

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار
مختار

Faculté : TECHNOLOGIE
Département : ELECTROTECHNIQUE
Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES
Filière : ELECTROTECHNIQUE
Spécialité : ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**Optimisation de la Gestion Energétique dans les Microgrids
à l'aide d'Algorithmes Métaheuristiques.**

Présenté par : *BELALA Nesrine*

BOUZID Abderrahmane

Encadrant : *SETTOUL Samir*

Badji Mokhtar-annaba

Jury de Soutenance :

KELAIAIA Mounia S	Pr	Badji Mokhtar-Annaba	Président
SETTOUL Samir	Dr	Badji Mokhtar-Annaba	Encadrant
MOHAMMEDI Moufid	Dr	Badji Mokhtar-Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2024/2025

Remerciements

“Avant tout, **AL-HAMDULILLAH** de m’avoir donné la force, le courage et de m'avoir gardé en vie et en bonne santé jusqu'à ce jour et de m'avoir permis de réussir cette thèse. “

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués au sein du département d'électrotechnique de l'Université de Badji Mokhtar-ANNABA.

Nous tenons tout d'abord à remercier notre directeur de mémoire Docteur **SETTOUL Samir**, pour ses conseils éclairés, sa disponibilité et sa patience tout au long de l'élaboration de ce travail. Son expertise a été un guide essentiel.

Nos remerciements s'adressent également aux membres du jury, madame la présidente de jury la Professeure **KELAIAIA Mounia.S**, du département d'électrotechnique à l'université de Badji Mokhtar-ANNABA, et monsieur l'examineur Docteur **MOHAMMEDI Moufid**, du département d'électrotechnique à l'université de Badji Mokhtar-ANNABA, pour l'honneur qu'ils me font d'évaluer ce travail.

Ainsi, nous remercions **nos parents, nos familles et nos proches** pour le soutien inconditionnel et les encouragements et leur compréhension durant cette période intense.

Finalement, merci également à ceux que j'ai pu oublier. Nous tenons à exprimer nos remerciements à tous nos collègues et amis pour leur appui tout au long de la démarche qui a mené à cette thèse. Vous êtes une partie importante de la famille en milieu de travail.

Ce projet a été une véritable aventure intellectuelle et humaine, et **nous sommes** reconnaissants d'avoir eu l'opportunité de la vivre.

Dédicace

À Ma Très Chère Mère

Affable, honorable, aimable, tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement.

Qui que je fasse ou je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes coté a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

À Mon Très Cher Père

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eus pour toi. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien-être. Ce travail est le fruit des sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.

Mes Très Chers Frères

*A mon bras droit, ma force, mon héro **ANIS** mon grand frère et à mon petit prince **TAKI** merci d'être toujours à mes côtés, merci d'être dans ma vie. Je vous aime.*

Ma Très Chère Famille

Je dédie cette réussite à chaque membre de ma famille, vous êtes la source de la joie dans ma vie.

GUYSAIII

NOUNOUSH , LAMIS, RAHMA, AYA votre amour, votre amitiés, votre soutiens, peu importe combien je parle, je ne décrirai jamais à quel point mes sentiments envers vous sont beaux. Vous êtes des amours.

Je dédie ce mémoire avant tout à mes parents, Salim et Aïcha, qui m'ont toujours entouré d'un amour inconditionnel, d'une patience exemplaire et d'une confiance sans faille. Leur soutien discret mais constant a été la clé de ma persévérance. Merci pour vos sacrifices silencieux, vos prières, vos encouragements dans les moments de doute, et cette force que vous m'avez transmise sans jamais faillir. Je vous dois tout.

À mon frère Zied, à ma sœur Djihane et à mon petit Nizar, qui ont été ma source de motivation, de réconfort et de rires dans les moments où j'en avais le plus besoin. Votre présence m'a donné l'énergie d'avancer, même dans les périodes les plus éprouvantes.

À mes amis les plus proches — Abdou bdl, Abdou bats Nasro, Rostom, imed Midou, Wassim, Borhen et Fadi — merci pour votre écoute, vos conseils sincères, vos moments de partage et votre soutien sans condition. Vous avez su rendre ce parcours plus léger, plus humain. Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à mon encadrant, M. Settoul, pour son accompagnement bienveillant, sa disponibilité, et la qualité de ses conseils tout au long de ce travail.

Enfin, à toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont cru en moi, m'ont encouragé, inspiré ou tendu la main à un moment ou à un autre : ce mémoire est aussi le vôtre.

Table Des Matières

Remerciements.....	II
Dédicace.....	III
Table Des Matières.....	V
Table Des Figures	VII
Table Des Tableaux	VIII
Introduction générale.....	1
Chapitre 1: Généralités et État de l'Art des Microgrids.....	4
1.1 Introduction :.....	4
1.2 Les microgrids : concept et enjeux	4
1.2.1 Définition et caractéristiques des microgrids.....	4
1.2.1.1 Définition des microgrids.....	4
1.2.1.2 Caractéristiques, avantages et fonctionnalités des microgrids	6
1.3 Composants clés d'un microgrid.....	8
1.3.1 Systèmes de production d'énergie renouvelable	8
1.3.2 Dispositifs de stockage d'énergie	8
1.3.3 Systèmes de gestion et de contrôle intelligents.....	8
1.3.4 Infrastructure de distribution électrique locale	9
1.4 Les différentes types et architectures des MGs	9
1.4.1 Par mode de fonctionnement.....	9
1.4.1.1 Micro-réseau îloté	9
1.4.1.2 Micro-réseau connecté.....	10
1.4.2 Par type de courant CA, CC ou CA/CC.....	10
1.4.2.1 Microgrid CA	10
1.4.2.2 Microgrid CC	11
1.4.2.3 Micro-réseau hybride (CA/CC)	12
1.5 Conclusion	12
Chapitre 2: Formulation de problème d'optimisation.....	15
2.1 Introduction.....	15
2.2 System de Gestion d'énergie (SGE)	15
2.3 Définition de l'optimisation	16
2.3.1 Problème d'optimisation mono-objectif	17
2.3.2 Problème d'optimisation multi-objectifs.....	17
2.3.2.1 Optimum de Pareto	17
2.4 Formulation du problème	17
2.4.1 Fonction objectif.....	17

2.4.2 Variables de décision	18
2.5 Contraintes	18
2.5.1 Équilibre entre la demande et la consommation	18
2.5.2 Limites de Puissance.....	18
2.6 Algorithme d'optimisation	19
2.6.1 Principe d'optimisation par algorithme de baleines (WOA).....	19
2.7 Conclusion	22
<i>Chapitre 3: Résultats et discussions</i>	<i>24</i>
3.1 Introduction.....	24
3.2 Résultats d'optimisation	24
3.2.1 Paramètres de Micro-réseau	24
3.2.2 Scénarios étudiés.....	25
3.2.3 Scénario 1 (Cas 1) :	26
3.2.4 Scénario 2 (Cas 2)	33
3.3 Conclusion	38
<i>Conclusion générale et perspectives</i>	<i>41</i>
<i>Références bibliographiques.....</i>	<i>43</i>
<i>Résumé</i>	<i>45</i>
<i>Abstract</i>	<i>46</i>
<i>ملخص.....</i>	<i>47</i>

Table Des Figures

FIGURE 1.1 : REPRÉSENTATION DU MG	5
FIGURE 1.2 : MICRO-RESEAU CA.	11
FIGURE 1.3 : MICRO-RESEAU CC.	12
FIGURE 2.1 : SYSTEM DE GESTION D'ENERGIE D'UN MICROGRID	16
FIGURE 2.2 : MECANISME DE RECHERCHE PAR FILET A BULLES IMPLEMENTE DANS WOA.	20
FIGURE 3.1 : SCHEMA DE SYSTEME DE PUISSANCE AVEC 5 GED ET IEEE-37 NŒUD SECONDAIRE.	25
FIGURE 3.2 : DISPONIBILITE HORAIRE DE PUISSANCE DES GED.	26
FIGURE 3.3 : PLANIFICATION OPTIMALE DE LA MISE EN SERVICE DES GED POUR LE CAS 1 A L'AIDE D'ALGORITHMES TESTES.....	29
FIGURE 3.4 : COUT TOTAL PAR HEURE OBTENU PAR LE SYSTEME DE GESTION DE L'ENERGIE POUR LE CAS 1.....	32
FIGURE 3.5 : PLANIFICATION OPTIMALE DE LA MISE EN SERVICE DES GED POUR LE CAS 2 A L'AIDE D'ALGORITHMES TESTES.....	35
FIGURE 3.6 : COUT TOTAL PAR HEURE OBTENU PAR LE SGE POUR LE CAS 2.	38

Table Des Tableaux

TABLEAU 3.1 : DEMANDE DE CHARGE ET PRIX D'ELECTRICITE PAR HEURE.	27
TABLEAU 3.2 : COEFFICIENTS DE COUT DE GED.	27
TABLEAU 3.3 : GESTION OPTIMALE DE L'ENERGIE (PUISSANCES ET COUTS) OBTENUE PAR LE SYSTEME SGE UTILISANT WOA.	30
TABLEAU 3.4: COUT TOTAL (\$) PAR HEURE OBTENU PAR LE SGE EN UTILISANT LES ALGORITHMES TESTES.	31
TABLEAU 3.5: COUT TOTAL EN (\$) DANS 24 HEURES UTILISANT LES ALGORITHMES TESTES.	32
TABLEAU 3.6 : DEMANDE DE CHARGE APRES L'AUGMENTATION PAR 20%	33
TABLEAU 3.7 : GESTION OPTIMALE DE L'ENERGIE (PUISSANCES ET COUTS) PAR LE SGE UTILISANT WOA POUR CAS 2	36
TABLEAU 3.8: COUT TOTAL (\$) PAR HEURE OBTENU PAR LE SGE POUR LE CAS 2.....	37
TABLEAU 3.9 : COUT TOTAL EN (\$) DANS 24 HEURES POUR LE CAS 2	38

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'électricité occupe aujourd'hui une place centrale dans nos vies, impactant non seulement notre quotidien mais aussi l'économie globale de chaque pays. En réalité, chaque panne d'électricité peut entraîner des répercussions économiques et sociales significatives, soulignant l'importance cruciale des réseaux électriques fiables et économiques.

Les micro-réseaux (MGs) utilisent des sources d'énergie renouvelable pour répondre à la demande croissante en énergie, en lien avec l'augmentation des besoins des consommateurs et l'évolution technologique. Ils fonctionnent de manière autonome comme des réseaux énergétiques à petite échelle en s'appuyant sur des ressources énergétiques distribuées. Cependant, la nature intermittente des sources d'énergie renouvelable et la faible qualité de l'énergie sont des problèmes opérationnels majeurs qu'il est nécessaire d'atténuer afin d'améliorer les performances des MGs [1].

L'utilisation des sources d'énergie renouvelable (RES) a suscité beaucoup d'attention et leur usage ne cesse de croître. Parmi les sources les plus importantes de production décentralisée, on peut citer les systèmes photovoltaïques et les éoliennes. Les micro-réseaux (MGs) sont généralement classés en trois catégories : les MGs en courant alternatif (AC), en courant continu (DC) et les MGs hybrides, et fonctionnent selon deux modes : en mode isolé (îloté) ou en mode connecté au réseau. [2].

Un système de gestion de l'énergie (SGE) est responsable du fonctionnement central d'un micro-réseau. Cela inclut l'établissement d'une communication continue et fiable entre toutes les unités de production décentralisée (GED) ainsi que la garantie d'une coordination efficace de leurs activités.

Dans ce contexte, cette thèse est organisée comme suit :

Le chapitre 1 introduit le concept des microgrids, des réseaux électriques locaux capables de fonctionner de manière autonome ou connectée au réseau principal. Il présente leurs caractéristiques clés, notamment l'autonomie énergétique, l'intégration des énergies renouvelables, et la résilience face aux pannes. Les différents types de microgrids (CA, CC, hybrides) et leurs architectures sont expliqués, ainsi que leurs composants essentiels : production d'énergie renouvelable, stockage, systèmes de gestion intelligente, et infrastructure de distribution. Le chapitre souligne également les enjeux techniques, économiques et environnementaux liés à leur déploiement.

Le chapitre 2 aborde la gestion optimale des microgrids via un Système de Gestion de l'Énergie (SGE). Le problème est formulé comme une optimisation visant à minimiser les coûts tout en respectant les contraintes techniques (équilibre offre-demande, limites de puissance). L'optimisation par algorithme de baleines, inspiré du comportement des baleines à bosse, est détaillé pour sa capacité à résoudre ce problème complexe. Les étapes clés incluent l'encerclement de la proie, l'attaque en spirale, et la recherche aléatoire.

Dans le chapitre 3 une comparaison des performances de quatre algorithmes (WOA, ABC, PSO, GA) dans deux scénarios : un cas de base et un cas avec charge augmentée de 20%. Les résultats montrent que WOA excelle en minimisant les coûts totaux grâce à une gestion efficiente des ressources renouvelables et une activation stratégique de la cogénération. Les visualisations des puissances et coûts horaires confirment sa robustesse, notamment lors des pics de demande. Les limitations des autres algorithmes sont également analysées, soulignant l'avantage de WOA pour les microgrids modernes.

CHAPITRE 01

Chapitre 1: Généralités et État de l'Art des Microgrids

1.1 Introduction :

L'accès à l'électricité demeure un défi majeur pour de nombreuses populations à travers le monde, mais les approches pour y remédier varient selon les régions. Dans les zones isolées non connectées aux réseaux électriques, les solutions d'électrification hors-réseau se développent, portées par les avancées technologiques en matière d'énergies renouvelables, notamment l'énergie solaire et les systèmes de stockage. Parmi ces solutions, les microgrids jouent un rôle croissant dans l'électrification des zones non desservies, constituant ainsi le sujet central de cette thèse.

Aujourd'hui, environ 17 % de la population mondiale vit sans accès à l'électricité. Les microgrids représentent une alternative viable pour alimenter en énergie les communautés rurales isolées ou les territoires insulaires, où l'extension des réseaux électriques traditionnels est souvent trop coûteuse et peu rentable. Toutefois, leur champ d'application ne se limite pas à ces contextes : ils émergent également comme une réponse aux limites des réseaux centralisés classiques, de plus en plus contestés pour leur rigidité et leur vulnérabilité. En favorisant la production et la consommation d'énergies renouvelables à l'échelle locale, les microgrids participent activement à la transition énergétique et à la décentralisation des systèmes électriques.

1.2 Les microgrids : concept et enjeux

1.2.1 Définition et caractéristiques des microgrids

Les microgrids constituent une solution énergétique novatrice. Ces réseaux électriques décentralisés peuvent fonctionner de manière autonome ou en complément du réseau principal. Cet article explore leur mode de fonctionnement, leurs avantages et leur contribution à la préservation de l'environnement. Plongez au cœur des énergies renouvelables et des avancées technologiques qui façonnent l'avenir de l'électricité.

1.2.1.1 Définition des microgrids

Les microgrid sont défini comme un groupe de sources de production d'énergie et de charges fonctionnant dans un réseau séparé, où il peut être utilisé en mode îloté ou en intégration au réseau électrique principal. La connexion et la déconnexion du réseau sont effectuées en fonction des exigences économiques et techniques [3] .

Les microgrids constituent une avancée majeure dans le domaine des réseaux électriques. En tant que systèmes décentralisés, ils offrent une approche innovante pour une production d'énergie plus efficiente et autonome. En intégrant des sources d'énergie renouvelables, ils minimisent les pertes et optimisent la gestion de la consommation. Imaginez un réseau où les communautés peuvent gérer leur propre électricité, renforçant ainsi leur sécurité énergétique.

Au-delà de leur contribution à la durabilité, les microgrids favorisent également l'autonomie face aux variations du marché. Grâce aux technologies avancées, ils garantissent une meilleure résilience aux pannes. Leur développement ouvre la voie à un avenir énergétique plus durable et respectueux de l'environnement [3], [4].

Un microgrid est un réseau électrique local qui peut fonctionner indépendamment ou en connexion avec le réseau principal. Il se compose de sources d'énergie renouvelable, de stockage d'énergie et de systèmes de gestion. Ce fonctionnement décentralisé permet d'optimiser la production et la consommation d'électricité, tout en renforçant la résilience du système électrique [3].

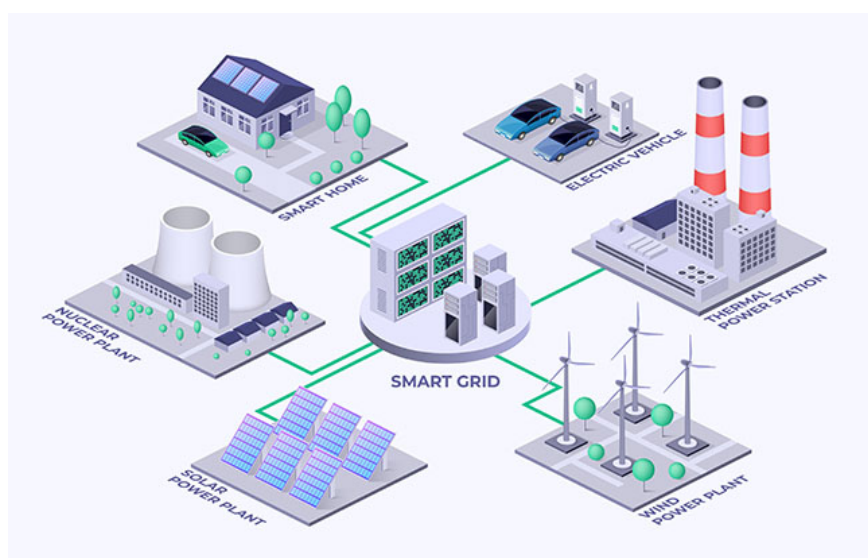


Figure 1.1 : Représentation du MG

1.2.1.2 Caractéristiques, avantages et fonctionnalités des microgrids

A. Caractéristiques et avantages des microgrids

Les microgrids constituent une solution énergétique innovante qui répond aux défis actuels liés à la production, à la distribution et à la gestion de l'électricité. Leur conception repose sur des caractéristiques spécifiques qui leur confèrent une grande flexibilité et une meilleure intégration des énergies renouvelables. En parallèle, ils offrent de nombreux avantages qui renforcent leur pertinence dans le contexte de la transition énergétique. Ces caractéristiques et avantages sont largement étudiés et documentés dans la littérature [1]:

a) Autonomie énergétique

Les microgrids permettent une autonomie énergétique significative. En produisant de l'énergie localement, les communautés peuvent réduire leur dépendance au réseau électrique central. Cela peut aller de pair avec une réduction des coûts énergétiques et une plus grande sécurité d'approvisionnement.

b) Intégration des énergies renouvelables

Ces systèmes favorisent l'utilisation des énergies renouvelables. Cela contribue à la transition énergétique et à la lutte contre le changement climatique. En exploitant des sources d'énergie durables, les microgrids diminuent les émissions de gaz à effet de serre.

c) Résilience et fiabilité

La résilience des microgrids est un atout essentiel. En cas de crises, comme des tempêtes ou des pannes massives, ces réseaux peuvent rester opérationnels. La gestion autonome d'énergie se traduit par une fiabilité accrue et une continuité de service pour les utilisateurs.

d) Développement des communautés

Les microgrids peuvent également dynamiser le développement des communautés. Par leur installation, ils créent des emplois locaux, encouragent l'innovation et favorisent les initiatives durables. Les habitants jouent un rôle actif dans la gestion de leur énergie, ce qui renforce la cohésion sociale.

e) Réduction des pertes énergétiques

Un réseau décentralisé permet de diminuer les pertes énergétiques associées au transport de l'électricité sur de longues distances. En produisant l'énergie près de son lieu de consommation, l'efficacité énergétique s'améliore considérablement.

Les microgrids émergent comme une solution prometteuse pour un avenir énergétique durable. Leur capacité à s'adapter, à innover et à se développer en fonction des besoins locaux en fait une option à considérer sérieusement. L'intégration des énergies renouvelables et leur impact positif sur les communautés renforcent leur pertinence dans un monde en quête de durabilité et d'indépendance énergétique.

f) Optimisation de la consommation locale

Les microgrids permettent une gestion fine et optimisée de la consommation énergétique locale. Grâce à des systèmes de contrôle avancés, ils peuvent ajuster en temps réel la production et la consommation d'électricité, maximisant ainsi l'utilisation des ressources énergétiques disponibles. Cette optimisation se traduit par :

- Une réduction des pertes liées au transport de l'électricité sur de longues distances
- Une meilleure adéquation entre la production locale et les besoins réels des consommateurs
- La possibilité de mettre en place des stratégies de *demande réponse* pour lisser les pics de consommation
- Une sensibilisation accrue des utilisateurs à leur consommation énergétique

B. Fonctionnalités des microgrids**a) Techniquement :**

Les microgrids (MGs) offrent une gestion optimisée de la production d'énergie renouvelable à l'échelle locale. Ils peuvent fournir un service auxiliaire au réseau public de distribution, contribuant au maintien de la stabilité de la tension et assurant un allègement en cas d'incident ou de coupure de distribution.

b) Economiquement :

Les microgrids (MGs) génèrent également des opportunités d'investissement dans les réseaux locaux, la proximité entre la production et la consommation d'électricité permettant d'optimiser l'acheminement et la transmission de l'énergie. Cette configuration contribue ainsi à la réduction du volume des pertes techniques.

c) Socialement :

Un microgrid (MG) répond aux besoins énergétiques fondamentaux d'un territoire en évolution. Il offre notamment un réseau plus sûr et plus fiable en cas d'incident. Sa nature de projet local favorise la création d'initiatives et de nouveaux partenariats entre les acteurs locaux.

d) Environnement :

Les microgrids (MGs) facilitent l'intégration des énergies renouvelables au sein des réseaux et permettent ainsi d'éviter l'implantation de centrales thermiques dans les zones résidentielles.

1.3 Composants clés d'un microgrid

Un microgrid performant dépend de la coordination optimale de plusieurs éléments clés. Chacun de ces composants contribue de manière essentielle à la capacité du système à délivrer une énergie fiable, durable et adaptée aux exigences locales. Analysons en détail ces éléments qui constituent la base des microgrids modernes.

1.3.1 Systèmes de production d'énergie renouvelable

Au cœur des microgrids, les systèmes de production d'énergie renouvelable jouent un rôle central dans l'atteinte de l'autonomie énergétique. Parmi les technologies prédominantes figurent les panneaux photovoltaïques, qui transforment l'énergie solaire en électricité par conversion directe, ainsi que les éoliennes, exploitant l'énergie cinétique du vent. Les installations biomasse produisent quant à elles de l'électricité à partir de la valorisation énergétique de matières organiques, tandis que les microcentrales hydrauliques tirent parti des flux hydriques disponibles localement. L'intégration synergique de ces différentes sources permet une diversification du mix énergétique, réduisant ainsi la dépendance à une technologie unique. Cette approche plurielle améliore la résilience du microgrid en atténuant les aléas climatiques et les fluctuations saisonnières.[5]

1.3.2 Dispositifs de stockage d'énergie

Les systèmes de stockage d'énergie (SSE) constituent un élément fondamental pour l'opération efficace des microgrids, palliant l'intermittence inhérente aux sources d'énergie renouvelable. Ils permettent l'accumulation de l'énergie excédentaire produite lors des périodes de forte production, afin de la réinjecter dans le réseau lors des pics de demande ou des périodes de faible production. Il existe plusieurs catégories de SSE parmi les technologies de SSE les plus prometteuses, les batteries se distinguent par leur polyvalence et leur maturité technologique.[6]

Une batterie est un système électrochimique complexe, capable de stocker de l'énergie électrique sous forme chimique puis de la restituer sous forme électrique, son fonctionnement et sa durée de vie peuvent être caractérisée par un ensemble de grandeurs dépendantes du temps (usages, température, constantes chimiques et physiques. Son fonctionnement et sa durée de vie peuvent être caractérisés par un ensemble de grandeurs dépendantes du temps (usages, température, constantes chimiques et physiques.[6]

1.3.3 Systèmes de gestion et de contrôle intelligents

Le cerveau opérationnel d'un microgrid repose sur ses systèmes de gestion et de contrôle intelligents, désigné sous l'acronyme SGE (Energy Management System), qui assure l'orchestration intégrale des flux énergétiques au sein du réseau local. Jouant un rôle pivot dans l'optimisation des performances. Leurs fonctions clés incluent :

- La prévision fine de la production d'énergies renouvelables et de la demande énergétique
- L'optimisation dynamique de la distribution de l'énergie en temps réel
- La gestion efficiente des capacités de stockage pour en maximiser le rendement

- Le pilotage intelligent des charges flexibles afin d'équilibrer consommation et production
- L'assurance d'une synchronisation parfaite avec le réseau principal en mode interconnecté

Intégrant des algorithmes sophistiqués d'intelligence artificielle et de machine learning, ces systèmes traitent des volumes conséquents de données, identifient des anomalies, anticipent les fluctuations de production et de demande, et adaptent en continu leurs stratégies de contrôle. Cette automatisation avancée renforce la résilience du microgrid, optimise les coûts énergétiques et facilite l'intégration harmonieuse des sources renouvelables, tout en garantissant une stabilité opérationnelle élevée.

1.3.4 Infrastructure de distribution électrique locale

L'infrastructure de distribution électrique d'un microgrid constitue l'ossature technique permettant le transfert sécurisé et efficient de l'énergie depuis les sources de production jusqu'aux utilisateurs finaux. Elle se compose des éléments suivants :

- **Transformateurs** : ajustant les niveaux de tension pour répondre aux exigences du réseau.
- **Réseaux de distribution** : comprenant des lignes aériennes ou souterraines pour le transport de l'électricité.
- **Dispositifs de protection** : tels que disjoncteurs et relais, assurant la détection et l'isolation des défauts (surintensités, courts-circuits) afin de préserver l'intégrité du système.
- **Compteurs intelligents (smart meters)** : fournissant une métrologie précise des flux énergétiques et permettant une supervision dynamique de la consommation et de la génération.

L'intégration de systèmes de surveillance avancés et de solutions d'automatisation renforce la robustesse opérationnelle du microgrid, optimise son efficacité énergétique et améliore sa capacité d'adaptation face aux variations de charge et à l'intermittence des énergies renouvelables.

1.4 Les différents types et architectures des MGs

1.4.1 Par mode de fonctionnement

Les micro-réseaux peuvent fonctionner selon deux modes distincts, chacun répondant à des exigences spécifiques : le mode connecté au réseau principal et le mode de fonctionnement en îlotage.

1.4.1.1 Micro-réseau îloté

Un microgrid îloté, ou autonome, fonctionne indépendamment du réseau électrique principal. Ce mode d'opération est crucial lors de situations spécifiques telles que la maintenance ou les pannes du réseau principal, où le microgrid se déconnecte et assure la continuité de l'alimentation électrique. En mode îloté, la gestion du microgrid se complexifie, car il doit garantir la fiabilité de l'approvisionnement, se comporter comme une source de tension et

maintenir une fréquence stable. Pour ce faire, il doit intégrer au moins une source de type "grid forming" qui génère l'onde de tension, en utilisant diverses stratégies comme le principe maître/esclave. La recherche s'active pour optimiser le fonctionnement des microgrids en mode îloté. Des travaux explorent l'application d'algorithmes génétiques pour l'utilisation optimale de condensateurs shunt et proposent des méthodes stochastiques visant à minimiser les coûts d'opération, en considérant l'exploitation de microturbines, d'éoliennes et de batteries lors de périodes d'îlotage imprévues.[7], [8]

1.4.1.2 Micro-réseau connecté

En mode connecté au réseau principal, le microgrid est relié à ce dernier via le Point de Connexion Commun (PCC), qui sert d'interface entre les deux réseaux. Dans cette configuration, la tension et la fréquence du microgrid sont régulées par le réseau principal. Le microgrid se comporte alors comme une source de courant, synchronisant sa tension avec celle du réseau principal. Ce mode de fonctionnement offre une fiabilité accrue, car le microgrid a la possibilité d'importer ou d'exporter de l'électricité pour maintenir son propre équilibre énergétique. Dans ce mode, le micro-réseau peut fonctionner de plusieurs façons :[7], [8]

- Autoconsommation partielle
- Autoconsommation totale
- Un support dit (Grid-feeding)
- Un support dit (Grid-supporting)

1.4.2 Par type de courant CA, CC ou CA/CC

On distingue différentes catégories de microgrids en fonction de la nature du courant électrique utilisé : les microgrids en courant alternatif (CA), les microgrids en courant continu (CC), et les microgrids hybrides combinant courant alternatif et continu (CA/CC). Traditionnellement, le courant alternatif a été privilégié pour le transport et la distribution d'énergie en raison de la simplicité et de l'efficacité des transformateurs. Cependant, les avancées dans l'électronique de puissance facilitent désormais le transport et l'utilisation du courant continu[7], [8]

1.4.2.1 Microgrid CA

Dans un microgrid à courant alternatif (CA), l'ensemble des systèmes est synchronisé à une tension et une fréquence spécifique et connectée à un nœud CA commun. Cette architecture requiert l'utilisation de convertisseurs DC-AC pour transformer le courant continu produit par certaines sources, telles que le photovoltaïque, en courant alternatif. Inversement, des redresseurs AC-DC sont nécessaires pour alimenter les charges en courant continu à partir du nœud CA. Les charges CA sont directement alimentées par ce bus. Forts d'une expérience significative et de la simplicité relative des équipements, les microgrids CA représentent une technologie mature en matière de protection, de contrôle et de stabilisation. À titre d'exemple, le coût des disjoncteurs CA simples est généralement inférieur à celui des disjoncteurs CC, qui impliquent des circuits

additionnels complexes pour l'interruption du courant continu. Un avantage majeur des microgrids CA réside dans leur compatibilité avec l'infrastructure du réseau électrique existant. Néanmoins, ils nécessitent un nombre significatif d'interfaces d'électronique de puissance (onduleurs et convertisseurs) pour assurer la synchronisation des sources d'énergies renouvelables avec le réseau CA. [6][7]

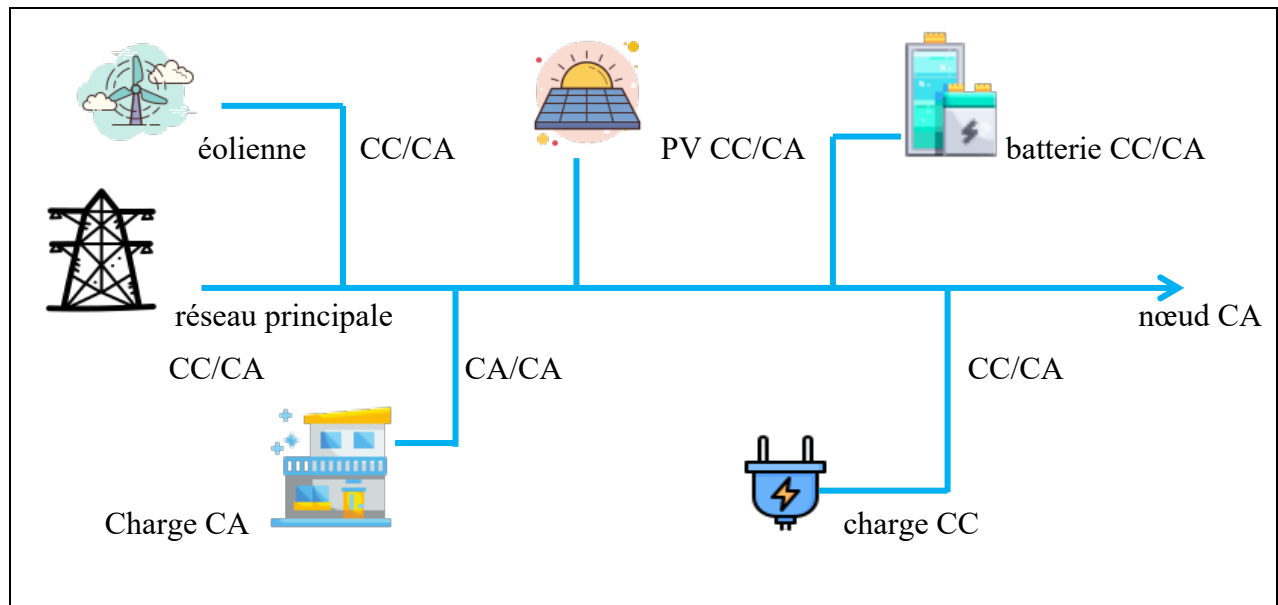


Figure 1.2 : Micro-réseau CA.

1.4.2.2 Microgrid CC

Dans un microgrid à courant continu (CC), le convertisseur de puissance principal est de type DC/AC. Ce convertisseur, qui assure la liaison avec le réseau CA, est bidirectionnel afin de permettre les échanges de puissance dans les deux sens. Étant donné que de nombreuses sources d'énergies renouvelables (EnR) produisent du courant continu et que les charges CC se développent, l'utilisation de microgrids CC présente des avantages significatifs. Des études indiquent qu'une part importante de la puissance alternative produite transite par une conversion électronique, entraînant des pertes énergétiques substantielles (10 à 25% de l'énergie convertie). Ainsi, l'adoption de microgrids CC via des convertisseurs offre :

- Une efficacité accrue grâce à la réduction des étapes de conversion.
- Une qualité d'électricité indépendante du réseau de distribution.

Comparativement aux microgrids CA, les microgrids CC se caractérisent par une structure simplifiée, des coûts de système inférieurs et une efficacité globale améliorée. Néanmoins, ils présentent des inconvénients notables. Leur connexion directe au réseau électrique actuel est impossible. De plus, la protection des systèmes CC soulève des défis liés au manque de normes établies et à une expérience pratique limitée. Un autre désavantage est l'incompatibilité directe

avec les charges CA, nécessitant l'ajout de convertisseurs. Face à ces limitations, le développement de microgrids hybrides CA/CC est envisagé par certains chercheurs comme une solution alternative pour une meilleure intégration de tous les éléments au réseau principal.[6][7]

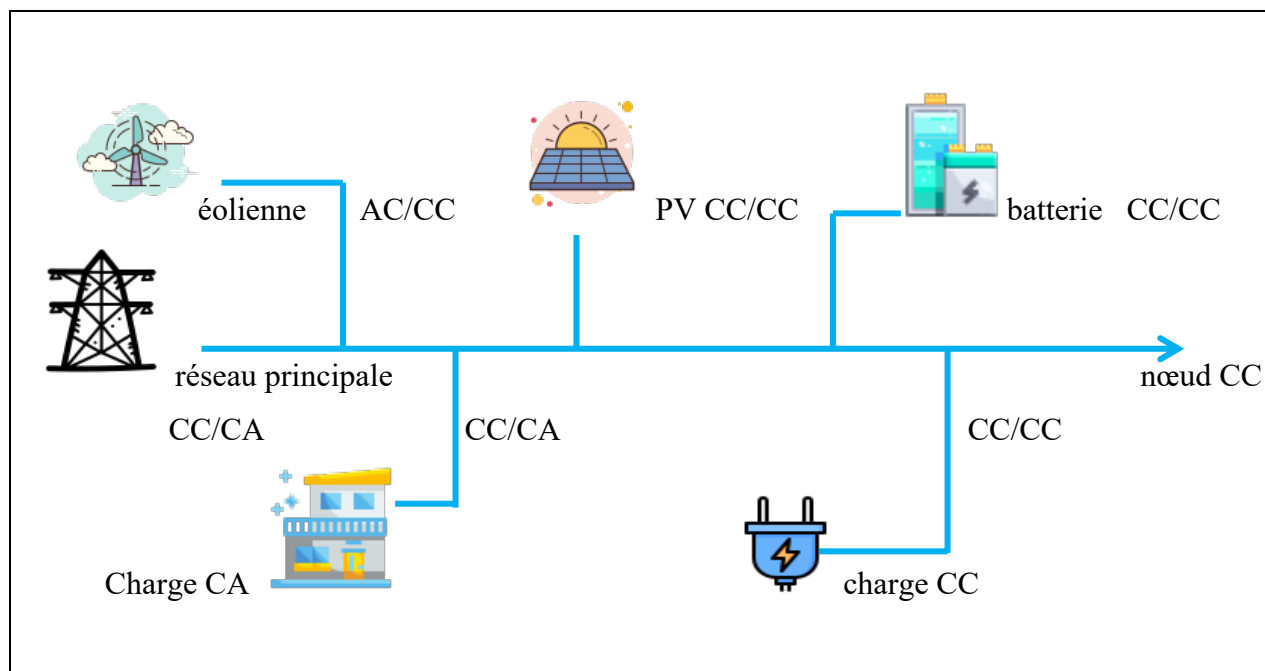


Figure 1.3 : Micro-réseau CC.

1.4.2.3 Micro-réseau hybride (CA/CC)

Les microgrids hybrides CA/CC combinent les atouts des architectures CA et CC, suscitant un intérêt croissant en raison de l'intégration de ces deux types de réseaux, chacun avec ses avantages et inconvénients en termes de transmission, de contrôle et de protection. Typiquement, un microgrid hybride comprend des réseaux CA et CC interconnectés par un convertisseur bidirectionnel AC/DC. Les charges alternatives sont connectées au nœud CA, tandis que les charges continues sont raccordées au nœud CC, avec l'utilisation éventuelle de convertisseurs de puissance pour ajuster les niveaux de tension. Les unités de production et de stockage sont connectées soit au nœud CA, soit au nœud CC, dans un souci de minimiser les étapes de conversion. Le nœud CA permet l'utilisation d'équipements existants, tandis que le nœud CC favorise l'emploi d'un nombre réduit de convertisseurs plus simples.[6][7]

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons établis les fondements théoriques essentiels concernant les microgrid qui ont démontré que ces systèmes énergétiques décentralisés représentent une solution prometteuse face aux défis actuels des réseaux électriques traditionnels. L'analyse

approfondie de leurs caractéristiques techniques, autonomie énergétique, intégration des énergies renouvelables et résilience opérationnelle.

Nous avons étudié des différentes architectures des microgrid (CA, CC et hybrides) a révélé que chaque configuration présente des avantages spécifiques en fonction du contexte d'application. Les microgrids hybrides émergent particulièrement comme une solution optimale, combinant les atouts des deux technologies tout en minimisant leurs limitations respectives.

Nous avons identifié les systèmes de production renouvelable, les dispositifs de stockage, les infrastructures intelligentes, et ainsi forment un écosystème technologique complexe dont la synergie détermine l'efficacité globale. Cette analyse a également souligné l'importance cruciale des systèmes de gestion intelligente pour la gestion de ces différents éléments.

Ces éléments théoriques établissent le cadre nécessaire pour aborder dans les chapitres suivants les problématiques d'optimisation de la gestion énergétique, qui constituent le cœur de cette recherche. Les enjeux identifiés dans ce chapitre guideront particulièrement notre approche méthodologique et nos choix techniques dans la conception des solutions d'optimisation.

CHAPITRE 02

Chapitre 2: Formulation de problème d'optimisation

2.1 Introduction

L'évolution rapide des réseaux électriques vers des systèmes intelligents, appelés smart grids (SG), a profondément transformé la manière dont l'énergie est produite, distribuée et consommée. Dans ce contexte, les microgrids, intégrant des sources d'énergie renouvelable, des systèmes de stockage et des charges variables, jouent un rôle crucial dans la transition énergétique. Toutefois, la gestion optimale de ces systèmes complexes nécessite l'utilisation de techniques avancées d'optimisation énergétique.

Ce chapitre aborde la formulation du problème d'optimisation énergétique dans les microgrids, en mettant l'accent sur le rôle central du système de gestion de l'énergie (SGE). Le SGE vise à coordonner les différentes sources d'énergie distribuées (RED) pour répondre à la demande en minimisant les coûts d'exploitation, tout en respectant un ensemble de contraintes techniques et économiques.

Nous présenterons d'abord les fondements théoriques de l'optimisation mono-objective et multi-objective, puis nous détaillerons les composantes du problème étudié : fonction objectif, variables de décision et contraintes. Enfin, une attention particulière sera portée à l'algorithme d'optimisation par les baleines (WOA), une méthode méta-heuristique inspirée du comportement naturel des baleines à bosse, utilisée ici pour résoudre efficacement le problème d'optimisation posé.

2.2 System de Gestion d'énergie (SGE)

Le système de management de l'énergie (SGE) (ou Energy Management System) est un logiciel qui permet de suivre et d'améliorer la performance énergétique d'un microgrid. Ce logiciel centralise l'ensemble des données énergétiques d'un microgrid, un bâtiment ou d'un parc immobilier [9].

Pour être pleinement efficient, il implique d'être utilisé en combinaison avec d'autres pratiques, processus et outils permettant à une entité de surveiller, contrôler et optimiser sa consommation d'énergie. En intégrant un energy management system, les gestionnaires peuvent adopter une approche proactive pour réduire leurs consommations énergétiques. En effet, management de l'énergie s'inscrit dans une stratégie énergétique globale, cherchant à allier efficacité, économie et responsabilité environnementale[10].

Différentes stratégies de gestion sont possibles : centralisées, décentralisées ou hiérarchiques. Les systèmes centralisés assurent une optimisation globale mais présentent des risques liés à un point de défaillance unique. En revanche, les approches décentralisées offrent plus de résilience et de flexibilité, mais requièrent des mécanismes de coordination plus complexes [9]. En outre, les contraintes réelles telles que la variabilité de la demande, l'intermittence des énergies renouvelables, ou encore les limites des systèmes de stockage imposent des défis supplémentaires que le SGE doit surmonter [11].

Les SGE doivent adopter des stratégies avancées pour maintenir la stabilité et l'efficacité du réseau. Les approches modernes incluent des méthodes d'optimisation classiques, des techniques méta-heuristiques comme l'optimisation par essaim de particules (PSO) et les algorithmes génétiques, ainsi que des méthodes basées sur l'intelligence artificielle, telles que les réseaux de neurones et la logique floue. De plus, les systèmes multi-agents et les contrôles prédictifs basés sur des modèles sont explorés pour améliorer la flexibilité et la résilience des microgrids face aux incertitudes de la demande et de la production. Ces avancées permettent aux SGE de s'adapter dynamiquement aux conditions changeantes, optimisant ainsi les performances économiques et environnementales des microgrids [10].

Le system de gestion d'énergie d'un microgrid est representé sur la Figure 2.1

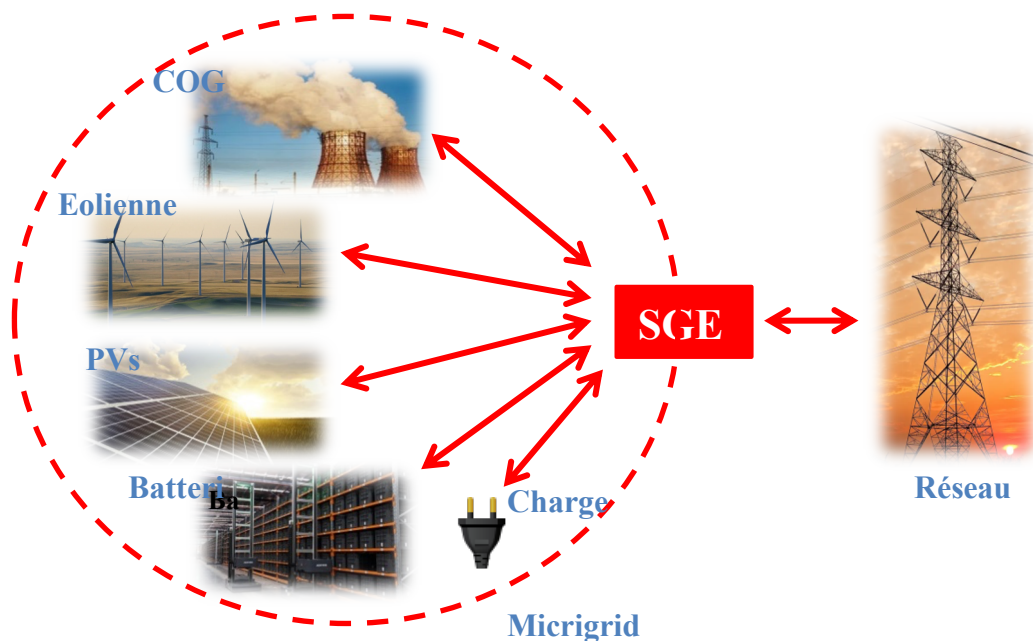


Figure 2.1 : System de gestion d'énergie d'un microgrid

2.3 Définition de l'optimisation

L'optimisation peut être définie comme le processus de conception, d'implémentation et de test d'algorithmes permettant de résoudre un grand nombre de problèmes numériques. En d'autres termes, il peut être aussi, définie comme le processus de recherche des conditions donnant la valeur maximale ou minimale d'une fonction objectif, tout en satisfaisant un certain nombre de contraintes d'égalité et d'inégalité sur ses variables de décision. La plupart des méthodes d'optimisation se sont concentrées sur la résolution de problèmes mono-objectif. Néanmoins, il existe un grand nombre d'applications qui nécessitent l'optimisation simultanée de plusieurs objectifs souvent en conflit, c'est pourquoi certains auteurs ont proposé des algorithmes multi-objectifs [12].

2.3.1 Problème d'optimisation mono-objectif

Ce type d'optimisation consiste à optimiser une seule fonction objectif, dont la forme générale peut être définie par la relation :

$$\begin{cases} \min f(x) \\ g(x) = 0 \\ h(x) \leq 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

Où $f(x)$ est la fonction objectif, $f(x)$ et $h(x)$ sont respectivement les contraintes d'égalité et d'inégalité.

2.3.2 Problème d'optimisation multi-objectifs

L'optimisation multi-objectifs est souvent divisée en deux catégories principales : les méthodes d'optimisation basées sur Pareto et les méthodes basées sur la somme pondérée.

2.3.2.1 Optimum de Pareto

La dominance au sens de Pareto pour résoudre les problèmes d'optimisation multi-objectifs, a été proposée par le mathématicien Italien Vilfredo Pareto. Plusieurs méthodes ont été développées pour résoudre un problème d'optimisation multi-objectifs. La plupart de ces méthodes génèrent essentiellement un ensemble de solutions optimales de Pareto et utilisent un critère ou une règle supplémentaire pour sélectionner une solution optimale de Pareto particulière comme solution du problème d'optimisation multi-objectifs. La forme mathématique est donnée par l'équation [12]:

$$\begin{cases} \min F(x) = [f_1(x), f_2(x) \dots f_n(x)] \\ g(x) = 0 \\ h(x) \leq 0 \end{cases} \quad (2.2)$$

2.4 Formulation du problème

Le rôle du SGE (système de gestion d'énergie) est de planifier de manière optimale les différentes sources du microgrid pour chaque heure, en fonction du scénario sélectionné, afin de minimiser les coûts d'exploitation du microgrid tout en respectant certaines contraintes. Ceci peut être formulé mathématiquement comme un problème d'optimisation, décrit dans les sous-sections suivantes [13].

2.4.1 Fonction objectif

La Fonction objectif du problème d'optimisation considéré peut être approximée par une fonction non linéaire quadratique de la manière suivante : [5], [13]

$$C_i(t) = \alpha_i \times P_i(t)^2 + \beta_i(t) \times P_i(t) + \gamma_i \quad (2.3)$$

C : Le coût

P : L'énergie générée en MW/h

α, β, γ : des coefficients.

2.4.2 Variables de décision

Pour ce problème d'optimisation, la puissance générée par chaque GED est considérée comme une variable de conception. Une solution initiale est proposée sous forme vectorielle, contenant toutes les variables de conception, et est soumise à l'optimiseur. Celui-ci a pour tâche d'optimiser la solution au cours des itérations suivantes et de déterminer un vecteur qui représente la distribution optimale de la puissance de sortie de chaque générateur. Un vecteur de solution 'x', pour 'n' éoliennes, 'm' centrales photovoltaïques et 'k' unités de cogénération (COGEN), est donné par l'expression suivante [13] :

$$x = [P_{EOL1}, P_{EOL2}, \dots, P_{WPN}, P_{PV1}, P_{PV2}, \dots, P_{PVM}, P_{COGEN1}, P_{COGEN2}, \dots, P_{COGENK}] \quad (2.2)$$

Eol : Energie éolienne

PV : Energie Photovoltaïque

COGEN : Cogénération (production combinée de chaleur et d'électricité – CCHP).

2.5 Contraintes

2.5.1 Équilibre entre la demande et la consommation

La puissance produite par le SGE doit être égale à la charge demandée à tout instant. Ceci peut être représenté par l'équation suivante :

$$\sum_{i=1}^{NDG} P_i(t) + P_{réseau}(t) = P_{totale}(t) \quad (2.3)$$

P_{totale} : La puissance totale requise par la charge à l'instant (t).

$P_{réseau}$: La puissance du à l'instant (t).

2.5.2 Limites de Puissance

Chaque source de GED est limitée par une valeur maximale et une valeur minimale, qui peuvent varier d'un instant à l'autre. Cette contrainte peut être exprimée de la manière suivante :

$$P_{i \min}(t) \leq P_i(t) \leq P_{i \max}(t) \quad (2.4)$$

P_i : puissance de GED

$P_{i \min}$: Valeur minimum de puissance en kW en (t).

$P_{1\max}$: Valeur maximale de puissance en kW en (t).

2.6 Algorithme d'optimisation

2.6.1 Principe d'optimisation par algorithme de baleines (WOA)

Mirjalili et Lewis ont développé l'algorithme WOA en 2016 [15] entant que nouvelle technique méta-heuristique inspirée de la nature pour résoudre les problèmes liés à l'ingénierie et différents problèmes d'optimisation mathématique. Les comportements communs des baleines à bosse sont à la base de la WOA. Cette technique d'optimisation est inspirée de l'approche de chasse au filet à bulles des baleines à bosse qui suivent un itinéraire de forme circulaire pour chasser les petits poissons près de la surface. Ce processus d'alimentation est un comportement distinctif des baleines à bosse, ce qui rend cette optimisation unique parmi d'autres méthodes d'optimisation inspirées de la nature. Pour concevoir le modèle mathématique du WOA, trois étapes sont impliquées dans le processus de chasse au filet à bulles. [14][15]

Encercler la proie

Les baleines à bosse peuvent reconnaître l'emplacement des proies et les encercler. Étant donné que la position de la conception optimale dans l'espace de recherche n'est pas connue a priori, l'algorithme WOA suppose que la meilleure solution candidate actuelle est la proie cible, ou proche de l'optimum. Une fois le meilleur agent de recherche défini, les autres agents de recherche essaieront donc de mettre à jour leurs positions vers ce meilleur agent de recherche. Ce comportement est représenté par les équations :

$$\vec{D} = \vec{C} \cdot \vec{X}^*(t) - \vec{X}(t) \quad (2.6)$$

$$X(t+1) = \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (2.7)$$

Où, D est la distance entre la $i^{\text{ème}}$ baleine et la proie, t indique l'itération actuelle, \vec{A} et \vec{C} sont les vecteurs de coefficient. \vec{X}^* Est le vecteur de position de la meilleure solution obtenue jusqu'à présent, \vec{X} est le vecteur de position. Il convient de mentionner ici que X^* doit être mise à jour à chaque itération s'il existe une meilleure solution. De plus, les vecteurs A et C sont calculés à partir des équations :

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r} - \vec{a} \quad (2.8)$$

$$C = 2 \cdot \vec{r} \quad (2.9)$$

Où, a est diminué linéairement de 2 à 0 au cours des itérations, (dans les phases d'exploration et d'exploitation) et r est un vecteur aléatoire de valeur comprise dans l'intervalle

[0,1]. L'équation 2.7 permet à tout agent de recherche de mettre à jour sa position dans le voisinage de la meilleure solution actuelle et simule l'encerclement de la proie.

Méthode d'attaque au filet à bulles (phase d'exploitation)

Afin de modéliser mathématiquement le comportement du filet à bulles des baleines à bosse, nous avons deux approches, la première consiste dans le mécanisme d'encerclement rétrécissant et la seconde est la mise à jour de la position en spirale.

1. Mécanisme d'encerclement rétrécissant

Ce comportement est obtenu en diminuant la valeur de \vec{a} dans l'équation 2.8. Noter que la plage de fluctuation de \vec{A} est également diminuée avec \vec{a} , En d'autres termes, \vec{A} est une valeur aléatoire dans l'intervalle $[-a, a]$ où a est diminué de 2 à 0 au cours des itérations, La Figure 2.2(a) montre les positions possibles de (X, Y) vers (X^*, Y^*) qui peuvent être atteintes par $0 \leq A \leq 1$ dans un espace 2D.

2. Mise à jour de la position en spirale

Comme on peut le voir sur la Figure 2.2 (b), cette approche calcule d'abord la distance entre la baleine située en (X, Y) et la proie située en (X^*, Y^*) . Une équation en spirale est ensuite créée entre la position de la baleine et de la proie pour imiter le mouvement en forme d'hélice des baleines à bosse exprimée par :

$$\vec{X}(t+1) = \vec{D}' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) \quad (2.10)$$

Où D' indique la distance de la $i^{\text{ème}}$ baleine à la proie (meilleure solution obtenue jusqu'à présent), b est une constante pour définir la forme de la spirale logarithmique, l est un nombre aléatoire dans $[-1, 1]$.

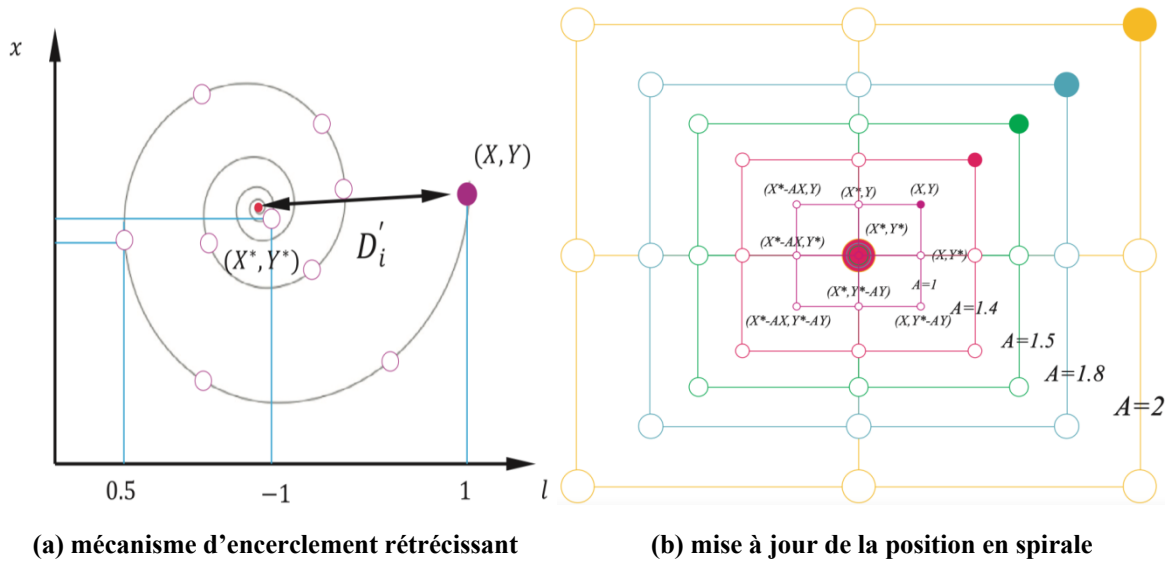


Figure 2.2 : Mécanisme de recherche par filet à bulles implémenté dans WOA.

Les baleines à bosse nagent autour de la proie dans un cercle rétréci et le long d'un chemin en forme de spirale simultanément. Pour modéliser ce comportement simultané, nous supposons qu'il y a une probabilité de 50 % de choisir entre le mécanisme d'encerclement rétrécissant ou le modèle en spirale pour mettre à jour la position des baleines lors de l'optimisation. Le modèle mathématique est formulé par :

$$(t + 1) = \begin{cases} \overrightarrow{X^*}(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} & ; \text{ Si: } p < 0.5 \\ \vec{D'} \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \overrightarrow{X^*}(t) & ; \text{ Si: } p \geq 0.5 \end{cases} \quad (2.11)$$

Où p est un nombre aléatoire dans [0,1].

3. Recherche de proies (phase d'exploration)

Une technique équivalente dépendante de la variation du vecteur A peut être utilisée lors de la recherche de la proie (exploration). Un relevé arbitraire des baleines à bosse montre qu'elles sont en vue les unes des autres et se distinguent. De la même manière, un agent de recherche en mouvement loin d'une baleine de référence devrait être qualifié dans le comportement, où $|A| > 1$. Le modèle mathématique peut être exprimé par :

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \overrightarrow{X_{rand}} - \vec{X}| \quad (2.12)$$

$$\vec{X}(t + 1) = \overrightarrow{X_{rand}} - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (2.13)$$

Où X_{rand} est un vecteur de position aléatoire (une baleine aléatoire) choisi dans la population actuelle.

Le pseudo-code de l'algorithme WOA est représenté si dessous :

Algorithme : Pseudo-code de l'algorithme WOA

```

1  début
2  Générer la population initiale  $X_i (i = 1, 2, \dots, n_p)$ 
3  Évaluer la valeur de la fonction objectif pour chaque solution dans  $X_i$ 
4   $X^*$  est la meilleure solution
5  tant que  $t < \text{nombre maximal d'itérations}$  faire
6      pour  $i=1$  à  $n_p$  faire
7          Mettre à jour  $a, A, C, l$  et  $p$ 
8          si  $p < 0.5$  alors
9              si  $|A| < 1$  alors
10                 Mettre à jour la position de chaque baleine selon l'équation 1.7
11             sinon si  $|A| \geq 1$  alors
12                 Sélectionnez une baleine aléatoire ( $X_{rand}$ )
13                 Mettre à jour la position de chaque baleine selon l'équation 1.13
14             fin
15         sinon si  $p \geq 0.5$  alors
16             Mettre à jour la position de chaque baleine selon l'équation 1.10
17         fin
18     fin
19     Vérifier si une baleine dépasse l'espace de recherche
20     Calculer la valeur de la fonction objectif de chaque baleine
21     Mettre à jour  $X^*$  s'il existe une meilleure solution
22      $t = t + 1$ 
23 fin
24 Retourner  $X^*$ 
25 fin

```

2.7 Conclusion

Ce chapitre a permis de définir et de structurer le problème d'optimisation énergétique dans un microgrid piloté par un système de gestion de l'énergie (SGE). En considérant des objectifs économiques et des contraintes opérationnelles, la planification optimale des ressources énergétiques distribuées a été formulée comme un problème mathématique d'optimisation non linéaire.

Après avoir décrit les fonctions objectives, les variables de décision et les contraintes techniques (équilibre de puissance, limites de production), l'algorithme Whale Optimization Algorithm (WOA) a été présenté comme une méthode pertinente pour résoudre ce type de problème. Inspiré du comportement collectif des baleines à bosse, WOA s'est distingué par sa capacité à explorer efficacement l'espace de recherche et à converger vers des solutions proches de l'optimum global.

La méthodologie exposée dans ce chapitre constitue ainsi une base solide pour l'implémentation d'algorithmes avancés dans les SGE, contribuant à une gestion énergétique plus intelligente, économique et durable dans les réseaux électriques de nouvelle génération.

CHAPITRE 03

Chapitre 3: Résultats et discussions

3.1 Introduction

Ce chapitre présente une analyse comparative des performances de quatre algorithmes d'optimisation par algorithme de baleines (WOA), Colonie d'Abeilles Artificielles (ABC), Optimisation par Essaim de Particules (PSO) et Algorithmes Génétiques (GA). pour la gestion d'un micro-réseau électrique de 37 nœuds. L'étude examine deux scénarios distincts : un cas de base (Scénario 1) et un cas avec charge augmentée de 20% (Scénario 2). Les résultats, présentés sous forme de tableaux et graphiques détaillés, permettent d'évaluer l'efficacité des algorithmes à minimiser les coûts tout en garantissant l'équilibre offre-demande. L'analyse s'appuie sur des indicateurs clés comme la répartition des puissances générées, les coûts horaires et totaux, ainsi que la stabilité opérationnelle. Ce chapitre vise à identifier la méthode d'optimisation la plus adaptée aux contraintes des micro-réseaux modernes, particulièrement dans des conditions de charge variables.

3.2 Résultats d'optimisation

Les performances du système de gestion de l'énergie (SGE) utilisant WOA proposée sont testées sur un micro-réseau de 37-nœuds. Les résultats obtenus sont comparés à ceux d'autres algorithmes ABC, PSO et GA

Paramètre des simulations :

- Chaque algorithme est exécuté 10 fois, et les meilleurs résultats sont retenus.
- Tous les algorithmes utilisent une taille de population de 100
- Le nombre maximal d'itérations est fixé à 1000 pour tous les algorithmes et tous les cas étudiés.

3.2.1 Paramètres de Micro-réseau

Le micro-réseau étudié dans ce mémoire est illustré à la Figure 3.1. Ce micro-réseau se compose d'une zone de charge représentée par le système de test IEEE à 37 nœuds, de cinq générateurs décentralisés (GED), d'une unité de cogénération (CoGen).

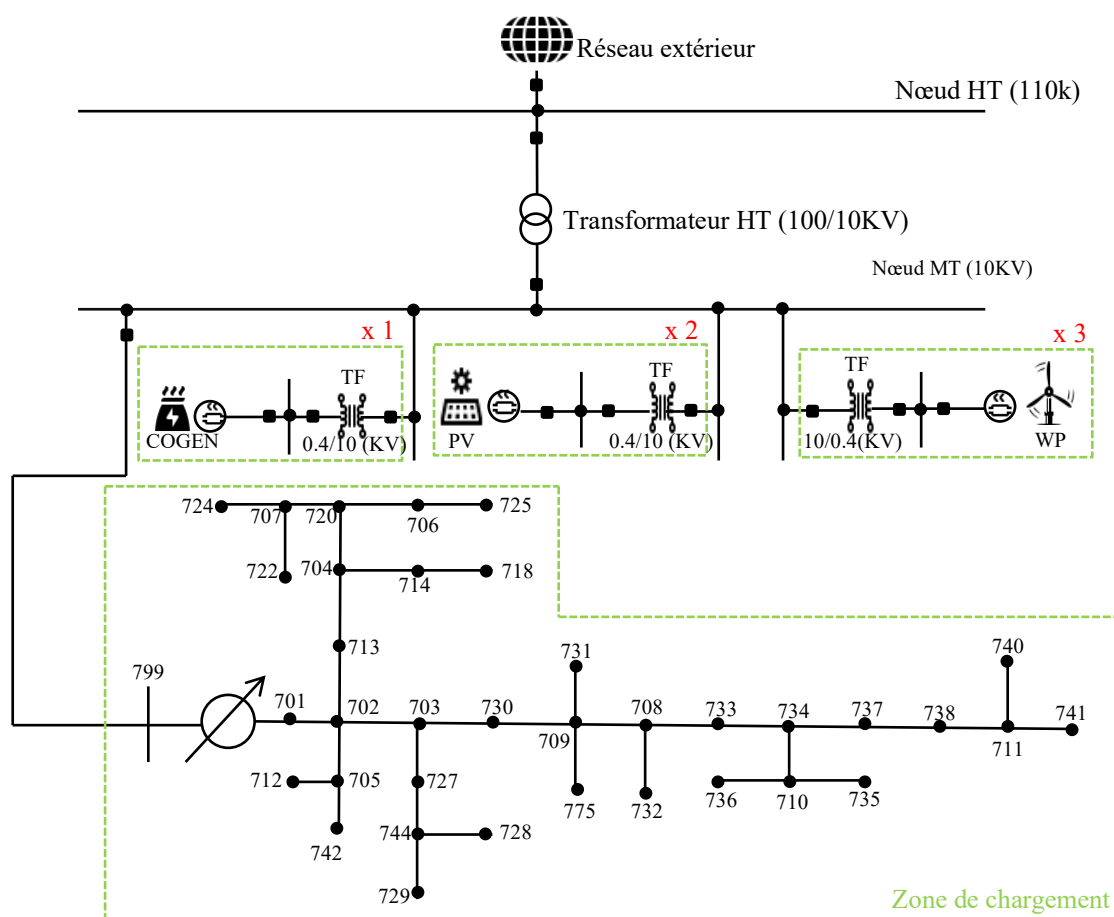


Figure 3.1 : Schéma de système de puissance avec 5 GED et IEEE-37 nœud secondaire.

3.2.2 Scénarios étudiés

L'étude compare les performances de quatre algorithmes d'optimisation (WOA, ABC, PSO, GA) pour la gestion du micro-réseau en intégrant des sources renouvelables (éoliennes, solaire) et une unité de cogénération (COGEN). Deux scénarios principaux sont analysés :

a) Scénario de base (Cas 1):

La demande énergétique suit un profil horaire standard, avec des pics entre 18h et 23h jusqu'à 2 382 kW et des creux la nuit 1 229 kW. Les tarifs de l'électricité varient de 0,022 \$/kWh heures creuses à 0,774 \$/kWh (pic de midi), influençant les stratégies d'optimisation.

b) Scénario avec charge augmentée de 20 % (Cas 2):

La demande est augmentée de 20 % pour tester la robustesse des algorithmes (pic à 2 858 kW). Les algorithmes doivent ajuster la répartition des puissances pour répondre à la demande sans surcoûts excessifs, en exploitant davantage la COGEN.

Les capacités maximales individuelles sont les suivantes : 1000 kW pour l'unité de cogénération, 250 kW pour chaque installation photovoltaïque (PV), et 750 kW pour chaque centrale éolienne. L'unité de cogénération est capable de fonctionner à pleine puissance tout au long de la journée, fournissant ainsi jusqu'à 1000 kW à tout moment. En revanche, la production des sources d'énergie renouvelable (PV et éolien) est variable en raison de leur nature

intermittente. La disponibilité horaire de la puissance pour chaque générateur décentralisé sur une journée d'exploitation est présentée à la Figure 3.2 .

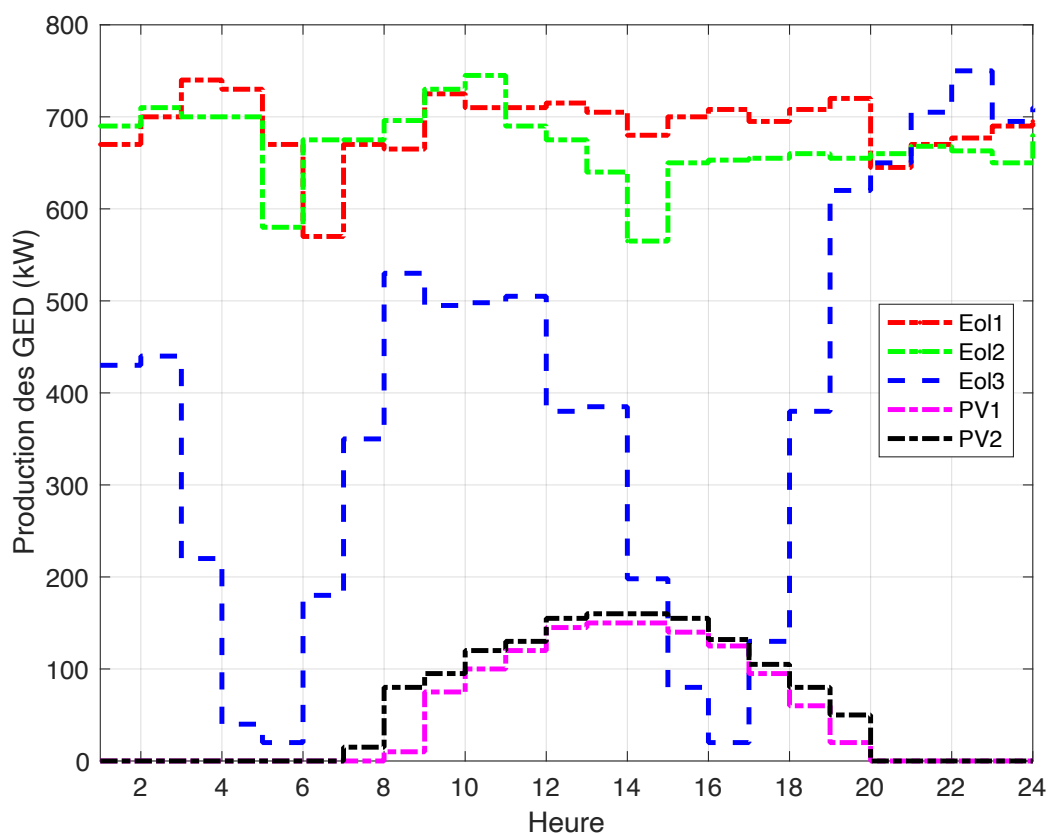


Figure 3.2 : Disponibilité horaire de puissance des GED.

3.2.3 Scénario 1 (Cas 1) :

Le Scénario 1 constitue la situation de référence pour l'évaluation des performances des algorithmes d'optimisation (WOA, ABC, PSO, GA) dans des conditions normales de fonctionnement du micro-réseau. Le profil de charge réaliste, avec une demande variant entre 1 229 kW heures creuses et 2 382 kW pic de soirée.

La demande en charge suit une évolution horaire, présentée dans le Tableau 3.1. Il est à noter que la charge atteint son pic entre la 18h et la 23h. Le prix de l'électricité fourni par le réseau principal est également indiqué dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Demande de charge et prix d'électricité par heure.

Heurs	Charge (KW)	Prix d'électricité (\$/KWh)
1	1471	0.043
2	1325	0.035
3	1263	0.026
4	1229	0.022
5	1229	0.022
6	1321	0.038
7	1509	0.043
8	1663	0.07
9	1657	0.28
10	1643	0.744
11	1643	0.774
12	1652	0.744
13	1666	0.28
14	1639	0.744
15	1642	0.372
16	1640	0.363
17	1676	0.112
8	1920	0.077
19	2214	0.065
20	2382	0.079
21	2382	0.235
22	2327	0.1
23	2174	0.56
24	1903	0.048

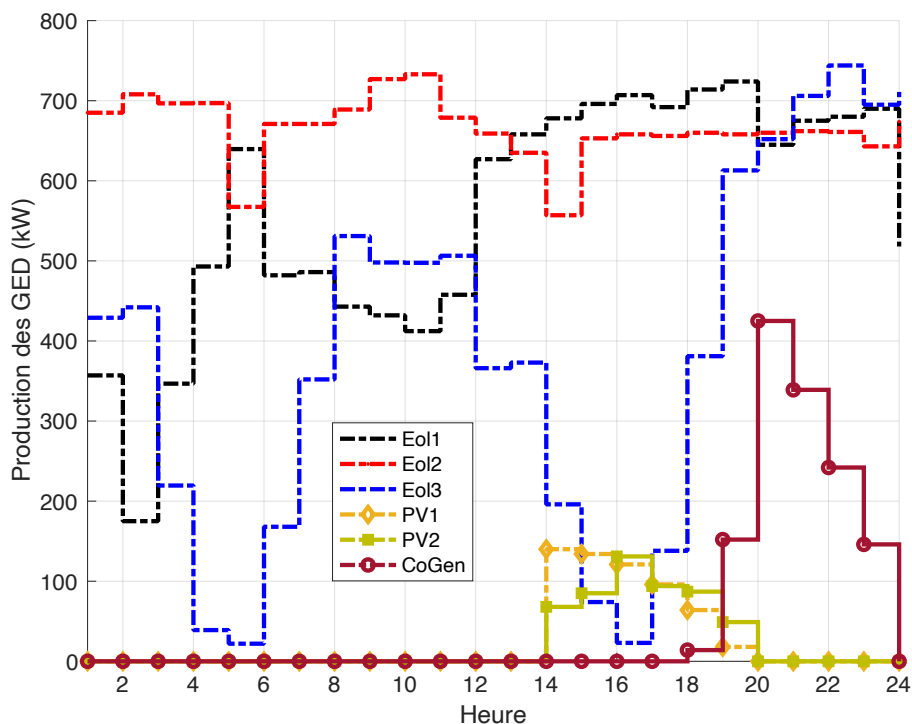
Ce tableau présente l'évolution horaire de la charge électrique (kW) et des prix de l'électricité (\$/kWh) sur 24 heures. La demande varie entre 1 229 kW (heures creuses) et 2 382 kW (pic de soirée), tandis que les tarifs fluctuent significativement, passant de 0,022 \$/kWh (nuit) à 0,774 \$/kWh (midi). On constate qu'il y a des tarifs élevés à 9h et 13h (0,28 \$/kWh) malgré une charge modérée, suggérant des facteurs externes congestion réseau, disponibilité des renouvelables. Les pics tarifaires les plus marqués se concentrent entre 10h-14h et 21h-23h, incitant à décaler les consommations énergivores vers les périodes nocturnes (1h-7h) ou tardives (24h) pour optimiser les coûts. Ces observations soulignent l'importance d'une gestion active de la demande. Une vérification des données (doublet à 8h) est recommandée pour garantir la cohérence de l'analyse.

Les coefficients de la fonction de coût associés aux différents générateurs décentralisés (GED) sont répertoriés dans le Tableau 3.2. Ces coefficients varient en fonction de la technologie utilisée pour chaque type de générateur.

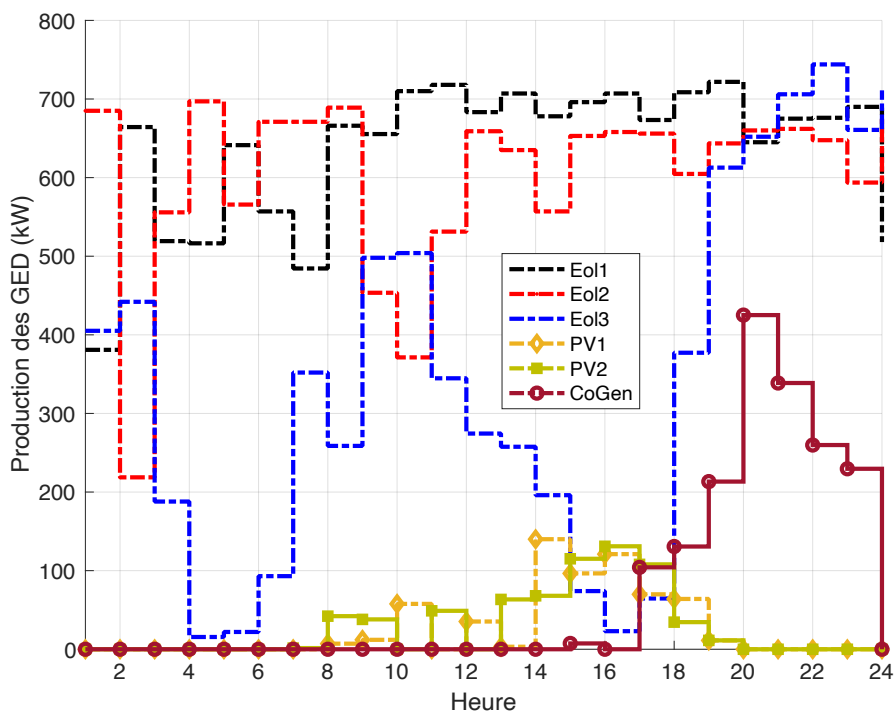
Tableau 3.2 : Coefficients de coût de GED.

GED	EOL1	EOL2	EOL3	PV1	PV2	COGEN
α	0.0027	0.0028	0.0026	0.0055	0.0055	0.0083
β	17.83	17.54	17.23	29.3	29.58	75.73
γ	4.46	4.45	4.44	4.45	4.46	8.21

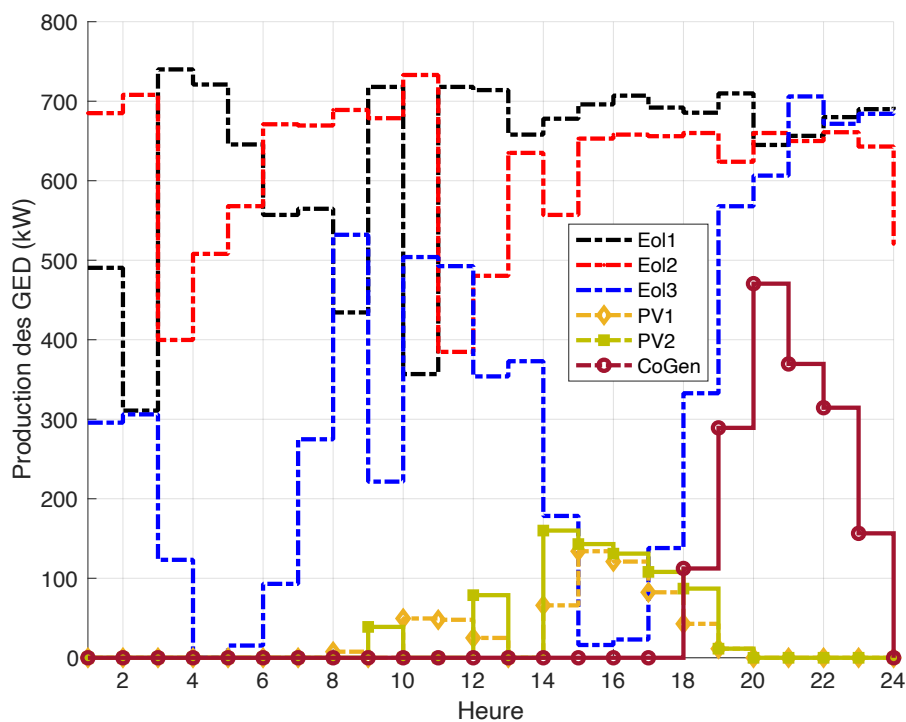
Figure 3.3 contient quatre sous-figures qui montrent la répartition horaire des puissances générées par chaque type de GED sur 24 heures par chaque algorithme (WOA, ABC, PSO, GA)



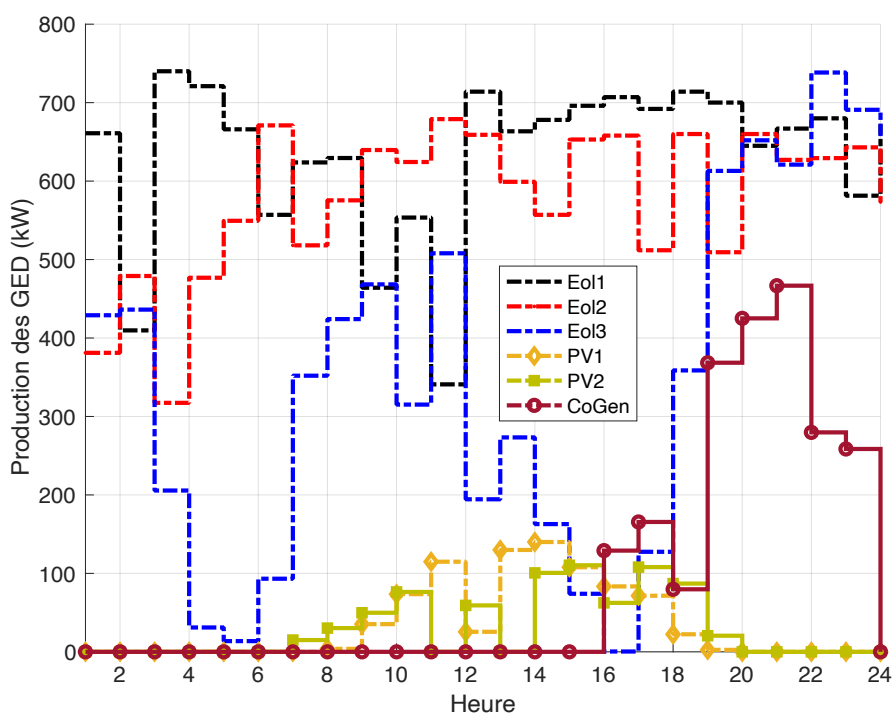
(b) WOA



(c) ABC



(d) PSO



(e) GA

Figure 3.3 : Planification optimale de la mise en service des GED pour le Cas 1 à l'aide d'algorithmes testés

Le tableau détaille la puissance attribuée à chaque GED et les coûts associés, heure par heure, pour WOA.

La figure illustre que l'algorithme WOA a utilisé au maximum des énergies renouvelables éoliennes et solaire et n'activant la cogénération (COGEN) qu'aux heures de pic, ce qui minimise

les coûts. Le ABC montre une activation prématurée et excessive de la COGEN, entraînant des coûts plus que de WOA, tandis que PSO présente des pics de puissance inutiles malgré une meilleure gestion que ABC. Par ailleurs on constate que le GA il ya une sous-utilisation des éoliennes et une activation erratique de la COGEN, conduisant aux performances les moins optimales. Cette figure met en évidence la supériorité de WOA en termes de stabilité et d'efficacité économique, confirmant son adéquation pour la gestion des micro-réseaux. Les autres algorithmes, bien que fonctionnels, manquent de précision et de cohérence dans l'optimisation des ressources énergétiques.

Tableau 3.3 : Gestion optimale de l'énergie (puissances et coûts) obtenue par le système SGE utilisant WOA.

Heure	Puissance de GED (kW)						Coût						Coût total
	EOL1	EOL2	EOL3	PV1	PV2	CoGen	EOL1	EOL2	EOL3	PV1	PV2	COGEN	
1	357	685	429	0	0	0	10.826	16.466	11.832	0	0	0	39.124
2	175	708	442	0	0	0	7.580	16.870	12.056	0	0	0	36.506
3	346	697	220	0	0	0	10.630	16.677	8.231	0	0	0	35.537
4	493	697	39	0	0	0	13.251	16.677	5.112	0	0	0	35.040
5	639	568	22	0	0	0	15.854	14.414	4.819	0	0	0	35.087
6	482	671	168	0	0	0	13.055	16.221	7.335	0	0	0	36.610
7	491.5	665.6	351.8	0	0	0	13.224	16.126	10.502	0	0	0	39.852
8	453.2	689	520.4	0.3	0	0	12.541	16.536	13.407	0	0	0	42.484
9	431.9	727	498	0	0	0	12.161	17.203	13.021	0	0	0	42.385
10	425.9	713.7	503.2	0	0	0	12.054	16.969	13.111	0	0	0	42.134
11	491.4	646.6	504.8	0	0	0	13.223	15.792	13.139	0	0	0	42.153
12	627	659	366	0	0	0	15.641	16.010	10.746	0	0	0	42.397
13	657.8	635	373	0	0.2	0	16.190	15.589	10.867	0	0	0	42.646
14	678	557	196	138.9	69.1	0	16.550	14.221	7.817	8.519	6.504	0	53.611
15	696	653	74	134	85	0	16.871	15.905	5.715	8.376	6.974	0	53.841
16	707	658	23	121	131	0	17.067	15.993	4.836	7.995	8.335	0	54.226
17	692	656	138	96	94	0	16.800	15.957	6.818	7.262	7.241	0	54.078
18	714	660	381	64	87	14	17.192	16.028	11.005	6.325	7.034	6.270	63.854
19	724	658	613	18	49	152	17.370	15.993	15.003	4.977	5.909	16.721	75.974
20	645	660	652	0	0	425	15.961	16.028	15.675	0	0	37.397	85.061
21	675	662	706	0	0	339	16.496	16.063	16.606	0	0	30.883	80.048
22	680	661	744	0	0	242	16.586	16.045	17.261	0	0	23.537	73.429
23	690	643	695	0	0	146	16.764	15.729	16.416	0	0	16.267	65.176
24	518	674	711	0	0	0	13.697	16.273	16.692	0	0	0	46.662

Ce tableau illustre la répartition optimale des puissances entre éoliennes (EOL1, EOL2, EOL3), panneaux solaires (PV1, PV2) et cogénération (COGEN), ainsi que les coûts associés, calculés par le système SGE utilisant l'algorithme WOA. L'éolien constitue la principale source d'énergie, avec une contribution majoritaire de EOL2, tandis que le solaire intervient de manière intermittente (heures 14-17). La cogénération (COGEN) n'est activée qu'en périodes de forte demande, entraînant une hausse significative des coûts (pic à 85,06\$ à l'heure 20). Les résultats montrent une gestion efficace des ressources renouvelables, mais soulignent également l'impact économique des sources d'appoint en cas de pic de consommation.

Le Tableau 3.4 compare les coûts horaires en dollars générés par quatre algorithmes d'optimisation (WOA, ABC, PSO, GA) pour la gestion d'un micro-réseau sur 24 heures :

Tableau 3.4: Coût total (\$) par heure obtenu par le SGE en utilisant les algorithmes testés.

Heure	ABC	PSO	GA	WOA
1	39.138	39.207	39.214	39.124
2	36.649	36.588	36.575	36.506
3	35.596	35.680	35.655	35.536
4	35.054	35.118	35.106	35.040
5	35.088	35.091	35.099	35.087
6	36.655	36.655	36.658	36.610
7	44.327	39.898	44.530	39.852
8	52.135	42.348	51.893	42.484
9	51.960	47.484	52.333	42.387
10	47.349	47.153	52.925	42.134
11	47.321	47.240	47.909	42.145
12	47.306	52.578	52.401	42.397
13	52.413	47.110	48.654	42.649
14	53.612	53.859	54.005	53.611
15	59.405	54.559	53.824	53.481
16	54.226	54.226	65.687	54.226
17	65.231	54.092	68.811	54.078
18	70.004	69.334	67.227	63.854
19	79.006	83.429	88.040	75.947
20	85.065	87.724	85.065	85.061
21	80.025	81.822	87.499	80.048
22	74.468	77.673	75.632	73.429
23	70.050	65.784	71.694	65.176
24	46.662	46.720	46.725	46.662

Le Tableau montre que le WOA et grâce à une optimisation optimale des ressources qui donne la priorité aux éoliennes, et usage ciblé de la COGEN. Ses coûts horaires restent stables, même aux heures de pointe par exemple à 19h le coût était 75,94 \$ par contre pour le GA à la

même heure il était 88,04 \$. Par ailleurs le ABC et PSO affichent des surcharges ponctuelles par exemple pour ABC à 15h le coût est 59.41 \$ qui sont liées à une activation trop fréquente de la COGEN. Comme montre le même tableau, le GA est le moins performant avec des pics incohérents par exemple à 17h le coût est 68,81, cela dus à une mauvaise gestion des pics de demande.

Le Tableau 3.5 comparent les coûts horaires et totaux des quatre algorithmes

Tableau 3.5: Coût total en (\$) dans 24 heures utilisant les algorithmes testés.

Algorithme	PSO	ABC	GA	WOA
Coût total (\$)	1271.375	1298.746	1333.159	1217.912

Le tableau des coûts totaux confirme la supériorité globale de WOA, qui atteint le coût le plus bas 1217,91 \$, grâce à une meilleur gestion des ressources. Cette performance optimale résulte de sa capacité à concilier exploitation des énergies renouvelables et usage stratégique de la cogénération. ABC et PSO obtiennent des résultats intermédiaires, respectivement 1 298,75 \$ et 1 271,38 \$. Par ailleurs le GA se révèle le moins performant 1 333,16 \$ avec un écart significatif de 9,5 %.

Le coût total par heure est représenté pas la Figure 3.4

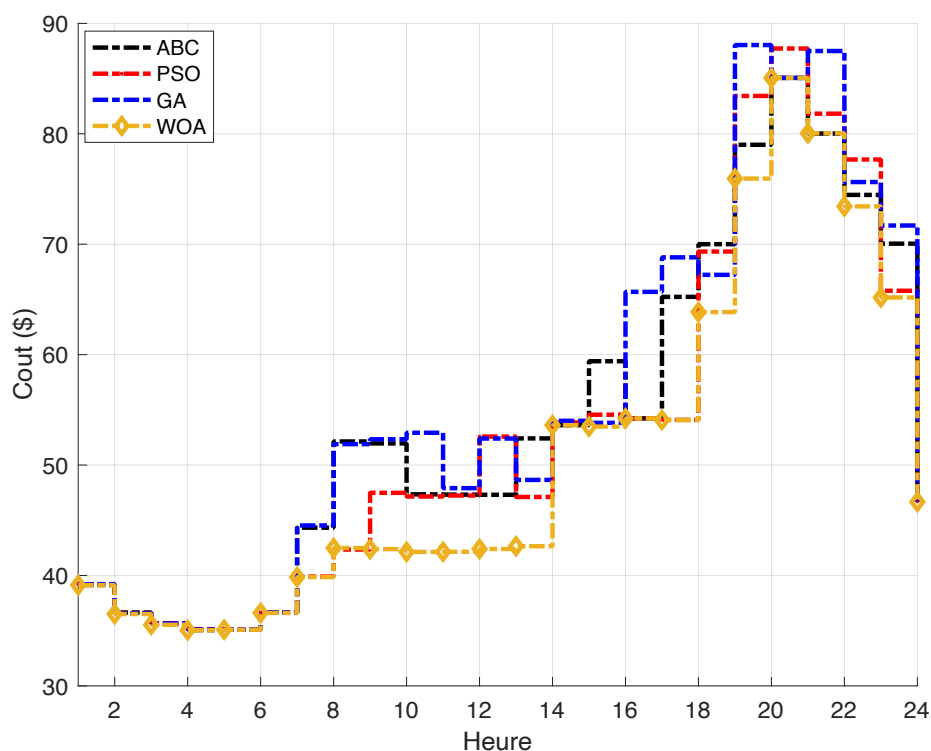


Figure 3.4 : Coût total par heure obtenu par le système de gestion de l'énergie pour le Cas 1.

La figure illustre que le WOA a montré une meilleure performance pendant les heures de pointe de 18h-23h, où il maintient des coûts inférieurs aux autres algorithmes. Tandis que, ABC

et PSO présentent des fluctuations plus marquées, avec des pics de coût inexpliqués à certaines heures GA enregistre la performance la plus médiocre, Cette visualisation montre la supériorité de WOA dans la gestion des transitions énergétiques et son adaptabilité aux variations de charge.

3.2.4 Scénario 2 (Cas 2)

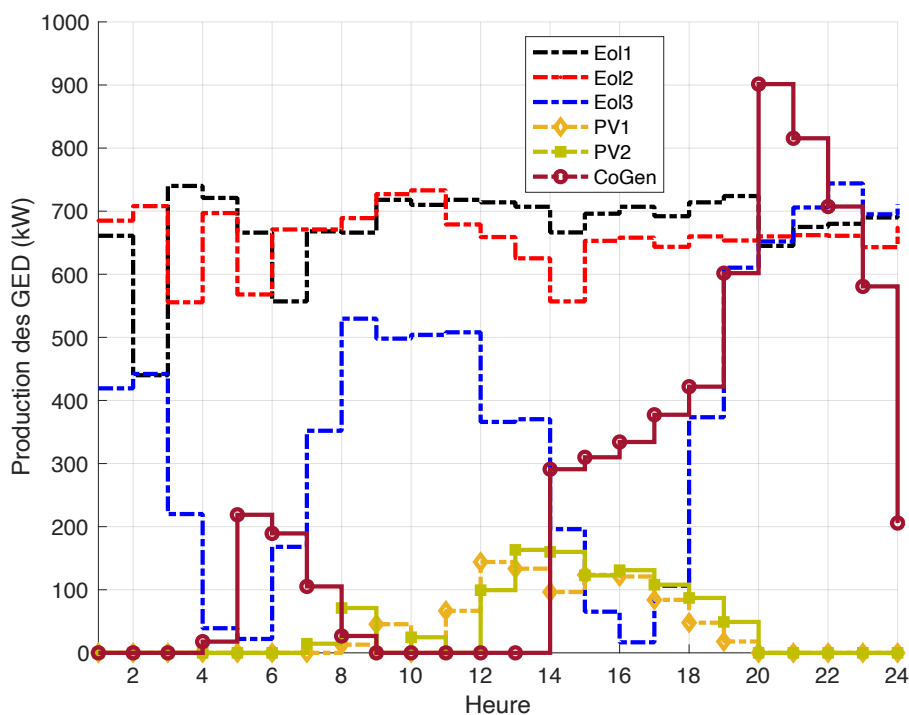
Le Scénario 2 simule une augmentation de 20% de la charge du micro-réseau par rapport au cas nominal, créant ainsi des conditions de fonctionnement plus contraignantes pour tester la robustesse des algorithmes d'optimisation. Cette hypothèse reproduit des situations réelles de pics de consommation ou de croissance de la demande énergétique. Le profil horaire conserve ses variations caractéristiques mais avec des amplitudes accrues, le pic de demande atteignant désormais 2 858 kW en soirée. Ce scénario permet d'évaluer la capacité des algorithmes à adapter leur stratégie de gestion des ressources, notamment en limitant le recours coûteux à la cogénération tout en maintenant l'équilibre du réseau.

Le Tableau 3.6 montre une augmentation uniforme de 20% de la charge horaire, avec un pic atteignant 2 858 kW contre 2 382 kW dans le scénario de base. Cette modification crée des conditions plus contraignantes, particulièrement entre 18h et 23h où la demande est la plus forte.

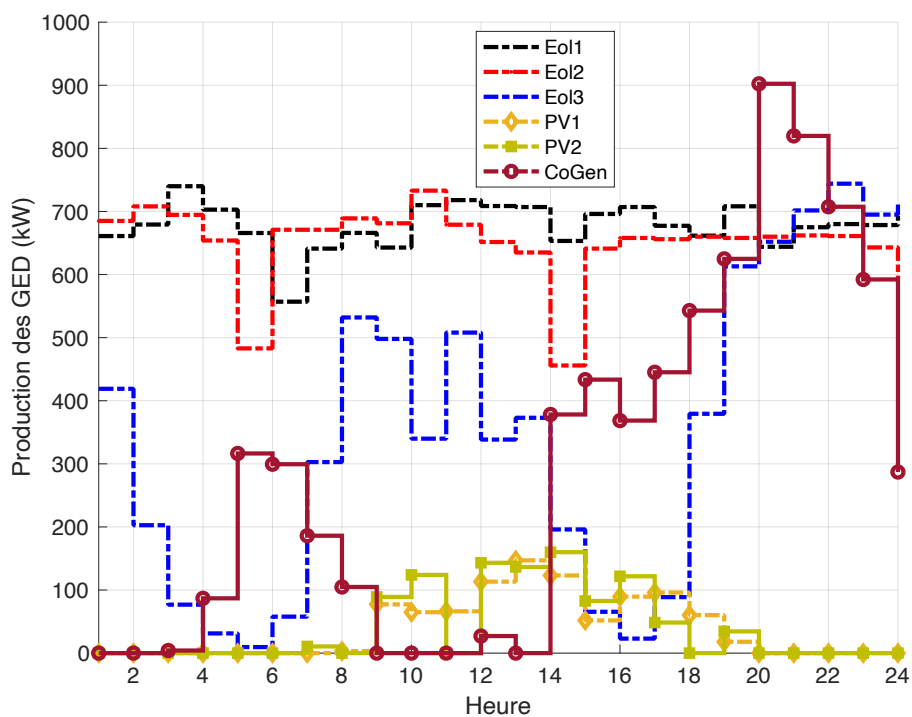
Tableau 3.6 : demande de charge après l'augmentation par 20%

Heure	Charge (kW)
1	1765.2
2	1590
3	1515.6
4	1474.8
5	1474.8
6	1585.2
7	1810.8
8	1995.6
9	1988.4
10	1971.6
11	1971.6
12	1982.4
13	1999.2
14	1966.8
15	1970.4
16	1968
17	2011.2
18	2304
19	2656.8
20	2858.4
21	2858.4
22	2792.4
23	2608.8
24	2283.6

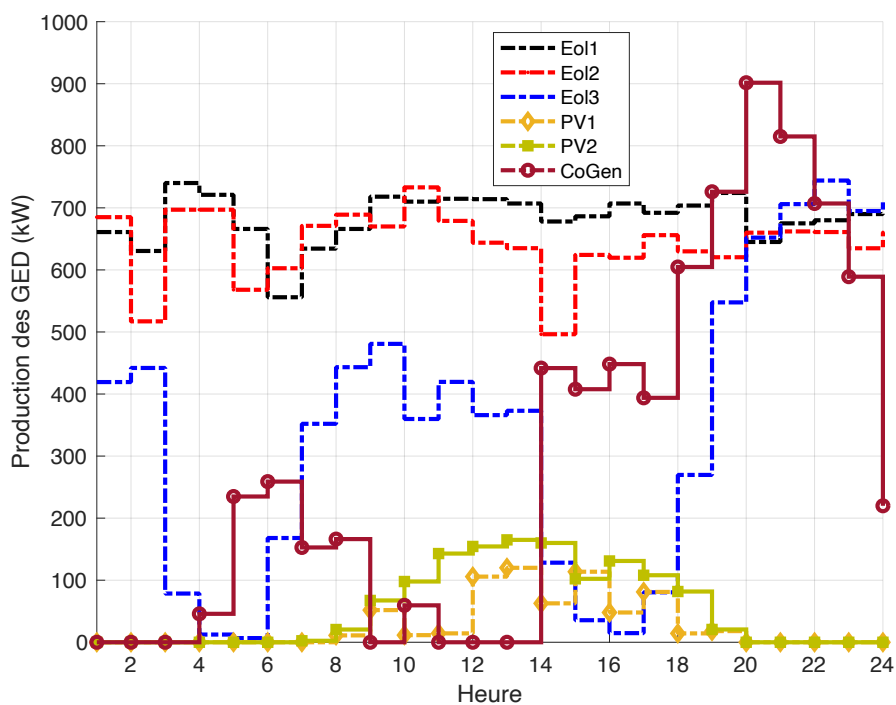
La Figure 3.5 représente la visualisation de la répartition horaire des puissances générées par chaque algorithme après l'augmentation uniforme de la charge.



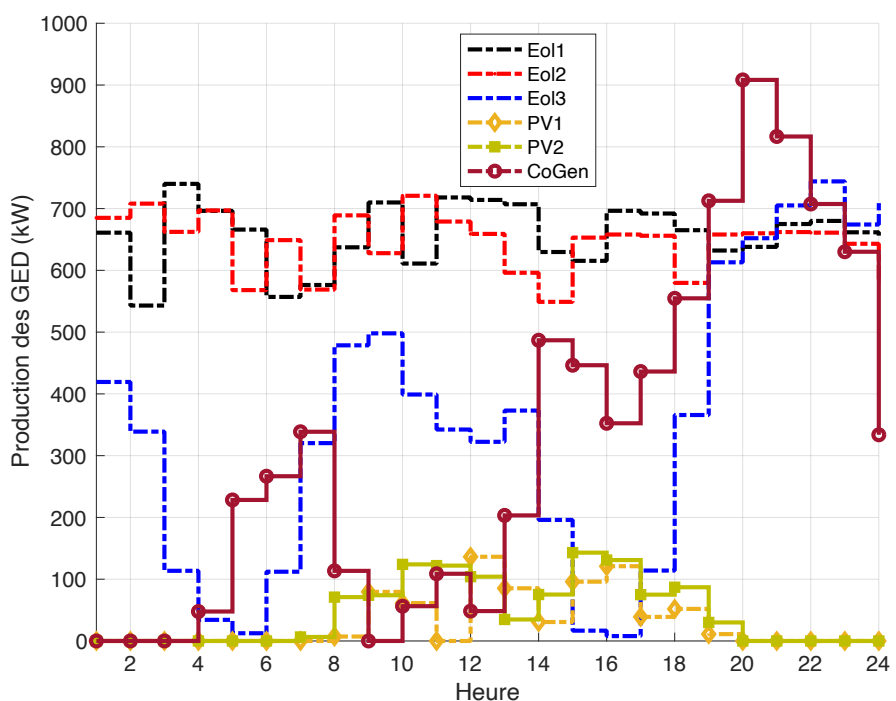
a) WOA



b) ABC



C) PSO



d) GA

Figure 3.5 : Planification optimale de la mise en service des GED pour le Cas 2 à l'aide d'algorithmes testés

De la figure et après l'utilisation de WOA, on observe une gestion particulièrement efficace des GED, l'algorithme active la cogénération de manière progressive et calculée, démarrant à 17h avec 377 kW pour atteindre un pic raisonné de 901 kW à 20h, tout en exploitant pleinement les PV 10h et 16h d'une puissance entre 96 à 163 kW. Pour le ABC on observe une activation excessive de la cogénération dès 8h d'une puissance de 520 kW, conduisant à des coûts supplémentaires. Pour le PSO présente une activation erratique de la cogénération variations de 26

kW à 815 kW en quelques heures. Pour le GA est le moins performant, avec une déclenchements anarchiques de la cogénération qui conduit à des cout plus élevé.

Le Tableau 3.7 montre que le WOA démontre une adaptation efficace à la charge augmentée en maximisant la production éolienne et en utilisant stratégiquement la COGEN. Les coûts horaires restent maîtrisés, avec un pic à 121.14\$ à 20h, contre 85.06\$ dans le scénario 1. Cette performance montre sa capacité à gérer des conditions plus exigeantes sans sacrifier l'efficacité économique. La comparaison avec le scénario 1 souligne sa robustesse et sa flexibilité.

Tableau 3.7 : Gestion optimale de l'énergie (puissances et coûts) par le SGE utilisant WOA pour cas 2

Heure	Puissance de GED (kW)						Coût (\$)						Coût total
	EOL1	EOL2	EOL3	PV1	PV2	COGEN	EOL1	EOL2	EOL3	PV1	PV2	COGEN	
1	661	685	419.2	0	0	0	16.247	16.466	11.663	0	0	0	44.376
2	440	708	442	0	0	0	12.306	16.870	12.056	0	0	0	41.232
3	740	555.6	220	0	0	0	17.656	14.196	8.231	0	0	0	40.083
4	721	697	39	0	0	17.8	17.317	16.677	5.112	0	0	6.556	45.662
5	666	568	22	0	0	218.8	16.336	14.414	4.819	0	0	21.781	57.350
6	557	671	168	0	0	189.3	14.392	16.221	7.335	0	0	19.543	57.491
7	668	671	352	0	14.5	105.3	16.372	16.221	10.505	0	4.888	13.182	61.168
8	666	689	529.6	13	71	26.7	16.336	16.536	13.566	4.831	6.560	7.234	65.064
9	718	727	498	45.4	0	0	17.263	17.203	13.021	5.780	0	0	53.268
10	710	733	504	0	24.7	0	17.121	17.308	13.125	4.450	5.189	0	57.193
11	718	679	508	66.7	0	0	17.263	16.361	13.194	6.403	4.460	0	57.681
12	714	659	366	144	99.4	0	17.192	16.010	10.747	8.669	7.400	0	60.018
13	707	625.3	370.3	133.4	163.2	0	17.067	15.419	10.820	8.359	9.288	0	60.953
14	666.3	557	196	96.4	160	291	16.342	14.221	7.817	7.275	9.193	27.250	82.097
15	696	653	65.2	123.6	122.7	309.9	16.871	15.905	5.564	8.072	8.089	28.681	83.181
16	707	658	16.7	121	131	334.2	17.067	15.993	4.728	7.995	8.335	30.518	84.636
17	692	643.5	106.3	84	108	377.3	16.800	15.739	6.272	6.910	7.655	33.787	87.163
18	714	660	373.4	47.8	87	421.9	17.192	16.028	10.874	5.849	7.034	37.160	94.136
19	724	653.5	610.4	18	49	601.8	17.370	15.914	14.959	4.977	5.909	50.784	109.914
20	645	660	652	0	0	901.4	15.961	16.028	15.675	0	0	73.479	121.144
21	675	662	705.9	0	0	815.5	16.496	16.063	16.603	0	0	66.977	116.139
22	680	661	744	0	0	707.4	16.586	16.045	17.261	0	0	58.785	108.676
23	690	643	695	0	0	580.8	16.764	15.729	16.416	0	0	49.196	98.106
24	661	685	419.2	0	0	0	16.247	16.466	11.663	0	0	0	44.376

Le Tableau 3.8 et la Tableau 3.9 montrent le détail des coûts horaires des quatre algorithmes après l'augmentation de la charge.

A partir du tableau et de la figure en constate que le WOA confirme sa supériorité avec des coûts par heure inférieurs par rapport à les autres trois algorithmes, notamment entre 19h et 21h qui représentent les heures critique. Pour ABC et PSO ils obtient des coût plus élevé que WOA .et le GA cumule les pires performances.

Tableau 3.8: Coût total (\$) par heure obtenu par le SGE pour le cas 2

Heure	ABC	PSO	GA	WOA
1	44.371	44.378	44.379	44.376
2	41.375	41.280	41.291	41.232
3	40.054	40.125	40.121	40.083
4	49.681	47.329	47.406	45.662
5	63.036	58.303	57.906	57.350
6	63.932	61.547	62.003	57.491
7	65.845	63.807	74.637	61.168
8	68.635	72.592	70.070	65.064
9	59.151	58.613	64.243	53.268
10	59.203	66.927	67.611	57.193
11	57.669	50.103	69.933	57.681
12	66.970	60.259	68.054	60.018
13	65.989	51.489	75.884	60953
14	87.475	90.504	91.698	82.097
15	89.047	88.505	91.038	83.181
16	86.154	90.426	85.677	84.636
17	90.543	88.104	89.679	87.163
18	95.801	104.349	101.905	94.163
19	111.076	116.818	116.032	109.914
20	121.199	121.161	121.545	121.144
21	116.382	161.104	116.211	116.139
22	108.681	108.648	108.674	108.676
23	98.768	98.587	100.979	98.106
24	75.305	71.407	77.997	70.572

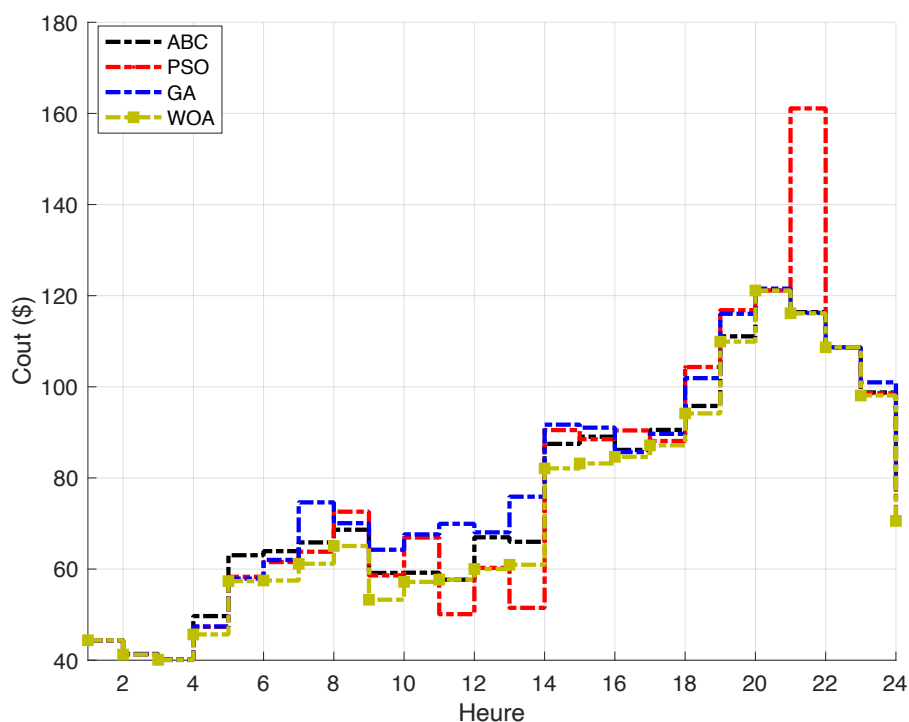


Figure 3.6 : Coût total par heure obtenu par le SGE pour le Cas 2.

Le Tableau 3.9 présente les coûts totaux sur 24 heures pour le scénario 2 :

Tableau 3.9 : Coût total en (\$) dans 24 heures pour le cas 2

Algorithme	PSO	ABC	GA	WOA
Coût total (\$)	1811.365	1826.341	1884.972	1757.301

Le tableau montre qu'avec une valeur de 1757,30 \$, le WOA maintient sa position dominante avec le coût le plus bas par rapport au ABC qui minimise le coût à 1826.341 et PSO qui obtient un coût de 1811.365 \$. Le GA a donné la mauvaise minimisation du coût avec une valeur égale à 1884.972 \$, cela démontre la robustesse de WOA face à des conditions de charge plus contraignantes. Cette performance s'explique par sa capacité à optimiser l'utilisation des énergies.

3.3 Conclusion

Les résultats de ce chapitre démontrent clairement la supériorité de l'algorithme WOA dans la gestion optimale des micro-réseaux. Dans les deux scénarios étudiés, WOA affiche les meilleures performances économiques (coût total le plus bas) tout en maintenant une grande stabilité opérationnelle. Sa capacité à maximiser l'utilisation des énergies renouvelables et à activer stratégiquement la cogénération se révèle particulièrement efficace, surtout dans le Scénario 2 où la charge est augmentée de 20%. À l'inverse, ABC, PSO et GA présentent des limitations notables, avec des surcoûts importants et une gestion moins optimale des pics de demande. Ces conclusions soulignent l'importance du choix de l'algorithme pour une gestion énergétique à la fois économique et fiable. Elles ouvrent également des perspectives

intéressantes pour de futures recherches, notamment sur l'hybridation des méthodes ou l'intégration de systèmes de stockage pour améliorer encore les performances.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Conclusion générale et perspectives

Ce mémoire a permis d'étudier en profondeur les microgrids et leur gestion optimale à travers différents algorithmes. Les travaux réalisés ont démontré l'efficacité des méthodes métaheuristiques, et plus particulièrement l'algorithme d'optimisation par algorithme de baleines (WOA), pour résoudre les problèmes complexes d'optimisation énergétique dans ces systèmes décentralisés.

Les résultats obtenus dans ce travail ont mis en évidence plusieurs points clés. Tout d'abord, l'analyse comparative des algorithmes WOA, ABC, PSO et GA a clairement montré la supériorité de WOA en termes de minimisation des coûts opérationnels. En effet, dans le scénario de base, WOA a permis une réduction des coûts totaux de près de 9,5% par rapport à l'algorithme GA. Cette performance s'est confirmée dans le scénario à charge augmentée, où WOA a maintenu son avantage tout en garantissant la stabilité du système.

Par ailleurs, l'étude a révélé que WOA présente une meilleure capacité à gérer les pics de demande grâce à une activation moins des unités de cogénération. Contrairement aux autres algorithmes qui ont tendance à surutiliser ces ressources coûteuses, WOA optimise leur emploi en les réservant aux périodes de forte demande, tout en maximisant l'utilisation des énergies renouvelables disponibles.

En conclusion, ce mémoire a montré tout le potentiel des algorithmes d'optimisation, et particulièrement de WOA, pour la gestion efficace des microgrids. Les résultats obtenus ouvrent des perspectives intéressantes pour le développement de réseaux électriques plus intelligents, économes et durables. Ces avancées contribueront sans aucun doute à accélérer la transition énergétique vers des systèmes plus décentralisés et respectueux de l'environnement.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [1] A. Akter *et al.*, "A review on microgrid optimization with meta-heuristic techniques: Scopes, trends and recommendation," *Energy Strategy Reviews*, vol. 51, p. 101298, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.esr.2024.101298.
- [2] M. Shirkhani *et al.*, "A review on microgrid decentralized energy/voltage control structures and methods," *Energy Reports*, vol. 10, pp. 368–380, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.egyr.2023.06.022.
- [3] N. Mahdavi Tabatabaei, E. Kabalci, and N. Bizon, "Overview of Microgrid," in *Microgrid Architectures, Control and Protection Methods*, N. Mahdavi Tabatabaei, E. Kabalci, and N. Bizon, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 3–19. doi: 10.1007/978-3-030-23723-3_1.
- [4] M. McCullough, *Downtime on the Microgrid: Architecture, Electricity, and Smart City Islands*. The MIT Press, 2020. doi: 10.7551/mitpress/11953.001.0001.
- [5] J. Silvente and L. G. Papageorgiou, "An MILP formulation for the optimal management of microgrids with task interruptions," *Applied Energy*, vol. 206, pp. 1131–1146, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.08.147.
- [6] J.-F. Reynaud, "Recherches d'optimums d'énergie pour charge/décharge d'une batterie à technologie avancée dédiée à des applications photovoltaïques," phdthesis, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2011. Accessed: Apr. 28, 2025. [Online]. Available: <https://theses.hal.science/tel-00559630>
- [7] O. Gam, "Optimisation multicritère du dimensionnement d'un micro- réseau électrique urbain à base des énergies renouvelables," masters, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, 2024. Accessed: Apr. 28, 2025. [Online]. Available: <https://depositum.uqat.ca/id/eprint/1637/>
- [8] K. Fabrice, "Développements et tests de stratégies de gestion de l'énergie à l'échelle de micro réseaux avec stockage et production d'hydrogène." Accessed: Apr. 28, 2025. [Online]. Available: <https://theses.hal.science/tel-02650719>
- [9] R. H. Lasseter, "Smart Distribution: Coupled Microgrids," *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 6, pp. 1074–1082, Jun. 2011, doi: 10.1109/JPROC.2011.2114630.
- [10] S. E. Eyimaya and N. Altin, "Review of Energy Management Systems in Microgrids," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 3, Art. no. 3, Jan. 2024, doi: 10.3390/app14031249.
- [11] D. Kanakadhurga and N. Prabakaran, "Demand side management in microgrid: A critical review of key issues and recent trends," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 156, p. 111915, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2021.111915.
- [12] S. Settoul, R. Chenni, A. Bouzid, and F. Kerrou, "Stratégies d'Intégration optimale de sources des énergies renouvelables dans le réseau de distribution électrique en considérant des indices techniques et économiques.," Thesis, Université Frères Mentouri - Constantine 1, 2022. Accessed: Jun. 02, 2025. [Online]. Available: <http://depot.umc.edu.dz/handle/123456789/13462>

- [13] M. A. M. Ramli, H. R. E. H. Boucekara, and A. S. Alghamdi, "Efficient Energy Management in a Microgrid with Intermittent Renewable Energy and Storage Sources," *Sustainability*, vol. 11, no. 14, Art. no. 14, Jan. 2019, doi: 10.3390/su11143839.
- [14] S. Mirjalili and A. Lewis, "The Whale Optimization Algorithm," *Advances in Engineering Software*, vol. 95, pp. 51–67, May 2016, doi: 10.1016/j.advengsoft.2016.01.008.
- [15] M. A. Elaziz and S. Mirjalili, "A hyper-heuristic for improving the initial population of whale optimization algorithm," *Knowledge-Based Systems*, vol. 172, pp. 42–63, May 2019, doi: 10.1016/j.knosys.2019.02.010.

Résumé

Ce mémoire explore l'optimisation de la gestion énergétique dans les micro-réseaux (microgrids) à l'aide d'algorithmes méta-heuristiques, en mettant l'accent sur l'algorithme d'optimisation par les baleines (WOA). Les micro-réseaux, intégrant des sources d'énergie renouvelable et des systèmes de stockage, représentent une solution prometteuse pour améliorer l'autonomie énergétique et la résilience des réseaux électriques. L'étude compare les performances de quatre algorithmes (WOA, ABC, PSO, GA) dans deux scénarios : un cas de base et un cas avec une charge augmentée de 20%. Les résultats démontrent la supériorité de WOA en minimisant les coûts totaux grâce à une gestion efficace des ressources renouvelables et une activation stratégique de la cogénération. Les limitations des autres algorithmes sont également analysées, soulignant l'avantage de WOA pour les micro-réseaux modernes.

Abstract

This thesis investigates the optimization of energy management in microgrids using meta-heuristic algorithms, with a focus on the Whale Optimization Algorithm (WOA). Microgrids, which incorporate renewable energy sources and storage systems, offer a promising solution for enhancing energy autonomy and grid resilience. The study compares the performance of four algorithms (WOA, ABC, PSO, GA) in two scenarios: a base case and a case with a 20% increased load. The results highlight WOA's superiority in minimizing total costs through efficient utilization of renewable resources and strategic activation of cogeneration. The limitations of other algorithms are also examined, emphasizing WOA's suitability for modern microgrids.

ملخص

تتناول هذه الأطروحة تحسين إدارة الطاقة في الشبكات الصغيرة (microgrids) باستخدام خوارزميات التحسين مع التركيز على خوارزمية الحوت (WOA) تمثل الشبكات الصغيرة، التي تضم مصادر الطاقة المتجددة وأنظمة التخزين، حلاً واعدًا لتعزيز الاستقلالية الطاقة ومرونة الشبكات. تقارن الدراسة أداء أربع خوارزميات (WOA, ABC, PSO, GA) في سيناريوهين: حالة أساسية وحالة بزيادة حمل بنسبة 20%. تظهر النتائج تفوق خوارزمية WOA في تقليل التكاليف الكلية عبر الاستخدام الفعال للموارد المتجددة وتفعيل التوليد المشترك بشكل استراتيجي. كما يتم تحليل قيود الخوارزميات الأخرى، مؤكداً على ملاءمة WOA للشبكات الصغيرة الحديثة