



Université du Québec
à Rimouski

**Développement d'une approche décisionnelle multicritère pour
le choix d'un système énergétique renouvelable à implanter dans
les sites isolés**

Cas d'étude : maison partielle aux îles de la madeleine

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en gestion de projet

en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences

PAR

KAOUTAR BOUYACHOU

[Octobre 2017]

Composition du jury :

Monsieur Didier Urli, président du jury, professeur, UQAR

Monsieur Bruno Urli, directeur de recherche, professeur associé, UQAR

Monsieur Farid Ben Hassel, membre du jury, professeur, UQAR

Monsieur Jean Louis Chaumel, examinateur externe

Dépôt initial le [16 août 2017]

Dépôt final le [19 octobre 2017]

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

À mes chers parents Mohamed et Houria Bouyachou. C'est grâce à votre présence, votre soutien, vos sacrifices et votre affection que j'avance. Sans vous, ce mémoire n'aurait jamais vu le jour. Un Merci infini!

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer mes remerciements à toutes les personnes qui m'ont aidé, de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.

Tout d'abord, et avant tout, je souhaite exprimer ma profonde gratitude à mon Directeur de recherche, M. Bruno Urli d'avoir toujours cru en moi, m'encourager, m'accompagner, me soutenir et d'être toujours présent tout au long de ma formation en maîtrise. Surement les mots restent insignifiants pour le remercier.

Je tiens aussi à remercier du fond du cœur, M. Khalid El Mellahi, pour ses conseils, son support, et toute son aide précieuse sur le plan professionnel et personnel.

Je n'oublierai sans doute pas de remercier le département de génie de l'UQAR, en particulier M. Adrien Ilinca de m'avoir aidé lors de la définition de la problématique de recherche et M. Damien Morandi pour tous les éclaircissements qu'il m'avait apporté sur le logiciel HOMER Energy.

Mes remerciements s'adressent aussi aux membres de Jury, M. Didier Urli, M. Farid Ben Hassel et M. Jean Louis Chaumel, d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Et sans doute, mes remerciements s'adressent à mon mari Adil Amine, mes frères Taoufiq, Mehdi et Samira, mes tantes et mes amies pour leur patience, leur présence et leur soutien inconditionnel.

RÉSUMÉ

Désormais, le recours aux énergies renouvelables est devenu une préoccupation majeure pour chaque société. Leur pertinence se veut dans les avantages environnementaux, sociaux et économiques qu'elles présentent par rapport aux énergies conventionnelles, notamment les énergies fossiles (charbon, gaz, pétrole...). Ainsi de nombreux pays s'intéressent aux développements des cinq filières énergétiques renouvelables (éolienne, solaire, hydraulique, géothermique et biomasse) et tentent, par ailleurs, de concevoir des systèmes ayant un plus grand pourcentage de ratio du renouvelable, tout en portant une attention particulière aux questions d'autonomie, de fiabilité ...etc. De là, nous retrouvons aujourd'hui sur le marché, une grande variété de système énergétique renouvelables (SER) ayant chacun ses avantages et ses inconvénients, ce qui rend le choix en SER difficile pour les décideurs surtout face à la multitude des critères techniques, environnementales, sociales et économiques...etc.

Bien qu'il existe de nombreux logiciels destinés au choix des SERs, notamment RETScreen, HOMER Energy...etc. – ces derniers restent limités à des critères quantitatifs (techniques et / ou économique), et omettent la prise en considération des critères qualitatifs (l'analyse d'impact environnementale, l'impact sociale, la présence de main d'œuvre, l'encombrement du système, la présence de pièces de rechange, la sécurité de l'équipement, etc. ...). De plus, la majorité de ces outils, ne permettent pas de faire de manière intégrée une simulation comparative de différents SERs à la fois.

C'est pourquoi l'objectif de cette recherche consiste à proposer une approche décisionnelle multicritère et multi-acteurs pour le choix optimal du système énergétique renouvelable en sites isolés. Cette approche a pour but de présenter une démarche globale intégrant aussi bien les critères quantitatifs que qualitatifs. Elle permettra également, l'analyse des scénarios qui prennent en considération les parties prenantes impliquées dans le projet. Afin de délimiter le cadre de notre étude, nous nous intéresserons particulièrement aux systèmes éolien / solaire et leurs systèmes dérivés. L'étude portera sur les systèmes délocalisés et destinés à l'usage des sites isolés.

Mots clés : Système d'énergie renouvelable, Aide à la décision multicritère, Homer Energy Pro, PROMETHEE-GAIA, Sites isolés, Systèmes hybrides

ABSTRACT

From now on, the use of renewable energies has become a major concern for each society. Their relevance is in the environmental, social and economic advantages that they offer comparing them to the conventional energies, in particular fossil fuels (coal, gas, oil, etc.). So, many countries were interested in the development of the five renewable energy (wind, solar, hydro, geothermal and biomass) and tried to conceive systems with a higher ratio of renewable energy, autonomous and reliable...etc. Hence, we can find today, a wide variety of renewable energy systems (RES), each one has its own strength and weakness, which makes the choice in RES difficult for decision-makers, especially regarding the multitude of technical, environmental, social and economic criteria.

Even if there is lots software developed for RES, such as RETscreen, HOMER Energy ... etc. - they remain limited to quantitative criteria (technical and / or economic), and omit the consideration of qualitative criteria (analysis environmental impact, social impact, lack of skilled labor, the presence of spare parts, the safety of the equipment, etc.). Moreover, the majority of these tools not allows an integrated simulation of the different SERs at one time.

Therefore, the aim of this research is to propose a multicriteria and multi-actor decision-making approach for choosing the optimal renewable energy system in isolated sites. This approach aims to present a global approach integrating both quantitative and qualitative criteria. It will also allow analysis of the scenarios that take into account the stakeholders involved in the project. Our study, we will be interested in wind / solar systems and their hybrid systems., intended for use in isolated sites.]

Keywords : [Renewable energy system, Multicriteria decision support, Homer Energy Pro, PROMETHEE-GAIA, Isolated sites, Hybrid systems]

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	vi
RÉSUMÉ.....	viii
ABSTRACT	ix
TABLE DES MATIÈRES	x
LISTE DES TABLEAUX.....	xii
LISTE DES FIGURES.....	xiv
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES	xvi
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CHAPITRE 1 PHASE CONCEPTUELLE.....	3
1.1 THEME GENERAL DE LA RECHERCHE	3
1.2 GENERALITE SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES	7
1.3 PROBLEMATIQUE DU CHOIX DES SYSTEMES ENERGETIQUES RENOUVELABLES.....	18
1.4 QUESTION ET OBJECTIF SPÉCIFIQUE DE LA RECHERCHE	19
1.5 STRUCTURATION DU MÉMOIRE	19
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTERATURE SUR LES METHODE DE CHOIX DES SERS	20
2.1 LES LOGICIELS.....	20
2.2 METHODES MULTICRITERES	36
CHAPITRE 3 REVUE DE LITTERATURE SUR LES CRITERES DE CHOIX DES SERS	45
3.1 DEFINITION D'UN CRITERE [40]	45

3.2	CRITERES CONSIDERES DANS LES PROGICIELS POUR LES SERS	46
3.3	CRITERES TROUVES DANS LA LITTERATURE	47
3.4	CRITERES ISSUS DES ENTREVUES.....	50
	CHAPITRE 4 CAS D'APPLICATION : MAISON PARTIELLE AUX ILES DE LA MADELEINE	51
4.1	DESCRIPTIF DE L'APPROCHE.....	51
4.2	PRESENTATION DU CAS D'ETUDE.....	53
4.3	ANALYSE AVEC HOMER ENERGY	54
4.4	APPLICATION DE LA MATRICE MULTICRITERE SUR PROMETHEE- GAIA	68
4.5	ANALYSE DES RESULTATS	80
	CONCLUSION GÉNÉRALE.....	97
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	98
	ANNEXE I.....	101
	Extrait de la revue de littérature des MCDA et des critères qui entrent dans le choix des SERs en sites isolés faite par [26] (traduction libre)	101

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Type de chaque outil étudié, Extrait de la table 2, (Connolly, Lund et al. 2010).....	21
Tableau 2: Les spécifications de chaque outil, adaptation de la table 3, 4, 5 (Connolly, Lund et al. 2010)	25
Tableau 3: Exemple d'étude réalisé par Homer Energy dans la littérature	31
Tableau 4: Exemples dans la littérature des études réalisés par RETScreen	34
Tableau 5: Revue de littérature sur MCDA utilisé pour le choix des SERs	38
Tableau 6: Nombre d'article traitant les méthodes MCDA pour le choix des SERs en site isolé selon [26].....	39
Tableau 7: Nombre d'article traitant les méthodes en MCDA pour la sélection des projets ER selon (extrait de la table 1 de l'article [20])	39
Tableau 8: Critères utilisées par les progiciels en matière de sélection des SERs.....	47
Tableau 9: Revue de littérature sur les critères de choix des SERs	48
Tableau 10: La consommation des appareils considérés dans une maison partielle aux îles de la madeleine	55
Tableau 11: Résultat de la simulation sur Homer Energy et évaluation des critères pour le cas de la maison partielle aux îles de la madeleine	68
Tableau 12: Explication de l'échelle pour le critère : complexité du système	69
Tableau 13: Explication de l'échelle pour le critère : complexité du système	70
Tableau 14: Le coût de remplacement, d'O&M, de combustible de chaque système retenu.....	71

Tableau 15: Explication de l'échelle pour le critère : impact faune et flore	73
Tableau 16: Explication de l'échelle pour le critère : nuisance visuelle et/ou auditive	73
Tableau 17: Explication de l'échelle pour le critère : acceptabilité du voisinage	74
Tableau 18: Explication de l'échelle pour le critère : sécurité sociale	75
Tableau 19: Explication de l'échelle pour le critère : sécurité anti-vol.....	75
Tableau 20: La modélisation des préférences sur les critères, cas maison partielles aux îles de la madeleine	77
Tableau 21: Nature des critères et leurs méthodes d'évaluations.....	77
Tableau 22: Évaluation des actions par chaque critère, cas de la maison partielle aux îles de la madeleine.....	78

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Transformation énergétique selon AIE.....	3
Figure 2 : Evolution de la consommation énergétique mondiale avec les réserves de l'énergie fossile[3].....	5
Figure 3: Projection de la consommation mondiale de l'énergie en 2035 en fonction des pays les plus consommateurs[4]	6
Figure 4: Le potentiel solaire mondial	8
Figure 5: Potentiel de l'énergie géothermique dans le monde [15].....	10
Figure 6: Utilisation de différentes énergies renouvelables [7]	13
Figure 7 : Classification des systèmes énergétiques en sites isolés	15
Figure 8: les étapes de l'approche décisionnelle multicritère pour le choix d'un SER à implanter dans les sites isolés.....	53
Figure 9: Profil de charge d'un maison partielle aux îles de la madeleine	56
Figure 10: Les spécifications techniques du générateur pour le cas de la maison partielle aux îles de la madeleine	57
Figure 11: Les irradiations solaires journalières aux îles de la madeleine.....	59
Figure 12: Profil de la vitesse moyenne de vent de la maison aux îles de la madeleine.....	61
Figure 13: La courbe de puissance d'une éolienne de 3kW	63
Figure 14: La courbe de puissance d'une éolienne de 10kW	64
Figure 15: Pondération des critères pour des poids égaux	79

Figure 16: Pondération des critères par les propriétaires.....	79
Figure 17: Pondération des critères par le voisinage	80
Figure 18: Pondération des critères par les environnementalistes.....	80
Figure 19: Classement partiel PROMETHEE I pour le scénario 1	81
Figure 20: Classement complet PROMETHEE II pour le scénario 1	81
Figure 21: Diamant-PROMETHEE pour le scénario 1	83
Figure 22: Graphe PROMETHEE pour le scénario 1.....	84
Figure 23 : Arc en ciel PROMETHEE pour le scénario 1	85
Figure 24: Représentation graphique des critères sur GAIA pour le scénario 1	87
Figure 25: Représentation des actions et des critères sur GAIA pour le scénario 1	88
Figure 26 : Profil d'action	91
Figure 27: GAIA-Web	92
Figure 28: Analyse PROMETHEE pour les propriétaires.....	93
Figure 29: Analyse PROMETHEE pour les voisins.....	94
Figure 30: Analyse PROMETHEE pour les environnementalistes	95
Figure 31: Comparaison des scénarios 1, 2, 3 et 4	96

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

ER	Energie renouvelable.
SEC	Système énergie conventionnel.
AIE	Agence Internationale de l'Énergie.
SER	Système d'énergie renouvelable.
TPER	Taux de pénétration d'énergie renouvelable.
TPE	Taux de pénétration d'énergie électrique.
TPES	Taux des autres secteurs de l'énergie renouvelable : chaleur et transport.
HOMER Energy	Hybrid optimisation model for electric renewables energy.
MCDA	Méthode multicritère d'aide à la décision.
GAIA	Graphical analysis for interactive aid..
PROMETHEE	Preference ranking optimisation method for enrichment evaluation.
PV	Panneaux photovoltaïques.
PV,G,S	Panneaux photovoltaïques., générateur et stockage
E3,G,S	Éolienne 3kW., générateur et stockage
PV,E3,G,S	Panneaux photovoltaïque, éolienne 3kW, générateur et stockage
E10,G,S	Éolienne 10kW., générateur et stockage
GES	Gaz à effet de serre

Coût O&M	Coût d'opération et de maintenance
NPC	Net present cost (coût actuel net)
VAN	Valeur actuelle nette
SO₂	Dioxyde du soufre
NO_x	Oxyde d'azote
CO₂	Dioxyde de carbone
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattheure
kWh/an	Kilowattheure par an
kg/an	Kilogramme par an
L	Litre
°C	Celsius
J	Joule
tBu	Unité thermique britannique
m²	mètre carré
m	mètre
m/s	mètre par seconde
Km/h	Kilomètre par heure
mm	millimètre
P_{pv}	Puissance des panneaux photovoltaïques

V_m Vitesse moyenne

Ah Ampère-heure

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Avec l'essor des énergies renouvelables, différentes technologies se sont développées pour répondre aux besoins énergétiques. Cependant, il s'avère aujourd'hui difficile de faire un choix de système énergétique optimal qui répond à toutes les exigences techniques, économiques et qui respect l'environnement et les préoccupations de la société. Dans ce sens, plusieurs études sur les outils d'aide à la décision et logiciels ont été développées pour aider les décideurs dans leur choix. Cependant, la majorité des outils présents ne permettent pas de faire une analyse complète qui permet de concilier les différents critères (techniques, économiques, environnementales et sociaux) des SERs à implanter dans un site isolé donné. En effet, Suite à une revue de littérature réalisée sur les outils disponible en matière d'aide à la décision multicritère, nous avons constaté que :

D'une part en matière des outils informatisés d'aide à la décision des systèmes énergétiques renouvelables, plusieurs d'entre eux se spécialisent seulement dans un type d'énergie renouvelable, notamment l'éolien ou le solaire. Ce qui revient à négliger tous les autres choix possibles et / ou toutes les combinaisons optimales. En outre, ces progiciels ne permettent que l'analyse des critères qualitatives souvent techniques et / ou économiques. Cependant, il paraît que le logiciel HOMER Energy est l'outil le plus complet qui permet de faire la simulation avec plusieurs composantes (simple ou hybride, avec ou sans stockage), d'optimiser les système et de réaliser une étude de sensibilité. Il permet aussi d'évaluer différents critères technico-économiques quantitatifs tels que la disponibilité des ressources, la fraction ER, la production énergétique, différents coûts et les émissions de gaz à effet de serre. Seulement, le logiciel ne prend pas en considération les choix des parties prenantes et la considération des critères qualitatifs techniques, environnementaux et/ou sociaux (impact environnementale, l'impact sociale, la présence de main d'œuvre, l'encombrement du

système, la présence de pièces de rechange, la sécurité de l'équipement, etc.). Ces critères se sont avérés importants à la prise de décision en matière de choix des SERs.

D'une autre part, les méthodes d'aide à la décision multicritères ont été aussi utilisées pour choisir les SERs. Nous en notons, PROMETHEE, ELECTRE, la méthode AHP...etc. Bien que ces méthodes, prennent en considération les critères quantitatifs et qualitatifs, ainsi que les choix des parties prenantes, cependant, ils sont faibles sur le plan des critères techniques et moins précis sur les critères économiques.

L'objectif de cette recherche, donc, consiste à proposer une démarche d'aide à la décision multicritère et multi-dimensionnelle en matière de choix de système énergétique renouvelable en sites isolés. Cette approche a pour but de présenter une démarche à la fois globale et facile, qui intègre aussi bien les critères quantitatifs que qualitatifs, et qu'elle soit le plus possible précise sur le plan technico-économique. Elle permettra également, l'analyse des scénarios qui prennent en considération les parties prenantes impliquées dans le projet.

Afin de délimiter le cadre de notre étude, nous nous intéresserons particulièrement aux systèmes autonomes éolien / solaire et leurs systèmes dérivés. Nous avons choisi en particulier les systèmes délocalisés, destinés à l'usage des sites non raccordés au réseau électrique.

Et pour illustrer notre démarche, nous l'avons appliquée sur un cas didactique d'une maison partielle aux îles de la Madeleine.

CHAPITRE 1

PHASE CONCEPTUELLE

1.1 THEME GENERAL DE LA RECHERCHE

Depuis toujours, l'énergie a joué un rôle majeur dans le développement humain et le bien-être de la société. Pour son confort, l'homme use de l'énergie dans la quasi-totalité de ses activités, son transport, son chauffage, son éclairage, etc. Cependant, pour des raisons économiques, environnementales et/ou sociales, il est devenu essentiel de remplacer les énergies conventionnelles à savoir (le gaz naturel, le charbon, le pétrole...) par d'autres formes d'énergies notamment les énergies renouvelables. Cette nouvelle orientation s'inscrit dans le programme de transition énergétique.

En effet, le concept de la transition énergétique a été introduit par l'association allemande Oko-institut, il visait à abandonner progressivement les énergies fossiles et/ou nucléaires au profit des énergies renouvelables [1]. Dans la même optique l'AIE a développé un scénario en 2012, qui appel à la promotion des énergies renouvelables de 10% face à une diminution des autres énergies non renouvelables (voir Figure 1).

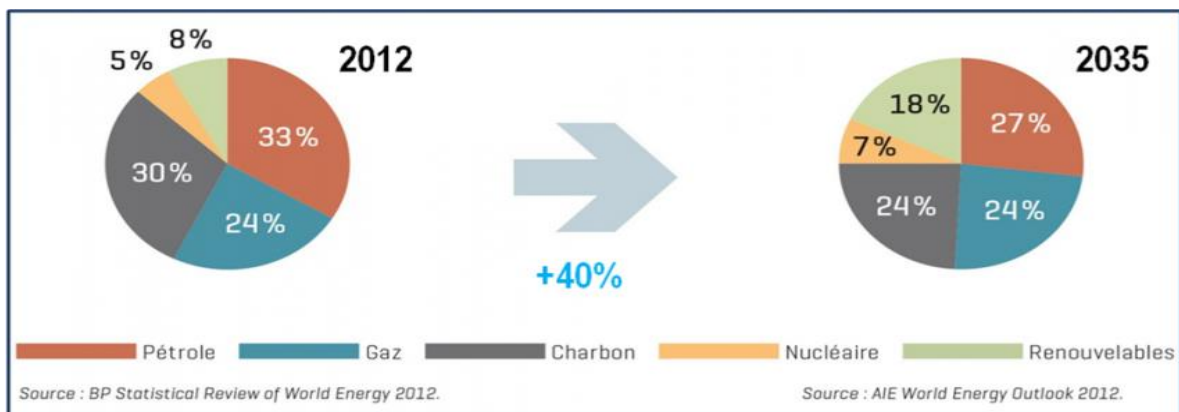


Figure 1: Transformation énergétique selon AIE

Parmi les raisons motivant cette transition, nous pouvons citer :

- Raisons environnementales
- Raisons économiques
- Raisons sociales
- **Raisons environnementales**

Les sources d'énergies conventionnelles sont sans doute responsables du réchauffement climatique. En effet, ce phénomène de hausse de température est causé par l'accroissement des gaz à effet de serre (le dioxyde de carbone, le méthane, l'oxyde d'azote, la vapeur d'eau, des classes d'hydrocarbures...) dans l'atmosphère. Ces gaz empêchent les rayons du soleil d'atteindre la surface de la terre et ralentissent l'évacuation de la chaleur hors de l'atmosphère. En conséquence, la température à la surface de la terre augmente et cause d'énormes dégâts écologiques et humains. Nous en citant l'extinction d'un grand nombre de faune et flore, l'augmentation du niveau des mers , les inondations, la sécheresse et la désertification...[2]

De plus, les SEC (système d'énergie conventionnels) sont réputés d'être bruyants et nocifs pour la santé des personnes qui vivent et travaillent à proximité. Aussi, les pertes locales du carburant endommagent l'environnement local. [2]

- **Raisons économiques**

Néanmoins, selon le même rapport, les énergies auxquels recours l'homme pour répondre à sa demande énergétique sont principalement le pétrole et les combustibles fossiles. Cependant, les réserves de ses énergies sont épuisables. La figure ci-dessous, illustre les réserves mondiales des énergies fossiles dans une projection à long terme et avec l'hypothèse que l'homme ne changera pas sa politique énergétique.

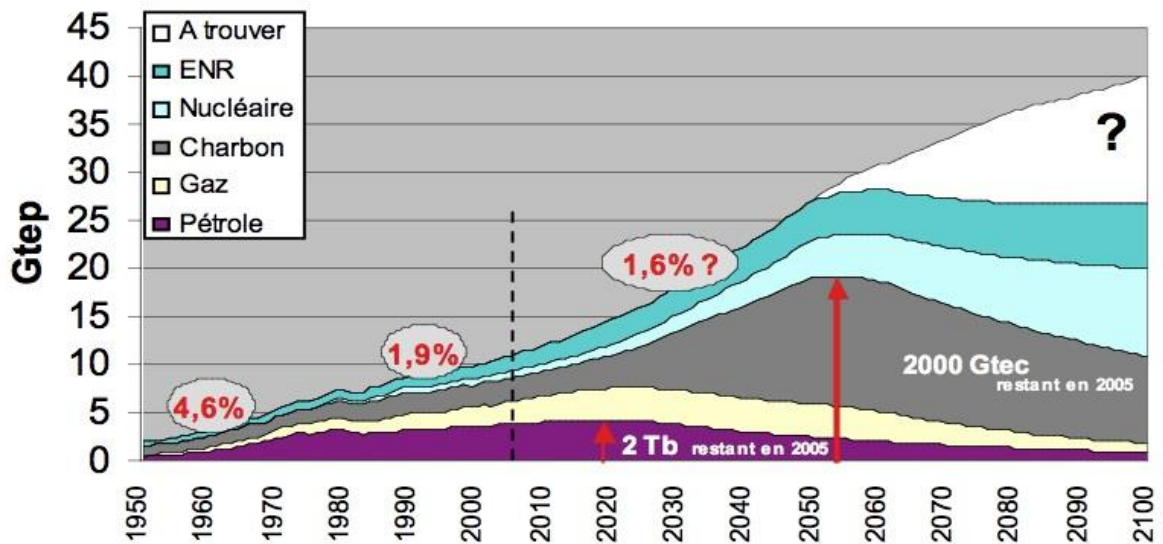


Figure 2 : Evolution de la consommation énergétique mondiale avec les réserves de l'énergie fossile[3]

En plus, de l'épuisement des réserves, les frais d'exploitation du pétrole, l'incertitude face aux prix des énergies conventionnelles sont aussi des facteurs animant la décision de transition énergétique.

- **Raisons sociales**

Sur le plan social, le marché des technologies d'énergie renouvelable participe à l'encouragement de l'industrie locale et la création d'emploi dans la région. Aussi, cette orientation vers l'exploitation des ressources naturelles répond à la problématique de demande croissante en énergie. Selon une projection de l'AIE, cette croissance d'énergie devrait dépasser 4000 mégatonnes équivalent en pétrole d'ici 2035. (Voir figure 3).

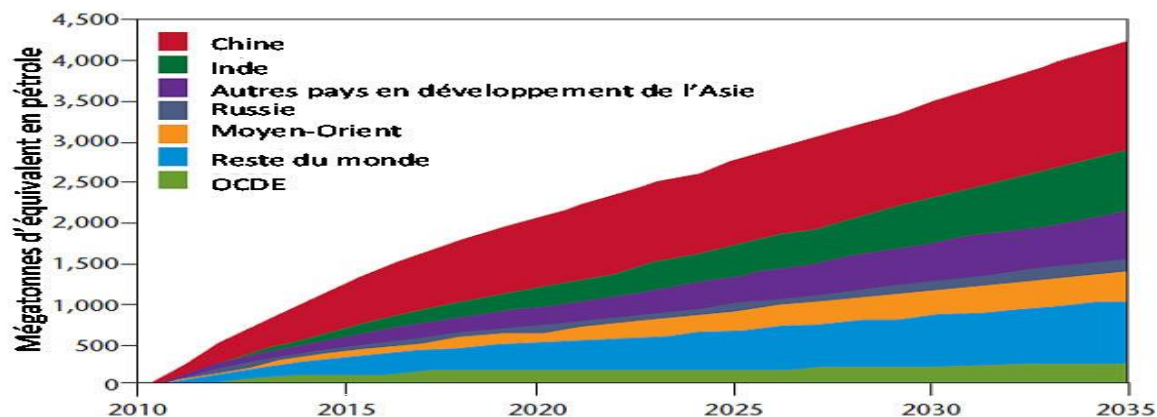


Figure 3: Projection de la consommation mondiale de l'énergie en 2035 en fonction des pays les plus consommateurs[4]¹

- **La problématique des territoires isolés vis-à-vis l'alimentation en électricité**

De plus des raisons précitées ci haut, l'orientation vers les énergies renouvelables se montre aujourd'hui comme une réponse aux problèmes de l'électrification rurale. Elles permettent d'offrir les premiers utilitaires pour une vie saine, à savoir l'électricité, le chauffage et l'eau chaude pour les habitants éloignés du réseau.

Qu'il s'agit de mine, des village, de station de télécommunication, de station météo, refuge, ferme ou encore de camps militaire, le raccord de ces zones non électrifiées, s'avère difficile et coûteux. Et ce en raison des conditions climatiques sévères, de l'absence d'infrastructure ou encore en raison du coût élevé des installations électriques.

Le problème des sites isolés ne touche pas que les villages des pays pauvres. Même les pays les plus développés sont toujours à la recherche de solution pour ce problème surtout lorsqu'il s'agit des sites à climat sévère.

¹ Les projections de l'Agence internationale de l'énergie indiquent que la Chine, l'Inde et les autres économies émergentes seront les principales sources de croissance de la demande mondiale en énergie au cours des 25 prochaines années.4.

Pour trouver des solutions à cette problématique, de nombreuses recherches se sont orientés vers les systèmes d'énergies renouvelables (SERs), en particulier les systèmes autonomes pour générer de l'énergie délocalisée.

1.2 GENERALITE SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES

1.2.1 Définition d'une énergie renouvelable

Une énergie est dite renouvelable lorsqu'elle provient de ressources naturelles pouvant être naturellement reconstituées ou renouvelées au cours de la durée de vie d'un être humain. D'où sa qualification en source d'énergie durable[5]. Par abus de langage, les énergies renouvelables sont souvent associées aux énergies propres. Cependant, ceci n'est pas toujours le cas. En effet, Une énergie est dite propre (ou verte) lorsque sa production ne rejette pas ou très peu de CO₂. Plus généralement, elle ne participe pas ou peu à l'effet de serre ou à la destruction de la couche d'ozone, et aussi préserve les ressources naturelles [6].

1.2.2 Les cinq familles d'énergie renouvelables

De nombreux ouvrages classifient les énergies renouvelables simples en cinq familles, qui sont [7]:

- **L'énergie solaire**

L'énergie solaire est l'énergie transmise par le soleil sous forme de rayonnements électromagnétiques (les rayons cosmiques, gamma X, la lumière visible, l'infrarouge, les micro-ondes et les ondes radios) [8].D'ailleurs, le rayonnement solaire est utilisé pour la production d'eau chaude et d'électricité, au moyen de [9] :

- Capteurs plans, qui fonctionnent essentiellement en thermosiphon, pour la production d'eau chaude sanitaire ou pour le chauffage saisonnier des piscines : c'est l'énergie solaire thermique dite aussi énergie passive.

- Cellules photovoltaïques qui produisent de l'électricité du moment où elles sont exposées aux rayons solaires : c'est l'énergie photovoltaïque, appelée aussi énergie active [10].

Contrairement aux idées courantes, l'énergie solaire est une énergie renouvelable, 100% propre, qui est présente dans la majorité des régions dans le monde. Mais il reste que, plus la surface d'ensoleillement et la durée de son utilisation sont grandes, plus l'énergie récupérée est intéressante, ce qui justifie son utilisation dans les zones dont le potentiel d'ensoleillement est plus élevé. (Voir figure 4)

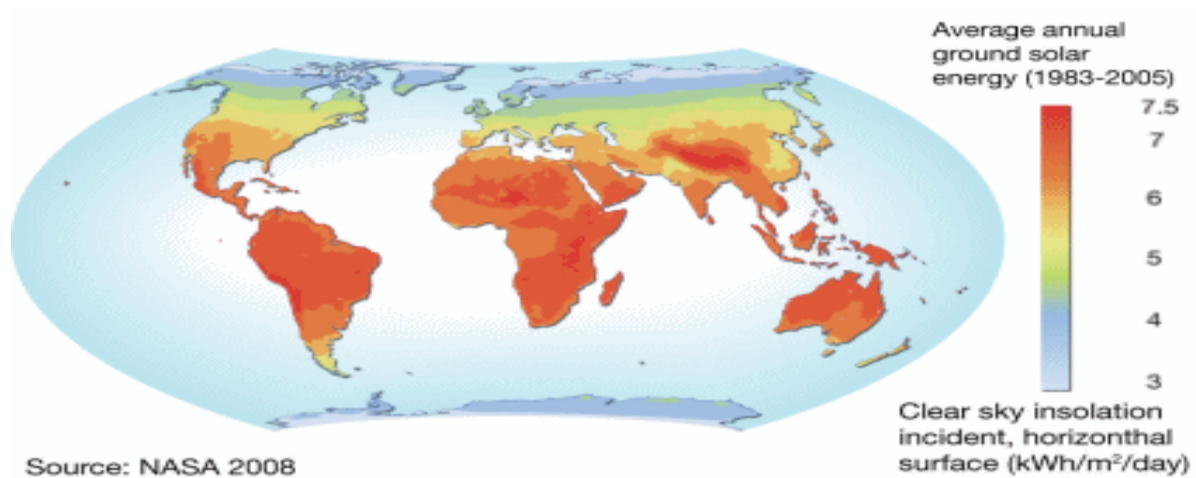


Figure 4: Le potentiel solaire mondial

Autant qu'énergie passive, le coût d'investissement de l'énergie solaire thermique est faible. Alors que le coût du solaire photovoltaïque reste un peu plus élevé à cause des cellules photovoltaïques qui sont chères à fabriquer.

▪ L'énergie éolienne

L'énergie éolienne consiste à utiliser l'énergie produite par le mouvement des vents. Son principe est d'utiliser des aérogénérateurs qui captent, à travers leurs pales, l'énergie cinétique du vent. Ensuite elles entraînent elles-mêmes un générateur pour produire de l'électricité d'origine renouvelable[11].

En 2011, l'énergie éolienne est considérée comme étant une deuxième source d'électricité renouvelable (15.3%)[12].

Cette forme d'énergie a deux grandes variantes, soit :

- L'éolien onshore présent sous diverse technologie. Il mobilise généralement les vents dont la vitesse varie de 6 à 12m/s. Vu que l'éolien, est avantageux dans les zones à potentiel du vent élevé, ceci signifie, que son application dans certains pays nécessite une technologie spécifique, rabattable et adaptée. Cependant même en étant une énergie renouvelable et vertes, son impact environnemental et son encombrement le soumet à plusieurs débats[13].
- L'éolien off-shore c'est l'éolien en mer. En raison de palier aux inconvénients de l'éolien terrestre et maximiser la productivité de l'équipement, la technologie de l'éolien off-shore consiste à poser l'éolien en mer. Néanmoins cette technologie est encore limitée en raison de son coût d'exploitation et la difficulté du raccordement.

- **L'énergie géothermique**

Le principe de l'énergie géothermique consiste à exploiter la chaleur superficielle du sol pour l'utiliser sous forme de chauffage ou pour la transformer en électricité à l'aide des turbines [14, 15]

Vu la difficulté de son exploitation, l'énergie géothermique est très peu utilisée en électricité. Cependant avec l'utilisation des pompes à chaleurs thermique, elle se positionne en 3^{ème} rang pour le chauffage[12]

La géothermie recouvre des technologies très différentes qui ont en commun l'usage de la chaleur présente naturellement dans l'écorce terrestre ou dans des nappes d'eau souterraines (aquifères). De par la température de la ressource, la géologie, et la profondeur du forage, l'énergie géothermique se divise en :

- Géothermie à basse température, qui concerne essentiellement l'habitat individuel, le petit habitat collectif et le tertiaire. Elle repose sur l'installation de pompes à chaleur individuelles ;
- Géothermie par usage direct de la chaleur, qui peut correspondre à l'exploitation par forage d'aquifères profonds (plusieurs centaines de mètres) ou à celle de zones à gradients thermiques élevés (par sonde) pour l'alimentation de réseaux collectifs de chaleur.
- Géothermie à très haute température, orientée vers la production d'électricité et qui concerne principalement les zones volcaniques ou de fracture géologique, pour laquelle les forages peuvent atteindre et même dépasser 5000 mètres.

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie a l'avantage de préserver l'environnement et d'être indépendante des conditions météorologiques. Elle est disponible continuellement dans le monde entier (voir figure 5), c'est une énergie donc fiable et stable dans le temps. Malheureusement cette ressource nécessite des forages dont les résultats sont parfois aléatoires qui impactent sur l'activité sismique et dont le temps de mise en place de l'installation pour son utilisation est assez important.

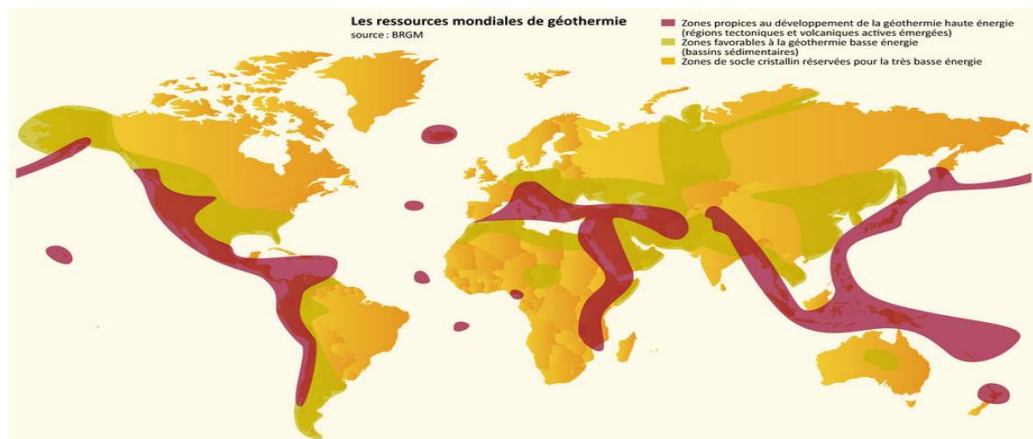


Figure 5: Potentiel de l'énergie géothermique dans le monde [15]

- **L'énergie hydraulique**

L'énergie hydraulique (à l'exception de l'énergie marémotrice) utilise les phénomènes météorologiques pour produire de l'électricité. En effet, le soleil provoque l'évaporation de l'eau, principalement dans les océans et en libère une partie sur les continents à des altitudes variables. L'énergie potentielle de pesanteur des eaux peut être captée et transformée dans des barrages hydroélectriques, et ce lors du retour de l'eau vers les océans. Les principales techniques utilisées sont :

- Les centrales avec réservoir d'eau, d'écluse ou de lac. En effet, lorsque les vannes sont ouvertes, l'eau est amenée par une « conduite forcée » jusqu'à la centrale où elle est turbinée. L'énergie de l'eau est donc potentielle : elle provient du différentiel de hauteur entre la retenue d'eau et la centrale et peut être utilisée à la demande. L'eau est détournée de son cours naturel et rejoint ensuite une rivière par un « canal de fuite ».
- les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) : ils se rapprochent des centrales de lac mais fonctionnent avec deux réservoirs, un en amont et un en aval. Elles sont en principe isolées de tout cours d'eau et fonctionnent en circuit fermé. Contrairement aux centrales hydroélectriques classiques, elles disposent, en plus des turbines, de faire remonter l'eau du bassin aval au bassin amont. Les STEP permettent de profiter du différentiel de prix de l'électricité selon les variations de la demande.
- Les centrales au fil de l'eau turbinent en permanence l'eau d'un cours d'eau au débit généralement puissant.

Cette source a l'avantage de ne pas être polluante (pas de rejet de GES lors de la production énergétique), de maîtriser le stockage de l'énergie potentiellement utilisable, de débarrasser les cours d'eau des déchets grâce aux différents filtres des barrages, mais il a l'inconvénient d'être bruyante et impacte sur la vie aquatique.

D'autres énergies hydrauliques existent et proviennent généralement de sources marines, nous en citons :

- Énergie des vagues : elle est produite par le mouvement des vagues et peut être captée par des dispositifs tels le Pelais, sorte de ver en métal articulé ou le Serve. Leur puissance correspond à celle d'une petite éolienne.
- Énergie marémotrice : elle est produite par le mouvement de l'eau créé par les marées (variations du niveau de la mer, courants de marée),
- Énergie hydrolienne : elle est issue de l'utilisation des courants sous-marins,
- Énergie thermique des mers : elle est produite en exploitant la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans,
- Énergie osmotique : elle a pour origine la diffusion ionique qui a lieu lors de l'arrivée du mélange d'eau douce dans l'eau salée de la mer.

▪ **L'énergie biomasse**

Indirectement, il s'agit d'énergie solaire stockée sous forme organique grâce à la photosynthèse. Elle est exploitée par combustion ou métabolisation. Cette énergie est renouvelable à condition que les quantités brûlées n'excèdent pas les quantités produites ; cette condition n'est pas toujours remplie.

Selon l'Agence internationale de l'énergie, la biomasse et les déchets fournissent 10 % de l'énergie primaire produite dans le monde, sur 13,3 % d'énergies renouvelables. Mais cette ressource produit de nombreux polluants et a l'inconvénient majeur d'exiger des surfaces considérables pour sa production. Cette énergie serait plus rentable économiquement et écologiquement si elle est utilisée en bio-carburant.

▪ **Champs d'application de chaque énergie**

La figure suivante résume les 5 sources d'énergie, leur transformation et leur utilisation.

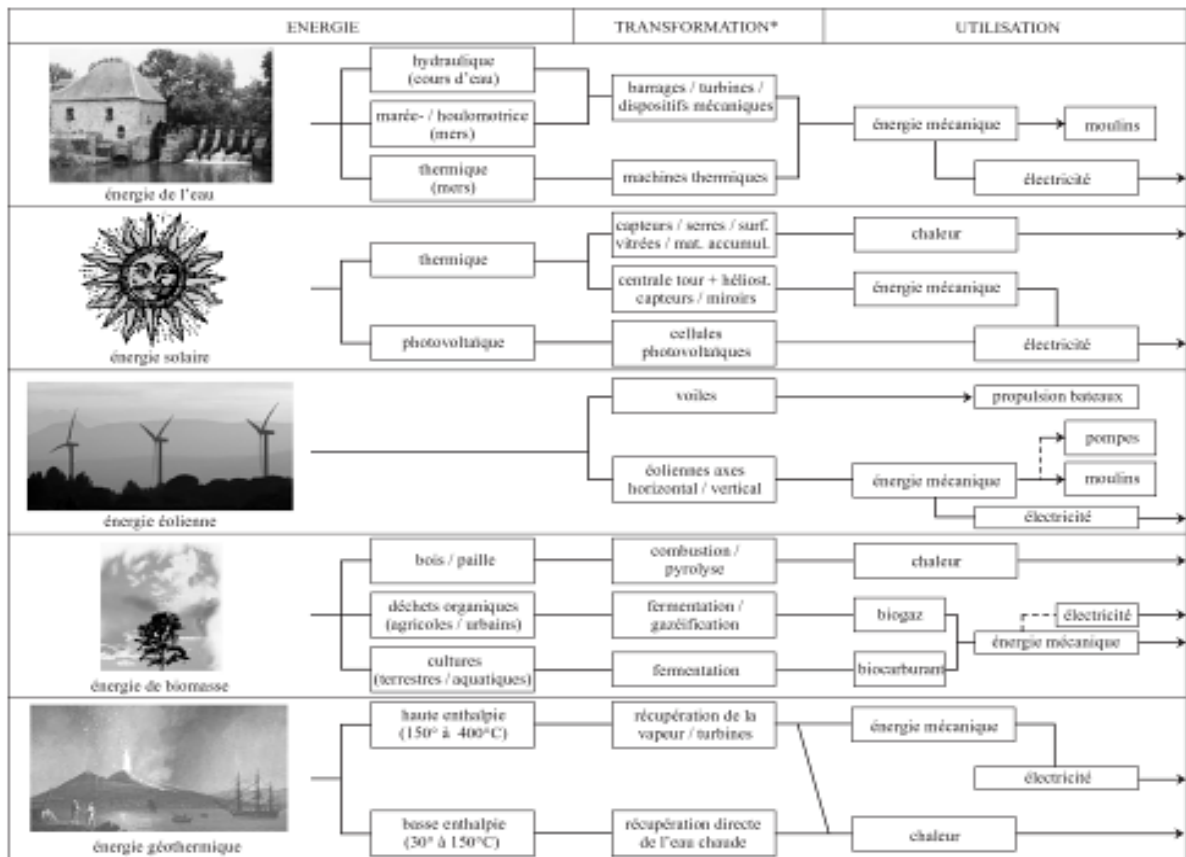


Figure 6: Utilisation de différentes énergies renouvelables [7]

1.2.3 Classification des systèmes énergétiques renouvelables en sites isolés

Dans chacune des cinq filières précitées ci hautes, plusieurs systèmes énergétiques ont vu le jour. Globalement nous pouvons les classifiés en deux catégories : les SERs simple et les SERs hybrides.

Les SERs simples sont des systèmes qui ne contiennent qu'une seule source d'alimentation en énergie renouvelable, tels les éoliennes, les panneaux solaire...etc. Ils peuvent contenir ou non un dispositif de stockage.

Tandis que les SERs hybrides se sont des systèmes électriques, comprenant plus d'une source d'alimentation en énergie, parmi lesquelles une au moins est renouvelable [16]. Ils représentent une solution en terme d'efficacité énergétique pour la production non uniforme de l'énergie produite par les systèmes simples, et qui est étroitement liée aux ressources disponibles en temps de production.

Plusieurs recherches dans ce sens ont permis de créer une variété de systèmes hybrides qui sont principalement destinés à fonctionner en mode autonome pour répondre aux besoins des sites isolés [16].

Les systèmes hybrides peuvent contenir ou non une source d'énergie conventionnelle tel qu'un générateur diesel, une micro turbine à gaz etc. Ils peuvent disposés ou non d'un dispositif de stockage (des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène, des volants d'inertie, etc.).

La figure suivante résume la classification des systèmes énergétiques renouvelables à implanter dans les sites isolés.

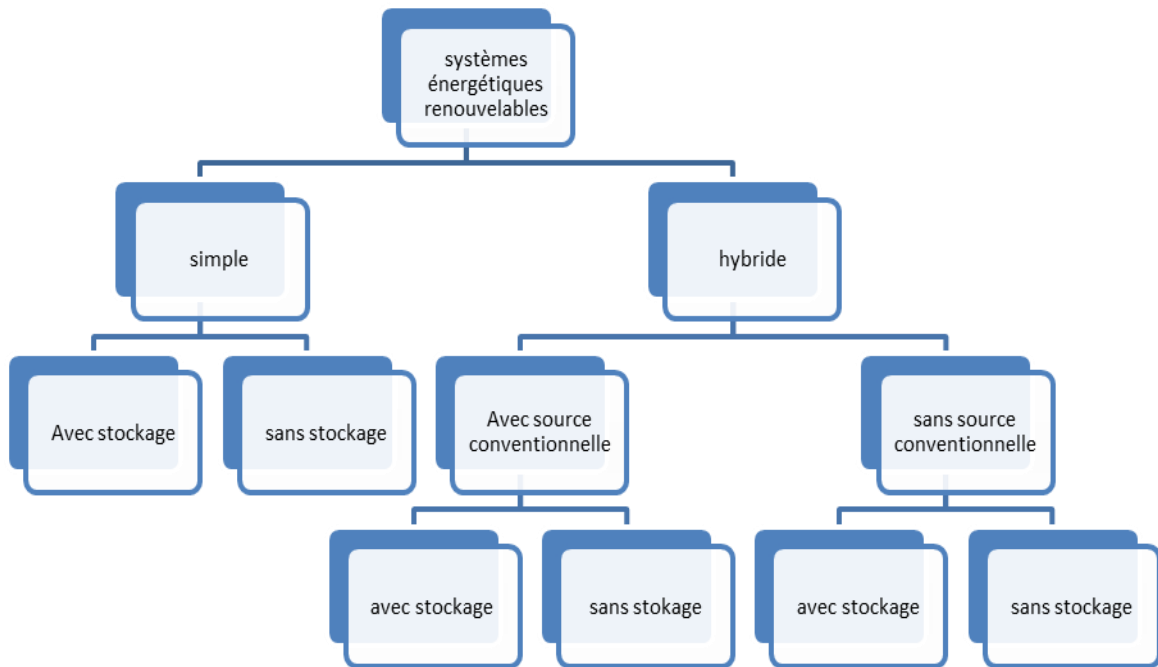


Figure 7 : Classification des systèmes énergétiques en sites isolés

1.2.4 Sans source d'énergie conventionnelle et sans stockage

- **Systèmes hybrides photovoltaïque/éolien sans stockage**

Ce type de système hybride s'utilise très rarement, parce qu'il n'assure pas une sécurité d'alimentation. Il fonctionne surtout en mode autonome dans des sites où l'approvisionnement en carburant diesel ou le raccordement au réseau électrique sont difficiles, voire même impossible.

1.2.5 Systèmes hybrides sans source d'énergie conventionnelle et avec stockage

- **Systèmes hybrides photovoltaïque/stockage**

L'installation photovoltaïque doit être raccordée avec une autre source d'énergie, pour qu'il soit possible de satisfaire la charge durant la nuit ou par temps nuageux.

Des systèmes ont été conçus de manière à avoir un stockage par électrolyseur à réservoir d'hydrogène, par batteries ou par combinaison de deux dispositifs de stockage différents comme électrolyseur et batterie ou électrolyseur et super condensateur. L'utilisation de super condensateurs est très récente. Ils sont utilisés pour un stockage très court avec une réactivité de quelques dixièmes de secondes. Tandis que l'électrolyseur et le réservoir d'hydrogène permettent un stockage plus important en terme de quantité stockée mais ils ont l'inconvénient d'être plus lent.

- **Système hybride éolien/stockage**

L'interconnexion du dispositif de stockage avec un générateur éolien peut avoir deux objectifs possibles : soit un rôle de tampon lorsque le système fonctionne en parallèle avec le réseau électrique, dans ce cas, il permet de lisser les variations rapides de la puissance électrique en provenance de l'éolienne. Soit un rôle de stockage à plus long terme.

Les modes de stockage étudiés peuvent être une batterie, un électrolyseur avec réservoir d'hydrogène, une combinaison des deux, un stockage par air comprimé, des aimants supraconducteurs ou une combinaison d'un électrolyseur avec réservoir d'hydrogène et un super condensateur.

1.2.6 Systèmes hybrides avec source d'énergie conventionnelle et sans stockage

- **Systèmes photovoltaïque/source conventionnelle[5]**

Ce type de système hybride est utilisé le plus souvent dans des sites où le potentiel d'ensoleillement est élevé. Il s'agit de raccorder le système photovoltaïque à une source conventionnelle, exemple : les génératrices diesel.

Malgré le fait que ces systèmes ne sont pas à 100% propre, ils restent très adaptés aux sites isolés ayant un potentiel d'ensoleillement élevé. Ils ont aussi l'avantage de procurer une alimentation autonome sans interruption pour les maisons, villages, camps de chasse...etc.

- **Systèmes éolien/source conventionnelle[17]**

Ces systèmes sont plus répandus sur les îles, où les brises de mer et le vent favorisent l'utilisation de l'énergie éolienne pour la production d'électricité.

Lorsque le système hybride fonctionne en régime autonome, il comprend souvent un stockage qui peut être idéal, classique par batteries ou innovant par utilisation d'un électrolyseur et d'une pile à combustible avec stockage d'hydrogène

1.2.7 Systèmes hybrides avec source d'énergie conventionnelle et avec stockage

- **Systèmes photovoltaïque/éolien/diesel 2**

La mise en place d'un tel système a pour objectif de diversifier les sources d'énergies renouvelables. On recherche par ce système à augmenter l'efficacité énergétique, le rendement et à diminuer la dépendance du système de l'énergie. Leur principal inconvénient s'avère le coût, vu que le système implique le photovoltaïque et l'éolien.

- **Système Green Cube [19]**

C'est un système développé par Audace Technologie Inc. (ATI) en plusieurs gammes dépendantes de la puissance délivrée et de son application. Ce système est conçu principalement à être utilisé dans les sites isolés. Il se compose d'éoliennes, de panneaux solaires couplé à un groupe diesel de secours tout en ayant la possibilité de le raccorder à d'autres sources telles qu'un petit hydro, pile combustible.

Afin de fiabiliser l'alimentation électrique en tout temps, ATI a conçu et intégré le système ILMS (Intelligent Load Management System) qui interrompt l'alimentation de certains équipements électriques jugés non essentiels, privilégiant ceux qui sont prioritaires.

² 18. <http://www.cder.dz/download/za-6.pdf>.

Le contrôleur central du Green Cube gère les sources d'énergie en fonction de leur disponibilité et puissance et, au besoin, démarre un groupe de secours.

Le Green Cube est conçu à base de composants standards, facile à entretenir pour ainsi réduire le coût de son exploitation. De plus, c'est un engin à grande fiabilité destiné à la communauté isolée partout dans le monde. Toutefois, son principal inconvénient c'est qu'il n'est pas à 100% propre.

1.3 PROBLEMATIQUE DU CHOIX DES SYSTEMES ENERGETIQUES RENOUVELABLES

Devant les avantages et les inconvénients des différents systèmes énergétiques renouvelables, il devient difficile de choisir aujourd'hui le meilleur système dans lequel il faut investir[20]. Deux grandes méthodes ont été utilisées pour aider aux choix des SERs. Dans un premier temps, nous retrouvons les logiciels, qui permettent de pallier aux contraintes techniques des SERs tels que : la réponse aux besoins, l'abondance des ressources, la fiabilité de l'équipement...etc. Dépendamment de l'objectif recherché, il existe un grand nombre de logiciel qui opèrent dans le domaine des SERs, notons par exemple, HOMER Energy, RETscreen, TRNSYS...etc.[21]. Toutefois, ces logiciels n'intègrent que les données quantifiables, et se limitent à une étude technique et/ou économique.

D'autres auteurs, ont discuté le caractère complexe et multidisciplinaire des SERs et propose les méthodes d'aide à la décision multicritère pour résoudre à cette problématique. [20] [22] [23]. En effet, le choix de la meilleure solution SER met en évidence plusieurs aspects contradictoires en terme social, technologique, environnemental et économique dont les approches traditionnelles de prise de décision à un seul critère ne peuvent pas les gérer [20]. De plus, le type de ces critères, entre qualitatives (mesurables) et quantitatives (non mesurables et difficile à modéliser) justifie notamment l'utilisation des méthodes d'aide à la décision multicritère[22]. Cependant les outils d'aide à la décision, tels que trouvées dans la littérature n'offre pas des études techniques approfondies.

1.4 QUESTION ET OBJECTIF SPÉCIFIQUE DE LA RECHERCHE

Pour les raisons précitées dans le paragraphe 1.3, chapitre 1, cette recherche s'intéressera à la question du comment choisir un système énergétique renouvelable répondant aussi bien aux contraintes technique des sites isolés, et considérant l'aspect multicritères des SERs.

L'objectif de cette recherche est donc, de développer une démarche d'aide à la décision en matière de sélection des systèmes énergétiques renouvelables en sites isolés. Cette démarche devrait permettre un choix technique approfondie et réalisable des SERs, et d'inclure aussi bien les critères qualitatifs et quantitative des différents aspects qui entre dans le choix des SERs.

1.5 STRUCTURATION DU MÉMOIRE

Pour répondre à cette problématique, nous procéderons comme suit :

Dans un premier temps, nous réaliserons une revue de littérature approfondie sur les outils d'aide à la décision multicritère (Chapitre 2). Nous analyserons de près, les logiciels utilisés en matière de sélections des SERs et les différents outils d'aide à la décision multicritères utilisés à la même fin.

Dans un deuxième temps, nous réaliserons une revue de littérature sur les critères qui entrent dans le choix des SERs (Chapitre 3).

Ensuite, nous proposerons une démarche faisant appel à un outil technique de conception des SERs et une méthode d'aide à la décision multicritère, à savoir HOMER Energy et PROMETHEE.

Et dans un dernier temps, nous appliquerons la méthode sur un cas didactique situé aux îles de la madeleine. (Chapitre 4).

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTERATURE SUR LES METHODE DE CHOIX DES SERS

Le choix des systèmes énergétiques renouvelables dans les sites isolés s'inscrit dans un processus décisionnel multidimensionnel complexe qui se compose de différentes dimensions à savoir économique, technique, environnementale et sociale [24].

Ainsi de nombreux outils d'aide à la décision en matière d'énergies renouvelables, ont été développés au fil des dernières décennies pour pouvoir aider les décideurs à trouver le bon compromis entre les différents critères selon leurs préoccupations. Chaque outil a ses forces et faiblesses et s'utilise selon l'objectif recherché par les décideurs.

Dans un premier temps nous nous sommes intéressés à lister les différents outils d'aide à la décision utilisés pour choisir des systèmes énergétiques renouvelables en site isolé. En effet, nous pouvons les classer selon deux grandes approches :

- Les logiciels (HOMER Energy, RETScreen...etc.) [24], [25], [21].
- Méthodes d'aide à la décision multicritères (AHP, PROMETHEE, ELECTRE ...etc.) [24], [25], [20],[26],[27]. Utilisé en deux approches avec un seul outil ou combinant deux ou plusieurs outils : c'est l'approche hybride [25].

2.1 LES LOGICIELS

2.1.1 Revue de littérature sur les différents logiciels utilisés en SERS

L'article [23] a porté une étude sur 37 logiciels utilisés pour analyser l'intégration des énergies renouvelables. Tableau 1 présente le classement des logiciels en fonction du nombre de téléchargement du logiciel et/ou le nombre de vente. Il en résulte que les logiciels les plus utilisés sont RETScreen, HOMER Energy, LEAP, BHP Screening, EnergyPro.

Tableau 1: Type de chaque outil étudié, Extrait de la table 2, (Connolly, Lund et al. 2010)

Tool	Organisation (link)	Availability	Downloads/sales
Very high number of users			
RETScreen	RETScreen International (http://www.retscreen.net/)	Free to Download	>200000
HOMER	National Renewable Energy Laboratory and HOMER Energy LLC (www.homerenergy.com)	Free to Download	>28000
LEAP	Stockholm Environment Institute (http://www.energycommunity.org/)	Commercial/free for developing countries and students	>5000
BCHP Screening Tool	Oak Ridge National Laboratory (http://www.ornl.gov/)	Free to Download	>2000
energyPRO	Energi-Og Mijodata (EMD) International A/S (http://www.emd.dk/)	Commercial	>1000
High number of users			
EnergyPLAN	Aalborg University (http://www.energyplan.eu/)	Free to Download	100-1000
Invert	Energy Economics Group, Vienna University of Technology (http://www.invert.at/)	Free to Download	100-1000
MARKAL/TIMES	Energy Technology Systems Analysis Program, International Energy Agency (http://www.etsap.org/)	Commercial	100-1000
MESSAGE	International Institute for Applied Systems Analysis (http://www.iiasa.ac.at/)	Free/Simulators must be purchased	100-1000
ORCED	Oak Ridge National Laboratory (http://www.ornl.gov/)	Free to Download	100-1000
TRNSYS16	The University of Wisconsin Madison (http://sel.me.wisc.edu/trnsys/)	Commercial	100-1000
WASP	International Atomic Energy Agency (http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/Pess/PESSEnergyModels.shtml)	Commercial/Free to IAEA member states	100-1000
Medium number of users			
EMCAS	Argonne National Laboratory (http://www.dis.anl.gov/projects/emcas.html)	Commercial	20-50
EMPS	Stiftelsen for Industriell og Teknisk Forskning (SINTEF) (http://www.sintef.no/)	Commercial	20-50
ENPEP-BALANCE	Argonne National Laboratory (http://www.dis.anl.gov/projects/Enpepwin.html)	Free to Download	20-50
GTMax	Argonne National Laboratory (http://www.dis.anl.gov/projects/GTmax.html)	Commercial	20-50
Low number of users			
AEOLIUS	Institute for Industrial Production, Universität Karlsruhe (http://www-iiip.wiwi.uni-karlsruhe.de/)	Commercial	1-20
COMPOSE	Aalborg University (http://www.socialtext.net/energyinteractivenet/index.cgi?compose)	Free to Download	1-20
IKARUS	Research Centre Jülich, Institute of Energy Research (http://www.fz-juelich.de/ief/ief-ste/index.php?index=3)	Commercial/Earlier versions are free	1-20
INFORSE	The International Network for Sustainable Energy (http://www.inforse.org/europe/Vision2050.htm)	Distributed to non-governmental organisations	1-20
Mesap PlaNet	sevenZone (http://www.sevenZone.de/de/technologie/mesap.html)	Commercial	1-20
NEMS	Office of Integrated Analysis and Forecasting, Energy Information Administration (http://www.eia.doe.gov/)	Free/Simulators must be purchased	1-20
PERSEUS	Institute for Industrial Production, Universität Karlsruhe (http://www-iiip.wiwi.uni-karlsruhe.de/)	Commercial: only sold to large European utilities	1-20
ProdRisk	Stiftelsen for Industriell og Teknisk Forskning (SINTEF) (http://www.sintef.no/Home/)	Commercial	1-20
RAMSES	Danish Energy Agency (http://www.ens.dk/)	Projects completed for a fee	1-20
SIVAEL	Energinet.dk (http://www.energinet.dk/en/menu/Planning/Analysis+models/Sivael/SIVAEL.htm)	Free to Download	1-20
EMINENT	Instituto Superior Técnico, Technical University of Lisbon (http://carnot.ist.utl.pt/~eminent2/)	To be decided	0
PRIMES	National Technical University of Athens (http://www.e3mlab.ntua.gr/)	Projects completed for a fee	0
Number of users is not specified as it is not monitored			
BALMOREL	Project Driven with a users network and forum around it (http://www.balmorel.com/)	Free to Download (Open Source)	Not specified
E4cast	Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics (http://www.abare.gov.au/)	Commercial	Not specified
H2RES	Instituto Superior Técnico and the University of Zagreb (http://powerlab.fsb.hr/h2res/)	Internal use only	Not specified
HYDROGEMS	Institutt for energiteknikk (http://www.hydrogems.no/)	Commercial/free for TRNSYS Users	Not specified
MiniCAM	Pacific Northwest National Laboratory (http://www.globalchange.umd.edu/)	Free to Download Once Contacted	Not specified
SimREN	Institute of Sustainable Solutions and Innovations (http://www.isusi.de/theerjreport.html)	Projects completed for a fee	Not specified
STREAM	Ea Energy Analyses (http://www.ea-energianalyse.dk/)	Free to Download Once Contacted	Not specified
UniSyD3.0	Unitec New Zealand (http://www.unitec.ac.nz/)	Contact Prof. Jonathan Leaver: jleaver@unitec.ac.nz	Not specified
WILMAR Planning Tool	Risø DTU National Laboratory for Sustainable Energy (http://www.wilmar.risoe.dk/)	Commercial	Not specified

À partir des différentes tables présentées par [21], qui définissent les spécifications de chaque logiciel, nous avons extrait les informations ci-dessous qui concerne les outils les plus utilisés et qui traite les SERs.

- 1- Le type de fonction que le logiciel peut offrir à savoir : la simulation, les scénarios, la macroéconomie, l'analyse SER, l'optimisation des opérations et l'optimisation des investissements. Chaque fonction est définie comme suit :

- La simulation : En fonction de la demande énergétique, le logiciel simule le fonctionnement d'un système d'énergie.
- Les scénarios : Le logiciel combine généralement une série d'année dans un scénario à long terme.
- La macroéconomie : À partir des données macroéconomiques générales, le logiciel détermine la croissance des prix et des demandes d'énergie.
- L'analyse des SER : Le logiciel permet d'identifier et analyser les systèmes énergétiques spécifiques et détermine ainsi les options et alternatives de remplacement.
- L'optimisation des opérations est ce en optimisant le fonctionnement d'un système énergétique donné.
- L'optimisation des investissements en optimisant les investissements pour un système énergétique donné.

2- La zone géographique fait référence à l'étendue de l'analyse que peut faire le logiciel et qui varie d'une échelle internationale à un projet spécifique.

3- Le calendrier d'analyse est la période de temps sur laquelle les simulations ou les scénarios sont établies. Les simulations se font généralement annuellement et les scénarios se font souvent sur une période de 25 à 50 ans.

4- Le pas est la période de temps que le logiciel considère pour simuler. Pour les logiciels qui font la scénarisation, le pas est généralement un an. Tandis que pour les simulations elle est souvent exprimé en heures ou minutes.

5- L'intérêt spécifique dans le cas où le logiciel s'applique dans un objectif précis.

6- Les secteurs énergétiques pour lesquels le logiciel peut être utilisé et qui sont l'électricité (E), la chaleur (C) et le transport (T).

7- Le taux de pénétration de l'énergie renouvelable (TPER) dans les secteurs d'électricité (TPE) et dans les autres secteurs (TPES) : la chaleur et le transport.

Après l'analyse du Tableau 2, il paraît que le logiciel EnergyPro est le logiciel le plus complet qui permet aussi bien la simulation, l'analyse des scénarios, l'analyse des SERs, l'optimisation opérationnelle et celle de l'investissement. Cependant, il est spécifiquement conçu pour faire l'étude d'un seul projet, précisément une centrale thermique ou de cogénération.

En ce qui concerne, le logiciel BCHP Screening, lui aussi a été développé pour un type de projet spécifique, utilisé principalement pour le chauffage et l'électricité des bâtiments commerciaux [28], ce qui le rend moins intéressant dans le cadre de notre étude.

Le Logiciel LEAP est un logiciel de planification des alternatives énergétiques à long terme, avec un pas annuel. Il est couramment utilisé pour l'analyse de la politique énergétique et l'évaluation de l'atténuation du changement climatique [29]. Il ne permet pas de faire ni l'optimisation opérationnelle ni celle de l'investissement. Il est plutôt utile pour une analyse macro sur l'échelle national ou régionale. Pour les raisons précitées, il n'est pas adapté pour le choix des systèmes énergétiques renouvelables en sites isolés.

Parmi les logiciels cités par (Connolly, Lund et al. 2010), les logiciels Homer Energy et RETScreen sont les logiciels les plus avantageux pour nous. Avec la version HOMER Pro V3.7 (2016), HOMER Energy est devenu le logiciel le plus complet qui intègre toutes les fonctionnalités. Il est aussi, le plus adapté aux études locales ou communautaires, et sa simulation est plus précise puisqu'elle porte sur un délai d'un an au moyen d'un pas de temps minimum de 1 min.

Dans un deuxième temps, bien que RETScreen ne permet pas de faire des simulations et l'optimisation des opérations, Mais il permet l'établissement des scénarios et s'applique au site au niveau local.

Tableau 2: Les spécifications de chaque outil, adaptation de la table 3, 4, 5 (Connolly, Lund et al. 2010)

Logiciel	Type de l'outil	Zone géographique	Le calendrier des simulation /scénarios	Pas	Intérêt spécifique	Secteur d'énergie considéré			TPER	
						E	C	T	% TPE	%TPES
RETScreen	- Scénarios - SER - Optimisation de l'investissement	Déterminer par l'utilisateur	Max 50 ans	Mois	-	Oui	Oui	-	100%	100%
HOMER	- Simulation Scénario ³ - SER - Optimisation de l'opération - Optimisation de l'investissement	Local Communauté	1 an Non spécifié pour les scénario ¹	Minute Annuelle ¹	-	Oui	Oui	-	100%	100%
LEAP	- Simulation Scénario - Macroéconomique - SER	National État Régional	Illimité	An	-	Oui	Oui	Oui	100%	100%
BCHP Screening	- Simulation - SER - Optimisation de l'opération	Investigation sur un seul projet spécifique	1 an ⁴	Heure	Combustion de chaleur et d'électricité	(Absence d'information)				
EnergyPRO	- Simulation Scénarios - SER - Optimisation de l'opération - Optimisation de l'investissement	Investigation sur un seul projet spécifique	Max 40 ans	Minute	Analyse de centrale électrique	Oui	P ⁵	-	100%	100%

³ La version HOMER PRO V3.7 inclut les scénarios avec un pas annuel, non spécifier pour le calendrier. (30. LLC, H.E., *HOMER® Pro V3.7 User Manual*. 2016.)

⁴ Les simulations se font annuellement mais avec possibilité de combinaison pour créer un scénario de plusieurs années.

⁵ P signifie partiellement.

D'autres auteurs tels que (Georgilakis 2005), (Bélangier-Gravel 2011) ont confirmé aussi que les logiciels RETScreen et HOMER Energy sont les logiciels les plus utilisés en matière d'aide à la décision des systèmes d'énergies renouvelables. Pour cette raison, nous allons établir une étude approfondie sur les entrées et les sorties de chaque logiciel ainsi que sur les critères qu'ils considèrent et les composantes d'énergie renouvelable que chacun d'eux met à la disposition des utilisateurs. Cette étude servira d'une part à choisir le logiciel qui nous servira à l'étude technico-économique par la suite et d'extraire le maximum de critère que nous pourrions inclure dans la matrice multicritère par la suite.

2.1.2 HOMER Energy

- **Présentation**

HOMER Energy (Hybrid Optimisation Model for Electric Renewables) a été initialement développé en 1993 par le National Renewable Energy Laboratory pour les programmes d'électrification rurale. Il est utilisé par 150 000 utilisateurs dans 193 pays. Il représente un standard mondial pour l'optimisation et la conception des micro-réseaux reliés ou non au réseau [30, 31].

- **Fonctionnement**

HOMER Energy permet de simuler, d'optimiser et aussi réaliser une analyse de sensibilité pour les SERs. Il est utile aussi bien pour les centrales électriques villageoises, les camps, les chalets, les bases militaires que pour les habitats individuelles, reliés ou non au réseau [31].

Dans un premier temps, HOMER peut **simuler** le fonctionnement d'un ou plusieurs systèmes à la fois. Pour chaque configuration, Il établit le bilan énergétique avec un pas allant d'une minute à une heure pour une période d'une année. Ainsi, pour chaque pas, HOMER compare la demande d'électricité et de chaleur dans cet intervalle de temps à l'énergie que le système peut fournir. C'est ainsi qu'il détermine la faisabilité technique du système. Aussi, suivant les données techniques et de coût de chaque composant du système, HOMER calcul

le rendement énergétique, le cout du système et le % d'émission de gaz à effet de serre pour chaque configuration.

Dans un deuxième temps, HOMER **optimise** le(s) système(s) déjà simulé(s). En effet, selon les critères que nous définissons, il trie et filtre les systèmes, déjà simulé, de sorte à ce que nous pouvons voir les meilleurs ajustements possibles. Par défaut, il trie les systèmes en fonction du coût actuels net du système (CPN).

En dernier temps, HOMER peut modéliser l'impact des variables qui sont hors de contrôle, tel que le vent, la vitesse, les coûts de carburant... etc., et de voir comment le système optimal change avec ces variations : C'est **l'analyse de sensibilité**.

- **Étapes HOMER Energy**

Pour le fonctionnement de Homer, les utilisateurs doivent suivre les étapes suivantes : [24] , [32], [33], [30]

- 1- Définir le projet : (*Onglet Home*)

À la première ouverture du logiciel, un environnement pour définir le projet s'offre à nous. Il sert à entrer le nom du projet, l'auteur, une description sommaire du projet et la localisation du projet. Cette dernière servira à télécharger les données des ressources (vent et rayonnement solaire).

- 2- Conception du système (*Onglet Design*)

- 2-1- Entrer la charge : Sous *le menu Load* nous pouvons définir les charges à supporter par le système. Nous devons ajouter le profil de la charge au modèle, modifier les spécifications de chargement après l'ajout de la charge au modèle et spécifier le type de la charge (primaire, thermique, secondaire ou d'hydrogène)

- 2-2- Choisir les composantes : en utilisant le menu component, nous pouvons choisir tous les composants que nous voulons considérer dans notre système

d'alimentation. HOMER offre un nombre considérable de composants à savoir générateur, PV, éolienne, différents dispositifs de stockages, convertisseur, hydro, reformer, électrolyseur, réservoir d'hydrogène, hydro cinétique, réseau et contrôleur de charge thermique. D'autres modules concernant l'énergie biomasse sont aussi disponibles via l'ajout d'un module supplémentaire du logiciel. Lors du choix des composants, il est important de sélectionner tous les composants des différents systèmes que nous voulons considérer et d'entrer les spécifications techniques et les différents coûts pour chaque composant.

2-3- Entrer le détail des ressources : HOMER définit une ressource comme étant tout ce qui provient de l'extérieur du système. Chaque ressource est liée à un composant (exemple les données de vent pour l'éolienne). *Le menu Ressources* permet d'introduire les données de la ressource. Ces dernières peuvent être importées à partir des bases de données de HOMER suivant la localisation du projet. Ils peuvent être téléchargés à partir d'un fichier ou entrés directement.

2-4- Entrer les données relatives à l'aspect économique, le système de contrôle, les émissions et les contraintes du projet. Ces données peuvent être spécifiées sous *le menu Project*. Ces données sont :

- Les données économiques concernent le taux d'intérêt réel annuel, la durée de vie du projet, le coût de la charge non satisfaite, le coût du capital fixe du système, le coût fixe du fonctionnement et de l'entretien du système (O & M), la taxe sur le carbone.
- Les données du Contrôle du système : concernent principalement la stratégie d'expédition (charge suivante, cycle de charge), qui détermine comment le ou les générateurs chargent le banc de batterie.
 - Les contraintes s'associent à la réserve d'exploitation, la capacité maximale de stockage annuelle, fraction minimale de l'énergie renouvelable que le système devrait satisfaire.

- Les données sur les émissions permettent de spécifier la pénalité associée à un polluant, ou la limite acceptable aux émissions des polluants.

Dans le même onglet, nous pouvons entrer les valeurs de chaque variable qui serviront à l'optimisation du système ou définir certains systèmes que nous voulons exclure de l'optimisation.

3- Analyser les résultats de la simulation (Onglet *Result View*)

Il s'agit de faire une analyse des coûts, du flux de trésorerie, de la consommation et la production de l'électricité du système, des émissions, des détails d'opération pour chaque composant, du carburant, du stockage et du réseau de chaque système simulé. Les différentes analyses se font en se basant sur les différents rapports, tables et graphes que Homer met à la disposition de l'utilisateur.

4- Analyser les résultats de L'optimisation (Onglet *Result View*)

Les résultats de l'optimisation peuvent être affichés sous forme de tableau ou de graphe. En effet après la simulation, Homer répertorie dans le tableau des simulations tous les systèmes réalisables. Par défaut, il les trie selon la plus grande valeur actuelle nette.

5- Réaliser l'analyse de sensibilité

▪ **Les critères considérés par HOMER :**

Lors des résultats de simulations, Homer calcul différents critères. Ces critères sont tous à caractère quantitatif et permettent de comparer un système à un autre.

Nous pouvons les classés en trois catégories :

- Architecture : Indique la présence de chaque type de composant considéré et leur taille.

- Coût : Nous y trouvons différents critères relatifs au coût global du système, le coût actuel net, le coût d'opération, le capital initial, le coût du carburant, le coût d'opérations et de maintenance...etc. Les coûts sont généralement exprimés en devise, prédéfinie lors de la définition du projet.
- Système : nous y trouvons des critères techniques tels que la fraction du renouvelable (%), le carburant utilisé (L), la capacité de stockage (% ou kWh/an), la production électrique (kWh/an), l'excès en production (% ou kWh/an), la charge non satisfaite (% ou kWh/an), les différentes émissions nuisible (kg/an), la valeur maximale annuelle de la pénétration du renouvelable (%)...etc.

En spécifiant un système de base, HOMER peut faire la comparaison économique des systèmes selon les critères comme: le taux de rendement interne (%), la période de retour d'investissement (an), la période de retour d'investissement actualisé (an), la valeur actuelle du système (\$) ...etc.

- **Exemple d'études réalisé par HOMER dans la littérature**

Ci-dessous des exemples tirés de la littérature et réalisés par HOMER en vue de choisir un système énergétique renouvelables.

Tableau 3: Exemple d'étude réalisé par Homer Energy dans la littérature

Références	Objectif	Localisation	Méthodes utilisés
(Asit, Meera et al. 2016) [34]	Une analyse technico-économique pour des systèmes hybrides de production d'électricité pour une institut technique et ce dans le but d'installer un micro-réseau.	Une institution en Inde	HOMER
(Bélangier-Gravel 2011) [32]	Analyse technico-économique d'un système hybride éolien-Photovoltaïque en comparaison avec les systèmes photovoltaïque et éolien seuls	Une résidence à Saint Hubert, Québec	HOMER Energy et RETScreen
(Corolleur 2011) [35]	Développement d'un catalogue de solutions d'implantation d'énergies renouvelables susceptibles de répondre aux besoins énergétiques d'une installation selon sa classe de puissance	Une maison en bretagne	HOMER Energy
(Fantidis, Bandekas et al. 2012) [36]	Étude technico-économique des systèmes d'énergie hybride dans les communautés éloignées en Grèce.	Village Palka, Grèce	HOMER Energy
(Khan and Iqbal 2005) [37]	Étude de préfaisabilité des systèmes autonomes d'énergie hybride pour les applications à Terre-Neuve.	Terre-Neuve, Canada	HOMER Energy

2.1.3 RETScreen

- **Présentation**

RETScreen est un progiciel destiné aux énergies propres, élaboré par le gouvernement du Canada en 1999. À l'aide d'une approche standardisée et simple, RETScreen, permet aux décideurs d'analyser la faisabilité technique et financière des projets d'efficacité énergétique, d'énergies renouvelables et de cogénération ainsi que d'analyser la performance énergétique en continu. En outre, RETScreen est aussi un outil de sensibilisation qui fournit et diffuse de

l'information utile à propos des technologies d'énergies propres. RETScreen a aussi été conçu pour servir n'importe quel pays. [2, 38].

- **Fonctionnement**

RETScreen offre une analyse standardisée et similaire pour tous les modèles de technologies d'énergies propres. Il permet d'évaluer leur production énergétique, leur coût, leur cycle de vie et leur réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES). L'utilisation du logiciel suit cinq étapes, chaque étape est représentée par une feuille de calcul Excel. Le logiciel RETScreen se base sur la comparaison entre un système de référence et un autre SER. Il s'intéresse aux coûts incrémentaux (les coûts supplémentaires au cas proposé par rapport à ceux du cas de référence). Il permet aussi d'analyser les réductions d'émissions de gaz à effet de serre.

- **Étapes de RETSREEN**

Dans ce qui suit nous avons analysé la dernière version de RETScreen expert (décembre 2016), ces étapes sont les suivants :

- 1- Choisir le lieu des données climatiques et déterminer le lieu de l'installation :
feuille Lieu

En choisissant le lieu des données climatiques, le logiciel télécharge, à partir des données en ligne, les différents paramètres climatiques mensuels du lieu sur une période annuel. Ces données sont : la température de l'air, l'humidité relative, les précipitations, le rayonnement solaire quotidien horizontale, la pression atmosphérique, la vitesse du vent, la température du sol, le degrés-jours de chauffage sous 18 °C, degrés-jours mensuels de climatisation au-dessus de 10 °C. Il enregistre aussi la position géographique du lieu à savoir son latitude, sa longitude, la température extérieur de calcul de chauffage et de climatisation et l'amplitude des températures du sol. RETScreen demande aussi de spécifier la zone climatique.

- 2- Enter les renseignements généraux de l'installation à étudier, ainsi que le système avec lequel nous souhaitons comparer notre installation s'il y a lieu : *feuille Installation*

Les renseignements généraux de l'installation servent à définir le projet. Ceci demande d'introduire les éléments ci-dessous :

- Le type de l'installation (centrale électrique, industriel, commercial / institutionnel, résidentiel, agricole ou autre défini par l'utilisateur.
 - Le type du projet (type de technologie, de bâtiment, de procédé, d'usine ou autre)
 - Une description du projet
 - L'organisme et l'utilisateur responsable de l'étude sur le projet
 - Le nom de l'installation et l'adresse du projet.
- 3- (Feuillet de calcul énergie) simuler la consommation et/ou la production d'énergie de divers types d'installations, y compris des systèmes et mesures individuels
 - 4- (Feuillet coût) aide l'utilisateur à estimer les coûts (et les crédits) relatifs au cas proposé, il considère les coûts d'investissement initiaux et les frais annuels récurrents.
 - 5- (Feuillet émission) la feuille de calcul Analyse des Émissions permet d'estimer le potentiel de réduction d'émissions de gaz à effet de serre (GES) de l'installation analysée
 - 6- (Feuillet finances), grâce aux données d'entrée des paramètres financiers (taux d'actualisation, ratio d'endettement, etc.) et aux données résultants de l'analyse de viabilité financière (taux de Rendement Interne (TRI), retour simple, valeur actualisée nette (VAN), etc.), la feuille de calcul, Analyse financière, offre aux décideurs les paramètres financiers utiles à leur analyse.

▪ **Critères évalués par RETScreen**

RETScreen fait son évaluation suivant différents critères quantitatifs, nous en citons :

La capacité électrique total (kW), la quantité totale d'électricité produite (kWh/J/tBu), le coût d'investissement des technologies (\$), le revenu d'exportation d'électricité (\$), le coût du combustible (\$), le coût d'exploitation et entretien (économie) (\$), le retour simple (an), l'énergie renouvelable fournie(%), la réduction nette des émissions de gaz à effet de serre(kg/an), le total des coûts initiaux (\$), les incitatifs / subventions (\$), le total des économies annuelles (\$), le flux de trésorerie annuel avant et après impôt (\$), le taux de rentabilité interne, la valeur actualisée nette(\$), le taux de récupération simple (an), l'indice de rentabilité.

▪ **Exemple dans la littérature**

Ci-dessous des exemples réalisés par RETScreen en vue de choisir un système énergétique renouvelables.

Tableau 4: Exemples dans la littérature des études réalisés par RETScreen

Références	Objectif	Localisation	Méthodes utilisés
(Bélanger-Gravel 2011) [32]	Analyse technico-économique d'un système hybride éolien photovoltaïque en comparaison avec les systèmes photovoltaïque et éolien seuls	Une résidence à Saint Hubert, Québec	HOMER Energy et RETScreen
(Alanís-Noyola, Prasanna et al.) [39]	Une évaluation de préfaisabilité technique et financière pour le dessalement de l'énergie solaire et éolienne, par rapport au dessalement classique de l'île de Thira	Île de Thira Grèce	RETScreen

2.1.4 Comparaison entre HOMER Energy et RETScreen

À terme de l'étude approfondie des deux progiciel HOMER Energy et RETScreen, nous avons soulevé les points suivants :

- Concernant les études techniques, HOMER Energy l'emporte sur RETScreen. En effet, HOMER permet de simuler à la fois plusieurs systèmes et de les optimiser. C'est le logiciel le plus adapté pour la conception et l'étude de la faisabilité technique, en particulier des systèmes hybrides.
- RETScreen quant à lui, il est plus avancé sur la faisabilité financière, il permet même d'inclure les subventions, les encouragements, le flux de trésorerie annuel avant et après impôt...etc. Ces critères peuvent être rajoutés dans une matrice multicritère.
- RETScreen ne permet pas de faire la conception des systèmes et de comparer plusieurs systèmes en même temps.
- Concernant, le calcul des coûts , les deux progiciels permettent de faire un calcul de coût global du système. Et ce, en sommant les coûts de chaque composant du système.
- HOMER Energy est le logiciel le plus utilisé en matière de sélection d'un système énergétique renouvelable. Alors que RETScreen est surtout utilisé pour vérifier la faisabilité d'un SER en le comparant avec un seul système de référence (souvent un système conventionnel)

Étant concerné par le choix d'un SER optimal en site isolé, nous conserverons HOMER Energy pour réaliser la faisabilité technique des systèmes et d'établir le calcul des coûts. L'étude technique comportera différents composants (éolien- solaire- stockage- générateur...) et permettra de simuler plusieurs systèmes simples ou hybrides à la fois. En cas de besoin nous conserverons certains financiers (tel que les subventions) comme critère supplémentaire lors de l'étude multicritère.

2.2 METHODES MULTICRITERES

Après avoir étudié les logiciels qui permettent le choix des SERs, nous nous intéresserons dans ce qui suit aux méthodes multicritères qui ont été utilisées pour la même fin. Nous avons étudiés sept article qui traite l'aide à la décision des SERs. Avant d'élaborer plus le sujet, nous allons définir les méthodes multicritères.

2.2.1 Définition des méthodes d'aide à la décision multicritère

Une méthode d'aide à la décision est une méthode qui permet l'identification et le choix des alternatives pour trouver la meilleure solution en fonction des différents critères tout en tenant compte les attentes des parties prenantes [22]. Ces méthodes peuvent traiter à la fois des critères quantitatifs et qualitatifs contradictoires et analyser les préférences conflictuelles des décideurs [20, 23] .

Les MCDM se réalisent généralement selon les 5 étapes suivantes [23] :

- Définition du contexte décisionnel
- Identification des critères d'évaluation
- Identification des alternatives
- Évaluation de chaque alternative par rapport à chaque critère
- Analyse de compromis.

Il existe plusieurs MCDM, chacune à ses forces et ses faiblesses. Elles peuvent être classées selon les trois approches suivantes [40] :

- l'approche du critère unique de synthèse, évacuant toute incomparabilité;

C'est une approche américaine dont les préférences au niveau de chaque attribut sont agrégées en une fonction (de valeur, d'utilité) unique qu'il s'agit ensuite d'optimiser. Ces méthodes permettent de réaliser un classement des solutions étudiées. Les principales méthodes appartenant à cette approche sont: MAUT, SMART, TOPSIS, AHP...etc. [41, 42]

- l'approche du surclassement de synthèse, acceptant l'incomparabilité;

C'est une approche française, qui permet de présenter des relations binaires, appelées relations de surclassement. Pour représenter les préférences des décideurs, elle utilise les seuils de discrimination [42]. Ces méthodes permettent une recommandation de solution, et elles ne forcent pas un classement complet des alternatives. Plutôt elles permettent de visualiser les pour et les contres de chaque solution. [41]. Les principales méthodes appartenant à cette approche sont: ELECTRE, PROMETHÉE...etc. [42]

- l'approche du jugement local interactif avec itérations essai-erreur.

Elles alternent les étapes de calculs (fournissant les compromis successifs) et les étapes de dialogue (source d'informations supplémentaires sur les préférences du décideur) [42] .

2.2.2 Revue de littérature des méthodes multicritères

Après une revue de littérature sur les MCDA en matière utilisés en matière de projet ER, nous listons ci bas, les méthodes multicritères utilisées

Tableau 5: Revue de littérature sur MCDA utilisé pour le choix des SERs

Références	Objectif	Localisation	Méthodes utilisés
(Malik, Al Badi et al. 2014) [43]	L'évaluation des projets d'énergie renouvelables en utilisant une approche multicritère	Île Masirah à Oman	HOMER Energy et AHP
(Diemuodeke, Hamilton et al. 2016) [33]	Choisir le meilleur système d'énergie hybride	Les communautés rurales du littoral nigérian	HOMER Energy et TOPSIS
(Georgiou, Mohammed et al. 2015) [42]	Sélectionner la meilleure configuration d'approvisionnement énergétique des unités autonomes de dessalements	Île dans le Golfe Saronique	AHP et PROMETHEE
(Büyüközkan and Güleriyüz 2016) [44]	Évaluer l'alternative énergétique durable pour la Turquie	Turquie	AHP floue et TOPSIS floue
(Hoberg and Peterson 2015) [23]	Présentation d'une démarche d'aide à la décision multicritères pour comparer les choix énergétiques	Démarche générale	Méthode d'aide à la décision multicritère
(Barin, Canha et al. 2011) [45]	Développer une analyse multicritère pour évaluer des sources d'énergies renouvelables notamment les systèmes de production d'énergie décentralisés	Démarche générale	AHP et logique floue
(Nigim, Munier et al. 2004) [22]	L'application des outils de MCDM pour aider les communautés dans le classement de préfaisabilité des autres PRES locaux	Communauté de Waterloo	Comparaison AHP et SIMOS

Le tableau ci-dessus peut être complété par le tableau de l'ANNEXE I. Ce dernier représente le résultat d'une publication récente, qui avait pour objet de faire l'état d'art des méthodes multicritères en matière des énergies renouvelables[26] . En se référant à cet annexe, nous avons calculé le nombre d'article ayant utilisé la même MCDA pour choisir un SERs en site isolé. 31 articles ont été traités.

Tableau 6: Nombre d'article traitant les méthodes MCDA pour le choix des SERs en site isolé selon [26]

MCDA pour le choix des SERs	Nombre d'article traitant
PROMETHEE	5
ELECTRE	3
AHP	7
Méthode floue	4
Moyennes pondérés	6
Autres méthodes (VIKOR, TOPSIS, SIMUS, NAIADE, REGIME...)	11

Aussi, Taha, R.A. and T. Daim se sont intéressés à la même question des MCDA en matière des SERs [20]. Le tableau suivant présente le nombre d'article en MCDA en matière de sélection des projets d'énergies renouvelables (extrait de la table 1 de l'article [20]). 21 articles ont été traités.

Tableau 7: Nombre d'article traitant les méthodes en MCDA pour la sélection des projets ER selon (extrait de la table 1 de l'article [20])

Méthodes MCDA pour la sélection des projets ER	Nombre d'article traitant
AHP	6
ELECTRE	2
PROMETHEE	4

Méthode floue	4
Autres méthodes (VIKOR, TOPSIS, SIMUS...)	5

Suite à notre revue de littérature sur les MCDA, nous avons constaté que les méthodes les plus utilisées pour choisir les SERs ou pour sélectionner les projets ER sont :

- La méthode AHP
- PROMETHEE
- ELECTRE
- Les modélisations par le FLOU
- Moyenne pondérée

En raison de la simplicité de la méthode PROMETHEE-GAIA, sa pertinence et son usage dans les pays francophones nous avons décidé d'explorer cette méthode et de l'utiliser lors de l'élaboration de notre démarche.

2.2.3 PROMETHEE-GAIA

▪ Présentation de PROMETHEE-GAIA

La méthode PROMETHEE (Preference Ranking Optimisation METHod for Enrichement Evaluation) est une méthode prescriptive d'analyse multicritère des problèmes. Elle est développée par Bernard Mareschal et Jean Pierre-Brans, en Belgique dans les années 80. [46, 47]

Elle représente une alternative francophone de la méthode ELECTRE. Réputée par sa simplicité, elle utilise le principe de surclassement des alternatives. Elle permet de classer les alternatives en effectuant une comparaison par pair des critères définis [20].

En 1989 GAIA (Graphical Analysis for Intereractive Aid) GAIA apporte un complément descriptif à PROMETHEE. Il permet de visualiser graphiquement les données

d'un problème multicritère (les choix, les compromis et les arbitrages pour prendre une décision) [46, 47].

PROMETHEE et GAIA permettent de confronter les points de vue de plusieurs décideurs, de mieux comprendre leurs divergences et de proposer des solutions de consensus.

▪ **Les étapes de VISUAL PROMETHEE**

Le logiciel de référence pour la méthodologie d'aide à la décision PROMETHEE-GAIA, Visual PROMETHEE, suit les étapes suivantes [46, 47] :

1- Définir le problème

Il s'agit d'introduire un ensemble de données sur le tableau d'interface du logiciel. Ces données concernent les actions, les critères et les scénarios.

- Définir des actions :

Les actions à comparer pour répondre à la problématique, elles sont abrégées par la lettre A et énumérées. Les actions semblables peuvent être regroupées sous la même catégorie d'action. Les actions sont en nombre fini.

- Définir des critères

Définir les critères qui sont nécessaires pour choisir entre les actions, ils sont abrégés par la lettre C. Ils peuvent être qualitatifs ou quantitatifs. Il est important de déterminer pour chaque critère qualitatif l'échelle qualitative associée, et pour les critères quantitatifs les unités de mesure.

- Définir les scénarios

Les scénarios peuvent représenter les points de vue et les préférences de parties prenantes, comme ils peuvent aussi représenter des hypothèses à étudier (exemple : différentes périodes). Les scénarios partagent les mêmes actions, les catégories d'action, les critères et les groupes de critère, les échelles qualitatifs, les unités de mesure...etc. Toutefois,

ils prennent des valeurs spécifiques pour les évaluations des actions, les préférences des critères et leur pondération.

2- Modéliser les préférences

Après la définition des actions et des critères, il est important de modéliser les préférences. Ceci revient à préciser les caractéristiques de chaque critère, à savoir :

- La fonction de préférence;
- Les seuils d'indifférence, de préférence et le seuil Gaussien (si la fonction Gaussienne est utilisée);
- Le poids des critères;
- Et spécifier si le critère est à maximiser ou à minimiser.

En outre, il s'agit d'hierarchiser les critères ayant le même objectif sur trois niveaux au maximum.

3- Classement PROMETHEE des actions

Visual PROMETHEE distingue deux types de classements, soit :

- Classement partiel PROMETHEE I

Le classement partiel PROMETHEE I est basé sur le calcul de deux flux de préférences Φ^+ et Φ^- , ces flux se définissent comme suit :

- Φ^+ , flux positif ou flux sortant: Il exprime de combien une action surclasse toutes les autres actions. Il mesure la force de l'action. Ainsi, plus le flux est élevé plus la solution est meilleure.
- Φ^- , flux négatif ou flux entrant: Il exprime de combien une action est surclassé par toutes les autres actions. Il mesure la faiblesse de l'action. Plus le flux est négatif, meilleure la solution est.

Dans le classement partiel, PROMETHEE, compare les actions selon les deux flux. Nous distinguons deux cas de figure : Si une action est préférée par rapport à l'autre sur les

deux flux, les actions sont dites comparables, et celle qui représente les meilleures valeurs représente la meilleure action. Ceci n'est pas toujours vrai en raison de l'aspect conflictuel du multicritère. Ainsi, si les deux actions ne présentent pas le même classement sur les deux flux, ceci signifie que l'une est meilleure sur le Φ^+ et l'autre l'est sur le Φ^- . Dans ce cas-là, les deux actions sont dites incomparables en raison de la difficulté à choisir entre les deux actions. Dans ce cas, une analyse plus approfondie par les décideurs est vivement recommandée .

- Classement complet PROMETHEE II

Le classement complet PROMETHEE II est basé sur le flux Φ net .

$$\text{Avec} \quad \Phi = \Phi^+ - \Phi^-, \quad \text{et } -1 \leq \Phi \leq +1.$$

Ce classement permet de classer toutes les actions de la meilleure à la moins bonne. Bien que ce classement ne considère pas les incomparabilités entre les actions, il a l'avantage de présenter un rangement complet. Plus le Φ est élevé, meilleur est l'action.

Visual PROMETHEE offre différentes représentations pour faciliter le classement des actions qui sont : le classement partiel PROMETHEE I, le classement complet PROMETHEE II, le diamant PROMETHEE, le graphe PROMETHEE, l'arc en ciel PROMETHEE, et le tableau de flux PROMETHEE.

4- Analyse visuelle GAIA

L'analyse GAIA est un complément descriptif du classement PROMETHEE, il permet de:

- Relever les critères importants lors de la prise de décision;
- Identifier les critères semblables, contradictoires et indépendants;
- Identifier les actions similaires, performantes ou présentant un bon compromis;
- Identifier les critères sur lesquels chaque action est performante ou mauvaise;
- Visualiser les priorités;

- Comparer les profils pour les différentes actions (affichage GAIA-webs ou affichage profil d'action).

5- Analyse de sensibilité

Pour réaliser une étude d'impact des pondérations des scénarios ou des critères, Visual PROMETHEE permet de faire une analyse de sensibilité. Cette analyse permet entre autre de :

- Analyser l'impact des priorités sur le classement de PROMETHEE.
- Obtenir et voir les intervalles de stabilité pour le poids de chaque critère.
- Évaluer la robustesse du classement PROMETHEE.
- Comparer les scénarios.

CHAPITRE 3

REVUE DE LITTERATURE SUR LES CRITERES DE CHOIX DES SERS

Après la revue de littérature sur les méthodes de choix des critères des SERS, nous avons soulevé l'importance du choix des critères pour la prise de décision. Dans ce chapitre nous avons tenté d'extraire les critères qui entrent en jeu lors de la sélection des SERS.

3.1 DEFINITION D'UN CRITERE [40]

Un critère d'évaluation est "un attribut associé à chaque action qui permet de comparer les actions et de déterminer les meilleures[47]".

Dans [24], Hoberg, G. and G. Peterson définissent les critères d'évaluations comme étant "des facteurs clés qui informent l'évaluation des alternatives et l'analyse des compromis. Ils peuvent être considérés comme des « aspects importants dans le processus décisionnel »."

Dans B. Roy et D. Bouyssou [48] définissent une famille cohérente de critère est une famille qui satisfait les trois axiomes suivants :

- L'exhaustivité
- La cohérence
- Et la non redondance

Un critère doit être mesurable quantitativement ou qualitativement. [24]. Nous parlons ainsi d'un critère quantitatif ou d'un critère qualitatif. Il peut être quantitatif (un nombre est associé à chaque action, exemple : le prix d'un élément) ou qualitatif (dans ce cas, une échelle

qualitative doit être définie avec un certain nombre de niveaux commandés tels que par exemple: très mauvais, mauvais, moyenne, bonne, très bonne).

Un critère quantitatif : est mesuré par des données objectives manipulées mathématiquement, et généré par des quantités mesurables, exemple : le coût d'une action [23]

Un critère qualitatif : il se mesure par une donnée qualitative, une échelle définie. il ne peut être quantifié en raison du manque de données historiques, du manque de ressources ou de la difficulté à modéliser les analyses [22].

Il est important de noter que le choix des critères dépend d'un objectif précis [26], ainsi que de la taille du projet.

3.2 CRITERES CONSIDERES DANS LES PROGICIELS POUR LES SERS

Comme l'avoir déjà mentionné dans le chapitre 2, les progiciels permettent de comparer les solutions selon un nombre de critères. Nous les avons classifiés dans le tableau suivant :

Tableau 8: Critères utilisées par les progiciels en matière de sélection des SERs

Famille de critère	Critères (unité de mesure)
Critères techniques	L'architecture du système (le nombre et la nature des composant du système) (sans unité de mesure), la fraction du renouvelable (%), le carburant utilisé (L), la capacité de stockage (% ou kWh/an), la production électrique (kWh/an), l'excès en production (% ou kWh/an), la charge non satisfaite (% ou kWh/an), (kg/an), la valeur maximale annuelle de la pénétration du renouvelable (%)...etc.
Critères économiques	Taux de rendement interne (%), période de retour d'investissement (an), période de retour d'investissement actualisé (an), la valeur actuelle du système (\$) le coût actuel net (\$), le coût d'opération (\$), le capital initial (\$), le coût du carburant (\$), le coût d'O&M et de maintenance(\$)...etc.
Critères environnementaux	Différentes émissions nuisible (kg/an)

Nous en concluons que les critères utilisés dans les progiciels sont tous des critères quantitatifs. Ils concernent surtout les critères techniques et économiques. Même s'ils intègrent des critères environnementaux, ceux-ci se limitent à l'émission des particules nuisibles dans l'air.

3.3 CRITERES TROUVES DANS LA LITTERATURE

En réalisant une revue de littérature approfondie, nous avons pu dresser l'état d'art des critères qui ont été utilisés lors du choix des SERs, notamment par MCDA. Le tableau 9 suivant présente le résultat de notre revue de littérature. Nous avons traité neuf articles traitant le choix des SERs en sites isolés.

Tableau 9: Revue de littérature sur les critères de choix des SERs

Références	Objectif	Famille de critère	Critères utilisés (QN, QL)	
(Diemuodeke, Hamilton et al. 2016) [33]	Évaluation multicritères des systèmes hybrides d'énergie renouvelable pour les communautés côtières du Nigeria	Technique	QN	Fraction du renouvelable
			QL	Disponibilité de la technologie, facilité d'installation, disponibilité / prévisibilité / aléatoire des ressources naturelles (vent, soleil), type de technologie utilisée
		Économique	QN	Capital d'investissement, coût O&M, coût actuel net, coût de l'énergie, coût du carburant.
			QL	Evaluation du cycle de vie
		Environnemental	QN	Émission CO ₂ (kg/an)
			QL	Impact environnemental
			QL	Sensibilisation socio-culturelle
(Malik, Al Badi et al. 2014) [43]	L'évaluation des projets d'énergie renouvelables en utilisant une approche multicritère	Technologie et durabilité,	QN	Disponibilité de l'équipement, fraction du renouvelable
			QL	Qualité de puissance, problèmes techniques dans O&M
		Economique	QN	Le coût d'investissement, les coûts d'O&M, les coûts du carburant
			QN	Émissions de CO ₂ , et autres émissions nuisibles (SO ₂ , NO _x ...)
		Environnemental	QL	Impact visuel, l'acceptabilité sociale, impact sur l'écosystème
			QN	le crédit de capacité du système d'énergie renouvelable, le temps de réalisation
		Politique et réglementation gouvernementale	QL	Politiques et réglementations gouvernementales
(Nigim, Munier et al. 2004)[22]	l'application des outils du MCDM pour aider les communautés dans le classement de la préfaisabilité des RES locales alternatives.	Impact social et environnemental	QL	Impact écologique, avantage social et économique, potentiel éducatif
		Faisabilité de projet	QN	Disponibilité de la ressource, faisabilité technique, viabilité financière
(Hoberg and Peterson 2015) [23]	Présentation d'une démarche d'aide à la décision multicritères pour comparer les choix énergétiques	Technique	QN	L'abondance (disponibilité de la ressources), la fiabilité de l'équipement
		Economique	QN	le coût par unité d'énergie
		Autres	QL	les impacts environnementaux, les événements extrêmes, le risque géopolitique, acceptabilité publique
(Demirtas 2013) [27]	Déterminer la meilleure technologie d'énergie	Technique	QN	Capacité de production d'énergie
			QL	Fiabilité, sécurité, maturité technologique

	renouvelable pour une planification énergétique durable	Economique	QN	Capital d'investissement, Coût d'O&M, durée de vie, période de récupération,
		Environnemental	QN	Émissions de CO ₂
			QL	Impact sur l'écosystème
		Social	QL	Avantages sociaux, l'acceptabilité sociale
(Ltd and électrique 2003)	Aider l'acheteur à déterminer si l'énergie éolienne est une solution intéressante dans son cas	Technique	QN	Disponibilité de la ressource, qualité de l'énergie, les composants, fiabilité technique
		Economique	QN	Les coût initiaux, coût annuels,
		Autres critères qualitatifs	QN	Environnement, sécurité, climat extrême, voisins, esthétique, bruit, corrosion, restriction due au zonage et autres obstacle juridiques potentiels, faune ailée locale, interférences électromagnétiques, connaissances techniques, accès, les assurances, les normes de construction et les restrictions aux actes de propriété.
(électrique 2003)	aider à déterminer si le recours à un système photovoltaïque est une option adaptée à vos besoins d'approvisionnement en électricité	Technique	QL et QN	fiabilité, possibilité d'expansion, exigences de ravitaillement, simplicité de l'installation, tolérance face aux interruptions, protection, rentabilité du système, évolution de la filiale, durée de vie, disponibilité des ressources
			Economique	QN
		Environnemental	QL	bruit, pollution
		Autres	QL	permis de construction, main d'œuvre qualifiée, les assurances, les normes de construction et les restrictions
(BÜYÜKÖZKAN and GÜLERYÜZ 2016)	Évaluer l'alternative de la technologie d'énergétique durable pour la Turquie	Technique	QN	Efficacité, énergie efficace, fiabilité
		Economique	QN	Coût d'investissement, coût d'O&M, retour sur investissement
		Social	QL	Acceptabilité sociale, Création d'emploi, Avantages sociaux
		Environnemental	QN	Émission de Nox, émissions de CO ₂
			QL	L'utilisation des terres
(Georgiou, Mohammed et al. 2015)	Sélectionner la meilleure configuration d'approvisionnement énergétique des unités autonomes de dessalements	Economique	QN	La valeur actuelle nette, indicateur du capital d'investissement, coût de production d'eau (énergie) euro/m ³
			QN	Quantité de l'eau produite (d'énergie produite) (m ³ /d), qualité de production de l'eau (de l'énergie) (µS/cm), consommation d'énergie spécifique (kWh / m ³)
		Environnemental	QL	Complexité, maturité technologique, Risque technologique
			QN	Émissions de NO _x , émissions CO ₂ , émissions de SO ₂
		Social	QL	Perte
			QN	création d'emplois, normes de vie, approbation communautaire et acceptation sociale, flux de capitaux à l'étranger

Ce tableau peut être complété par l'étude faite par Wimmeler, C., et al.[26]. Ces derniers ont listé un nombre considérable de critères (voir l'ANNEXE 1). Selon le tableau 9 et l'Annexe I nous pouvons déduire que généralement les critères se regroupent en quatre familles : des critères techniques, économiques, environnementaux et sociaux.

Les critères techniques les plus utilisés sont : la disponibilité de la ressource, la disponibilité de l'équipement, la fraction du ER, la fiabilité, la maturité de la technologie, la quantité, l'efficacité et la qualité de l'énergie. Les critères techniques peuvent être qualitatifs et/ou quantitatifs.

Les critères économiques les plus utilisés sont le capital d'investissement, le coût d'O&M, le coût du carburant, le coût de l'énergie, le coût actuel net, la période de récupération, la durée de vie. Ces critères sont à priori des critères quantitatifs.

En ce qui concerne, les critères environnementaux, autres que les émissions nuisibles (CO₂, SO₂, NOX...), qui est un critère quantitatif, les critères environnementaux qui sont souvent utilisés concernent l'impact visuel, l'impact sur la faune et la flore (l'écosystème), les pertes, l'utilisation des terres, le bruit et ils sont plutôt des critères qualitatifs.

Et finalement les critères sociaux qui sont reliés aux avantages sociaux, à l'acceptabilité sociale, et à la sécurité sociale. Ces critères sont surtout des critères qualitatifs.

3.4 CRITERES ISSUS DES ENTREVUES

Pour mieux compléter la liste des critères, nous avons réalisé des entrevues avec des experts. Il en ressort que, de plus que les critères précités ci haut, la présence de main d'œuvre qualifiée, la taille du système (l'encombrement), la sécurité de l'équipement contre le vol et la possibilité d'extension du système sont aussi des critères importants à considérer lors du choix d'un SER en site isolé.

CHAPITRE 4

CAS D'APPLICATION : MAISON PARTIELLE AUX ILES DE LA MADELEINE

4.1 DESCRIPTIF DE L'APPROCHE

Après avoir étudié les méthodes existantes pour choisir les SERs en site isolé, nous proposons la démarche ci-dessous. Cette démarche repose sur les étapes suivantes :

- Étape 1. Le choix du site qui fixera par ailleurs tous les paramètres du climat, de morphologie du sol, du voisinage ...
- Étape 2. 1ère analyse avec le logiciel HOMER Energy :

Cette étude a pour but ultime de générer les solutions techniquement faisables, qui répondent et qui vérifie la disponibilité des ressources. Nous y analyserons toutes les combinaisons possibles du choix énergétiques (éoliennes, panneaux solaires, énergie conventionnelles, dispositifs de stockage...). Cette analyse nous permettra aussi de faire une première analyse des critères quantitatifs techniques (la fraction ER, l'énergie produite, l'excès en énergie...), économiques (les coûts, le coût actuel net du projet, la période de récupération...), et l'émission des gaz à effet de serre. De plus, cette première analyse nous aidera à faire un premier filtre des solutions afin d'écartier celles qui ne répondent pas aux conditions et/ou contraintes du projet. Il en reste que, nous ne nous baserons pas sur cette analyse pour comparer les solutions.

- Étape 3. 2ème analyse : analyse avec Visuel PROMETHEE-GAIA

Les systèmes ressortissants de la première analyse feront l'objet d'une deuxième étude plus approfondie sur le logiciel d'agrégation multicritère Visuel Prométhée-Gaia. Ils représenteront les actions à comparer. Cette étude reprendra certains critères quantitatifs calculés par HOMER Energy et sera

enrichie par d'autres critères quantitatifs et qualitatifs non contenu dans l'évaluation des systèmes ressortissant de la première étude. Ainsi par la suite nous pourrons analyser les forces et les faiblesses de chaque solution et établir un rangement des différents systèmes.

- Étape 4. L'élaboration des scénarios, qui représenteront les intérêts et les préférences des parties prenantes ou des hypothèses du projet.
- Étape 5. À l'aide des outils d'analyse de Visuel PROMETHEE-GAIA, nous réaliserons différentes analyses pour pouvoir ranger les actions, déterminer les forces et les faiblesses de chaque solution, visualiser les préférences des parties prenantes impliquées et ainsi éclairer les décideurs sur le choix optimal de la solution SER.

Le graphe suivant résume les étapes de la démarche proposée pour le choix d'un SER à implanter dans un site isolé:

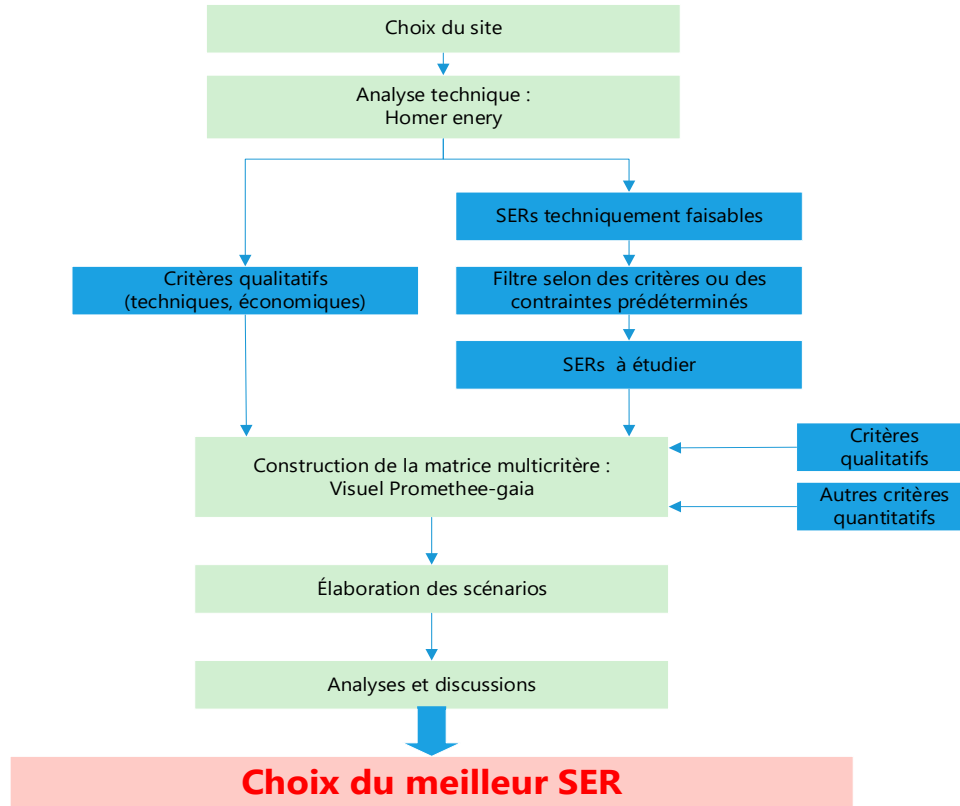


Figure 8: les étapes de l’approche décisionnelle multicritère pour le choix d’un SER à implanter dans les sites isolés

Pour expliquer la démarche proposée, nous l’illustrerons dans ce qui suit sur un cas didactique en vue d’une électrification partielle d’une maison aux îles de la madeleine. (la consommation de la maison est inspiré du cas d’une maison partielle [36])

4.2 PRESENTATION DU CAS D’ETUDE

La maison étudiée habite deux adultes et deux enfants et comporte :

- Une chambre pour les parents
- Une chambre pour les enfants
- Une salle de bain et toilette
- Un séjour
- Une cuisine

Le chauffage, le chauffe-eau et les gros électroménagers tels que les plaquettes de cuisson, le four, le réfrigérateur ...etc., consomment beaucoup d'énergie et doivent être étudiés à part. Et ce, dans le but de déterminer le meilleur système à considérer pour leur alimentation.

La toiture de la maison est de 30 m² (6,0 m x 5,0 m) orientée plein sud et inclinée à 47,39°.

4.3 ANALYSE AVEC HOMER ENERGY

4.3.1 Définition du projet

- **Localisation du projet :**

La maison se situe aux coordonnées géographiques suivantes (47°23,6'N, 61°51,1'W), 143-275 Qc-199, Fatima, G4T, Canada. L'endroit est peu peuplé et il ne présente pas d'obstacle dans le paysage.

- **Données économiques :**

Nous définissons les données économiques comme suit :

- Taux d'actualisation : 6% [49]
- Taux d'inflation : 0,7% (année 2016) [50]
- Capacité annuelle de stockage : 0%
- Durée de vie du projet : 25 ans.

4.3.2 Conception du système

4.3.3 La charge

Nous considérons que les charges à alimenter sont toutes des charges électriques. Elles comprennent l'éclairage, certains appareils électriques tels que l'Hi-Fi/vidéo, la bureautique,

l'ordinateur portable et le petit électroménager (micro-onde, aspirateur...). Le tableau ci-dessus présente un résumé de la consommation et l'utilisation de ses appareils.

Tableau 10: La consommation des appareils considérés dans une maison partielle aux îles de la madeleine

Appareil	Puissance	Utilisation	Total/semaine	Moyenne/jour
PC de bureau	200W	25h	5 kWh	0,72 kWh
Imprimante	80W	5h	0,4 kWh	0,06 kWh
Ordinateur portable	30W	70h	2,1 kWh	0,3 kWh
Chaîne Hi-Fi	110W	51h	5,61 kWh	0,80 kWh
TV (2)	140-110W	39-35h	9,31 kWh	1,33 kWh
Console de jeu	20	9h	0,18 kWh	0,03 kWh
Radio-réveils (4)	5W	672h	3,36 kWh	0,48 kWh
Ampoules BC (15)	13W	249h	3,24 kWh	0,46 kWh
LEDs (7)	5W	240h	1,2 kWh	0,17 kWh
Micro-ondes	700W	7h	4,9 kWh	0,7 kWh
Hotte aspirante	250W	14h	3,5 kWh	0,5 kWh
Aspirateur	1000W	4h	4 kWh	0,57 kWh
Veilles	-	-	4,97 kWh	0,71 kWh
TOTAL	-	-	47,77 kWh	6,8 kWh

L'image suivante présente le profil globale d'une maison partielle type aux îles de la madeleine. La consommation moyenne journalière est de 6,87kWh alors que la puissance de crête est 2,52kW.

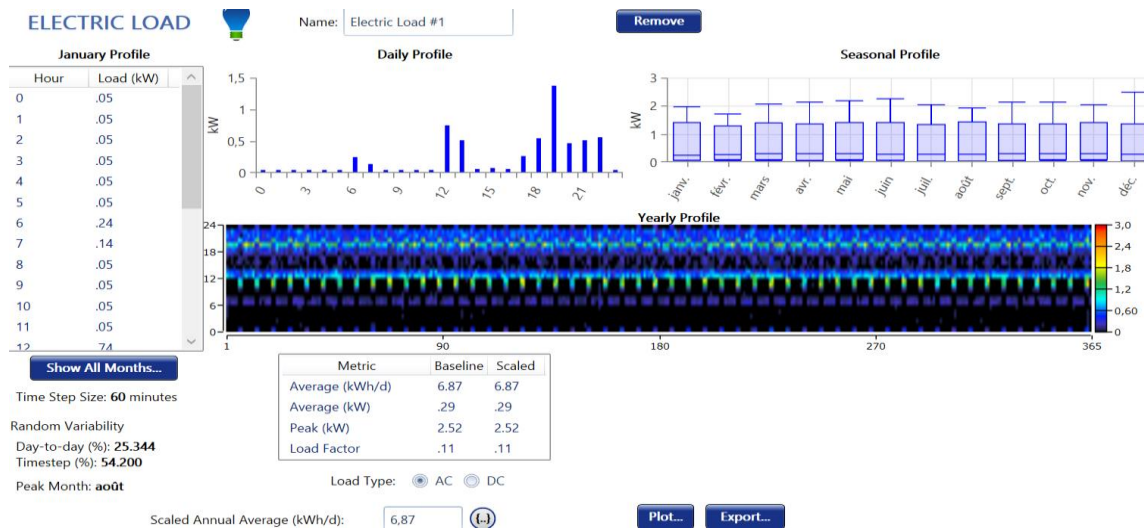


Figure 9: Profil de charge d'un maison partielle aux îles de la madeleine

N.B : Il est important avant d'établir le calcul de la charge de viser l'efficacité énergétique et de s'orienter vers les lampes et les appareils les plus économiques. Il est toujours plus intéressant d'économiser 1kW que d'en produire un !

4.3.4 Choix des composants

Dans cette section nous effectuons le choix de tous les composants à considérer dans notre système. Il s'agit de définir les spécifications techniques et les coûts (coût d'investissement et coûts d'O&M, coût de remplacement) de chaque composant de notre système énergétique.

Les composants auxquels nous nous intéresserons dans cette étude seront :

- Générateur;
- PV;
- Éolienne;
- Dispositifs de stockages;
- Convertisseur.

Avant de choisir chaque composant, nous effectuons une estimation avec un calcul manuel.

4.3.5 Choix du générateur

Homer Energy pro offre une multitude du choix du générateur avec différents types de carburants. Lors du choix du générateur, dans un premier temps, il est important de déterminer sa puissance apparente, ensuite de choisir le type de carburant (diesel, essence ou gaz naturel...). Et finalement de déterminer l'exigence d'inclure le générateur dans toutes les configurations ou de le configurer juste comme un dispositif d'appoint seulement.

Le générateur que nous considérons dans cette étude est un générateur diesel qui s'auto-dimensionne de façon à ce qu'il réponde à toute la charge. Il ne présente pas, donc, une capacité de stockage excédentaire. De plus, il ajuste sa courbe de carburant à sa taille. La figure 9 représente les spécifications techniques du générateur que nous considérons dans notre étude.

The screenshot displays the 'Autosize Genset' configuration window in the HOMER Energy software. The interface includes a 'Name' field set to 'Autosize Genset' and an 'Abbreviation' field set to 'Gen'. The 'Generator is auto-sizing' checkbox is checked. The fuel type is 'Diesel', with fuel curve intercept at 0,170 L/hr and fuel curve slope at 0,251 L/hr/kW. Emissions are listed as CO (g/L fuel): 16.5, Unburned HC (g/L fuel): 0.72, and Particulates (g/L fuel): 0.1. The 'Generator Cost' is set to € per kW of capacity, with 'Initial Capital' and 'Replacement' both at \$500.00, and 'O&M (per hour)' at \$0.030. The 'Electrical Bus' is set to AC. The 'Generic' information for HOMER Energy is displayed, including contact details for Andy Kruse. The 'Site Specific' tab is active, showing 'Minimum Load Ratio (%)' at 25,00, 'Lifetime (Hours)' at 15 000,00, and 'Minimum Runtime (Minutes)' at 0,00.

Figure 10: Les spécifications techniques du générateur pour le cas de la maison partielle aux îles de la madeleine

4.3.6 Choix des PV

Lors du dimensionnement des PV, nous devons considérer :

- La charge et les équipements que nous voulons alimentés avec des PV;
- La surface que nous avons en notre disposition pour placer les modules PV. Cette surface doit être capable de supporter les modules PV et la distance entre chaque deux modules de 20 mm;
- L'inclinaison des modules par rapport aux rayons solaires;
- Le nombre d'heure d'ensoleillement maximale par jour.
 - **Évaluation de la quantité de l'ensoleillement disponible**

Avant de dimensionner les PV, nous analyserons le potentiel d'ensoleillement disponible dans notre lieu d'étude. Après l'analyse de la Figure 10, qui présente la moyenne mensuelle des irradiances solaires globales horizontales nous constatons :

- Le mois juin est le mois le plus ensoleillé avec une irradiation journalière moyenne de 6,070 kWh/m²/jours.
- Le mois de décembre est le mois le moins ensoleillé avec 0,88 kWh/m²/jours.
- Nous pouvons aussi diviser les irradiances en trois périodes :
 - Période 1 (faible ensoleillement) :
Elle correspond à des irradiances journalières moyennes < 3 kWh/m²/jours. Elle concerne les mois : novembre, décembre, janvier et février.
La moyenne des irradiances journalière de la Période 1 = 1,38 kWh/m²/jours
 - Période 2 (ensoleillement moyen) :
Elle correspond à : 3 kWh/m²/jours ≤ irradiances journalières < 5 kWh/m²/jours.
Elle concerne les mois : mars, avril et septembre.
La moyenne des irradiances journalières de la Période 2 = 3,93 kWh/m²/jours.
 - Période 3 (ensoleillement élevé) :

Elle correspond à des irradiances journalières $\geq 5 \text{ kWh/m}^2/\text{jours}$. Elle concerne les mois : mai, juin, juillet et août.

La moyenne des irradiances journalières de la Période 3 = $5,645 \text{ kWh/m}^2/\text{jours}$.

La définition de ces périodes nous permettra de calculer différentes puissances de PV que nous pouvons simuler sur Homer Energy. Elles permettront d'optimiser le mieux notre système. Et elles sont surtout utiles pour la conception des systèmes hybrides.



Figure 11: Les irradiances solaires journalières aux îles de la madeleine

▪ **Dimensionnement des PV :**

Le calcul de la puissance des PV dont nous avons besoin, se fait selon la formule suivante :

$$P_{PV} = \text{charge journalière} / (K * \text{radiation journalière})$$

Avec :

K est le coefficient des pertes énergétiques occasionnées par le chargement des accumulateurs, de l'efficacité du régulateur de charge et les pertes dues aux conditions météorologiques tels que : l'accumulation de poussière ou de neige sur les modules.

En considérant que l'efficacité du régulateur de charge des accumulateurs est de 90%, et l'efficacité des accumulateurs de 85 % et des pertes métrologiques négligeables, nous considérons que le coefficient de perte est $K = 0,77$.

La puissance des panneaux photovoltaïques correspondants aux potentiels d'ensoleillement ci haut, est comme suit :

- $P_{PV \text{ maximale}} = (6,87\text{kWh/J}) / (6,07\text{kWh/m}^2/\text{J} * 0,77) = 1,47 \text{ kWh}$
- $P_{PV \text{ minimale}} = (6,87\text{kWh/J}) / (0,88 \text{ kWh/m}^2/\text{J} * 0,77) = 10,13 \text{ kWh}$
- $P_{PV \text{ moyenne}} = (6,87\text{kWh/J}) / (3,52\text{kWh/m}^2/\text{J} * 0,77) = 2,53 \text{ kWh}$
- $P_{PV \text{ catégorie 1}} = (6,87\text{kWh/J}) / (1,38 \text{ kWh/m}^2/\text{J} * 0,77) = 1,58 \text{ kWh}$
- $P_{PV \text{ catégorie 2}} = (6,87\text{kWh/J}) / (3,93 \text{ kWh/m}^2/\text{J} * 0,77) = 2,27\text{kWh}$
- $P_{PV \text{ catégorie 3}} = (6,87\text{kWh/J}) / (3,645 \text{ kWh/m}^2/\text{J} * 0,77) = 6,46 \text{ kWh}$

Nous effectuons les simulations sur Homer Energy pro avec des modules PV ayant un convertisseur intégré. Nous aurons pu considérer aussi la technologie sans convertisseur et y rajouter le convertisseur indépendant dans le design du système. En plus, si le module photovoltaïque ne comporte pas un optimisateur de puissance intégré, il faut prendre en considération les pertes liés à celui-ci, et par suite augmenter la P_{PV} de 15 à 25%.

Suite aux calculs fait, nous effectuerons les simulations, avec un modèle de module générique de 1kW et nous simulons avec des valeurs de 1kW, 2 kW, 3kW, 6kW, 8kW et 10kW.

4.3.7 Choix des éoliennes

Pour choisir son éolienne nous avons suivi la démarche décrite dans [51]. En effet, cette démarche repose sur les étapes suivantes :

- **Évaluation de la quantité de l'énergie éolienne disponible**

Dans cette étape nous analysons un paramètre clé pour le choix des éoliennes à savoir : la vitesse du vent.

A une distance déterminée du sol, il faut d'abord vérifier si nous disposons d'un potentiel de vent pour envisager l'installation d'un système éolien. Et pour cela, il faut que la vitesse annuelle moyenne du vent soit supérieur à 15km/h (équivalent à 4m/s).

Ensuite, nous analyserons la fluctuation de la vitesse moyenne en fonction de la hauteur, et ce en vue de déterminer les périodes présentant un potentiel de vent élevé ou faible. Nous nous intéressons principalement à la vitesse d'enclenchement et à la vitesse de déclenchement de l'éolienne à installer.

Finalement, la topologie du lieu, la hauteur de l'éolienne et l'existence d'obstacle avoisinant influent aussi sur la vitesse du vent, plus on s'éloigne du sol plus la vitesse du vent augmente. Et plus il y a d'obstacle moins la vitesse de vent est.

Dans notre cas, Homer Energy télécharge les données du vent à partir de la base de données sur la météorologie de surface et l'énergie solaire de la NASA. Le profil de la vitesse moyenne de notre cas d'étude aux îles de la madeleine, mesurée à une hauteur de 50m par rapport au sol, est présenté dans la figure suivante :

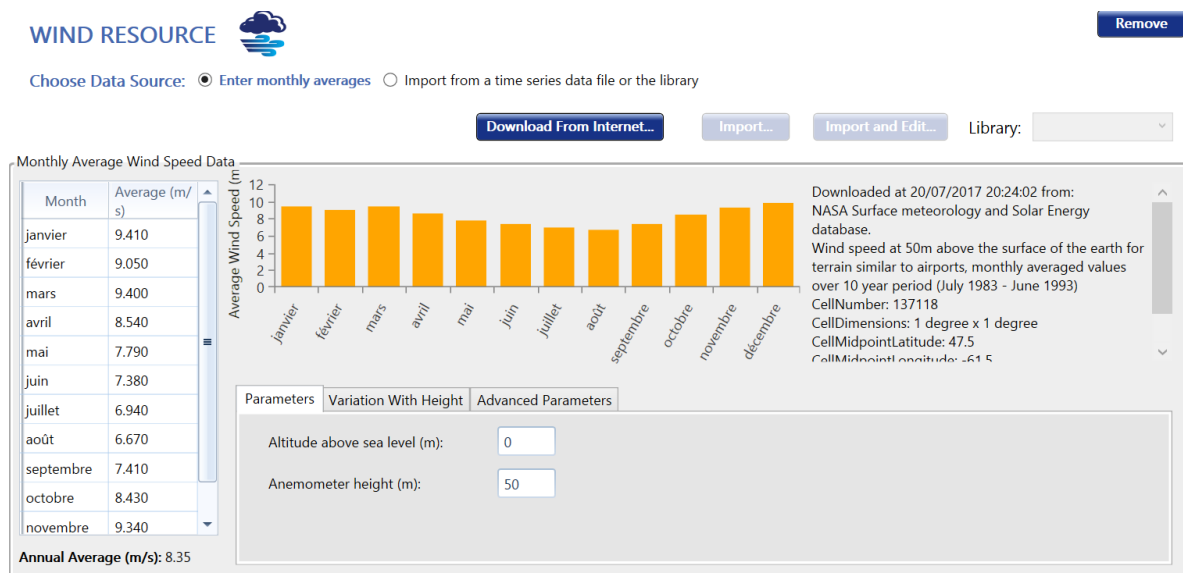


Figure 12: Profil de la vitesse moyenne de vent de la maison aux îles de la madeleine

La figure 11 permet d'extraire les informations pertinentes suivantes :

- La vitesse moyenne annuelle du vent est de 8,35 m/s.
- La vitesse moyenne mensuelle minimale est 6,67 m/s. Elle se produit au mois d'août, correspondant au mois de la crête de puissance.
- Le mois de décembre est le mois le plus venteux avec une vitesse moyenne mensuelle maximale de 9,79m/s.

Nous pouvons aussi dire qu'il y a trois périodes de variation de la vitesse du vent :

- La période 1' :

Elle correspond aux mois les plus venteux, qui sont : novembre, décembre, janvier, février et mars $V_{m1} = 9,49$ m/s

- La période 2' :

Elle correspond aux mois les moyennement venteux, qui sont avril et octobre avec $V_{m2} = 8,48$ m/s

- La période 3' :

Elle correspond aux mois les moins venteux de l'année, qui sont : mai, juin, juillet, août et septembre. $V_{m3} = 7,24$ m/s

Les informations ci hautes démontrent que l'endroit étudié présente un potentiel de vent intéressant est donc il est propice à l'installation des éoliennes. De plus, l'endroit est plutôt dégagé avec moins d'obstacle.

Étant donné que la hauteur d'une éolienne domestique est environ 20m, que la vitesse de vent est mesurée à 50m et que la vitesse de vent varie en fonction de la hauteur, nous vérifierons, donc, le potentiel de vent pour cette éolienne. En effet selon la Figure 13, pour une hauteur de 20 m, la vitesse de vent moyenne annuelle est de 7,8 m/s, ce qui est supérieur à 4 m/s. Donc un potentiel de vent toujours intéressant.

- **Détermination de la taille de l'éolienne**

Pour répondre à toute la charge de l'éolienne, la puissance de celle-ci doit pouvoir répondre à la crête de consommation à savoir 2,52 kW.

Ainsi, nous aurons besoin en théorie d'une éolienne de puissance de 3kW. Sauf que selon le graphe de puissance de l'éolienne de 3kW (voir Figure 12), l'éolienne ne délivre 3kW que lorsqu'elle atteint sa vitesse nominale. Une éolienne de 3kW ne serait pas suffisante pour répondre à notre puissance de crête, elle délivre plutôt environ 1kW. En analysant la courbe de puissance de l'éolienne (Figure 12 et Figure 13) et du graphe de variation de la vitesse moyenne de vent en fonction de la hauteur, nous estimerons qu'il faut prévoir soit : 3 éoliennes de 3kW ou une éolienne de 10 kW.

Et puisque nous nous intéressons aux systèmes hybrides, nous réaliserons les simulations avec une, 2, 3 éoliennes génériques de 3 kW et 1 éolienne générique de 10 kW. Le manque d'énergie sera supporté par les autres systèmes énergétique les PV , le générateur ou les dispositifs de stockage.

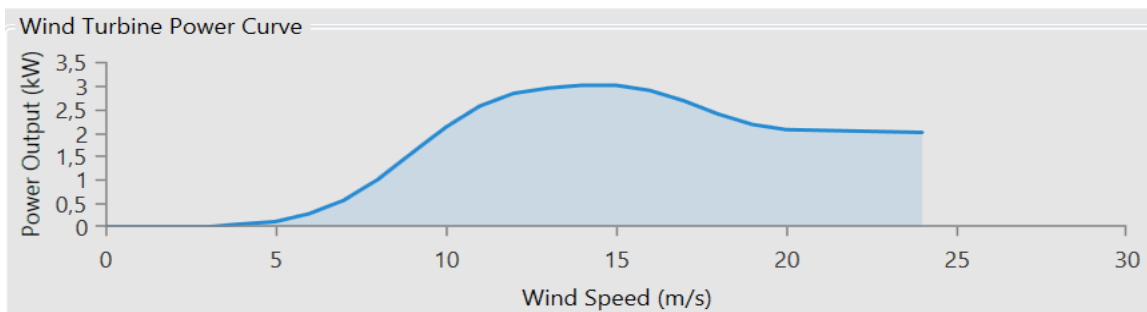


Figure 13: La courbe de puissance d'une éolienne de 3kW

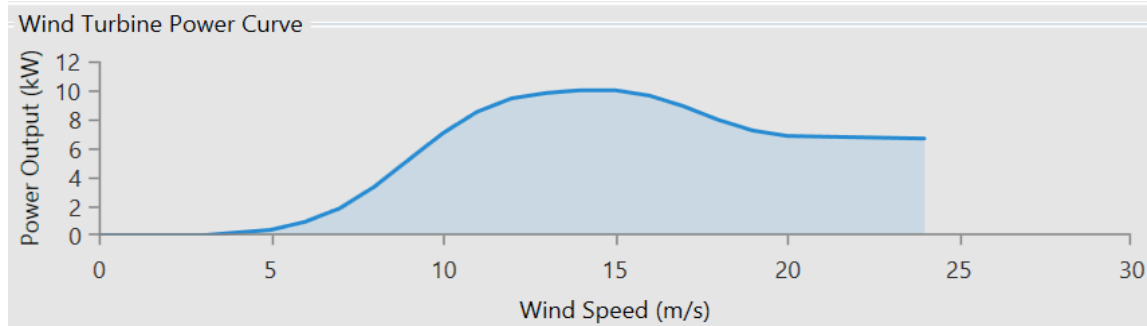


Figure 14: La courbe de puissance d'une éolienne de 10kW

4.3.8 Choix des accumulateurs (batteries)

Pour choisir sa batterie, il faut considérer :

- La décharge maximale de la batterie;
- Le besoin en stockage, celui-ci dépend de l'autonomie de la batterie. Dans notre cas, en recherchera une autonomie de 3j;
- La capacité de la batterie;
- La tension de stockage.

- **Pour une autonomie de batterie de 3j :**

L'autonomie de l'accumulateur se calcul par la formule suivante :

$$\text{Autonomie accumulateur} = \text{charge totale journalière} * \text{nombre de jour} * (1 + \text{déperdition de la charge})$$

Avec :

La déperdition de charge est généralement comprise entre 15% et 30%.

Nous considérerons une déperdition de 20%.

$$\text{Ainsi l'autonomie de l'accumulateur} = 6,87 \text{ kWh/j} * 3j * (1 + 20\%)$$

$$= 24,73\text{kWh} \approx 25\text{kWh}$$

▪ **La capacité de l'accumulateur:**

Il est recommandé de ne pas décharger l'accumulateur au-delà de la profondeur maximale de sa décharge. Elle est déterminée par le constructeur, et il faut en tenir en compte lors du choix de l'accumulateur. Le calcul de la capacité de stockage s'effectue selon les formules suivantes :

Capacité de stockage (kWh) = Autonomie de l'accumulateur (kWh) / la profondeur maximale de sa décharge

Capacité de stockage (Ah) = la capacité de stockage (Wh) / tension de l'accumulateur

N.B : Nous considérons que la profondeur maximale de la décharge de l'accumulateur est de 50%

Ainsi

La capacité de stockage (kWh) = 25 kWh / 50% = 50 kWh

La capacité de stockage (Ah) = (50000 (Wh) / 12) = 4167 Ah

A savoir, le branchement en parallèle de batterie permet de garder la même tension en sommant les capacités. Alors qu'un montage en série des batteries garde la même capacité et fait une sommation des tensions de stockage.

Dans les simulations sur Homer Energy nous avons choisi pour le stockage une batterie générique de 1kWh de 12V. Selon le système, Homer Energy pro, optimise lors des simulations et détermine le nombre de batterie pour chaque système.

4.3.9 Choix de l'onduleur :

Pour convertir la tension en courant continu à une tension à courant alternatif, nous devons utiliser un onduleur. Ce dispositif permet de pallier aux coupures de courant, de stabiliser la tension électrique et d'éliminer les parasites électriques.

Le logiciel permet de lui-même de définir la puissance de l'onduleur dont on aura besoin. Dans notre cas, c'est le logiciel qui effectuera les calculs selon les valeurs optimales, en général la puissance des onduleurs, dans notre cas d'étude est comprise entre 1 et 3 kW.

4.3.10 Spécifications économiques, le système de contrôle, les émissions et les contraintes du projet.

Ces spécifications ne sont pas obligatoires pour effectuer la simulation, mais ils permettent de filtrer ou d'ajouter des précisions sur les solutions réalisables selon des paramètres déterminés.

Etant données que nous présentons seulement un cas didactique nous avons seulement spécifié les données économiques. Pour tous les autres paramètres, nous avons conservé les paramètres par défaut du logiciel. Cependant, pour un cas réel, il serait plus intéressant d'entrer le maximum d'information disponible pour avoir une analyse plus précise.

4.3.11 Analyser les résultats de la simulation

Il s'agit d'analyser les coûts du flux de trésorerie, de la consommation et de la production de l'électricité du système, des émissions, des détails d'opération pour chaque composant, du carburant, du stockage, du réseau de chaque système simulé. Les différentes analyses se font en se basant sur les différents rapports, tables et graphes que Homer met à la disposition de l'utilisateur.

4.3.12 Analyser les résultats de l'optimisation et filtre des solutions

Après la simulation et l'optimisation, Homer Energy génère plusieurs systèmes techniquement faisables. Cependant nous conserverons pour ce qui suivra que les systèmes qui répondent aux critères suivants :

- Les systèmes dont le coût actuel net ne dépasse pas le triple du coût actuel net minimale de tous les systèmes simulés, et qui de l'ordre de 24000\$ (le champ NPC $\leq 3 * 24000$)
- Les systèmes qui répondent totalement à la charge (le champ unmet load = 0)
- Les systèmes ne représentant pas une instabilité.
- Les systèmes doivent contenir des composants d'énergies renouvelables (Champs Renewable fraction $\neq 0$)

Après les simulations et le tri nous conservons les systèmes énergétiques renouvelables suivants :

- Solution 1 : PV,G,S
Cette solution comporte des panneaux photovoltaïques de 1Kw, un Générateur diesel de 2,8Kw, 7 batteries de 1 kWh et un convertisseur de puissance 0,898 kW
- Solution 2 :E3,G,S
Cette solution comporte une éolienne de puissance 3Kw, un générateur diesel de puissance 2,8 kW, 5 batteries de 1 kWh et un convertisseur de puissance 1,11 kW.
- Solution 3 : PV,E3,G,S
Cette solution comporte des panneaux photovoltaïque de puissance 1kW, une éolienne de 3Kw, un générateur diesel de 2,8 Kw, 5 batteries de 1 kWh et un convertisseur de puissance 1,11kW.
- Solution 4 : E10,G,S
Cette solution comporte une éolienne 10Kw, un générateur diesel de 2,8 kW, 4 batteries de 1 kWh et un convertisseur de 0,992 kW

Dans Homer Energy nous avons aussi choisi de visualiser les critères quantitatifs qui nous intéressent et que nous injecterons dans la matrice multicritère ultérieurement. (voir le tableau 11).

Tableau 11: Résultat de la simulation sur Homer Energy et évaluation des critères pour le cas de la maison partielle aux îles de la Madeleine

Architecture										Cost					System				Gen	
⚠	⬆	⬆	⬆	⬆	PV (kW)	G10	G3	Gen (kW)	1kWh LA	Converter (kW)	NPC (\$)	Operating (\$)	Initial capit: (\$)	Fuel cost (\$)	O&M (\$)	Ren. Frac (%)	Excess Elec (kWh/yr)	Unmet l (kWh)	CO ₂ (kg/yr)	Hours
					1,00			2,80	7	0,898	24 005 \$	1 255 \$	6 769 \$	652,10 \$	173,74 \$	26,6	113	0	1 707	1 116
						1		2,80	5	1,11	32 261 \$	803,17 \$	21 234 \$	173,55 \$	264,69 \$	83,6	6 365	0	454	413
					1,00	1		2,80	5	1,11	34 082 \$	717,31 \$	24 234 \$	122,34 \$	264,19 \$	88,4	7 500	0	320	288
						1		2,80	4	0,992	70 391 \$	1 274 \$	52 898 \$	98,20 \$	559,40 \$	90,6	28 991	0	257	231

4.4 APPLICATION DE LA MATRICE MULTICRITERE SUR PROMETHEE- GAIA

Suite à la génération des solutions réalisables sur Homer, nous entamerons l'étude multicritère sur le logiciel PROMETHEE GAIA

4.4.1 Les actions

Les actions sont les systèmes énergétiques renouvelables faisant l'objet de l'étude d'aide à la décision. Ce sont les solutions générées par Homer Energy à savoir :

- PV, G, S
- E3, G, S
- PV, E3, G, S
- E10, G, S

4.4.2 Les critères

Pour illustrer, la partie multicritère nous avons choisi les critères techniques, économiques, environnementaux et sociaux, que nous définissons comme suit :

Rappel : Le choix des critères dépend des parties prenantes impliquées, de la taille du système et de l'objectif de l'étude.

- **Les critères techniques**

- **La complexité du système**

La complexité du système fait référence à la difficulté au niveau d'installation et de l'exploitation. Ceci dépend aussi du nombre des composants du système. Par exemple, le système qui comporte un PV, une éolienne est plus complexe qu'un système comprenant qu'un PV. Ce critère est un critère négatif qu'il faut minimiser. C'est un critère qualitatif, qui sera évalué sur une échelle de 3 échelons. Le tableau 12 explique l'échelle de ce critère.

Tableau 12: Explication de l'échelle pour le critère : complexité du système

Échelon	Intitulé	Explications
1	Élevé	Système compliqué, incluant plusieurs sources d'énergie ou incluant une grande éolienne. Il est difficile à installer et à exploiter.
2	Moyen	Système moyennement compliqué, incluant des éoliennes de petites tailles.
3	Faible	Système peu compliqué, ne comportant pas d'éolienne.

- **Fraction de l'énergie du renouvelable en (%)**

La fraction de l'énergie du renouvelable est la proportion de l'énergie produite par les composants d'énergies renouvelables du système sur la production totale du système. Elle est exprimée en %. Plus cette proportion est grande plus l'indépendance des énergies conventionnelles est grande aussi. C'est un critère quantitatif positif, à maximiser. Ses valeurs seront extraites directement du résultat de la simulation de Homer Energy (champ Ren Frac).

- Excès de production d'énergie

Un excès de production d'énergie est l'énergie supplémentaire produite annuellement après avoir répondu à la charge en tout moment de l'année. Elle peut être revendue si le système est branché à un réseau. Il est exprimé en kWh/an. Autant que particulier, il serait intéressant de considérer ce critère. C'est un critère quantitatif, positif à maximiser. Il sera extrait directement du résultat de la simulation sur Homer Energy (champ : Excess Elect)

- Taille du système

La taille du système est aussi un critère important à prendre en considération. Il est surtout rattaché à l'encombrement. Plus le système est grand, plus il faut disposer d'un grand endroit pour son installation. Exemple, plus le nombre de batterie est grand, plus il faut prévoir un abri plus grand pour le stockage. De même pour les éoliennes, elles sont plus grandes que les systèmes PV et elles ont besoin d'un grand espace pour leur installation et exploitation. La taille du système est un critère à minimiser. C'est un critère qualitatif s'évaluant sur une échelle de 3. L'explication de cette échelle est présentée dans le tableau suivant :

Tableau 13: Explication de l'échelle pour le critère : complexité du système

Échelon	Intitulé	Explications
1	Grand	Un grand système est un système possédant de gros composants ou nécessitant un grand endroit pour l'installation et l'exploitation du système.
2	Moyen	Un système moyen possédant plusieurs petit composants nécessitant un espace modéré pour son installation et son exploitation.
3	Petit	Un petit système est un système possédant de composants de petites tailles et ne nécessitant qu'un petit endroit pour son installation et son exploitation.

- **Les critères économiques :**

Dans notre cas, les critères économiques ont été tous extraits de Homer Energy.

- Coût actuel Net

Le coût actuel net total d'un système est la valeur actualisée de tous les coûts encourus par le système au cours de sa durée de vie moins la valeur actuelle de tous les revenus qu'il génère au cours de sa durée de vie. C'est un critère négatif à minimiser. Il est extrait de la table de simulation de Homer Energy (champ NPC)

- Coût totale de maintenance : de remplacement, d'exploitation et de maintenance et du combustible.

Le coût de maintenance est l'ensemble des coûts de remplacement, d'opération et de maintenance de tous les composants et du combustible. Il s'agit de sommer les différents coûts présentés par Homer Energy avant de les introduire sur Visual PROMETHEE-GAIA. Ce critère est un critère quantitatif, négatif à minimiser. Le tableau suivant représente les coûts extraits de Homer Energy

Tableau 14: Le coût de remplacement, d'O&M, de combustible de chaque système retenu

Les systèmes	Coût de remplacement (\$)	Coût d'O&M (\$)	Coût du carburant (\$)	Total des coûts de maintenance (\$)
PV, G, S	6299,52	2385,44	8953,10	17638,06
E3, G, S	8988,30	3634,11	2382,72	15005,13
PV, E3, G, S	8796,25	3627,25	1679,72	14103,22
E10, G, S	19253,88	7680,39	1348,21	28282,48

- Capital d'investissement (\$)

C'est le coût total d'installation du système investi au début du projet. Ce coût est un critère négatif à minimiser, nous utiliserons le champ initial capital de la table de simulation de Homer Energy.

- Période de retour d'investissement

En prenant pour référence le système avec un générateur Diesel, nous obtenons dans le résultat de simulation d'HOMER la valeur de récupération de chaque système simulé. Le champ (simple payback), nous indique le nombre d'années nécessaire pour récupérer le montant investi au début du projet. En effet, il indique combien d'années il faut pour récupérer un investissement. Il est exprimé en nombre d'année, sans unité. C'est un critère négatif à minimiser.

▪ Les critères environnementaux

- Emissions nuisibles :

Les émissions nuisibles sont des particules nocives émet dans l'air par le système et qui impactent l'environnement et la santé publique. Nous en citons le dioxyde du carbone, les hydrocarbures non brûlés, le dioxyde de soufre, l'oxyde d'azote et autres. Toutefois, nous analyserons uniquement les émissions du CO₂, puisque le taux des autres émissions est très faible par rapport à celui-ci. Ce critère est un critère quantitatif, et il sera extrait des résultats de la simulation d'Homer, champ CO₂. C'est un critère négatif, à minimiser.

- Impact sur la faune et la flore

Sur ce critère, les systèmes avec des PV sont les systèmes les plus appréciés. Tandis que les éoliennes peuvent tuer certaines d'espèces animales notamment les oiseaux et/ou perturber leurs cycles de vie (nidification, alimentation, reproduction...). D'autres impacts sur la flore sont aussi à considérer, étant donné que certains systèmes peuvent engendrer un

déboisement de plantes lors de leur implantation. C'est un critère qualitatif, négatif à minimiser. Il est évalué selon une échelle de 3 défini comme suit :

Tableau 15: Explication de l'échelle pour le critère : impact faune et flore

Échelon	Intitulé	Explications
1	Élevé	Impact est élevé sur la faune et la flore lorsqu'il y a existence de grande éolienne.
2	Moyen	Impact est élevé sur la faune et la flore lorsqu'il y a présence dans le système de petite éolienne.
3	Faible	Impact est faible lorsque le système ne représente pas de danger pour la faune et la flore.

- Nuisance visuelle et/ou auditive

Avec ce critère nous analyserons l'aspect du confort visuel des différents systèmes ainsi que le bruit produit par ceux-ci. En effet la présence d'éolienne dans un système augmente sa nuisance visuelle et auditive. Tandis que les PV ne produisent aucun son et sont plus esthétique. C'est un critère qualitatif, négatif à minimiser. Il est évalué suivant une échelle de 3 présentée comme suit :

Tableau 16: Explication de l'échelle pour le critère : nuisance visuelle et/ou auditive

Échelon	Intitulé	Explications
1	Très élevé	Lorsque les sources d'énergie du système sont une grande éolienne et/ ou un générateur.
2	Élevé	Lorsque les sources d'énergie du système sont une petite éolienne et/ ou un générateur.

3	Moyen	Lorsque les sources d'énergie du système ne comportent pas d'éoliennes et le fonctionnement du générateur dépasse 500 h.
4	Faible	Lorsque les sources d'énergie du système ne comportent pas d'éoliennes et le fonctionnement du générateur ne dépasse pas 500 h.
5	Pas du tout	Lorsque le système ne comporte ni d'éolienne, ni de générateur.

▪ **Sociale**

- Acceptabilité du voisinage

Sur le plan social, il est important d'avoir l'acceptabilité du voisinage pour implanter un SER. Surtout si le système impact sur la vue, émet du bruit ou présentant un danger public. La non acceptabilité du voisinage peut engendrer la non réalisation du projet. C'est un critère qualitatif, positif à maximiser. Plus l'acceptabilité du voisinage d'un système est grande, plus le système serait intéressant.

Tableau 17: Explication de l'échelle pour le critère : acceptabilité du voisinage

Échelon	Intitulé	Explications
1	Faible	Présence de grande éolienne dans le système
2	Moyen	Pas de présence de grande éolienne et fonctionnement du générateur plus de 500h
3	Forte	Pas de présence de grande éolienne et/ou fonctionnement du générateur moins de 500h

- Sécurité sociale

Ce critère fait référence aux accidents envers l'humain, qui peuvent être causés par un système donné. Les PV seuls ne présentent aucun danger public, contrairement aux éoliennes

qui peuvent causer de graves dégâts si une pôle ou le mât se brisent. C'est un critère qualitatif, positif à maximiser. Il est évalué sur une échelle de 2, définie comme suit :

Tableau 18: Explication de l'échelle pour le critère : sécurité sociale

Échelon	Intitulé	Explications
1	Oui	Ne présentant aucun danger public
2	Faible	Présentant un danger public

- Sécurité anti-vol du système

Ce système est important pour les petits systèmes installés dans les sites isolés ou le risque du vol du matériel est présent. En effet les PV sont plus faciles à voler alors que pour le vol d'une éolienne cela prend plus de temps et plus d'équipement. C'est un critère qualitatif, positif à maximiser. Il est évalué selon une échelle de 3 définie comme suit :

Tableau 19: Explication de l'échelle pour le critère : sécurité anti-vol

Échelon	Intitulé	Explications
1	Forte	Système difficile à voler
2	Moyen	Système pas facile à voler, mais possibilité de voler certains de ses composants
3	Faible	Système très facile à voler, ou à voler certains de ses composants

4.4.3 La hiérarchisation des critères

Nous avons regroupé les critères précédemment cités suivant 4 familles :

- Les critères techniques C1 :
 - Complexité du système C11

- Fraction de l'énergie renouvelable C12
- Excès de production d'énergie C13
- Taille du système C14
- Les critères économiques
 - Coût actuel Net C21
 - Coût de maintenance totale C22
 - Capital d'investissement C23
 - Retour d'investissement C24
- Les critères environnementaux C3
 - Emissions nuisible C31
 - Impact sur la faune et la flore C32
 - Nuisance audio/visuelle C33
- Les critères sociaux C4
 - Acceptabilité du voisinage C41
 - Sécurité sociale C42
 - Sécurité anti-vol C43

4.4.4 La modélisation des préférences

Le tableau suivant présente les caractéristiques et les préférences sur chacun des critères utilisés pour notre cas d'études.

Tableau 20: La modélisation des préférences sur les critères, cas maison partielles aux les îles de la madeleine

Poids égaux	Compléxité...	Fraction ER	Exces Elec	Taille_Sys	CPN	Coût total m...	Capital_Invest	Retour_Invest	Emission_nui...	Impact faun...	Nuisance Au...	Accepta_Voisin	Sécurité sociale	Anti-vol	
Unité	Qualitatif	%	kWh/an	Qualitatif		\$	\$	\$	Année	Kg/an	Qualitatif	Qualitatif	Qualitatif	Qualitatif	Échelle 3
Cluster/Groupe	♦	♦	♦	♦	●	●	●	●	■	■	■	◆	◆	◆	
Préférences															
Min/Max	min	max	max	min	min	min	min	min	min	min	min	max	max	max	
Poids	8,33	8,33	4,17	4,17	6,25	6,25	6,25	6,25	8,33	8,33	8,33	8,33	8,33	8,33	
Fn. de préférence	Usuel	Linéaire	Linéaire	Usuel	Linéaire	Linéaire	Linéaire	Linéaire	Linéaire	Usuel	Usuel	Usuel	Usuel	Usuel	
Seuils	absolu	absolu	absolu	absolu	absolu	absolu	absolu	absolu	absolu	absolu	absolu	absolu	absolu	absolu	
-Q: Indifférence	n/d	5,00	500,00	n/d	\$ 2.000,00	\$ 1.000,00	\$ 1.000,00	1,00	100,00	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	
-P: Préférence	n/d	10,00	1500,00	n/d	\$ 10.000,00	\$ 10.000,00	\$ 10.000,00	2,00	300,00	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	
-S: Gaussien	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	
Statistiques															
Minimum	1,00	26,60	113,00	1,00	\$ 24.005,00	\$ 14.103,22	\$ 6.769,00	1,50	257,00	1,00	3,00	1,00	0,00	1,00	
Maximum	3,00	90,60	28991,00	3,00	\$ 70.391,00	\$ 28.282,48	\$ 52.898,00	13,00	1707,00	3,00	5,00	3,00	1,00	3,00	
Moyenne	2,25	72,30	10742,25	2,25	\$ 40.184,75	\$ 18.757,22	\$ 26.283,75	6,25	684,50	2,00	4,00	2,25	0,25	2,25	
Ecart-type	0,83	26,51	10904,93	0,83	\$ 17.848,19	\$ 5.650,69	\$ 16.724,57	4,19	594,61	0,71	0,71	0,83	0,43	0,83	

4.4.5L'évaluation de chaque alternatif par chaque critère

Pour chaque critère précédemment cité nous avons évalué nos quatre alternatives. Nous distinguons deux types d'évaluation : qualitatif et quantitatif.

Tableau 21: Nature des critères et leurs méthodes d'évaluations

Critères	Nature des critères	Méthode d'évaluation
<ul style="list-style-type: none"> Complexité du système C11 Taille du système C14 Impact sur la faune et la flore C32 Nuisance audio/visuelle C33 Acceptabilité du voisinage C41 Sécurité sociale C42 Sécurité anti-vol C43 	Qualitatif	Evalués par des experts en matière selon les échelles définis
<ul style="list-style-type: none"> Fraction de l'énergie renouvelable C12 Excès de production d'énergie 	Quantitatif	Extraits ou calculés selon les résultats de simulation de Homer Energy

<p>C13</p> <ul style="list-style-type: none"> • Coût actuel Net C21 • Coût de maintenance totale C22 • Capital d'investissement C23 • Retour d'investissement C24 • Emissions nuisible C31 		
---	--	--

Le tableau suivant présente l'évaluation des actions par chaque critère.

Tableau 22: Évaluation des actions par chaque critère, cas de la maison partielle aux îles de la madeleine

Poids égaux	Complexité_...	Fraction ER	Exces Elec	Taille_Sys	CPN	Coût total m...	Capital_Invest	Retour_Invest	Emission_nui...	Impact faun...	Nuisance Au...	Accepta_Voisin	Sécurité sociale	Anti-vol	
Unité	Qualitatif	%	kWh/an	Qualitatif		\$	\$	\$	Année	Kg/an	Qualitatif	Qualitatif	Qualitatif	Qualitatif	Échelle 3
Cluster/Groupe	♦	♦	♦	♦	●	●	●	●	■	■	■	◆	◆	◆	
Evaluations															
PV, G, S	●	Faible	26,60	113,00	Petit	\$ 24.005,00	\$ 17.638,06	\$ 6.769,00	1,50	1707,00	Faible	Moyen	Moyen	non	Faible
E3, G, S	■	Moyen	83,60	6365,00	Moyen	\$ 32.261,00	\$ 15.005,13	\$ 21.234,00	5,00	454,00	Moyen	Élevé	Élevé	oui	Élevé
PV, E3, G, S	◆	Élevé	88,40	7500,00	Grand	\$ 34.082,00	\$ 14.103,22	\$ 24.234,00	5,50	320,00	Moyen	Élevé	Élevé	oui	Moyen
E10, G, S	■	Élevé	90,60	28991,00	Grand	\$ 70.391,00	\$ 28.282,48	\$ 52.898,00	13,00	257,00	Élevé	Très élevé	Faible	oui	Élevé

4.4.6 Les scénarios

Dans notre cas didactique nous avons choisis d'illustrer 4 scénarios :

- **Scénario 1 : Poids égaux**

Chaque famille de critère compte pour 25% du poids global. Lors de ce scénarios, il n'y a aucune préférence de famille de critère ou critère par rapport aux autres critères.





	Nom	Mode: %			Lock	Hierarchical Weight
+ -	aucun(e)	-	0,0%	+	<input type="checkbox"/>	0%
+ -	Technique	-	25,0%	+	<input type="checkbox"/>	 25%
+ -	Economique	-	25,0%	+	<input type="checkbox"/>	 25%
+ -	Environnementaux	-	25,0%	+	<input type="checkbox"/>	 25%
+ -	Sociaux	-	25,0%	+	<input type="checkbox"/>	 25%

Figure 15: Pondération des critères pour des poids égaux

▪ **Scénario 2 : les propriétaires**

Ce scénario illustre les préférences des propriétaires. Ces derniers, s'intéressent surtout à l'aspect technique de la solution et à l'aspect économique. Le tableau ci-dessous montre la répartition des poids des critères dans ce scénario.





	Nom	Mode: %			Lock	Hierarchical Weight
+ -	aucun(e)	-	0,0%	+	<input type="checkbox"/>	0%
+ -	Technique	-	35,0%	+	<input type="checkbox"/>	 35%
+ -	Economique	-	35,0%	+	<input type="checkbox"/>	 35%
+ -	Environnementaux	-	15,0%	+	<input type="checkbox"/>	 15%
+ -	Sociaux	-	15,0%	+	<input type="checkbox"/>	 15%

Figure 16: Pondération des critères par les propriétaires

▪ **Scénario 3 : le voisinage**

Ce scénario représente la vision du voisinage. Ceux-là s'intéresse surtout aux critères environnementaux et sociaux, et ce au profil des critères techniques et économiques.

	Nom	Mode: %			Lock	Hierarchical Weight
+ —	aucun(e)	-	0,0%	+	<input type="checkbox"/>	0%
+ —	Technique Noms	-	13,0%	+	<input type="checkbox"/>	<div style="width: 13%; background-color: red;"></div> 13%
+ —	Economique	-	12,0%	+	<input type="checkbox"/>	<div style="width: 12%; background-color: yellow;"></div> 12%
+ —	Environnementaux	-	40,0%	+	<input type="checkbox"/>	<div style="width: 40%; background-color: green;"></div> 40%
+ —	Sociaux	-	35,0%	+	<input type="checkbox"/>	<div style="width: 35%; background-color: gray;"></div> 35%

Figure 17: Pondération des critères par le voisinage

- **Scénario 4 : les environnementalistes**

Ce Scénario interprète les préférence des environnementalistes. Ces derniers se préoccupe des critères environnementaux au profil des autres critères.

	Nom	Mode: %			Lock	Hierarchical Weight
+ —	aucun(e)	-	0,0%	+	<input type="checkbox"/>	0%
+ —	Technique	-	10,4%	+	<input type="checkbox"/>	<div style="width: 10%; background-color: red;"></div> 10%
+ —	Economique	-	9,6%	+	<input type="checkbox"/>	<div style="width: 10%; background-color: yellow;"></div> 10%
+ —	Environnementaux	-	66,0%	+	<input type="checkbox"/>	<div style="width: 66%; background-color: green;"></div> 66%
+ —	Sociaux	-	14,0%	+	<input type="checkbox"/>	<div style="width: 14%; background-color: gray;"></div> 14%

Figure 18: Pondération des critères par les environnementalistes

4.5 ANALYSE DES RESULTATS

4.5.1 Scénario 1 : Poids égaux

4.5.1.1 Classement PROMETHEE

- **Classement partiel et complet**

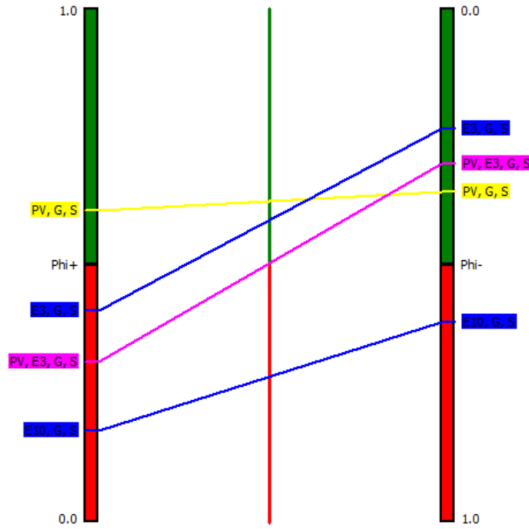


Figure 19: Classement partiel PROMETHEE I pour le scénario 1

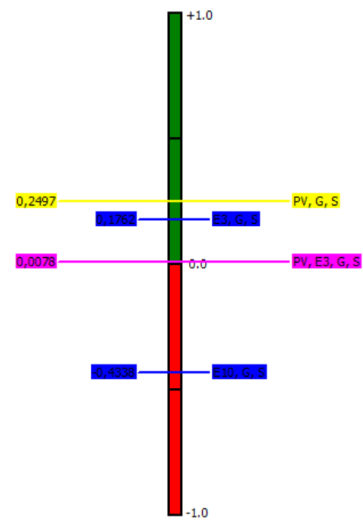


Figure 20: Classement complet PROMETHEE II pour le scénario 1

Le classement partiel PROMETHEE I (figure 18) démontre que :

- La solution PV,G,S est une action totalement préférable par rapport à E10,G,S.
- La solution E3,G,S est totalement préférable par rapport à la solution PV,E3,G,S et la solution E10,G,S.
- La solution PV,G,S est incomparable par rapport aux actions E3,G,S et PV,E3,G,S. En effet, bien que son flux sortant Phi+ est positif, son Phi- est négatif. Ce dernier est inférieur par rapport aux autres actions.
- La solution E3,G,S et la solution PV,E3,G,S sont des solutions plutôt proches ayant toutes les deux un Phi+ négatif et un Phi- négatif positif.

Le classement partiel de PROMETHEE I peut être complété par l'analyse du graphe PROMETHEE II (figure 19). Ce dernier mesure la Phi net des flux de chaque action. Selon le graphe de la figure ci haut, nous constatons :

- la solution PV,G,S est la solution ayant le score Phi le plus élevé suivi par E3,G,S. Les deux solutions ont une valeur de Phi, en absolu, très proche, ce qui appelle à une analyse approfondie des deux solutions.
- La solution PV,E3,G,S est une solution ayant un flux presque nul, ce qui amène à la considérer comme une solution moyenne.
- La solution E10,G,S est la seule solution ayant un Phi négatif, elle est donc en bas de classement. C'est la solution la moins intéressante par rapport aux précédentes. .

Bien que le classement avec PROMETHEE II est facile à interpréter, il n'exprime pas du tout les incomparabilités entre les solutions.

▪ **Diamant-PROMETHEE**

Le graphe du diamant-PROMETHEE est une représentation bidimensionnelle alternative des deux classements PROMETHEE I et II. Le carré correspond au plan (Phi +, Phi-) où chaque action est représentée par un point.

La figure ci-dessous permet de reconstater, les mêmes conclusions faites dans le classement de PROMETHEE I et PROMETHEE II à la fois.

- Le chevauchement de la solution PV,G,S avec E3,G,S et PV,E3,G,S indique l'incomparabilité entre ces solutions.
- Une préférence totale est illustrée compte tenu respectivement de l'action PV,G,S avec E10,G,S et E3,G,S avec PV,E3,G,S et E10,G,S.
- La solution E10, G, S est d'autant désavantagée sur le flux sortant que sur le flux entrant.
- La solution PV,G,S et la solution E3,G,S sont toutes les deux préférables par rapport aux autres solutions.

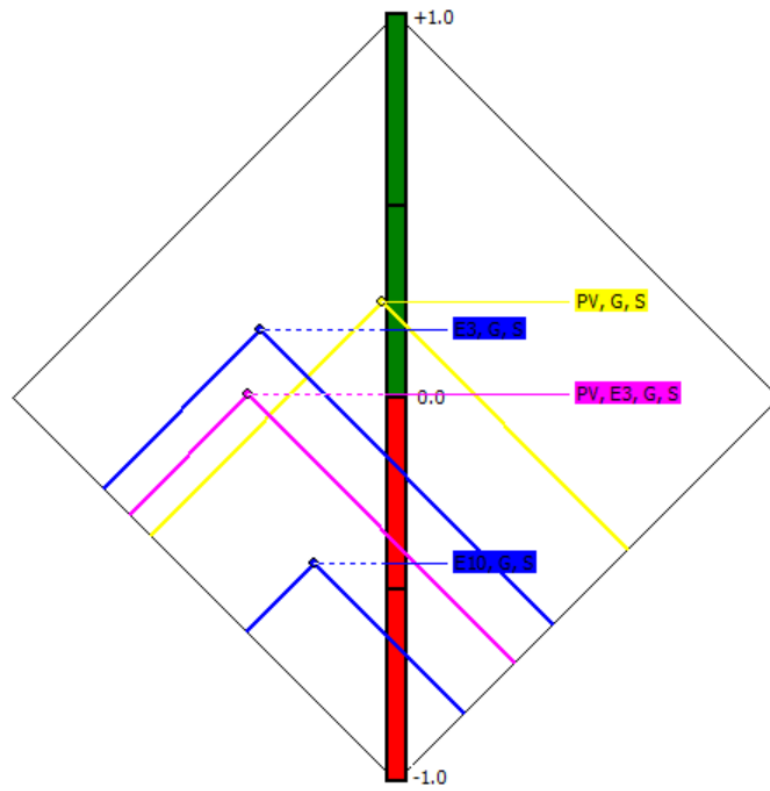


Figure 21: Diamant-PROMETHEE pour le scénario 1

▪ **Grphe PROMETHEE**

De façon simple et lucide, le graphe PROMETHEE permet de visualiser facilement, l'incomparabilité et la préférence totale entre les solutions ainsi que le rapprochement des solutions entre elles.

- PV,G,S est incomparable par rapport à E3,G,S et PV,E3,G,S
- E3,G,S est préférée par rapport à PV,E3,G,S
- PV,G,S, E3,G,S et PV,E3,G,S sont totalement préférable par rapport à E10,G,S.

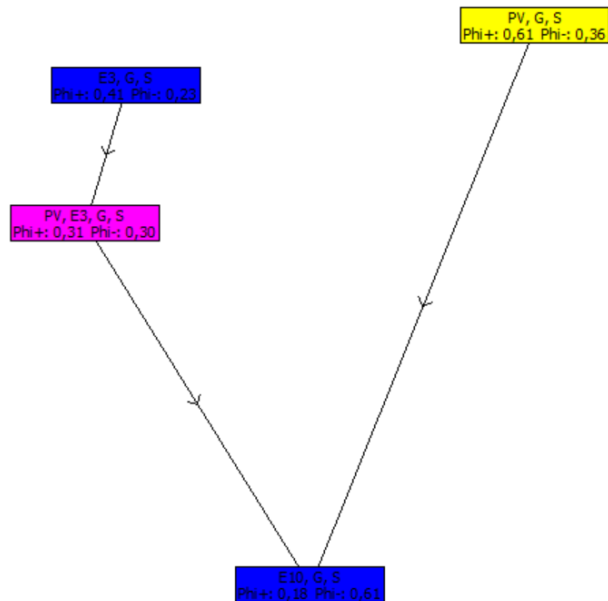


Figure 22: Graphe PROMETHEE pour le scénario 1

- **L'arc en ciel PROMETHEE**

En analysant le graphe arc en ciel de PROMETHEE, nous pourrions voir les composants des flux positif et négatif de chaque action.

Il paraît évident que l'action PV,G,S est la solution ayant le Phi+ le plus élevé. La solution est positive sur les critères économiques (coût de maintenance, capital d'investissement, retour d'investissement et CPN), la taille et la complexité du système et sur l'impact faune et flore ainsi que les nuisances auditives. Toutefois elle se classe en 2ème rang sur le flux entrant, le moins bon à la suite de E10,G,S. En effet, la solution est moins bonne sur l'acceptabilité du voisinage, excès de production, l'antivol, les émissions nuisibles et la fraction ER.

Les deux solutions PV,G,S et E10,G,S peuvent être considérées comme des solutions opposées puisque les avantages de l'une représentent les inconvénients de l'autre sauf pour le critère d'acceptabilité du voisinage. Car en vue de la taille de l'éolienne, le critère reste un inconvénient aussi pour la solution E10,G,S.

La solution E3,G,S, bien qu'elle ne soit pas la solution ayant le meilleur flux, mais elle est la solution ayant le moindre inconvénients, ses points faibles touchent légèrement les critères de l'excès de production (pareillement pour la solution PV,G,S) et la sécurité social. C'est une solution qui reste intéressante si l'on veut choisir une solution moyenne à moindre inconvénients.

La solution PV,E3,G,S est une solution qui a autant de points positifs que négatifs. Ces points positifs se situent au niveau de l'acceptabilité du voisinage, les émissions nuisibles réduites, la fraction ER, coût de maintenance et CPN, le retour sur investissement, impact faune et flore et la nuisance audio-visuel. Alors que ces inconvénients touchent au capital d'investissement, la sécurité sociale, l'anti-vol, la taille de système et la complexité du système.

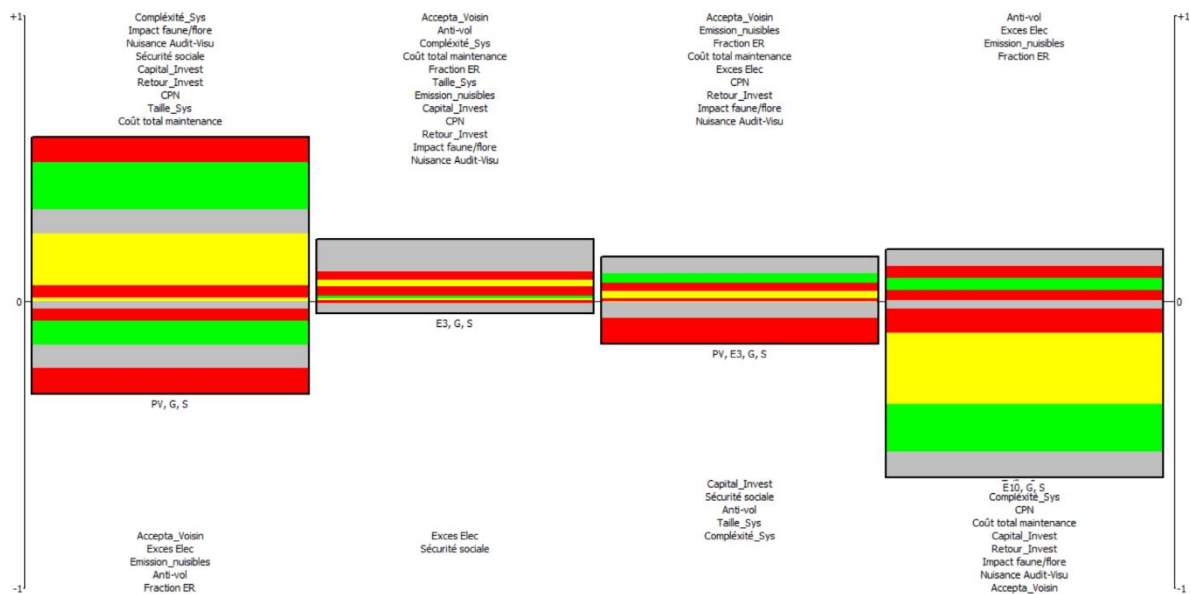


Figure 23 : Arc en ciel PROMETHEE pour le scénario 1

4.5.1.2 Analyse GAIA

Pour mieux analyser les similitudes des critères et des actions, nous avons analysé le graphe GAIA.

Selon la représentation graphique des critères sur GAIA (figure 23), il paraît que :

- En regardant la longueur de l'axe des critères, il paraît que les critères qui influencent le plus la décision sont : l'acceptabilité du voisinage, et le coût total de maintenance .
- Les critères CPN, capital d'investissement et les nuisances audio-visuelles vont dans la même direction sur le graphe, nous pouvons donc les considérer comme des critères parfaitement semblables. De même pour les émissions nuisibles et la fraction du renouvelable.
- La taille du système et la sécurité sociale sont proches, ce qui représente une similitude entre eux. Pareillement pour l'excès en production et la sécurité anti-vol.
- L'excès en production électrique est un critère qui s'oppose au capital d'investissement, CPN et aux émissions nuisibles. Pareillement, la taille du système s'oppose à la sécurité anti-vol _ plus le système est bon sur la taille moins il le serait sur la sécurité anti-vol.
- L'acceptabilité du voisinage et les coûts de maintenance sont des critères indépendants. (orthogonaux par rapport aux autres critères).

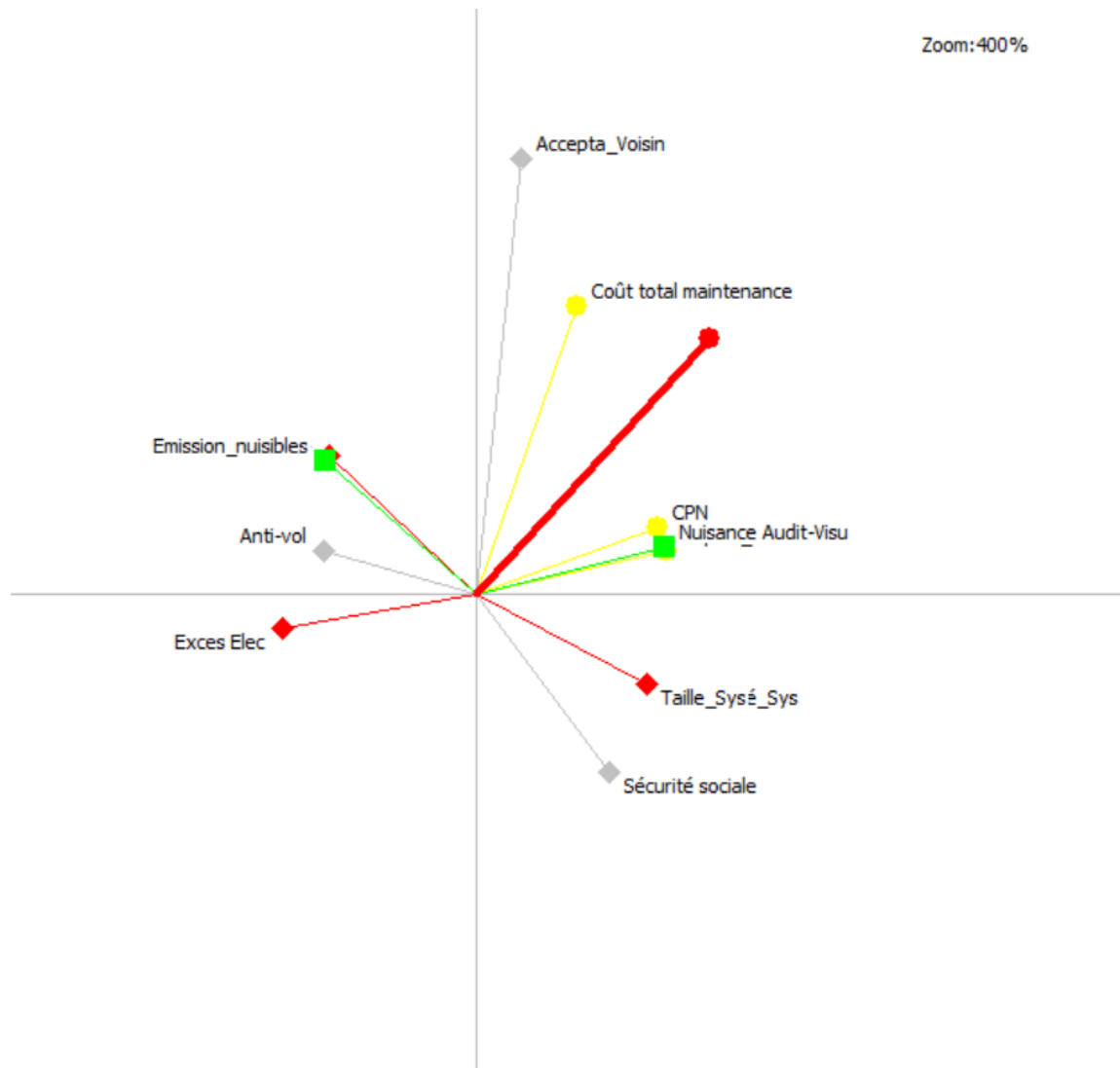


Figure 24: Représentation graphique des critères sur GAIA pour le scénario 1

Nous analyserons ensuite la position des actions sur GAIA, l'analyse de la figure 24 conclus que :

- En analysant la distribution des actions, nous remarquons que les deux solutions PV,E3, G,S et E3,G,S sont des solutions plutôt proches, présentant une certaines similitudes sur certains critères .

- L'action E3,G,S est l'action la plus proche par rapport à l'origine, elle correspond donc à la solution moyenne. Elle présente un bon compromis sur l'ensemble des critères.
- La solution PV,G,S est la meilleure solution tenant compte de la taille du système et la sécurité sociale. Et elle est la pire solution par rapport aux émissions nuisibles et à la sécurité anti-vol.
- La solution E3,G,S représente la meilleure solution par rapport à l'acceptation du voisinage. Elle est aussi bonne sur les coûts de maintenance.



Figure 25: Représentation des actions et des critères sur GAIA pour le scénario 1

Pour plus de précision sur l'influence des critères par rapport aux action nous avons analysé le profil de chaque action.

▪ **Analyse des profils d'action**

L'analyse de profil d'action permet de voir, de façon significative les critères positifs et négatifs de chaque action étudiée à part.

La figure 25 démontre que :

Pour la solution PV,G,S :

- En ce qui concerne les critères techniques, la solution PV,G,S est la meilleure solution compte tenu des critères : complexité du système et la taille du système et la pire solution suivant la fraction ER et excès en production électrique.
- Elle représente aussi une meilleure solution tenant compte des critères économiques. C'est la seule solution n'ayant aucun faible sur les quatre critères économiques.
- Du point de vue des critères environnementaux, la solution produisant le maximum d'émissions nuisibles. Mais elle est la meilleure solution sur les autres critères environnementaux à savoir l'impact faune et flore et nuisance audio-visuelle.
- En ce qui concerne les critères sociaux, c'est le système, le plus facile à voler mais le seul système, entre les quatre systèmes qui est bon au niveau de la sécurité sociale. Sur l'acceptabilité sociale, bien qu'il soit négatif sur ce critère il est moins pire que E10,G,S et PV,E3,G,S.

Pour la solution E3,G,S :

- Comme l'avoir mentionné précédemment, la solution ne représente pas d'avantages ou d'inconvénients marquants. C'est une solution moyenne, présentant 2 inconvénients moyens et 7 avantages moyens sur 14 critères.

- La solution est pareillement négative que PV,E3,G,S et E10,G,S sur le critère de sécurité sociale et ceux en raison de présence de l'éolienne dans le système.
- Bien que la solution présente un faible au niveau de l'excès de production, elle est moins pire que la solution PV,G,S.

Pour la solution PV,E3,G,S :

La solution PV,E3,G,S est aussi une solution qui ne s'avère pas la plus positive ou la plus pire sur un des critères.

- Sur les critères techniques : elle est une solution moyennement bonne en ce qui concerne la fraction ER et l'excès en production et la solution la plus défavorisée en termes de complexité et de taille du système.
- En ce qui est attrait aux critères économiques : la solution est neutre au niveau du CPN et le retour d'investissement. Elle est moyennement positive sur les coûts de maintenance et d'opération, pareillement pour la solution E3,G,S, mais avec un capital d'investissement légèrement négatif.
- Sur les critères environnementaux : la solution ressemble à la solution E3,G,S, légèrement meilleure que cette dernière par rapport aux émissions nuisibles.
- Et concernant les critères sociaux : la solution est similaire en comparaison pour la solution E3,G,S pour les critères d'acceptabilité sociale et de la sécurité sociale. Elle présente un inconvénient moyen par rapport au critère de l'anti-vol et ceux en raison de la facilité de vol de certains composants du système.

La solution E10,G,S :

- Concernant les critères techniques : c'est la meilleure solution par rapport à l'excès de production et présentant une fraction du ER la plus élevée. Mais elle

est la moins bonne par rapport à la complexité et la taille du système (similaire à la solution PV,E3,G,S).

- Avec les critères économiques, la solution E10,G,S est la solution la plus coûteuse et la plus négatives sur les quatre critères économiques.
- En ce qui touche les critères environnementaux, c'est la solution qui présente le maximum d'inconvénient, notamment sur le critère de nuisance audiovisuelle et celui de l'impact faune et flore. Mais elle reste plutôt bonne en ce qui concerne les émissions nuisibles.
- Sur le plan sociaux, la solution présente les mêmes avantages et inconvénients que la solution E3,G,S.

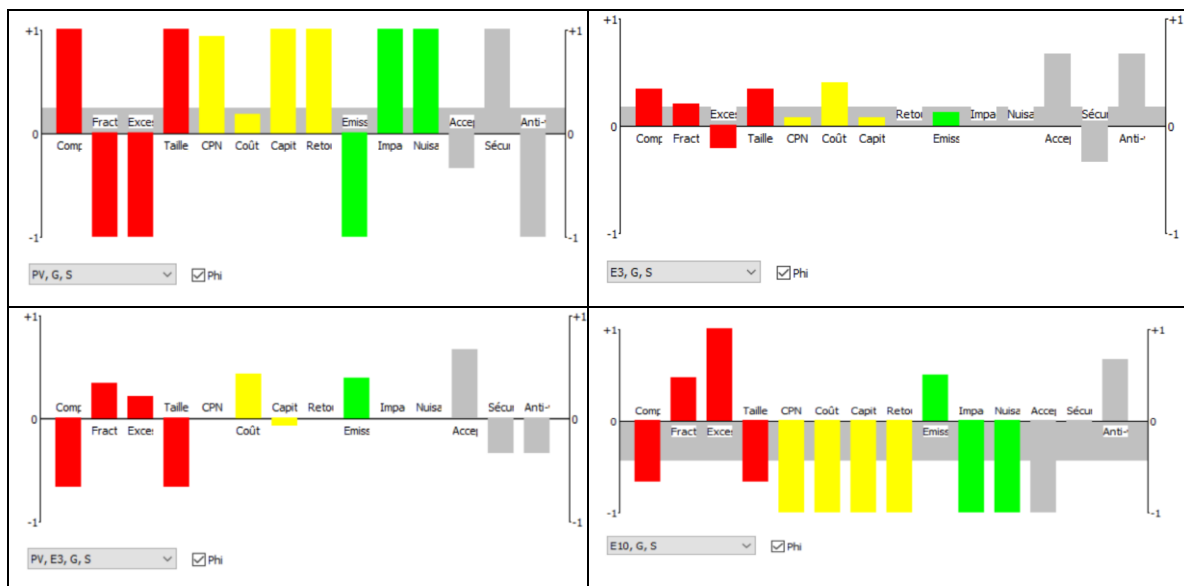


Figure 26 : Profil d'action

▪ GAIA Web

Comme complément, les graphes de GAIA Web permettent aussi de visualiser les critères sur lesquelles chaque actions peut être priorisée. Il permet aussi de voir les similarités entre les critères (exemple : les émissions nuisibles avec la fraction ER et la taille du système avec la complexité du système et la sécurité sociale...)

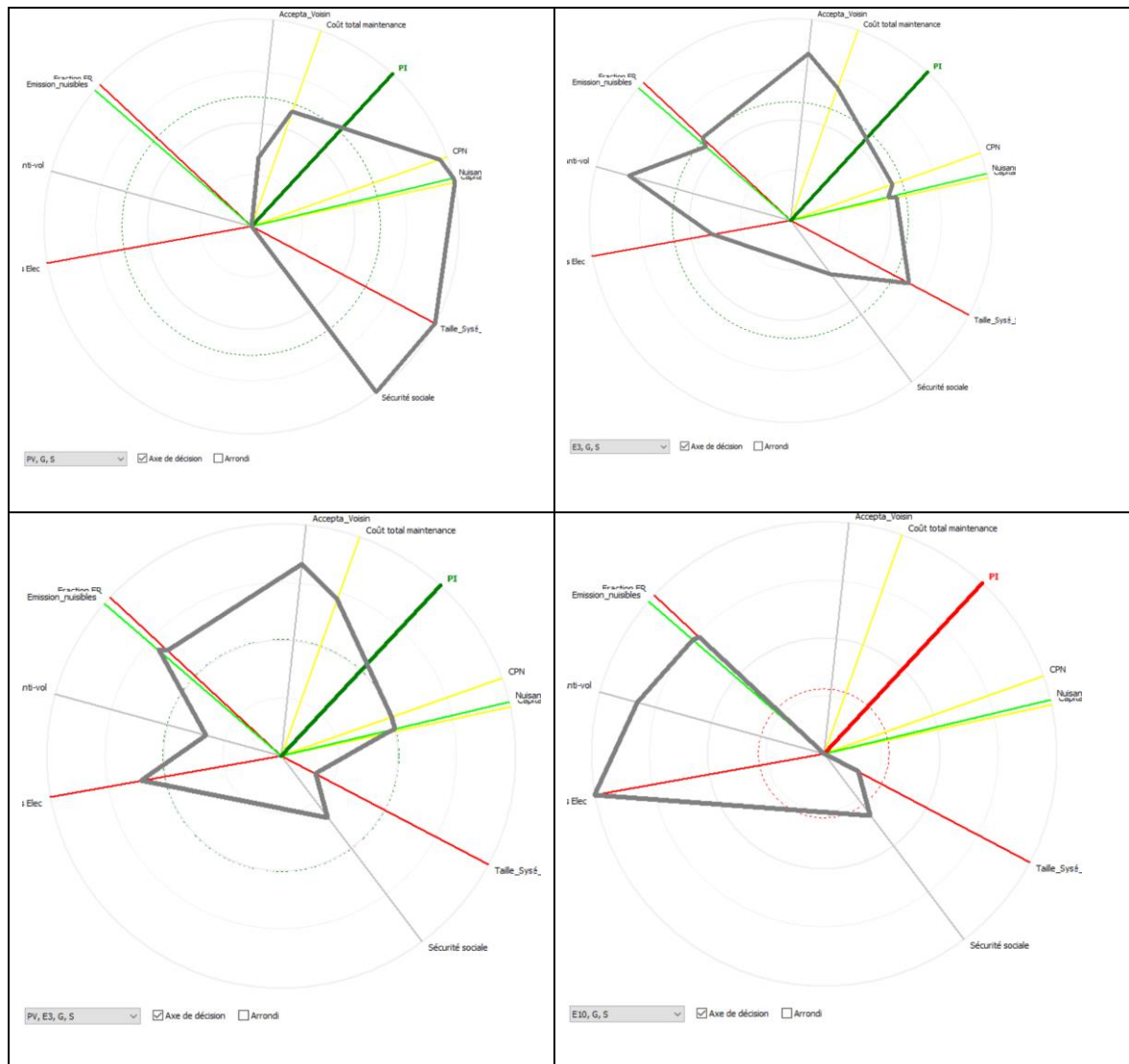


Figure 27: GAIA-Web

4.5.2 Scénario 2 : Propriétaire

Avec une préférence des critères techniques et économiques, les propriétaires ont une préférence totale des solutions E3,G,S et PV,G,S par rapport à PV,E3,G,S. Cette dernière est totalement préférée par rapport à E10,G,S.

Les deux actions E3,G,S et PV,G,S sont incomparables. Toutefois, elles ont presque le même Phi-. L'action PV,G,S a un par contre un Phi+ beaucoup plus intéressant.

En ce qui concerne le classement par rapport au flux absolu, la solution PV,G,S précède au classement, suivi de la solution E3,G,S puis PV,E3,G,S et finalement E10,G,S. Ces deux dernières sont des actions non intéressantes pour les propriétaires.

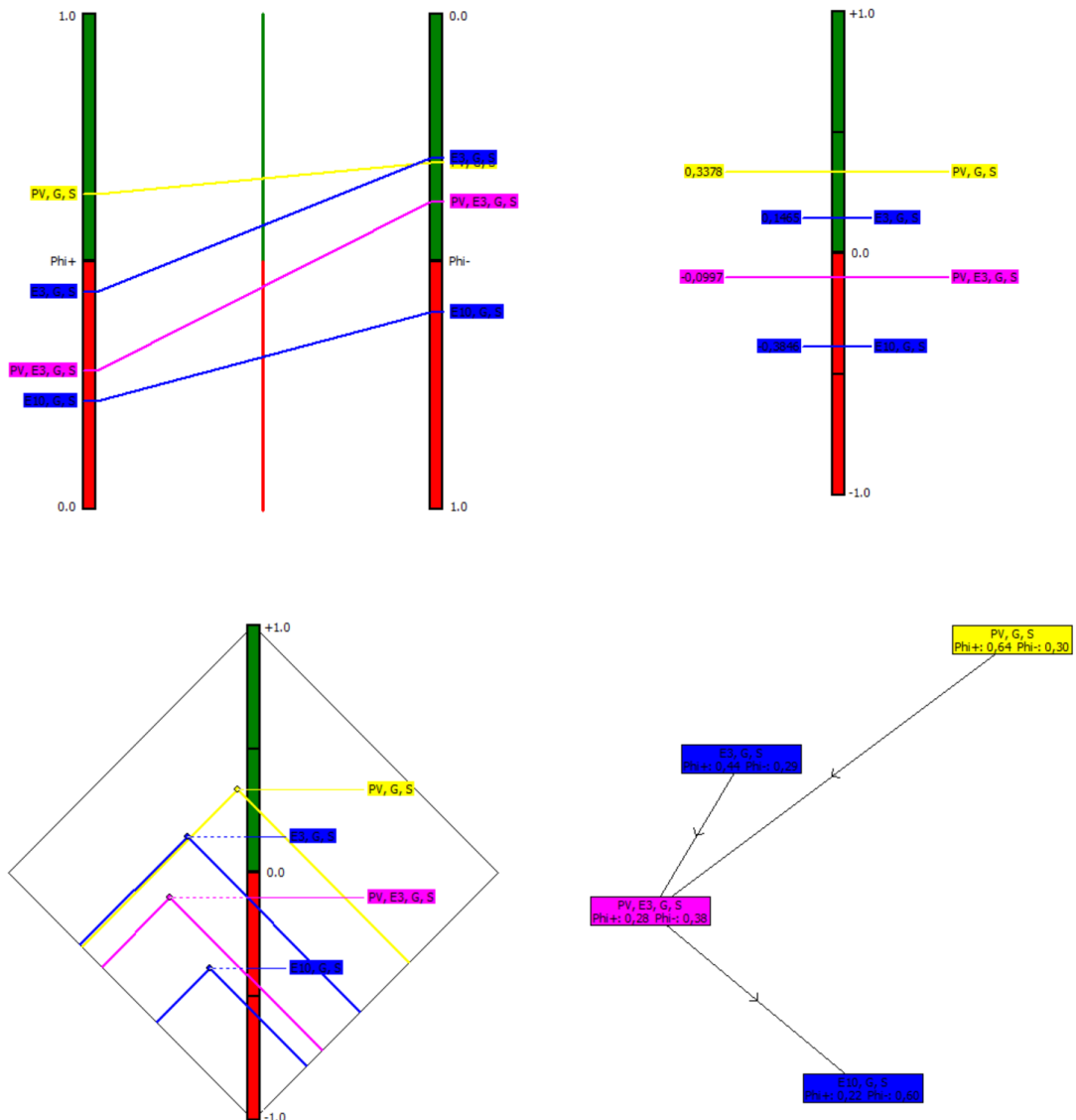


Figure 28: Analyse PROMETHEE pour les propriétaires

4.5.3 Scénario 3 : voisinage

Pour le voisinage, nous soulevons une incomparabilité entre la solution PV,G,S avec les deux solutions E3,G,S et PV,E3,G,S. En effet le flux positif de PV,G,S est meilleur que celui des autres solutions. Inversement pour le flux négatif.

La solution PV,G,S a aussi une préférence totale par rapport à E10,G,S.

De plus, il y a une préférence totale de la solution E3,G,S par rapport à la solution PV,E3,G,S. Toutefois, les deux solutions sont très proches aussi bien sur le flux sortant, que sur le flux négatif.

Sur le classement du Phi absolu la solution PV,G,S est aussi la meilleure solution suivie de la solution E3,G,S, puis PV,E3,G,S. La solution E10,G,S est pour eux la pire solution à envisager.

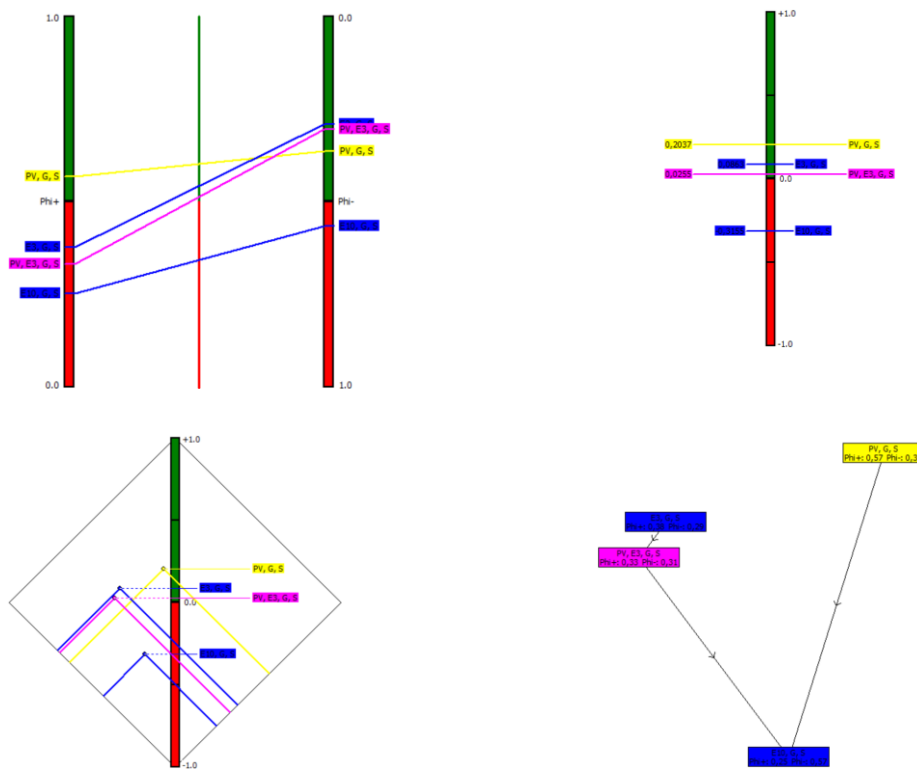


Figure 29: Analyse PROMETHEE pour les voisins

4.5.4 Scénario 4 : environnementalistes

Chez les environnementalistes, les solutions PV,G,S , E3,G,S et PV,E3,G,S présentent une préférence totale seulement par rapport à E10,G,S. Ces trois solutions sont incomparables entre elles.

Sur le flux absolu c'est la solution PV,G,S qui est la plus avantageée, alors que les deux solutions E3,G,S et PV,E3,G,S sont similaires.

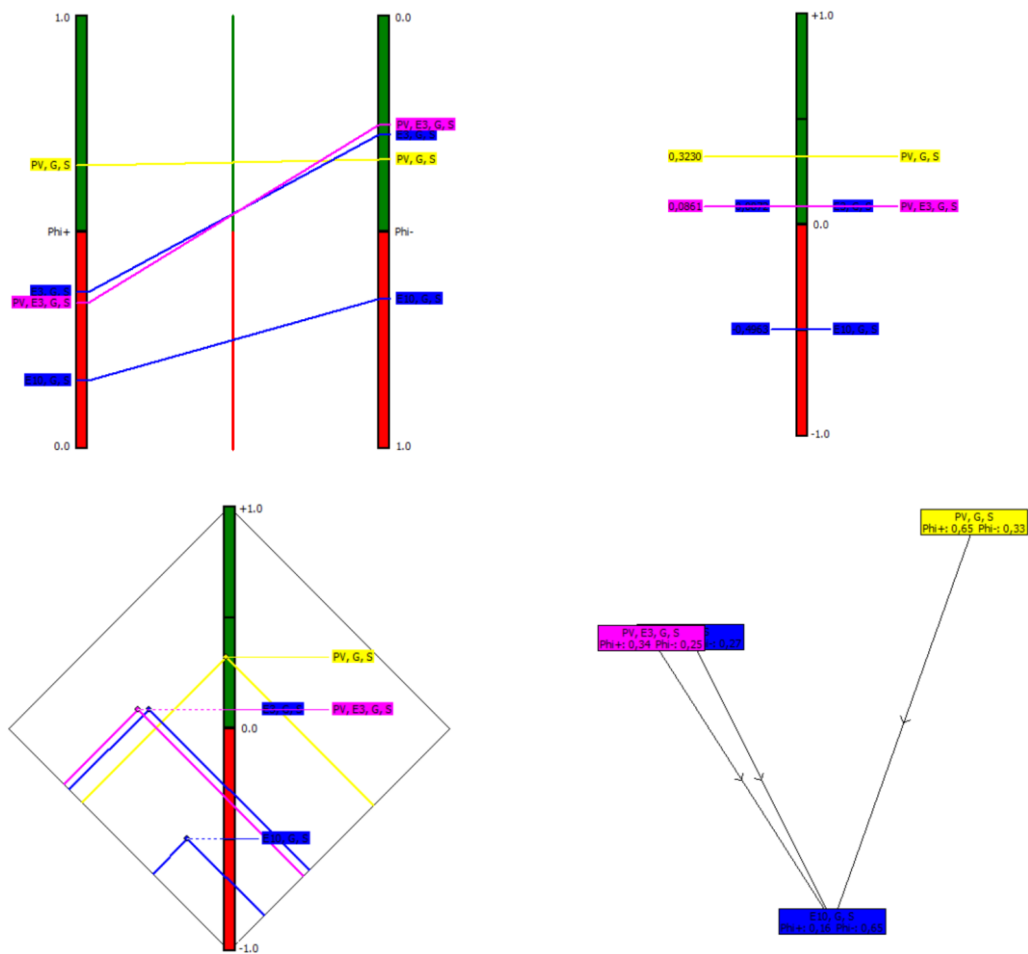


Figure 30: Analyse PROMETHEE pour les environnementalistes

4.5.5 Comparaison des scénarios

Pour comparer les préférences des parties prenantes, nous avons analysé la figure ci-dessous. Nous en concluons que :

Pour les trois scénarios la solution E10,G,S est toujours la pire solution. Contrairement à cela, la solution PV,G,S, est toujours la meilleure solution. Notamment chez les propriétaires et les environnementalistes la solution est pareillement intéressante pour les deux. Pour le voisinage, bien que la solution PV,G,S soit la solution préférée, elle est tout de même proche par rapport aux actions E3,G,S et PV,E3,G,S.

Quant à la solution PV,E3,G,S, pour des une raison économique, la solution n'est pas intéressante pour les propriétaires. Elle est légèrement proche de la solution E3,G,S pour les voisins, et elle est considérée comme une action similaire à celle-ci, pour les environnementalistes.

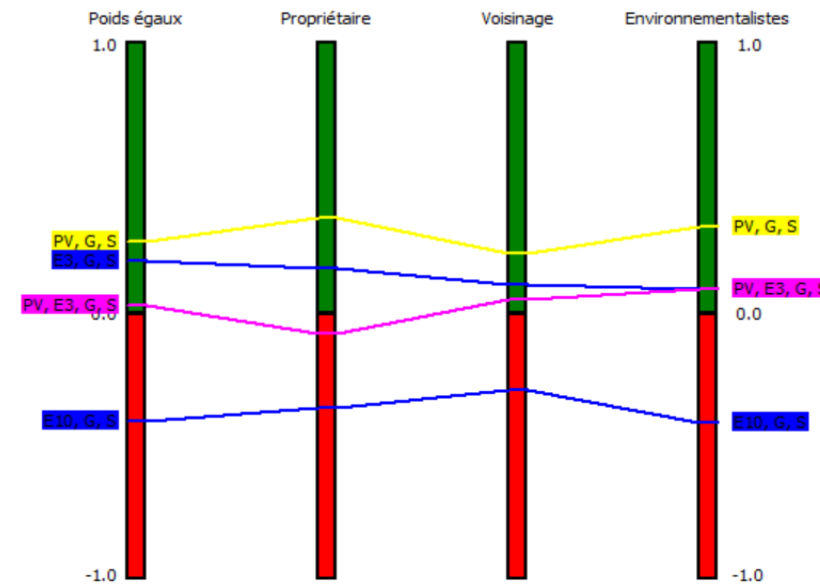


Figure 31: Comparaison des scénarios 1, 2, 3 et 4

CONCLUSION GÉNÉRALE

Après l'analyse des différents outils de prise de décision en matière de choix des SERs, nous avons proposé une démarche combinant l'utilisation du logiciel HOMER et d'un outil d'aide à la décision multicritère PROMETHEE-GAIA. Comme nous l'avons présenté précédemment, Homer permet la conception des systèmes et un premier filtre compte tenu des critères quantitatifs, que nous fixons selon le cas étudié. De plus, il permet de faire un calcul de différents coûts et certains paramètres touchant à l'environnement tel que l'évacuation des gaz à effet de serre. Ensuite, les systèmes retenus de Homer, ont fait l'objet d'une étude multicritère sur le logiciel Visuel PROMETHEE-GAIA. Evidemment, l'outil permet d'intégrer d'abord les critères qualitatifs et quantitatifs et d'analyser les SERs selon les différents critères et leur importance. Il permet aussi d'analyser selon chaque scénario quel est le meilleur SER qui répond le mieux aux aspirations des parties prenantes. La méthode peut aussi servir comme outil de marketing pour les concepteurs de ces SERs, exemple : la promotion de la green box. En effet, elle permet de déterminer les critères qui font de ce système le meilleur compromis.

Nous avons illustré notre démarche sur un cas d'étude didactique simple. Il revient cependant, de spécifier que le choix des critères pour chaque cas est subjectif. De plus, la pondération de ces critères repose principalement sur l'avis des experts. Toutefois, l'analyse de sensibilité et les intervalles de stabilité permettent de voir si la solution est stable compte tenu de cette subjectivité.

Il serait ainsi intéressant dans le futur, d'explorer la même démarche en rajoutant l'aspect d'incertitude sur la pondération des critères, par exemple (la méthode Monte-Carlo). Cette méthode permettrait formellement de modéliser, de prendre en compte des informations indéterminées sur les poids des critères ou même sur les évaluations des SERs sur les différents critères.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Iffly, R., *Transition énergétique : indispensable et difficile*. Le Débat, 2014(5): p. 183.
 2. Canada, C.R.n., *Analyse de Projets d'énergie propres manuel d'ingénierie et d'études de cas RETSCREEN* ed. e. édition. 2005, Québec: Ressources naturelles Canada.
 3. EDF, R.D., *Revue de l'énergie*. Avril 2007.
 4. Agency, I.E. 2014; Available from: projection de la consommation mondiale de l'énergie en 2035
 5. Canada, R.n. *À propos de l'énergie renouvelable*. Available from: <http://www.rncan.gc.ca/energie/renouvelable-electricite/7296>.
 6. Thermiques, L.a.C. *Énergies propres*. [cited 2014; Available from: http://conseils-thermiques.org/contenu/energie_propre_verte.php.
 7. Potvin, S., *L'énergie éolienne : moteur de développement économique*. 2013.
 8. Sacadura, J.-F., *Initiation aux transferts thermiques*. 1993, Paris, France Lavoisier.
 9. Gomri, S., *Energies Alternatives, Scénarios Tunisie 2030*, in *Prospective appliquée M2PA*. 2009, Université virtuelle de Tunis.
 10. UQAR, U.d.Q.à.R.L.d.r.e.é.é., et al., *Investigations des différentes alternatives renouvelables et hybrides pour l'électrification des sites isolés rapport interne*. 2008, Rimouski, Québec: Laboratoire de recherche en énergie éolienne, Université du Québec à Rimouski.
 11. Sarlos, G., et al., *Systèmes énergétiques : offre et demande d'énergie : méthodes d'analyse*. 2003, Lausanne; [Paris]: Presses polytechniques et universitaires romandes ; [diff. Géodif].
 12. comptes, C.d., *La politique de développement des énergies renouvelables*. 2013.
 13. parlementaires, C.S.d.i.e.d.r. and M. Charron, *L'énergie turbulente avantages et inconvénients de l'énergie éolienne*. 2005, Ottawa]: Bibliothèque du Parlement.
 14. <http://www.energies-renouvelables.org/>.
 15. <http://geothermie.is-great.org/>.
 16. Stayanov, L., *Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables*. 2011, Université Technique de Sofia
- SPE - Sciences pour l'environnement - CNRS : UMR6134 ; Université Pascal Paoli.
17. Ilinca, A. and T.M. Weis, *Renewable North policy considerations for wind-diesel systems in remote Canada = Le Nord renouvelable : considérations politiques pour les systèmes éolien-diesel dans les sites isolés au Canada / Nord renouvelable : considérations politiques pour les systèmes éolien-diesel dans les sites isolés au Canada*. 2011.
 18. <http://www.cder.dz/download/za-6.pdf>.
 19. ATI, A.t.I., *Green Cube*.

20. Taha, R.A. and T. Daim, *Multi-criteria applications in renewable energy analysis, a literature review*, in *Research and Technology Management in the Electricity Industry*. 2013, Springer. p. 17-30.
21. Connolly, D., et al., *A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems*. *Applied Energy*, 2010. **87**(4): p. 1059-1082.
22. Nigim, K., N. Munier, and J. Green, *Pre-feasibility MCDM tools to aid communities in prioritizing local viable renewable energy sources*. *Renewable energy*, 2004. **29**(11): p. 1775-1791.
23. Hoberg, G. and G. Peterson, *Multi-Criteria Decision-Making for Comparing Energy Choices—A Hoberg Course Brief*. 2015.
24. Georgilakis, P.S., *State-of-the-art of decision support systems for the choice of renewable energy sources for energy supply in isolated regions*. *International Journal of distributed energy resources*, 2005. **2**(2): p. 129-150.
25. Bhattacharyya, S.C., *Review of alternative methodologies for analysing off-grid electricity supply*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012. **16**(1): p. 677-694.
26. Wimmmler, C., et al., *Multi-Criteria decision support methods for renewable energy systems on Islands*. *J. Clean Energy Technol*, 2015. **3**: p. 185-195.
27. Demirtas, O., *Evaluating the best renewable energy technology for sustainable energy planning*. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 2013. **3**: p. 23.
28. Department of Development and Planning, A.U. <http://www.energyplan.eu/othertools/local/bchp-screening-tool/>.
29. Heaps, C.G. *Long-range Energy Alternatives Planning (LEAP) system*. 2016; Available from: <https://www.energycommunity.org>.
30. LLC, H.E., *HOMER® Pro V3.7 User Manual*. 2016.
31. LLC, H.E. *HOMER® Micro grid Software*. 2015; Available from: <http://www.homerenergy.com/company.html>.
32. Bélanger-Gravel, J., *Analyse technico-économique d'un système hybride éolien-photovoltaïque en comparaison avec les systèmes photovoltaïque et éolien seuls*. 2011, École Polytechnique de Montréal.
33. Diemuodeke, E., S. Hamilton, and A. Addo, *Multi-criteria assessment of hybrid renewable energy systems for Nigeria's coastline communities*. *Energy, Sustainability and Society*, 2016. **6**(1): p. 26.
34. Asit, M., V. Meera, and M. Sthitapragyan. *Techno-economic feasibility of a renewable hybrid source for a technical institute in Hubaneswar*. in *International Interdisciplinary Conference On Engineering Science & Management Held 2016*. Goa, India.
35. Corolleur, M., *Développement d'un catalogue de solutions d'implantation d'énergies renouvelables susceptibles de répondre aux besoins énergétiques d'une installation selon sa classe de puissance*. 2011.
36. Fantidis, J., D. Bandekas, and N. Vordos, *Techno-economical study of hybrid power system for a remote village in Greece*. *Economic analysis*, 2012. **15**(15): p. 15-39.

37. Khan, M. and M. Iqbal, *Pre-feasibility study of stand-alone hybrid energy systems for applications in Newfoundland*. Renewable energy, 2005. **30**(6): p. 835-854.
38. Canmet, C.d.l.t.d.l.é.d., C.d.a.à.l.d.s.l.é.p.R. International, and R.I. Centre d'aide à la décision sur les énergies propres, *Logiciel RETScreen, manuel de l'utilisateur en ligne*. Manuel de l'utilisateur en ligne du logiciel RETScreen. 2006, Varennes, Québec: Ressources naturelles Canada.
39. Alanís-Noyola, A.E., et al., *Pre-Feasibility Analysis of a Desalination Plant Powered by Renewable Energy in Thira, Greece*.
40. Roy, B., *Méthodologie multicritère d' aide à la décision*. 1985: Economica.
41. Martel, J.-M., *L'aide multicritère à la décision: méthodes et applications*. CORS-SCRO Bulletin, 1999. **31**(1).
42. Georgiou, D., E.S. Mohammed, and S. Rozakis, *Multi-criteria decision making on the energy supply configuration of autonomous desalination units*. Renewable Energy, 2015. **75**: p. 459-467.
43. Malik, A., et al. *Evaluation of renewable energy projects using multi-criteria approach*. in *Global Humanitarian Technology Conference (GHTC), 2014 IEEE*. 2014. IEEE.
44. BÜYÜKÖZKAN, G. and S. GÜLERYÜZ, *Fuzzy Multi Criteria Decision Making Approach for Evaluating Sustainable Energy Technology Alternatives*. International Journal of Renewable Energy Sources, 2016.
45. Barin, A., et al., *Multi-criteria analysis of the operation of renewable energy sources taking as basis the AHP method and fuzzy logic concerning distributed generation systems*. The Online Journal on Electronic and Electrical Engineering (OJEEE), 2011. **1**: p. 52-57.
46. Mareschal, B. *PROMETHEE Methods*. 2011-2014; Available from: <http://www.promethee-gaia.net>.
47. Mareschal, B., *Visual PROMETHEE 1.4 Manual*. Visual PROMETHEE, 2013. **1**.
48. Roy, B., D. Bouyssou, and A. Multicritere ala Décision, *Méthodes et cas*. Economica, Paris, 1993.
49. Québec, R. *Taux d'intérêt sur les créances*. [cited 2015; Available from: <http://www.revenuquebec.ca/fr/a-propos/pen-inter/creance.aspx>.
50. quebec, G.d., *Tableau statistique canadien*.
51. Ltd, M.R.C. and C.D.d.l.é.r.e. électrique, *Les systèmes éoliens autonomes : guide de l'acheteur*. Stand-alone wind energy systems : a buyer's guide. 2003, Ottawa: Ressources naturelles Canada.

ANNEXE I

Extrait de la revue de littérature des MCDA et des critères qui entrent dans le choix des SERs en sites isolés faite par [26] (traduction libre)

	Objectif / cible	Critères et indicateurs	# Indicateur & type de	Méthode de décision multicritères *
Diakoulaki et al. [45]	Examiner les scénarios pour l'expansion du réseau électrique	T: garantie de l'énergie, la puissance disponible à la charge de pointe, la sécurité d'approvisionnement Ec: coût d'investissement, coût de production En: augmentation de CO2, SO2, NOx	8M	PROMETHEE
Georgopoulou et al. [46]	Choisir parmi les politiques énergétiques alternatives au niveau régional	T: sécurité à couvrir la demande à la pointe, opérationnalité, stabilité du réseau Ec: coût d'investissement, coût O & M Politique: cohésion des activités économiques locales, emploi régional En: la qualité de l'air, le bruit, l'agrément visuel, l'épuisement du fini Les sources d'énergie, les risques de changement climatique, la protection des écosystèmes, l'utilisation des terres, la mise en œuvre de la politique environnementale européenne et nationale	15M	ELECTRE III
Afgan et al. [12]	Définir les indicateurs énergétiques utilisés dans l'évaluation des	T : Ressource: Efficacité Fr: Coût d'installation, coût de l'électricité Ec: émissions de CO2 S: Zone	5QN	Moyenne arithmétique pondérée

	<p>systemes energetiques repondant au critere de la durabilite</p>			
<p>Baysal et al. [13]</p>	<p>Selection des technologies des centrales a energie renouvelable</p>	<p>T: duree de construction, duree de vie technique, facteur de capacite, disponibilite maximale Ec: cout d'investissement, cout fixe et variable de l'O & M, ratio d'avancement, taux de progression</p>	<p>15QL</p>	<p>Analyse d'enveloppe de donnees floues (FDEA)</p>
<p>Beccali et al. [21]</p>	<p>Diffusion des technologies d'energies renouvelables a l'echelle regionale</p>	<p>T: Cibles d'economie d'energie primaire a l'echelle regionale, Maturite technique et fiabilite, Conformite des exigences d'installation et d'entretien avec le savoir-faire technique local, Continuite et previsibilite des performances, Coût de l'energie primaire economisee</p> <p>En: Durabilite selon les emissions de polluants atmospheriques, Durabilite selon les autres emissions polluantes, Besoins en terres, Durabilite Selon d'autres impacts environnementaux</p> <p>S - Ec: Impact du travail, Maturite du marche, Compatibilite avec la situation politique, legislative et administrative</p>	<p>13M</p>	<p>ELECTRE</p>
<p>Tsoutsos et al. [47]</p>	<p>Methodologie multicritere pour la planification energetique</p>	<p>T - Ec: Investissement, cout O & M, economies de carburant conventionnelles, maturite de la technologie, securite d'approvisionnement</p>	<p>8M</p>	<p>PROMETHEE</p>

	<p>durable sur l'île de Crète</p>	<p>S - En: les émissions de CO2 évitées, la contribution au développement local et le bien-être, l'acceptation sociale et de la viabilité des effets environnementaux restants</p>		
<p>Burton et al. [48]</p>	<p>Comparaison des schémas à petite échelle avec des alternatives à grande échelle</p>	<p>T: capacité de production, durée de vie Ec: coût d'investissement, coût d'exploitation En: CO2, impact sur l'environnement naturel S: bruit, effets sociaux</p>	<p>8M</p>	<p>MACBETH</p>
<p>Cavallaro et al. [49]</p>	<p>Évaluation de la faisabilité de l'installation d'éoliennes</p>	<p>T - Ec: coût d'investissement, coût d'exploitation, capacité de production d'énergie, économies d'énergie finie, maturité de la technologie, temps de réalisation En: émissions de CO2 évitées, impact visuel, bruit acoustique, impact sur l'écosystème, acceptabilité sociale</p>	<p>11M</p>	<p>NAIADE</p>
<p>Afgan et al. [50]</p>	<p>Évaluation des options d'énergie hydrogène par rapport aux énergies renouvelables</p>	<p>Rendement: Efficacité, coût de l'électricité, coût du capital, durée de vie Marché: marché européen, marché mondial En: CO2, NOx, indicateur de Kyoto S: zone, nouveaux emplois</p>	<p>11QN</p>	<p>Moyenne arithmétique pondérée</p>
<p>Afgan et al. [51]</p>	<p>Évaluation des systèmes d'énergie hybrides</p>	<p>Ec: Efficacité, coût de l'électricité, coût d'investissement En: Émissions de CO2 S: émissions de NOx</p>	<p>5QN</p>	<p>Moyenne arithmétique pondérée des indicateurs</p>
<p>Mourmouris et al. [52]</p>	<p>Appuyer la planification énergétique pour promouvoir</p>	<p>T: efficacité, sécurité, disponibilité, En: qualité de l'environnement, impacts visuels, impacts sur la flore et la faune, CO2, SO2, émissions de NOx</p>	<p>14M</p>	<p>REGIME</p>

	l'utilisation des RET	Ec: avantages économiques pour la région, création de développement S: emploi dans le secteur de l'énergie, utilisation du sol, acceptabilité sociale		
Topcu et al. [53]	Choix d'alternatives de production d'électricité	P: durabilité de la ressource énergétique, adéquation du site potentiel En: Coût de l'externalité Ec: Coût ajusté Politique et incontrôlable: stabilité	5M	PROMETHEE
Kaya et al. [55]	1) déterminer la meilleure alternative à l'énergie renouvelable 2) choisir l'emplacement du site	T: efficacité technique, efficacité énergétique Ec: Coût d'investissement, O & M En: les émissions de NOx, les émissions de CO2, l'utilisation des terres S: acceptabilité sociale, création d'emplois	9QL	L'intégrale Floue VIKOR – l'algorithme AHP
Evans et al. [56]	Évaluation des RET en utilisant des indicateurs de durabilité	T: Disponibilité et limitations, efficacité Ec: Prix En: les émissions de CO2, l'utilisation des terres, la consommation d'eau S: impacts sociaux	7QL	Poids égaux
Onat et al. [57]	Évaluation des technologies génératrices d'électricité	T: Disponibilité, efficacité Ec: coût unitaire de l'énergie En: les émissions de CO2, l'utilisation des terres, la consommation d'eau douce S: coûts externes, avantages externes	8M	Classement des critères et la poids égaux
Varun et al. [58]	Sélection de la technologie pour le développement durable	T: puissance nominale, durée de vie Ec: temps de récupération d'énergie, coût de la production d'électricité En: les émissions de GES	5QN	Facteur de mérite basé sur la pondération égale

Cavallaro[59]	Évaluation préliminaire des technologies CSP	T: maturité de la technologie, température, facteur de capacité solaire Ec: coût d'investissement, coût d'exploitation et de maintenance, LEC En: impact environnemental	7M	PROMETHEE-GAIA
Buchholz et al. [60]	Évaluer la durabilité des systèmes de bioénergie en mettant l'accent sur l'intégration de différentes Partie prenantes	Écologique: réduction de la concurrence pour les terres fertiles Ec: augmentation du commerce local, rentabilité élevée, sécurité d'approvisionnement élevée S: besoins de formation insuffisants, taux d'emploi élevé, diversité et certitude dans les domaines de propriété et d'entreprise, faibles besoins de planification et de suivi	8QL	AHP, MAUT, PROMETHEE et NAIADE
Pilavachi et al. [61]	Évaluer les possibilités de production d'énergie électrique	T: efficacité, service de la vie Er: Émissions de CO2, émissions de NOx Ec: coût d'investissement, frais d'exploitation et coûts d'électricité	7QN	AHP
Erol et al. [62]	Faciliter les activités de planification des ressources énergétiques	T: possibilité d'acquérir une technologie originale, supériorité technologique, complétude de la technologie Ec: fiabilité de la technologie et de l'exploitation, facilité d'accès à la source, investissement supplémentaire, durabilité des sources, utilisation supplémentaire des ressources En: effet de la technologie sur l'environnement, empreinte carbone, besoin de ressources Public: acceptation par les résidents locaux	12QL	AHP

Streimikiene et al. [64]	Choisir les technologies de production d'électricité les plus durables	Ec: coûts privés, facteur moyen de disponibilité (charge), sécurité d'approvisionnement, coûts de raccordement au réseau, En: Émissions de GES, coûts externes environnementaux, coûts externes des radionucléides, impact sur la santé humaine S: opportunités d'emploi spécifiques à la technologie, risque pour la sécurité alimentaire, accidents mortels de l'expérience passée, accidents graves perçus à l'avenir	13M	Mulrimoora et TOPSIS
San Cristobal [65]	Sélection d'un projet d'investissement dans les énergies renouvelables	T: puissance, heures de fonctionnement, période de mise en œuvre, durée de vie utile Ec: taux d'investissement, coûts d'exploitation En: tonnes de CO2 évitées	7QN	Méthode de classement des compromis VIKOR
Al-Yahyai et al. [24]	Derive wind farm land suitability index and Classification Dériver Indice d'aptitude et classification des sites éoliens	T: densité de l'énergie éolienne, la demande d'énergie correspondante, pourcentage de vent durable, intensité de turbulence, dunes de sable Ec: distance à la route, pente du terrain En: lieux historiques, faune et réserve naturelle S: zone urbaine	10M	AHP avec moyenne pondérée ordonnée
Charabi et al. [25]	Évaluer la pertinence des terres pour la mise en œuvre des grandes exploitations PV	T: rayonnement solaire, accessibilité des sites, utilisation des sites Ec: proximité du réseau, pente de terrain, poteaux de charge En: zones sensibles, ligne hydrographique, risque sable / crépuscule	9M	Calcul en logique floue de la moyenne pondérée (FLOWA)

Defne et al. [26]	Aider à choisir les endroits les plus appropriés pour les projets de cours d'eau	Physique: densité de puissance En: impact environnemental S - Ec: accessibilité	3M	GIS et pondération égale
Haurant et al. [66]	Sélection de projets photovoltaïques	T: production nette Géoéconomique: zone de location non occupée par l'installation Écologique: étude de la dégradation écologique potentielle dans les chantiers En: pertinence de la présentation d'impact visuel dans les chantiers, distance minimale observateur-plante Utilisation territoriale: utiliser les risques de conflits Ec: activité économique et bénéfices financiers des habitants liés aux installations RES, revenus financiers au niveau communal	8M	ELECTRE
Zhang et al. [67]	Choisir un plan énergétique durable pour la ville de Nanjing	T: efficacité, sécurité, fiabilité Ec: coût d'investissement, coût O & M En: Réduction des émissions de GES, utilisation des terres S: création d'emplois, prestations sociales	8QL	Méthode intégrale floue
Barin et al. [15]	Évaluer le fonctionnement des systèmes de stockage d'énergie	T: efficacité, gestion de la charge, maturité technique, cycle de vie, qualité de l'énergie Ec: coûts	6M	AHP and ensembles flous

T= critères techniques ; Ec : critères économiques ;

En : critères environnementaux , S : critère sociaux.

QL : critère qualitatif ; QN : critère quantitatif

M : critères mixtes (QL et QN)