



BIBLIOTHÈQUE

CÉGEP DE L'ABITIBI-TÉMISCAMINGUE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

Mise en garde

La bibliothèque du Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue et de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) a obtenu l'autorisation de l'auteur de ce document afin de diffuser, dans un but non lucratif, une copie de son œuvre dans [Depositum](#), site d'archives numériques, gratuit et accessible à tous. L'auteur conserve néanmoins ses droits de propriété intellectuelle, dont son droit d'auteur, sur cette œuvre.

Warning

The library of the Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue and the Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) obtained the permission of the author to use a copy of this document for nonprofit purposes in order to put it in the open archives [Depositum](#), which is free and accessible to all. The author retains ownership of the copyright on this document.



Optimisation multicritère du dimensionnement d'un micro- réseau électrique urbain à base des énergies renouvelables

MÉMOIRE PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA
MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

PAR
OLFA GAM

JUIN 2024

REMERCIEMENTS

Je remercie Dieu le Tout-Puissant pour sa bénédiction, il est toujours près de moi.

Je suis reconnaissante envers mes encadreurs, TAHAR TAFTICHT et MOHAMAD SAAD dont leurs expertises et leurs conseils éclairés ont guidé cette recherche vers des horizons nouveaux, leur patience, leur enthousiasme et leur dévouement envers l'avancement de la connaissance m'ont inspiré à donner le meilleur de moi-même.

Je remercie le personnel et la direction du l'UQAT pour les ressources mises à ma disposition et l'environnement d'apprentissage stimulant. Je remercie également tous les professeurs du programme de maîtrise en ingénierie concentration génie électrique pour leur formation et leurs conseils qui m'ont bien aidé dans mon projet de recherche. Merci à chacun de vous qui a contribué, de près ou de loin, à la réussite de cette mémoire. Votre engagement a fait de cette expérience un moment inoubliable.

Je tiens à remercier, le Pr,Ing. Mourad Nedil et le Pr,Ing. Nahi Kandil d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Pour finir, j'adresse un grand merci à ma famille, mes chers parents ma source d'inspiration, mon mari qui m'a donné le courage et l'ambition de persévérer et mes enfants Loujayn et Bedis que j'adore. Nul mot ne saurait exprimer l'amour et la reconnaissance que je porte pour eux.

Cordialement, OLFA GAM

Résumé

Les micro-réseaux autonomes deviennent des alternatives populaires dans les régions éloignées et insulaires où la connexion au réseau n'est pas économiquement ou techniquement viable. Pour cette raison, l'exploitation de l'offre abondante d'énergie renouvelable peut jouer un rôle important pour assurer une production d'énergie propre et respectueuse de l'environnement pour les communautés éloignées. Le présent travail porte sur l'intégration des micro-réseaux isolés qui présentent des petits réseaux électriques destinés à alimenter des zones rurales n'ayant pas de raccordement possible au réseau conventionnel principal. Ces micro-réseaux fonctionnant à base de production éolienne, de groupes électrogènes et de système de stockage par batteries, sont plus fragiles et la production d'électricité peut subir des interruptions fréquentes si le réseau n'est pas conçu avec précaution. La fiabilité est donc un critère préliminaire pour assurer d'une part la viabilité de ces projets et d'autre part pour permettre l'amélioration des conditions de vie des communautés. Pour cette raison, une méthode de conception multi-objective de ces micro-réseaux basée sur des critères technoéconomiques est proposée. Un algorithme itératif est développé pour faire évoluer la configuration du micro-réseau vers un optimum et permet de visualiser les compromis entre les critères fixés. Ce dernier est comparé à un algorithme intelligent évolutif qui a permis d'optimiser d'avantage la performance du micro-réseau. Les résultats des simulations et les tests valident notre conception du micro-réseau.

Mots clés

micro-réseau, fiabilité, dimensionnement, optimisation multi-objective.

Abstract

Stand-alone microgrids are becoming popular alternatives in remote and island regions where grid connection is not economically or technically viable. For this reason, harnessing the abundant supply of renewable energy can play an important role in ensuring clean, environmentally-friendly power generation for remote communities. The present work focuses on the integration of isolated microgrids, which present small-scale power grids designed to supply rural areas with no possible connection to the main conventional grid. These microgrids, based on wind generation, generators and battery storage, are more fragile and the electricity production can suffer frequent interruptions if the grid is not carefully designed. Therefore, to overcome the intermittent and fluctuating characteristics of wind power, reliability is a preliminary criterion to ensure the viability of these projects on the one hand, and to enable the improvement of communities' living conditions on the other. For this reason, a multi-objective design method for these microgrids based on techno-economic criteria is proposed. An iterative algorithm is developed to evolve the microgrid configuration towards an optimum and to visualize the trade-offs between the set criteria, compared with an evolutionary intelligent algorithm that further optimized microgrid performance. Simulation results and tests validate our microgrid design.

Keywords

Microgrid, reliability, sizing, multi-objective optimization.

Table des matières

Table des matières	i
Liste des Figures	ix
Liste des Tableaux	xi
Introduction générale	1
1 Cadre de l'étude	1
1.1 Contexte général	2
1.2 Problématique	5
1.3 Objectifs	6
1.4 Apport scientifique	6
1.5 Conclusion	7
2 Aperçu sur les microgrids isolés : fiabilité et méthodes de conception	8
2.1 Introduction	9
2.2 Généralités sur les MG isolés	9
2.2.1 Composants d'un MG	9
2.3 Classification des MG	12
2.3.1 Architectures de distribution en fonction de la puissance fourni	13
2.3.2 Classification des MGs selon le mode d'opération	14
2.3.3 Classification des MGs selon le type de control	15
2.4 Les avantages et les fonctionnalités des MGs isolés	16
2.5 Fiabilité des MGs isolés	17
2.6 Conception des MGs isolés	18
2.6.1 Critères d'évaluation du dimensionnement des composants du MG	18
2.6.2 Approches de dimensionnement des MGs	20

2.6.3	Schéma récapitulatif du dimensionnement :	23
2.7	Conclusion	24
3	Modélisation et gestion du Microgrid	25
3.1	Introduction	26
3.2	Description du MG étudié	26
3.3	Modélisation énergétique du MG	27
3.3.1	Modélisation énergétique des composants de MG	27
3.3.1.1	Modèle de l'éolienne	27
3.3.1.2	Modélisation du système de stockage à batterie	28
3.3.1.3	Modélisation du groupe diesel	30
3.3.1.4	Modélisation du convertisseur	30
3.3.1.5	Estimation du profil de charge requis dans le MG	31
3.4	Stratégie de gestion d'énergie	33
3.5	Résultats de simulation	34
3.6	Conclusion	39
4	Conception multi-objective d'un microgrid isolé	40
4.1	Introduction	41
4.2	Objectifs d'optimisation et critères de fiabilité choisis	41
4.2.1	Critères technologiques	41
4.2.2	Critères économiques	42
4.3	Méthode d'optimisation multi-objective appliquée au MG :	44
4.3.1	Technique analytique	44
4.3.1.1	Analyse économique développée	47
4.3.2	Description de la méthodologie d'optimisation par essais particuliers (PSO) :	48
4.3.2.1	Présentation générale	48
4.3.2.2	Formulation	49
4.3.2.3	Optimisation à l'aide de MOPSO	51
4.4	Résultats obtenus sur le cas étudié	54
4.5	Conclusion	61
	Conclusion générale et Perspectives	62
	Bibliographie	65

Nomenclature

Abréviations :

AD : Autonomy Days,
AG : Algorithme génétique,
BSS : Batterie système de stockage (Battery Bank Storage),
CA : Courant alternatif,
CB : Capacité de la batterie,
CC : : Courant continu,
COE : Le coût de l'énergie,
DPSP : (Deficiency in Power Supply Probability),
ELF : (Equivalent Loss Factor),
EL : électrolyseur,
FC : Pile a combustible,
GD : Groupe Diesel,
GSAP : Génératrice synchrone à aimant permanent,
HOMER : Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources,
IDH : Index de développement humain (Human Development Index),
IA : Intelligence artificiel,
LCA :(Life cycle assessment),
LCE : (Levelised cost of energy),
LCC : (Life Cycle Cost),
LCOE : Levelized Cost of Electricity,
LPSP : (Loss of Power Supply Probability),
LP : Linear Programming,
LOLP, LLP : (Loss of Load probability),
MG : micro réseau électrique (Microgrid)
MOPSO : Multi-Objective Particle Swarm Optimization,
NPC : (Net Present Cost),

NPV : (Net present value),

NPC : Net Present Cost,

PSO : Particle swarm optimization ,

P(R) : (Percentage of Risk State Probability),

P(H) : (Percentage of Healthy State Probability),

PV : Photovoltaïque,

REPG : Puissance Relative en Excès Générée, Relative Excess Power Generated,

SEH : Système électrique hybride,

SCC : Social Cost of Carbon,

SOC : État de la charge de la Batterie (State of Charge),

TC : (coût total cost),

T/C : Tele-Communication,

TED :(Total Energy Defici),

TPC : (total present cost),

WT : Turbine éolienne,

Table des figures

1.1	Avenir énergétique du Canada[1]	2
1.2	Capacité de production des énergies renouvelables [1]	3
1.3	Chaîne de conversion énergétique	4
2.1	Classification des MGs	12
2.2	Différentes architectures de distribution, inspirées de [2]	14
2.3	Principe de dimensionnement	24
3.1	Schéma général du microgrid isolé étudié	26
3.2	Profil typique d'une maison	31
3.3	Exemple des applications disponibles d'une maison	32
3.4	Algorithme de gestion implémenté pour l'architecture du MG considéré	35
3.5	Vitesse de vent enregistrée au cours de l'année 2020	36
3.6	Puissance annuelle produite par le parc éolien	36
3.7	Puissance annuel, mensuel et journalière consommée par un seul foyer	37
3.8	Énergie stockée dans le système de stockage	38
3.9	Énergie produite par le groupe diesel	38
3.10	Énergie rejetée par le MG	39
4.1	Organigramme de dimensionnement optimal	46
4.2	Déplacement d'une particule.	49
4.3	Organigramme de l'OEP.	51
4.4	LPSP pour différentes valeurs de la capacité de la batterie	55
4.5	REPG pour différentes valeurs de la capacité de la batterie	55
4.6	LPSP et COE pour différents jour d'autonomie	56
4.7	Configuration optimale obtenue de l'algorithme analytique	57
4.8	LPSP obtenue via l'algorithme MOPSO pour le MG étudié	58
4.9	COE obtenue via l'algorithme MOPSO pour le MG étudié	59

4.10 Prix de production optimal du kWh d'énergie en fonction de l'insatisfaction énergétique LPSP	60
4.11 Répartition en % de l'apport annuel en puissance des sous-systèmes de MG . .	61

Liste des tableaux

2.1	Résumé des critères d'évaluation du dimensionnement des MGs basés sur les énergies renouvelables	19
3.1	les principaux types d'appareils considérés	32
4.1	résultats de MOPSO	60
4.2	Comparaison des résultats	61

Chapitre 1

Cadre de l'étude

En vérité, le chemin importe peu, La volonté d'arriver suffit à tout.

Albert Camus

1.1 Contexte général

Au cours des dernières décennies, l'humanité fait face à une forte croissance de la demande énergétique. Ce phénomène a entraîné des fortes mutations dans le système de production et de distribution de l'énergie électrique. Différents facteurs climatiques, énergétiques ou économiques, tel que le réchauffement climatique et la raréfaction des énergies fossiles, soutiennent une prise de conscience accrue dans le domaine des énergies renouvelables. Ainsi l'intégration de nouvelles sources naturelles renouvelables présentent un véritable levier pour le changement du paradigme énergétique. Ces dernières constituent ainsi une alternative aux énergies fossiles à plusieurs titres : elles n'émettent pas de gaz à effet de serre et elles sont inépuisables. La nature offre une variété de sources d'énergie considérées comme inépuisables à l'échelle humaine et respectueuses de l'environnement, comme l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, etc. Actuellement, la production d'électricité à partir des technologies de l'éolienne et du photovoltaïque devient de plus en plus importante et trouve un grand intérêt dans les régions ayant des conditions climatiques favorables. À titre d'exemple, la stratégie de la transition énergétique canadienne dans les prochaines décennies met en valeur la nécessité du renforcement de l'efficacité énergétique et de l'intégration des énergies renouvelables. Cette stratégie prévoit une hausse de plus de 36 PJ (ou 10 TWh) de la production provenant de l'éolien et du solaire en 2030 par rapport à celui de 2007.

La Figure 1.1 présente des indicateurs clés sur la situation énergétique globale [3].

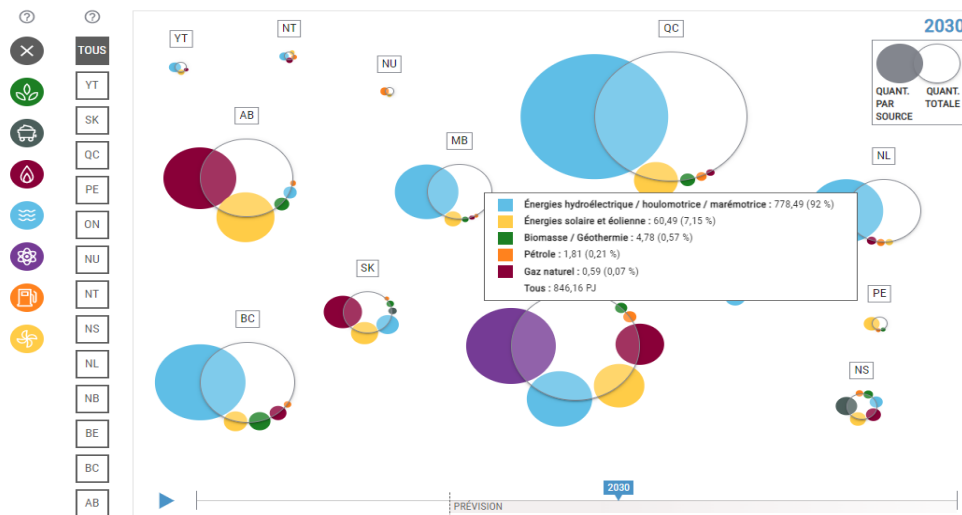


FIGURE 1.1 – Avenir énergétique du Canada[1]

Dans cette optique, le cadre pan-canadien prévoit la modernisation des filières énergétiques

canadiennes qui aident les systèmes électriques à mieux utiliser les sources intermittentes, augmente la capacité de production renouvelable à savoir l'éolien et le solaire et facilite l'intégration du stockage d'énergie renouvelable.

La Figure 1.2 présente la capacité de production des énergies renouvelables.

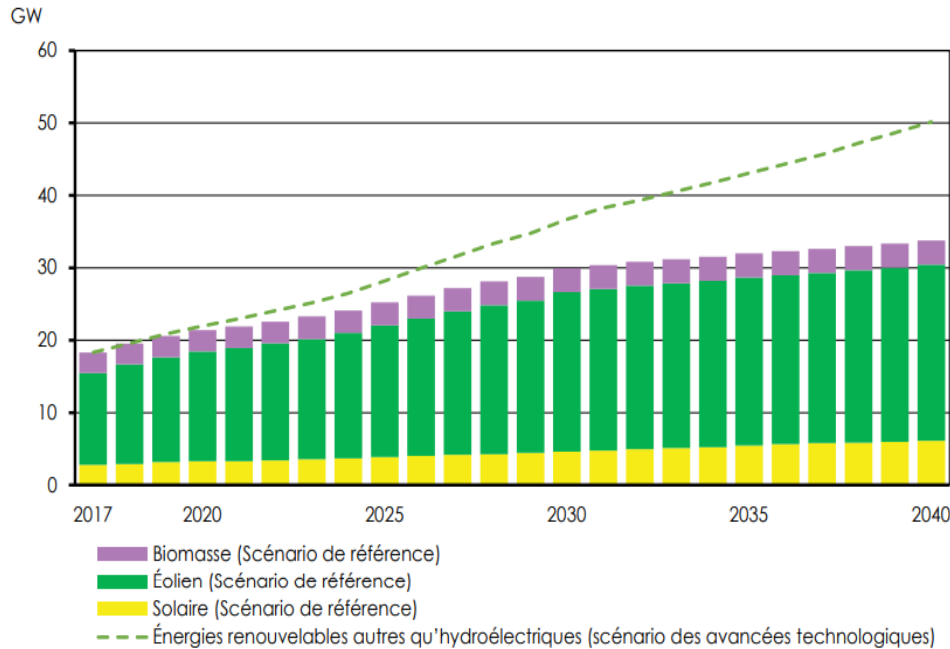


FIGURE 1.2 – Capacité de production des énergies renouvelables [1]

La capacité installée des sources renouvelables autres que l'hydroélectrique atteindra plus de 50 gigawatts d'ici 2040 soit 48 % de plus que dans le scénario de référence. L'analyse énergétique est un facteur clé pour le développement durable des systèmes électriques. La transition des collectivités éloignées vers des sources d'énergie plus propres fait partie intégrante du cadre sur la croissance propre et les changements climatiques. Comme le montre la figure 1.3, le système électrique présente des pertes d'énergie pendant la conversion, la transmission et la distribution. Ces pertes réduisent donc l'efficacité du système. Cependant, l'efficacité peut être améliorée en utilisant des systèmes de conversion à haut rendement et en réduisant les lignes de transmission. Ces caractéristiques sont fournies par les micro-réseaux. Les micro-réseaux ou micro-grid (MG) permettent l'auto production et l'autoconsommation lorsque l'énergie produite par les générateurs distribués est proche des charges. D'autre part, l'augmentation de l'utilisation des technologies d'énergie renouvelable permet de produire localement de l'électricité, de diversifier les sources et de maîtriser les impacts tous en adaptant les solutions à chaque collectivité et aux réalités de la région éloignée.

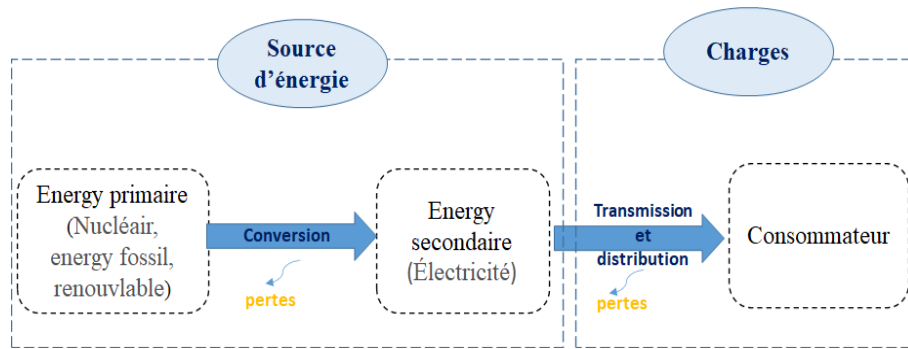


FIGURE 1.3 – Chaîne de conversion énergétique

La production intermittente et irrégulière des sources renouvelables reste habituellement un problème pour leur utilisation. Pour cela, des sources répartissables, y compris des systèmes de restauration et de stockage, sont nécessaires. En utilisant des stratégies de gestion intelligentes, les sources renouvelables et ces sources répartissables peuvent être gérées. Les micro-réseaux à courant continu (CC) et à courant alternatif (CA) peuvent être d'excellentes structures pour intégrer les sources renouvelables et le réseau électrique.

Par conséquent, la transition énergétique apportera une solution importante qui se présente par le micro réseau électrique. Grâce à la modernisation, cette solution peut atteindre les objectifs ambitieux et résoudre les problèmes posés des zones rurales.

Le niveau de maturité atteint par les technologies utilisées dans les micro réseaux telles que les compteurs communicants, le système de suivi intelligent des flux d'électricité, le stockage d'énergie, les onduleurs et charges contrôlables explique le recours de plus en plus aux micro réseaux au détriment des systèmes autonomes individuels. Les micro réseaux isolés, ciblant les zones sans raccordement possible au réseau électrique national, sont le sujet de cette mémoire. L'optimisation de la conception de ces systèmes a pour objectif premier de réduire au minimum le coût de l'électricité qui sera imputé à l'utilisateur puisque les populations vivant dans ces zones isolées ont généralement des faibles revenus. Donc, dans le cadre d'une auto production énergétique continue au niveau d'un habitat, le système visé dans cette mémoire comprendra un mix énergétique associant un système de production primaire présenté par un parc éolien, un second système de production qui est un groupe diesel, présente une source d'appui et un système de stockage comportant un banc des batteries. Ce système multi sources est destiné à alimenter des charges résidentielles en mode isolé (non connecté au réseau électrique conventionnel). Ce système de MG permet la satisfaction de la demande énergétique en respectant le comportement physique et dynamique de chaque source de façon appropriée.

1.2 Problématique

Vu la croissance significative des consommations de l'électricité et de la population, le réseau électrique devient plus maillé et interconnecté pour acheminer l'électricité des producteurs aux consommateurs. Il comprend des centrales produisant de l'énergie électrique, des lignes de transport à haute tension qui transportent l'énergie de sources éloignées vers des centres de consommation et des lignes de distribution reliant des clients individuels. Cette complexité de structure se reflète négativement sur la sûreté et la qualité de l'énergie électrique fournie au consommateur. En effet, de nouveaux modes de production énergétiques décentralisés intégrant des sources renouvelables sont prometteurs et semblent être une alternative clé permettant une électrification mondiale s'inscrivant dans une démarche de développement durable. Parmi les solutions évidentes pour l'accès à l'électricité des zones éloignées est l'extension du réseau. Cependant, plus la zone est éloignée des infrastructures et du réseau conventionnel existant et la densité de population est faible, plus le coût d'extension du réseau est élevé [4]. Le faible revenu et la faible consommation annuelle des utilisateurs potentiels dans ces zones isolées ne justifiant pas une extension du réseau. L'option d'électrification hors-réseau est alors une alternative très importante.

Il existe deux principales catégories d'électrifications :

- Une électrification individuelle hors-réseau « standalone systems » alimentant en général une maison ou commerce et non raccordée au réseau conventionnel de distribution. Cette alternative de production d'énergie exploite principalement des panneaux photovoltaïques et des batteries, et sont dénommés en anglais « Solar home systems ».
- Une électrification à travers le concept des microgrids ou mini-grids, qui est le sujet de cette mémoire.

Ce concept combine plusieurs parties. Parmi ces parties, on trouve le dimensionnement et la gestion des ressources énergétiques. Le défi majeur de l'électrification autonome est de fournir une sécurité d'approvisionnement de l'électricité avec des sources intermittentes qui dépendent des conditions climatiques. C'est dans ce contexte se situe la problématique fondamentale de cette mémoire qui se focalise sur la stabilité d'un microgrid isolé. Particulièrement, un microgrid était un enjeu pour limiter le réchauffement climatique, la raréfaction des énergies fossiles, et accroître l'autonomie locale des territoires éloignés et de maîtriser leur production. En effet, la conception d'un microgrid nécessite la connaissance du comportement des sources de production en fonction de leurs conditions technologique notamment la connaissance d'une stratégie d'opération dynamique capable de s'adapter en cas de changements climatique imprévisibles (météorologiques ou de la demande énergétique), afin de garantir la fiabilité et la stabilité du

micro réseau électrique conçu. Dans ce contexte, les travaux de recherche doivent être menés pour améliorer l'efficacité énergétique des microgrids en minimisant les pertes de la production électrique, et plus particulièrement des microgrids. S'intéresser à la conception de nouveaux systèmes électriques était un enjeu afin de satisfaire l'autonomie locale des zones éloignées et de maîtriser leur production. Ce travail souhaite contribuer à la mise en avant d'un microgrid répondant aux défis économiques, techniques et environnementales. La question qui résulte de cette recherche du contexte énergétique est : **"Peut-on trouver des compromis entre des performances économiques, techniques et environnementaux répondant à la consommation électrique d'une zone rurale en assurant un approvisionnement fiable, acceptable économiquement et respectueux de l'environnement?"**.

1.3 Objectifs

L'objectif de ce travail est de développer un programme capable de proposer le coût, et la fiabilité du MG étudié. Un microgrid est considéré ici comme un ensemble de sous système de production et de stockage d'électricité, à une échelle locale, avec leurs stratégies de pilotage. L'approche adoptée vise à agrandir l'espace des solutions de conception et à suivre une logique décisionnelle dans l'intégration de nouvelles restrictions physiques et techniques. Le développement d'une telle approche nécessite de mettre en place certaines fonctionnalités :

- La modélisation énergétique et technologique de la production de chaque sous système (éolien, groupe diesel ou batterie par exemple) ;
- Développer une stratégie de gestion afin de mener un équilibre entre la production et la consommation d'énergie ;
- L'optimisation multi-objectifs du microgrid afin de trouver une variété de solutions, compromis entre les objectifs.
- Développer un programme de simulation (sous Matlab/Simulink) pour l'évaluation des performances économiques, techniques et environnementales ;

1.4 Apport scientifique

Le travail proposé dans ce mémoire a pour objectif de chercher des compromis qui permettent de sélectionner dans l'espace des solutions un choix optimal afin de concevoir un microgrid plus performant. Dans le cadre de cette recherche, nous nous intéressons à l'optimisation

méthahéuristique multiobjectifs au dimensionnement d'un microgrid à base des énergies renouvelables. Nous avons mené l'étude sur différents indicateurs techniques, environnementaux et économiques pour choisir un bon compromis de performance entre différents services.

Dans un premier temps, il s'agit de développer un algorithme de gestion qui permet de se rapprocher d'un fonctionnement réel à base des données météorologique de la ville de Rouyn Noranda. Avec ce programme de gestion, les solutions d'optimisation seront considérées plus performantes que celles avec une stratégie classique fixée. Dans un deuxième temps, on mène l'étude sur le dimensionnement à l'aide de deux méthodes multiobjectives, une analytique et une autre basée sur un algorithme méthahéuristique par les essais particules pour traiter à la fois les subsides et les différents objectifs présentés ci-dessus. Cette optimisation multiobjective du dimensionnement est réalisée afin d'éviter les coûts d'exploitation prohibitifs et de satisfaire adéquatement la charge en considérant soit une maison unifamiliale soit une collectivité MG. Le choix des deux méthodes peut se fonder sur des critères discriminants non pris en compte dans l'optimisation mais disponibles dans le modèle. Finalement, l'algorithme développé dans ce travail est capable de :

- Simuler le fonctionnement d'un microgrid afin d'évaluer sa capacité à satisfaire la charge présente ;
- Trouver plusieurs résultats de la partie d'optimisation multi-critère des deux algorithmes pour le territoire choisi, en montrant leurs polyvalence au centre de la décision pour améliorer l'efficacité énergétique et assurer la continuité d'alimentation à travers un microgrid à courant continu à base des sources renouvelables. C'est-à-dire une variété de compromis entre diverses performances économiques, techniques et environnementales.

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduire une présentation globale du sujet du mémoire tout en élaborant le contexte global dans lequel s'inscrit notre projet d'étude. Ensuite nous avons énoncer sa problématique (position du problème à l'étude), les objectifs fixés et l'apport scientifique traiter. Cet apport qui présente la principale contribution de ce rapport, nous mène à la pertinence et à l'originalité de notre travail et à définir nos objectifs au sein de la recherche effectuée.

Chapitre 2

Aperçu sur les microgrids isolés : fiabilité et méthodes de conception

*L'homme et sa sécurité doivent constituer la première
préoccupation de toute aventure technologique.*

Albert Einstein.

2.1 Introduction

Durant cette dernière décennie, le monde connaît un développement remarquable et s'oriente vers l'exploitation des centrales de production renouvelables et décentralisées. Cela rend, la production d'électricité décentralisée, à base des énergies renouvelables, une solution pertinente permettant de remplacer les sources fossiles d'une manière partielle ou totale. Afin d'intégrer différents types de sources d'énergie renouvelables, le concept de MG a été proposé il y a plusieurs années. Ce nouveau concept sous la forme de MG, est divisé en deux parties : La première partie est la connexion de la zone isolée par extension du réseau électrique existant [5]. La deuxième consiste plutôt à étendre le réseau uniquement dans les zones densément peuplées et économiquement viables, installer des micro-réseaux dans les zones éloignées et choisir des MGs qui peuvent fonctionner en îlot dans les zones faiblement peuplées avec une demande potentielle faible. Ce dernier concept présente un réel avantage : il permet de fournir en énergie les sites difficiles d'accès ou très isolés, et d'autre part il constitue une réponse adéquate à la demande de ressources énergétiques plus respectueuses de l'environnement [6]. L'objectif de ce chapitre est de présenter la recherche bibliographique réalisée sur les MGs ainsi que les méthodes d'optimisation développées. Nous décrivons les composants et les différentes classes des MGs suivant plusieurs aspects dans la section 2.2. Puis, la section 2.6 s'intéressera aux méthodes d'optimisation de conception des MGs afin de définir l'approche globale choisie et ses différentes spécificités ainsi que les enjeux à aborder.

2.2 Généralités sur les MG isolés

Un MG peut être défini comme « Un ensemble inter connecté de générateurs, de convertisseurs d'électronique de puissance, de systèmes de stockage, et de consommateurs avec des limites électriques clairement définies, peut fonctionner en connexion vis-à-vis le réseau principal ou en îlotage ».

2.2.1 Composants d'un MG

Le concept d'un MG, ou micro-réseau, représente un ensemble de technologies de production, stockage et consommation d'électricité avec leurs stratégies de gestion.

Générateurs électriques

Ce sont des unités de production d'électricité, qui sont intégrées au réseau électrique de distribution avec un taux de production jusqu'à 50 MW. Ces unités de production peuvent être de nature classique à base d'énergies d'origine fossile, telles que les centrales à pétrole, au charbon ou à gaz naturel, ou renouvelables à base des ressources énergétiques régénérées naturellement. Ces derniers proviennent directement du soleil (solaire thermique et photovoltaïque), indirectement du soleil (énergie éolienne, hydroélectrique et photo synthétique stockée dans la biomasse), ou d'autres mouvements naturels et mécanismes de l'environnement (tels que l'hydroélectricité, l'énergie géothermique, et l'énergie des océans).

Systèmes de stockage

Les systèmes de stockage d'énergie peuvent servir de centrales de secours. Ils sont utilisés pour stocker ou libérer l'énergie électrique comme un tampon d'énergie, en soutenant le fonctionnement des sources, la transmission, la distribution et les charges [7]. Par conséquent, ils présentent une partie intégrale du MG pour résoudre les problèmes d'intermittence de puissance et de faible inertie du système dans un réseau électrique à base de générateurs éoliens. La combinaison des dispositifs de stockage d'énergie et des générateurs éoliens constitue un générateur d'énergie hybride ou un MG qui peut fournir de l'énergie non seulement pour les charges locales, mais aussi pour alimenter le réseau principal ainsi assurer sa stabilité et garantir un niveau élevé de qualité et de fiabilité.

Il existe différents types de technologies de stockage d'énergie, telles que les batteries, les super condensateurs, les systèmes de stockage d'énergie à air comprimé, les volants d'inertie et les systèmes de stockage d'hydrogène (pile à combustible + réservoirs + électrolyseur). Les avantages de l'utilisation des dispositifs de stockage d'énergie sont les suivants :

- Surmonter la variabilité intermittente de l'énergie renouvelable.
- Améliorer la qualité de l'énergie.
- Soutenir la régulation du système (service système).
- Garantir le suivi de la charge.
- Engager le générateur à respecter la charge prévue.

Les technologies de stockage d'énergie peuvent être classifiées en deux types en fonction des densités d'énergie et de puissance et en fonction de la dynamique de l'énergie du stockage soit à long terme ou à court terme :

Technologie de stockage d'énergie à réponse à court terme : Cette catégorie comprend les technologies de stockage d'énergie qui ont une densité de puissance élevée (MW/m³) et peuvent répondre à des courtes portées. Leur temps de réponse pour la libération et la restauration d'énergie électrique est très court : de quelques millisecondes à quelques minutes. Ils fournissent une amélioration de la qualité de l'énergie, principalement pour maintenir la stabilité de la tension pendant les transitoires (quelques secondes ou minutes) [8]. Cette amélioration de la qualité de l'énergie s'applique par un équilibrage de tension rapide pour les échanges d'énergie et pour la fourniture de services, surtout dans les domaines de la production d'énergie à base d'énergie renouvelable et de véhicules électriques qui sont les principales applications de ces technologies de stockage d'énergie.

Technologie de stockage d'énergie à réponse à moyen terme : Ces technologies de stockage d'énergie peuvent contenir et fournir de l'énergie électrique de quelques minutes à quelques heures. Ils sont principalement utilisés dans les applications des réseaux électriques et contribuent à la régulation des fréquences, à la congestion du réseau et à la gestion de l'énergie. Ils peuvent continuellement libérer l'énergie électrique pendant une période relativement longue (de quelques dizaines de minutes à plusieurs heures), et sont donc généralement utilisés comme réserve d'énergie à long terme. Ce type de stockage d'énergie à moyen terme, comme les batteries de diverses technologies, le stockage d'hydrogène et le système de stockage d'air comprimé, peut être utilisé dans des systèmes d'alimentation sans coupure et pour fournir des services auxiliaires. Ils ont également été proposés pour résoudre le problème d'intermittence des éoliennes : par exemple, en utilisant des batteries pour stocker l'énergie éolienne supplémentaire sur des périodes relativement longues [9].

Technologie de stockage d'énergie à réponse réelle à long terme : Ces technologies sont capables de retenir et de fournir de l'énergie à long terme (jours, semaines ou mois). Ils sont généralement appliqués pour combler les écarts de demande et d'approvisionnement sur une journée ou plus.

Charges

Les MGs peuvent être utilisés dans plusieurs cas à travers le monde. L'une des applications les plus courantes comprend les installations dans des zones éloignées, où le coût de connexion au réseau correspondant est très élevé. Dans ce contexte, certaines applications courantes des MGs autonomes peuvent inclure les stations T/C, les petits systèmes de dessalement, les installations de pompage d'eau, les fermes isolées, les abris d'hiver ou d'été et les petites communautés ou les communautés isolées du réseau (par exemple, les îles éloignées).

Convertisseurs électroniques

Un MG contient aussi des équipements auxiliaires comme les convertisseurs d'énergie, des compteurs électroniques, des câbles électriques, des capteurs, des bus, etc. Les convertisseurs sont souvent utilisés dans les MGs. Par exemple, un MG fournissant du CA nécessite un onduleur à la sortie pour convertir le CC délivré par la source d'énergie en CA. Inversement, pour les MGs fournissant du CC, il est indispensable d'installer des redresseurs (convertisseur de CA en CC) à la sortie de tout générateur de CA.

2.3 Classification des MG

La section précédente a montré les principaux composants du MG. Ces éléments sont réunis pour donner un MG fiable et capable d'assurer l'équilibre production/consommation. La conception des MGs suit une architecture qui dépend de l'application, ainsi la classification de l'architecture des MGs peut se faire selon trois critères en trois classes principales [10]

- Le premier critère est le type de puissance qui peut être délivrer AC, DC ou Hybride.
- Le deuxième critère est le mode de fonctionnement, qui peut être isolé ou connecté.
- Le dernier critère est le type de contrôle, qui peut être centralisé ou décentralisé.

La figure 2.1 montre la classification des MGs en fonction de ces derniers critères.

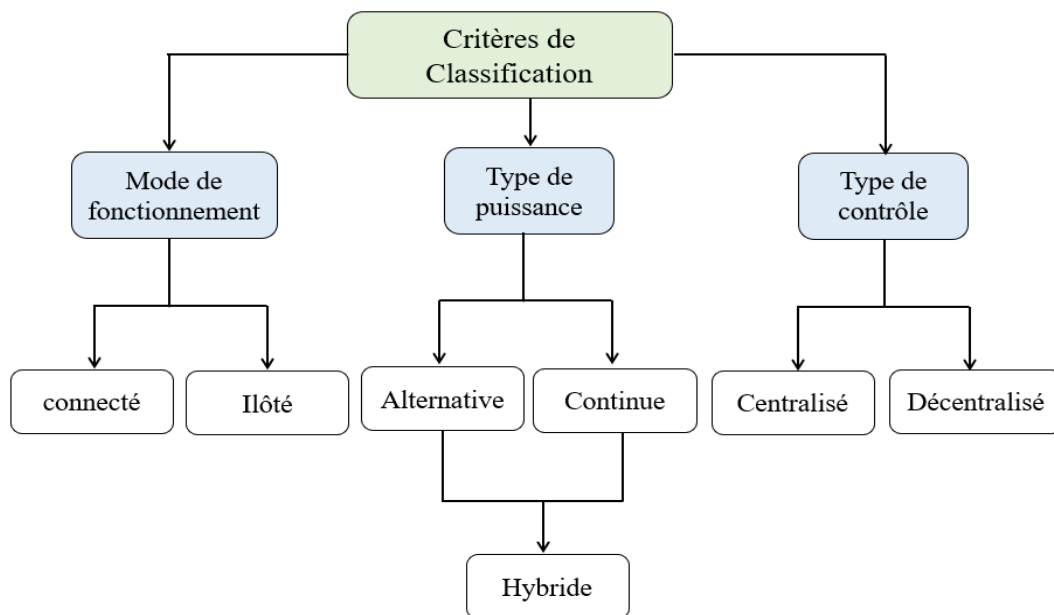


FIGURE 2.1 – Classification des MGs

2.3.1 Architectures de distribution en fonction de la puissance fourni

Dès qu'il faut transporter de l'électricité entre les sites de production et les sites de consommation, le courant alternatif est devenu la technologie de pointe. Sa force réside dans la possibilité d'utiliser des transformateurs pour l'amener à haute tension afin de rendre son transport plus facile et plus rentable [11]. Les générateurs, à la fois en CA et en CC, produisent de l'électricité à des niveaux de tension relativement bas, ce qui n'est pas pratique pour la transmission à longue distance, sinon cela entraîne des pertes d'énergie énormes et coûteuses. A cet effet, l'utilisation du transformateur élévateur est devenue nécessaire, impliquant l'utilisation du CA. Le CA offre également un degré élevé de flexibilité d'interconnexion pour former un réseau électrique solide, ce qui rend l'approvisionnement en électricité plus fiable. Le principal avantage de l'alternative : la flexibilité de connexion des charges et de la production sur le chemin de puissance. Cet avantage est particulièrement important si le corridor de transport traverse une zone densément peuplée et si les installations de production sont situées le long de l'itinéraire. En revanche, l'alternative est coûteuse : le système décrit ci-dessus est très coûteux car, en réalité, il nécessite la construction d'une infrastructure tout électrique de bout en bout. L'inconvénient majeur du CA est la présence de puissance réactive. Le CC présente plusieurs avantages. En effet, le CC est plus facile à transporter sur de longues distances. Les stations de conversion (côté redresseur et côté onduleur) peuvent réguler très rapidement les valeurs tension/courant et donc le flux de puissance. Le déphasage entre les extrémités d'émission et de réception est insignifiant si la seule connexion est en CC. En fait, les réseaux connectés peuvent même fonctionner de manière asynchrone puisque le courant continu n'a pas d'angle de phase et indépendant de la fréquence. De plus, l'émergence de nouveaux systèmes à CC tels que le PV et d'autres appareils électroménagers et la réduction des prix des batteries ont ouvert la voie aux micro-réseaux à CC. Néanmoins, la combinaison d'un transport massif de puissance sur une liaison à CC à haute tension économique et, en parallèle, d'un réseau à CA à plus basse tension pourrait, dans de nombreux cas, offrir une solution optimale alliant faible coût et grande flexibilité, ainsi que la possibilité d'approvisionner le consommateur tout au long du trajet. Cependant, cela ne va pas sans quelques problèmes techniques : les perturbations dans la transmission CC entraîneront souvent la rupture de la liaison CA lorsque les angles de phase augmentent. Principalement, les MGs peuvent être classés en trois types selon le type d'alimentation du bus : micro-réseaux CA, micro-réseaux CC et hybrides. Le MG hybride est une architecture mixte, qui contient deux bus, un bus AC et un bus DC tel est présenté dans la figure 2.2.

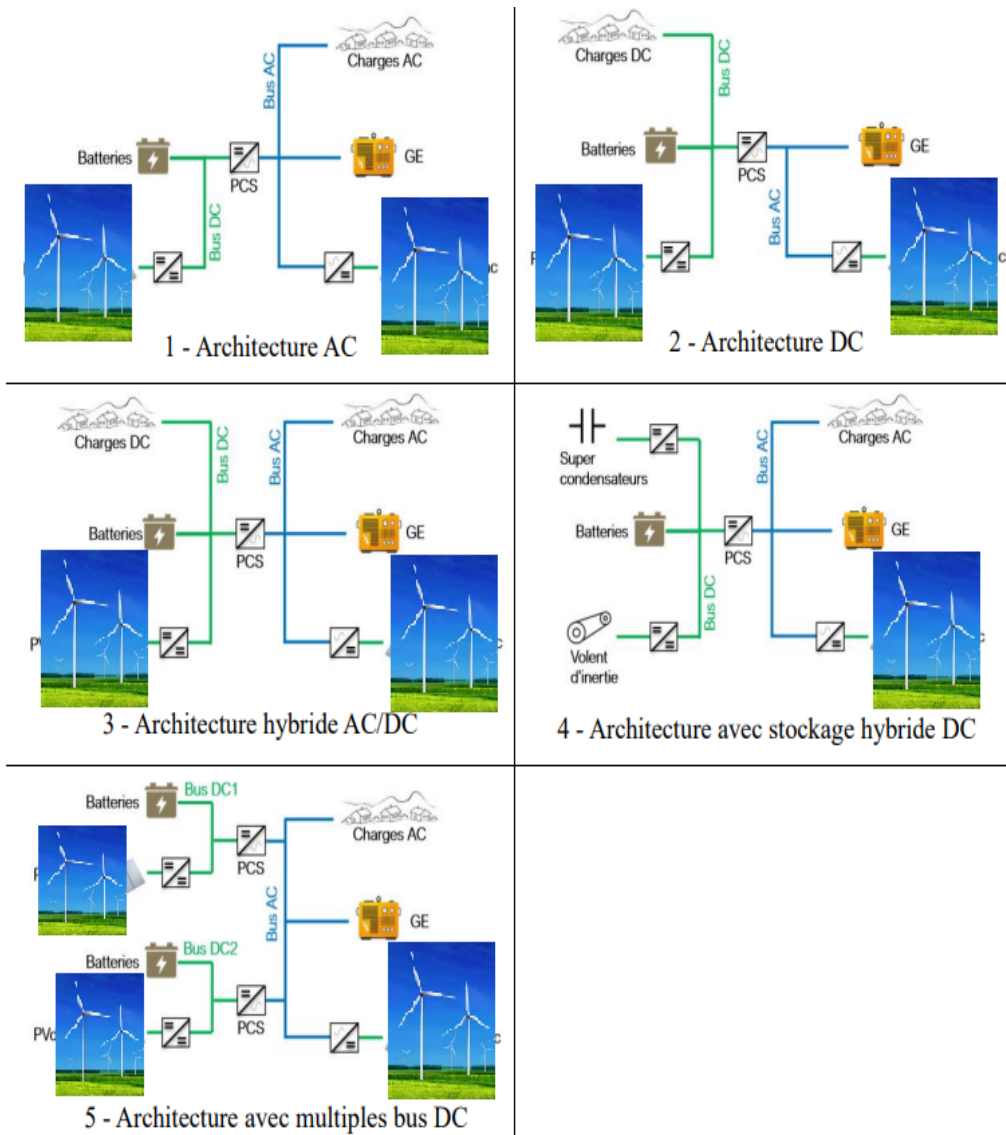


FIGURE 2.2 – Différentes architectures de distribution, inspirées de [2]

2.3.2 Classification des MGs selon le mode d'opération

Un MG peut fonctionner en mode connecté (ON-grid) ou en mode îloté (OFF-grid) pour augmenter la fiabilité de l'alimentation électrique en se déconnectant du réseau en cas de panne du réseau. L'électrification rurale et les petites îles sont quelques exemples de MG. Leur capacité est de l'ordre de quelques watts à 10 MW. Les îles plus grandes, les sites industriels, les sites militaires, les hôpitaux, les centres de données et les réseaux de distribution existants sont quelques exemples de MG insulaires et connectés, leur puissance varie de 500 kW à 10 MW [12]. Les grands réseaux de transport et d'interconnexion transportent de très grandes quantités d'énergie sur de longues distances, ils sont régulés en tension pour réduire le courant (les pertes), les niveaux de tension sont compris entre 225 kV et 400 kV et peuvent aller jusqu'à

1000 kV. Ensuite, il y a les réseaux de distribution régionaux, le niveau de tension varie entre 63 kV, 90 kV et 225 kV. Enfin, les réseaux de distribution desservent les consommateurs finaux en moyenne ou basse tension. Les MGs, comme leur définition l'indique, contiennent des charges et ils sont conçus dans des zones peuplées, ils ont donc des niveaux de tension inférieurs à ceux des grands réseaux de transport et de distribution, ils sont connectés aux réseaux de distribution basse tension (parfois moyenne tension), où le niveau de tension varie de 400 V à 20 kV. Les MGs connectées disposent d'un point d'interconnexion (appelé point de couplage commun) avec le réseau principal, leur permettant de fonctionner dans les deux modes. Les MGs ayant cette caractéristique de fonctionner dans les deux modes doivent passer d'un cas à l'autre de manière fluide et transparente. Cette capacité à changer de mode rend le système plus résilient et précieux en cas de panne. Ces aspects de basculement d'un mode à l'autre ne sont pas présents dans les MGs fonctionnant uniquement en mode îloté. Un MG dispose d'une infrastructure qui communique des informations entre l'unité centrale de contrôle et ses autres parties de mesure et de contrôle, mais en général, une infrastructure est installée en parallèle entre toutes ces parties et le gestionnaire de réseau principal. En mode connecté au réseau, la tension et la fréquence sont contrôlées par l'unité de contrôle du réseau principal, ce qui simplifie la gestion du MG, car il devient comme un composant secondaire du réseau principal et ne satisfait donc que les instructions de l'unité principale. Les seuls paramètres à contrôler sont ceux des sources d'énergies, des charges et des systèmes de stockage. Contrairement à ce mode, le mode îlot est plus complexe ; en plus des paramètres ci-dessus, la tension et la fréquence doivent être contrôlées sur tous les composants du MG îloté. Parmi les perturbations majeures rencontrées dans les MGs, le passage involontaire du mode connecté au mode îloté.

2.3.3 Classification des MGs selon le type de control

Comme mentionné précédemment, l'élément clé du déploiement d'un MG est l'utilisation d'une gestion optimale et efficace de l'énergie, qui peut être assurée par un système de contrôle centralisé ou décentralisé. Dans le système de contrôle centralisé, le contrôle est assuré par une unité de contrôle unique, qui gère l'ensemble des MGs. Il reçoit des informations internes du système (des capteurs), et des informations externes (données climatiques) et suit en permanence le marché de l'énergie, notamment les évolutions de prix, et génère une solution prenant en compte toutes ces données en même temps. Par conséquent, la solution calculée est réalisable et optimal, et répond aux exigences du système, car il est généré selon toutes les contraintes du système [13]. Cependant, la collecte de toutes les données du système dans une seule unité de contrôle entraîne trop d'erreurs, trop de variables et d'équations. Les contraintes du système

sont accumulés et le grand nombre de variables rend l'optimisation très difficile, très lente, et le système devient plus compliqué à résoudre. Ce type de contrôle nécessite une forte approche constitutionnelle et surtout rapide pour générer la solution en temps réel temps.. La deuxième structure de contrôle possible est le contrôle décentralisé. Il est développé pour pallier les lacunes du contrôle centralisé. L'avantage de ce contrôle est que chaque unité s'occupe localement de son sous-système, donc elle aura moins de tâches à effectuer. L'unité locale collecte les mesures liées à son sous-système et analyse la requête qu'elle reçoit de l'unité globale. Dans un premier temps, cette unité génère une solution locale ne prenant en compte que les contraintes de son sous-système, ce qui réduit le nombre de variables et donc le temps de calcul. Après avoir calculé les solutions locales, l'unité centrale utilise ces résultats pour trouver la solution optimale pour le système complet, sans tenir compte de toutes les contraintes du système, ni des mesures effectuées au niveau des capteurs des sous-systèmes. Le temps de calcul est court, et les approches utilisées sont plus simplifiées, et parfois elles sont linéaires, et ne nécessitent pas de logiciel puissant pour le calcul. Le contrôle décentralisé, malgré ses avantages, présente certains inconvénients. Cela nécessite plusieurs unités de contrôle locales, plus de capteurs, plus d'outils de communication et d'autres installations, et donc un investissement plus coûteux. De plus, les solutions calculées par les unités locales peuvent être rejetées par l'unité centrale, car elles ne sont pas réalisables.

2.4 Les avantages et les fonctionnalités des MGs isolés

Les principaux avantages de l'intégration de la technologie des micro réseaux isolés sont les suivants :

Techniquement : les MGs offrent une gestion optimisée de la production énergétique d'origine renouvelable à l'échelle locale. Ils peuvent apporter un service auxiliaire au réseau public de distribution, en l'aidant à maintenir la stabilité de la tension et en l'allégeant lorsque il subit un incident de coupure de distribution.

Économiquement : Les MGs créent également des occasions de l'investissement de réseaux, la proximité entre production et consommation d'électricité permettant d'optimiser l'acheminement de la transmission d'énergie. Ainsi ils réduisent le volume des pertes techniques.

Socialement : Un MG fournit des satisfactions à l'évolution des besoins fondamentaux d'un territoire en énergie. Il offre notamment un réseau plus sûr et plus fiable en cas d'incident. Sa caractéristique d'être considéré comme un projet local, facilite la création d'initiatives

et de nouveaux partenariats entre les acteurs locaux.

Environnement : ils facilitent l'intégration des énergies renouvelables sur les réseaux et ainsi d'éviter l'installation de centrales thermiques en zones populaire.

Bien que ce soit les avantages d'un MG isolé, différentes fonctionnalités peuvent être distinguées.

2.5 Fiabilité des MGs isolés

Dans le contexte de la conception des MGs isolés, la fiabilité d'un réseau fait partie de sûreté de fonctionnement. A titre de définition "la fiabilité du système est sa capacité à fournir l'électricité demandée à tous moment d'utilisation selon des critères définis et acceptables". Pour cette raison l'objectif d'une analyse de sûreté de fonctionnement d'un MG isolé est de chercher à minimiser les interruptions, donc s'intéresser à l'indisponibilité du réseau et ses coupures de production d'énergie. Cet objectif peut être effectué de deux façons :

- Quantifier la probabilité pour que le système fonctionne sans incident durant sa durée de fonctionnement,
- Quantifier le nombre moyen de coupures de courant et/ou la durée moyenne d'indisponibilité en cas ou le système va subir des interruptions.

Dans le cas d'un MG isolé, il est indispensable d'estimer la fiabilité en utilisant des indicateurs d'indisponibilité et d'observer l'impact du dimensionnement sur ces indicateurs. Ces derniers peuvent être classés en quatre catégories :

- Les indicateurs de probabilité : probabilité d'avoir un incident ;
- Les indicateurs de fréquence : nombre d'occurrences dans un intervalle de temps précis ;
- Les indicateurs de durée : durée totale ou moyenne des défaillances ;
- Les indicateurs d'espérance : énergie perdue pour les consommateurs.

La fiabilité est de plus en plus une étape prépondérante dans le développement de la conception des projets des MGs. Parler sur l'accès à l'électricité n'est plus suffisant, et une certaine qualité de service est exigée. Ainsi la prise en compte de la fiabilité à la conception considèrent les premières études : l'adéquation, le dimensionnement des réserves, et la planification des moyens de production. Certaines études mettent en évidence le réseau de transport et le réseau de distribution. Pour les MGs considérés dans ce mémoire, il n'est pas fait de distinction entre le réseau de transport et le réseau de distribution.

2.6 Conception des MGs isolés

L'étape de conception d'un MG est une étape qui consiste à effectuer « le choix, le design, et le dimensionnement optimal des sources de production et de stockage d'énergie pour améliorer les performance en terme de coût et fiabilité tout en garantissant l'alimentation des consommateurs du MG » Durant la conception des MGs on passe généralement par les phases suivantes :

- Identification du potentiel énergétique du site ;
- Modélisation des systèmes de production, de conversion et de stockage d'énergie ;
- Estimation de la consommation et projection moyenne et long terme ;
- Détermination des critères d'optimisation.

En effet, pour déterminer le dimensionnement optimal d'un MG, une zone spécifique pour un MG autonome est d'abord définie, puis des données météorologiques telles que la vitesse du vent, le rayonnement solaire et la température ambiante sont obtenues. La capacité des composants du système de production d'énergie renouvelable, comme le nombre de turbines, le générateur photovoltaïque, la batterie de stockage et la taille de l'onduleur, est ensuite calculée. Il est à noter que plusieurs considérations doivent être prises en compte dans le dimensionnement des MGs autonomes, telles que le kWh/an nécessaire pour couvrir la demande de charge, le kWh/an généré par le système de production d'énergie renouvelable, le Ah des bancs de batteries, la surface du système qui occupera et le coût du système. Les différentes méthodes et outils existants seront explorés dans les sections suivantes. Une revue des différentes méthodes de dimensionnement est présentée. Ensuite les principaux indicateurs de dimensionnement seront listés. Les différentes méthodes et outils existants seront explorés dans les sections suivantes. Dans un premier temps, une revue des différentes méthodes et outils de conception est présentée. Ensuite les principaux indicateurs de conception retrouvés seront listés.

2.6.1 Critères d'évaluation du dimensionnement des composants du MG

Dans la littérature plusieurs indicateurs sont utilisés dans les méthodes de conception. En effet, le type de puissance est le premier critère à choisir avant de concevoir le MG [14]. Un MG à CA n'a pas les mêmes conditions de fonctionnement qu'un MG à CC. Par conséquent, les deux types de micro-réseaux n'ont pas la même architecture ni les mêmes stratégies de gestion d'énergie. Pour le reste de l'évaluation d'un MG, la plupart des indicateurs rapportés dans la littérature peuvent être classés en quatre grandes catégories, à savoir : les évaluations économiques, la fiabilité, environnementales et sociales. Ces paramètres sont utilisés pour évaluer

et estimer la disponibilité et la faisabilité du MG pour aider à concevoir et construire un système optimal et adapté à une application donnée. L'évaluation économique est un facteur principal dans la détermination du coût minimum initial, d'entretien, de remplacement et de tout autre coût futur souhaitable d'un MG. L'évaluation de la fiabilité évalue la capacité du système électrique à assurer la cohésion du MG afin de satisfaire la demande de charge. L'évaluation environnementale évalue la quantité de CO_2 et d'autres émissions nocives produites par le système pendant une période donnée. L'évaluation sociale évalue la capacité du MG à produire de l'énergie pour augmenter l'IDH. De plus, il évalue l'acceptation sociale de l'installation d'un MG et sa création d'emplois. Le résumé des paramètres d'évaluation pour un MG autonome est illustré dans le tableau 2.1.

TABLE 2.1: Résumé des critères d'évaluation du dimensionnement des MGs basés sur les énergies renouvelables

Évaluation	Indicateur	Description	Équation
Paramètres techniques	Probabilité de Perte de Puissance d'Alimentation (LPSP : Loss of Power Supply Probability). La probabilité de perte de charge (LOLP) ou (LLP) Loss of Load probability	Le pourcentage d'alimentation qu'il n'est pas en mesure de satisfaire la demande de charge. Le rapport de déficit énergétique total	$LPSP = \frac{\sum_{t=1}^T (P_{Load} - P_{HPS})}{\sum_{t=1}^T P_{Load}}$ $LLP = \frac{\sum_{t=1}^T DE(t)}{\sum_{t=1}^T E_{Load}(t)}$
	L'espérance de perte de charge (LOLE : Loss of load expected) ou (LOEE : expected energy)	La capacité de production disponible	$LOLE = \sum_{t=1}^T E[LOL(t)]$ $LOEE = \sum_{t=1}^T E[LOL(t)]$
	Le défaut d'alimentation (DPS) ou (DPSP : Deficiency in Power Supply Probability)	Le total de la pénurie d'électricité à chaque heure (DPSP)	$DPS = \sum_{t=1}^T LD(t)$ $DPSP = \frac{DPS}{\sum_{t=1}^T E_{Load}}$
	Facteur de perte équivalent (ELF : Equivalent Loss Factor)	Le rapport des heures effectives d'indisponibilité par rapport au nombre total d'heures	$ELF = 1/T \sum_{t=1}^T \frac{E(Q(t))}{D(t)}$
	Déficit énergétique total (TED : Total Energy Deficit)	Le rapport de l'énergie non fournie au consommateur sur l'énergie totale requise.	$LPSP = \frac{\sum_{t=1}^T (E_{Load} - E_{HPS})}{\sum_{t=1}^T E_{Load}}$

Paramètres économiques	Le coût net actualisé (NPC :Net Present Cost) ou (TPC :total present cost) ou (NPV :Net present value) ou le coût total (TC :total cost)	Les coûts totaux d'investissement, de maintenance, d'exploitation et de remplacement tout au long de la durée de vie du système	$NPV = \sum NPV_{income} + \sum NPV_{end} - C_{investment} - \sum NPV_{O\&M} - \sum NPV_r$
	Le coût sur cycle de vie (LCC : Life Cycle Cost)	Les coûts de fonctionnement du système tout au long de sa durée de vie n'incluent pas les coûts de fabrication et d'élimination	$LCC_i = C + OM_{ni} + R_{ni}S_{ni}$
	(COE) ou (LCE :Levelised cost of energy) ou Le coût actualisé de l'énergie (LCOE)	Le rapport des coûts et de l'énergie totale consommée par la charge	$LCE = TAC/E_{tot}$, TAC est le coût total annualisé du système
Environnement	Émissions totales de CO_2 ou émissions de carburant. (LCA :Life cycle assessment)	Quantité totale en kg d'émissions de CO_2 produites par le système sur une période donnée. L'évaluation de toutes les étapes de vie d'un composant du système hybride	$ECO_2 = S_{E(CO_2)}(kg/l) * F(t)(l/h)$ dioxyde de carbone ou $S_{E(CO_2)}$ est l'émission spécifique de carbone par litre de carburant est donné par 2,7kg/l
Critères Sociaux	Indice de développement humain (IDH)	L'IDH est un indicateur de développement d'un pays qui prend en compte l'espérance de vie à la naissance, les années de scolarisation attendues et le revenu national brut par habitant. Il dépend de la consommation d'électricité, de sorte que l'énergie supplémentaire pouvant être fournie par le système hybride peut améliorer l'indice IDH.	$HDI = 0.0978 \ln(E_{LoadAnCap}) - 0.0319$

2.6.2 Approches de dimensionnement des MGs

Plusieurs méthodologies ont été décrites dans la littérature indiquant la diversité des méthodes, probabiliste, analytique, analytique itérative et d'intelligence artificielle, utilisées pour le dimensionnement optimal des MGs. La façon la plus simple de les classer pourrait être faite en

fonction de leur niveau de complexité.

A) Les techniques de dimensionnement classiques :

Un nombre limité d'études ont récemment été réalisées à l'aide des méthodes classiques d'optimisation de la taille d'un MG autonome. La plupart de ces études ont été menées à l'aide d'algorithmes itératifs [15]. Smaoui et al. [16] a proposé une méthodologie d'optimisation basée sur la technique itérative pour optimiser la taille d'un PV-WT-FC afin de fournir une unité de dessalement pour l'île de Kerkennah au sud de la Tunisie. L'algorithme d'optimisation a été mis en œuvre en deux parties en calculant les puissances installées FC et EL et en testant la partie combinaison proposée pour évaluer les performances techniques. L'objectif principal de l'optimisation était de minimiser le coût d'investissement total du système. L'étude a révélé que le système hybride proposé pouvait répondre à la demande de charge, et les caractéristiques complémentaires de la combinaison hybride de PV et de WT réduisaient les coûts d'installation dus à la diminution des besoins de stockage. Quelques études ont récemment utilisé LP pour optimiser la taille d'un système hybride autonome avec PV et WTs [17]. Nogueira et al. [18] a proposé une méthodologie qui utilise LP pour dimensionner et simuler un SEH (PV-WT-BSS) autonome pour une zone rurale éloignée en minimisant le T/C du système tout en satisfaisant la demande de charge. La fiabilité du système a été évaluée en utilisant le paramètre LPSP. Le dimensionnement optimal du système a été réalisé avec six scénarios différents, chacun avec des durées variables de périodes critiques de quantités prédéterminées d'heures consécutives et LPSP.

B) Les techniques de dimensionnement artificielles :

Les méthodes d'IA sont utilisées pour pallier l'indisponibilité des données météorologiques pour le dimensionnement d'un SEH autonome dans les zones reculées. Il peut gérer la fluctuation non linéaire et il peut être classé comme un algorithme de prédiction pour prédire les rapports de dimensionnement d'un SEH autonome. L'IA a été mise en œuvre par plusieurs chercheurs pour atteindre la taille optimale de SEH autonome. Ces techniques peuvent traiter plusieurs problèmes objectifs et fournir un ensemble de solutions optimales. Les algorithmes artificiels les plus récents appliqués pour les SEH autonomes sont discutés ci-dessous. Ogunjuyigbe et al. [19] a utilisé l'AG, pour le dimensionnement optimal et pour l'allocation du SEH en mode autonome. Dans cette étude, les auteurs ont étudié cinq combinaisons différentes pour les charges résidentielles et la possibilité d'utiliser de petites GD agrégées à la place d'un seul diesel de grande taille. L'étude a révélé que le SEH (PV-WT-GD-BSS) est la combinaison la plus optimale en termes de

LCC minimum, de COE, d'énergie de décharge nette et d'émissions de CO₂. En outre, l'étude a révélé que l'utilisation d'un GD fractionné agrégé plutôt qu'un seul diesel de grande taille était plus rentable. PSO est l'un des algorithmes heuristiques les plus populaires pour résoudre les problèmes d'optimisation non linéaire en raison de sa simplicité, de sa facilité de mise en œuvre et de sa convergence rapide. Paliwal et al. [20] a mis en œuvre PSO pour trouver la combinaison optimale de PV, WT, GD et unités de batterie en termes de fiabilité (P(R) et P(H)), de SCC social et de LCOE en tant que paramètres économique. En conséquence, les paramètres de fiabilité ont été respectés avec moins d'unités de stockage en utilisant celles avec de grandes capacités de stockage, ce qui a réduit les coûts de remplacement. En outre, l'intégration d'un SEH avec les GD a réduit le CSC. Sanchez et al. sanchez2014techno a utilisé PSO pour optimiser la taille des systèmes PV, WT et SEH autonomes pour la charge résidentielle éloignée à Chetumal, au Mexique. La fonction objectif de l'optimisation était de minimiser le système T/C tout en assurant sa fiabilité. Le paramètre LPSP a été utilisé pour évaluer la fiabilité du système. La taille optimale des composants a été trouvée en termes de T/C le plus bas depuis 20 ans. Hassan et al. [21] a proposé un PSO modifié pour trouver la combinaison optimale du SEH PV/WT/BSS autonome et du système SEH PV-WT connecté au réseau. L'objectif économique de cet exercice d'optimisation était de minimiser le TIC du système. L'algorithme proposé a fourni le TIC optimal pour le mode autonome. Bo rhanazad et al. [22] a utilisé MOPSO afin d'obtenir la meilleure configuration du système hybride PV-éolien-diesel-batterie pour trois stations en Iran, à savoir Nahavand, Raf-sanjan et Khash. Ce pendant, plusieurs approches d'optimisation de l'intelligence artificielle de nouvelle génération basées sur des algorithmes inspirés de la nature se sont révélées plus acceptables que les approches traditionnelles en raison de leur capacité à rechercher des solutions optimales locales et globales, telles que les algorithmes de colonie de fourmis, l'algorithme de recherche de nourriture bactérienne, l'abeille artificielle, l'algorithme de colonie, l'algorithme de recherche d'harmonie, l'algorithme de recherche gravitationnelle, l'algorithme de compétition impérialiste et l'algorithme de recherche tabou.

C) Outils/logiciels de dimensionnement :

Une multitude de logiciels ont été utilisés pour la conception et la simulation des MGs qui peuvent être classifiés en 4 catégories [23] :

- Des outils de pré faisabilité pour le calcul du potentiel énergétique et l'analyse des coûts ;

- Des logiciels de dimensionnement des sources de production et de stockage ;
- Des logiciels de simulation qui évaluent la fiabilité des microgrids ;
- Des outils de R& D qui peuvent effectuer des analyses variées.

Récemment, deux outils logiciels, à savoir HOMER et iHOGA, ont été principalement utilisés pour dimensionner un système hybride PV-WT autonome. HOMER peut optimiser et simuler des systèmes énergétiques comprenant des sources renouvelables et conventionnelles, ainsi qu'un ESS en mode autonome ou connecté au réseau. L'optimisation peut être effectuée à l'aide de données météorologiques antérieures selon des données moyennes mensuelles ou horaires basées sur l'emplacement du site. HOMER Pro est la version améliorée de HOMER avec quelques fonctionnalités supplémentaires telles qu'un optimiseur, un module pluriannuel, une batterie avancée, des options de profil de charge et des limites de demande mensuelles, et la possibilité de se connecter au logiciel Matlab. Le logiciel HOMER est largement utilisé pour dimensionner un système d'énergie hybride PV et WT autonome et d'autres sources d'énergie et systèmes de stockage intégrés [24–27]. Le logiciel est limité car il n'effectue qu'une optimisation à objectif unique en minimisant le NPC et les variables d'entrée doivent être insérées par l'utilisateur.

iHOGA est un autre outil logiciel utilisé dans l'optimisation de la taille des HES PV-WT autonomes. iHOGA est un logiciel d'optimisation des systèmes énergétiques hybrides développé par le département d'ingénierie électrique de l'Université de Saragosse. L'optimisation peut être effectuée en utilisant des données d'entrée de composants, de ressources économiques et de contraintes. La simulation est effectuée pendant un intervalle de 1 h dans lequel toutes les variables du système restent inchangées tout au long de la simulation. Un tel logiciel utilise l'algorithme génétique (AG) pour effectuer l'optimisation de la taille d'un ou plusieurs objectifs et des stratégies de contrôle optimales avec moins de temps de calcul par rapport à l'utilisation du AG seul.

“Renewable Energy Technologies Screen” (RETScreen) est un logiciel développé par le ministère canadien des ressources naturelles pour évaluer technico-économiquement les systèmes énergétiques. C'est un logiciel gratuit exploitant une interface développée sur Excel qui permet en plus des analyses technico-économiques d'effectuer des analyses de sensibilité, une analyse financière et une évaluation environnementale .

2.6.3 Schéma récapitulatif du dimensionnement :

De cette brève revue de littérature, un schéma récapitulatif résumant les objectifs et les critères de dimensionnement pour les MGs autonomes est ci-dessous présenté (Figure 2.3).

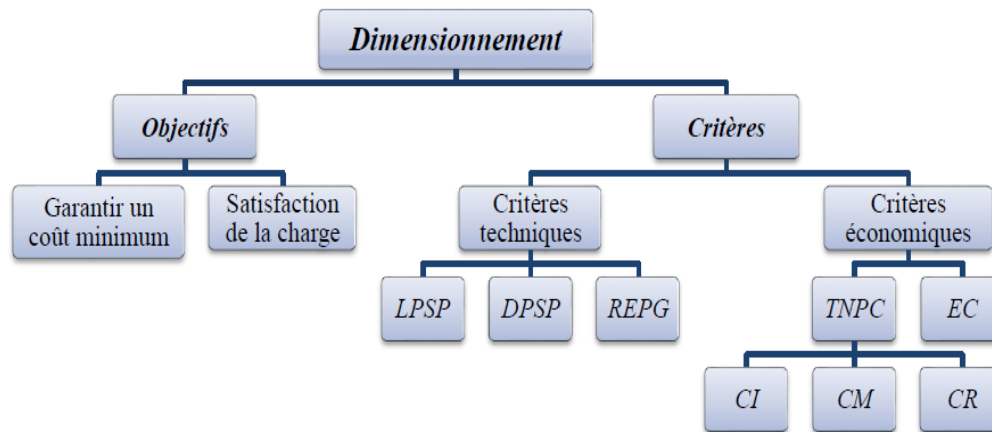


FIGURE 2.3 – Principe de dimensionnement

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une revue des principaux aspects techniques des MGs isolés. Nous avons introduit une présentation globale du sujet du mémoire tout en expliquant le contexte global dans lequel s'inscrit notre projet d'étude. On a bien précisé les principaux verrous associés à la conception de ces systèmes d'énergie.

Chapitre 3

Modélisation et gestion du Microgrid

L'homme et sa sécurité doivent constituer la première préoccupation de toute aventure technologique.

Albert Einstein.

3.1 Introduction

La modélisation des systèmes physiques est une exigence importante dans les domaines de la conception, de la supervision, du diagnostic, elle permet de prévoir les comportements des différents composants du système et facilite la bonne compréhension des divers phénomènes physiques. Afin d'évaluer la capacité d'un MG à répondre à la consommation électrique, il nous faut modéliser la production électrique de chaque technologie en fonction des conditions météorologiques et des contraintes internes. Ces modèles doivent être précis afin de garantir l'adéquation entre production et demande mais également être calculés rapidement pour simuler l'opération du système dans un temps raisonnable. En effet, ce chapitre a pour principal objectif la modélisation d'un MG avec des sources renouvelables. Dans un premier temps, nous allons rappeler la modélisation des composants du MG afin de montrer ses régimes de fonctionnement possibles. Dans un second temps, nous présenterons le processus d'opération permettant d'optimiser la conception de MG.

3.2 Description du MG étudié

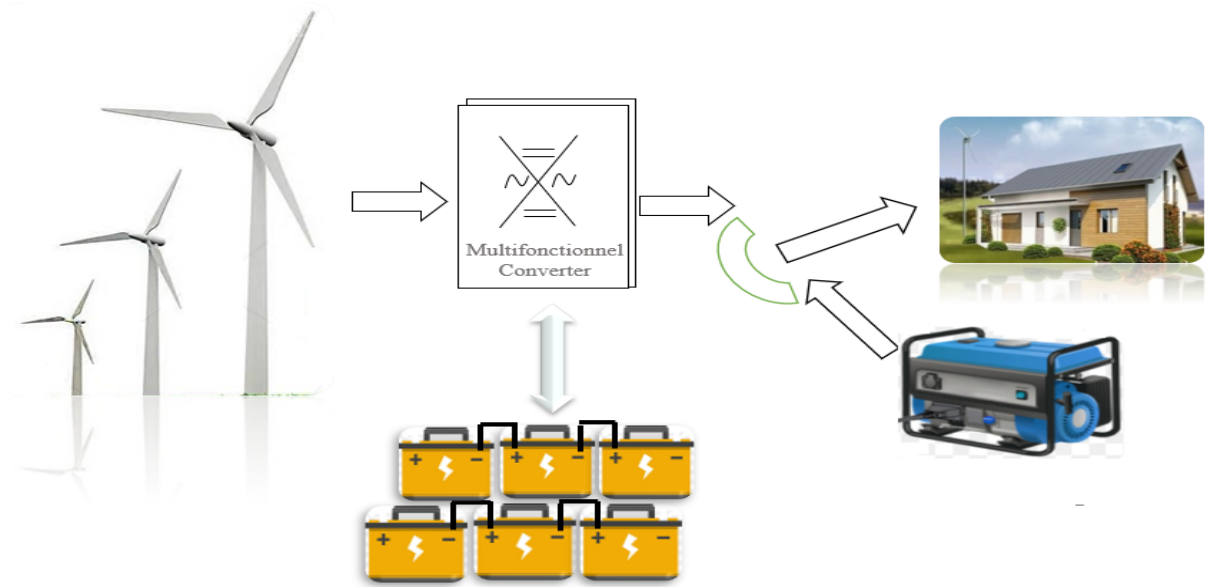


FIGURE 3.1 – Schéma général du microgrid isolé étudié

Dans ce chapitre, le MG présenté se compose d'un parc éolien [28] qui convertit l'énergie cinétique du vent en énergie électrique moyennant des éoliennes avec trois pales à base d'une génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP), un banc de batteries est considéré comme un système de stockage d'énergie et un groupe électrogène GD comme source de production

de secours. Les différents composants de l'unité de production sont reliés à une tension de bus continu par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance multifonction [29]. Ce convertisseur est considéré comme un module d'arrangement entre la puissance générée par le MG et le consommateur et la tension du bus continu. Il assure l'extraction d'une puissance optimale du GSAP lors d'un fonctionnement à vitesse variable de vent. En même temps il contrôle le courant de la batterie pour ajuster l'excès ou le manque de puissance de la production à la consommation. Ces composants seront représentés avec un niveau différent selon la précision de détail requise. Les modèles présentés ci-dessous sont utilisés afin de simuler le MG. Dans ce travail, l'accent sera mis sur les modèles suivants : les éoliennes, batteries au lithium, charges résidentielles. La communauté MG est considérée comme la charge principale. Une maison typique de la ville de Rouyn Noranda prend partie en tant qu'élément de la communauté MG.

3.3 Modélisation énergétique du MG

Le cas d'un MG fictif suivant sera utilisé tout au long de ce mémoire afin d'illustrer la proposition de la conception sur un exemple. Un ensemble de données (météorologiques et de consommation) est exploité afin de valider les exigences de l'algorithme développé. On considère ainsi une ville qui souhaite développer un MG local sur son territoire. On suppose connue la localisation de la commune et ses prévisions pour les données météorologiques et la consommation électrique.

3.3.1 Modélisation énergétique des composants de MG

3.3.1.1 Modèle de l'éolienne

Pour un parc éolien, les données météorologiques, les caractéristiques du site, les demandes de charge et les données économiques sont des informations très intéressantes pour l'amélioration du cadre de l'énergie éolienne [30]. Il est très important de sélectionner un modèle approprié pour la simulation de la puissance de sortie d'un système de production éolienne. Un modèle de simulation simplifié du système de production éolienne dépend de la vitesse du vent, de la hauteur du moyeu et de la loi de puissance comme paramètres de contrainte. La conversion de la vitesse du vent mesurée à une hauteur d'anémomètre à la hauteur de moyeu souhaitée peut être effectuée en utilisant l'équation de loi de puissance suivante [31] :

$$\frac{V(h)}{V(h_{ref})} = \left(\frac{h}{h_{ref}}\right)^\alpha \quad (3.1)$$

Avec $V(h)$ et $V(h_{ref})$ sont respectivement les vitesses du vent à la hauteur du moyeu (h) et à la hauteur de référence h_{ref} , et α est le facteur de rugosité. La détermination de α est basée sur différents types de terrains. La valeur α est souvent considérée comme une valeur de 1/7 lorsqu'il n'y a pas de données spécifiques. La puissance délivrée par une éolienne dans une zone donnée dépend de la vitesse du vent V_w à la hauteur du moyeu et des caractéristiques de vitesse de la turbine.

La plage de fonctionnement est limitée par trois limites de vitesse du vent décrites comme suit : V_{cut-in} est la vitesse de démarrage du vent, $V_{cut-out}$ est la vitesse de coupure du vent et V_r est la vitesse nominale du vent. La puissance électrique produite par une éolienne peut être approchée par le modèle simplifié comme suit [31] :

$$P_w(V_w) = \begin{cases} P_r(A + BV_w + CV_w^2) & ; V_{cut-in} \leq V_w \leq V_r \\ P_r & ; V_r \leq V_w \leq V_{cut-out} \\ 0 & ; Otherwise \end{cases} \quad (3.2)$$

Les constantes A, B et C sont liées aux vitesses caractéristiques de la turbine à travers les formules suivantes [31] :

$$\begin{cases} A = \frac{1}{V_{cut-in}^2 - V_r^2} [V_{cut-in}(V_{cut-in} + V_r) - 4(V_{cut-in} V_r) (\frac{V_{cut-in} + V_r}{2V_r})^3] \\ B = \frac{1}{V_{cut-in}^2 - V_{cut-out}^2} [4(V_{cut-in} + V_r) (\frac{V_{cut-in} + V_{cut-out}}{2V_{cut-out}})^3 - 3(V_{cut-in} + V_{cut-out})] \\ C = \frac{1}{V_{cut-in}^2 - V_{cut-out}^2} [2 - 4(\frac{V_{cut-in} + V_{cut-out}}{2V_{cut-out}})^3] \end{cases}$$

où P_r est la puissance nominale, V_{cut-in} est compris entre 2,5 et 3,5 m/s, V_r est la vitesse nominale et $V_{cut-out}$ est compris entre 20 et 25 m/s.

3.3.1.2 Modélisation du système de stockage à batterie

Grâce à la nature intermittente des ressources énergétiques renouvelables, la capacité du système de stockage à batterie BSS évolue constamment pour établir le bilan énergétique entre les unités de production et la demande de charge [32]. Lorsque la puissance de sortie totale de l'éolienne est supérieure à la charge, l'état de charge SOC (State of Charge) disponible du BSS à l'instant t peut être obtenu par les équations suivantes :

Processus de charge :

$$E_{bat}(t) = E_{bat}(t-1)(1-\sigma) + [(E_{wind}(t) \cdot \eta_{inv}) - E_{Load}(t)/\eta_{inv}] \cdot \eta_{BC}(t) \quad (3.3)$$

Lorsque la demande de charge dépasse la génération, le groupe de batteries est en cours de décharge est donné par :

$$E_{bat}(t) = E_{bat}(t-1)(1-\sigma) - [E_{Load}(t)/\eta_{inv} - (E_{wind}(t) \cdot \eta_{inv})]/\eta_{BD}(t) \quad (3.4)$$

Avec :

- $E_{bat}(t)$ et $E_{bat}(t-1)$ présentent l'énergie (Wh) stockée dans la batterie aux instants t et $t-1$ respectivement,
- $E_{Load}(t)$ est la puissance horaire demandée par la charge,
- $E_{wind}(t)$ est l'énergie générée par les sources éoliennes à l'instant t ,
- η_{inv} , η_{BC} et η_{BD} désignent respectivement l'efficacité de l'onduleur et le facteur d'efficacité de charge et de décharge du BSS, et σ est le taux d'auto décharge horaire

A chaque instant t , l'énergie stockée dans la batterie est soumise aux contraintes suivantes :

$$E_{bat,min} \leq E_{bat}(t) \leq E_{bat,max} \quad (3.5)$$

L'énergie maximale stockée dans le BSS $E_{bat,max}$ prend la valeur de la capacité nominale de la batterie C_B , en utilisant l'équation suivante :

$$E_{bat,max} = SOC_{max} \cdot C_B \cdot V_{bat} \quad (3.6)$$

L'énergie minimale stockée $E_{bat,min}$ est déterminée par la DOD maximale (DOD_{max}) :

$$E_{bat,min} = (1 - DOD_{max}) \cdot C_B \cdot V_{bat} \quad (3.7)$$

La capacité de la batterie C_B du BSS est conçue en fonction de la demande de charge et des jours d'autonomie à l'aide de l'équation suivante :

$$C_B = \frac{E_{Load} \cdot AD}{DOD \cdot \eta_{inv} \cdot \eta_B} \quad (3.8)$$

Où AD est les jours d'autonomie (généralement 3 à 5 jours) et DOD est la profondeur de

décharge. Dans notre cas DOD_{max} prend la valeur de (80 %) et η_{inv} (95 %), ainsi que la valeur de η_B (85%) d'efficacité.

3.3.1.3 Modélisation du groupe diesel

Pour les communautés éloignées, le GD fonctionne comme une source d'énergie secondaire pour l'épuisement des batteries pendant la demande de pointe. Par conséquent, pour obtenir une marge de sécurité adéquate pour les fluctuations de puissance, nous utilisons efficacement la génération diesel, qui doit fonctionner dans une plage de fonctionnement normale afin d'éviter les conditions de décharge et de charge légère. Dans la conception d'une génération hybride, le rendement et la consommation horaire d'un GD, peuvent être définis par la formule suivante :

$$Q_t = A_{GD} \cdot P_{GD,gen}(t) + B_{GD} \cdot P_{GD,rat}(t) \quad (3.9)$$

Avec, Q_t est la consommation de carburant (L/h), $P_{GD,gen}$ et $P_{GD,rat}$ sont respectivement la puissance de sortie et la puissance nominale, du GD (KW), et A_{GD} (l/kW h) et B_{GD} (l/kW h) représentent les coefficients de la courbe de consommation fournis par le fabricant. Ils peuvent être approximés à 0,246 et 0,08415, respectivement. Le rendement GD (kW h/l) est calculé comme suit :

$$\eta_{overall} = \eta_{brake\ thermal} * \eta_{generator} \quad (3.10)$$

où $\eta_{overall}$ est l'efficacité globale et $\eta_{brake\ thermal}$ est l'efficacité thermique du frein du GD.

3.3.1.4 Modélisation du convertisseur

L'onduleur convertit l'énergie électrique produite par le parc éolien en une forme CA avec la fréquence souhaitée de la demande de charge. Les onduleurs centraux sont couramment utilisés dans les applications à grande échelle qui offrent une installation facile et un rendement élevé. L'efficacité de l'onduleur peut être calculée par l'équation suivante :

$$\eta_{inverter} = \frac{P}{P + P_0 + kP^2} \quad (3.11)$$

où P , P_0 et k sont déterminés à l'aide des équations suivantes :

$$P = \frac{P_{out}}{P_n}, P_0 = 1 - 99 \left(\frac{10}{\eta_{10}} - \frac{1}{\eta_{100}} - 9 \right)^2, k = \frac{1}{\eta_{100}} - P_0$$

En fait, η_{10} et η_{100} sont donnés par les fabricants et présentent respectivement le rendement de l'onduleur à (10%) et (100%) de sa puissance nominale.

3.3.1.5 Estimation du profil de charge requis dans le MG

Le dimensionnement d'un MG est basé essentiellement sur la puissance requise par les charges, afin de garantir une couverture totale de la puissance énergétique du site. Le profil de consommation de notre site varie entre la puissance minimale appelée par les charges prioritaires permanentes P_{Lmin} et la puissance maximale appelée par l'ensemble des charges qui existent sur le site P_{Lmax} . Comme le montre la figure 3.2, un profil de charge résidentiel typique d'une maison individuelle est d'environ 1,8kW comme charge maximale qui couvre l'équipement domestique de base, comme les réfrigérateurs, les lumières, les téléviseurs, les ventilateurs. Le même profil de charge est considéré pour tous les logements.

La figure 3.3 montre tous les applications disponibles dans la maison.

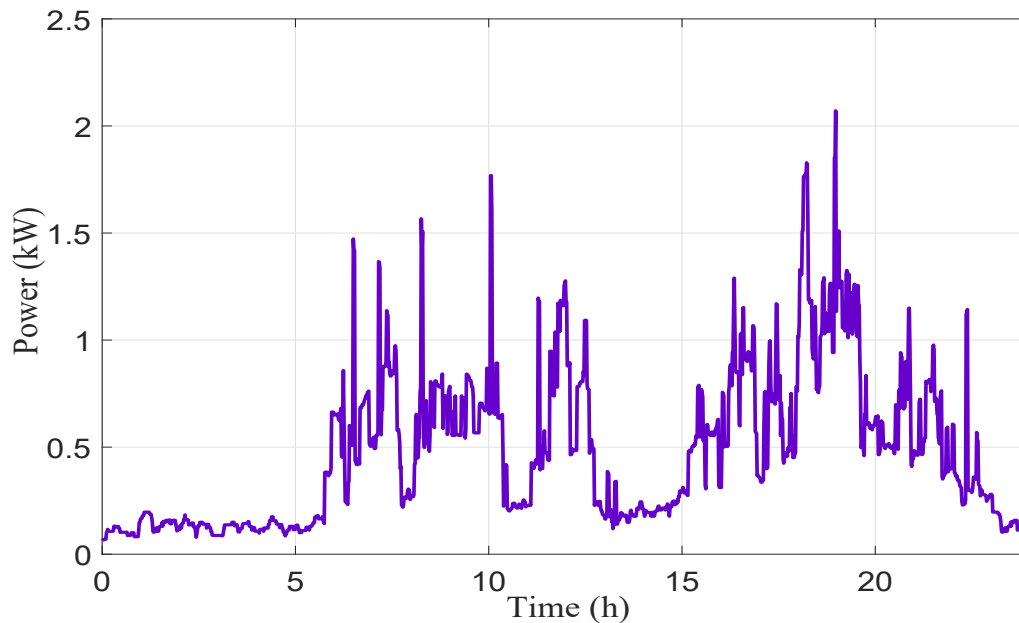


FIGURE 3.2 – Profil typique d'une maison

Le tableau 3.1 résume les différentes puissances utilisées au cours de la journée.

La puissance renouvelable nominale assure l'alimentation du site à pleine charge. Le système de stockage est intégré au MG pour résoudre le problème de l'équilibrage de puissance. Un superviseur central reçoit les données météorologiques de la vitesse du vent, le SOC du BSS, et la tension et le courant nécessaires pour évaluer l'état opérationnel du MG. Le profil de charge ty-

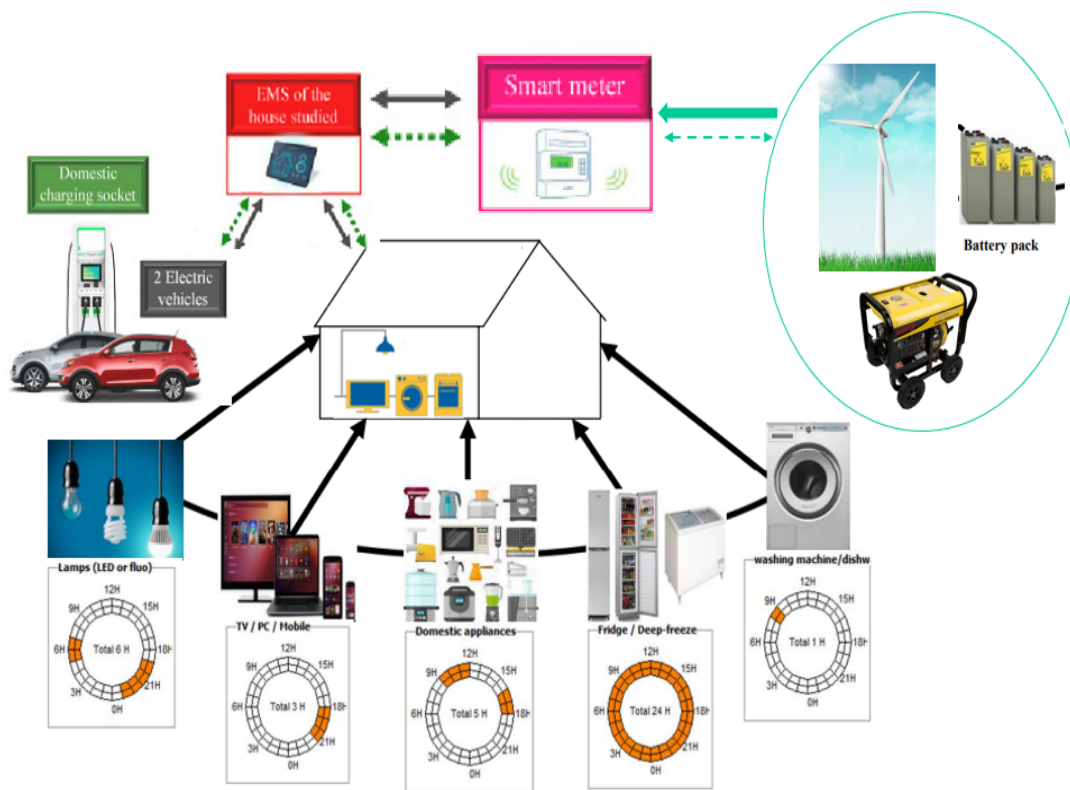


FIGURE 3.3 – Exemple des applications disponibles d’une maison

TABLE 3.1 – les principaux types d’appareils considérés

Type d’appareil	Puissance nominale (w)	Période d’exploitation (h)	Nombre
TV	124	5	2
Éclairage	100	4	10
Climatiseur	1500	4	2
Lampe de bureau	20	4	3
Wi-Fi	100	1	1
Modem-Adsl	20	24	1
Réfrigérateur	190	24	1
Chauffage	1500	8	2
Microwave	Four micro onde1200	1	1
Machine à laver	1600	1	1

pique est conçu selon les étapes suivantes : Le profil de charge typique d'une zone éloignée est le facteur le plus important dans la méthodologie d'optimisation. La consommation d'énergie quotidienne supposée reflète la charge CA connectée minimale pour un seul bâtiment résidentiel. Pendant la journée, la demande d'énergie correspond à la consommation de chaque appareil électroménager.

- $E_{Load} = E_{wind}$,
- La charge maximale requise est de 1800 Wh, ce qui est suffisant pour la charge de base d'un bâtiment.
- Si l'énergie par jour n'atteint pas 3600 Wh, le complément sera puisé par les éléments de stockage.
- Si l'énergie dépasse 3600 Wh pour une journée ou 1800 W par heure, le surplus sera utilisé pour recharger les éléments de stockage.

3.4 Stratégie de gestion d'énergie

La gestion d'énergie est l'unité conçue pour contrôler l'ensemble d'opération du MG. Elle est responsable de la répartition des consignes en puissance entre les différents composants au sein du MG [33]. L'algorithme implémenté pour la logique de gestion utilisé pour le MG ciblé dans ce mémoire, est illustré sur la Figure 3.4. La première partie du programme a la charge de calculer les limitations de puissance du système de stockage dont découlent les limitations des convertisseurs de puissance. Par conséquent, un éventuel changement de mode de fonctionnement est évalué selon :

- Condition du temps : Une heure minimale et maximale est paramétrée pour le changement de mode,
- Condition de l'état de charge (SOC) : Un état de charge minimal est fixé,
- Condition de la puissance produite : La puissance de production renouvelable doit être supérieure à la puissance de consommation tout en tenant compte d'une marge de sécurité,

L'efficacité de la méthodologie proposée peut être évaluée en fonction de différents scénarios de puissance de la stratégie de gestion de l'énergie. Dans ce travail, cette stratégie dépend de la conduite d'énergie du MG pour chaque heure, tout au long de l'année, comme une étape essentielle pour un dimensionnement optimal. En fait, l'objectif de cette stratégie est de sélectionner la meilleure taille des composants pour répondre à la demande de la communauté tout en respectant un niveau de fiabilité souhaitée. L'algorithme de gestion proposé est expliqué en détail dans les scénarios suivants :

- **Scénario (1) :** Si la puissance produite par les sources renouvelables est supérieure à celle requise par la charge, l'énergie excédentaire doit être stockée dans le banc de batterie , tant que son SOC est dans la plage de fonctionnement souhaitée. Le nouveau SOC est calculé à l'aide de l'équation 3.3,
- **Scénario (2) :** Lorsque l'énergie renouvelable ne satisfait pas à alimenter la charge, dans ce cas, le système de stockage sera utilisé pour combler le manque de production d'électricité. Le SOC à l'heure t est donc calculé à l'aide de l'équation 3.4.

Dans le premier scénario, lorsque l'excédent d'énergie est supérieur à la demande de la charge et au système de stockage, il sera consommé dans une charge de décharge. Dans le second scénario, lorsque le système de stockage n'est pas en mesure de satisfaire le manque d'énergie, le GD fonctionne à sa puissance nominale. Par conséquent, l'énergie diesel sera utilisée pour combler le déficit énergétique. Il est donné par :

$$E_{GD}(t) = E_{Load}(t) - (E_{wind}(t) + E_{bat}(t - 1) - E_{bat,min}(t))\eta_{inv} \quad (3.12)$$

En outre, l'énergie restante sera utilisée pour charger le banc de batterie. Ainsi, le nouveau SOC est donné par :

$$E_{bat}(t) = E_{bat,min}(t) + (E_{GD,rat}(t) - E_{GD}(t))\eta_{inv}\eta_{bat} \quad (3.13)$$

où $E_{GD,rat}$ est l'énergie générée par le groupe électrogène lorsqu'il fonctionne à sa puissance nominale.

3.5 Résultats de simulation

Dans cette partie, nous allons présenter les résultats de simulation de la gestion du MG. Nous avons considéré pour cet exemple illustratif un village rural avec cinq foyers (soit environ 30 habitants). Pour mieux fonder notre étude, nous avons utilisé des données réalistes, nous considérons des données météorologiques issues de mesures de la ville de Rouyn Noranda pour l'année 2020, ainsi qu'un profil de charge typique d'une maison réelle dans la ville de Rouyn-Noranda. En se basant sur l'algorithme de gestion mentionné ci-dessus, le micro-grid étudié peut être mis en œuvre sous MATLAB/Simulink. La figure 3.5 illustre l'allure de la vitesse du vent mesurée pendant l'année 2020 de la ville de Rouyn Noranda. Ces données sont mesurées à 10m de haut. En se conformant aux données de la vitesse du vent annuel, la figure 3.6 illustre la production énergétique du parc éolien pour satisfaire le besoin des 5 foyers. La figure 3.7 illustre la consommation en électricité d'un seul foyer. Pour notre micro-grid, la priorité est

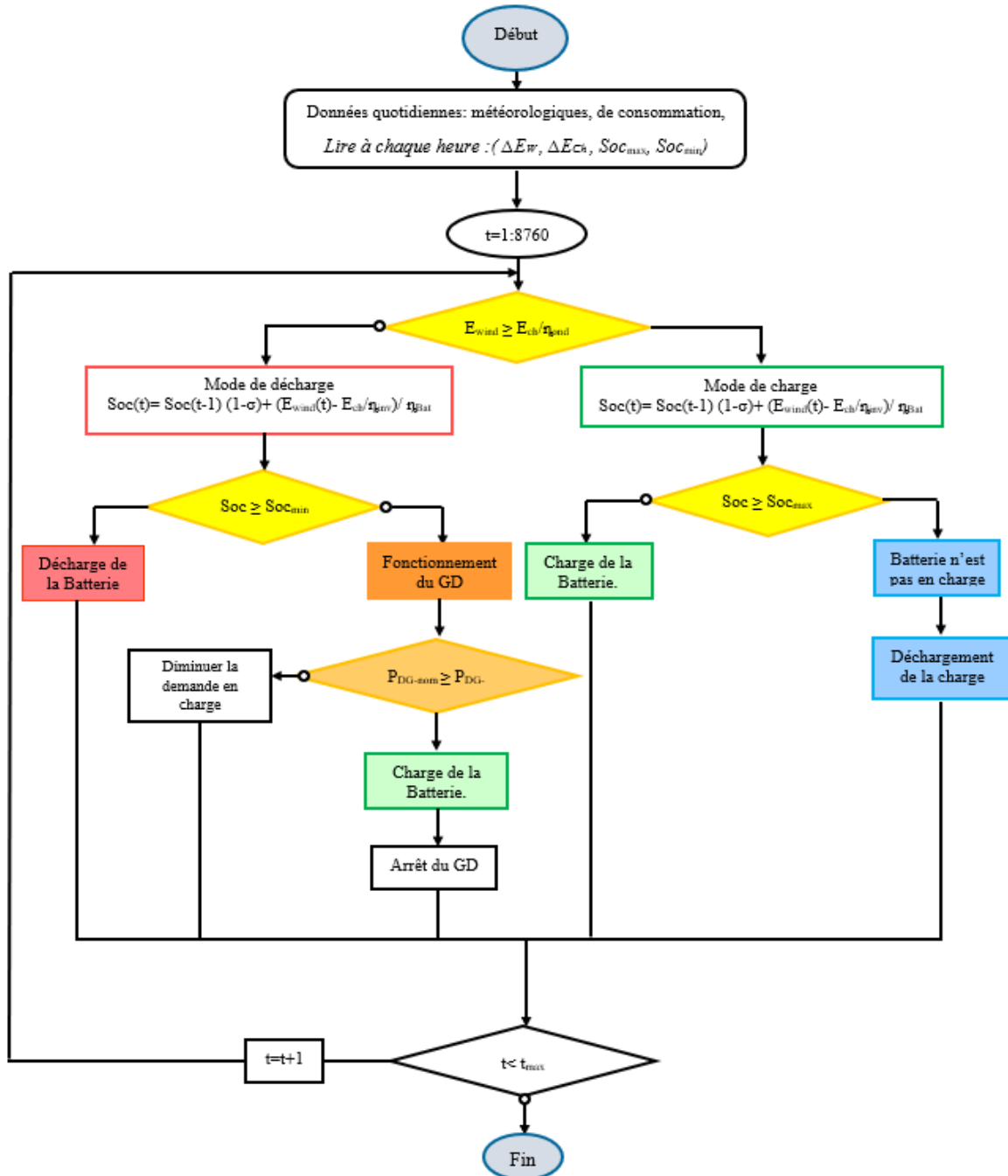


FIGURE 3.4 – Algorithme de gestion implémenté pour l’architecture du MG considéré

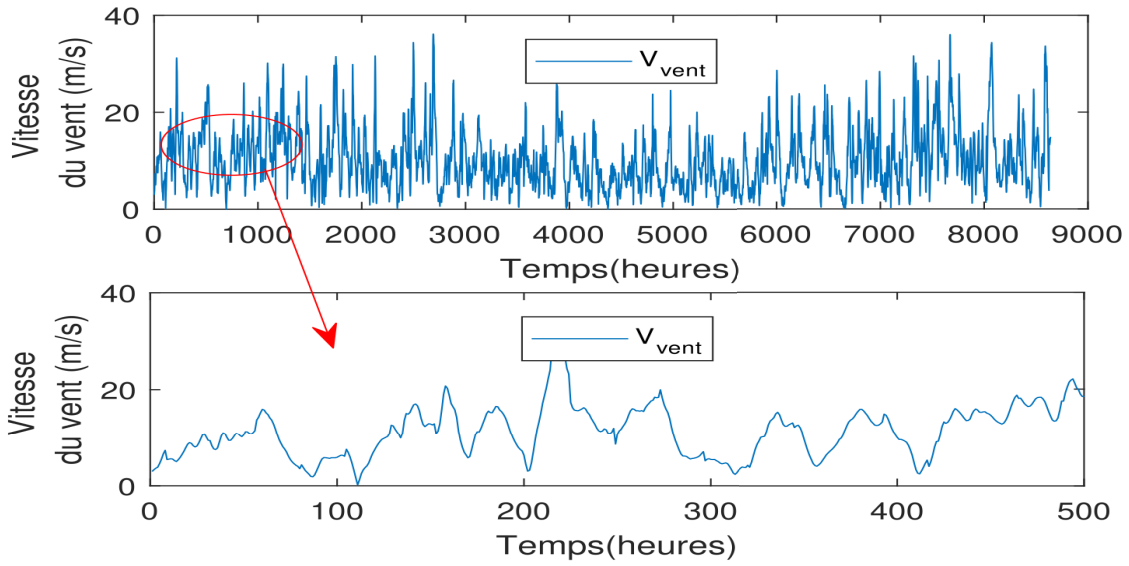


FIGURE 3.5 – Vitesse de vent enregistrée au cours de l'année 2020

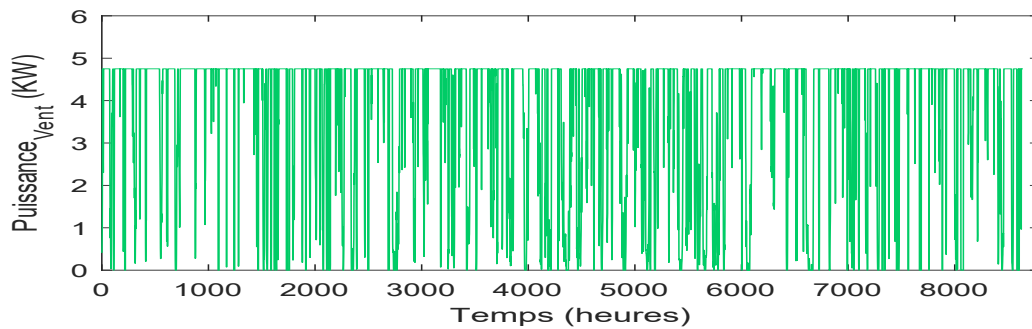


FIGURE 3.6 – Puissance annuelle produite par le parc éolien

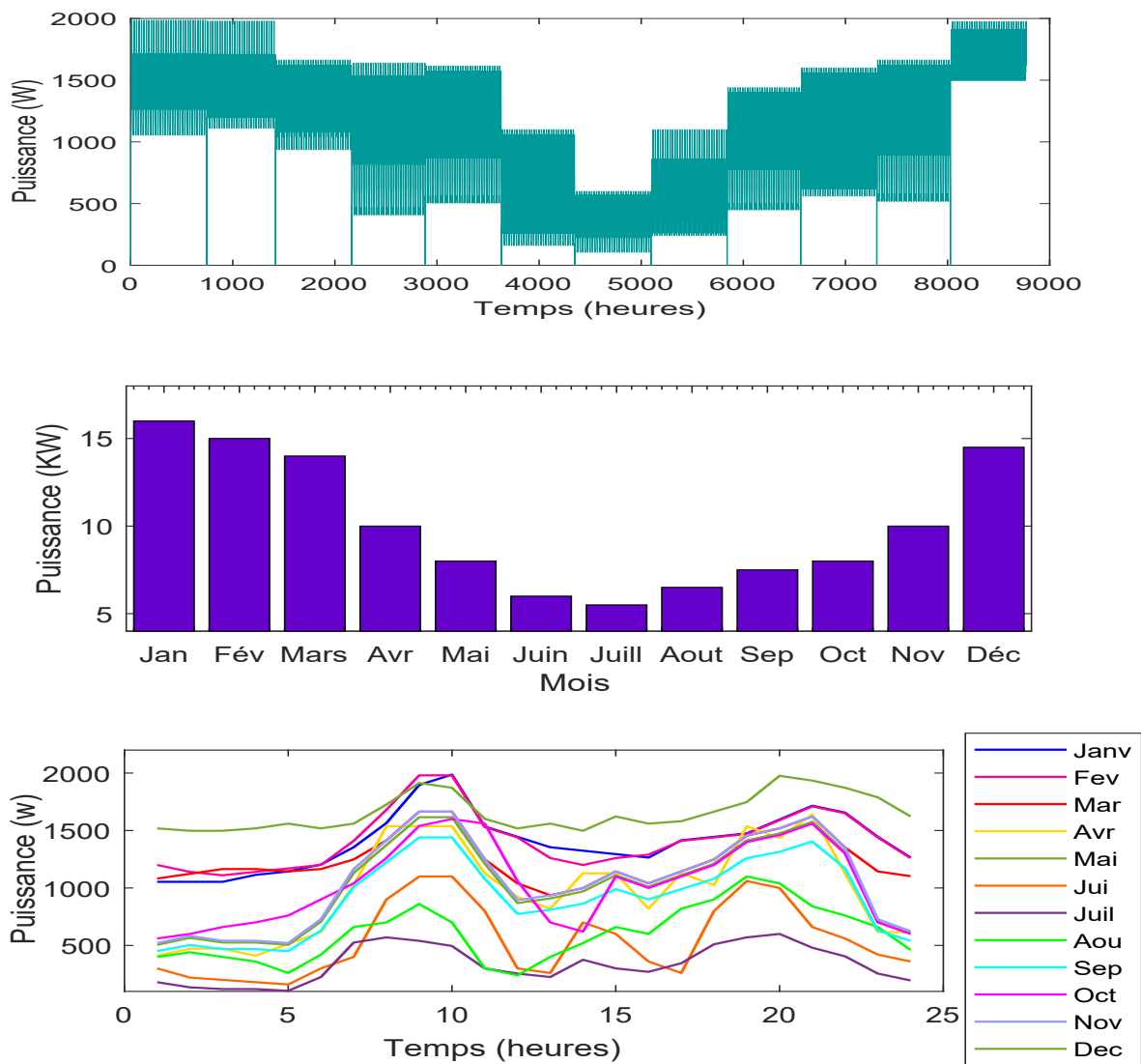


FIGURE 3.7 – Puissance annuel, mensuel et journalière consommée par un seul foyer

toujours donnée aux sources renouvelables. Autrement dit, en absence d'énergie renouvelable, et tant que la charge n'est pas satisfaite le MG fonctionne en consommant l'énergie fournie par les éléments de stockage. La figure 3.8 ci-dessus qui présente l'énergie stockée et produite par

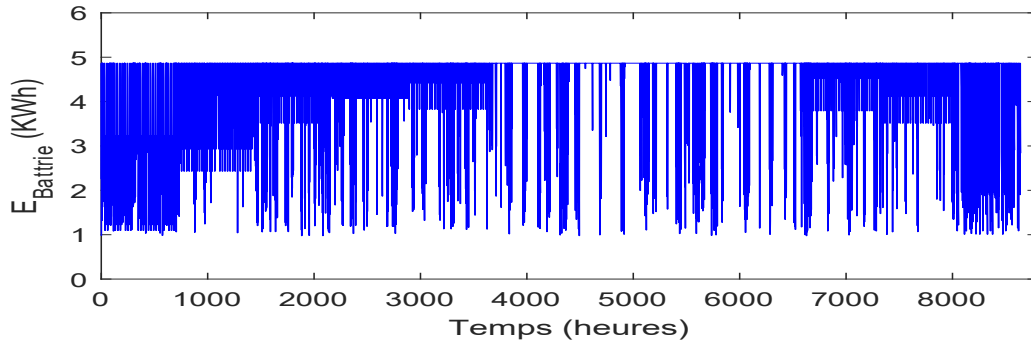


FIGURE 3.8 – Énergie stockée dans le système de stockage

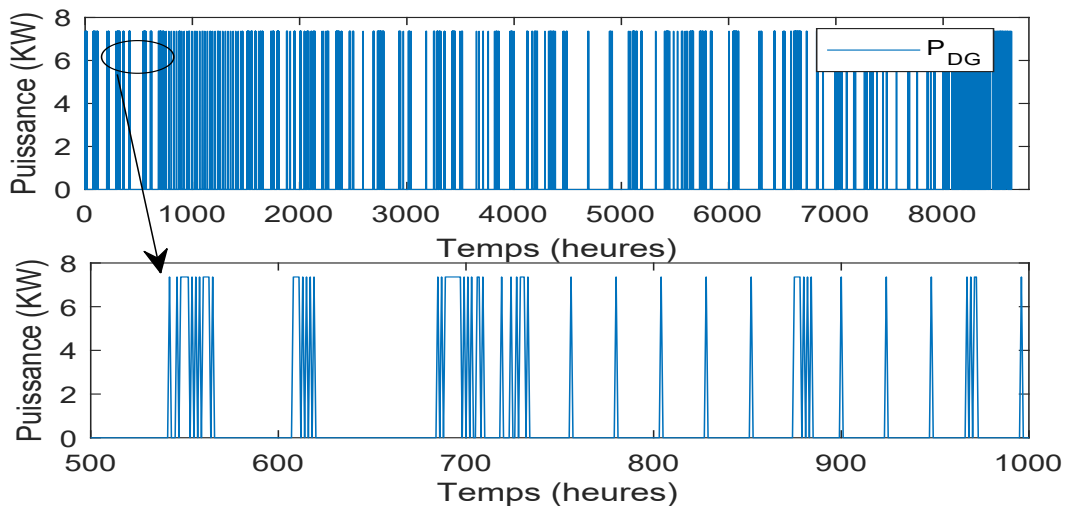


FIGURE 3.9 – Énergie produite par le groupe diesel

la batterie durant toute l'année. Il est à signaler que pendant les périodes hivernale et automnale la batterie est exploitée intensivement comparativement aux périodes printanières et estivale. La figure 3.9 illustre la production du GD en cas de secours pour satisfaire la charge demandée. Tant-disque, la figure 3.10 illustre l'énergie rejeté par tout le système. La simulation du fonctionnement du MG nous permet de connaître à chaque heures les énergies produites, stockées, déstockées, consommées, perdues et inexploitées par chaque technologie. On connaît de plus l'état d'énergie des stockeurs ainsi que la provenance de l'énergie qui les charge. On en déduit la valeurs des divers indicateurs économiques, techniques et environnementaux.

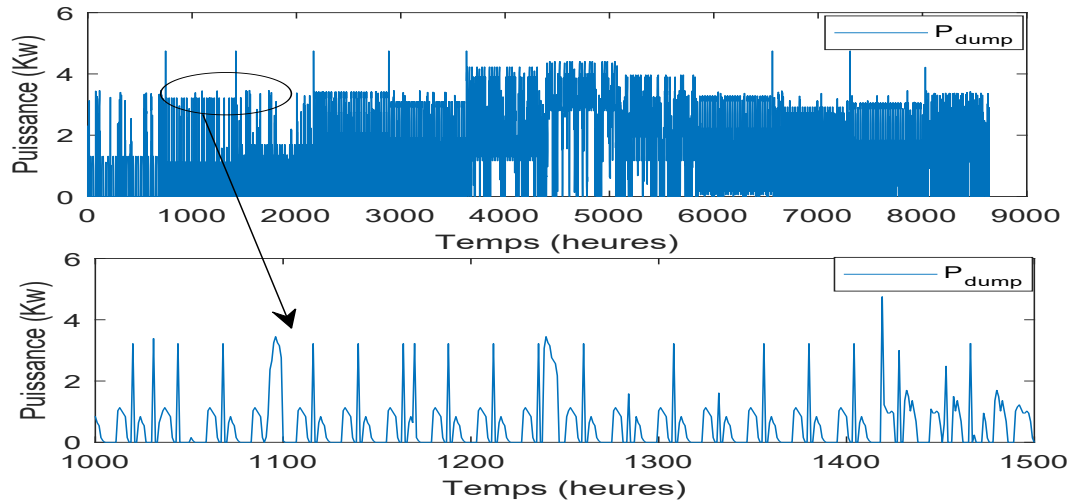


FIGURE 3.10 – Énergie rejetée par le MG

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons proposé une modélisation qui nous permet d'évaluer le MG considéré dans ce mémoire selon des indicateurs de coût, d'intégration renouvelable et de fiabilité. Le modèle du MG a été construit sur une échelle énergétique, représentant chacun des composants incluant les générateurs éoliens et le groupe diesel, le système de stockage, les différents étages de conversion. Grâce à l'approche de modélisation choisie, nous pouvons concevoir l'interaction entre les composants du système, et le fonctionnement du système global.

Chapitre 4

Conception multi-objective d'un microgrid isolé

La science ne connaît qu'une loi : la contribution scientifique.

Galileo Galilei

4.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à décrire la méthodologie mise en place pour concevoir le MG isolé dont le schéma est présenté dans le chapitre III, 3.1. Les différentes méthodes et outils de conception existants dans la littérature ont été revus dans le premier chapitre. Dans ce dernier il a été bien décrit l'importance de prendre en compte la fiabilité dans la conception des MGs isolés, ainsi que le coût qui présente une partie également cruciale dans les projets MGs. Les MGs ont comme application principale l'électrification des zones éloignées dans lesquelles la communauté des habitants a des revenus modestes. Le service apporté à ces zones doit se faire à un coût faible mais sans contraindre la disponibilité de l'énergie électrique. Une prise en compte des différents critères cités pour dimensionner un MG implique l'utilisation d'une méthode d'optimisation multi-objective. Pour ce faire, un algorithme analytique itératif technoéconomique et un algorithme métaheuristique ont été développés afin de déterminer la taille des composantes du micro-réseau en se basant sur deux critères économiques, le Coût Nette Actualisée Total, "Total Net Present Cost", (TNPC) et le Coût de l'Énergie, "Energy Cost", (EC) et deux critères techniques, la Probabilité de Perte de Puissance d'Alimentation, "Loss of Power Supply Probability", (LPSP) et la Puissance Relative en Excès Générée, "Relative Excess Power Generated", (REPG).

4.2 Objectifs d'optimisation et critères de fiabilité choisis

Le résultat de la méthodologie de dimensionnement est entièrement basé sur le choix d'une combinaison de certains des objectifs suivants [34].

- Minimiser l'indicateur de coût sur un cycle de vie,
- Maximiser l'indicateur d'intégration d'énergie renouvelable,
- Minimiser l'indicateur d'indisponibilité globale du MG prenant en considération les différents aspects de fiabilité considérés : adéquation, pannes, et protection.

Ainsi, plusieurs critères classés dans des catégories telles que les facteurs économiques, environnementaux et technologiques peuvent être formulés afin d'évaluer les performances du dimensionnement de MG dans le cadre de la fiabilité.

4.2.1 Critères technologiques

- **Probabilité de Perte de Puissance d'Alimentation LPSP :**

En raison de la vitesse variable du vent, qui influe considérablement sur la production

d'électricité, le MG doit être jugé en termes de fiabilité pour fournir de l'énergie à la demande de charge requise. L'un des termes importants pour démontrer la fiabilité de la production d'énergie est basé sur la Probabilité de Perte de Puissance d'Alimentation (LPSP :Loss of Power Supply Probability). Ce dernier est caractérisé par une fourchette statistique comprise entre 0 et 1. Le MG n'est pas en mesure de répondre à la demande de charge requise, quand le LPSP est égal à 1. Lorsque la demande de charge requise est toujours satisfaite, la valeur du LPSP est égale à 0. Ainsi, le LPSP présente la contrainte technique liée à la fiabilité du système, qui est mise en œuvre pendant une période considérée T (un an). Le LPSP est donné par l'équation suivante :

$$LPSP = \frac{\sum_{t=1}^T (P_{Load} - (P_{Wind} + P_{soc_{min}} + P_{DG}))}{\sum_{t=1}^T P_{Load}} \quad (4.1)$$

où SOC_{min} représente le SOC minimal. En outre, ce concept d'évaluation est réalisé dans les pires conditions. Cependant, lorsque la demande de charge est satisfaite avec la présentation d'un excédent de puissance, on peut calculer le REPG, défini comme le rapport entre l'excédent de puissance et la somme de la demande de charge, qui est calculé par l'équation suivante :

$$REPG = \frac{\sum_{t=1}^T EPG(t)}{\sum_{t=1}^T E_{Load}(t)} \quad (4.2)$$

où l'EPG peut être décrit par l'équation suivante :

$$EPG = E_{wind}(t) - \left[\frac{E_{Load}(t)}{\eta_{inv}} + (E_{bat,max} - E_{bat}(t-1))/\eta_{bat} \right] \quad (4.3)$$

— **Le Facteur d'énergie renouvelable RF :**

Le RF est défini pour déterminer la quantité d'énergie générée par le générateur électrogène par rapport à la quantité provenant du générateur renouvelable. Il peut être décrit par l'équation suivante :

$$RF = \left(1 - \frac{\sum P_{DG}}{\sum P_{Wind}} \right) \quad (4.4)$$

4.2.2 Critères économiques

Une conception du MG de production peu coûteuse et fiable doit répondre à une analyse économique dépendant du prix des composants et des changements économiques et météorologiques pour chaque heure de l'année. Le coût de chaque composant est pris en compte lors de l'optimisation de la taille du MG. Dans la littérature, plusieurs critères économiques ont été développés pour l'analyse économique des MGs. Dans cette section, l'approche économique de l'énergie

(le coût de l'énergie EC ou COE), basée sur le coût total net actuel (TNPC) est utilisée comme meilleur indicateur de la rentabilité économique de l'analyse des coûts du MG.

— **Coût total net actuel TNPC :**

Le TNPC est un indicateur financier clé pour l'évaluation de la fiabilité économique d'un projet d'investissement. Selon le MG, le TNPC peut être exprimé comme suit :

$$TNPC(\$) = IC + PW_{C_{rec}} + PW_{C_{non-rec}} \quad (4.5)$$

où IC est le coût initial des composants du système et représente la somme des coûts initiaux de tous les composants du système avant que le système soit mis en service (comprenant les coûts des travaux de génie civil, des installations et des connexions), et $PW_{C_{rec}}$ et $PW_{C_{non-rec}}$ sont les facteurs de conversion des coûts récurrents et non récurrents en leur valeur actuelle. Ces deux facteurs sont respectivement définis par [30] :

$$PW_{C_{rec}} = C_{rec} \frac{\left[\frac{1+e}{1+d} \right] \left\{ \left[\frac{1+e}{1+d} \right]^\xi - 1 \right\}}{\left[\frac{1+e}{1+d} \right] - 1} \quad (4.6)$$

$$PW_{C_{non-rec}} = C_{non-rec} \frac{\left[\frac{1+e}{1+D_{adj}} \right] \left\{ \left[\frac{1+e}{1+D_{adj}} \right]^\xi - 1 \right\}}{\left[\frac{1+e}{1+D_{adj}} \right] - 1} \quad (4.7)$$

où C_{rec} et $C_{non-rec}$ sont respectivement les coûts récurrents et non récurrents, d (8%) et e (4%) sont respectivement les taux d'intérêt et d'indexation, et ξ est la durée de vie du système en années (25 ans). D_{adj} , qui est le taux d'intérêt ajusté, est donné comme suit :

$$D_{adj} = \frac{(1+d)^{P_y}}{(1+d)^{(P-1)}} - 1 \quad (4.8)$$

où P_y est le nombre d'années entre deux paiements successifs pour les coûts non récurrents.

— **Le coût de l'énergie (EC ou COE) :**

Le COE est développé pour être l'un des indicateurs de rentabilité économique les plus utilisés dans l'analyse des coûts du MG dans ce travail. Le COE est défini comme le prix constant par unité d'énergie (ou par unité d'électricité) de l'ensemble du MG pour l'énergie électrique annuelle produite par le système. Il peut être défini comme suit [30] :

$$COE(\$/KWh) = \frac{TNPC * CRF}{\sum_{h=1}^{h=8760} E_{gen}(h)(KWh)} \quad (4.9)$$

où CRF est un ratio permettant de calculer la valeur actuelle des composants du système pour une période donnée en tenant compte du taux d'intérêt. Il est calculé par :

$$CRF(d, \xi) = \frac{d(1 + d)^\xi}{(1 + d)^\xi - 1} \quad (4.10)$$

4.3 Méthode d'optimisation multi-objective appliquée au MG :

Dans le cadre de notre étude, notre choix s'est porté sur deux approches pour concevoir le MG isolé dont le périmètre a été défini dans le chapitre III. La première consiste en une approche analytique qui s'appuie sur une formulation mathématique pour calculer les valeurs moyennes des indices de fiabilité. La seconde est une méthode non conventionnelle (intelligente) a été proposée pour améliorer les performances du MG en terme de coût et de fiabilité tout en garantissant une alimentation continue des consommateurs. Cette technique est basée sur un algorithme d'optimisation par les essais particuliers.

4.3.1 Technique analytique

À partir des stratégies décrites ci-dessus, la fiabilité du MG est exprimée en termes de LPSP tout en minimisant le COE. La technique analytique est présentée à partir d'un algorithme analytique itératif développé à l'aide du logiciel MATLAB pour permettre la simulation des différents scénarios en réalisant le calcul du bilan énergétique pour chaque heure de l'année avec la configuration optimale de la source. Dans ce programme, certaines données doivent être fournies :

- Données météorologiques de la vitesse du vent par an (Figure 3.5), profil de charge horaire requis 3.2,
- Les spécifications relatives aux différents composants du MG sont présentées à l'annexe A,
- Conditions limites et initiales pour le système de stockage : SOC_{ini} , SOC_{min} (40%), SOC_{max} (100%), et taille requise de l'éolienne.

Le programme développé comprend les principales étapes suivantes :

- - Étape 1 : fixation du mode (charge ou décharge) en fonction de l'excès ou du manque d'énergie produite.
- - Étape 2 : Respect des contraintes imposées au BSS, au GD et au WT.
- - Étape 3 : Calcul des paramètres techniques à optimiser (LPSP, REPG et COE), et arrêt lorsque LPSP = 0% et que le COE est le plus bas.

- - Étape 3.1 : si E_{bat} dépasse $E_{bat,max}$, l'EPG est calculé à l'aide de l'équation 4.3.
- - Étape 3.2 : si E_{bat} diminue jusqu'à son minimum $E_{bat,min}$ et $E_{DG} \geq E_{DG,rat}$, le LPSP est calculée à l'aide de l'équation 4.1.

À chaque étape de la simulation, la puissance générée par le générateur éolien est calculée à l'aide des modèles mathématiques comme dans l'équation 3.2, en tenant compte du profil de vent existant et des caractéristiques sélectionnées du générateur éolien. Cet algorithme est appliqué étape par étape pour choisir les valeurs optimales de N_{WT} , N_{GD} et N_{ad} entre les limites définies pour toutes les périodes de temps. Pour toutes les étapes de la simulation, les probabilités LPSP et REPG sont calculées. Lorsqu'au moins $LPSP \leq LPSP^*$, la configuration sélectionnée est sauvegardée et évaluée dans l'analyse économique. Par conséquent, la configuration optimale est sélectionnée pour être celle qui a la valeur minimale de COE entre les solutions sauvegardées. La figure 4.1 illustre le principe de la méthodologie mise en œuvre pour effectuer l'optimisation en associant la gestion dynamique du système de production d'électricité sous MATLAB.

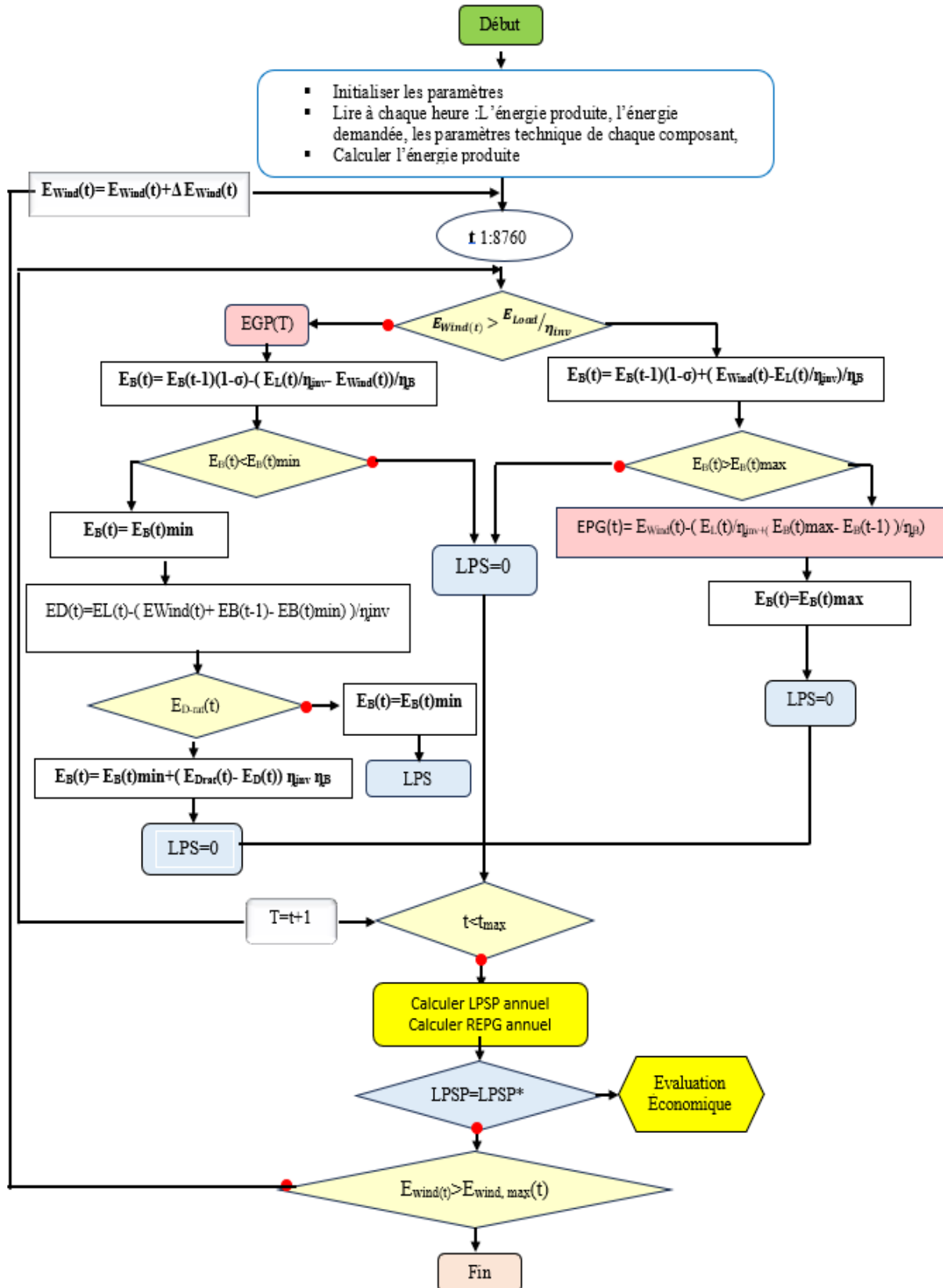


FIGURE 4.1 – Organigramme de dimensionnement optimal

4.3.1.1 Analyse économique développée

L'optimisation économique est une autre contrainte pour le dimensionnement optimal du MG. La minimisation du TNPC permet également d'obtenir une solution optimale. Le TNPC est la valeur actuelle de tous les coûts initiaux, des coûts d'exploitation et de maintenance et des coûts de remplacement des éléments utilisés pour l'installation du MG. Il peut être calculé selon la relation suivante.

$$TNPC(\$) = C_{Init} + C_{Mnt} + C_{Rep} \quad (4.11)$$

où C_{Init} est le coût initial du système, C_{Mnt} et C_{Rep} sont respectivement les coûts de maintenance et de remplacement, et C_{Mnt} et C_{Rep} sont récurrents pendant la durée de vie du projet. Le NPC de chaque composant est défini comme suit :

$$\begin{cases} NPC_{WT} = C_{Init_{WT}} + C_{Mnt_{WT}} + C_{rep_{WT}} \\ NPC_{BSS} = C_{Init_{BSS}} + C_{Mnt_{BSS}} + C_{rep_{BSS}} \\ NPC_{Inv} = C_{Init_{Inv}} + C_{Mnt_{Inv}} + C_{rep_{Inv}} \\ NPC_{GD} = C_{Init_{GD}} + C_{Mnt_{GD}} + C_{rep_{GD}} \end{cases}$$

Les coûts d'investissement et d'installation pour chaque composant sont calculés par :

$$C_{Init,comp} = N_{comp} * C_{Uinv,comp} \quad (4.12)$$

où N_{comp} est le nombre total de composants, et $C_{Uinv,comp}$ est le coût unitaire d'investissement et d'installation du composant. Les coûts d'exploitation et de maintenance de chaque composant, $C_{Mnt,comp}$, sont calculés comme suit :

$$C_{Mnt,comp} = \frac{N_{comp} * C_{Uinv,comp}}{CRF(d, \xi)} \quad (4.13)$$

où $C_{Mnt,comp}$ est le coût unitaire annuel des opérations et de la maintenance pour chaque composant. Le coût de remplacement des composants, $C_{rep,comp}$, est donné par :

$$C_{rep,comp} = \frac{N_{comp} * SFF(i, t_{comp}) * f_{rep,comp} * C_{Urep,comp}}{CRF(d, \xi)} \quad (4.14)$$

où C_{Urep} est le coût de l'unité de remplacement des éléments. Dans les équations précédentes, ξ est la durée de vie du projet, d est le taux d'intérêt, CRF est le facteur de récupération du capital, SFF est le facteur de financement, t_{comp} est la durée de vie des composants, soit la batterie, l'onduleur ou l'éolienne. $f_{rep,comp}$, $t_{rep,comp}$ et $SFF(i, N)$ sont calculés comme suit :

$$f_{rep,comp} = \begin{cases} \frac{CRF(i, t_{comp})}{CRF(i, t_{rep,comp})}; t_{rep} > 0 \\ 0; t_{rep} = 0 \end{cases} \quad (4.15)$$

$$t_{rep,comp} = t_{comp} \text{int}\left(\frac{N}{t_{comp}}\right) \quad (4.16)$$

$$SFF(i, N) = \frac{i}{(1+i)^N - 1} \quad (4.17)$$

Dans cette étude, on suppose que tous les prix augmentent au même rythme, et on utilise un taux d'intérêt réel annuel plutôt qu'un taux d'intérêt nominal. Les prix unitaires, les coûts de maintenance et la durée de vie de chaque composant (aérogénérateur, BSS et onduleur) dans cette étude sont supposés tels que mentionnés dans le tableau B. La configuration avec le COE le plus bas est considérée comme optimale parmi l'ensemble des configurations qui garantissent la fiabilité requise de l'alimentation électrique.

4.3.2 Description de la méthodologie d'optimisation par essais particuliers (PSO) :

4.3.2.1 Présentation générale

L'algorithme d'optimisation par les essais particuliers (OEP); (ou en anglais Particle Swarm Optimization (PSO)); est un algorithme évolutionnaire inspiré de la biologie. Il a été développé par Kennedy (ingénieur en électricité) et Eberhart (socio-psychologue) en 1995 [36]. Il s'agit d'un algorithme d'optimisation facile, simple et global qui permet de résoudre plusieurs types des problèmes où la solution optimale est un point dans un espace multidimensionnel du paramètre (optimisation de valeur réelle). C'est une approche heuristique inspirée des comportements sociaux de volées des oiseaux, bancs de poissons ou bien essaims d'insectes [37].

Le PSO partage de nombreuses similitudes avec les techniques de calcul évolutives telles que les algorithmes génétiques (AG). Le système est initialisé avec une population de solutions aléatoires et recherche les optimas en mettant à jour les générations. Cependant, contrairement au AG, le PSO n'a pas d'opérateur génétique tel que le croisement et la mutation. Dans le PSO, les solutions potentielles, appelées particules, traversent l'espace du problème en suivant les particules optimales actuelles.

L'algorithme de PSO se repose sur un simple scénario. En effet, il effectue la résolution d'un problème en utilisant un ensemble de données généralement choisi au hasard et ayant une certaine taille appelée "population" (essaim) qui inclut les solutions candidates nommées "particules". Ces particules se déplacent sur un espace de recherche multidimensionnel pour localiser leur meilleure expérience. Chaque particule est associée non seulement à sa position, mais aussi à une fitness calculée par des fonctions mathématiques et une vitesse qui contrôle son vol. Elle possède également une petite mémoire liée d'une part à sa meilleure position visitée (opti-

mum local) et d'autre part à la meilleure position visitée par la population (optimum global) ainsi qu'une capacité de communiquer avec les autres particules (informateurs). En se basant sur les informations partagées "coopération" entre les particules essaimées, elle poursuit une tendance : premièrement, de sa motivation à retourner à sa solution optimale, et ensuite de sa motivation à atteindre la meilleure solution obtenue par ses voisins. Ainsi, à partir des optima locaux, l'ensemble des particules rencontrera finalement, après un certain nombre d'itérations, la solution optimale globale du problème considéré. Sur la base des informations partagées, la particule doit décider de son prochain mouvement qui déduit également sa nouvelle vitesse. Le mouvement des particules dans l'essaim est influencé par trois composantes.

- une composante inertielle : la particule a tendance à suivre sa direction de mouvement actuelle.
- une composante mémoire : la particule a tendance à revenir à la meilleure position qu'elle a déjà visitée.
- une composante sociale : la particule a tendance de suivre l'expérience de ses voisins par se diriger vers la meilleure position qui l'ont atteint.

4.3.2.2 Formulation

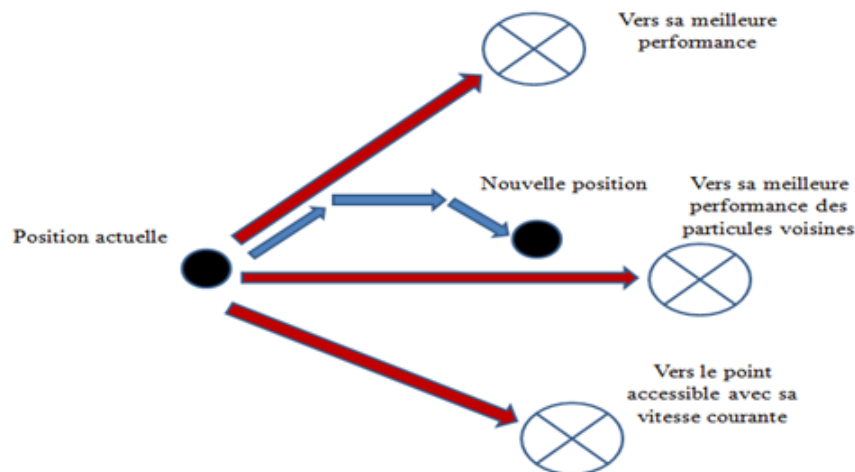


FIGURE 4.2 – Déplacement d'une particule.

Un essaim comporte N particules qui sont dispersées dans un espace de recherche à D dimensions. Chaque particule i de l'essaim est modélisée par son vecteur position $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ et par son vecteur vitesse $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$. La qualité de sa position est déterminée par la valeur de la fonction fitness en ce point. Durant la procédure de recherche, la particule ajuste sa position vers l'optimum globale, d'une manière itérative, en se basant sur

deux facteurs : sa meilleure position trouvée que nous la notons $P_{besti} = (p_{best1}, p_{best2}, \dots, p_{bestD})$ et la meilleure position trouvée par les autres particules de l'essaim $G_{best} = (g_{best1}, g_{best2}, \dots, g_{bestD})$.

La stratégie de déplacement d'une particule est représentée par la figure 4.2 :

Au début de l'algorithme ($t=0$), les positions et les vitesses des particules de l'essaim sont initialisées de manière aléatoire dans l'espace de recherche du problème considéré. Ensuite, à chaque itération, chaque particule se déplace, en combinant les trois composantes (inertielle, mémoire et sociale) comme illustré dans la figure 4.2. A l'itération prochaine ($t=t+1$), la mise à jour de la vitesse et la position de chaque particule est faite par les deux équations suivantes

$$V_{i,j}^{t+1} = wV_{i,j}^t + c_1r_1(p_{best_{i,j}}^t - x_{i,j}^t) + c_2r_2(g_{best}^t - x_{i,j}^t) \quad (4.18)$$

$$x_{i,j}^{t+1} = x_{i,j}^t + V_{i,j}^{t+1} \quad (4.19)$$

avec : w représente le coefficient d'inertie, c_1 et c_2 représentent les coefficients d'accélération et leurs valeurs varient dans l'intervalle $[0,2]$, r_1 et r_2 sont deux nombres aléatoires triés uniformément dans $[0,1]$. $p_{best_{i,j}}^t$ correspond à la meilleure position locale de la particule i à l'itération t , et g_{best}^t correspond à la meilleure position globale à l'itération t . Les trois composantes (d'inertie, cognitive et sociale) considérées lors du déplacement d'une particule sont représentées dans l'équation (4.18) par les termes suivants :

$wV_{i,j}^t$: représente la composante d'inertie du mouvement. Le paramètre w a pour but de contrôler l'influence de la direction courante du déplacement sur le déplacement prochain. Le but d'insertion de ce paramètre dans l'équation, est de réaliser un équilibre entre la recherche locale (exploitation) et la recherche globale (exploration) des particules ; la valeur de ce coefficient peut être prise constante ou variable linéairement selon l'équation suivante :

$$w = w_{max} - \frac{(w_{max} - w_{min})}{iter_{max}} iter \quad (4.20)$$

où $iter$ est l'itération courante, $iter_{max}$ présente le nombre maximal d'itérations. w_{max} et w_{min} désignent respectivement les valeurs maximale et minimale du coefficient w (généralement, w_{max} et $w_{min} \in [0, 1]$).

$c_1r_1(p_{best_{i,j}}^t - x_{i,j}^t)$: représente la composante cognitive du mouvement. Le paramètre c_1 contrôle le comportement cognitif de la particule ;

$c_2r_2(g_{best}^t - x_{i,j}^t)$: représente la composante sociale du mouvement. Le paramètre c_2 contrôle le comportement sociale de la particule.

Une fois le déplacement de toutes les particules est réalisé, les nouvelles positions sont évaluées

et donc les deux positions $pbest_{i,j}$ et $gbest^t$ sont mettre à jour. L'algorithme du PSO peut être résumé par l'organigramme suivant :

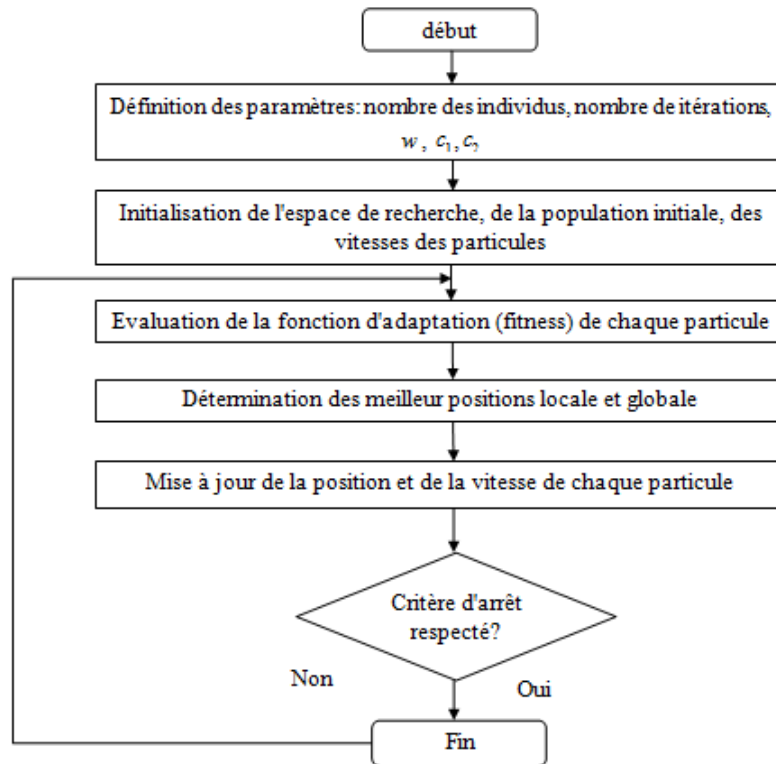


FIGURE 4.3 – Organigramme de l'OEP.

4.3.2.3 Optimisation à l'aide de MOPSO

Le problème d'optimisation technico-économique étant formulé comme un problème d'optimisation non linéaire avec contraintes, une stratégie de gestion de l'énergie basée sur MOPSO est appliquée pour trouver le dimensionnement optimal des systèmes de production d'électricité à haut rendement recommandés. En effet, l'estimation de la taille est considérée comme un problème multi-objectif qui est formulé en tenant compte des contraintes et des performances du système[38]. En général, un problème d'optimisation multi-objectif peut être formulé par l'énoncé mathématique suivant :

$$\begin{cases} \text{Minimize} & F(X) = [f_1(X), f_2(X), \dots, f_n(X)]^T \\ \text{Subjectto} & g(X) = 0 \\ \text{and} & h(X) \leq 0 \end{cases} \quad (4.21)$$

où X est le vecteur de variables de conception à n dimensions, $f_i(X)$ est la i^{th} fonction objective, $F(X)$ est le vecteur de fonctions objectives, (n) est le nombre de fonctions objectives,

$g(X)$ et $h(X)$ sont l'ensemble des contraintes d'égalité et d'inégalité, respectivement. La fonction d'aptitude est un type particulier de fonction objective permettant d'obtenir la meilleure solution parmi toutes les solutions possibles. L'optimisation est résolue par deux fonctions objectives requises dans cette étude. Ainsi, nous avons adopté une minimisation du COE comprenant le coût d'investissement initial $ICC(X)$, le coût d'exploitation et de maintenance $C_{OM}(X)$, le coût de remplacement $CR(X)$, et le coût du générateur diesel C_{DG} , tout au long de la durée de vie du système installé, ainsi qu'une minimisation du $LPSP$ pour le problème de la conception optimale. Les fonctions objectifs pour la conception optimale du MG doivent être minimisées simultanément, comme l'exprime l'équation suivante :

$$\begin{cases} \min_X f_1 = \min COE = ICC + C_{OM} + C_R + FC \\ \min_X f_2 = \min LPSP = \frac{\sum_{t=1}^T LPS(t)}{\sum_{t=1}^T P_{Load}(t)} \end{cases} \quad (4.22)$$

Le coût total du capital initial ICC peut être exprimé comme suit :

$$ICC = \sum_{WT=1}^{N_{WT}} C_{WT} + \sum_{DG=1}^{N_{GD}} C_{GD} + \sum_{BSS=1}^{N_{BSS}} C_{BSS} + \sum_{INV=1}^{N_{INV}} C_{INV} \quad (4.23)$$

où C_i est le coût unitaire du i^{eme} composant, et N_i est le nombre du i^{eme} composant.

Le coût d'exploitation et de maintenance ($O\&M$) du MG peut être exprimé comme suit :

$$C_{O\&M} = \sum_1^{365} \left\{ \sum_1^{24} (C_{O\&M,WT} + C_{O\&M,BSS} + C_{O\&M,GD} + C_{O\&M,INV}) \right\} \quad (4.24)$$

où $C_{O\&M}$ est le coût horaire total d'exploitation et de maintenance, et $C_{O\&M,WT}$, $C_{O\&M,GD}$ et $C_{O\&M,BSS}$ sont les coûts horaires $O\&M$ du WT, du GD et du BSS, respectivement.

En outre, C_R est le coût de remplacement des composants du MG, comme le montre l'équation suivante :

$$C_R = \sum_{j=1}^{N_{rep}} (C_{RC} * C_u * \left(\frac{1+i}{1+r}\right)^{\frac{T*j}{(N_{rep}+1)}}) \quad (4.25)$$

où i est le taux d'inflation des unités de remplacement, C_{RC} est la capacité des unités de remplacement, C_u est le coût des unités de remplacement, et N_{rep} est le nombre de remplacements d'unités pendant la durée de vie du projet T. FC est le coût du combustible du GD et peut être calculé comme suit :

$$FC = D_f(t) * GD_h * P_f \quad (4.26)$$

où GD_h est le nombre total d'heures de fonctionnement de la DG pendant T , et P_f est le prix du carburant par litre ($/L$).

L'algorithme complet utilisé à l'intérieur de l'ensemble est représenté sur la figure 4.3. Il nécessite l'ajustement de certains paramètres tels que les poids de socialité (ϕ_1, ϕ_2). Pour mettre en œuvre l'approche de gestion et d'optimisation proposée pour le MG, de nombreuses étapes MOPSO doivent être appliquées comme suit [39] :

— **Étape 1** : Définir les paramètres de l'algorithme MOPSO :

- Nombre de particules (N_p) et nombre maximum d'itérations.
- Poids d'inertie maximum $w = 0.5$, poids d'inertie minimum, ratio d'amortissement du poids d'inertie, $Wdamp = 0.99$ et facteurs d'apprentissage.
- Contrainte : facteur d'énergie renouvelable (équation (4.4) $RF > 0.01$,
- Limites inférieures et supérieures du nombre de WT, du nombre de GD et de la capacité du BSS.

— **Étape 2** : Générer un essaim aléatoire de particules en tenant compte des contraintes et des positions et vitesses correspondantes des particules.

— **Étape 3** : Évaluer la fonction d'aptitude pour chaque particule en utilisant et en trouvant la meilleure aptitude (COE minimum et LPSP). Trouver la meilleure performance globale $gbest_{id}$, dans la population qui représente le prix minimum de l'électricité et la probabilité de perte de l'alimentation électrique. Sauvegarder la meilleure performance $pbest_{id}$ pour chaque particule avec ses valeurs précédentes.

— **Étape 4** : Mettre à jour la vitesse de chaque particule en utilisant (4.27) :

$$v_{id}(k) = v_{id}(k-1) + \phi_1 rand_1 [pbest_{id} - x_{id}(k-1)] + \phi_2 rand_2 [gbest_{id} - x_{id}(k-1)], \quad (4.27)$$

où ϕ_1, ϕ_2 sont les facteurs de poids constants, et $rand_1$ et $rand_2$ sont des facteurs aléatoires dans l'intervalle $[0, 1]$.

— **Étape 5** : Mettre à jour la position de chaque particule en fonction de la dernière vitesse calculée à l'aide de (4.28) :

$$x_{id}(k) = x_{id}(k-1) + v_{id}(k) \quad (4.28)$$

— **Étape 6** : Répéter à partir de l'étape 2 jusqu'à ce qu'un nombre maximum d'itérations soit atteint.

4.4 Résultats obtenus sur le cas étudié

La méthodologie proposée pour l'optimisation de dimensionnement du MG consiste à utiliser un algorithme itératif et un algorithme métaheuristique d'optimisation multiobjectifs dont la combinaison d'outils (LPSP, COE) permettant l'évaluation énergétique et économique du MG. L'algorithme analytique est illustrée par l'organigramme de la figure 4.1 tant dis que l'algorithme évolutif d'optimisation est décrit par la figure 4.3. Les deux méthodes de dimensionnement sont validées à l'aide du logiciel MATLAB. La simulation du système MG hors réseau est réalisée sur une base de données réelle utilisant la vitesse du vent pour chaque heure durant la période allant du 01/01/2020 au 31/12/2020 de la ville de Rouyn Noranda. Cette base de données est collectée à partir du site Météoblue. Les paramètres techniques et économiques des composants du MG (WT, batterie, générateur diesel et onduleur) sont donnés en annexe.

Les figures 3.5 et 3.6 représentent les données horaires de la vitesse du vent et le profil annuel de la répartition de la production du parc éolien respectivement. Le profil de charge adopté est donné par la figure 3.7. Les jours d'autonomie (ad) sont ceux où il n'y a pas de vent pendant les saisons chaudes (juin, juillet et août). L'objectif est d'obtenir une demande de charge entièrement satisfaite avec un coût minimal. Pour maintenir le LPSP, une augmentation de la capacité de la batterie peut être une solution. Cependant, une capacité de batterie excessive peut augmenter le coût initial du système MG.

Dans cette étude, les méthodes d'optimisation sont divisées en deux catégories : les méthodes traditionnelles et les méthodes de nouvelle génération. L'algorithme de dimensionnement optimal basé sur la technique itérative est simulé comme le premier algorithme utilisé pour optimiser le problème. MOPSO est choisi comme algorithme métaheuristique efficace inspiré par la nature. Les résultats obtenus par le premier algorithme sont comparés à ceux obtenus par le MOPSO proposé. Pour la première stratégie optimisée, les résultats obtenus à l'aide du logiciel permettent de répondre à la demande de charge requise à un coût énergétique minimal. Les relations entre la fiabilité et les configurations du MG sont étudiées. La figure 4.4 montre les résultats de la relation entre la fiabilité du MG pour différentes valeurs de la capacités de BSS. Dans cette figure, les courbes sont de nature hyperbolique. Chaque point de ces courbes représente le nombre d'éolienne pouvant garantir l'autonomie énergétique souhaitée. Il est également démontré que lorsque la fiabilité du système est plus élevée, la configuration du MG (nombre d'éoliennes) est également plus élevée pour une même capacité du bancs de batteries. La variation du REPG pour différentes capacités de BSS et différents nombres d'éoliennes est donnée par la figure 4.5. On observe que le REPG diminue avec l'augmentation du LPSP. Après les critères techniques, le COE est utilisé comme référence économique. Ainsi, la figure

4.6 illustre les résultats de la relation entre la fiabilité du MG, les valeurs du coût COE, ainsi que sa configuration pour différents jours d'autonomie du BSS. La configuration démontrée par la figure 4.7 est considérée comme la configuration optimale, qui répond aux exigences de fiabilité du MG avec la valeur COE la plus faible. Il est également démontré que la configuration optimale est déterminée pour une valeur (LPSP=0.085) inférieure à 1, et pour un coût énergétique (COE=0.844 \$/KWh) avec un BSS fonctionnant pendant trois jours et un nombre d'éolienne égale à 5.

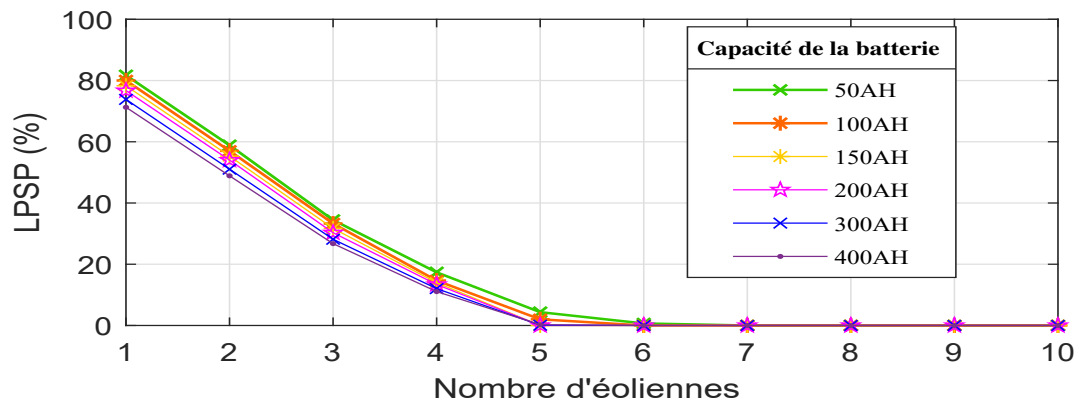


FIGURE 4.4 – LPSA pour différentes valeurs de la capacité de la batterie

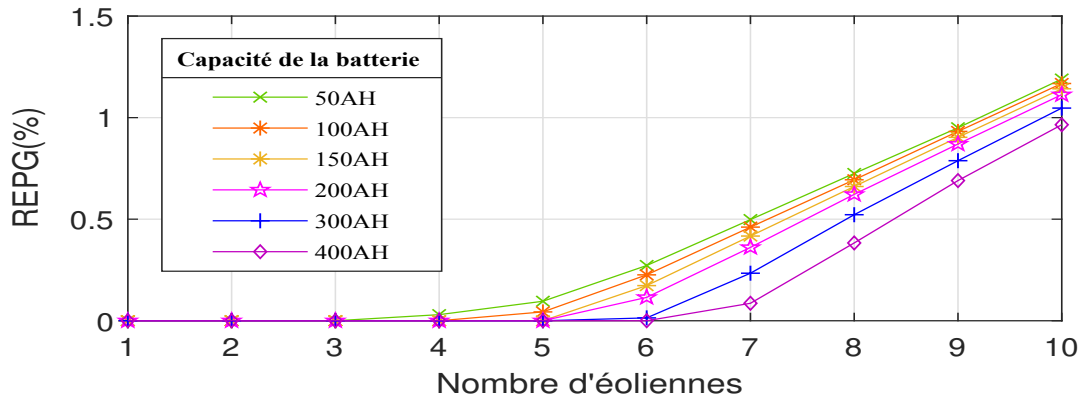


FIGURE 4.5 – REPG pour différentes valeurs de la capacité de la batterie

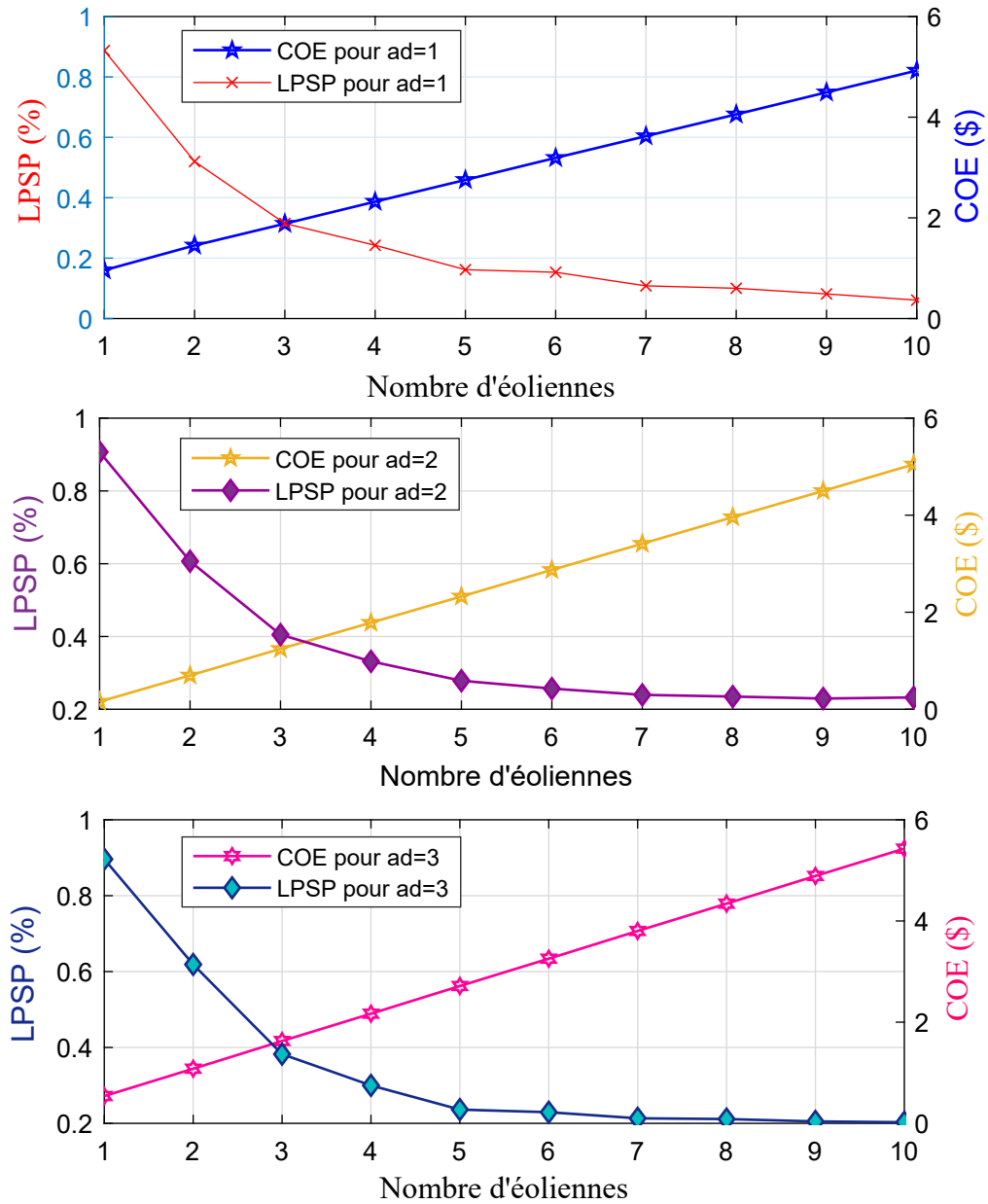


FIGURE 4.6 – LPSP et COE pour différents jour d'autonomie

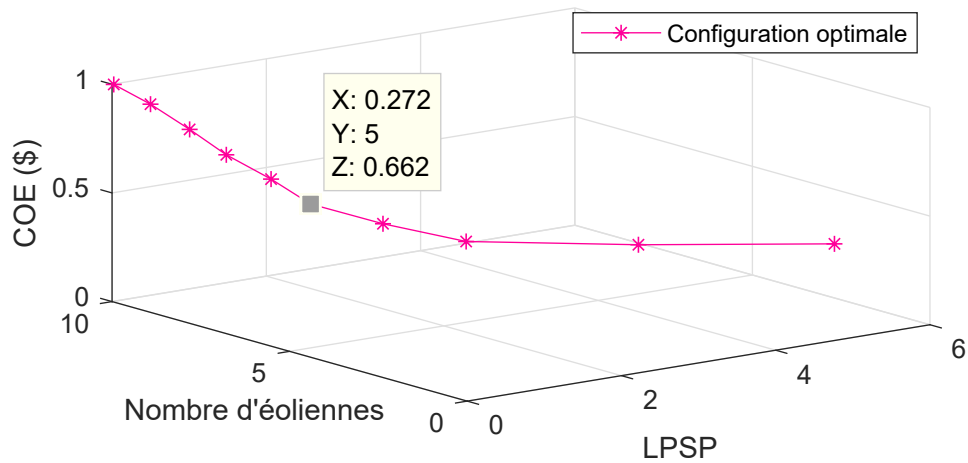


FIGURE 4.7 – Configuration optimale obtenue de l’algorithme analytique

Il est également démontré que la configuration optimale est déterminée pour une défaillance de l’approvisionnement souhaitée inférieure à 1, et pour un coût énergétique avec un BSS fonctionnant pendant trois jours et un nombre d’éolienne un peu élevé.

Concernant la deuxième stratégie du dimensionnement du MG, les caractéristiques techniques et les contraintes de chaque sous système sont les mêmes que ceux exploités dans la méthode analytique pour l’évaluation économique . En appliquant cette méthode les paramètres COE et LPSP ont été considérés comme des indicateurs de performance instantanés. Pour chaque configuration, la stratégie de gestion d’énergie est simulée sur une année (8640 h) et le bilan énergétique horaire du MG est calculé et classé. Dans ce qui suit, les figures 4.8, 4.9 illustrent les variations des différents indicateurs de fiabilité du MG en fonction du nombre d’itération de l’algorithme MOPSO (jusqu’à 100 itérations).

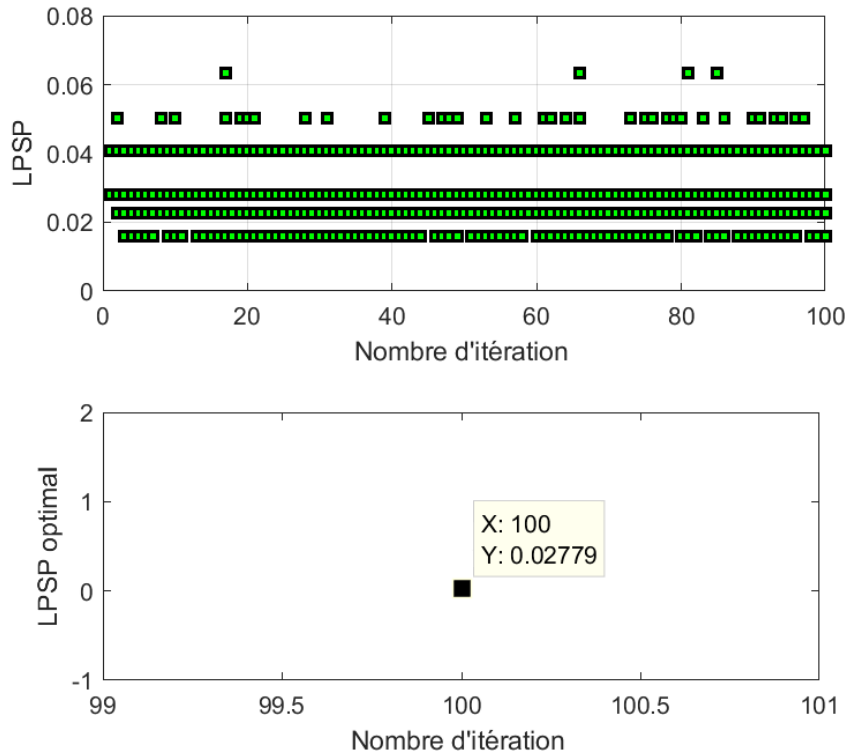


FIGURE 4.8 – LPSP obtenue via l'algorithme MOPSO pour le MG étudié

Comme le montre la figure 4.9, la valeur du COE varie au cours du processus d'itération. Cela signifie que l'algorithme d'optimisation réduit le coût d'exploitation en se rapprochant de la meilleure taille de système. Comme le montre cette figure, la solution optimale est obtenue après environ 30 itérations, et les 100 itérations sont considérées comme une mesure finale raisonnable.

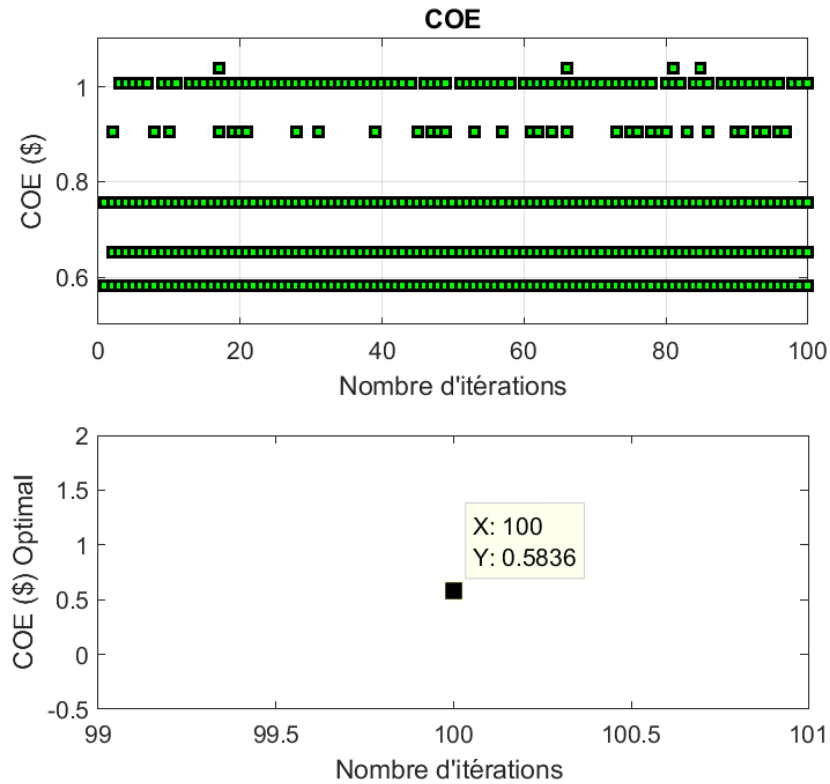


FIGURE 4.9 – COE obtenue via l'algorithme MOPSO pour le MG étudié

La figure 4.10 illustre la variation du prix de production du KWh d'énergie électrique en fonction du critère de fiabilité LPSP. Cette optimisation multi-objectifs offre un choix plus large du point optimal. Grâce à cette méthode, il est possible d'obtenir le coût COE pour n'importe quelle valeur de LPSP. Par conséquent, toute réduction de la fonction objective est importante car elle permet d'obtenir d'avantage d'informations sur la taille optimale.

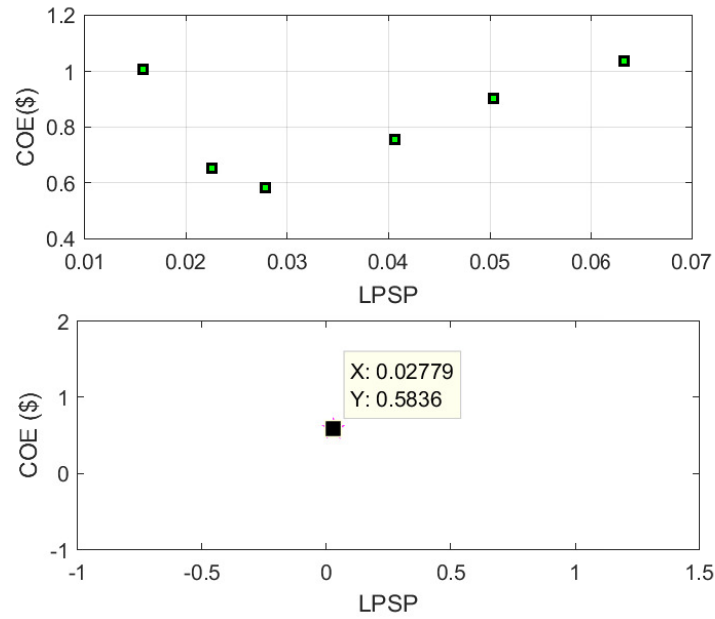


FIGURE 4.10 – Prix de production optimal du kWh d'énergie en fonction de l'insatisfaction énergétique LPSP

La valeur 0 pour le LPSP signifie que l'énergie demandée est toujours satisfaite et la valeur 1 signifie que la demande n'est jamais satisfaite. Le mouvement des essais au cours de 100 itérations est représenté sur la figure (4.9, 4.8). On peut voir que 100 particules volent depuis une initialisation aléatoire vers la meilleure particule globale, de sorte que toutes les particules convergent vers un point appelé "Global Best". Un examen approfondi pour trouver la conception optimale du système de micro-réseau hybride, présenté dans le tableau 4.1.

TABLE 4.1 – résultats de MOPSO

Paramètres	Valeur
Nombre d'itérations	100
Nombre de particules	40
Nombre de WT	3
Nombre de DG	2
Nombre de maisons	5
Nombre de jour d'autonomie	2
LPSP (%)	0.0278
COE(\$/KWh)	0.583
RF	(1 - 0.15140)

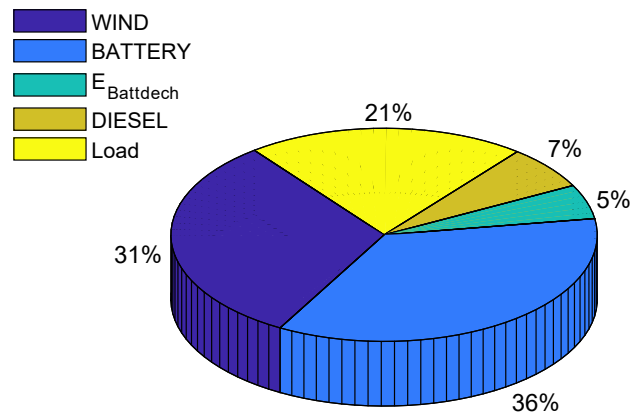


FIGURE 4.11 – Répartition en % de l'apport annuel en puissance des sous-systèmes de MG

TABLE 4.2 – Comparaison des résultats

Méthode	Nombre d'éolienne	Nombre de GDs	ad	LPSP (%)	COE(\$/KWh)
Méthode Analytique	5	1	3	0.272	0.662
Technique intelligente	3	2	2	0.0278	0.583

Le modèle d'optimisation de MOPSO génère un dimensionnement approprié pour les charges choisies. Les résultats obtenus avec MOPSO montrent une fiabilité améliorée avec un coût réduit et une contribution maximisée des sources renouvelables illustré par la figure 4.11. Pour évaluer la validité de l'approche proposée, MOPSO est comparé à l'algorithme analytique et présenté dans le tableau 4.2.

4.5 Conclusion

L'optimisation de la conception des MGs est une question importante dans le système électrique. L'objectif de ce chapitre était d'optimiser, sous les contraintes de fiabilité et de coût, le dimensionnement et la gestion d'énergie au sein d'un MG autonome à énergies renouvelables composé d'un parc éolien, des batteries, un GD et une charge. Deux techniques, l'algorithme

analytique et le MOPSO, sont utilisées pour résoudre le problème de dimensionnement. Les résultats de la simulation prouvent que l'approche proposée, basée sur le MOPSO, produit des résultats plus prometteurs que l'algorithme analytique. La prise en compte d'un dimensionnement évolutif a montré que des gains importants sur l'ensemble des objectifs peuvent être obtenus. Enfin, la dernière partie de ce chapitre a été consacrée aux résultats de simulation du MG et leurs interprétations.

Conclusion Générale et Perspectives

les MGs isolés sont une solution prometteuse pour fournir une énergie fiable et durable dans des zones éloignées où l'extension du réseau traditionnel peut être coûteuse ou difficile à mettre en œuvre. Dans le cadre de ce mémoire, l'étude des micro-réseaux à énergies renouvelables constitue un défi du fait que ces énergies sont de natures intermittentes et que leur intégration dans des zones éloignées nécessite le déploiement d'une conception fiable, d'un contrôle de puissance efficace et d'une gestion d'énergie optimale. Les travaux présentés se sont concentrés sur les MGs autonomes dont une définition a été proposée dans le deuxième chapitre. Le premier chapitre a posé le cadre d'étude ainsi que les concepts importants. Une étude générale des MGs hybrides a été proposée dans le chapitre II. Ce dernier a permis de définir, d'étudier la composition, les architectures des microgrids et les évaluer sur plusieurs indicateurs : économique, environnemental et rentabilité. Dans le troisième chapitre, le modèle du MG a été construit sur une échelle énergétique, représentant chacun des composants incluant le générateur éolien, le GD, le système de stockage, et l'étage de conversion. Un algorithme de gestion a été développé et testé sur une année entière. La stratégie de gestion a été développée pour maintenir l'équilibre entre la production et la consommation d'énergie : elle donne la priorité à la source renouvelable et le privilège aux batteries par rapport au GD pour produire et stocker de l'énergie, et permet d'aboutir à un maximum de satisfaction énergétique. L'adéquation production-consommation a été approuvée sous l'environnement MATLAB. Ce projet a pour objectif d'électrifier cinq maisons rurales de la ville de Rouyn Noranda, ne disposant pas de connexion au réseau publique d'électricité. Le MG a été simulé sur une année entière avec des données météorologique réelle.

Dans le chapitre VI, deux méthodes de conception ont été proposées pour optimiser le dimensionnement des MGs isolés. La première méthode est basée sur un algorithme itératif avec une optimisation de fiabilité et du coût du MG. Ainsi, la deuxième méthode proposée repose sur un algorithme métaheuristique qui évalue une population entière de configurations du MG à chaque génération et fait évoluer la population à chaque nouvelle configuration vers un optimum global, du point de vue des objectifs d'intérêt fixés. Les perspectives découlant des études présentées ci-dessus peuvent être divisées entre la gestion de l'énergie et le dimensionnement

des MGs. En effet, certaines perspectives peuvent être mises en évidence pour futures études.

- Il est possible d'inclure d'autres sources d'énergie renouvelable. Par exemple, les panneaux solaires peuvent présenter l'avantage d'un meilleur potentiel de production lors des saisons où le potentiel éolien est faible.
- Appliquer des méthodes d'intelligence artificielle pour améliorer la stratégie de gestion de l'énergie à partir des sources d'énergie renouvelables et de la demande de charge.
- Appliquer d'autres méthodes d'intelligence artificielle pour améliorer le dimensionnement du système de micro-réseau.

Bibliographie

- [1] I. E. Statistics, Available on-line : <http://www.iea.org/Textbase/stats/index.asp> (2003). [ix](#), [2](#), [3](#)
- [2] I. Patrao, E. Figueres, G. Garcerá, R. González-Medina, Microgrid architectures for low voltage distributed generation, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 43 (2015) 415–424. [ix](#), [14](#)
- [3] M. Groll, Can climate change be avoided? vision of a hydrogen-electricity energy economy, *Energy* 264 (2023) 126029. [2](#)
- [4] I. Ackah, E. Graham, Meeting the targets of the paris agreement : an analysis of renewable energy (re) governance systems in west africa (wa), *Clean Technologies and Environmental Policy* 23 (2021) 501–507. [5](#)
- [5] A. Scott, Sustainable energy for all : a balance of objectives, *Development Progress*. October (2012). [9](#)
- [6] A. H. Tariq, S. A. A. Kazmi, M. Hassan, S. M. Ali, M. Anwar, Analysis of fuel cell integration with hybrid microgrid systems for clean energy : A comparative review, *International Journal of Hydrogen Energy* (2023). [9](#)
- [7] A. Varais, Modèles à échelle réduite en similitude pour l'ingénierie système et l'expérimentation simulée" temps compacté" : application à un microréseau incluant un stockage électrochimique., Ph.D. thesis (2019). [10](#)
- [8] F. Mebarek-Oudina, I. Chabani, Review on nano enhanced pcms : insight on nepcm application in thermal management/storage systems, *Energies* 16 (3) (2023) 1066. [11](#)
- [9] A. Olabi, C. Onumaegbu, T. Wilberforce, M. Ramadan, M. A. Abdelkareem, A. H. Al-
Alami, Critical review of energy storage systems, *Energy* 214 (2021) 118987. [11](#)

- [10] F. S. Al-Ismail, Dc microgrid planning, operation, and control : A comprehensive review, *IEEE Access* 9 (2021) 36154–36172. [12](#)
- [11] G. Shahgholian, A brief review on microgrids : Operation, applications, modeling, and control, *International Transactions on Electrical Energy Systems* 31 (6) (2021) e12885. [13](#)
- [12] M. Uddin, H. Mo, D. Dong, S. Elsayah, J. Zhu, J. M. Guerrero, Microgrids : A review, outstanding issues and future trends, *Energy Strategy Reviews* 49 (2023) 101127. [14](#)
- [13] B. Sahoo, S. K. Routray, P. K. Rout, Ac, dc, and hybrid control strategies for smart microgrid application : A review, *International Transactions on Electrical Energy Systems* 31 (1) (2021) e12683. [15](#)
- [14] T. Tezer, R. Yaman, A pareto optimum approach and a power management strategy for a stand-alone wind turbine-pv-hydrogen with reformer hybrid renewable energy system, *Environmental Progress & Sustainable Energy* 41 (4) (2022) e13772. [18](#)
- [15] R. Hosseinalizadeh, H. Shakouri, M. S. Amalnick, P. Taghipour, Economic sizing of a hybrid (pv–wt–fc) renewable energy system (hres) for stand-alone usages by an optimization-simulation model : Case study of iran, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 54 (2016) 139–150. [21](#)
- [16] M. Smaoui, A. Abdelkafi, L. Krichen, Optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind/hydrogen hybrid system supplying a desalination unit, *Solar Energy* 120 (2015) 263–276. [21](#)
- [17] F. Huneke, J. Henkel, J. A. Benavides González, G. Erdmann, Optimisation of hybrid off-grid energy systems by linear programming, *Energy, Sustainability and Society* 2 (1) (2012) 1–19. [21](#)
- [18] C. E. C. Nogueira, M. L. Vidotto, R. K. Niedzialkoski, S. N. M. de Souza, L. I. Chaves, T. Edwiges, D. B. dos Santos, I. Werncke, Sizing and simulation of a photovoltaic-wind energy system using batteries, applied for a small rural property located in the south of brazil, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29 (2014) 151–157. [21](#)
- [19] A. Ogunjuyigbe, T. Ayodele, O. Akinola, Optimal allocation and sizing of pv/wind/split-diesel/battery hybrid energy system for minimizing life cycle cost, carbon emission and dump energy of remote residential building, *Applied Energy* 171 (2016) 153–171. [21](#)

- [20] P. Paliwal, N. Patidar, R. Nema, Determination of reliability constrained optimal resource mix for an autonomous hybrid power system using particle swarm optimization, *Renewable energy* 63 (2014) 194–204. [22](#)
- [21] A. Hassan, M. Saadawi, M. Kandil, M. Saeed, Modified particle swarm optimisation technique for optimal design of small renewable energy system supplying a specific load at mansoura university, *IET Renewable Power Generation* 9 (5) (2015) 474–483. [22](#)
- [22] H. Borhanazad, S. Mekhilef, V. G. Ganapathy, M. Modiri-Delshad, A. Mirtaheri, Optimization of micro-grid system using mopso, *Renewable energy* 71 (2014) 295–306. [22](#)
- [23] E. Sortomme, G. Mapes, B. Foster, S. Venkata, Fault analysis and protection of a micro-grid, in : 2008 40th North American Power Symposium, IEEE, 2008, pp. 1–6. [22](#)
- [24] M. A. Ramli, A. Hiendro, Y. A. Al-Turki, Techno-economic energy analysis of wind/solar hybrid system : Case study for western coastal area of saudi arabia, *Renewable energy* 91 (2016) 374–385. [23](#)
- [25] M. S. Adaramola, M. Agelin-Chaab, S. S. Paul, Analysis of hybrid energy systems for application in southern ghana, *Energy Conversion and Management* 88 (2014) 284–295.
- [26] S. Bhattacharjee, S. Acharya, Pv–wind hybrid power option for a low wind topography, *Energy Conversion and Management* 89 (2015) 942–954.
- [27] F. Khalid, M. Aydin, I. Dincer, M. Rosen, Comparative assessment of two integrated hydrogen energy systems using electrolyzers and fuel cells, *International Journal of Hydrogen Energy* 41 (44) (2016) 19836–19846. [23](#)
- [28] T. K. Ghosh, M. A. Prelas, T. K. Ghosh, M. A. Prelas, *Wind energy, Energy Resources and Systems : Volume 2 : Renewable Resources* (2011) 1–77. [26](#)
- [29] Y. Wang, Evaluation de la performance des réglages de fréquence des éoliennes à l'échelle du système électrique : Application à un cas insulaire, Ph.D. thesis, Ecole centrale de Lille (2012). [27](#)
- [30] A. Kaabeche, R. Ibtouen, Techno-economic optimization of hybrid photovoltaic/wind/diesel/battery generation in a stand-alone power system, *Solar Energy* 103 (2014) 171–182. [27](#), [43](#)

- [31] X. Xu, W. Hu, D. Cao, Q. Huang, C. Chen, Z. Chen, Optimized sizing of a standalone pv-wind-hydropower station with pumped-storage installation hybrid energy system, *Renewable Energy* 147 (2020) 1418–1431. [27](#), [28](#)
- [32] W. Cai, X. Li, A. Maleki, F. Pourfayaz, M. A. Rosen, M. A. Nazari, D. T. Bui, Optimal sizing and location based on economic parameters for an off-grid application of a hybrid system with photovoltaic, battery and diesel technology, *Energy* 201 (2020) 117480. [28](#)
- [33] R. Hou, A. Maleki, P. Li, Design optimization and optimal power management of standalone solar-hydrogen system using a new metaheuristic algorithm, *Journal of Energy Storage* 55 (2022) 105521. [33](#)
- [34] S. M. S. Alavi, A. Maleki, A. Noroozian, A. Khaleghi, Simultaneous optimal site selection and sizing of a grid-independent hybrid wind/hydrogen system using a hybrid optimization method based on electre : A case study in iran, *International Journal of Hydrogen Energy* 55 (2024) 970–983. [41](#)
- [35] A. Kaabeche, M. Belhamel, R. Ibtouen, Techno-economic valuation and optimization of integrated photovoltaic/wind energy conversion system, *Solar energy* 85 (10) (2011) 2407–2420.
- [36] A. Lazinica, Particle swarm optimization, BoD–Books on Demand, 2009. [48](#)
- [37] S. Khunkitti, A. Siritaratiwat, S. Premrudeepreechacharn, R. Chatthaworn, N. R. Watson, A hybrid da-pso optimization algorithm for multiobjective optimal power flow problems, *Energies* 11 (9) (2018) 2270. [48](#)
- [38] A. Heydari, M. M. Nezhad, F. Keynia, A. Fekih, N. Shahsavari-Pour, D. A. Garcia, G. Piras, A combined multi-objective intelligent optimization approach considering techno-economic and reliability factors for hybrid-renewable microgrid systems, *Journal of Cleaner Production* 383 (2023) 135249. [51](#)
- [39] C. Roldán-Blay, G. Escrivá-Escrivá, C. Roldán-Porta, D. Dasí-Crespo, Optimal sizing and design of renewable power plants in rural microgrids using multi-objective particle swarm optimization and branch and bound methods, *Energy* 284 (2023) 129318. [53](#)

Annexe

Données économiques et spécifications des composants utilisés

Paramètre	Valeur	Unité
Wind generator		
Cut-in velocity	3	<i>m/s</i>
Cut-out velocity	25	<i>m/s</i>
Rated speed	12	<i>m/s</i>
Maximum power	2.25	<i>kW</i>
Unit cost	1750	€ / <i>kW</i>
Operation and maintenance cost	2	%
Lifetime	20	years
Batterie		
Energy capacity	2.4	<i>kWh</i>
Nominal Voltage	48	<i>V</i>
Unit cost	900	€
Operation and maintenance cost	2	%
Lifetime	10	years
Round trip efficiency	85	%
Converter		
Rated power	3	<i>kW</i>
Unit cost	500	€
Operation and maintenance cost	2	%
Lifetime	10	years
Round trip efficiency	90	%
Diesel generator		
Rated power	3	<i>kW</i>
Unit cost	400	€
Operation and maintenance cost	2	%
Lifetime	24,000	h