

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI TIZI-OUZOU

Faculté du Génie de la Construction

Département de Génie Mécanique



Thèse de Doctorat en Sciences

Spécialité : Génie Mécanique

Présentée par

Fazia BAGHDADI

Thème

**Simulation et Optimisation des Performances d'un
Système de production d'électricité Hybride
Intégrant des Energies Renouvelables**

Devant le jury :

M. Mohand Saïd BOUTOUDJ	Professeur	UMM TIZI-OUZOU	Président
M. Kamal MOHAMMEDI	Professeur	UMB BOUMERDES	Directeur de thèse
M. Saïd DIAF	Directeur de Recherche	CDER BOUZAREAH	Co-directeur de thèse
M. Salah ZOUAOUI	Maître de Conférences (A)	UMM TIZI-OUZOU	Examineur
M. Brahim MAHFOUD	Professeur	UAMO BOUIRA	Examineur
M. Hocine TEBBICHE	Maître de Conférences (A)	UMM TIZI-OUZOU	Examineur

Soutenue le 11 - 12 - 2023

Remerciements

A l'issue de cette présente étude, je rends grâce au seigneur Dieu le tout puissant, j'adresse mes remerciements à Dieu de m'avoir donné la chance, le courage et la force nécessaire pour aboutir au terme de cette recherche. Cette thèse de doctorat a été un long processus de recherches, d'apprentissages, de remises en question et de découvertes avec de nombreuses personnes que je souhaite ici remercier.

J'exprime ma profonde gratitude, et j'adresse aussi mes plus vifs remerciements à Monsieur Kamal MOHAMMEDI, Professeur à l'Université de M'hamed Bougara de Boumerdès de m'avoir encadré et permis d'entreprendre ce travail de recherche ainsi que pour les conseils et les encouragements qu'il m'a donné tout au long de ce travail. Sans lui, ce travail n'aurait probablement pas vu le jour.

J'adresse mes vifs remerciements au co-directeur de ma thèse, Monsieur Saïd DIAF Directeur de Recherche au CDER Bouzaréah. Mille mercis à ce Monsieur généreux, incroyablement dévoué pour son travail, celui qui répondait à mes questions, à me motiver et à me remettre sur la bonne voie de la recherche scientifique.

J'exprime également toute ma gratitude à Monsieur Mohand Saïd BOUTOUDJ, Professeur à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO), pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail en me faisant l'honneur de présider le jury de ma thèse.

Je tiens à remercier Monsieur Brahim MAHFOUD, Professeur à l'université Akli Mohand Oulhadj de Bouira pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail en me faisant l'honneur d'être examinateur de cette thèse.

Je tiens également à témoigner toute ma reconnaissance à Monsieur Salah ZOUAOU, Maître de conférences à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant d'être examinateur de cette thèse.

J'adresse aussi mes plus vifs remerciements à Monsieur Hocine TEBBICHE Maître de conférences à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail en me faisant l'honneur d'être examinateur de cette thèse.

Chers enseignants du département génie mécanique de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Je tiens à vous exprimer ma profonde gratitude pour tout ce que vous m'avez appris. J'ai eu la chance de vous avoir comme enseignants pendant ma longue période d'études à votre université. J'ai été très impressionné par votre rigueur, votre précision et votre méthodologie scientifique. Vos compétences en pédagogie de l'enseignement m'ont permis de comprendre et d'assimiler les concepts de manière efficace. Je suis reconnaissant de votre soutien et de votre encouragement.

Je souhaiterai également remercier toute ma famille, pour son soutien et ses encouragements dans ces longues années d'études. Particulièrement ma mère, mes derniers mots iront à mon mari, qui m'a soutenu durant la rédaction de cette thèse.

Enfin je renouvelle toute mon amitié et ma sympathie à ceux qui m'ont accordé du temps et m'ont témoigné un soutien constant dans ce long travail de recherche, et pour tous ceux qui m'ont donné de la motivation pour finir ce travail sans qui cela n'aurait pas été possible.

Avec toute ma gratitude.

DÉDICACES

À la mémoire de mon père,

À ma chère mère,

À mon frère et à ma sœur,

À mon mari,

À mes nièces Dounia, Meriem, Sandra, Mélissa, Anaïs, Maïlis, et Elena,

À mes tantes, mes cousins et cousines, à leurs enfants,

À mon beau-frère et ma belle-sœur,

À toute ma famille,

À tous mes ami(e)s et tous mes collègues.

Sommaire

Sommaire.....	IV
Liste des figures.....	VIII
Liste des tableaux.....	X
Symboles et acronymes, liste des abréviations.....	XI
Introduction générale.....	XV
Chapitre 1 : Contexte et Etat de l'art des performances des systèmes énergétiques hybrides.....	5
1.1 Introduction	6
1.2 Le contexte de la transition énergétique	6
1.2.1 La demande mondiale d'énergie électrique.....	7
1.2.2 Les énergies renouvelables	8
1.2.2.1 L'évolution de la production mondiale de l'électricité par les énergies renouvelables	8
1.2.2.1.1 L'éolien.....	9
1.2.2.1.2 Solaire photovoltaïque et prévisions d'évolution.....	10
1.2.3 Stockage de l'énergie électrique et capacité installée dans le monde	11
1.2.4 Contexte énergétique algérien.....	12
1.2.4.1 Génération autonome d'électricité solaire en milieu rural	13
1.2.4.2 Génération autonome d'électricité solaire et activités agricoles.....	13
1.2.4.3 Les réseaux électriques isolés du sud Algérien (RIS)	14
1.2.4.4 La transition énergétique et ses enjeux.....	14
1.2.4.5 Potentiel solaire de l'Algérie	16
1.2.4.6 Potentiel éolien de l'Algérie.....	17
1.2.4.7 Conception d'un système Hybride pour remplacer une installation diesel.	18
1.3 Les systèmes d'énergie hybrides à énergies renouvelables	18
1.3.1 Arrangement de l'équipement	18
1.3.1.1 Architecture à bus DC.....	18
1.3.1.2 Architecture à bus AC.....	19
1.3.1.3 Architecture mixte (DC/AC)	19
1.3.2 Production de l'énergie dans les sites isolés	20
1.3.3 Démarche de conception d'un site isolé de production d'énergie électrique	21
1.4 Performances des systèmes énergétiques	22
1.4.1 Systèmes énergétiques	22
1.4.1.1 Les panneaux solaires photovoltaïques.....	22
1.4.1.2 Les convertisseurs	23
1.4.1.3 Les éoliennes	23
1.4.1.3.1 Principes et éléments constitutifs de l'éolienne.....	23
1.4.1.4 Le générateur diesel (GD)	26
1.4.1.5 Le stockage d'énergie.....	27
1.4.1.5.1 Stockage de l'énergie électrochimique	28

1.4.1.5.2 Choix du système de stockage.....	28
1.4.2 Évaluation exergetique	29
1.4.3 Système de gestion d'énergie	30
1.4.3.1 Stratégies de gestion à base de règles	31
1.4.3.2 Stratégies basées sur l'optimisation.....	32
1.4.4 Dimensionnement optimal et évaluation économique avec HOMER.....	32
1.4.5 Outil de simulation MATLAB / SIMULINK.....	34
1.4.6 Synthèse bibliographique sur systèmes hybrides à énergies renouvelables.....	35
1.5 Conclusion	37
Chapitre 2 : Analyse technico-économique et faisabilité d'un système énergétique hybride dans une communauté rurale.	38
2.1 Introduction	39
2.2 Aperçu des techniques d'optimisation de la taille.....	39
2.3 Configuration du système hybride de production d'électricité.....	41
2.4 Procédure d'optimisation avec le logiciel HOMER.....	42
2.5 Données d'entrée	43
2.5.1 Profile de Charge	43
2.5.2 Description du site et données météorologiques.....	45
2.5.2.1 Situation géographique	45
2.5.3 Évaluation des ressources en énergie renouvelable.....	46
2.5.3.1 Vitesse moyenne mensuelle du vent.....	46
2.5.3.2 L'irradiation solaire	46
2.5.3.3 Températures	47
2.5.4 Données économiques	48
2.6 Modèles physiques et aspects techniques des composants.....	48
2.6.1 Modélisation des ressources renouvelables	49
2.6.1.1 Puissance de sortie du générateur PV	49
2.6.1.2 Puissance de sortie du générateur éolien	49
2.6.2 Modèle de batterie.....	50
2.6.3 Modèle du générateur Diesel.....	51
2.6.4 Convertisseur bidirectionnel	52
2.7 Critères d'analyse dans le logiciel HOMER.....	52
2.7.1 Stratégie de de répartition d'énergie.....	54
2.8 Résultats de la simulation des performances du système hybride et discussion.....	54
2.8.1 Production d'électricité des panneaux PV, de l'éolienne et du générateur diesel	54
2.8.2 Faisabilité économique.....	56
2.8.3 Comparaison entre les configurations faisables.....	57
2.9 Analyse de sensibilité	59
2.9.1 Influence des paramètres climatiques sur le coût d'électricité.....	59
2.9.2 La fraction de l'énergie renouvelable et les émissions produites.....	60
2.9.3 L'influence du prix du carburant sur la performance	61
2.9.4 Productions du diesel et de l'éolienne en fonction de la vitesse du vent	61
2.10 Conclusion.....	62

Chapitre 3 : Modèles de simulation et gestion énergétique.....	64
3.1 Introduction	65
3.2 Le système hybride proposé.....	65
3.3 Modélisation énergétique du système	66
3.3.1 Générateur photovoltaïque	66
3.3.1.1 Principe de fonctionnement d'une pile solaire photovoltaïque.....	67
3.3.1.2 Modélisation des panneaux photovoltaïques PV.....	68
3.3.2 Caractéristiques techniques et conditions de fonctionnement et d'essai	69
3.3.2.1 Modèle éolien.....	70
3.3.2.1.1 Courbe de puissance.....	71
3.3.2.1.2 Extrapolation de la vitesse	72
3.3.3 Modélisation de la batterie.....	73
3.3.4 Modélisation du groupe électrogène	74
3.3.5 Convertisseur	75
3.3.5.1 Analyse de fiabilité.....	75
3.3.5.2 La fraction d'énergie renouvelable FER	76
3.3.6 Stratégies de gestion d'énergie pour le système hybride PV/Eolien/Diesel	76
3.3.7 Algorithme de gestion proposée	81
3.3.8 Simulation et analyse des résultats de gestion énergétique du système	82
3.3.9 Entrées de Simulation.....	82
3.3.10 Résultats et discussions	84
3.3.10.1 Bilan énergétique mensuel.....	84
3.3.10.2 État de charge des batteries	86
3.3.10.3 Évolution des énergies échangées	87
3.3.10.4 Résultats de simulation de la stratégie de gestion pour une semaine	88
3.3.10.5 Étude comparative avec le logiciel HOMER	91
3.4 Conclusion	93
Chapitre 4 : Analyse énergétique et exergetique du système de production d'électricité.....	95
4.1 Introduction	96
4.2 Équations générales de masse, d'énergie et d'exergie	97
4.3 Analyse de l'exergie.....	97
4.3.1 Exergie relative au transfert de chaleur.....	98
4.3.2 Exergie associée à un travail mécanique.....	98
4.3.3 Évaluation exergetique	99
4.3.4 Critères d'évaluation exergetique	100
4.3.4.1 L'efficacité exergetique	100
4.3.4.2 Le rendement exergetique	100
4.4 Exergie et énergie du générateur Diesel.....	101
4.4.1 Exergie du carburant à l'entrée	101
4.4.2 Rendement énergétique et exergetique.....	102
4.4.3 Rendement énergétique et exergetique de l'ensemble des modules photovoltaïques	103
4.4.3.1 Rendement énergétique.....	103
4.4.3.2 Rendement exergetique.....	103
4.4.4 Performances du générateur éolien	104
4.4.4.1 Evaluation de la puissance du vent	104

4.4.4.2 Masse volumique de l'air.....	104
4.4.4.3 Le facteur de charge.....	105
4.4.4.4 Rendement énergétique.....	105
4.4.4.5 Heures de pleine charge.....	106
<i>4.5 Résultats et discussions:</i>	<i>106</i>
4.5.1 Performances énergétique du générateur Diesel.....	107
4.5.2 Performances exergetiques du générateur Diesel	107
4.5.3 Les performances de l'éolienne sur le site.....	109
4.5.3.1 Facteur de capacité.....	110
4.5.3.2 Production d'énergie et heures de pleine charge	111
4.5.3.3 Rendement énergétique et exergetique de l'éolienne.....	112
4.5.4 Performances du système photovoltaïque	114
4.5.5 Rendement exergetique et énergétique moyen	114
4.5.5.1.1 Caractéristiques météorologiques.....	115
4.5.5.2 Influence de la température et du l'éclairement	116
4.5.6 Rendements énergétique et exergetique des sous-systèmes de la génération d'électricité...	117
<i>4.6 Conclusion</i>	<i>120</i>
Conclusion générale et travaux futurs.....	122
Bibliographie et Références.....	127
Annexes	140

Liste des figures

Figure 1-1 :L'évolution des nouvelles capacités de production d'électricité (en GW) et part des renouvelables (%) installées dans le monde, 2001-2020.	7
Figure 1-2 : Mix d'électricité d'origine renouvelable et part des différentes technologies dans la production mondiale (2019).	9
Figure 1-3 : Projection à l'horizon 2050 de l'évolution des capacités cumulées d'éolien terrestre (Onshore) installées dans le monde (source IRENA)	10
Figure 1-4 : Evolution des capacités de production d'électricité solaire photovoltaïque à travers le monde (2010-2019).	11
Figure 1-5 : Projection à l'horizon 2050 des capacités cumulées de solaire photovoltaïque installées par région dans le monde (source IRENA).	11
Figure 1-6 : Capacités de stockage par technologie dans le monde (2017).	12
Figure 1-7: Evolution estimée du parc national de production d'électricité, selon le Ministère de l'Energie et des Mines (MEM).	15
Figure 1-8 : Gisement solaire de l'Algérie (Irradiation globale journalière reçue sur un plan horizontal sur une surface d'un m ²) [45].	17
Figure 1-9 : Carte annuelle des vitesses de vent de l'Algérie à 10 m du sol [45].	17
Figure 1-10 : Structure à bus DC d'un système hybride [46].	19
Figure 1-11: Structure à bus AC d'un système hybride [46].	19
Figure 1-12: Structure à bus mixte (DC/ AC) d'un système hybride [46].	20
Figure 1-13: Principales étapes de la conception d'un site isolé de production d'énergie électrique.	21
Figure 1-14: Structures matérielles des systèmes PV connectés au réseau [58] : (a) Onduleur de module, (b) Onduleur de branche, (c) Onduleur multibranche, et (d) Onduleur central.	23
Figure 1-15: Eléments constitutifs d'une éolienne	24
Figure 1-16 : Eolienne à axe horizontal.	25
Figure 1-17: Un système éolien typique [60].	25
Figure 1-18: Configuration d'un groupe électrogène diesel.	27
Figure 1-19: différents systèmes de stockage les plus répandus dans les énergies renouvelables [64].	28
Figure 1-20: Classification des stratégies de gestion d'énergie.	31
Figure 2-1 : Aperçu des techniques d'optimisation de la taille [107]	40
Figure 2-2 : Schéma de conception du système de production d'énergie hybride	41
Figure 2-3 : Procédure d'optimisation de HOMER [108].	43
Figure 2-4 : Profil de consommation électrique de 24 heures d'opération.	44
Figure 2-5 : Profil de charge moyenne mensuelle électrique desservie au village.	45
Figure 2-6 : Localisation géographique de la wilaya d'Adrar en Algérie.	45
Figure 2-7: Evolution de la vitesse moyenne mensuelle du vent (site- Adrar).	46
Figure 2-8 : Irradiation solaire globale sur le plan horizontal.	47
Figure 2-9: Evolution de la température ambiante moyenne mensuelle.	47
Figure 2-10: Courbe de puissance relative à l'éolienne.	50
Figure 2-11 : Générateur diesel de type 404C-22G du fabricant PERKINS.	51
Figure 2-12 : Variantes proposées par HOMER.	54
Figure 2-13 : Production moyenne mensuelle d'électricité de la conception C ₂ sous la stratégie de répartition CC.	55
Figure 2-14: Distribution horaire de la production d'électricité des sources, de la charge consommée et le SOC du système de stockage.	55
Figure 2-15: Coût actuel net du système hybride sélectionné en fonction du type de coût et du composant.	56

Figure 2-16: Contribution des ressources renouvelables (%) et le coût du kWh dans chaque configuration faisable.	57
Figure 2-17: Coût du cycle de vie (NPC) dans chaque configuration faisable.	58
Figure 2-18 : Emissions de CO ₂ dans chaque configuration faisable.	58
Figure 2-19: Coût de l'énergie et les émissions CO ₂ par rapport à la vitesse du vent.	60
Figure 2-20: Coût de l'énergie-émissions CO ₂ en fonction d'irradiation solaire globale.	60
Figure 2-21: Fraction renouvelable et émissions CO ₂ en fonction les irradianations solaires.	61
Figure 2-22: Variation de coût spécifique de l'énergie (\$/kWh) et de émissions CO ₂ .	61
Figure 2-23: Productions du diesel et fraction renouvelable en fonction des vitesses de vent.	62
Figure 3-1: Schéma synoptique du système hybride photovoltaïque-éolien-diesel avec batteries.	66
Figure 3-2: Cellules, module et panneau photovoltaïques, modules PV sur support [125].	67
Figure 3-3 : Production d'électricité par la séparation électron-trou [126].	68
Figure 3-4: Schéma typique d'un système éolien.	71
Figure 3-5 : Courbe de la puissance typique de l'éolienne.	71
Figure 3-6: Consommation en fonction du taux d'utilisation pour la génératrice diesel 404C-22G.	75
Figure 3-7: Organigramme de calcul de la gestion énergétique.	82
Figure 3-8 : Évolution de la vitesse du vent et de la température sur un an.	83
Figure 3-9: Variations de l'ensoleillement sur le site choisi.	84
Figure 3-10 : Production mensuelle d'énergie par chaque partie du système hybride et la consommation d'énergie.	85
Figure 3-11 : Variations de la puissance produite par le générateur PV et l'éolienne.	86
Figure 3-12 : L'état de charge des batteries en fonction du temps au cours de l'année.	87
Figure 3-13 : Performance annuelle du système hybride étudié.	87
Figure 3-14: Production solaire PV en fonction de la température ambiante tout au long de l'année	88
Figure 3-15: Évolution de l'irradiation solaire	89
Figure 3-16 Évolution de la vitesse du vent	89
Figure 3-17: Evolution de la charge Pch, de Ptot, de Pdg et du SoC durant une semaine.	90
Figure 3-18 : Bilans de puissance des trois générateurs solaire PV, éolienne et diesel pour les deux modèles.	92
Figure 4-1 : Schéma du bilan d'exergie d'un volume de contrôle [151].	98
Figure 4-2 : Variation mensuelle de la vitesse de vent.	109
Figure 4-3 : Puissance mensuelle de WT.	110
Figure 4-4 : Facteur de capacité CF estime par le model de l'éolien.	111
Figure 4-5 : Production mensuelle d'énergie et nombre d'heures de pleine charge.	112
Figure 4-6: Variation moyenne mensuelle de rendement énergétique et exergétique de l'éolienne.	113

Liste des tableaux

Tableau 1-1: Le parc de production des réseaux isolés du sud pour l'année 2012[38].	14
Tableau 1-2: Répartition du potentiel solaire et éolien en Algérie [41, 42-44].	16
Tableau 1-3 : Exemple de la consommation énergétique pour quelques sites isolés [53].	20
Tableau 1-4 : Tensions recommandées pour une installation PV pour différentes puissances crêtes.	27
Tableau 2-1 : Coordonnées géographiques du site choisi.	45
Tableau 2-2: Coûts net actuel de l'installation	48
Tableau 2-3 : Données techniques de l'éolienne PROVEN 15.	49
Tableau 2-4 : Données techniques des batteries.	51
Tableau 2-5: Données techniques du moteur diesel.	51
Tableau 2-6 : Résumé comparatif avec des HES hors réseau dans quelques régions du monde dans la littérature.	59
Tableau 3-1 : Caractéristiques du générateur PV.	70
Tableau 3-2 : Conditions d'essai standard spécifiées (STC) ou de références pour les modules photovoltaïques.	70
Tableau 3-3 : Consommation de groupe électrogène diesel	75
Tableau 3-4 : Bilans d'énergies des générateurs du SEH pour les deux modèles	93
Tableau 4-1 Rapport des fractions de masse de H, C et O du diesel.	101
Tableau 4-2 : Formule moléculaire, Poids moléculaire, Pouvoir calorifique inférieur, et exergie spécifique de diesel $C_{13}H_{28}$ [156].	102
Tableau 4-3 : Performances énergétique du générateur Diesel.	107
Tableau 4-4 : Performances exergetiques du générateur Diesel	108
Tableau 4-5 : Tableau de la variation de l'efficacité énergétique de chaque composant.	120

Symboles et acronymes, liste des abréviations

Symbol	Désignation	Unité
A	Surface balayée par le rotor de l'éolienne	(m ²)
A_c	Surface de générateur PV	(m ²)
AEP	Production énergétique annuelle	(kWh)
C_{bat}	Capacité de stockage de la batterie	(Ah)
C	Capacité installée,	(kW)
CF	Facture de charge	-
C_{rep}	Coût de remplacement du composant	(\$)
C_s	Consommation spécifique du moteur Diesel	(l/kWh)
C_i	Volume de combustible consommé pour le mois i	(m ³)
E_s	Irradiation solaire globale dans le plan des panneaux	(W/m ²)
Ex	Exergie	(J)
$\dot{E}x$	Exergie par unité de temps ou taux d'exergie	(kW)
\dot{E}	Taux d'énergie	(kW)
Ex_s	Exergie spécifique	(kJ/kg)
E	Energie électrique produite	(kWh)
E_i	Energie électrique produite durant le mois i	(kWh/mois)
G	Enthalpie libre de Gibbs	(J)
g	Accélération de la pesanteur	(m/s ²)
\dot{H}	Enthalpie massique	(kJ/kg)
h	Hauteur du moyeu de l'éolienne	(m)
I_{mp}	Courant maximal sous conditions standards	(A)
I_s	Courant de saturation	(A)
I	Courant fournie par la cellule	(A)
L.H.V	Pouvoir calorifique inférieur	(kJ/kg)

M	Masse molaire	(kg/kmol)
\dot{m}	Débit massique	(kg/s)
N_{mod}	Nombre de modules dans le panneau PV	
NetPEM	Energie éolienne nette produite	(kWh)
P_n	Puissance électrique nominale de l'éolienne	(kW)
P	Pression	(kPa)
P_{pvs}	Puissance de sortie du générateur photovoltaïque	(kW)
P_{DG}	Puissance de sortie du générateur diesel	(kW)
\dot{Q}	Puissance thermique	(kW)
q	Chaleur spécifique	(kJ/kg)
R₁	Longueur de pales	(m)
R	Constante des gaz parfaits	(kJ/kg K)
R_{comp}	Durée de vie du composant	(an)
R_{rem}	Durée de vie restante du composant après la fin du projet	(an)
R_{proj}	Durée de vie du projet	(an)
R_{rep}	Durée du coût de remplacement,	(an)
S	Récupération	(\$)
S	Entropie par unité de masse	(kJ/kg)
T_{amb}	Température ambiante	(°C ou K)
T_f	Temps du fonctionnement du générateur diesel	(h)
T_C	Température de jonction de la cellule photovoltaïque	(K)
T_s	Température de soleil	(K)
U_{AC,nom}	Tension nominale AC	(V)
U_{Bat}	Tension de la batterie	(V)
V_{CELL}	Tension aux bornes de la cellule	(V)
V_{oc}	Tension en circuit ouvert	(V)
V(H_m)	Vitesse du vent à la hauteur des mesures	(m/s)
V(h)	Vitesse du vent à la hauteur h	(m/s)
V_d	Vitesse de démarrage de l'éolienne	(m/s)

V_n	Vitesse nominale de l'éolienne	(m/s)
V_{mp}	Tension maximale du module sous conditions standards	(V)
VC	Volume de contrôle	(m ³)
V_c	Vitesse d'arrêt spécifique de l'éolienne	(m/s)
W	Travail	(J)
\dot{W}	Puissance électrique	(W)
ρ	Masse volumique de l'air	(kg/m ³)
ϕ	Facteur d'exergie chimique	-
η_m	Rendement mécanique	%
η_{decha}	Rendement pendant le processus de la décharge des batteries	
$\eta_{dc/ac}$	Rendement du convertisseur CC/CA	
η_{ref}	Rendement de référence du générateur photovoltaïque	
$\eta_{ex wt}$	Rendement exergétique de l'éolienne	(%)
ψ	Efficacité exergétique	(%)
η_{en}	Rendement énergétique	(%)
η_{cha}	Rendement pendant le processus de la charge des batteries	

Liste des abréviations

AM	Air Mass
AC	Alternating Current
Bat	Batterie
cha	Charge
DC	Direct Current
DG	Diesel Generator
DOD	Profondeur de décharge de la batterie
dét	Détruite
ex/en	Exergie/énergie
HOMER	Hybrid Optimisation Model for Electric Renewable
in	Entrée
ke	Cinétique
LPSP	Loss of power supply probability
max	Maximum
SEH	Système énergétique hybride
NOCT	Conditions nominales des températures des panneaux photovoltaïques
NPC	Net Present Cost ou Valeur Actuelle Nette (VAN)
out	Sortie
PV	Photovoltaïque
Pc	Puissance crête
STC	Conditions standards d'essai des panneaux photovoltaïques
SOC	Etat de charge de batterie
SMC	Sunny Mini Central
WT	Turbine Éolienne
WB	Windy Boy
ΔT	Pas de temps
o	Etat de référence

Introduction générale

La demande énergétique mondiale continue d'augmenter. Les prix des énergies fossiles sont instables et incertains. Selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), la consommation d'énergie mondiale augmentera de 37 % d'ici 2040. En outre, on s'attend à une augmentation significative de la demande mondiale d'électricité de 80 % sur la période 2012-2040 [1]. En conséquence, les prix des combustibles fossiles devraient progresser au cours des 20 prochaines années pour atteindre 215 dollars le baril en 2035 [2]. Cette demande croissante d'énergie a conduit à l'épuisement des combustibles fossiles. Ceci, à son tour, augmente les gaz à effet de serre. Les systèmes énergétiques ont intégré les sources renouvelables à petite et grande échelle telles que l'énergie solaire, éolienne, la biomasse et l'énergie marémotrice pour atténuer les problèmes susmentionnés à l'échelle mondiale [3]. En 2040, les sources renouvelables devraient représenter 40 % du bouquet énergétique mondial.

La fiabilité des sources renouvelables est un défi majeur dû principalement à l'inadéquation entre la demande et l'offre d'énergie [4]. Aujourd'hui, les politiques énergétiques actuelles se concentrent sur le concept d'efficacité énergétique et de combustibles à faible teneur en carbone. La pénétration des technologies à faible teneur en carbone au cours des dernières années et l'amélioration de l'efficacité des systèmes de conversion de l'énergie n'ont fait que ralentir l'augmentation du prix du pétrole et la croissance de la demande.

Il est vrai que les prix de l'énergie sont fortement liés à l'agitation dans certaines régions du monde, y compris le Moyen-Orient et l'Afrique du Nord (MENA). Les pays exportateurs de pétrole de cette région peuvent bénéficier de la hausse des prix du pétrole, tandis que les pays fragiles peuvent être désavantagés. Cependant, la guerre entre la Russie et l'Ukraine se répercute dans toutes les régions du monde. Ces deux pays étant d'importants producteurs de matières premières, les perturbations ont provoqué une flambée des prix mondiaux, notamment du pétrole et du gaz naturel et l'ensemble de l'économie mondiale va ressentir les effets du ralentissement de la croissance et de l'accélération de l'inflation.

Les fluctuations des prix des combustibles fossiles au cours de la dernière décennie, ainsi que la pénurie et l'épuisement à venir ont renforcé les inquiétudes quant à la sécurité de l'approvisionnement énergétique futur. À cette fin, les politiques énergétiques avancées, dans de nombreux pays, ont été basées sur le développement de ressources énergétiques renouvelables et durables [5-9]. La vision ambitieuse de l'autonomie en énergie renouvelable hors réseau des régions éloignées ne s'est pas encore concrétisée. Le développement de systèmes complets de production d'énergie serait nécessaire pour atteindre un tel objectif. En Algérie, il existe un grand intérêt pour le développement des technologies d'énergie renouvelable, et plus particulièrement le concept hybride. Suivant cette approche, l'Algérie a annoncé, en mars 2011, un programme très prometteur pour développer et étendre l'utilisation des énergies renouvelables afin de passer de l'ère des combustibles fossiles à l'ère des énergies vertes d'ici 2030.

Pour ce faire, un projet d'une puissance totale de 2 000 MW, dans le sud du pays qui consiste en la réalisation de 14 centrales solaires photovoltaïques réparties sur 11 wilayas, d'une puissance unitaire variant entre 80 et 220 MW, en plus des raccordements au réseau de transport électrique [10]. Cette installation d'énergies renouvelables (EnR) prévue, au niveau national, bien plus élevée que les 589,7 MW recensés dans le bilan établi par le Commissariat

aux énergies renouvelables et à l'efficacité énergétique (CEREFÉ) sur toute la période allant de 2011 à décembre 2022. Par conséquent, l'énergie solaire est l'objectif principal du programme algérien d'énergie renouvelable.

De jour en jour, l'utilisation de la technologie CSP et de la technologie photovoltaïques dans le monde entier, en particulier en Espagne, en Allemagne et aux États-Unis, a montré une réduction significative des coûts grâce à des améliorations de l'efficacité [11,12]. Alors que les options CSP sont davantage privilégiées pour les applications à grande échelle, le photovoltaïque a prouvé ses performances à petite échelle et pour une utilisation hors réseau dans les régions éloignées.

La compétitivité des applications à petite échelle, la facilité de maintenance d'installation et d'entretien, et le faible coût de l'énergie dans les régions où le réseau électrique n'est pas disponible sont les avantages les plus importants de la technologie solaire photovoltaïque [13].

Dans le cas de l'Algérie, ce dernier avantage présente un intérêt particulier en raison de sa grande superficie et de sa faible densité de population. Par exemple, la densité de population dans la partie du Sahara est de moins d'une personne par kilomètre carré. Couvrir une région aussi vaste avec un réseau électrique est un investissement coûteux. Même, si le coût de l'électricité sera plus élevé que les valeurs moyennes actuelle. Dans un tel contexte, les panneaux photovoltaïques seraient la meilleure solution pour la population et le gouvernement.

Des études ont indiqué qu'environ la moitié de la réduction des coûts peut être obtenu, tandis que l'autre moitié relève des activités de R&D [11]. À cette fin, la plupart des activités récentes de R&D dans le monde entier se concentrent sur la combinaison du solaire photovoltaïque avec d'autres sources d'énergie, car c'est la seule alternative pour surmonter le problème du coût élevé de l'électricité. De nombreux pays montrent aujourd'hui un intérêt croissant pour le développement de systèmes d'énergie hybrides. Les marchés émergents tels que la Chine, l'Inde, l'Indonésie, la Tunisie, l'Algérie et l'Arabie saoudite en sont d'excellents exemples. Pour ce qui concerne la Chine, Li et al [14] ont étudié la faisabilité d'un système hybride PV-Eolien avec système de stockage pour électrifier un foyer dans la région d'Urumqi. Comparée aux centrales photovoltaïques et éoliennes la configuration proposée a montré une réduction du coût total net actuel d'environ 10 %.

La mise en place de système réel hybride multi sources photovoltaïque-éolien-diesel avec stockage d'énergie dans les régions isolées est précédée d'une étude de faisabilité technique. Par contre, la complexité des composants utilisés pour représenter un système hybride rend le développement d'une stratégie de gestion et de contrôle une tâche difficile, surtout en termes de validation des modèles utilisés. Dans ce contexte, le développement d'un programme de gestion d'énergie et des modèles peut rendre possible la simulation du fonctionnement de ces systèmes pour une application envisagée. Des améliorations dans la modélisation et la conception sont toujours nécessaires pour rendre ces systèmes plus compétitifs dans les régions isolées. Ainsi, le travail de recherche présenté dans cette thèse est une contribution à la simulation et à l'analyse des performances d'un système hybride photovoltaïque-éolien-diesel avec stockage par batteries.

Dans cette thèse, le premier aspect de nos activités concernera à déterminer la taille optimale de ce système via l'algorithme d'optimisation du logiciel HOMER, en tenant compte des contraintes technico-économiques. Nous avons étudié la faisabilité d'un système hybride PV- éolien - diesel et batterie dans le climat du sud de l'Algérie en analysant les performances de chaque composant. Pour ce faire, des données météorologiques comprenant la température ambiante, l'intensité du rayonnement solaire et la vitesse du vent ont été utilisées et un profil de charge prédéterminé appliqués pour les simulations. Le deuxième axe consistera à la modélisation du système d'alimentation électrique hybride multi-sources. La gestion d'énergie sera également un axe majeur de nos travaux de recherche, visant à optimiser le fonctionnement du système hybride (micro réseau) en considérant les différentes contraintes liées à la dégradation des composants et aux conditions d'exploitation afin de maximiser leur durée de vie.

Le travail présenté ici est organisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre décrit le contexte et un état de l'art sur les performances des systèmes d'énergie hybride autonome où nous présentons les systèmes hybrides, les différentes architectures des systèmes électriques multi-sources autonomes. Puis nous donnons une étude descriptive des sources d'énergies qui composent ces systèmes. Des exemples de systèmes déjà installés sont cités et une étude documentaire est réalisée. Finalement, la dernière section de ce chapitre est consacrée à une classification des différentes stratégies de gestion proposée dans la littérature.

Le deuxième chapitre concerne la conception et l'optimisation technico-économique du système électrique hybride, elle est réalisée à l'aide du logiciel HOMER pour un village isolé de l'Algérie. La demande de puissance est estimée et les coûts des composants de l'équipement sont spécifiés après des recherches approfondies, de sorte que la conception du système peut être réalisée. Le micro-réseau se compose de photovoltaïque, éolienne, batteries, groupe électrogène diesel, convertisseur et des charges. Quelques informations sur la situation du site sont données et les besoins en énergie électrique des habitants sont déterminés.

Dans le troisième chapitre, la configuration du système est présentée, ainsi que ses caractéristiques de base et son fonctionnement ensuite, le système est modélisé dans l'environnement MATLAB. Chaque composant est présenté ainsi que le modèle de contrôle de la stratégie opérationnelle du système. Les stratégies de gestion de l'énergie sont cruciales pour le fonctionnement des systèmes énergétiques hybrides. Ce chapitre se concentre principalement sur la mise en œuvre d'un modèle développé pour la gestion de l'énergie. Une fois les modèles développés et implémentés dans l'outil, la dernière partie elle est réservée à la simulation des éléments du système hybride et du système complet. Des simulations par Matlab sont effectuées en vue de confirmer les bonnes performances du système hybride à réagir face à une demande variable. Enfin nous terminons donc ce chapitre par des résultats de simulation du comportement de SEH, face aux variations climatiques et de la charge électrique et les résultats de la présente analyse sont discutés.

Dans le chapitre 4, des modélisations énergétiques et exergetiques, ont été réalisés et appliquées au site étudié, les évaluations des performances des sous-systèmes sont données à

travers le calcul de leurs rendements exergetiques et énergetiques, depuis la source d'énergie jusqu'à la production finale de l'électricité à partir d'un mix énergétique de deux sources propres et une autre qui est fossile a été réalisée. Les analyses sont essentiellement réalisées pour les composants principaux de génération d'énergie électrique. Les simulations pour les performances sont effectuées et leurs résultats sont analysés et discutés, l'analyse des résultats a permis d'orienter les travaux pour la suite de la thèse.

Enfin, des conclusions sont tirées concernant le système, sa conception et son modèle, et certains de ses aspects nécessitant des améliorations supplémentaires dans le cadre de travaux futurs sont indiqués, des perspectives, des annexes et une section des références bibliographique utilisées.

Chapitre 1 : Contexte et Etat de l'art des performances des systèmes énergétiques hybrides

L'objectif de ce premier chapitre est de présenter le contexte et une revue de la littérature des performances des systèmes énergétiques. Nous décrivons les différents défis énergétiques mondiaux à travers les contextes énergétiques, plus particulièrement celui de l'Algérie. Ensuite, nous présenterons un état de l'art des différents systèmes d'énergie hybride existants et des technologies de stockage d'énergie. Nous concentrerons sur les éléments fondamentaux qui serviront à mieux comprendre notre travail, dans un premier temps de présenter le cadre physique de ce travail de thèse dédié à l'étude des performances des composants de ces systèmes, notamment le système photovoltaïque, le système éolien, le générateur diesel, les batteries et les convertisseurs. Nous discuterons des différentes solutions proposées par les chercheurs pour la gestion d'énergie au sein de ces systèmes. Ces différentes stratégies varient avec les différentes architectures de système multi-sources et surtout avec les objectifs recherchés par les utilisateurs.

1.1 Introduction

La recherche sur les énergies renouvelables suscite une attention croissante dans le monde, car la croissance démographique exerce une pression importante sur les besoins énergétiques et environnementaux. L'Algérie s'est engagée sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile, à travers le lancement d'un programme ambitieux pour le développement des énergies renouvelables, parce qu'elles présentent beaucoup d'avantages par rapport aux sources de conversion classique, surtout du point de vue environnemental.

Dans ce chapitre, nous exposons les enjeux énergétiques mondiaux et algériens, ainsi que les performances des systèmes hybrides de production d'électricité à base d'énergies renouvelables. Nous intéressons plus particulièrement aux systèmes éoliens, photovoltaïques et diesel. Cette section passe en revue la littérature relative à l'optimisation et à la gestion de l'énergie des systèmes électriques hybrides basés sur les énergies renouvelables pour les applications hors réseau. Dans le cadre de cette recherche seuls les composants du système énergétique, qui comprennent le solaire photovoltaïque (PV), l'éolien, générateur diesel(DG) et batteries comme moyen de stockage, sont passés en revue et retenues. Les mérites et démérites des différentes technologies sont révélés, expliquant la motivation pour l'utilisation des technologies choisies.

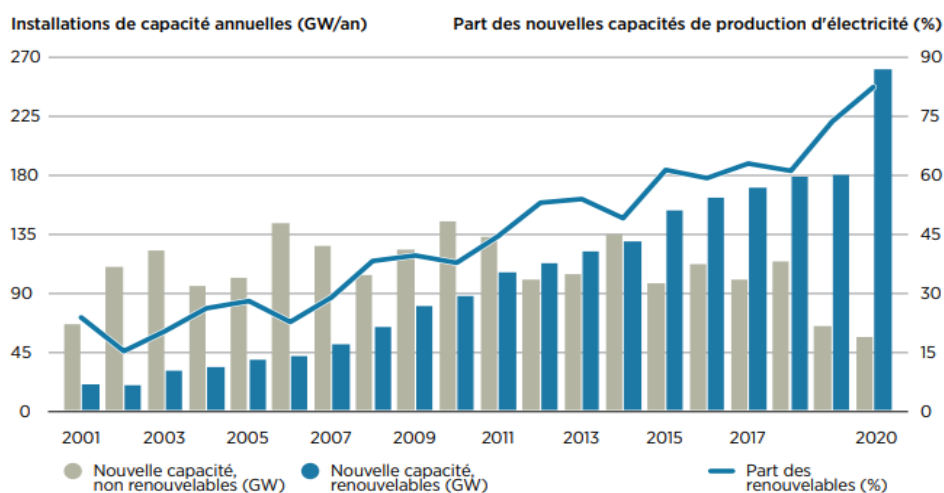
1.2 Le contexte de la transition énergétique

La transition énergétique comporte nombre de défis dont le premier est une augmentation mondiale de la demande d'électricité. Le second est une réduction des émissions de CO₂ et des énergies fossiles. Selon l'approche centrée sur les énergies renouvelables adoptée par l'IRENA, les scientifiques sont catégoriques : d'ici 2030, les émissions mondiales de gaz à effet de serre devront être réduites de 45 % par rapport aux niveaux de 2010. Plusieurs orientations façonnent la transition énergétique en cours et donnent une idée de la direction qu'elle prend. Premièrement, les coûts des technologies renouvelables ont chuté au point que les nouvelles capacités de production d'électricité à partir de combustibles fossiles ne sont plus une alternative intéressante. Deuxièmement, les progrès réalisés dans le secteur de l'énergie exercent une influence sur les utilisations finales, ce qui élargit les possibilités grâce au grand nombre de solutions renouvelables désormais disponibles. Troisièmement, il existe un consensus sur le fait qu'une transition énergétique reposant sur des sources d'énergie renouvelables et des technologies performantes est notre seule chance de nous donner une chance de limiter le réchauffement climatique à 1,5°C d'ici 2050[15]. Les prévisions de l'IRENA pour les transitions énergétiques mondiales exposent les pistes permettant de sortir de la crise climatique et de progresser vers un monde plus résilient et plus équitable. Il montre précisément les options dont nous disposons aujourd'hui et les faiblesses qui doivent être comblées. L'analyse et les options présentées donnent la priorité aux options de limitation des émissions déjà présentes et à celles qui ont le plus de chances de devenir viables dans les années à venir. Pour toutes les utilisations de l'énergie, une solution possible est proposée en vue de limiter l'empreinte carbone, avec l'électrification et le rendement énergétique comme principaux facteurs, soutenus par les

énergies renouvelables. Les prix des énergies fossiles sont instables et incertains. La libéralisation du marché électrique et une conscience environnementale des acteurs mondiaux sont des leviers au développement des énergies renouvelables. Ces dernières se développent à un rythme rapide dans le monde. Elles ont atteint une maturité technique qui leur permet de devenir un segment important de l'industrie de l'énergie. Leur insertion dans le mix énergétique pose de nouveaux défis par rapport aux sources d'énergie traditionnelles. L'intégration des sources d'énergies renouvelables (SER) dans les systèmes de production est devenue indispensable afin de répondre aux demandes croissantes de l'énergie électrique. Entre-temps, l'augmentation progressive de la consommation d'énergie et l'épuisement rapide des ressources énergétiques conventionnelles sont autant de raisons de réduire la dépendance à l'égard des combustibles fossiles [16]. Dans ce cas, les technologies des énergies renouvelables peuvent être l'avenir de la production d'électricité car elles sont remplaçables et respectueuses de l'environnement.

1.2.1 La demande mondiale d'énergie électrique

La demande énergétique mondiale continue d'augmenter eu égard à une industrialisation massive. Les besoins en énergie pour les années à venir ne feront que confirmer, voire amplifier, cette tendance, notamment compte tenu de l'évolution démographique et du développement industriel de certains pays en particulier asiatiques. D'après les statistiques de l'IRENA, les technologies de production d'énergie renouvelable dominent désormais les nouvelles capacités de production d'électricité à l'échelle mondiale, car elles sont devenues les sources d'électricité les moins chères sur de nombreux marchés. Un niveau record de 260 gigawatts (GW) de capacité de production à base d'énergies renouvelables a été ajouté dans le monde en 2020, soit plus de quatre fois celle provenant d'autres sources (IRENA, 2021a). La figure 1.1 ci-dessous illustre cette évolution.



Source : IRENA, 2021a

Figure 1-1 : L'évolution des nouvelles capacités de production d'électricité (en GW) et part des renouvelables (%) installées dans le monde, 2001-2020.

D'après le rapport (IRENA, 2019) dans le monde entier des innovations dans le domaine des technologies, des politiques et des marchés sont mises en œuvre. Des progrès significatifs

ont été réalisés en matière de mobilité électrique, de stockage sur batterie, de technologies numériques et d'intelligence artificielle, entre autres. Pour faire face à la variabilité des énergies renouvelables, des nouveaux réseaux intelligents, allant des petits aux grands réseaux, soutenus par des politiques et des marchés habilitants, améliorent la capacité du secteur de l'électricité. D'ici 2050, l'électricité sera le principal vecteur énergétique, passant d'une part de 21 % de la consommation totale d'énergie finale en 2018 à plus de 50 % en 2050. Actuellement, la plupart des besoins énergétiques humains sont les ressources fossiles, dont le pétrole, le gaz et le charbon [21].

Des centres de production d'énergie électrique sont mis en œuvres, pour faire face à la croissance de la consommation d'énergie dans le monde. Il y a deux manières principales de produire l'énergie électrique : la première approche consiste à produire de l'énergie électrique en des points limités tels qu'un réseau central et de la transférer dans tout le réseau. La plupart de ces centrales électriques utilisent des combustibles fossiles pour la conversion de l'énergie, et leur problème capital est l'émission de gaz à effet de serre et la pollution de l'environnement, qui cause réchauffement de la planète. La deuxième approche consiste à utiliser des énergies renouvelables. Le transfert centralisé par les grandes centrales électriques augmente les pertes [22]. Les énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne et solaire réduisent considérablement les problèmes environnementaux. Cependant, en raison des natures intermittentes et variables des sources renouvelables, la stabilité et la sécurité du système sont affectées [23].

1.2.2 Les énergies renouvelables

Fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau, les marées ou encore la croissance des végétaux, les énergies renouvelables sont des ressources perpétuelles qui ne présentent aucun souci d'un manque de disponibilité à long terme et qui n'engendrent pas ou peu de déchets ou d'émissions polluantes. Le solaire (photovoltaïque, ou thermique), l'hydroélectricité, l'éolien, la biomasse, la géothermie sont des énergies à flux inépuisable par rapport aux combustibles fossiles [24].

1.2.2.1 L'évolution de la production mondiale de l'électricité par les énergies renouvelables

Le monde montre une augmentation considérable de l'utilisation des énergies renouvelables ces dernières années. Selon des capacités cumulées installées, la contribution de l'hydroélectricité reste dominante (44,6%) dans la production d'électricité renouvelable, il faut souligner que les parts, du solaire PV et de l'éolien, ont progressivement augmentées (figure 1-2), la place de l'électricité éolienne (23,5%) et solaire photovoltaïque (22,8%) en 2019. Quant à la contribution de la biomasse et de la géothermie à la production de d'électricité renouvelable, elle reste faible (5,5 % en 2019). Fin 2019, la génération d'électricité provenant de ressources renouvelables était d'environ 2537 GW [25].

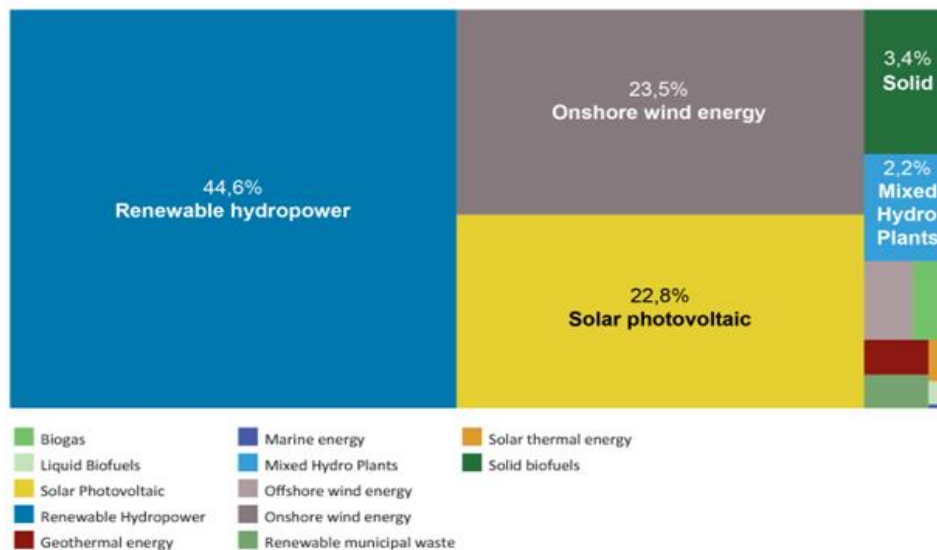


Figure 1-2 : Mix d'électricité d'origine renouvelable et part des différentes technologies dans la production mondiale (2019).

L'hydroélectricité, l'éolien et le solaire à priori peuvent concourir à une production massive d'électricité et permettre ainsi une transition énergétique avec des objectifs ambitieux quant à intégration et à la contribution des énergies renouvelables. Les nouvelles capacités de génération d'électricité renouvelable installées en 2019, indiquent que le solaire continue d'évoluer en tête avec 97 GW supplémentaires. Ceci représente en fait une augmentation de 20 % par rapport à la capacité cumulée en 2018 (489 GW), suivi de l'éolien qui n'a progressé que de 10 %, soit 59 GW de nouvelles capacités, l'hydroélectricité de 1% (12 GW), la biomasse de 5% (7GW) et la Géothermie (0.7 GW).

1.2.2.1.1 L'éolien

La maîtrise des techniques de l'éolien en mer étant encore réservée aux pays industriels précurseurs (Danemark, Royaume unis, Allemagne,...Chine), le gros des nouvelles capacités dans le monde reste toutefois à base d'éolien terrestre (Onshore). En effet, c'est l'Asie du sud-est, qui aura une contribution notable aux capacités globales projetées à l'horizon 2050 (5044 GW) (figure1-3) avec un peu plus de la moitié (2646 GW), suivie par l'Amérique du nord (1146 GW) et l'Europe (483 GW) [26].

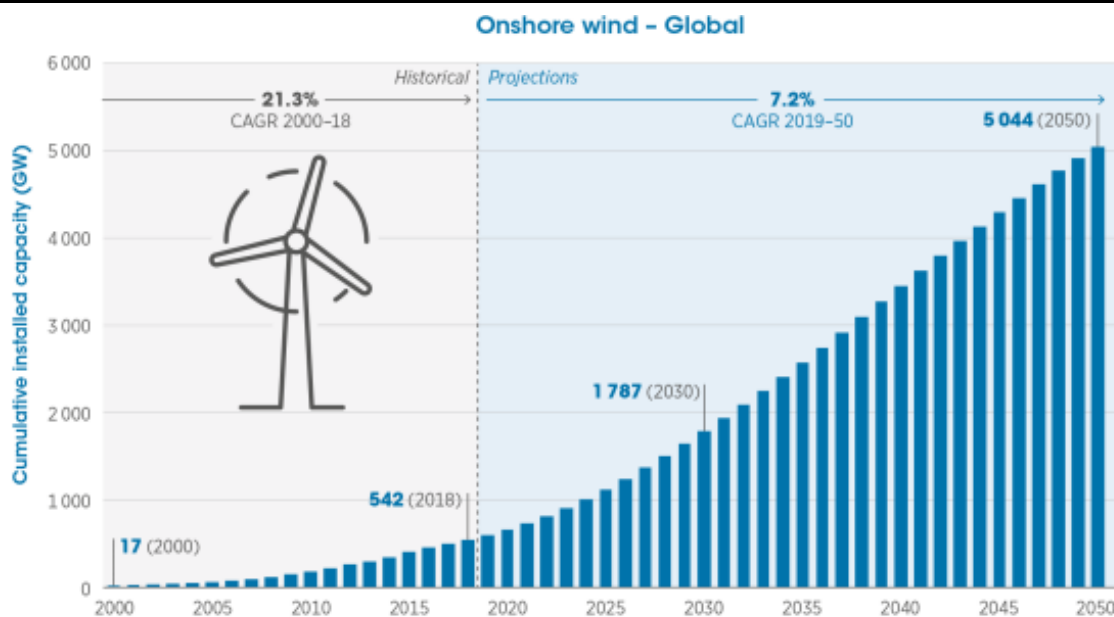
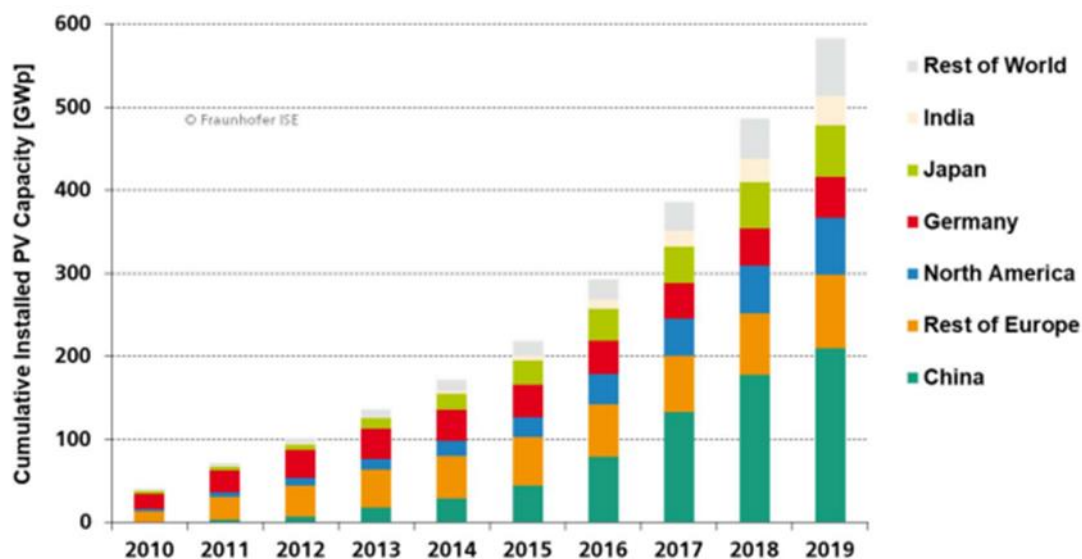


Figure 1-3 : Projection à l'horizon 2050 de l'évolution des capacités cumulées d'éolien terrestre (Onshore) installées dans le monde (source IRENA)

1.2.2.1.2 Solaire photovoltaïque et prévisions d'évolution

Le solaire photovoltaïque a amorcé sur la même période une progression remarquable pour aboutir à une capacité cumulée évaluée à 580 GW en 2019 [27]. Cela étant sous l'effet de multiples considérations à la fois techniques et économiques, dont la plus directe réside dans la chute remarquable des coûts des divers équipements impliqués dans les installations photovoltaïque ainsi que la facilité relative quant à leur déploiement [28]. Enfin, il y a lieu de souligner également que le gisement solaire exploitable pour une conversion photovoltaïque (spectre lumineux), est plus ou moins présent à travers toutes les régions du monde, d'où le développement notable du PV même dans les régions nordiques à faible ensoleillement. 168 GW de nouvelles installations photovoltaïques ont été raccordées dans le Monde en 2020 (138 GW en 2020). En 2021, la Chine ajoute 55 GW au plus grand parc photovoltaïque mondial, qui dépasse les 300 GW. En 2021, le parc européen a augmenté de 32 GW et atteint désormais 200 GW. En Europe, les Pays-Bas raccorde 3,7 GW, l'Espagne a ajouté plus de 4,8 GW à son parc photovoltaïque, et l'Allemagne en a ajouté 6 GW. En 2021, la croissance mondiale est très localisée en Chine, suivie par les zones Asie/Pacifique et Amériques. La zone Europe a connu une croissance significative. La zone Afrique/Moyen Orient repart à la hausse.

Le graphique (1-4) illustre l'évolution de la capacité installée d'énergie solaire photovoltaïque dans le monde de 2010 à 2019, en gigawatts. On peut constater que la capacité en énergie solaire photovoltaïque a grandi durant la période en question, passant de moins de 50 gigawatts en 2010 à plus de 550 gigawatts en 2019. En Chine, environ 50 gigawatts de puissance solaire photovoltaïque ont été nouvellement installés en 2019.



Data: IRENA 2020. Graph: PSE Projects GmbH 2020

Figure 1-4 : Evolution des capacités de production d'électricité solaire photovoltaïque à travers le monde (2010-2019).

La croissance dominante du solaire photovoltaïque par rapport à l'ensemble des autres ressources renouvelables, apparaît en fait également à travers la plupart des scénarios prévisionnels, notamment à l'horizon 2050 [27]. La capacité cumulée prévue de 8519 GW en 2050, est 30 % supérieure à celle de l'éolien à la même échéance, avec une contribution toujours prépondérante de l'Asie (4837 GW), suivie de l'Amérique du nord (1728 GW), l'Europe (891 GW), l'Afrique (673 GW) et enfin l'Amérique latine (281 GW) (Figure 1-5).

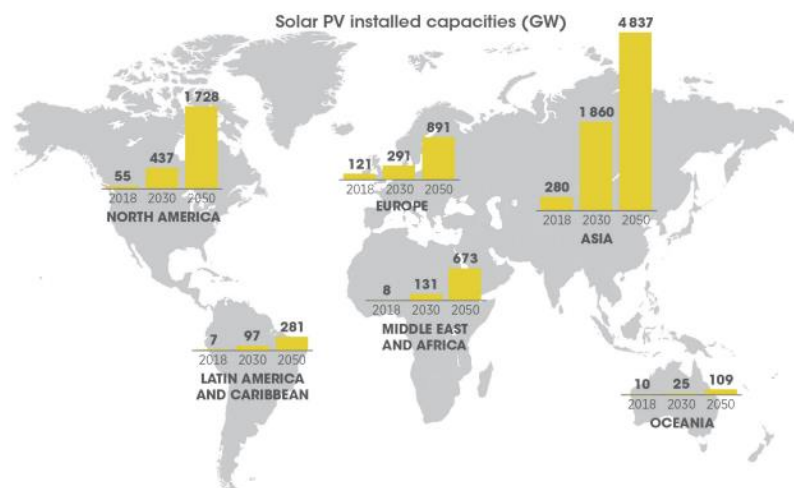


Figure 1-5 : Projection à l'horizon 2050 des capacités cumulées de solaire photovoltaïque installées par région dans le monde (source IRENA).

1.2.3 Stockage de l'énergie électrique et capacité installée dans le monde

À l'échelle mondiale, divers technologies de stockage en sont à différents stades de maturité et sont applicables à différentes échelles de capacité. Elles permettent un stockage en masse de l'énergie électrique [31-32], Le stockage hydroélectrique par pompage convient aux

applications à grande échelle et représente 96% de la capacité totale installée dans le monde en 2017, avec 153 GW en exploitation (figure 1-6). Le stockage d'énergie thermique occupe la seconde place avec une puissance installée de 2,3 GW, dont les 75 % sont déployés par la technologie de stockage thermique au sel fondu. Les batteries électrochimiques sont la troisième méthode de stockage la plus développée avec une capacité de puissance globale de 2,3 GW, suivie du stockage électromécanique avec 1,3 GW de puissance installée globale. Finalement, une technologie prometteuse de stockage de l'énergie est celle de l'hydrogène, qui ne représente qu'une faible part par rapport aux autres technologies, avec près de 15 MW de capacité de stockage mondiale installée.

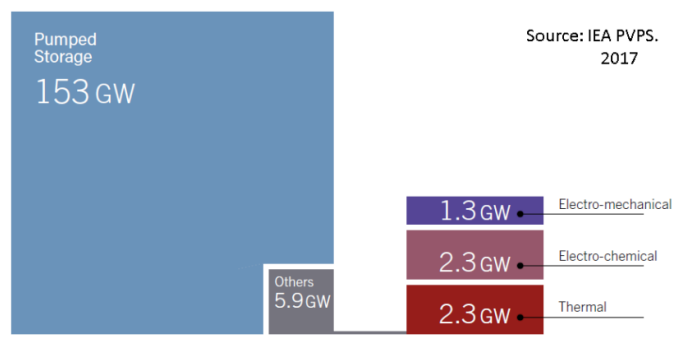


Figure 1-6 : Capacités de stockage par technologie dans le monde (2017).

Le stockage électrochimique par batteries, reste tout de même l'un des moyens les plus appropriés en la matière et fait l'objet d'investissements considérables en matière de recherche & développement [33]. Les modèles à base de Lithium-ion, de capacités unitaires assez significatives (quelques centaines de KWh à quelques MWh), sont devenus des éléments importants dans l'accompagnement des installations solaires photovoltaïques ou éoliennes, connectées au réseau ou autonomes et ce, pour différer l'usage de capacités de plus en plus importantes d'électricité renouvelable [38]. Celles-ci étant plutôt situées à l'échelle locale et couvrent des besoins énergétiques compatibles avec ceux de certains secteurs (résidentiel, petites collectivités, alimentations de secours...). Un tel moyen de stockage, favorise en fait l'émergence du mode d'autoconsommation et contribue déjà à assurer un complément notable au développement des réseaux électriques, notamment lorsqu'il s'agit d'y accueillir des productions intermittentes et décentralisées d'électricité à base de ressources renouvelables. A titre d'exemple l'une des plus grandes installations de stockage à base de batteries Tesla (100 MW/ 129MWh), a été récemment déployée en Australie pour soutenir un ensemble de fermes éoliennes alimentant quelques 30.000 foyers [34].

1.2.4 Contexte énergétique algérien

Le contexte énergétique national est marqué par l'augmentation de la dépendance énergétique et l'insécurité économique et, d'autre part, par les changements climatiques dus à l'inefficacité énergétique et à la faible contribution des énergies renouvelables.

L'urgence dans notre pays pour les énergies renouvelables se fait ressentir en raison du réchauffement climatique, encore plus en raison des mutations technologiques dans le monde mais en raison de l'épuisement des ressources fossiles.

Face à ces risques, la recherche de sources d'énergies alternatives reste une préoccupation majeure pour les décideurs du secteur de l'électricité en Algérie.

Les prix des générateurs d'énergie renouvelable sont de plus en plus intéressants et la fiabilité croissante de ces systèmes a favorisé l'utilisation de ces sources pour la génération d'électricité dans les régions éloignées. Un des facteurs qui restreint l'utilisation des énergies renouvelables (solaire, éolienne) est la nature variable des ressources. Les fluctuations de la charge en fonction des périodes annuelles, saisonnières ou journalières ne sont pas nécessairement corrélées aux ressources. Pour les régions isolées, la solution est certainement le couplage de plusieurs sources d'énergie ([35], [36]). Parmi les solutions qui pourraient être envisagées, nous proposons d'utiliser des sources d'énergies renouvelables accompagnées des groupes électrogènes pour alimenter ces zones rurales isolées, le pays prend de plus en plus de mesures pour assurer une couverture sûre, fiable, rentable et respectueuse de l'environnement pour répondre aux besoins énergétiques de la population, tant dans les zones urbaines que rurales, en augmentant la production d'électricité.

1.2.4.1 Génération autonome d'électricité solaire en milieu rural

Des petites installations de génération autonome d'électricité solaire photovoltaïque, avec une capacité de stockage adaptée par batteries, peuvent être rendues disponibles en faveur de certaines populations en milieu rural, notamment les nomades, Toutefois, l'expérience des milliers de kits solaires ainsi distribués, montre qu'un grand nombre de ces derniers ont été mis de côté par les bénéficiaires dès la première petite panne, faute de services de maintenance appropriés, alors qu'il s'agit là d'un gisement d'emploi qui demande juste à être bien exploité par la jeunesse locale, moyennant des formations adaptées et des aides de l'état.

1.2.4.2 Génération autonome d'électricité solaire et activités agricoles

En plus des kits solaires évoqués ci-dessus, qui peuvent répondre à certains besoins particuliers du monde agricole en Algérie, ce dernier demande également à être doté d'installations spécifiques de génération autonome d'électricité solaire, pouvant aider à améliorer de manière substantielle son indépendance énergétique vis-à-vis du réseau électrique. Dans cette optique, le pompage solaire de l'eau constitue un bon exemple, dans la mesure où il est devenu un dispositif fiable et parfaitement mature sur le plan technique. En effet, celui-ci n'exige pas le recours aux moyens de stockage directs tels que les batteries dont l'entretien et la durée de vie peuvent poser problème, du fait que la fonction essentielle de pompage peut être effectuée au fil du soleil. Dans ce cas, c'est le réservoir cumulant l'eau pompée elle-même qui fait office de moyen de stockage (indirect), lequel en plus peut être aménagé avec une surélévation appropriée afin de permettre l'irrigation d'une surface donnée par simple gravitation. Dans le même ordre d'idées, il est aisé d'imaginer d'autres options quant à une utilisation ponctuelle et assez efficace de la génération autonome d'électricité solaire, dans le monde agricole. Le constat précédent, peut être élargi à l'ensemble des secteurs d'activité, pour lesquels une multitude d'autres applications où la génération autonome d'électricité solaire, peut être économiquement viable comparée à une alimentation directe à partir du réseau. Ceci est notamment le cas pour répondre à des besoins ponctuels et très limités en énergie électrique (relais isolés de transmission, éclairage solaire, balisage, équipements électriques mobiles....).

1.2.4.3 Les réseaux électriques isolés du sud Algérien (RIS)

On regroupe sous l'appellation réseau isolé tout réseau électrique moyenne ou haute tension, alimenté par une centrale électrique (diésel ou turbine à gaz), pouvant fonctionner de façon autonome. Le parc de production des réseaux isolés du sud est composé essentiellement des générateurs diesel, cependant il est renforcé par des turbines à gaz mobiles dans certains sites dans lesquels les réseaux de gaz sont disponibles. Il s'agit de 26 sites du grand Sud, alimentés par des réseaux locaux à travers des groupes diesels ou des turbines à gaz compte tenu des distances mises en jeu et des niveaux de consommation relativement faibles. Pour faire face à l'évolution importante de la demande électrique des localités isolées du Sud, plusieurs centrales turbines à gaz et groupes diesel ont été installées entre 2012 et 2015. Ces capacités de production ont été implantées au niveau des différents sites isolés du Sud et contribuent fortement à la sécurisation de leur alimentation en énergie électrique, au développement local et à l'amélioration des conditions de vie de ces régions désenclavées [37]. La répartition du parc de production des réseaux isolés du sud pour l'année 2012 est présentée dans le tableau 1-1.

Tableau 1-1: Le parc de production des réseaux isolés du sud pour l'année 2012[38].

Moyen de production	Puissance installée (MW)	Taux (%)
Diesel	269	97.26
Turbine à gaz	9	3,23
Total	278	100

La puissance totale installée est développée pour atteindre 391 MW en 2013; cette puissance ayant permis de répondre à la puissance maximale appelée qui a atteint 208 MW [37]. La contrainte climatique qui est la température a une influence sur la consommation. En effet, les températures dépassant parfois plus de 50 degrés au sud fait que les systèmes de refroidissement (climatiseurs, réfrigérateurs, etc.) fonctionnent à plein régime, contribuent notablement à l'augmentation de la demande et fragilisent considérablement les capacités d'approvisionnement électrique des réseaux isolés.

1.2.4.4 La transition énergétique et ses enjeux

La transition énergétique vise à préparer l'après-pétrole et à instaurer un nouveau modèle énergétique algérien, plus robuste et plus durable face aux enjeux d'approvisionnement en énergie, à l'évolution des prix, à l'épuisement des ressources et aux impératifs de la protection de l'environnement.

Selon le rapport de 2020 [39], le succès de la transition énergétique nécessitera un environnement propice à l'innovation et à l'entrepreneuriat. Le recours aux nouvelles énergies renouvelables devra par ailleurs s'accompagner du développement de filières industrielles compétitives au niveau international.

En 2011, le Gouvernement a lancé un programme de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique qui consiste à installer une puissance énergétique d'origine renouvelable de près de 22 000 MW entre 2011 et 2030 dont 12 000 MW seront dédiés à la demande nationale en électricité et 10 000 MW à l'exportation. Ceci étant sur la base d'une estimation de l'évolution de la puissance installée préalablement établie (figure 1.7)

En dépit de l'importance qui lui a été accordée, ce programme n'a pas atteint ses objectifs. Le but initial de 40% de la production électrique d'origine renouvelable à l'horizon 2030 a été revu à la baisse, en 2015, à 27%. L'Algérie vise à réaliser cet objectif dans les délais fixés.

Afin d'accélérer le développement des énergies renouvelables, un Haut-commissariat aux Energies renouvelables, rattaché au Premier ministre, et un Ministère de la Transition énergétique et des Energies renouvelables ont été créés en 2019 et 2020 respectivement. La feuille de route de ce nouveau ministère prévoit d'atteindre un taux d'intégration dans la production d'électricité de 30% à l'horizon 2030 en commençant par la mise en œuvre de 1 000 MW d'électricité renouvelable.



Figure 1-7: Evolution estimée du parc national de production d'électricité, selon le Ministère de l'Energie et des Mines (MEM).

En ce qui concerne l'Algérie, le bilan réalisé par le Haut-Commissariat au Développement de la Steppe (HCDS) sur la base des questionnaires adressés à tous les secteurs concernés, montre que vers la fin 2019, la capacité cumulée des installations en hors réseau, est évaluée à 21,4 MWc, soit 5,5 % par rapport à l'ensemble de la production d'électricité renouvelable connectée au réseau (389,3 MWc y compris l'éolien et le solaire thermique CSP).

1.2.4.5 Potentiel solaire de l'Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara).

L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m^2 est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m^2 /an au Nord et 2263 kWh/m^2 /an au sud du pays [40]. La répartition du potentiel solaire et éolien par région climatique au niveau du territoire algérien est présentée dans le tableau 1-2.

Tableau 1-2: Répartition du potentiel solaire et éolien en Algérie [41, 42-44].

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie%	4	10	36
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures /an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m^2/an)	1700	1900	2650
Energie éolienne moyenne récupérable (TWh/an)	1	4,5	31,5

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. L'irradiation correspond au flux d'énergie incidente sur une surface donnée, exprimée en W/m^2 . Sa connaissance pour un site d'implantation est indispensable pour évaluer le potentiel d'électricité solaire d'un projet photovoltaïque. L'Algérie, compte tenu de sa position géographique, dispose de l'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut même atteindre 3900 heures notamment dans les hauts plateaux et le Sahara. Ainsi, sur l'ensemble du territoire national, la figure (1.8) donne un aperçu sur la distribution de l'irradiation globale reçue par jour sur une surface horizontale d'un mètre carré qui varie entre 5.1 kWh au Nord et 6,6 kWh dans le Sud. Ces valeurs varient tout au long de l'année en fonction des saisons avec évidemment un maximum en été.

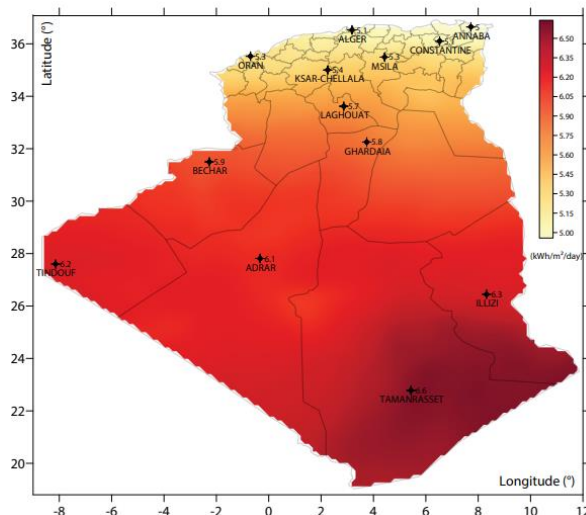


Figure 1-8 : Gisement solaire de l'Algérie (Irradiation globale journalière reçue sur un plan horizontal sur une surface d'un m²) [45].

1.2.4.6 Potentiel éolien de l'Algérie

L'Algérie à un régime de vent modéré (2 à 6,5 m/s). L'atlas éolien donne des informations sur le potentiel éolien à travers plusieurs régions du pays. Dans le sud, le site d'In Salah affiche une vitesse moyenne du vent de 6,4 m/s à côté d'Adrar qui enregistre 6,3 m/s. La wilaya d'Illizi, dotée d'une dizaine de stations, montre des vitesses dépassant les 5 m/s tandis que le site de Hassi R'Mel affiche des vitesses moyennes assez importantes atteignant 6,5 m/s. Quant au nord du pays, plusieurs microclimats sont également détectés d'ouest en est. Dans le cas des Hauts-Plateaux, il est constaté que dans l'extrême ouest, la région de Mecheria affiche une vitesse moyenne particulièrement intéressante de 5,6 m/s. Malgré un potentiel assez faible, le programme n'exclut pas l'éolien qui constitue le second axe de développement et dont la part devrait avoisiner les 3% de la production d'électricité en 2030.

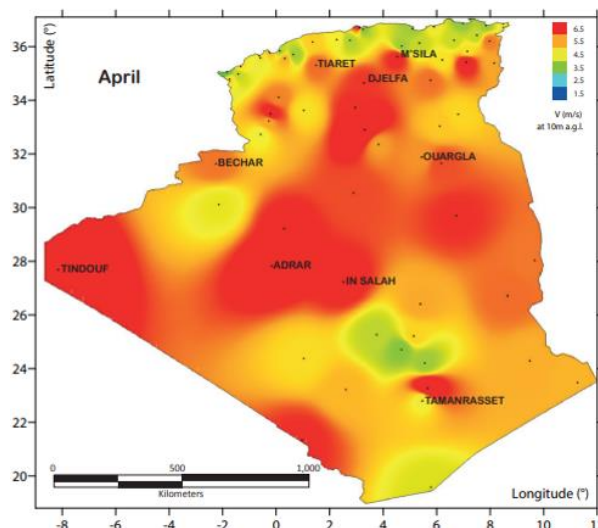


Figure 1-9 : Carte annuelle des vitesses de vent de l'Algérie à 10 m du sol [45].

1.2.4.7 Conception d'un système Hybride pour remplacer une installation diesel.

Le choix des énergies éolienne et solaire pour remplacer le diesel dans les réseaux isolés du sud est basé sur la vaste distribution de ces deux ressources naturelles à travers tout le territoire Algérien. A cet effet, la conception d'un système hybride solaire PV/éolien /générateur diesel consiste en trois unités, l'unité de production principale PV et l'éolien, l'unité de stockage et l'unité de production d'appoint, on peut maintenir un générateur diesel comme réserve (secours).

Afin d'aider efficacement à l'intégration au réseau des productions intermittentes d'électricité à base de ressources renouvelables, notamment le solaire photovoltaïque et l'éolien, il est recommandé d'introduire au niveau national, ne serait-ce qu'à titre d'installations pilotes, certaines techniques éprouvées en matière de stockage. Prévoir et planifier la réalisation d'installations de stockage avec des capacités appropriées est dans tous les cas fortement souhaité, pour optimiser le rendement des productions issues des énergies renouvelables.

1.3 Les systèmes d'énergie hybrides à énergies renouvelables

Les sources renouvelables générateurs d'énergie électrique provenant en particulier du vent et de soleil, est considérée comme une alternative de production intéressante dans les systèmes d'énergie électrique du monde d'aujourd'hui. Cependant, leur utilisation est limitée par la variabilité des ressources qui risque de diminuer leur fiabilité. En plus, les fluctuations de la charge selon les périodes annuelles ou journalières ne sont pas forcément corrélées avec les ressources énergétiques disponibles. Pour surmonter cette limite, la solution à retenir, en particulier pour les sites isolés, est certainement le recours et la combinaison de plusieurs sources, telles que les systèmes hybrides éolien-photovoltaïques diesel avec stockage.

Le terme « Système d'Energie Hybride » fait référence aux systèmes de génération d'énergie électrique multi-sources [46]. Il s'agit de systèmes complexes associant différentes sources renouvelables ou bien combinées avec des sources conventionnelles (générateur diesel, turbines à gaz, etc.), différents éléments de stockage et différentes charges. Ils permettent la compensation du caractère intermittent des sources renouvelables et offrent un rendement énergétique global plus élevé. Leur intérêt essentiel est la possibilité d'autonomie énergétique qu'ils permettent vu qu'ils ne dépendent pas d'une seule source. Ils peuvent résoudre en très grande partie le problème de la disponibilité de l'énergie.

1.3.1 Arrangement de l'équipement

Face à l'émergence de l'électronique de puissance qui permet une optimisation pour les différents convertisseurs de puissance, les systèmes hybrides à énergies renouvelables ont pris de l'avance par rapport aux systèmes qui utilisent les sources conventionnelles, elle leurs a permis de réaliser des combinaisons importantes de deux ou plusieurs technologies d'énergies renouvelables comme le photovoltaïque et l'éolien à différentes architectures [47], [48].

1.3.1.1 Architecture à bus DC

La figure (1-10) représente la structure à bus **DC** (Direct Current) d'un système hybride [46]. Dans cette architecture, l'énergie fournie par chaque source du système alimente un bus

continu DC à travers des convertisseurs DC/DC ou AC/DC. Ce type d'assemblage est adapté pour les sites isolés, à charge continue ou alternative, reliée au bus DC via un onduleur. L'avantage de cette topologie est la simplicité de la commande par rapport aux autres configurations [49].

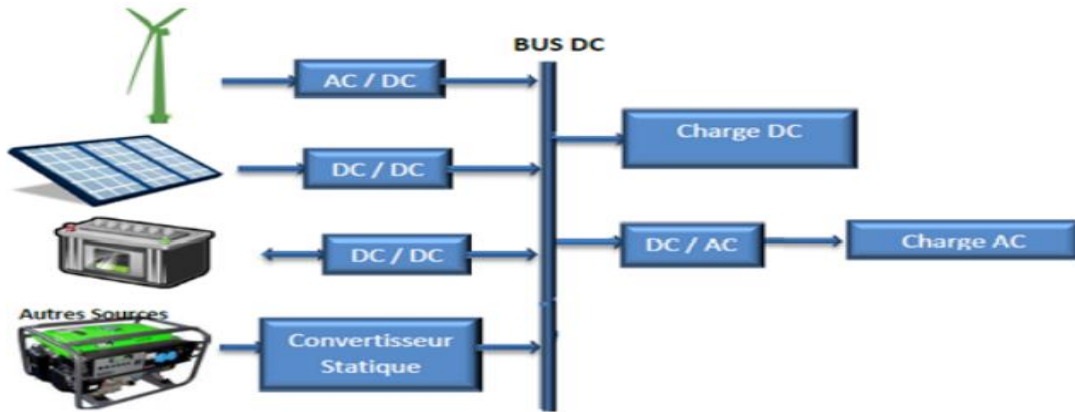


Figure 1-10 : Structure à bus DC d'un système hybride [46].

1.3.1.2 Architecture à bus AC

Dans la topologie à bus AC, toutes les sources de productions sont reliées au bus **AC** (Alternating Current) via des convertisseurs comme présenté dans la figure (1-11) [46]. Cette configuration offre des performances supérieures par rapport à la configuration précédente, puisqu'un découplage de différentes sources de production permettra à celles-ci d'agir de façon assez indépendante les unes des autres. Cependant, le rendement de l'ensemble du système est faible, parce qu'une certaine quantité d'énergie est perdue à cause de l'utilisation des convertisseurs statiques et ce type d'association complique le système de commande. L'architecture à bus AC est plus adaptée à une génération distribuée (c.-à-d. raccordée au réseau électrique) [50]. Nous retiendrons cette configuration dans le cadre de cette thèse.

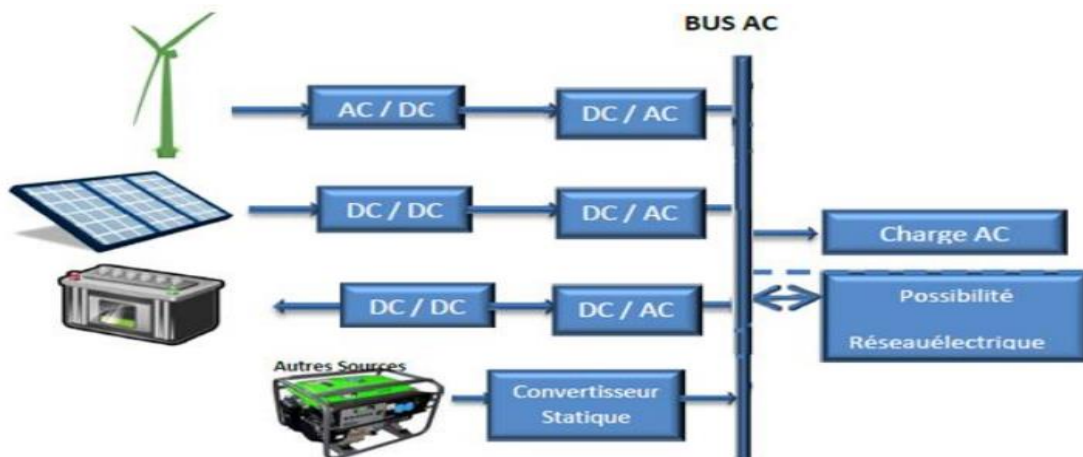


Figure 1-11: Structure à bus AC d'un système hybride [46].

1.3.1.3 Architecture mixte (DC/AC)

La figure (1.12) représente la structure à bus mixte (DC / AC) d'un système hybride [46]. Dans cette configuration, les sources d'énergie peuvent alimenter une charge alternative

AC ou une charge continue DC par un convertisseur bidirectionnel qui réalise la conversion continue-alternative et vice versa.

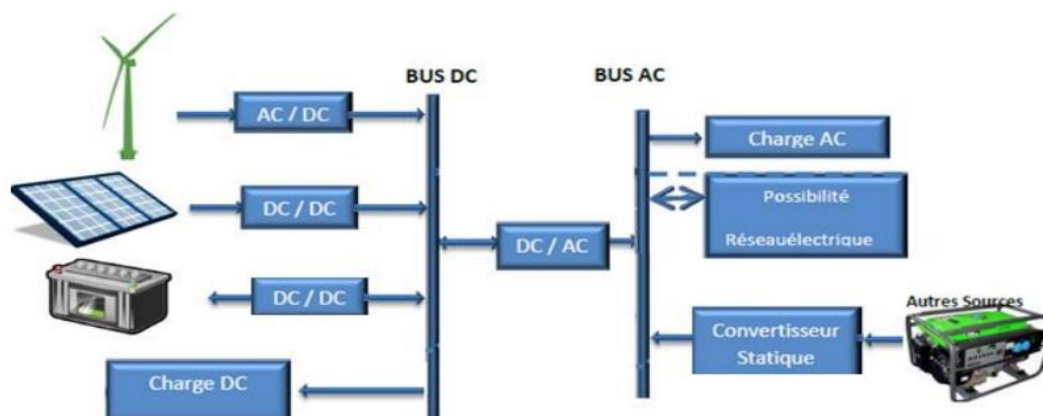


Figure 1-12: Structure à bus mixte (DC/ AC) d'un système hybride [46].

1.3.2 Production de l'énergie dans les sites isolés

Pour différentes raisons, plusieurs communautés au monde vivent dans des sites plus ou moins éloignés des agglomérations. La définition des sites isolés et éloignés dépend d'un pays à un autre. Selon RITG (Remote and Isolated Task Group), les sites éloignés sont définis comme des sites situés à plus de 350 km du centre de service le plus proche ayant un accès routier toute l'année. Le seul mode de transport disponible dans ses régions est le transport aérien. Ces sites peuvent être liés à la présence humaine comme une habitation, un village, ou même une île mais peut aussi remplir une fonction spécifique comme une antenne-relais isolée, un puits dans le désert ou encore une culture agricole dans un endroit reculé [51]. La consommation d'énergie ainsi que les puissances installées varient d'un site à un autre (tableau 1-3). En effet, ces communautés situées dans des sites éloignés ou isolés sont nombreuses ; elles ne sont pas liées à un réseau public de distribution d'électricité. Appelées « communautés hors réseau » ou bien « off-grid communities », ces communautés sont définies selon les rapports de Sigma et RetScreen comme communautés contenant au moins 10 habitants, et qui ne sont pas reliées au réseau public de distribution d'électricité ou de gaz naturel ni à un autre moyen de génération électrique conventionnelle [52].

Tableau 1-3 : Exemple de la consommation énergétique pour quelques sites isolés [53]

Type de site isolé	Puissance électrique	Electricité consommée
Station météorologique	5 W	100 Wh/jour
Refuge de montagne	<10 kW	15 kWh/jour
Antenne de télécommunication	3 kW	66 kWh/jour
Île habitée	250 kW	3 MWh/jour (420 000 l diesel/an)

1.3.3 Démarche de conception d'un site isolé de production d'énergie électrique

La démarche de conception d'un site isolé de production d'énergie électrique à partir de sources renouvelables, n'est pas chose aisée. En effet, en raison de la diversité des composants, et surtout du caractère très imprévisible de la ressource (vent, rayonnement solaire, etc.), l'opération peut s'avérer délicate. La méthodologie d'optimisation du dimensionnement pour un site donné se déroule sur plusieurs étapes, elle consiste à :

- déterminer le profil de charge (de la demande) à partir d'une estimation des besoins des populations,
- évaluer la ressource énergétique disponible sur le site.
- déterminer les composants du système (nombre, coût, etc.)
- en déduire la meilleure combinaison pour le système.

La figure 3.1 suivante résume les différentes phases de cette conception. En d'autres termes, déterminer la meilleure combinaison possible, permettant de satisfaire la demande au moindre coût. Pour notre cas les paramètres entrant en ligne de compte sont:

- les données météorologiques: irradiation, températures ambiantes, vitesses de vents,
- les caractéristiques des composants: panneaux PV, turbine éolienne, onduleurs, etc.

Il est nécessaire de concevoir la taille de chaque composant du système d'alimentation pour programmer avec précision la puissance délivrée par chaque source. La conception inefficace peut conduire à un surdimensionnement des systèmes renouvelables qui entraîne non seulement une augmentation des coûts. Afin de déterminer la conception des composants, la demande de charge précise doit être connue. Cela nécessite une analyse détaillée de la charge comme la première étape dans la conception.

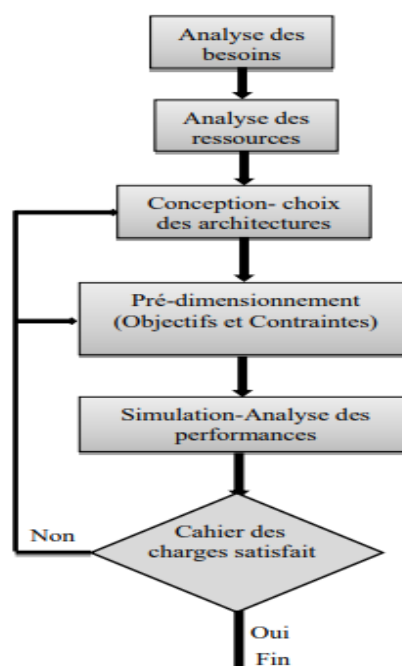


Figure 1-13: Principales étapes de la conception d'un site isolé de production d'énergie électrique.

1.4 Performances des systèmes énergétiques

L'électricité nécessaire peut être achetée au réseau électrique ou être obtenue sur place grâce à l'installation des panneaux photovoltaïques ou d'éoliennes. L'analyse de l'ensemble des solutions possibles pour le choix des unités énergétiques requiert une revue des principaux systèmes existants et de leurs arrangements. Ajouté aux concepts énergétiques et économiques, l'aspect exergetique.

1.4.1 Systèmes énergétiques

Les panneaux solaires photovoltaïques, le générateur diesel une éolienne ou encore des batteries de stockage font partie de ces systèmes. Leur fonctionnement est décrit dans cette section. Leurs performances seront détaillées par la suite et, pour ce faire, différents critères seront introduits.

1.4.1.1 Les panneaux solaires photovoltaïques

Le flux énergétique solaire intercepté par la Terre équivaut à 1353 W/m^2 , hors atmosphère. Lors de la traversée du rayonnement solaire dans l'atmosphère, les photons sont diffusés ou absorbés par les molécules composant les différentes couches de l'atmosphère (principalement l'ozone) mais également par les poussières et les aérosols [54].

Le processus de conversion photovoltaïque (PV) permettant d'exploiter l'énergie lumineuse du soleil. Les panneaux photovoltaïques permettent la transformation directe de l'énergie solaire en électricité, la conversion du rayonnement solaire en électricité a été largement étudiée [54-55]. L'énergie photovoltaïque est obtenue en exposant à la lumière un capteur appelé cellule solaire ou photopile. Il s'agit d'un phénomène physique dit "effet photovoltaïque". La découverte de ce dernier est attribuée à Antoine Becquerel en 1839 [56].

Afin d'augmenter la tension et/ou le courant, un grand nombre de cellules sont connectées en série et/ou en parallèle, encapsulées entre deux feuilles de résine et recouvertes d'un verre et d'un film étanche, pour former les modules photovoltaïques. Ces modules, ou panneaux solaires, sont ensuite assemblés pour constituer des systèmes photovoltaïques, qu'il s'agisse de grandes fermes solaires ou de petites installations. Dans un montage en série, les cellules sont traversées par le même courant. La tension totale du module correspond à la somme des tensions délivrées par chacune des cellules. Dans un montage en parallèle, le courant total correspond à la somme des courants générés par chacune des cellules. La tension reste la même pour toutes les cellules. La caractéristique courant-tension d'un panneau solaire est semblable à la courbe courant-tension d'une cellule de base. Par conséquent, tout ce qui est valable pour une cellule solaire reste aussi valable pour un panneau solaire. On prendra juste le soin de ne connecter en série que des cellules identiques ayant la même densité de courant et de ne connecter en parallèle que des cellules ayant la même tension. En effet, un branchement de cellules non identiques peut gravement détériorer les performances de l'ensemble.

Différentes technologies sont aujourd'hui utilisées dans la filière photovoltaïque, avec l'évolution continue des rendements des différentes filières [2].

Nous pouvons observer qu'à ce jour, les plus hauts rendements sont obtenus avec les cellules III-V multi-jonction sous concentration, tandis que les plus faibles rendements sont obtenus avec les cellules solaires organiques. Près de 93 % de la production mondiale des panneaux solaires est à base de silicium. Les technologies mises en œuvre sont en effet, depuis plusieurs dizaines d'années déjà, bien maîtrisées.

1.4.1.2 Les convertisseurs

La fonction du convertisseur est d'optimiser la conversion du courant alternatif en courant continu ou vice versa, en fonction de la direction du flux d'énergie [57]. Pour les systèmes photovoltaïques (PV) ils ont connu une augmentation au cours des dernières années en raison de l'intérêt mondial accru pour les sources d'énergie renouvelables. Par conséquent, des stratégies de contrôle nouvelles et modernes ont été développées pour améliorer l'efficacité, la fiabilité et la stabilité des systèmes photovoltaïques. La structure matérielle, utilisée pour transférer et contrôler la puissance générée par le système PV est principalement basée sur des convertisseurs électroniques de puissance (DC-DC hacheur et onduleur) [58]-[59]. Une classification des systèmes PV connectés au réseau est présentée à la fig. 1-14.

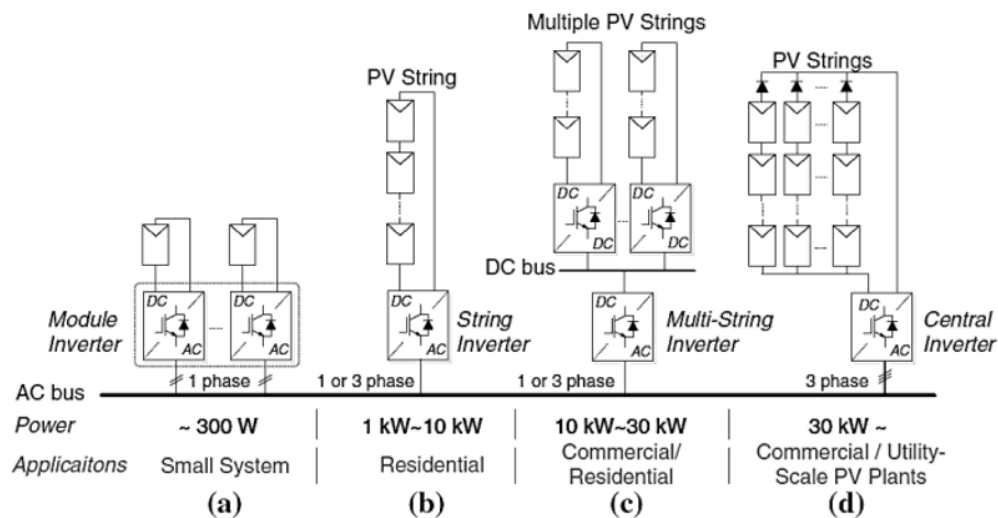


Figure 1-14: Structures matérielles des systèmes PV connectés au réseau [58] : (a) Onduleur de module, (b) Onduleur de branche, (c) Onduleur multibranche, et (d) Onduleur central.

1.4.1.3 Les éoliennes

1.4.1.3.1 Principes et éléments constitutifs de l'éolienne

Une éolienne permet de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Une éolienne "classique" est généralement constituée des éléments suivants [46]:

Le mât : nommé aussi « tour », qui est un élément rigide vertical, utilisé pour supporter l'éolienne. Les mâts des éoliennes sont généralement construits en acier mais aussi en béton précontraint lorsque des problèmes de transports se posent. La hauteur du mât est choisie en fonction de la vitesse moyenne du vent et des aspects environnementaux.

Le rotor : il est composé de plusieurs pales et du nez de l'éolienne. Les rotors à 3 pales sont les plus répandus. Les pales sont faites de matériaux composites à la fois légers et assurant

une rigidité et une résistance suffisantes : polyester renforcé de fibre de verre et/ou fibre de carbone. Le rotor est relié à la nacelle par un moyeu.

La nacelle : elle est montée au sommet du mât et abrite les composants mécaniques et pneumatiques et certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine. Le transport de l'électricité produite dans la nacelle jusqu'au sol est assuré par des câbles électriques descendant à l'intérieur du mât de l'éolienne. La nacelle contient un multiplicateur de vitesse qui sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique, une génératrice qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique, un système électronique de contrôle et de surveillance et d'autres divers dispositifs de refroidissement de freinage etc.

Les pales du rotor éolien captent une partie de l'énergie contenue dans le vent et la transfèrent au moyeu qui est fixé sur l'arbre de l'éolienne. Celui-ci transmet ensuite l'énergie mécanique au générateur électrique à travers le multiplicateur de vitesse de rotation. Le générateur convertit l'énergie éolienne en énergie électrique par induction. Ce dernier est composé de deux parties, une partie mobile (rotor) et une partie fixe (stator), permettant de créer un champ magnétique et de générer un courant électrique.

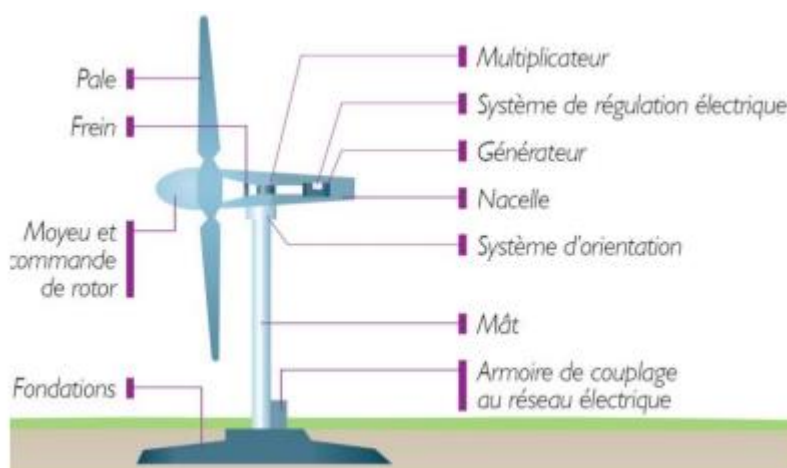


Figure 1-15: Eléments constitutifs d'une éolienne

Le vent est une grandeur stochastique, intermittente qui dépend d'un ensemble de facteurs tels que la situation géographique, l'altitude, la température et la hauteur de captage. Les caractéristiques du vent déterminent non seulement la quantité d'énergie qui s'applique à la turbine, mais également les contraintes de fonctionnement (turbulences, valeurs extrêmes,) qui jouent aussi sur la durée de vie. En réalité, le vent est mesuré par un anémomètre complété par une girouette qui génère les grandeurs fondamentales que sont la vitesse et la direction.

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leurs puissances nominales :

- Éoliennes de petite puissance : inférieure à 40 kW

- Éoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de KW.
- Éoliennes de forte puissance : supérieure à 1 MW.

Il existe différentes façons de classer les turbines éoliennes, celles-ci appartiennent principalement à deux groupes selon l'orientation de leur axe de rotation: celles à axe horizontal et celles à axe vertical. Une éolienne à axe horizontal est représentée schématiquement en figure (1-16). Elle est composée d'une hélice perpendiculaire au vent, montée sur un mât. Les pales tournent autour d'un axe horizontal. Ce type d'éolienne est le plus répandu et est souvent utilisé dans les parcs éoliens terrestres et offshore.



Figure 1-16 : Eolienne à axe horizontal.

Sur la figure (1-17), un schéma d'un système éolien typique est représenté, où on distingue une éolienne, un convertisseur, un utilisateur qui a deux options pour la consommation en électricité une énergie renouvelable ou un réseau et un banc de batteries comme moyen de stockage.

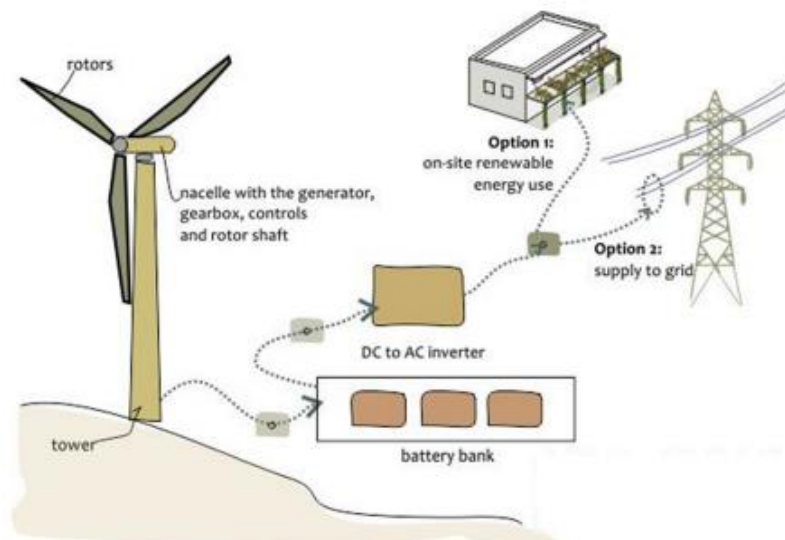


Figure 1-17: Un système éolien typique [60].

La performance énergétique d'une éolienne est un indice important qui détermine la production d'énergie annuelle (PEA) et ensuite le coût de l'énergie produite par le parc éolien.

D'après Oh et Kim (2015), la performance énergétique d'une éolienne est influencée par les défauts mécaniques, la détérioration due à l'âge, les caractéristiques du terrain et l'environnement climatique de la région. Par conséquent, l'énergie éolienne n'est donc pas produite dans des conditions idéales et la production réelle d'énergie s'écarte régulièrement de la courbe de puissance [61].

1.4.1.4 Le générateur diesel (GD)

L'électricité générée par les groupes électrogènes diesel reste une source d'électricité stable qui répond aux demandes individuelles des sites éloignées. En plus le carburant diesel est une source d'énergie fiable, ainsi que cette technologie est facile à utiliser et nécessitent peu de planification pour leur mise en œuvre. Les générateurs diesel installés dans les sites éloignés sont de petite taille. Ces générateurs sont dimensionnés pour répondre à la demande maximale de la communauté (charge de pointe), avec une réserve capable de fournir les charges critiques pour la communauté.

Le choix du groupe électrogène dépend de la puissance et de la nature de la charge à alimenter. Un groupe électrogène à essence peut être utilisé pour de faibles puissances et de manière continue. La vitesse du GE diesel pourra être de 3000 tours/mn si il est utilisé occasionnellement (pour charger une batterie, par exemple, c'est le cas dans le système hybride) et de 1500 tours/mn pour une utilisation plus intensive.

Le principe de fonctionnement d'un groupe électrogène diesel se base sur l'accouplement d'un moteur thermique à combustion interne, diesel et un alternateur appelé génératrice synchrone (GS) tel qu'illustré sur la figure 1.18. Le rôle de l'alternateur est de convertir l'énergie mécanique créée par la force motrice du moteur thermique en un courant alternatif. L'électricité est produite lorsque le rotor (partie tournante bobinée) tourne à travers un champ magnétique produit par les pôles positifs et négatifs d'un aimant fixe [53].

Dans le cas des alternateurs modernes, l'aimant est "auto-excité". Cela signifie que l'électricité utilisée pour créer le champ électromagnétique est créée dans l'alternateur lui-même, permettant ainsi à l'alternateur de produire de grandes quantités d'électricité. On rencontre deux contraintes fondamentales d'exploitation des diesels dans les réseaux autonome:

Le niveau de tension du courant de sortie doit être toujours régulé pour correspondre le plus possible sa valeur nominale (110/220/380 Volts).

La fréquence de l'onde de tension doit être stable et prêt de sa valeur nominale (50/60 Hz). La tension produite à la sortie de l'alternateur est généralement contrôlée par un régulateur de tension. La fréquence du courant alternatif à la sortie est maintenue par un régulateur de vitesse, qui fonctionne en ajustant le flux du carburant entrant dans le moteur. Ce régulateur a pour objectif de garder la vitesse du MD et la vitesse du GS constante.

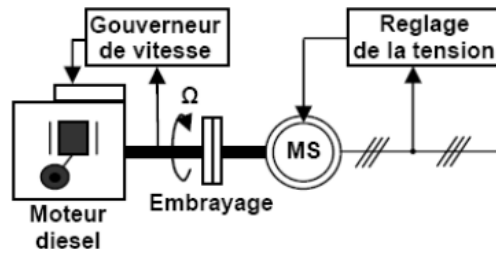


Figure 1-18: Configuration d'un groupe électrogène diesel.

1.4.1.5 Le stockage d'énergie

Pour les petits systèmes (quelques kWh) et les grands systèmes (plus de 100 kWh) dans les régions isolées utilisant des énergies renouvelables intermittentes, l'accumulateur électrochimique (batterie) reste le meilleur compromis entre performances et coût. Il est évident que l'intégration d'un système de stockage est nécessaire afin de récupérer la production excédentaire ou d'alimenter un pic de demande occasionnelle dans ce cas précis. Le système de stockage d'énergie peut être un banc de batteries, un ensemble électrolyseur et pile à combustible, un super condensateur ou la combinaison de ces systèmes de stockage. La plupart des systèmes d'électricité renouvelable utilisent des batteries. Ce type de stockage est coûteux et volumineux par unité d'énergie stockée, mais il présente l'avantage d'un rendement élevé. Les batteries peuvent être utilisées pour le stockage à court terme, mais afin de maintenir la fiabilité du système d'énergie solaire/éolienne, un nombre relativement important de batteries sera généralement nécessaire. Afin de ne pas endommager la batterie, un contrôleur de batterie appelé aussi un régulateur de tension est souvent associé au système de stockage par batterie. Le régulateur permet de protéger la batterie en limitant un certain seuil minimum pour éviter les décharges profondes et un seuil maximum pour éviter les surcharges au niveau des batteries. La connaissance de quelques règles ou informations est nécessaire avant l'utilisation des batteries:

- Il est recommandé par exemple de bien vérifier que le cyclage est clairement indiqué par le fabricant, car ce dernier indique la durée de vie de la batterie.

- La détermination de la tension de stockage: dans la référence [62] il est conseillé de se fier au tableau (1-4) ci-dessous, car plus le besoin d'énergie est élevé, plus on doit utiliser une tension élevée afin de diminuer les pertes.

Tableau 1-4 : Tensions recommandées pour une installation PV pour différentes puissances crêtes.

Puissance de l'installation PV	Tension recommandée
De 0 à 800Wc	12V
De 800 à 1600 Wc	24V
Au-dessus de 1600 Wc	48V

1.4.1.5.1 Stockage de l'énergie électrochimique

Il existe deux principales technologies de stockage électrochimique : les batteries électrochimiques et les super condensateurs. Le principe de stockage dans les batteries repose sur la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique et réciproquement. Des réactions d'oxydation ou de réduction interviennent aux interfaces de deux électrodes séparées par un électrolyte. Les types de ces systèmes varient selon la nature de la réaction chimique, les caractéristiques structurelles et la conception. Ces accumulateurs sont classés selon le principe de fonctionnement, la profondeur de décharge maximale ou selon la caractéristique de l'électrolyte dans la batterie. Différentes technologies ont été utilisées dans la fabrication de ces accumulateurs. Leur inconvénient majeur réside dans leur durée de vie qui reste relativement faible [63].

1.4.1.5.2 Choix du système de stockage

Une analyse détaillée de la base de données de projets de stockage d'énergie globale du « Department of Energy » des États-Unis révèle que la technologie de stockage d'énergie par batterie compte le plus grand nombre de projets opérationnels lié aux énergies renouvelables (figure 1-19).

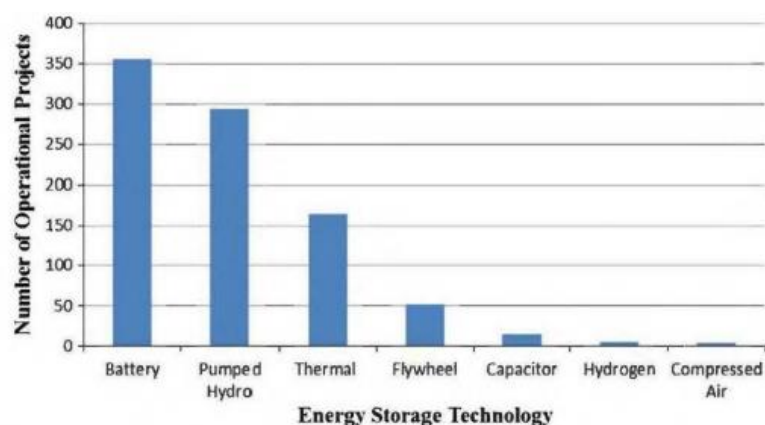


Figure 1-19: différents systèmes de stockage les plus répandus dans les énergies renouvelables [64].

Il existe plusieurs types de stockage pour les systèmes d'énergies renouvelables. Les critères pour le choix d'un système de stockage d'énergie sont la fiabilité, l'efficacité, la maturité technique, le coût, la durée de vie et l'impact environnemental. L'efficacité et l'espérance de vie jouent un rôle essentiel lors du choix d'une technologie de stockage, car ils affectent les coûts de stockage. On résume les données disponibles sur les aspects techniques, et les critères environnementaux des différentes technologies de stockage d'énergie. Parmi ces aspects et critères, nous citons [65], [66] :

- La puissance disponible (MW) : C'est la puissance maximale qu'un moteur ou un générateur peut délivrer à une charge.
- La capacité énergétique de stockage (MWh) : Elle représente la quantité d'énergie disponible dans le dispositif de stockage à la fin de la charge.

- Le temps de décharge : Il est défini comme le rapport entre la capacité énergétique et la puissance maximale. Il est aussi appelé « constante de temps ». Ce critère représente le temps requis pour extraire la proportion exploitable (W_{ut}) de l'énergie stockée (W_{st}).

$$\tau_{(s)} = \frac{W_{ut}}{P_{max}} \quad (1.1)$$

- Le rendement ou efficacité : C'est le rapport entre l'énergie restituée utile sur l'énergie stockée.

$$\eta = \frac{W_{ut}}{W_{st}} \quad (1.2)$$

- La durée de vie du dispositif de stockage : Selon les technologies, elle est exprimée en années et en nombre de cycles de charge/décharge (N) (cas des batteries par exemple).

- Le temps de réponse : c'est la rapidité du système à mettre en disposition l'énergie stockée. Il caractérise la vitesse à laquelle l'énergie doit être libérée ou absorbé. Pour les technologies de stockage comme les batteries il est préférable de définir cette durée. Certaines applications ont des exigences très strictes, ce temps de réponse peut être de quelques millisecondes au maximum.

- Autodécharge : ce critère représente la quantité de l'énergie qui sera dissipée avec le temps en dehors de toute utilisation.

- Densités massique et volumique de l'énergie : Elles représentent les quantités maximales d'énergies divisées par la masse ou le volume du dispositif de stockage. Les densités d'énergie sont calculées en Wh/kg et Wh/l.

- Les coûts d'investissement et d'exploitation : elle est la part la plus marquante sur toute la durée de vie du système. Le coût est évalué par unité de puissance (\$/kW) ou par unité d'énergie (\$/kWh). Il est divisé par le rendement de stockage. Le coût peut être évalué par cycle pour les systèmes de stockage d'énergie ayant des fréquences de charge / décharge.

- Autres caractéristiques : d'autres caractéristiques peuvent être prises en compte dans les technologies de stockage d'énergie comme : l'aspect écologique, la fiabilité, les équipements de contrôle et de surveillance, les contraintes opérationnelles, la facilité de maintenance, le niveau de maturité, etc.

1.4.2 Évaluation exergetique

Dans la littérature on trouve, plusieurs définitions de l'exergie d'un système quelconque. Nous retiendrons la suivante [67]: « l'exergie d'une certaine quantité de matière contenue dans un système est une mesure du potentiel de production (ou de réception) d'un travail maximal (ou minimal) par le super système (constitué du système et de son milieu ambiant), qui permettra à cette quantité de matière d'être ramenée de son état initial à un état d'équilibre inerte avec le milieu ambiant ».

Le résumé de Rivero–Rodriguez énonçant cinq propriétés de l'exergie et qui sont [68]:

* L'exergie d'un système est l'énergie nette (utile) qui peut être obtenue de l'ensemble système- environnement en portant cet ensemble à l'équilibre.

* L'exergie d'un système est la portion de l'énergie qui, dans un environnement donné, peut être transformée en d'autres formes d'énergies nobles.

* L'exergie d'un système est la capacité du système à produire un changement.

* L'exergie d'un système est la mesure de la qualité de l'énergie contenue dans le système.

* L'exergie est le potentiel de travail maximum du système relatif à son entourage.

L'analyse exergetique conduit donc à une meilleure compréhension de l'influence des phénomènes thermodynamiques sur l'efficacité du procédé, à la comparaison de l'importance des différents facteurs thermodynamiques et à la détermination des moyens les plus efficaces pour améliorer un système considéré [69].

1.4.3 Système de gestion d'énergie

Les systèmes de gestion de l'énergie pour les systèmes hybrides sont également très importants. De nombreux chercheurs et scientifiques ont tenté d'étudier de meilleures options d'approvisionnement en énergie pour répondre à la demande.

Afin d'améliorer le rendement du système multi-sources, il faut assurer l'exigence de la charge sans interruption, protéger le système de stockage (l'élément clef dans les SEH) contre les surcharges et les charges profondes. Par conséquent, prolonger sa durée de vie et optimiser au mieux la répartition de la puissance entre les différents éléments qui constituent le SEH, tout en réduisant la consommation du carburant et le coût du système. Une stratégie de gestion de l'énergie est nécessaire. Plusieurs stratégies de gestion ont été abordées dans la littérature et qui varient en fonction de la composition du système multi-sources et les objectifs visés par ce dernier. Particulièrement, les systèmes de gestion d'énergie ont été développés sur trois bases : soit sur des modèles mathématiques, soit sur l'expertise humaine, soit sur la base de simulations [70]. La figure.1.20 représente une classification des stratégies de gestion d'énergie [71].

Les stratégies de gestion de l'énergie peuvent être classées en deux grandes familles :

- Stratégies à base de règles,
- Stratégies basées sur l'optimisation

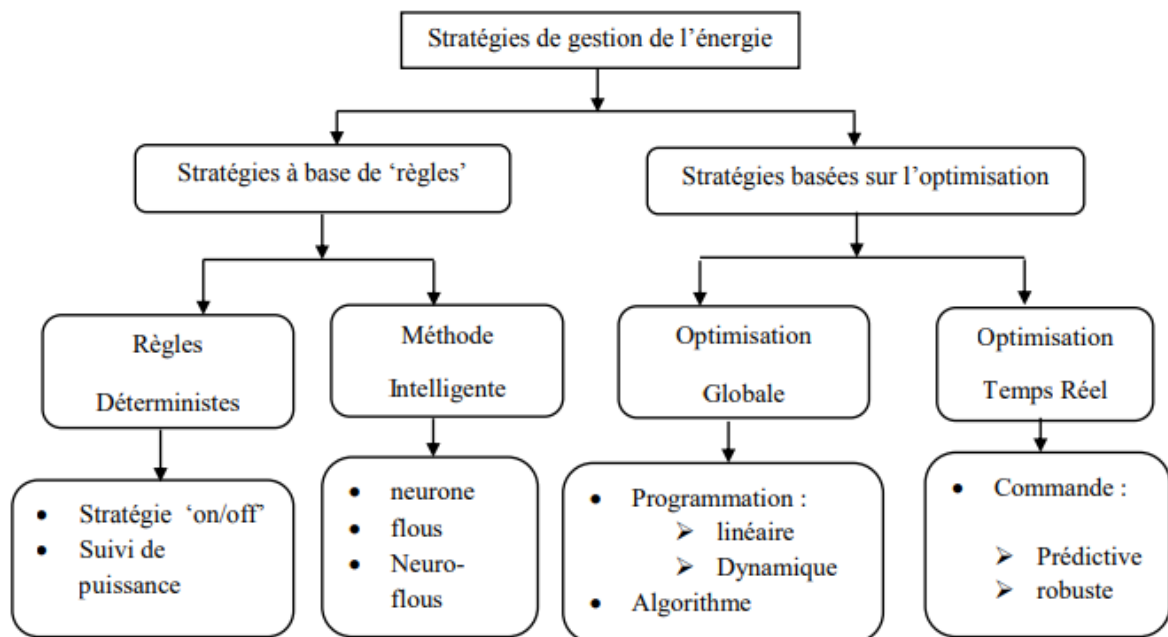


Figure 1-20: Classification des stratégies de gestion d'énergie.

1.4.3.1 Stratégies de gestion à base de règles

Elles peuvent être facilement implémentées avec un contrôle de supervision en temps réel. Les lois de gestion d'énergie à base de règles ne disposant pas de connaissance a priori sur le besoin énergétique d'un consommateur ou sur les conditions climatiques, elles sont définies au préalable, sur la base d'une estimation ou sur l'analyse du comportement des composants du système. Elles peuvent être établies par des règles déterministes ou par des règles floues.

Règles déterministes : Les règles sont fixées en lien direct avec l'objectif. On peut citer dans cette catégorie la méthode de la stratégie "On/Off" qui est connue pour son efficacité, sa robustesse et son fonctionnement en temps réel.

Méthodes intelligentes : Il convient d'utiliser cette technique lorsque la modélisation du système est difficile ou lorsqu'il est très complexe à appréhender. On peut citer dans cette catégorie le contrôle par la logique floue, qui permet une meilleure compréhension de la gestion d'énergie. En effet, elles sont considérées comme une amélioration des règles déterministes. Le régulateur par logique floue ne traite pas de relations mathématiques, mais utilise plutôt des inférences avec plusieurs règles [70].

Deux façons existent pour l'élaboration de ces règles:

- À base de l'expertise humaine et à la connaissance du profil.
- À base des données générées par l'algorithme génétique ou par l'utilisation des valeurs de la programmation dynamique.

1.4.3.2 Stratégies basées sur l'optimisation

Dans ce cas, le problème de la gestion énergétique d'un SEH revient à trouver la meilleure manière de répartir, stocker et consommer l'énergie afin de satisfaire la demande. De telle sorte à minimiser le coût du système et optimiser la consommation de carburant. Dans ces stratégies, on distingue deux catégories :

a. Optimisation globale

L'utilisation des algorithmes d'optimisation globale ou hors ligne sont destinées à la résolution de problèmes d'optimisation difficiles et avec contraintes. Les stratégies de gestion d'énergie basées sur l'optimisation hors ligne nécessitent la connaissance à priori du profil de charge pour trouver la meilleure répartition de puissance entre les sources d'énergie. Cela rend l'implémentation de ces stratégies d'optimisation globale en temps réel irréalisable.

b. Optimisation en temps réel.

Afin de pallier les inconvénients des méthodes d'optimisations globales, les chercheurs proposent des stratégies d'optimisations en temps réel permettant d'obtenir une commande des flux énergétiques en temps réel et ne nécessitent pas la connaissance du profil de charge par avance.

Par rapport aux objectifs de notre travail nous n'avons considéré que deux d'entre eux. Elles sont brièvement discutées ci-dessous [72]:

- **Gestion des charges:** l'utilisateur interdit la charge des batteries par un groupe électrogène. Toute l'énergie fournie par les groupes sert à la charge principale et non au stockage. Les batteries sont exclusivement rechargées par l'énergie photovoltaïque.

- **Gestion du stockage:** Une fois en marche, le groupe électrogène alimente prioritairement les consommateurs puis, s'il n'est pas à son maximum de puissance, il charge les batteries. Sur la base des stratégies mentionnées ci-dessus, de nombreux algorithmes ont été proposés. Le dimensionnement des composants du système est l'une des caractéristiques clés qui déterminent la performance d'un système hybride.

1.4.4 Dimensionnement optimal et évaluation économique avec HOMER

Homer est un logiciel de dimensionnement et d'optimisation des systèmes de génération électrique, distribué et développé par le National Renewable Energy Laboratory (NREL). C'est un outil puissant pour la conception de HES afin de déterminer la taille optimale de ses composants en effectuant une analyse technico-économique. De nombreux composants tels que WT, les panneaux photovoltaïques, les piles à combustible, les petites centrales hydroélectriques, la biomasse, les convertisseurs, les batteries et les générateurs conventionnels sont modélisés dans cet outil. Ce logiciel peut résoudre le problème d'optimisation des systèmes à haute efficacité énergétique en mode connecté au réseau et en mode hors réseau. Il conçoit le système hybride en fonction des détails des paramètres de coût utilisés dans le

système, tels que le coût principal, le coût de substitution, le coût d'exploitation et de maintenance (O & M) [73]. Les principales limites de Homer sont les suivantes :

- Homer ne permet de minimiser qu'un seul objectif qui est le coût actuel net (NPC), or des problèmes multiobjectifs ne peuvent pas être formulés. Après le processus d'optimisation, Homer classe les configurations des systèmes hybrides optimisés selon le NPC et non pas selon le coût moyen actualisé de l'énergie.
- Homer ne considère pas la profondeur de décharge (DOD) de la batterie, un facteur qui joue un rôle très important dans l'optimisation des systèmes hybrides, puisque la durée de vie qui diminue quand la DOD augmente. Par conséquent, le DOD devrait être soit optimisé, soit inclus dans les entrées de l'étude de sensibilité d'Homer.
- Homer ne considère pas la variabilité intra-horaire
- Homer ne considère pas les variations de la tension du bus (AC, DC ou les 2).

Plusieurs autres outils logiciels sont également disponibles pour la conception de systèmes hybrides. HOMER a été largement utilisé dans plusieurs études de cas de système d'énergie renouvelable existant dans la littérature. Les deux types de systèmes, autonomes et raccordé aux réseaux, ont été largement étudiés. Une liste des publications et études de cas mettant la lumière sur son utilisation est représentée dans le paragraphe ci-après.

Pour souligner ce fait, Zeraïa et al. [74] ont analysé de nombreuses configurations hybrides de type PV-Wind-Diesel avec stockage afin de déterminer le concept optimal pour les régions éloignées d'Algérie. La prédiction de la performance des configurations sélectionnées ont été réalisées sous six climats différents, c'est-à-dire Alger, Djelfa, Ghardaïa, Adrar, Tindouf et Tamanrasset. La simulation utilisant le logiciel HOMER a montré que le système électrique hybride PV-Diesel est le plus approprié.

Rezzouk et Mellit [75] se sont intéressés à la faisabilité de l'alimentation d'une unité de recherche (UDES) située dans le nord de l'Algérie avec un système hybride PV- Diesel-batterie. Le programme HOMER a été appliqué et diverses configurations en fonction de la pénétration du PV, y compris un générateur diesel autonome et un système PV autonome ont été considérées. Les auteurs ont trouvé qu'une centrale électrique hybride avec 25% de production d'électricité à partir de panneaux PV est la configuration optimale qui assure une stabilité élevée avec le coût d'électricité le plus bas.

Himri et al. [76] ont proposé la combinaison d'un générateur diesel existant avec une éolienne pour alimenter une région éloignée dans le sud de l'Algérie. Ils ont utilisé le programme HOMER pour évaluer la production d'énergie, les coûts du cycle de vie et la réduction des émissions de gaz à effet de serre du système éolien-diesel proposé. La simulation a montré que le système hybride devient réalisable à une vitesse de vent de 5,48 m/s avec un prix du combustible fossile de 0,162 \$/L.

Shezan et al. [77] ont mené une étude sur une zone éloignée hors réseau, dans la station KLIA Sepang de l'état de Selangor en Malaisie avec une configuration de technologie PV/WT/DG/LA avec l'outil logiciel HOMER Pro® pour minimiser le NPC du système.

Haein Kim et al. [78] ont effectué une étude sur l'électrification d'une zone rurale hors réseau au Myanmar avec une configuration PV/DG/BAT en utilisant les technologies de batteries LA et Li-Ion avec le logiciel HOMER Pro® pour minimiser le NPC du système et ils ont obtenus des résultats optimaux avec la technologie de batteries LA.

Atef S. Almashakbeh et al. [79] en 2019 ont mené une étude pour le village hors réseau de Samra en Jordanie avec la configuration PV/WT/générateur diesel (DG)/batterie LA en utilisant l'outil logiciel HOMER Pro® avec différentes valeurs de fraction d'énergie renouvelable.

Lorafe Lozano et al. [80] ont réalisé une étude pour électrifier les îles hors réseau de l'Asie du Sud-Est telles que Gilutongan, Philippines, Cebu et Cordova avec la configuration PV/batterie LA avec l'outil logiciel HOMER Pro® pour minimiser le NPC du système.

Chong Li et al. [81] en 2020 ont réalisé une étude pour 280 foyers hors réseau dans la province de Gansu en Chine avec une configuration WT/DG/BAT utilisant les technologies de batteries LA, Li-Ion et Zinc Bromine (ZB) en utilisant l'outil logiciel HOMER pro® et ont obtenu les résultats optimaux avec la technologie de batterie ZB.

1.4.5 Outil de simulation MATLAB / SIMULINK

MATLAB est un logiciel commercial développé par MathWorks en 1984 et mise à jour régulièrement [82]. C'est un système interactif et convivial de calcul numérique et de visualisation graphique permettant de modéliser, simuler, optimiser, contrôler et analyser des systèmes de nature très diverse (éolien, PV, diesel, batterie, air comprimé, pile à combustible, électronique de puissance, etc.). Il intègre des fonctions d'analyse numérique, de calcul matriciel, de traitement de signal et de visualisation graphique 2D et 3D, etc.

En Algérie l'intégration du photovoltaïque avec l'énergie éolienne et les combustibles fossiles combustibles fossiles en utilisant Matlab/Simulink a également fait l'objet de nombreux articles publiés. Aissou et al. [83] qui ont étudié expérimentalement et numériquement la performance d'un petit système d'énergie PV-énergétique sous un climat côtier à Bejaia, Algérie. La centrale hybride est composée de six panneaux photovoltaïques de 175 W chacun connectés en parallèle, une éolienne de 1 kW, des batteries, un onduleur et des capteurs pour les mesures. Le contrôle et la gestion de la puissance de la centrale hybride ont été évalués. La conception et la modélisation des composants ont été réalisées à l'aide de Matlab/Simulink, tandis que la stratégie de contrôle de la puissance implanté via le logiciel LabVIEW. Les auteurs ont démontré expérimentalement le potentiel du système hybride proposé ainsi que sa stratégie de contrôle de gestion. Afin de déterminer la taille optimale d'un système hybride PV, éolien, diesel et batterie, Saheb-Koussa et al [84] ont développé un modèle dans Matlab/Simulink. Différents endroits en Algérie avec des différents climats ont été sélectionnés, Bouzareah (littoral), Batna et El Oued (hauts plateaux), Ghardaia, Adrar et Tamanrasset (climat chaud et sec). Les auteurs ont constaté que la configuration optimale dans chaque site est fortement liée à ses ressources renouvelables, notamment l'intensité du rayonnement solaire et le potentiel éolien. En conclusion, MATLAB s'est imposé dans les

milieux universitaire et industriel comme un outil puissant de modélisation, de simulation et de visualisation de problèmes numériques

1.4.6 Synthèse bibliographique sur systèmes hybrides à énergies renouvelables

Au cours des dernières années, beaucoup de recherches ont été effectuées sur la conception, l'optimisation, le contrôle et l'opération des systèmes hybrides à énergies renouvelables. Les efforts de recherche et de développement dans les technologies d'énergie renouvelable comme le solaire, l'éolienne et d'autres sources d'énergie renouvelable doivent continuer afin d'améliorer leurs performances et fiabilité. Compte tenu des récents développements, il est clair que ce domaine prend de l'ampleur.

Rehman et al. [85] se sont intéressés à la faisabilité de remplacement d'un générateur diesel en une centrale hybride PV-vent-diesel à Rafha, en Arabie Saoudite. Ils ont constaté qu'avec un prix du diesel de 0,6 \$/L, le système hybride devient compétitif en termes de coûts. En ce qui concerne l'efficacité et la fiabilité du système, Daud et Ismail [86] ont conçu et analysé un système hybride PV-éolien-diesel pour une maison familiale en Palestine. En tenant compte de la carte des ressources énergétiques actuelles en Tunisie, Colantoni et al. [87] ont développé un programme mathématique pour trouver la dimension optimale d'un système hybride PV-éolien. Les auteurs ont souligné le potentiel des centrales hybrides fossiles et renouvelables pour réduire les importations de combustibles fossiles en Tunisie. Kumar et Manoharan [88] ont étudiés la faisabilité de l'implantation d'une centrale hybride PV-Diesel au Tamil Nadu, en Inde. L'analyse économique basée sur le coût actuel net, la consommation de carburant et la fraction d'électricité renouvelable a indiqué que la zone climatique intérieure est la plus propice à la production d'électricité.

Hafez et Bhattacharya [89] ont analysé le potentiel de l'installation d'un système hybride PV-eolien-diesel à Johor Bahru, en Malaisie. Akms et al. [90] et Hoque et al. [91] se sont intéressés au système hybride PV-éolien-diesel sous le climat du Bangladesh. Le premier a étudié la performance du système hybride dans les conditions climatiques de l'île Martin, tandis que le second a considéré un petit village de Comilla. Lal et Raturi [92] ont effectué une évaluation économique d'un système électrique hybride PV-éolien-diesel pour un emplacement éloigné sur l'île de Vanua Levu.

En Algérie, il y a un intérêt croissant pour le développement et l'étude des systèmes photovoltaïques hybrides, en particulier après l'introduction du programme d'énergie renouvelable en 2011. Khelif et al. [93] ont proposé la combinaison de panneaux PV avec un générateur diesel existant en fonctionnement à l'AFRA (sud de l'Algérie). Les auteurs ont développé un programme mathématique pour prédire les performances horaires de la centrale hybride proposée incluant la tension, le courant, la consommation de carburant, l'état de charge de la batterie et la production d'électricité. Le modèle est également capable d'effectuer une évaluation économique pour évaluer la rentabilité du système électrique. Ils ont conclu que la rentabilité du système hybride proposé est fortement liée au coût des combustibles fossiles et que au-delà de 0,34 €/l de combustible, le projet est rentable.

Pour les systèmes solaire et/ou éolien, ils sont largement utilisés dans les applications autonomes, cependant, le comportement intermittent de l'irradiation et du vent affecte

sérieusement la stabilité de la production [94]. Ainsi donc la grande variation de la puissance disponible qui se produit de saison en saison, d'un jour à l'autre, d'une heure à l'autre pose un principal problème d'utilisation de ces deux énergies. D'après José L. et collaborateurs [95], les systèmes autonomes hybrides à énergies renouvelables sont généralement plus adaptés que les systèmes qui ont une seule source d'énergie pour l'approvisionnement en électricité des applications hors réseau, en particulier dans les zones reculées et difficiles d'accès. Ces types de systèmes démontrent une plus grande fiabilité que les systèmes simples photovoltaïque (PV) ou éolien. Les systèmes hybrides les plus utilisés sont les combinaisons PV -Éolien-Batterie et PV-Diesel- Batterie. Les batteries (de type plomb-acide) sont habituellement utilisées comme système de stockage. Le stockage d'énergie sous forme d'hydrogène, bien que techniquement viable, a un inconvénient en terme de sa faible efficacité dans le processus de conversion électricité-hydrogène-électricité, outre le fait que, sur le plan économique, il ne peut pas rivaliser avec le stockage de la batterie à l'heure actuelle.

Bart et al. [96] ont réalisé une étude sur les zones rurales hors réseau de l'Asie du Sud-Est, avec une analyse du cycle de vie des produits d'éclairage PV avec un outil logiciel Simapro et ont conclu que l'éclairage solaire PV a moins d'impact sur l'environnement que les solutions d'éclairage conventionnelles.

Une revue de littérature a été faite par Prabodh Bajpai et Vaishalee Dash en 2012 sur les systèmes hybrides à énergies renouvelables pour la production d'électricité dans les applications autonomes [97]. Dans cette étude, les auteurs se sont fixé comme objectifs l'examen minutieux de l'état de la recherche sur le dimensionnement, l'optimisation, la gestion énergétique et la modélisation des composants des systèmes hybrides à énergies renouvelables. Ils affirment que les systèmes hybrides à énergies renouvelables peuvent fournir une alimentation ininterrompue en énergie et une émission zéro de gaz à effet de serre qui est le principal avantage de ces systèmes. L'utilisation généralisée de ces systèmes permettra non seulement de résoudre les questions énergétiques, mais aussi de garantir une planète plus verte et durable.

En 2014, Madan A. et al. [98] ont fait une revue sur l'état de la recherche sur les systèmes hybrides d'énergie. Dans leur étude, plusieurs travaux publiés par l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), dans des magazines et des actes de conférences ont été analysés. Il ressort de cette étude que parmi les sources d'énergies renouvelables, l'énergie solaire et l'énergie éolienne sont les sources les plus utilisées dans la production d'électricité dans de nombreux pays en développement. Plusieurs systèmes hybrides d'énergie sont analysés et une étude détaillée a été effectuée pour différentes stratégies de commande et des algorithmes d'optimisation ont été incorporés dans 15 différentes sources d'énergie non-conventionnelles. Il se trouve que beaucoup de chercheurs ont étudié par simulation et expérimentalement les systèmes hybrides d'énergie. Enfin, ils concluent que les systèmes hybrides d'énergie sont fiables, économiques et efficaces pour satisfaire les besoins en énergie.

Sarah et al. [99] en 2017 ont mené une étude pour le lieu de Dodoma en Tanzanie avec une configuration de PV/WT/DG/BAT utilisant les technologies de batterie LA et Li-Ion et ont obtenu un coût minimum de l'énergie (COE) avec la configuration basée sur la batterie Li Ion en utilisant l'algorithme génétique. Carlos et al. [100] ont réalisé une étude pour électrifier une

île hors réseau en Indonésie avec une configuration de la technologie PV/DG/Li-Ion basés sur Algorithmes AG. Sompol et al. [101] ont fait une étude pour des applications hors réseau en Thaïlande avec une configuration de PV/BMG/ batterie Li-Ion dans l'outil logiciel LABVIEW

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le contexte de l'étude et un état de l'art sur les systèmes de production d'énergie hybride, nous décrivons les performances d'un système multi-sources. Ensuite nous nous sommes focalisés sur les différents facteurs qui déterminent les différents coûts et la fiabilité du système. Parmi lesquelles, certaines seront utilisés dans les études présentées au chapitre suivant. Enfin, nous avons décrit les différentes méthodes de gestion d'énergie afin d'atteindre une meilleure efficacité du système. En effet, la problématique de l'énergie est vue d'une manière différente selon la région de la planète. Avec l'avancée technologique, et le développement des systèmes décentralisés, le consommateur peut devenir producteur. À travers ces différentes études, nous constatons que les systèmes hybrides à énergies renouvelables constituent une solution viable, économique et efficace pour les régions éloignées, difficiles d'accès et dépourvues de réseau électrique. Comme nous l'avons vu, de nombreuses solutions existent, et il reste à optimiser économiquement et écologiquement leur insertion eu sein du système énergétique afin d'économiser les ressources monétaires et les matières premières c'est l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 2 : Analyse technico-économique et faisabilité d'un système énergétique hybride dans une communauté rurale.

Ce chapitre présentera la conception optimale d'un système hybride, basée sur le logiciel HOMER. Principalement on examinera la faisabilité technico-économique du micro-réseau dans la zone d'Adrar dans le sud-ouest d'Algérie, pour une alimentation électrique fiable, durable et rentable. La recherche commence par l'évaluation de la disponibilité des ressources locales en énergie renouvelable. Ensuite, on va choisir la stratégie de répartition de la SSE, et on va introduire la courbe de charge, les paramètres du système et les spécifications technico-économiques des principaux composants. Enfin, les tailles optimales des équipements du système vont être déterminées et une analyse de sensibilité va être réalisée pour identifier comment la conception optimale répond aux variables de sensibilité.

2.1 Introduction

L'Algérie est l'un des pays qui utilise les combustibles fossiles pour la production d'électricité, ce qui a eu un impact considérable sur son développement économique et sur la croissance de son secteur électrique. Cependant, le pays dispose d'une grande quantité de ressources d'énergie renouvelable, ce qui en fait une solution prometteuse pour l'électrification des régions éloignées hors réseau. En Algérie, la combinaison de diverses sources d'énergie (renouvelables et fossiles) peut offrir des avantages significatifs, tels que :

- Réduction significative des coûts de production d'électricité.
- Fourniture d'une énergie continue et stable.
- Réduction des coûts d'exploitation et de maintenance.
- Économie des combustibles fossiles pour les générations futures.

Le dimensionnement optimal des unités de production est essentiel pour minimiser le coût annuel total et répondre à la demande énergétique d'un site donné. Les micro-réseaux proposés en Algérie sont de nature hybride, composés de ressources conventionnelles et non conventionnelles, ils doivent être correctement dimensionnés pour garantir une alimentation électrique continue [102].

Ce chapitre vise principalement à examiner la faisabilité technico-économique d'un système hybride qui a pour objectif de satisfaire des besoins identifiés d'électricité, dans une région non raccordée à un réseau électrique (village isolé), dans la zone choisie, Adrar en Algérie. La réalisation d'un tel projet doit tenir compte de nombreuses contraintes liées aux sites, et la disponibilité ou indisponibilité locale de divers services ou structures matérielles ou administratives. Les qualités techniques et conditions que doit satisfaire le système sont les suivantes (cahier des charges système) :

- Dimensionnement : Le système devra assurer l'autonomie des besoins en électricité d'un village type.
- Système d'appoint : Le couplage d'un générateur diesel est envisagé.
- Autonomie : Un système de stockage qui est une réserve d'énergie doit assurer le fonctionnement autonome.
- Robustesse et simplicité : La durée de vie du système doit être de vingt-cinq ans.
- Coût : Économiquement le système devra être concurrentiel à une installation (photovoltaïque/éolienne/diesel/batterie) équivalente en termes de puissance et d'autonomie.

2.2 Aperçu des techniques d'optimisation de la taille

Les techniques d'optimisation de la taille peuvent être classées en techniques classiques, les techniques modernes et les outils logiciels. Les techniques classiques utilisent des méthodes de construction itératives, numériques, analytiques, probabilistes et graphiques [103]. Ces méthodes utilisent le calcul différentiel pour dériver la solution optimale. Les techniques

modernes utilisent des méthodes artificielles et hybrides [103,104]. Ces méthodes peuvent déterminer le système optimal global et ont une meilleure convergence et une meilleure précision dans la recherche d'un ensemble de solutions optimales [103,105]. La troisième approche d'optimisation pour le dimensionnement des HES comprend des outils logiciels informatiques. Certains logiciels de simulation tels que TRNSYS, orbs, Balmorel, DER-CAM, HOMER Pro, MARKAL & TIMES, Energy Plan, Top Energy, peuvent permettre l'optimisation des systèmes complexes, mais l'outil logiciel le plus largement utilisé est HOMER pro (Hybrid Optimization Model for Electric Renewable). Un autre logiciel, nommé Optimisation hybride améliorée par algorithme génétique (iHOGA) a été utilisé pour l'optimisation du dimensionnement.

La conception d'un système à haute efficacité énergétique est complexe en raison des incertitudes associées aux ressources renouvelables et à d'autres facteurs techniques, et des contraintes associées à l'emplacement du site et au système. Les méthodologies d'optimisation du dimensionnement peuvent utiliser une fonction d'optimisation à objectif unique (SOO) ou des fonctions d'optimisation à objectifs multiples (MOO). La fonction SOO est utilisée pour trouver la solution optimale correspondant à la valeur minimale ou maximale. En revanche, la fonction MOO combine deux ou plusieurs fonctions d'objectifs individuels pour déterminer un ensemble de solutions de compromis, qui permettent aux décideurs de sélectionner la solution la plus appropriée en fonction des exigences du problème [106]. La plupart des techniques classiques utilisent des algorithmes uniques avec la fonction SOO. Les techniques modernes utilisent des algorithmes uniques et hybrides pour résoudre les problèmes de SOO ou de MOO. Par conséquent, les méthodes modernes sont plus flexibles et plus souples pour traiter les problèmes d'optimisation complexes et fournissent des résultats plus précis. Une vue d'ensemble des techniques d'optimisation discutées dans l'étude [107] est présentée à la figure 2-1.

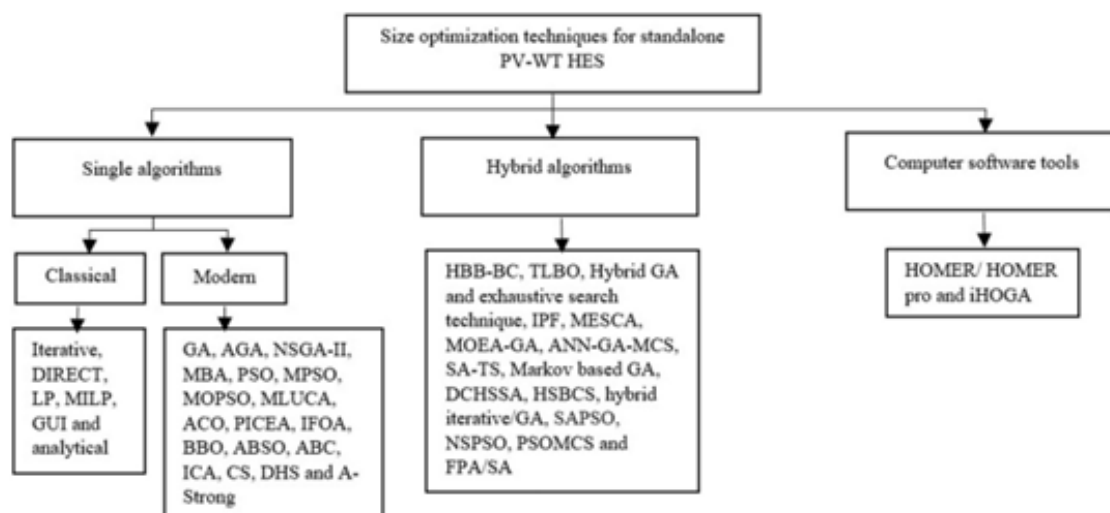


Figure 2-1 : Aperçu des techniques d'optimisation de la taille [107]

Les sites isolés sont généralement des zones d'accès difficile et dont les populations contribuent faiblement à l'activité économique du pays. La fourniture d'énergie électrique participe donc à la politique de développement.

Chapitre 2 : Analyse technico-économique et faisabilité d'un système énergétique hybride dans une communauté rurale

La mise en œuvre de système hybride autonome ou de micro-réseaux doit obéir à deux objectifs essentiels ; rendre disponible l'énergie, et à un coût acceptable au regard des revenus des populations. Ces deux objectifs ne sont pas nécessairement compatibles, et un compromis doit être obtenu. Nous avons vu dans le paragraphe précédent que le micro-réseau est une structure complexe, de par son architecture, les modèles des composants et le contrôle du flux d'énergie. Le compromis ne peut se faire manuellement et conduit à formuler un problème d'optimisation, aussi bien pour le dimensionnement que pour le contrôle. La formulation du problème d'optimisation devra définir :

- Le ou les objectifs (minimisation du coût, minimisation du taux de CO₂, etc.)
- Les contraintes (garantir une disponibilité maximale, respecter les conditions de fonctionnement des composants, etc.).

2.3 Configuration du système hybride de production d'électricité

Les détails techniques et les coûts de tous les composants matériels nécessaires à ce système sont entrés dans le logiciel. La demande de charge électrique de la communauté sélectionnée et les données météorologiques telles que l'irradiation solaire, la vitesse du vent et la température ambiante de la zone d'étude sont sélectionnées. Ainsi donc le schéma du système hybride de production d'électricité est obtenu, avec ses composants (panneaux solaires photovoltaïques PV, la turbine éolienne, le générateur diesel et le système de stockage par batteries) sont illustrés dans la fig.2-2. Dans ce système, le générateur PV, l'éolienne et la batterie sont reliés au bus CC, tandis que le générateur diesel et la charge sont connectés au bus CA. La charge connectée au système nécessite une alimentation en courant alternatif. L'énergie circule du bus CC au bus CA pour répondre à la demande de la charge ou vice-versa pour charger le banc de batteries par l'intermédiaire d'un convertisseur bidirectionnel. Comme la production d'électricité à partir de ressources renouvelables dépend des conditions météorologiques, la production décentralisée fournit le soutien nécessaire à la charge en cas d'un déficit de ces ressources. Le système hybride proposé devrait fournir l'électricité pour une communauté rurale, avec une charge moyenne de 245 kWh/jour et une charge de pointe de 13 kW, respectivement.

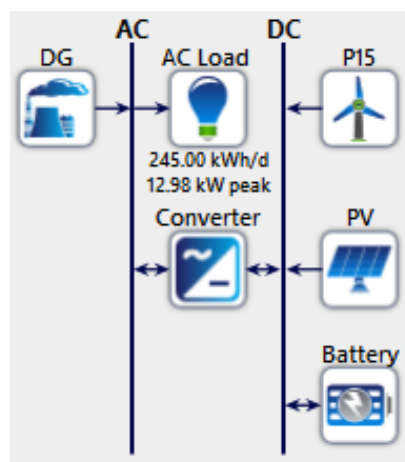


Figure 2-2 : Schéma de conception du système de production d'énergie hybride

2.4 Procédure d'optimisation avec le logiciel HOMER

Dans cette étude, le modèle d'optimisation hybride pour les ressources énergétiques multiples (HOMER), développé par le NREL (National Renewable Energy Laboratory) aux Etats-Unis [108], est utilisé comme modèle de simulation, en effectuant une analyse technico-économique. Il modélise de nombreuses ressources telles que les éoliennes, les panneaux photovoltaïques, les piles à combustible, les petites centrales hydroélectriques, la biomasse, les convertisseurs, les batteries et les générateurs conventionnels. Il prend en compte les systèmes hybrides en mode connecté au réseau et en mode autonome.

L'optimisation dimensionnelle des systèmes énergétiques représente un travail énorme et dans la présente étude, ce logiciel est utilisé pour déterminer le dimensionnement optimal basé sur le coût le plus bas en considérant la fonction objective SOO et les contraintes énergétiques et contraintes techniques des ressources et donne un ensemble de configurations différentes du système. La configuration optimale basée sur le coût de l'énergie (COE), le coût net actuel (NPC), la fraction renouvelable (RF) et les émissions de gaz à effet de serre [109-110].

Pour notre cas d'étude la viabilité du développement d'un système hybride autonome pour un village dans la région d'Adrar, en Algérie est évaluée à travers l'analyse technico-économique et environnementale. Une fois les données d'entrée introduites dans le logiciel, ce qui va être décrit dans la section suivante, les tailles optimales des équipements HRES sont déterminées en trois étapes: simulation, optimisation et analyse de sensibilité. Ces étapes sont présentées dans les sous-sections suivantes. La méthodologie utilisée pour l'optimisation est indiquée à la figure 2-3. Le processus de simulation a deux objectifs. Dans un premier temps, il vérifie la faisabilité du système. Un système est considéré comme faisable s'il peut desservir adéquatement les charges électriques et thermiques et satisfaire toute autre contrainte imposée par l'utilisateur. Dans un second temps, il permet d'estimer le coût du cycle de vie du système, c'est-à-dire le coût total des composants du système.

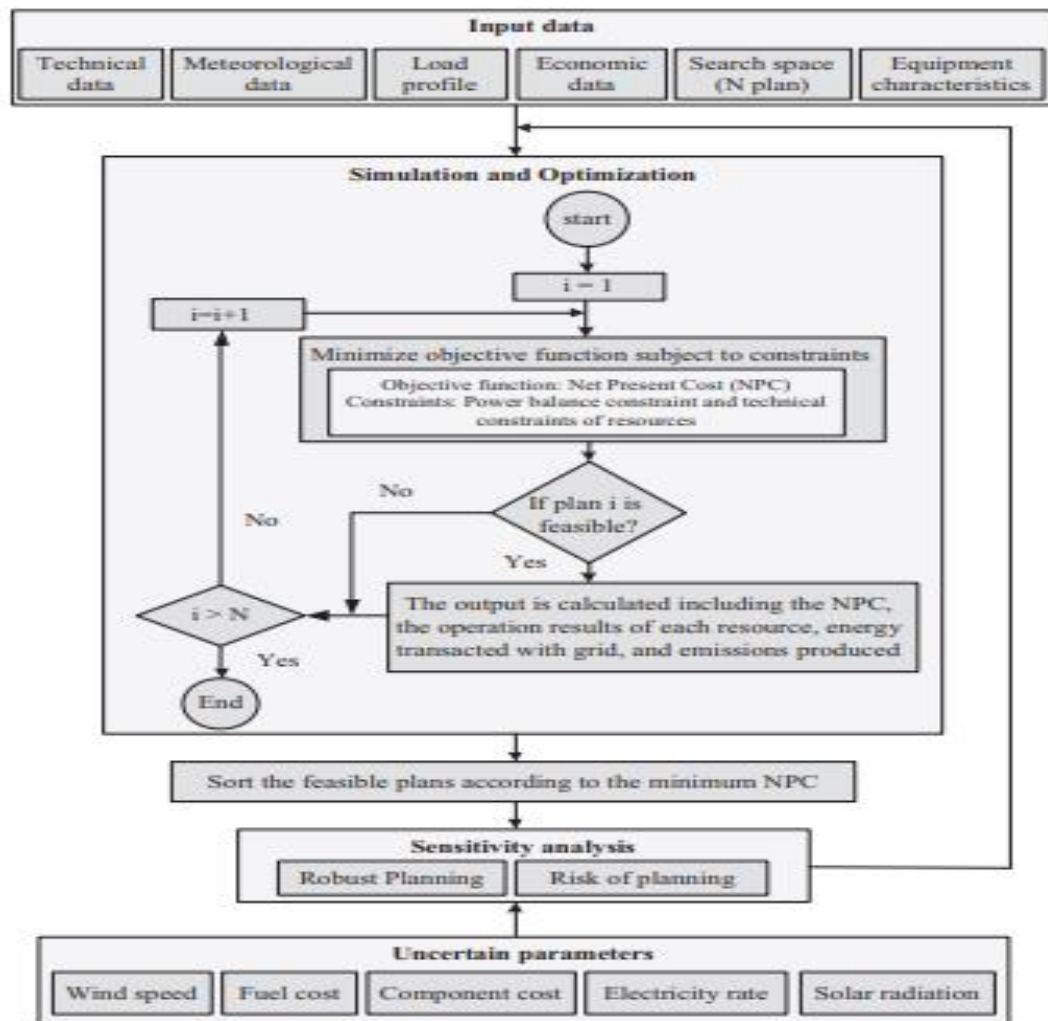


Figure 2-3 : Procédure d'optimisation de HOMER [108].

2.5 Données d'entrée

Le choix des entrées du système est critique pour mettre en avant ces performances des composants. HOMER requiert six types de données pour la simulation et l'optimisation, notamment le profil de charge, les données météorologiques, les caractéristiques des équipements, l'espace de recherche, les données économiques et techniques. Ces données sont décrites en détail dans les sous-sections suivantes.

2.5.1 Profil de Charge

Le profil de la charge est indispensable à la conception d'un système en mesure de répondre aux demandes d'électricité des consommateurs. Pour chaque région il représente le facteur le plus important pour la simulation et l'optimisation. L'information sur les besoins en électricité des villages est la base d'un bon dimensionnement du système de production. Les besoins en électricité peuvent être divisés en trois catégories, à savoir les besoins des ménages, les besoins pour l'éclairage public et les besoins des infrastructures communautaires du village. Dans

Chapitre 2 : Analyse technico-économique et faisabilité d'un système énergétique hybride dans une communauté rurale

certaines régions, notamment les zones rurales et éloignées, où les données réelles de consommation ne sont pas disponibles, le profil de charge doit être prévu en tenant compte de la spécification de cette région. Ces données sont introduites dans HOMER sous forme de profil quotidien. Dans cette étude, nous avons utilisé un profil de consommation électrique qui est associé aux autres profils (vent, irradiation,) pour tester les performances de l'ensemble du système hybride.

La figure 2-4 présente un scénario de profil de charge journalier de la localité d'Adrar choisi par la présente étude. Ce profil représente la puissance appelée à chaque heure. On note une évolution rampante de la pointe entre 00 h et 17 h. A partir de 18 h, on note une hausse de la pointe qui atteint son maximum à 21 h avec une d'une puissance maximale de 13 kW. La demande en énergie électrique est déduite de cette courbe de charge et est estimée à 89,352 MWh par an , un besoin total en énergie de 245 kWh/jour, avec une puissance moyenne journalière de 10,2 kW, la courbe de charge reste aux alentours de 5 kW entre 07 h et 18 h, les activités prédominantes sont l'agriculture et l'élevage. L'énergie est demandée majoritairement pour les activités administratives, le fonctionnement des écoles et des centres de santé, et les petits espaces économiques (boutiques, ateliers artisanaux, etc.). Par contre, à partir de 18 h, pendant que la majeure partie de la population retourne dans les foyers, plusieurs points économiques et centres de santé restent en activité et on enregistre aussi quelques coins d'animations nocturnes d'où l'augmentation de la demande.

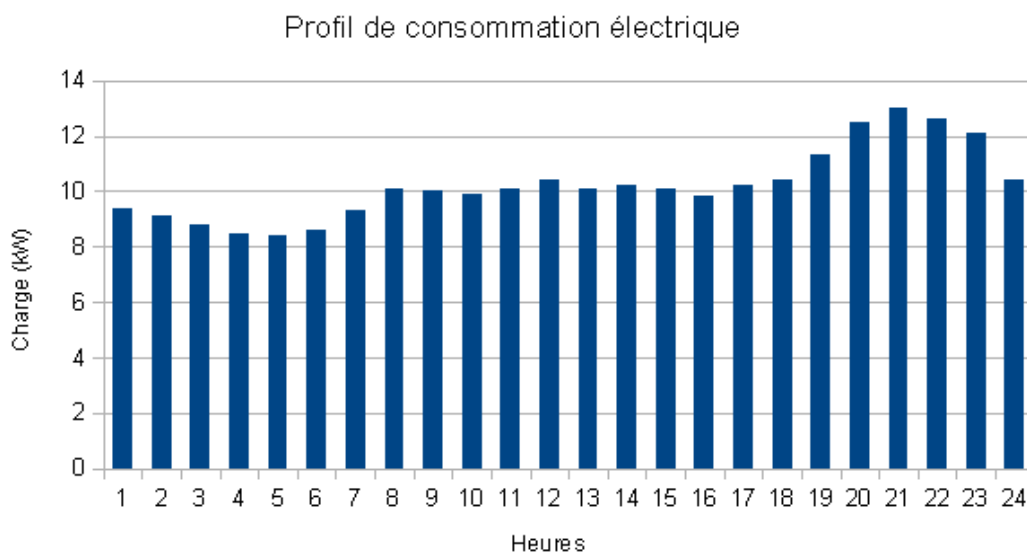


Figure 2-4 : Profil de consommation électrique de 24 heures d'opération.

La figure 2-5 Représente la demande de charge moyenne mensuelle du site. On note que le profil de consommation adopté dans cette étude est considérée identique pour tous les jours, elle correspond au profil de consommation rencontré généralement dans les sites isolés.

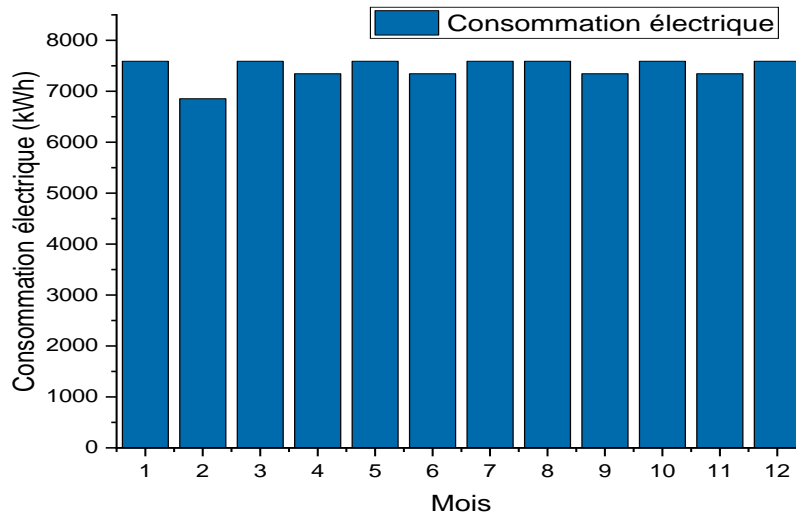


Figure 2-5 : Profil de charge moyenne mensuelle électrique desservie au village.

2.5.2 Description du site et données météorologiques

2.5.2.1 Situation géographique

Pour cette étude, une localisation géographique est considérée : Adrar, située à l'extrême sud-ouest en Algérie, comme le montre la fig.2-6. Elle s'étend sur une superficie considérable de 663 km², soit près d'un cinquième (1/5) du territoire national. Sa population est estimée à 65 000 habitants dont 76% de population rurale [111]. Adrar est éloigné de la capitale à près de 1600km, elle est située dans un environnement désertique. La majorité des sites situés dans cette région pourraient être considérés comme des sites isolés vu que leur superficie est immense et leur éloignement par rapport à la ville et les uns par rapport aux autres.

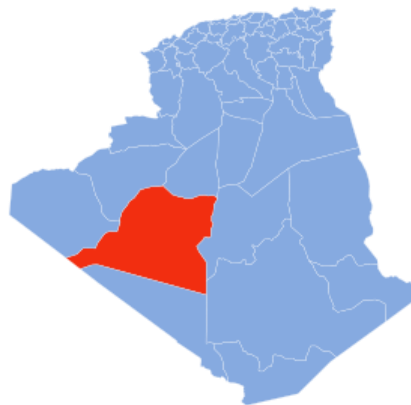


Figure 2-6 : Localisation géographique de la wilaya d'Adrar en Algérie.
(<http://www.algerie-monde.com/wilayas/Adrar/>)

Le Tableau 2-1 suivant représente les informations relatives du site choisi.

Tableau 2-1 : Coordonnées géographiques du site choisi.

SITE /CARACTERISTIQUE	LATITUDE	LONGITUDE	ALTITUDE
ADRAR	27.82°N	0.18°W	263.8 m

2.5.3 Évaluation des ressources en énergie renouvelable

On présente, l'évaluation de la disponibilité des ressources locales en énergie renouvelable car elle est essentielle dans la phase initiale de la conception du système. Dans ce chapitre, le potentiel d'énergie solaire, d'énergie éolienne et la température de la région sont évalués sur la base des données météorologiques obtenues à partir de la base de données atmosphériques de la NASA 'Surface Meteorology and Solar Energy' [112]. Ces données météorologiques sont introduites dans le logiciel sous forme de moyennes mensuelles ou de séries chronologiques.

2.5.3.1 Vitesse moyenne mensuelle du vent

La région d'Adrar est dotée d'un bon potentiel énergétique éolien d'après l'annexe F. La vitesse horaire moyenne du vent à Adrar connaît une variation saisonnière modérée au cours de l'année. À 10 mètres au-dessus du sol. Le vent observé à cet emplacement dépend fortement de la topographie locale et d'autres facteurs, et la vitesse et la direction du vent instantané varient plus que les moyennes horaires.

Le mois le plus venteux de l'année à Adrar est mars, avec une vitesse moyenne mensuelle du vent de 6,9 m/s. Le mois le plus calme de l'année à Adrar est novembre, avec une vitesse moyenne mensuelle du vent de 5,56 m/s.

Les mesures ont montré que la région d'Adrar est l'une des régions les plus ventées d'Algérie. La figure 2-7 montre la variation de la vitesse du vent.

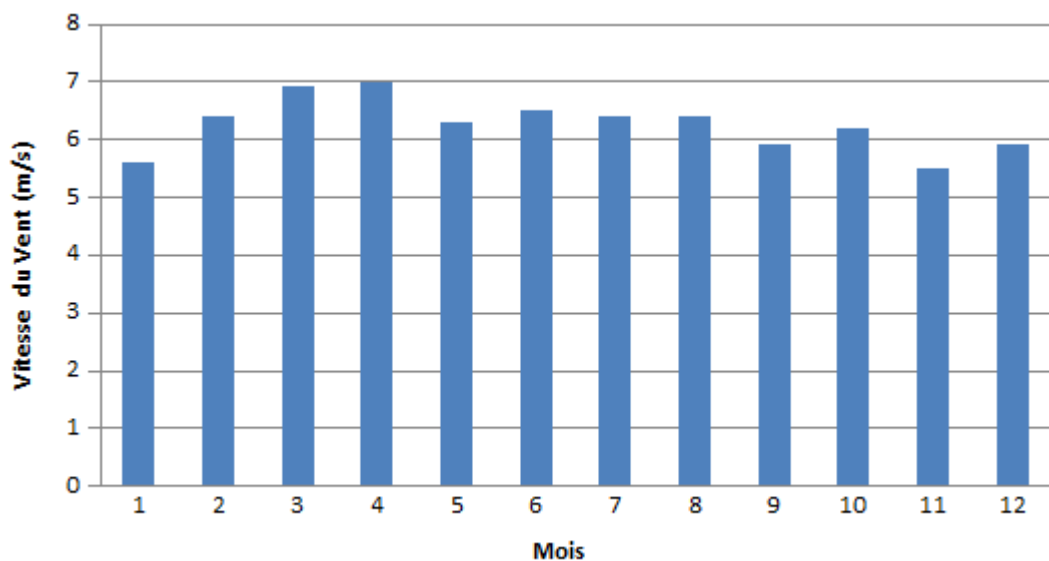


Figure 2-7: Evolution de la vitesse moyenne mensuelle du vent (site- Adrar).

2.5.3.2 L'irradiation solaire

La moyenne mensuelle de l'irradiation solaire globale sur le plan horizontal est présentée sur la figure 2-8. Adrar, par son emplacement dans le sud algérien, est doté d'une grande insolation (6,42 kWh / m² / j). Mars, avril, mai, juin, juillet et août sont les mois les plus ensoleillés de l'année, alors que novembre, décembre et janvier ont les plus bas niveaux de rayonnement dans l'année. La lumière du jour moyenne annuelle est d'environ 12,125 h / j.

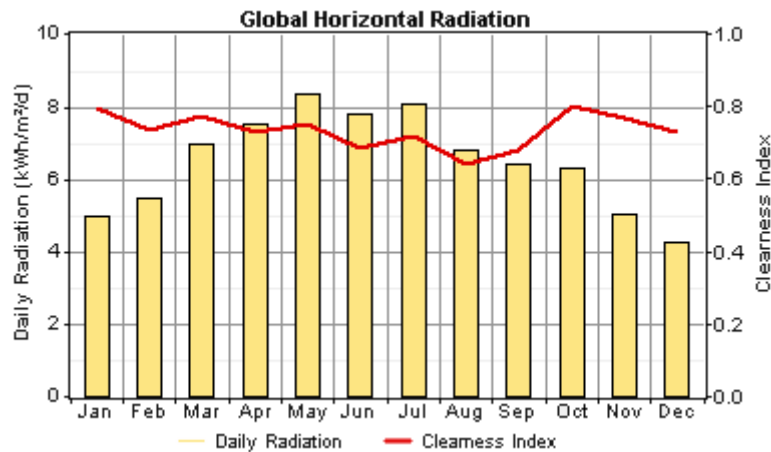


Figure 2-8 : Irradiation solaire globale sur le plan horizontal.

2.5.3.3 Températures

Des écarts de températures considérables ; la température maximale est de plus 45°C en Juin, Juillet et en Aout. En saison hivernale les températures sont souvent basses et peuvent atteindre 12°C à 7°C en Décembre et Janvier. La moyenne annuelle la température est d'environ 24,4 ° C.

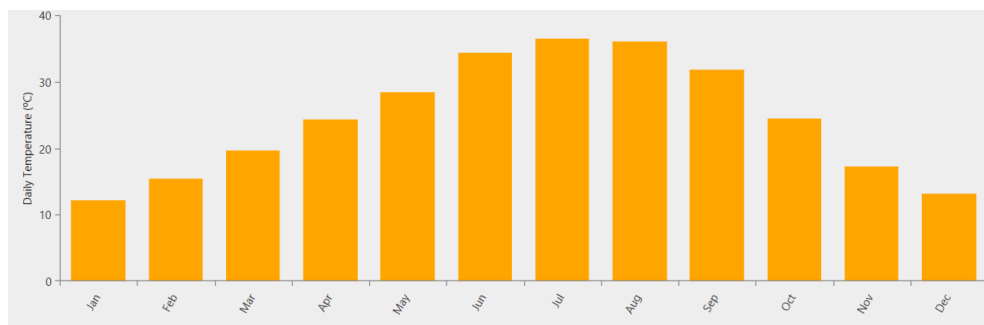


Figure 2-9: Evolution de la température ambiante moyenne mensuelle.

On note une excellente compatibilité avec le changement des saisons de la région, le mois de mai est le mois le plus ensoleillé à Adrar, avec une irradiation journalière moyenne de 8,4 kWh/m²/jours. Le mois de décembre est le mois le moins ensoleillé en Algérie, avec une irradiation journalière moyenne de 2,5 kWh/m²/jours. Nous pouvons aussi diviser les irradiations en trois périodes :

Période 1 (faible ensoleillement) : Elle correspond à des irradiations journalières moyennes inférieure à 5 [kWh/m² /jours]. Elle concerne les mois : novembre, décembre, janvier.

Période 2 (ensoleillement moyen) : Elle correspond à : 5 [kWh/m² /jours] ≤ irradiations journalière <7 [kWh/m² jours]. Elle concerne les mois : février, mars, avril, août, septembre et octobre.

Période 3 (ensoleillement élevé) : Elle correspond à des irradiations journalières ≥ 7[kWh/m² /jours]. Elle concerne les mois de mai, juin, juillet.

2.5.4 Données économiques

Le tableau 2-2 présente à la fois le coût de et durée de vie des différents composants.

Concernant le diesel, le prix du fuel est de (0,8 \$/L). La durée de projet est de 25 ans.

Tableau 2-2: Coûts net actuel de l'installation

Coût (\$)			Durée de vie
PV			25an
Initial: 57000	Replacement: 0	O&M: 0	
WT			20an
Initial: 29000	Replacement: 9042	O&M: 0	
DG			20000h
Initial: 11590	Replacement: 17869	O&M: 12663	
Convertisseur			15an
Initial: 9000	Replacement: 3755	O&M: 0	
Batterie			12an
Initial: 36800	Replacement: 2738	O&M: 895	

Le taux d'intérêt nominal sans risque utilisé dans l'analyse a été fixé à 6%. Le taux d'intérêt représente la charge que l'investisseur subit en raison de l'engagement de l'argent dans le projet. Nous avons fixé comme contrainte, la fraction de l'énergie à produire par la partie renouvelable du système, qui est de 60 % au minimum de l'énergie totale produite. En se basant sur la latitude de l'Adrar ($25^\circ < \phi = 27,82^\circ < 50^\circ$) et selon (SolarPanelTilt.com), l'angle d'inclinaison optimal des panneaux photovoltaïques est obtenu comme suit : ($\beta = 0,76 \phi + 3,1 = 24,24^\circ$).

2.6 Modèles physiques et aspects techniques des composants

Le système PV-éolien-batteries-générateur diesel, comprend un générateur photovoltaïque et une turbine éolienne en tant que sources renouvelables, un générateur diesel en tant que système de secours, une batterie comme support de stockage et un convertisseur bidirectionnel. Des informations sur les composants de l'installation sont obtenues à partir de la littérature et des fabricants afin d'obtenir des évaluations actuelles et futures des coûts et de l'efficacité du système complet. Les données techniques et économiques détaillées sont présentées dans la sous-section suivante.

2.6.1 Modélisation des ressources renouvelables

2.6.1.1 Puissance de sortie du générateur PV

La puissance de sortie du générateur photovoltaïque pour chaque pas de temps est calculée à l'aide de l'équation suivante [113].

$$P_{PV}(t) = f_{PV} \cdot R_{PV} \cdot \left(\frac{G_T}{G_{T,STC}}\right) \cdot [1 + \alpha_p(T_C - T_{c,STC})] \quad (2.1)$$

Où R_{PV} est la puissance nominale du générateur photovoltaïque (kW), f_{PV} est le facteur de déclassement du champ PV (%), G_T l'irradiation solaire globale du lieu considéré (kW/m^2), $G_{T,STC}$ est l'irradiation solaire globale dans les conditions de références (kW/m^2), α_p est la variation de la puissance PV en fonction de la température ($\%/^{\circ}\text{C}$), T_C est la température de la cellule PV ($^{\circ}\text{C}$), $T_{c,STC}$ est la température de la cellule dans des conditions de test standard égale à 25°C , respectivement.

f_{PV} : Facteur de dégradation. Il tient compte du point de fonctionnement des modules qui est rarement optimal et qui peut être aggravé par la baisse des caractéristiques des modules ou de leur rendement dans le temps (vieillessement et dépôt de poussière). Ici, f_{PV} sera égal à 89,5%.

2.6.1.2 Puissance de sortie du générateur éolien

Comme pour les spécifications du module solaire PV, les spécifications de l'éolienne sont données pour un ensemble de conditions spécifiques. La courbe de puissance est déterminée pour une densité de l'air au niveau de la mer, ce qui signifie que la puissance produite ne correspond pas nécessairement à la courbe de puissance à une altitude différente du niveau de la mer. L'équation (2.3) est utilisée pour calculer la puissance de sortie spécifique au site, où le rapport de masse d'air est inclus pour tenir compte de la variation de la masse d'air [114].

$$P_{WTG} = \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right) \times P_{WTG,STP} \quad (2.3)$$

Où :

P_{WTG} : Puissance de sortie de l'éolienne (kW),

$\frac{\rho}{\rho_0}$: Rapport de masse volumique de l'air,

$P_{WTG,STP}$: Puissance de sortie à la température et à la pression standard au niveau de la mer (15°C et $1,225 \text{ kg/m}^3$ respectivement).

La turbine choisie est de marque Proven energy 15, c'est une turbine à axe horizontal, à trois pâles, le rotor fonctionne dans la direction du vent, aux grandes vitesses du vent, les pâles se déplacent dans la direction du vent formant un angle supérieur à 90° avec l'axe de rotation (voir l'annexe D), ce qui donne au rotor une forme conique et diminue ainsi la vitesse de rotation. La turbine fonctionne sans réducteur de vitesse, ce qui réduit énormément le niveau de bruit et les pertes par frottement mécanique, ainsi que les périodes d'arrêt et le coût d'entretien. Les données du constructeur présentées dans le tableau 2-3.

Tableau 2-3 : Données techniques de l'éolienne PROVEN 15.

Spécifications	Proven Energy 15	Unité
----------------	------------------	-------

Puissance nominale	15	kW
Vitesse nominale du vent	12	m/s
Vitesse min. du vent (pour démarrage)	2,5	m/s
Vitesse max. dont la turbine peut supporter	70	m/s
Diamètre du rotor	9	m
Surface balayée par le rotor	64	m ²
Hauteur de la tour	25	m
Vitesse de rotation maximale	140	tr/min
Tension nominale	300	V
Durée de vie	25	ans

L'aérogénérateur considéré est caractérisé par sa courbe de puissance illustrée sur la figure (2-10).

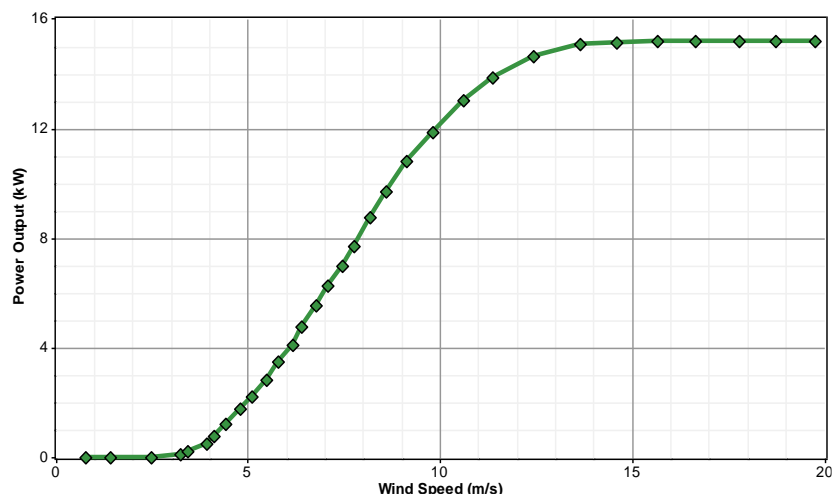


Figure 2-10: Courbe de puissance relative à l'éolienne.

2.6.2 Modèle de batterie

La batterie ne peut pas être complètement chargée ou déchargée d'un coup. Cela signifie que la capacité de la batterie à se charger et à se décharger ne dépend pas seulement de son état actuel de charge, mais aussi sur son historique de charge et de décharge.

La surveillance de l'état de charge de la batterie (SOC) devient essentielle. Elle protège la batterie de la surcharge et améliore sa durée de vie. En d'autres termes, l'état de charge. Autrement dit, l'état de charge d'une batterie dans HOMER est défini comme le rapport entre sa capacité actuelle ($Q(t)$) et la capacité nominale (Q_n) (voir Eq. 2.4).

$$SOC(t) = \frac{Q(t)}{Q_n} \quad (2.4)$$

Tableau 2-4 : Données techniques des batteries.

Spécifications	Valeurs	Unités
Type de courant délivré	DC	
DDP	48	V
Courant de décharge	192	A
Puissance	9.2	kW
Capacité nominale	1923	Ah
Etat de charge minimale permise	50	% de la charge max.
O&M	180	\$/kWh
Coût	3680	\$
Durée de vie minimale	10	Ans

2.6.3 Modèle du générateur Diesel

Dans cette étude, un générateur diesel d'une capacité de 18.5kW est sélectionné. Les principales propriétés physiques du générateur sont sa puissance de sortie maximale et minimale, sa durée de vie en heures de fonctionnement, le type de carburant qu'il consomme, et sa courbe de consommation, qui rapporte la quantité de carburant consommée pour la puissance électrique produite, le rendement et la consommation horaire de carburant de la diesel doivent être pris en compte dans la conception d'un système énergétique hybride. La figure 2-11 présente le générateur retenu dans l'étude.

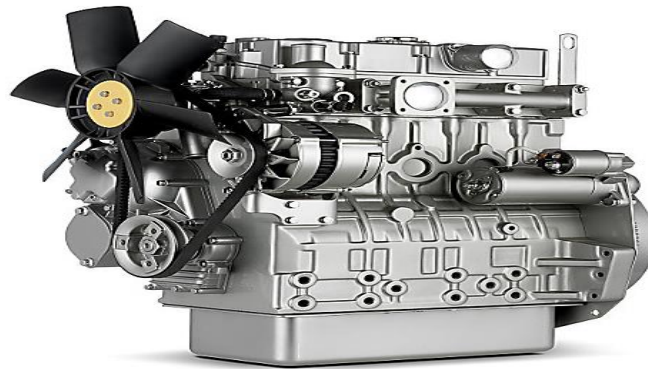


Figure 2-11 : Générateur diesel de type 404C-22G du fabricant PERKINS.

HOMER suppose que la courbe de consommation de carburant d'un générateur diesel est une ligne droite. Le générateur diesel est donc modélisé par sa consommation de carburant et peut être exprimée par l'expression suivante [114] :

$$F(t) = a.P_{DG}(t)+b.P_n \quad (2.5)$$

Où P_{DG} est la puissance électrique générée par le générateur en kW, $F(t)$ est la consommation horaire du carburant (l/h), P_n est la puissance nominale (kW) du générateur, a et b sont des paramètres constants en (L/kWh), qui représentent les coefficients de consommation du carburant, et peuvent être estimés à 0,246 et 0,08415, respectivement [115].

Tableau 2-5: Données techniques du moteur diesel

Moteur Diesel	
Constructeur	PERKINS
Pays	UK
Modèle	404C-22G
Vitesse de rotation	1500 tr/min
Puissance net	18.5 kW
Refroidissement	À eau
Circuit électrique (DC)	12 V
Consommation spécifique du carburant	297 g / kWh

2.6.4 Convertisseur bidirectionnel

Un convertisseur bidirectionnel d'une efficacité de 95 %, fonctionnant à la fois comme un redresseur (entrée CA, sortie CC) et un onduleur (entrée CC, sortie CA), est utilisé.

HOMER calcule la puissance de sortie en se basant sur le flux d'énergie en utilisant l'équation (2.6) [116], où $P_o(t)$ est la puissance de sortie de convertisseur et $P_i(t)$ la puissance d'entrée au convertisseur.

$$P_o(t) = P_i(t) \times \eta_{inv} \quad (2.6)$$

2.7 Critères d'analyse dans le logiciel HOMER

La faisabilité et la durabilité de chaque configuration de conception est évalué sur la base de critères d'évaluation techniques, économiques et environnementaux. Le modèle HOMER définit ces critères comme suit :

Excès d'électricité : L'excédent d'électricité (EE) est la quantité totale d'électricité non consommée au cours de l'année. L'énergie électrique excédentaire est mise au rebut car elle ne peut pas être utilisée pour servir une charge ou charger les batteries.

Charge non satisfaite : La charge totale non satisfaite (UL) est la quantité totale de charge qui n'a pas été satisfaite en raison d'une production insuffisante pendant l'année. Elle est la charge électrique que le système électrique est incapable de desservir et qui se produit lorsque la demande en électricité dépasse l'offre.

Production électrique : La production électrique totale (PE) est la quantité totale d'énergie électrique produite par le système électrique en une année. Elle est la somme de l'énergie électrique produite par tous les composants du système.

Coût net actualisé (NPC) : Le coût net en anglais (NPC: Net Present Cost) d'un système intervient dans le modèle économique et exprime le coût réel de chaque composant du système. Pour un composant donné, le NPC intègre le coût d'acquisition, le coût de remplacement et le coût lié à la maintenance. Il prend en compte le taux d'inflation et les taux d'intérêt. Pour calculer le coût actuel net total de chaque composant du système, et du système dans son ensemble, HOMER utilise l'équation suivante [117] :

$$NPC = \frac{C_{ann,tot}}{CRF(i,N)} \quad (2.7)$$

Avec :

$C_{ann,tot}$: Coût total annualisé en \$/an. .

N: Durée de vie du projet en années.

i : Taux d'intérêt réel annuel en %.

CRF : Facteur de récupération du capital.

Le coût annualisé total du système (ACS) est l'estimation du coût du système pour une durée de fonctionnement donnée. Il intègre tous les éléments entrant en ligne de compte dans l'acquisition, l'exploitation, la maintenance, etc. Le modèle économique basé sur le coût annuel du système est donné par la formule (2.8) suivante [117]:

$$C_{ann,tot} = C_{taci} + C_{taom} + C_{tarep} \quad (2.8)$$

Avec :

- Ctaci: Coût total de l'investissement
- Ctaom: Coût total de la maintenance
- Ctarep: Coût total de remplacement des équipements

Le facteur de récupération du capital est donné par l'équation suivante :

$$CRF(i, N) = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (2.9)$$

Enfin, le coût par kWh de l'électricité est calculé en utilisant l'équation (2.10):

$$COE = \frac{C_{ann,tot}}{E_{serv}} \quad (2.10)$$

Où E_{serv} est la charge électrique totale desservie (kWh).

Pour les montants récupérés S (\$) des composants de puissances à la fin du projet peut être déterminé en utilisant l'équation (2.11), où C_{rep} représente le coût de remplacement du composant (\$), L_{rem} est la durée de vie restante du composant après la fin du projet (an), et L_{com} est la durée de vie du composant (an).

$$S = C_{rep} \frac{L_{rem}}{L_{com}} \quad (2.11)$$

2.7.1 Stratégie de de répartition d'énergie

Cycle Charging : Une fois en marche, le groupe électrogène alimente prioritairement les consommateurs puis, s'il n'est pas à son maximum de puissance, il charge les batteries.

2.8 Résultats de la simulation des performances du système hybride et discussion

La mise en œuvre de la simulation sous l'environnement HOMER .ceci à travers une étude d'un cas, Afin de répondre à des objectifs définis dans la proposition du sujet et de démontrer la faisabilité de la mise en œuvre de la configuration choisie .

	PV (kW)	P15	GD (kW)	Batterie	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Fuel (L)	GD (hrs)	Batt. Lf. (yr)
⚠	10	1	18.5	1	10	\$ 91,270	11,400	\$ 237,002	0.208	0.70	10,662	3,141	12.0
⚠	15	1	18.5	1	10	\$ 110,270	11,112	\$ 252,313	0.222	0.75	10,056	3,380	12.0
⚠	10	1	18.5		10	\$ 87,590	19,382	\$ 335,355	0.295	0.70	15,761	8,217	
⚠	15	1	18.5		10	\$ 106,590	17,933	\$ 335,837	0.295	0.75	14,550	7,626	

Figure 2-12 : Variantes proposées par HOMER.

Les conceptions ont été classées en fonction du meilleur COE dans la figure (2-12). Cette dernière montre une liste de toutes les configurations faisables. Ils sont énumérés de haut en bas, de la plus rentable à la moins rentable. On choisit pour l'étude, la deuxième configuration PV /éolien /diesel/batteries/convertisseur.

2.8.1 Production d'électricité des panneaux PV, de l'éolienne et du générateur diesel

On a choisi la conception (C₂) avec la production électrique renouvelable la plus élevée. La production mensuelle d'électricité produite par les sources du système est présentée à la figure 2-13. Il y a une grande différence dans la contribution énergétique entre les trois sources principales. L'éolienne développe la plus grande puissance, On remarque que ces courbes sont très semblables avec celles qui représentent la distribution des vitesses moyennes journalières du vent. Les mois les plus ventés (mars, avril, mai et juin) sont caractérisés par une production importante et inversement.

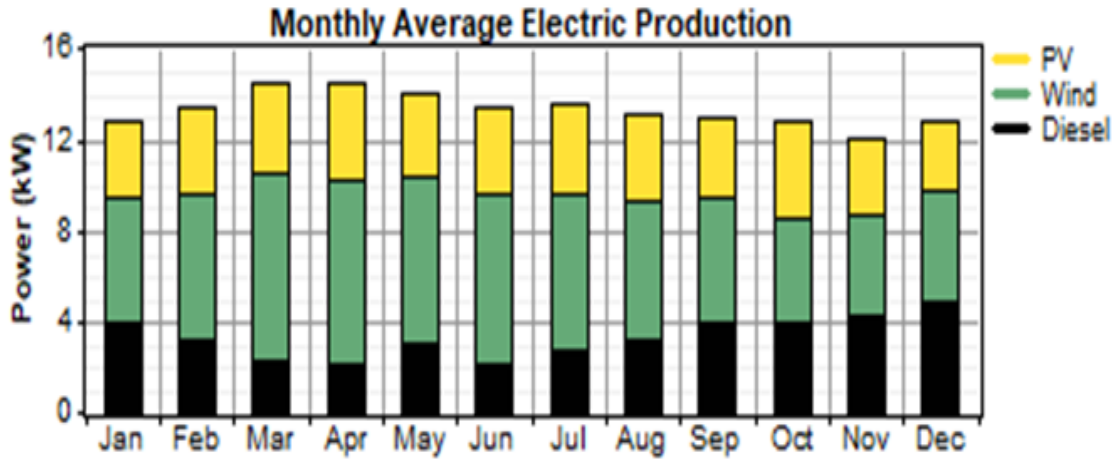


Figure 2-13 : Production moyenne mensuelle d'électricité de la conception C₂ sous la stratégie de répartition CC.

La figure 2-14 présente la courbe de la série chronologique sur 24 heures pour le 1er janvier afin de comprendre la relation entre l'offre et la demande d'électricité pour le site sélectionné. La contribution de chaque élément à la production d'électricité du système PV, de l'éolienne et de générateur diesel DG a été présentée. Les points suivants peuvent être observés à partir de la courbe des séries chronologiques :

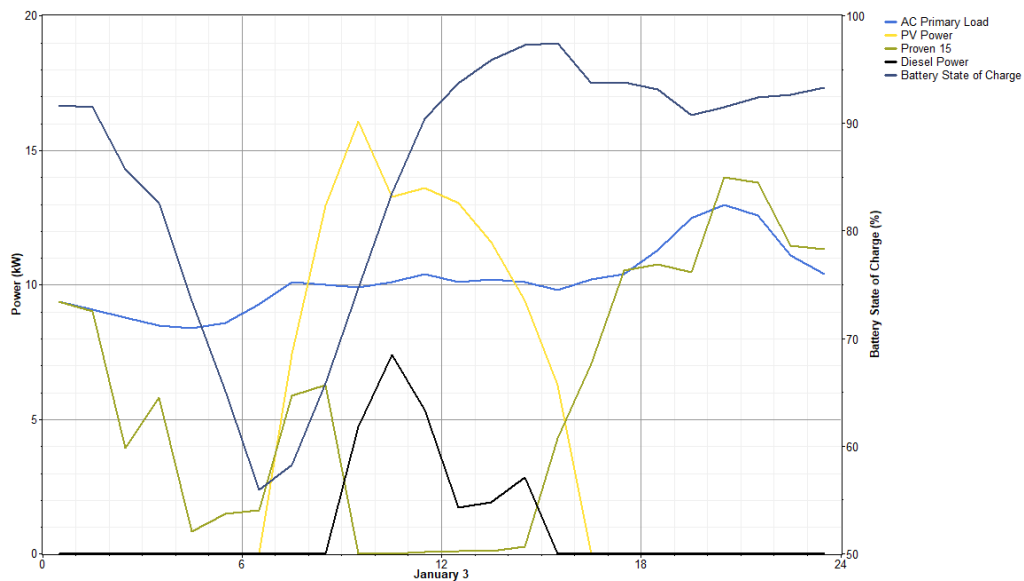


Figure 2-14: Distribution horaire de la production d'électricité des sources, de la charge consommée et le SOC du système de stockage.

De 00h30 à la 7ème heure : presque la totalité de la charge a été servie par l'énergie stockée dans les batteries et une partie par l'éolienne. Les panneaux PV, et le DG ne fonctionnent pas pendant cette période du temps.

De la 7 heure à la 17 heure : La charge est desservie par l'électricité produite par le réseau PV et l'énergie stockée dans les batteries. L'éolienne ne produit pas assez alors le DG est exploités de 8h30 à 10h30.

Chapitre 2 : Analyse technico-économique et faisabilité d'un système énergétique hybride dans une communauté rurale

De 16h30 à 20h00 : Comme le générateur PV ne peut pas produire d'électricité le soir et la nuit, la demande d'électricité est satisfaite par le fonctionnement de l'éolienne, et de la batterie. La batterie contribue à fournir de l'électricité jusqu'à la vingt énième heures, puis il se charge. Le niveau de SOC reste élevé de 19 h00 à 20h00 heure.

De 18h30 à 20h30 : Une augmentation de la demande d'électricité peut être observée pendant cette période

De la 20h30 à la 22h30 : La demande d'électricité diminue, la charge est servie par l'éolienne uniquement. Le surplus charge les batteries.

2.8.2 Faisabilité économique

Une fois les performances techniques du système optimal choisi sont assurées, il est important d'examiner sa faisabilité d'un point de vue économique. Les résultats obtenus après l'optimisation montrent que le NPC du système hybride est de 250794\$. Ce chiffre est largement dominé par le coût d'investissement des composants, suivi de coût de Fuel du diesel et de leur coût de remplacement et de maintenance.

Le NPC de la conception énergétique hybride sélectionnée en fonction du type de coût et du composant est présenté à la figure (2-15). On constate que pour le NPC, les composants les plus coûteux sont le groupe électrogène et le système photovoltaïque ; viennent ensuite l'éolienne, le convertisseur et les batteries dans l'ordre. Les panneaux PV ne seront pas remplacés, le DG sera remplacé trois fois respectivement aux années N° 8, 16 et 23, avec une récupération en dernière année de 2033 \$. La turbine sera aussi remplacée pour l'année N°20, avec une récupération de 5068 \$. Pour les batteries deux remplacement (année N°12 et N°24), et pour le convertisseur un seul remplacement (année N°15).

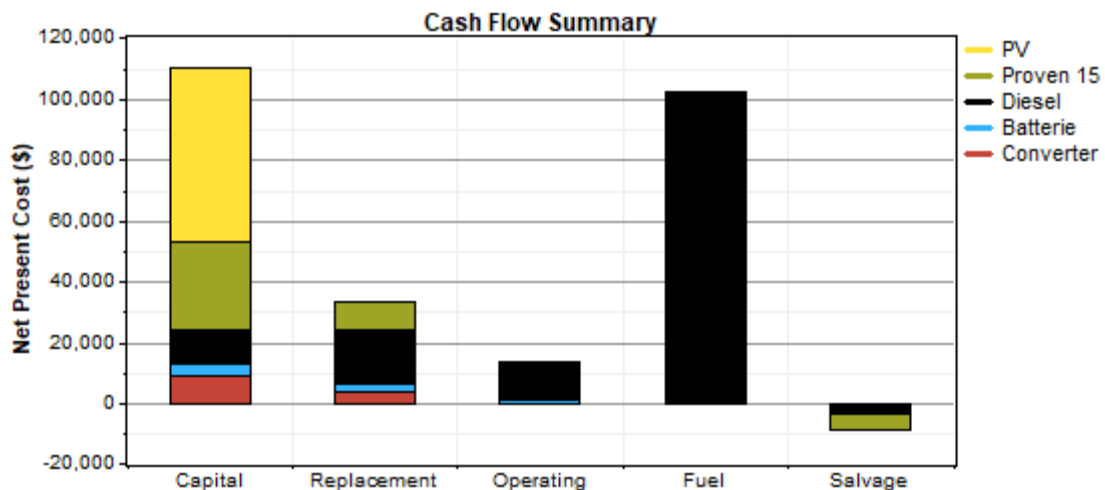


Figure 2-15: Coût actuel net du système hybride sélectionné en fonction du type de coût et du composant.

Le générateur diesel (DG) présente le coût le plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie, cela est principalement attribué au prix élevé du carburant et aux coûts d'entretien et de maintenance.

2.8.3 Comparaison entre les configurations faisables

On donne la comparaison des principaux paramètres économiques, environnemental et fraction renouvelable des configurations. On note :

DG – WT – PV – Batterie : Configuration C₁

DG – WT – PV – Batterie: Configuration C₂

DG – WT – PV: Configuration C₃

DG – WT – PV: Configuration C₄

Système classique diesel : Configuration C₅

A l'aide de l'analyse technique et économique développée ainsi que des hypothèses de coût, nous pouvons déduire les résultats de simulation, le coût du kWh prévu et la fraction renouvelable pour les différentes configurations.

En ce qui concerne la protection de l'environnement, la figure (2-16) illustre la contribution des ressources énergétiques renouvelables dans chaque configuration réalisable. On peut voir que les énergies renouvelables sont le principal contributeur à la production d'électricité dans les quatre configurations (70% pour les configurations C₁ et C₃ et 75% pour C₂ et C₄). Cela signifie que les quatre configurations peuvent réduire de manière significative la dépendance au carburant diesel. Par rapport au système conventionnel fonctionnant au diesel.

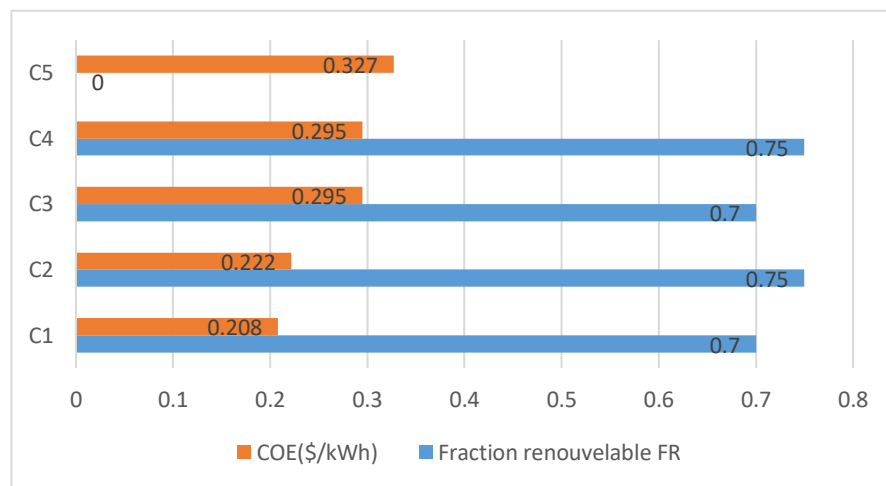


Figure 2-16: Contribution des ressources renouvelables (%) et le coût du kWh dans chaque configuration faisable.

Les figures (2-17 et 2-18) montrent le NPC (appelé le coût du cycle de vie) et une évaluation du point de vue des émissions en CO₂ pour toutes les configurations réalisables et celle de diesel seul.

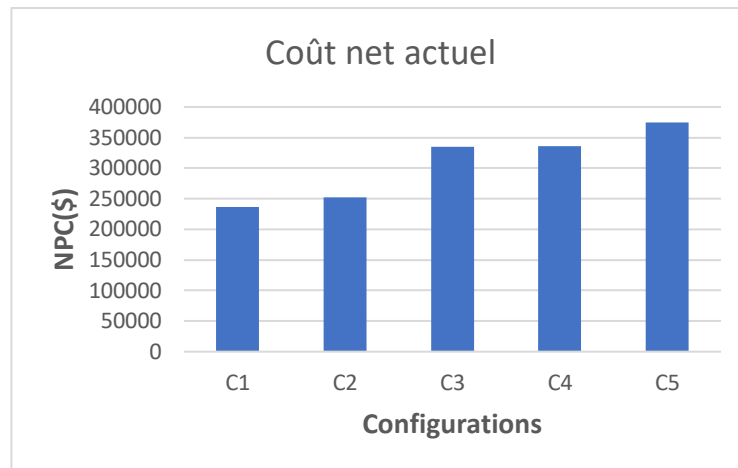


Figure 2-17: Coût du cycle de vie (NPC) dans chaque configuration faisable.

Dans HOMER les émissions des gaz polluants proviennent uniquement de la génératrice diesel. La réduction de ces émissions est l'objectif capital de cette étude, et ce dans le sens de remédier aux problèmes liés à la pollution atmosphérique. Le CO₂ (dioxyde de carbone) et les NO_x (oxydes d'azote) sont deux polluants atmosphériques d'importance majeure. Ils sont les principaux gaz dégagés par la combustion.

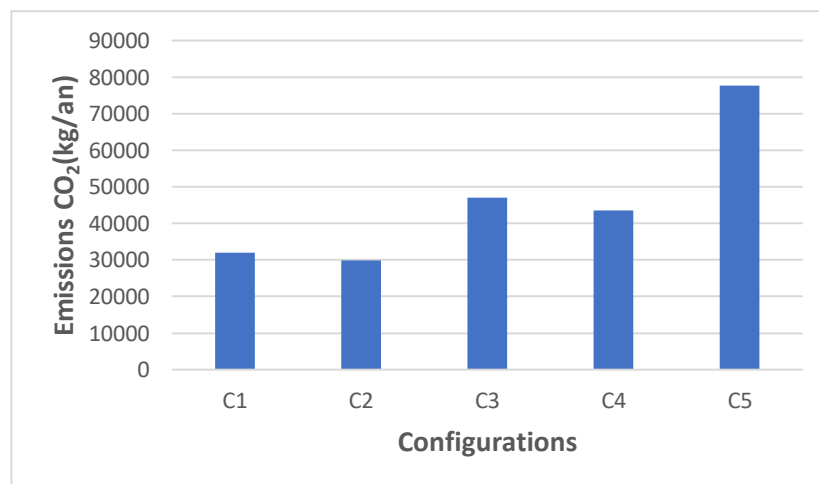


Figure 2-18 : Emissions de CO₂ dans chaque configuration faisable.

Après l'analyse des résultats des configurations, il est certain que le recours à un système hybride présente un choix stratégique justifié sur les plans : économique et environnemental. Il est clair que le système hybride est plus rentable que le système conventionnel à générateur diesel. Le choix de la configuration C₂ (PV-éolien-diesel-batterie) est que le système est plus performant (NPC : 250 794 \$; LCOE : 0,22 \$/kWh) avec une plus grande pénétration en énergies renouvelables et un minimum émissions en CO₂. En effet, il est important pour un tel système de pouvoir faire face à la demande pendant les périodes de forte sollicitation. Le coût du système se trouve néanmoins légèrement affecté.

Les systèmes hybrides hors réseau sont des solutions énergétiques qui combinent différentes sources d'énergie renouvelable pour répondre aux besoins en électricité des zones rurales

Chapitre 2 : Analyse technico-économique et faisabilité d'un système énergétique hybride dans une communauté rurale

isolées. Le tableau 2-6 montre, un résumé de quelques systèmes hybrides étudiés dans la littérature et le système proposé dans cette thèse. À titre de comparaison avec d'autres options hybride, on inclut dans la comparaison les options photovoltaïques (PV), éolien et diesel.

Tableau 2-6 : Résumé de quelque systèmes hybrides hors réseau dans quelques régions du monde dans la littérature.

Options hybrides	Méthodologie	Paramètres de performance	Emplacement
PV/Diesel/Battery [118]	HOMER	COE (0.284\$/kWh), NPC (\$0.043 M)	Inde
PV/Diesel/Battery [119]	HOMER	COE (0.436\$/kWh), NPC (\$0.589 M), RF (42.55%)	Niger
PV/Diesel/Battery [120]	HOMER	COE (0.48\$/kWh), NPC (\$8.1 M), RF (57%)	Chine
PV/Wind/Diesel/Battery [121]	HOMER	COE (0.392\$/kWh), NPC (\$168,767)	Bangladesh
PV/Wind/Diesel/Battery [122]	HOMER	COE (0.279\$/kWh), NPC (\$17.15 M), RF (41.6%)	Malaisie
PV/Wind/Diesel/Battery [123]	HOMER	COE (0.162 \$/kWh)	Inde
Le model proposé dans cette thèse			
PV/Wind/Diesel/Battery	HOMER	COE (0.222\$/kWh), NPC (252313\$), RF (75%),	Algérie

Le coût de l'énergie (COE) de 0,222 \$/kWh est très intéressant par rapport à ceux trouvés dans la littérature. Le COE est élevé dans certains cas d'étude en raison du coût d'investissement élevé du composant, du prix élevé du carburant, de la distance élevée par rapport au réseau principal, etc.

2.9 Analyse de sensibilité

Une analyse de sensibilité est réalisée pour révéler la performance du système de base dans le cadre d'incertitudes futures. Elle nous permet aussi de prévoir l'installation du même système sur un autre site. Pour évaluer l'effet des paramètres incertains sur le dimensionnement optimal des composants du système. Les paramètres incertains peuvent varier en fonction de l'emplacement et du type des composants. La vitesse du vent, le rayonnement solaire, le prix du combustible, le coût des composants et la charge primaire sont les paramètres les plus incertains pris en compte dans les recherches. Dans la plupart des articles, l'effet des paramètres incertains sur le NPC, les résultats d'exploitation des ressources, la production d'émissions et d'autres paramètres des meilleurs plans sont évalués.

2.9.1 Influence des paramètres climatiques sur le coût d'électricité

L'analyse de sensibilité économique concernant le coût de l'électricité du système étudié est réalisée en modifiant les données d'entrées utilisées pour le calcul du COE, Les résultats de cette analyse sont fortement influencés par la puissance installée dans chaque source d'électricité respective.

Les figures (2-19 et 2-20) regroupent l'influence conjuguée des paramètres de sensibilité sur la performance de la configuration optimale, on fait varier simultanément la vitesse moyenne du vent (entre 5 et 7,5 m/s) et l'irradiation solaire moyenne (entre 4 et 6,5 kWh/m²/j).

Chapitre 2 : Analyse technico-économique et faisabilité d'un système énergétique hybride dans une communauté rurale

En effet la vitesse moyenne du vent et l'irradiation solaire globale, ont l'impact direct le plus important sur le coût spécifique de l'énergie produite, une augmentation de la vitesse du vent de 16 % par rapport à la valeur actuelle entraîne une diminution du coût spécifique de l'énergie de 0,025 \$/kWh, et une réduction maximale des émissions de CO₂ est de 12000 kg par an.

Le coût spécifique de l'énergie et une réduction maximale des émissions de CO₂ est de 34,8 à 31,9 kg/an et de 11 962 kg par an, respectivement, lorsque l'irradiation solaires est de 4 à 6,5 kWh/m² /j, comme le montre la figure 2.20.

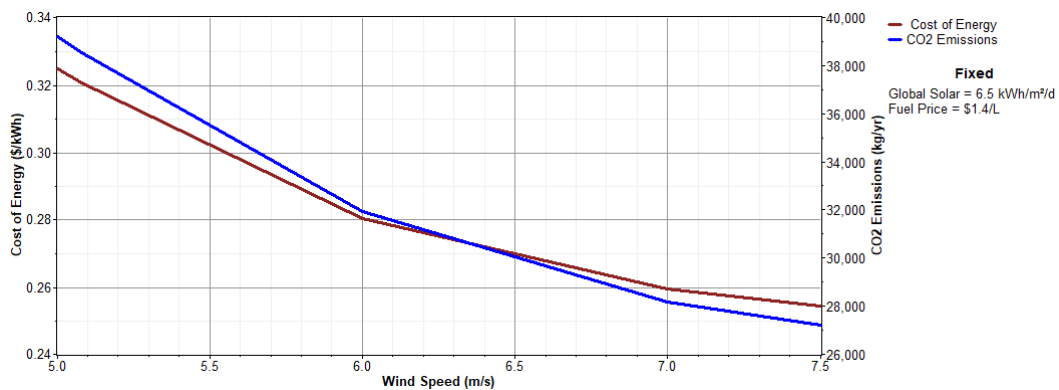


Figure 2-19: Coût de l'énergie et les émissions CO₂ par rapport à la vitesse du vent.

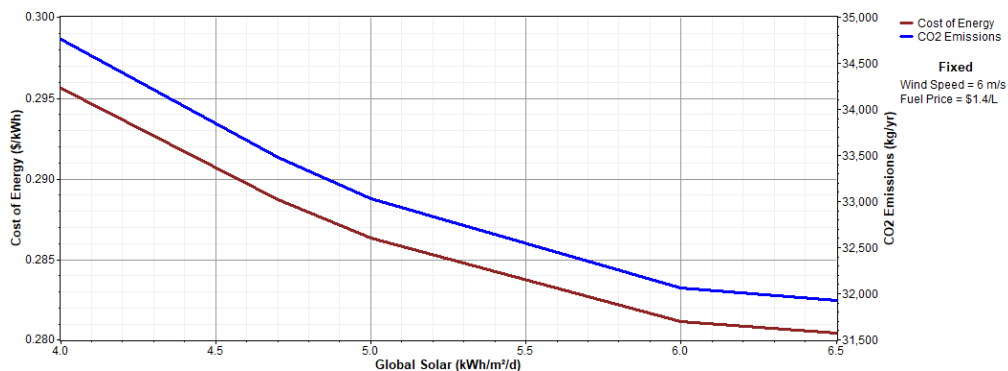


Figure 2-20: Coût de l'énergie-émissions CO₂ en fonction d'irradiation solaire globale.

2.9.2 La fraction de l'énergie renouvelable et les émissions produites

Pour justifier le choix d'une installation hybride, il faut illustrer la quantité d'énergie produite par la partie renouvelable du système, il devient nécessaire donc d'évaluer la fraction de cette dernière dans la production totale. La figure 2-21 présente à la fois les émissions de CO₂ et la fraction renouvelable. Les émissions et la fraction renouvelable sont de 34,8 à 31,9 kg/an et de 65,25 à 70 %, respectivement, lorsque l'irradiation solaires est de 4 à 6,5 kWh/m² /j.

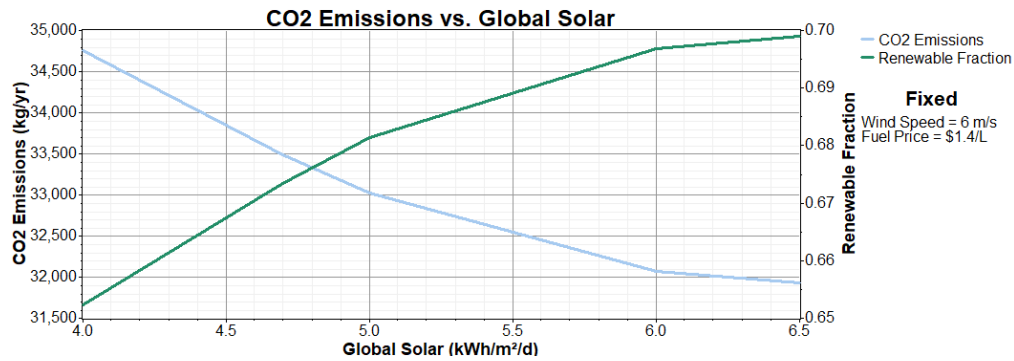


Figure 2-21: Fraction renouvelable et émissions CO₂ en fonction des irradiances solaires.

2.9.3 L'influence du prix du carburant sur la performance

La figure 2-22 montre l'effet du prix du combustible sur la performance du système. On constate que le prix du fuel a une influence capitale sur le fonctionnement du système, pour illustrer cette influence, on prend les valeurs suivantes : 0,8 et 1,4 \$/L (y compris le coût du transport), dès qu'une légère augmentation du prix a lieu, elle entraîne un accroissement important des émissions CO₂ et du coût spécifique de l'énergie. Un accroissement du prix du combustible de 25% augmentera ce coût de 0,02 \$/kWh.

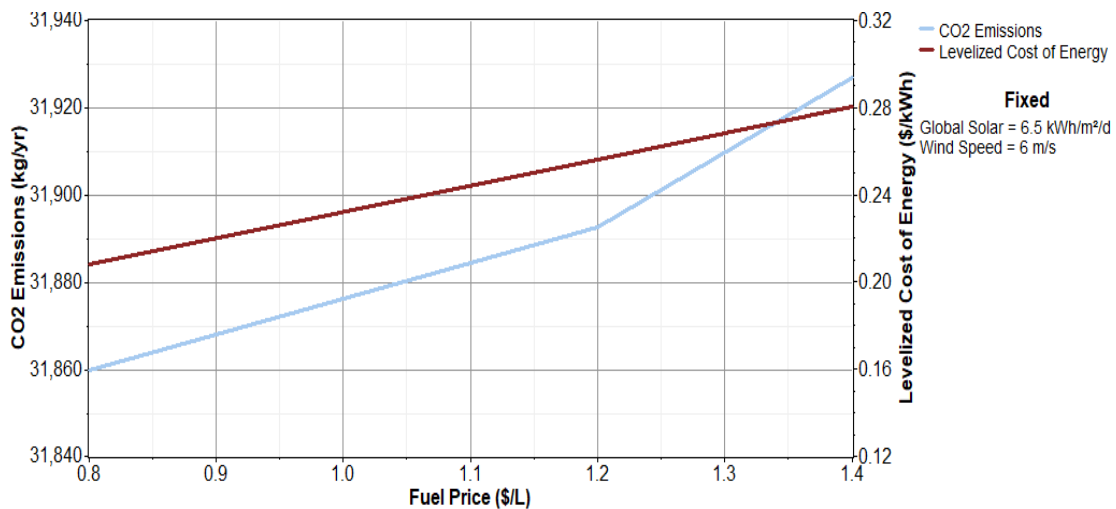


Figure 2-22: Variation de coût spécifique de l'énergie (\$/kWh) et de émissions CO₂.

2.9.4 Productions du diesel et de l'éolienne en fonction de la vitesse du vent

La figure 2-23 présente à la fois la production de diesel et la fraction renouvelable de différentes combinaisons de composants. Lorsqu'on fait varier la vitesse moyenne du vent (entre 5 et 7,5 m/s). La fraction renouvelable est de 61 à 77 %, et une réduction de 34,31% de la production de GD. Le diesel développe plus de puissance avec le prix de 1,4 \$/L, sa production est inversement proportionnelle avec les potentiels renouvelables en particulier pour l'éolien.

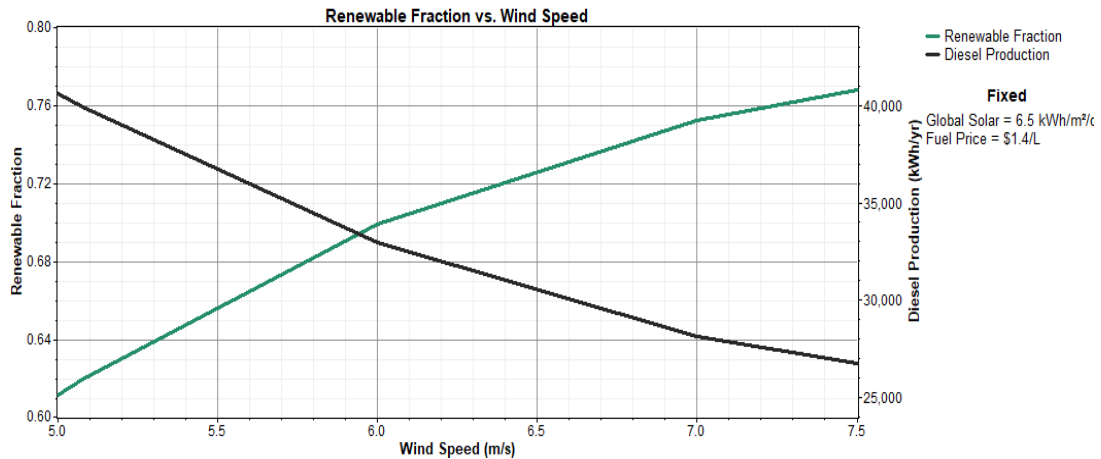


Figure 2-23: Productions du diesel et fraction renouvelable en fonction des vitesses de vent.

2.10 Conclusion

L'objectif de ce chapitre est l'analyse des perspectives de production d'un système hybride autonome basé sur deux énergies renouvelables l'énergie éolienne, photovoltaïque et l'énergie fossile de secours représentant le générateur diesel, avec stockage d'énergies pour produire de l'électricité en utilisant des sources d'énergie renouvelables en Algérie. La solution optimale et la stratégie d'exploitation du système multi-sources ont été évaluées à l'aide du logiciel HOMER pour un village isolé dans la région d'Adrar.

Une présentation globale de la modélisation, du fonctionnement, de la structure et des différents composants est faite. Le dimensionnement et l'utilisation de l'énergie éolienne et solaire pour la production d'électricité et la possibilité de produire de l'énergie électrique à partir de systèmes hybrides éolien et solaire a été souligné.

Des simulations notifiant les caractéristiques de base de chaque système (solaire et éolien) nécessaire à la prédiction de la production hybride sont présentées. Les inconvénients de tels systèmes sont leurs coûts d'investissement élevés et, dans les zones reculées, la nécessité d'une source d'énergie dynamique supplémentaire pour faire face à la charge. Le stockage d'énergie est souvent nécessaire pour améliorer la rentabilité et la fiabilité du système.

Une analyse de sensibilité a été réalisée pour révéler la performance du système de base dans le cadre d'incertitudes futures.

Les paramètres clés pris en compte lors de l'étude de faisabilité en sélectionnant la configuration optimale en fonction du coût de l'énergie (COE), du coût actuel net (NPC), de la fraction renouvelable (RF) et des émissions de gaz à effet de serre (GHG).

Les points suivants ont été conclus concernant ce travail :

- La configuration du système hybride proposé comprend un générateur PV de 15kW, une éolienne de 15kW, une DG de 18,5kW, un banc de batteries avec une capacité 1923 Ah et de voltage 48V, et deux convertisseurs de 20kW.

Chapitre 2 : Analyse technico-économique et faisabilité d'un système énergétique hybride dans une communauté rurale

- D'après les résultats obtenus, la configuration optimale a un NPC de 252313 \$ et un COE de 0,222 \$/kWh. Le système est respectueux de l'environnement avec une fraction renouvelable de 75 % et une émission de GES de 29848 kg/an.
- Dans le système proposé, le coût net actualisé (NPC) du système a été réduit de 32,55 %, passant de 374128 \$ pour le système de diesel à 252313 \$.
- Il a été observé que le système proposé a réduit le coût de l'énergie de 0,327 \$ par kWh du système de production d'électricité à base de diesel à 0,222 \$ par kWh.
- Il a été observé que le système proposé réduit les émissions de polluants de 61,56%, c'est-à-dire de 77656 kg/an à 29848 kg/an du système de production d'électricité à base de diesel.
- L'analyse de sensibilité a été réalisée en faisant varier l'irradiation solaire et la vitesse du vent, le coût du fuel, le coût de l'énergie et les émissions de CO₂, productions du diesel et fraction renouvelable ont été analysés en fonction de ces variables de sensibilité.

L'éolien et le solaire fournissent une source d'énergie propre et sont prometteurs à court et long terme. Ce sont des solutions rentables pour alimenter les utilisateurs isolés et sont largement utilisés dans les applications autonomes. Aussi un système alternatif, économiquement et localement plus réaliste est trouvé. Pour l'électrification des zones rurales qui sont très éloignées du réseau principal qui parfois, l'extension du réseau n'est pas possible en raison de la topographie de la région. Par conséquent, afin d'encourager les investisseurs privés à investir dans les systèmes à haute efficacité énergétique dans les zones rurales, les gouvernements devraient définir des réglementations attrayantes pour donner plus d'avantages aux investisseurs.

Chapitre 3 : Modèles de simulation et gestion énergétique

L'objectif de ce chapitre est de modéliser et de simuler un système d'alimentation électrique hybride à partir d'énergies renouvelables. La première partie détaillera la modélisation des composants individuels du système, à savoir le champ photovoltaïque, l'éolienne, le générateur diesel et le système de stockage par batteries. Ensuite, les stratégies de contrôle et de gestion d'énergie utilisées pour assurer la consommation électrique du système hybride à 100% avec la production d'énergie seront présentées. Ce chapitre se terminera par une analyse des résultats obtenus du programme des simulations, réalisées pour évaluer l'impact des données d'entrée sur les performances du système considéré.

3.1 Introduction

La modélisation du système hybride est une étape importante avant toute phase de conception. Elle conduit à l'évaluation des performances du système hybride ayant des composants dans différents domaines, et qui de plus sont couplés de façon optimale. Différentes techniques de modélisation sont suggérées par les recherches pour modéliser les composants d'un hybride système d'énergie renouvelable. Les méthodologies suivies pour la modélisation de l'éolienne, du panneau photovoltaïque, de générateur diesel et de la batterie et ainsi que la gestion du système sont discutée ci-dessous.

Cette partie de cette thèse vise principalement à apporter une contribution à la compréhension et à la gestion d'énergie des systèmes hybrides à énergies renouvelables avec stockage électrochimique pour les applications aux zones rurales. Pour ce faire, ce chapitre propose une méthode de gestion d'énergie d'un système hybride photovoltaïque/éolien/diesel avec stockage. La méthode de gestion adoptée consiste à l'élaboration d'un algorithme de gestion capable de satisfaire la demande de la charge et de protéger les batteries contre la surcharge et la décharge profonde.

3.2 Le système hybride proposé

Notre système est composé d'un champ PV de 14,6 kW, d'une éolienne d'une puissance de 15 kW, d'un générateur diesel et d'un banc de batteries de capacité nominale 1923 Ah et des convertisseurs de puissance, qui servent d'interface entre le bus et les composants. Le SHPE est conçu pour alimenter une charge. Tous les composants interagissent pour fournir d'électricité à la communauté via un bus alternatif AC. On considère que :

- L'éolienne et le champ PV sont les sources principales ; la priorité est la fourniture de l'énergie demandée par l'utilisateur à partir de l'énergie produite par le champ photovoltaïque et l'éolienne.
- Le banc de batteries est utilisée à la fois comme une source dans le cas d'un déficit de production, et comme une charge dans le cas d'une surproduction ;
- Le groupe électrogène est considérée comme une source de secours ;
- La charge est toujours connectée.

Tous les composants du système exceptée la charge sont connectés à un bus alternatif via des convertisseurs (CC/CA pour le champ PV et l'éolienne et bidirectionnel pour le banc de batterie). Pour la gestion du système on considère l'algorithme réalisé sur le bus AC. Toutes les charges sont alimentées en 230V AC donc l'utilisation de convertisseurs DC-AC s'impose. En entrée du convertisseur, la tension aux bornes des batteries est de 48 V continue (tension de sécurité) alors qu'en sortie, la tension alternative vaut 230V, 50Hz. La figure 3-1 présente un schéma de fonctionnement du système hybride éolien-photovoltaïque éolien-diesel avec stockage proposé.

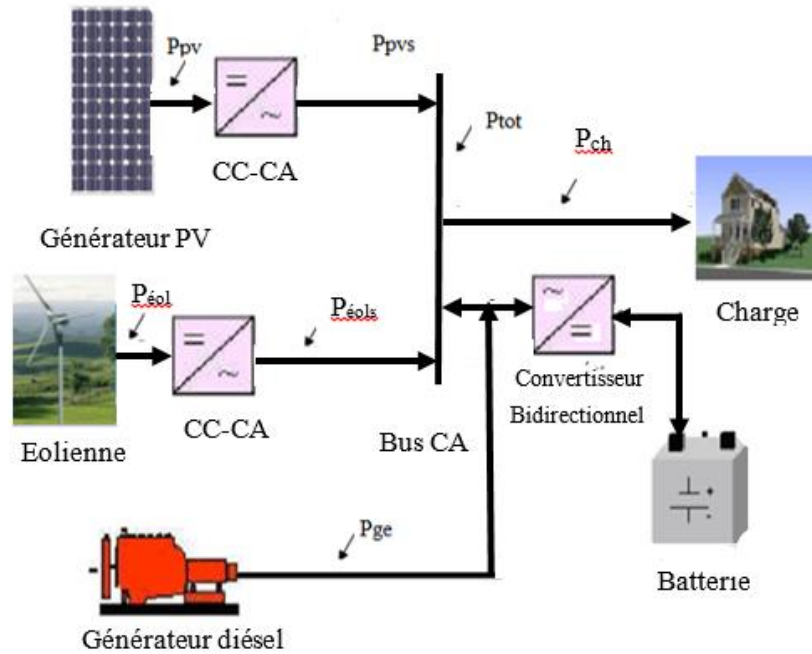


Figure 3-1: Schéma synoptique du système hybride photovoltaïque-éolien-diesel avec batteries.

3.3 Modélisation énergétique du système

Nous présentons dans cette section, les modèles sélectionnés pour notre outil de simulation. Pour réaliser la simulation, les composants principaux ont été étudiés pour connaître leurs caractéristiques. Aussi, nous abordons la modélisation énergétique du système complet. L'objectif recherché est de disposer de modèles fiables pour pouvoir effectuer une analyse du système complet photovoltaïque/éolien utilisée pour l'alimentation d'une charge dans un site isolé et autonome. Le générateur photovoltaïque (PV) et la turbine éolienne sont largement utilisés dans les applications des sources d'énergie renouvelables et il est important d'avoir la capacité à évaluer les performances des systèmes installés. Pour les sources renouvelables nous souhaitons établir des modèles des deux systèmes de production afin de déterminer la puissance qu'ils peuvent nous fournir pour des conditions météorologiques données ou estimées.

3.3.1 Générateur photovoltaïque

Les paramètres d'un module photovoltaïque d'après la référence [124] sont :

Puissance crête P_c : la puissance maximale produite par un module photovoltaïque dans les conditions standards : ensoleillement de 1000 W/m^2 à l'horizontale, température ambiante de 25°C , masse d'air optique (AM) égale à 1,5.

Caractéristique $I(V)$: Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.

Tension à vide V_{co} : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairage " plein soleil ".

Courant de court-circuit I_{cc} : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairage " plein soleil ".

Point de fonctionnement optimum (U_m , I_m) : La puissance maximale pouvant être délivrée par le module photovoltaïque est définie sur sa caractéristique I-V par le point de puissance maximale (MPP en anglais, Maximum Power Point).

Rendement maximal : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.

Facteur de forme : Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut avoir la cellule : V_{co} . I_{cc} .

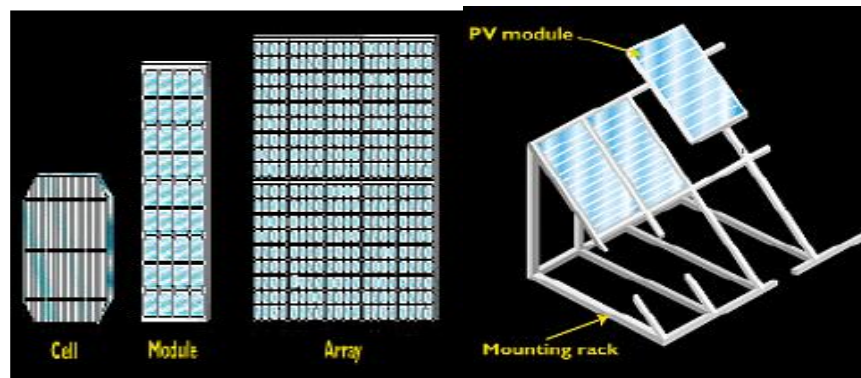


Figure 3-2: Cellules, module et panneau photovoltaïques, modules PV sur support [125].
(Source: Web EREN, US Department of Energy).

3.3.1.1 Principe de fonctionnement d'une pile solaire photovoltaïque

Un champ électrique local est alors créé à la jonction PN des semi-conducteurs P et N et les deux zones de charges fixes ainsi engendrées constituent une zone de charge d'espace [126]. En effet le silicium possède quatre électrons dans sa bande de valence lui permettant ainsi une structure cristalline stable. En introduisant des impuretés avec cinq et trois électrons sur la bande de valence, la concentration en électrons libres est modifiée et des électrons (dopage N) et des trous (dopage P), peu liés au noyau, sont respectivement ajoutés à la structure du silicium. Le phosphore ou l'arsenic peut être utilisé pour le dopage N tandis que le bore ou l'aluminium peut servir à ajouter des trous dans la structure [126]. En associant deux semi-conducteurs, l'un dopé N et l'autre dopé P, les électrons (respectivement, les trous) à l'interface ont tendance à migrer vers la zone P (respectivement, la zone N), là où ils sont peu nombreux, par diffusion. La superposition des semi-conducteurs et la jonction PN sont illustrées sur la figure 3-3.

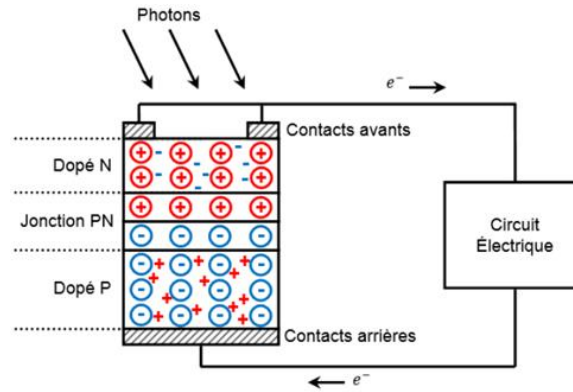


Figure 3-3 : Production d'électricité par la séparation électron-trou [126].

3.3.1.2 Modélisation des panneaux photovoltaïques PV

La transformation du rayonnement solaire en électricité par le processus photovoltaïque (PV) est un des moyens d'exploitation du gisement solaire. La puissance de sortie du système PV n'est pas seulement liée à ses propres paramètres techniques mais aussi à l'irradiation solaire (E_s) et à la température [127]. Elle est exprimée par la relation donnée par [128]:

$$P_{pvs} = \eta_{gen} \times A_c \times E_s \quad (3.1)$$

Tel que :

A_c : la surface totale de captation du générateur photovoltaïque (m^2),

η_{gen} : le rendement du générateur photovoltaïque,

E_s : irradiation solaire globale du lieu considéré (W/m^2)

La quantité d'énergie produite dans un intervalle horaire est $E_{pvs}(t) = P_{pvs}(t)$, en kWh.

Le rendement d'un générateur photovoltaïque η_{gen} est calculé par l'équation suivante:

$$\eta_{gen} = \eta_{mod} \times \eta_{dc/ac} \times P_f \times N_{mod} \quad (3.2)$$

L'efficacité du module qui est donnée par l'équation :

$$\eta_{mod} = \eta_{ref} [1 - \beta(T_c - T_{ref}) + \gamma \log_{10} I_m] \quad (3.3)$$

Avec :

β : coefficient tenant compte de la variation du rendement du module photovoltaïque en fonction de la température, qui est pris à $0.0045 / ^\circ C$,

η_{ref} : rendement de référence du générateur photovoltaïque,

T_c : température de la cellule ($^\circ C$),

NOCT : température nominale de fonctionnement de la cellule,

$\eta_{CC/CA}$: rendement du convertisseur CC/CA (ce rendement est égal à 0.95),

P_f : facteur de puissance, égal à 0.9,

γ : coefficient de l'intensité de rayonnement pour la cellule,

I_m : Rayonnement incident sur le module par unité de surface.

Le coefficient solaire γ est généralement considéré comme nul ou négligé et par conséquent, l'équation (3.3) se réduit à l'équation (3.4) [129].

$$\eta_{mod} = \eta_{ref} [1 - \beta(T_c - T_{ref})] \quad (3.4)$$

On supposant que tous les modules composant le champ photovoltaïque sont soumis aux mêmes conditions climatiques et se comportent de manière similaire étant donné la surface totale de champ photovoltaïque envisagées dans la thèse. La puissance électrique du champ est donc directement proportionnelle à la puissance d'un module PV. Par conséquent il suffit de multiplier la puissance de sortie d'un module par le nombre de modules du champ PV pour connaître la puissance totale fournie par celui-ci. La température de fonctionnement de la cellule $T_c(t)$ à la surface du panneau PV, elle est liée au rayonnement solaire et à la température ambiante [130]. Elle peut être calculée à partir de :

$$T_c(t) = T_{amb} + \left(\frac{NOCT-20}{800} \right) E_s(t) \quad (3.5)$$

Où NOCT et T_{amb} représentent respectivement la température de fonctionnement des cellules PV dans les conditions de références en (°C), et la température ambiante (°C).

Le facteur de puissance P_f tient compte de la température ; la valeur de 90% est maintenue comme hypothèse en milieu rural où les dépôts de poussières sont très accentués.

3.3.2 Caractéristiques techniques et conditions de fonctionnement et d'essai

Pour le type des panneaux, nous avons opté pour la marque Kyocera, de type KD180GX-LP dont les caractéristiques techniques sont résumés par le Tableau-3.1.

Les modules photovoltaïques solaires sont soumis à deux conditions environnementales: les conditions de fonctionnement normales spécifiées et les conditions d'essai standard. Les conditions d'essai standard sont spécifiées pour garantir que les spécifications des modules soient comparables entre les producteurs, ce qui signifie que les modules d'un producteur sont testés dans les mêmes conditions que ceux des autres producteurs. Les conditions d'essai standard sont définies dans le tableau 2-3.

Les conditions de fonctionnement normales spécifiées pour les modules solaires PV dans les conditions suivantes : un ensoleillement de 800 W/m², une température ambiante de 20°C, vitesse du vent est de 1 m/s.

Tableau 3-1 : Caractéristiques du générateur PV.

Performances électriques sous les conditions standards de test STC	
Puissance maximale	180 W (+/- 5%)
Tension maximale	23,6 V
Courent maximal	7,63 A
Tension circuit ouvert (Voc)	29,5 V
Courent de court circuit (Isc)	8,35 A
Performances électriques à 800 W/m ² , NOCT, AM1.5	
Puissance maximale	127 W
Tension maximale	20,8 V
Courent maximal	6,1 A
Tension circuit ouvert (Voc)	26,5 V
Courent de court-circuit (Isc)	6,8 A
Dimensions du module (longueur×largeur×épaisseur)	1341×990×36 mm

Tableau 3-2 : Conditions d'essai standard spécifiées (STC) ou de références pour les modules photovoltaïques.

Spécification	Valeur	Unité
Irradiation	1000	W/m ²
Vitesse du vent	0	m/s
Température ambiante	25	°C

3.3.2.1 Modèle éolien

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. L'énergie cinétique du vent est captée par les pales de longueur R. La turbine éolienne étudiée ici, entraînant une génératrice électrique avec l'intermédiaire de l'arbre de la

turbine (figure 3.4). Le rendement total de la turbine est une fonction du coefficient de puissance du rotor et des rendements mécanique et électrique [131].

$$\eta = C_p \cdot \eta_m \cdot \eta_g \quad (3.6)$$

Avec

C_p , η_m et η_g sont respectivement le coefficient de puissance, les rendements mécanique et électrique de la turbine.

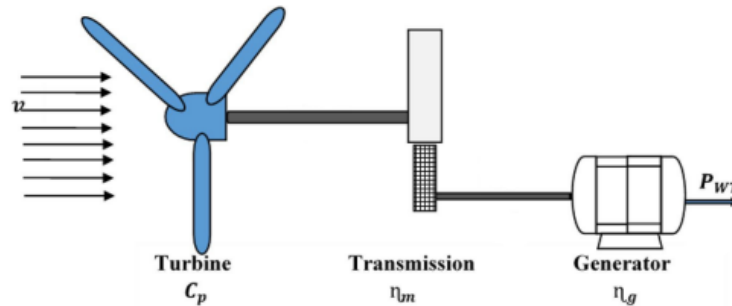


Figure 3-4: Schéma typique d'un système éolien.

3.3.2.1.1 Courbe de puissance

La courbe caractéristique décrivant la quantité de puissance produite par l'éolienne en fonction de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu est donnée dans le chapitre 2 (figure 2-10).

La turbine atteint sa puissance nominale qui est de 15 kW pour une valeur nominale de la vitesse qui vaut 12 m/s, au-delà de cette valeur la puissance reste constante. Ainsi, trois zones distinctes de fonctionnement apparaissent sur la figure (3-5) ci-dessous :

- la zone I, où $P = 0$ (la turbine ne fonctionne pas),
- la zone II, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent v ,
- la zone III, où la vitesse de rotation est maintenue constante et où la puissance P fournie reste égale à la puissance nominale P_n .

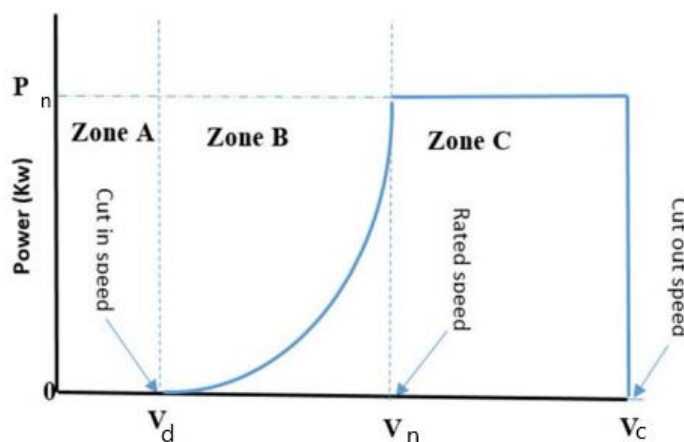


Figure 3-5 : Courbe de la puissance typique de l'éolienne.

La puissance extraite par un aérogénérateur éolien de puissance nominale P_n dépend de la vitesse du vent. Dans la littérature, plusieurs modèles ont été appliqués pour calculer l'énergie produite par l'éolienne [132,133]. Parmi ces modèles on trouve le modèle quadratique décrit par l'équation suivante:

$$P_{\text{éol}}(V_v) = \begin{cases} P_n \cdot \frac{V_v^2 - V_d^2}{V_n^2 - V_d^2} & V_d < V_v < V_n \\ P_n & V_n \leq V_v < V_c \\ 0 & V_v \leq V_d \text{ et } V_v \geq V_c \end{cases} \quad (3.7)$$

Où :

V_v est la vitesse du vent à la hauteur du moyeu et les caractéristiques de l'éolienne sont :

- vitesse de démarrage, V_d
- vitesse d'arrêt spécifique du vent, V_c
- vitesse nominale, V_n
- Puissance nominale P_n

La quantité d'énergie générée par heure est donnée par : $E_{\text{éols}}(t) = P_{\text{éols}}(t)$ en kWh.

3.3.2.1.2 Extrapolation de la vitesse

En effectuant la caractérisation d'un site éolien, il est impératif de connaître la hauteur sur laquelle les mesures sont prises et ensuite adapter les résultats à la hauteur du mat de l'éolienne. En effet, la vitesse du vent augmente selon la hauteur. La méthode la plus utilisée pour l'extrapolation de ces vitesses à une hauteur différente de celle de mesure est celle utilisant la loi (empirique) de Davenport et Harris exprime cette dépendance par la relation définie par l'expression (3-8) [134].

$$V(h) = V(H_m) \left(\frac{h}{H_m} \right)^\alpha \quad (3.8)$$

Avec :

- $V(H_m)$: la vitesse du vent à une hauteur de référence des mesures,
- $V(h)$: la vitesse du vent à une hauteur h du moyeu,
- h : la hauteur à laquelle le vent est estimé (hauteur du moyeu de l'éolienne),
- H_m : la hauteur des appareils de mesure (généralement 10 m).

- α : est un facteur empirique exprimant les influences de la rugosité de la surface et de la stabilité atmosphérique, il est compris entre 0,1 et 0,4 (0,1 correspond à la mer, 0,16 à une plaine, 0,28 à une forêt et 0,4 à une zone urbaine). On prend $\alpha = 1/7$.

3.3.3 Modélisation de la batterie

Dans la littérature, de nombreux modèles sont proposés. Pour cette étude, une représentation très empirique et simplifiée du comportement de la batterie a été choisie : le modèle développé par Bogdan et Salameh en 1996 [135]. Il permet de calculer la capacité de stockage en fonction de la puissance produite localement (photovoltaïque et éolienne) et la charge demandée. Une batterie présente deux modes de fonctionnement : un mode charge et un mode décharge. Lorsque la production locale d'énergie est supérieure (respectivement inférieure) à l'énergie demandée, la batterie est en mode charge et le surplus d'énergie est y stocké (respectivement, la batterie est en mode décharge et l'énergie est déstockée afin de pallier le manque d'énergie) [136]. Ainsi, l'état de la batterie à chaque instant est lié à son état antérieur (instant) ainsi qu'à la production et à la consommation d'énergie du système à l'instant.

Deux équations permettent de décrire ces deux modes de fonctionnement pour le modèle de batterie proposée. Ainsi donc, l'évolution de l'état de charge (SOC) de la batterie en mode charge, il est calculé comme suit :

$$SOC(t) = SOC(t-1)(1-\gamma) + (P_{tot}(t) - P_{ch}(t) + P_{DG}(t)) \eta_{ac/dc} \eta_{ch} \Delta t \quad (3.9)$$

Dans Le processus de décharge, le SOC est décrit par :

$$SOC(t) = SOC(t-1)(1-\gamma) + (P_{tot}(t) - P_{cha}(t)) \frac{\Delta t}{\eta_{dc/ac} \eta_{decha}} \quad (3.10)$$

Où :

η_{cha} : Rendement de la charge des batteries

η_{dech} : Rendement de la décharge des batteries

SOC (t) : Capacité C_{bat} des batteries à l'instant t

SOC (t-1) : Capacité C_{bat} de la batterie à l'instant t-1,

$P_{ge}(t)$: Puissance produite par les sources renouvelables à l'instant t.

$P_{tot}(t)$: Puissance produite par les sources renouvelables à l'instant t.

$P_{cha}(t)$: Puissance consommée par les habitants du site à l'instant t.

γ : taux d'auto décharge des batteries de stockage, pour notre étude $\gamma = 0$.

Δt : Tepms de simulation ($\Delta t=1$ heure).

$\eta_{ac/dc}$ et $\eta_{dc/ac}$ sont les rendements respectifs des convertisseurs AC/DC et DC/AC, Ils sont égaux à 0,95[137].

η_{cha} et η_{dis} sont les rendements de la charge et de la décharge des batteries. Pour cette étude, le rendement est supposé constant et égal à 85 % pendant la charge de la batterie, et égal à 100% pendant la décharge.

Si $SOC = 1$, la batterie est totalement chargée. Si $SOC = 0$, la batterie est totalement déchargée.

Dans le but de maîtriser la durée de vie des batteries, leur état de charge (SOC) est soumis aux contraintes suivantes :

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (3.10)$$

SOC_{min} correspond à la limite inférieure que le banc de stockage ne doit pas dépasser lors de la décharge. Elle est déterminée de la manière suivante:

$$SOC_{min} = (1 - DOD_{max})SOC_{max} \quad (3.11)$$

Avec :

SOC_{max} et SOC_{min} étant les capacités de stockages maximales et minimales permises. SOC_{max} correspond à la capacité nominale du banc de batteries.

DOD_{max} est la profondeur de décharge de la batterie, selon les fabricants, la durée de vie des batteries peut être maximisée pour une profondeur de décharge comprise entre 70 et 50 %. Pour cette étude, une profondeur de décharge de 50 % est considérée.

La capacité des batteries nécessaire pour répondre aux besoins, quelque soit le profil de charge est donc égale au double de la capacité C_{bat} , puisqu'on ne peut soutirer plus de 50%, si l'on veut éviter qu'elles ne se déchargent excessivement.

D'après la plupart des fabricants et Markvart et al. [138], le taux d'autodécharge de la batterie est de 1 à 4 % par mois à 20 - 25°C. Pour cette étude le taux d'autodécharge est égal à zéro.

3.3.4 Modélisation du groupe électrogène

Un groupe électrogène résulte de l'association d'un moteur thermique et d'une génératrice électrique, le plus souvent de type synchrone. Bien que le type de carburant diffère selon les groupes, nous nous limiterons ici aux groupes diesel. Le générateur diesel est utilisé dans le HRES pour compenser le manque de puissance de sortie des énergies renouvelables (PV et éolien) et du banc de batteries.

Le modèle utilisé est un modèle linéaire : la consommation en carburant (en litres/h) est supposée croître linéairement avec la puissance utile demandée par la charge. Suivant l'électricité produite, la consommation de diesel varie. Elle dépend en effet du taux d'utilisation qui est le rapport entre la puissance fournie et la puissance nominale de la génératrice diesel.

Pour la modélisation de la consommation du groupe électrogène en fonction de la puissance électrique qui lui est demandée, nous nous sommes basés sur les données du constructeur. En effet compte tenu du caractère non régulier des ressources renouvelables, un générateur diesel est requis comme dispositif de secours. Le générateur diesel est modélisé par sa consommation de carburant et peut être exprimée par l'expression suivante :

$$C_{fuel} = f(P_{DG}) \quad (3.11)$$

Où

P_{DG} : est la puissance générée (kW),

C_{fuel} : est la consommation de carburant (L/heure).

La courbe de consommation du groupe électrogène diesel est représentée sur la figure (3-6).

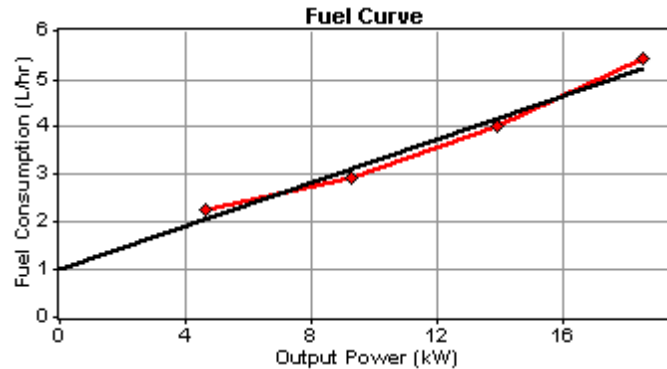


Figure 3-6: Consommation en fonction du taux d'utilisation pour la génératrice diesel 404C-22G.

Les données de consommation sont exprimées en fonction du pourcentage de la puissance nominale du groupe électrogène (25% ,50%, 75%,100%). Ces données sont représentées sur le tableau 3-2.

Tableau 3-3 : Consommation de groupe électrogène diesel

Puissance de sortie (KW)	Consommation du fuel (L/h)
18.500	5.400
13.875	4.000
9.250	2.900
4.625	2.270

3.3.5 Convertisseur

La fonction du convertisseur est d'optimiser la conversion de l'énergie CC en énergie CA ou vice versa, en fonction de la direction du flux d'énergie.

3.3.5.1 Analyse de fiabilité.

La fiabilité du système est évaluée sur la base du LPSP qui est un indice de fiabilité, qui indique la probabilité de défaillance de l'alimentation électrique pour répondre à la demande d'énergie. En raison de la faiblesse des ressources renouvelables ou de défaillances techniques pour. Il peut être décrit par l'équation suivante [139, 140] :

$$LPSP = \frac{\sum_{t=1}^{8760} (P_{cha}(t) - P_{éols}(t) - P_{pvs}(t) + P_{DG}(t) + P_{bat_{min}})}{\sum_{t=1}^{8760} P_{cha}(t)} \quad (3.12)$$

Où :

$P_{éol}(t)$ est la quantité d'énergie produite par l'éolienne à l'instant t .

$P_{gen}(t)$ est la quantité d'électricité produite par le système PV à l'instant t

$P_{DG}(t)$ est la quantité d'énergie produite par le générateur diesel à l'instant t .

$P_{ch}(t)$ est la quantité d'énergie consommée à l'instant t .

P_{batmin} est la capacité de stockage minimale autorisée du système de stockage par batterie.

Selon la littérature la valeur de LPSP doit être inférieure à 5 %. Le LPSP est dans l'intervalle [0-1].

- Si LPSP = 0, alors l'alimentation de la charge est assurée à 100 %.
- Si LPSP = 1, alors la charge n'est jamais satisfaite.

Dans ce travail, les évaluations de fiabilité sont effectuées dans les pires conditions, lorsque $P_{cha}(t) > P_{tot}(t)$.

3.3.5.2 La fraction d'énergie renouvelable FER

Un facteur est défini pour évaluer la contribution de l'énergie renouvelable produite par le système proposé. L'objectif est de réduire l'utilisation du groupe estrogène DG, de minimiser les émissions de CO₂ et de diminuer le coût d'exploitation. Pour atteindre cet objectif, la FER est calculée selon la formule suivante :

$$FER(\%) = \left(1 - \frac{\sum_{t=1}^{8760} P_{DG}(t)}{\sum_{t=1}^{8760} (P_{éol}(t) + P_{gen}(t))} \right) \times 100 \quad (3.13)$$

En pourcentage FER est délimité par 0 % et 100%, où FER = 0 % signifie que l'énergie renouvelable n'est pas utilisée et FER = 100% signifie que l'énergie est produite uniquement par des sources d'énergie renouvelables sans utiliser de DG.

3.3.6 Stratégies de gestion d'énergie pour le système hybride PV/Eolien/Diesel

Le système hybride appliqué pour une région éloignée est composé de sources d'énergie renouvelables et d'une ressource non renouvelable en secours ainsi que d'un système de stockage. Par conséquent, les stratégies de gestion de l'énergie sont devenues très complexes. En tant que règle de contrôle de base, l'énergie extraite des sources d'énergie renouvelables doit être utilisée de manière préférentielle pour alimenter les charges. De plus, le parc de batteries doit également être capable de fournir l'énergie nécessaire lorsque les ressources renouvelables ne sont pas disponibles ou suffisantes pour répondre aux besoins de la charge. La stratégie d'opération proposée dans cette étude vise à :

- Minimiser la consommation de combustibles fossiles.
- Maximiser l'utilisation des énergies renouvelables (solaire PV et éolien).
- Minimiser la capacité de stockage de la batterie.
- Réduire la durée de fonctionnement du générateur diesel et donc améliorer sa fiabilité, réduire les coûts d'exploitation et de maintenance et les émissions de GES.

La gestion d'énergie entre les différents composants de notre système est assurée par une technique de gestion à base de règles déterministes. Elle est conçue en tenant compte de tous

les scénarios de fonctionnement de ce système étudié. L'organigramme de la figure V-1 donne le principe de fonctionnement de la stratégie de gestion de l'énergie de notre système. On a initialisé d'abord les paramètres des différents sous-systèmes et les données climatiques (vitesses de vent température, éclairement solaire). Ensuite, on a estimé la puissance totale produite par les sources (PV+ éolien) et la demande de la charge P_{Cha} évaluée à chaque heure.

Dans cette étude, l'auto décharge de la batterie est supposé égale à zéro. L'excédent est calculé au Bus AC et le déficit à l'entrée de la charge.

$\eta_{bat} = \eta_{cha}$ → Processus de la charge.

$\eta_{bat} = \eta_{dech}$ → Processus de la décharge.

La puissance totale est la puissance produite par les deux générateurs PV et éolien est :

$$P_{tot}(t) = \eta_{dc/ac} \cdot (P_{éol}(t) + P_{pv}(t)) \quad (3.14)$$

où : $P_{pv}(t)$ et $P_{éol}(t)$ sont respectivement la puissance produite par le générateur photovoltaïque et l'aérogénérateur, $\eta_{dc/ac}$ est le rendement de l'onduleur.

À tout moment, et en fonction de la vitesse du vent, et de l'irradiation solaire l'énergie électrique produite par les panneaux PV et l'éolienne est comparée à la charge électrique.

Si $P_{tot} - P_{Cha} = 0$, alors toute la puissance produite par la source renouvelable (PV) est égale à la puissance requise par la charge ($P_{tot} - P_{Cha}$). Par conséquent, l'état de charge des batteries reste constant (batterie au repos), si on néglige bien sûr leur autodécharge. Le dg est en état OFF.

Si $P_{tot} - P_{Cha} > 0$, la puissance générée par la source principale (PV) est supérieure à la demande de la charge. Par conséquent, il y a suffisamment d'énergie pour alimenter la charge et stocker l'excédent

Si $P_{tot} - P_{Cha} < 0$, l'énergie produite par la source renouvelable (PV) n'est pas suffisante pour alimenter la charge. Dans ce cas, les batteries et le générateur diesel interviennent pour fournir l'énergie nécessaire afin de couvrir la demande de la charge.

Les différentes modes de fonctionnement du système hybride sont les suivantes :

Mode 1

- Conditions
 - La puissance totale du système (P_{tot}) est supérieure à la puissance totale des charges.
 - L'état de charge des batteries (SOC) est inférieur à son état de charge maximal (SOCmax).
- Actions
 - L'éolienne et le PV produisent de l'énergie suffisante pour alimenter les charges.
 - L'énergie excédentaire est stockée dans les batteries.
 - Le générateur diesel est arrêté.

Explications

- Dans ce mode, le système dispose d'une puissance excédentaire. Cette puissance est soit stockée dans les batteries, soit injectée sur le réseau électrique.
- Le générateur diesel est arrêté car il n'est pas nécessaire pour alimenter les charges.

Mode 2

- Conditions
 - La puissance totale du système (P_{tot}) est supérieure à la puissance totale des charges.
 - Les batteries sont chargées.
- Actions
 - Les charges sont alimentées par les sources renouvelables (éolienne et PV).
 - Le générateur diesel est arrêté.

Explications

- Dans ce mode, le système dispose également d'une puissance excédentaire. Cependant, les batteries sont déjà chargées, de sorte que l'énergie excédentaire est injectée sur le réseau électrique.
- Le générateur diesel est arrêté car il n'est pas nécessaire pour alimenter les charges.

Mode 3

- Conditions
 - La puissance totale du système (P_{tot}) est inférieure à la puissance totale des charges.
 - L'état de charge des batteries (SOC) est supérieur à son état de charge minimal (SOC_{min}).
- Actions
 - Les charges sont alimentées par les sources renouvelables et les batteries.
 - Le générateur diesel est arrêté.

Explications

- Dans ce mode, le système ne dispose pas d'une puissance excédentaire. L'énergie nécessaire pour alimenter les charges est fournie par les sources renouvelables et les batteries.
- Le générateur diesel est arrêté car il n'est pas nécessaire pour alimenter les charges.

Mode 4

- Conditions
 - La puissance totale du système (P_{tot}) est inférieure à la puissance totale des charges.
 - Les batteries sont déchargées.
- Actions
 - Les charges sont alimentées par les sources renouvelables (éolienne et PV).
 - Le générateur diesel démarre pour compléter la charge et charger les batteries.

Explications

- Dans ce mode, le système ne dispose pas d'une puissance excédentaire. L'énergie nécessaire pour alimenter les charges est fournie par les sources renouvelables et le générateur diesel.
- Le générateur diesel démarre pour compléter la charge des batteries et assurer la continuité de l'alimentation électrique.

Mode 5

- Conditions
 - La puissance totale du système (P_{tot}) est négative, l'éolien et le PV ne produisent pas d'énergie.
 - L'état de charge des batteries (SOC) est supérieur à son état de charge minimal (SOC_{min}).
- Actions
 - Les charges sont alimentées par les batteries.

Explications

- Dans ce mode, le système ne dispose d'aucune source d'énergie disponible. Les charges sont alimentées par les batteries jusqu'à épuisement de leur charge.

Mode 6

- Conditions
 - La puissance totale du système (P_{tot}) est négative, l'éolien et le PV ne produisent pas d'énergie.
 - Les batteries sont déchargées.
- Actions
 - Le générateur diesel démarre pour alimenter les charges et charger les batteries.

Explications

- Dans ce mode, le système ne dispose d'aucune source d'énergie disponible. Le générateur diesel démarre pour alimenter les charges et charger les batteries.

Mode 7

- Conditions
 - La puissance totale produite par les sources renouvelables (éolienne et PV) est inférieure à la puissance totale des charges.
 - L'état de charge des batteries est supérieur à son état de charge minimal.
- Actions
 - Les charges sont alimentées par les sources renouvelables.
 - Le générateur diesel est arrêté.

Explications

- Dans ce mode, le système ne dispose pas d'une puissance excédentaire. L'énergie nécessaire pour alimenter les charges est fournie par les sources renouvelables.
- Le générateur diesel est arrêté car il n'est pas nécessaire pour alimenter les charges.

Mode 8

- Conditions
 - La puissance totale produite par les sources renouvelables est inférieure à la puissance totale des charges.
 - Les batteries sont déchargées.
- Actions
 - Le générateur diesel démarre pour alimenter les charges.

Explications

- Dans ce mode, le système ne dispose pas d'une puissance excédentaire. L'énergie nécessaire pour alimenter les charges est fournie par le générateur diesel.

Mode 9

- Conditions
 - Les sources renouvelables ne produisent pas d'énergie.
 - L'état de charge des batteries est supérieur à son état de charge minimal.
- Actions
 - Les charges sont alimentées par les batteries.

Explications

- Dans ce mode, le système ne dispose d'aucune source d'énergie disponible. Les charges sont alimentées par les batteries jusqu'à épuisement de leur charge.

Mode 10

- Conditions
 - Les sources renouvelables ne produisent pas d'énergie.
 - Les batteries sont déchargées.
- Actions
 - Le générateur diesel démarre pour alimenter les charges et charger les batteries.

Explications

- Dans ce mode, le système ne dispose d'aucune source d'énergie disponible. Le générateur diesel démarre pour alimenter les charges et charger les batteries.

Finalement, un certain nombre de règles sont identifiées en appliquant cette démarche

Les cas présentés seront considérés dans le logiciel de simulation pour appliquer ces stratégies.

3.3.7 Algorithme de gestion proposée

Nous présentons sur la figure 3-7 l'organigramme relatif au programme MATLAB, du Système hybride.

La stratégie de gestion de puissance est un ensemble d'algorithmes qui contrôlent le fonctionnement des générateurs à sources renouvelables, du stockage d'énergie et du groupe diesel. L'objectif de la stratégie de gestion est d'assurer la satisfaction des besoins en énergie des charges électriques tout en optimisant la durée de vie des composants du système.

La stratégie de gestion développée est basée sur les principes suivants :

- Priorisation des sources renouvelables : les générateurs à sources renouvelables sont utilisés en priorité pour alimenter les charges électriques.
- Utilisation du stockage d'énergie : le stockage d'énergie est utilisé pour stocker l'énergie produite par les générateurs à sources renouvelables lorsque la demande est faible.
- Activation du groupe diesel en dernier recours : le groupe diesel est utilisé en dernier recours pour alimenter les charges électriques lorsque les sources renouvelables et le stockage d'énergie ne sont pas suffisants.

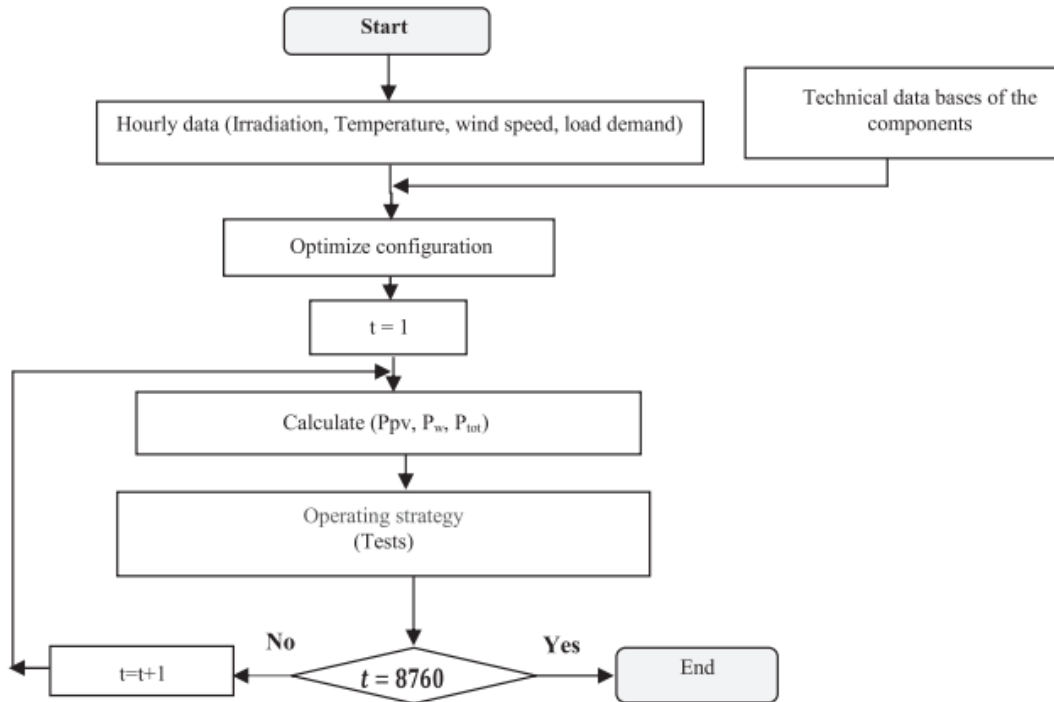


Figure 3-7: Organigramme de calcul de la gestion énergétique.

3.3.8 Simulation et analyse des résultats de gestion énergétique du système

La stratégie de supervision proposée a permis de faciliter l'analyse et la détermination de la structure de supervision basée sur des règles déterministes pour la gestion énergétique, pour évaluer la stratégie, il faudrait analyser le comportement de l'installation en simulation en utilisant des indicateurs de performances. On suppose ici que la charge et la puissance sont divisées en heures d'une année entière (8760 h). De plus, la puissance des éoliennes, des panneaux photovoltaïques, des batteries et des demandes de charge sont constants en unité de temps. La simulation a été menée pour atteindre un coût annuel bas du système avec un LPSP égale à zéro. La simulation du système proposé sous les modèles d'interconnexion, les performances des panneaux photovoltaïques, des éoliennes et du stockage batteries efficacement, sous réserve des conditions météorologiques locales. Le modèle de l'architecture de gestion énergétique (figure 3-1) a été implémenté sous Matlab.

3.3.9 Entrées de Simulation

Pour tester l'efficacité de l'algorithme utilisé dans le système, des données d'entrées du programme sont utilisées dans la simulation d'une année de fonctionnement avec un pas de temps ($\Delta t = 1$ heure) sont :

- ✓ trois profils annuels : de charge ; d'ensoleillement ; profil de température ambiante; et de vitesse de vent,
- ✓ les paramètres des composants.

Un profil annuel d'irradiation solaire globale en (W/m^2) et le même pas de temps est fourni pour l'ensoleillement. De nombreux paramètres d'entrées nécessaires doivent être renseignés préalablement au démarrage de la simulation. Ainsi donc un programme de simulation a été

mis au point pour prédire le comportement du système. Le site considéré dans cette étude de cas représente le site d'Adrar situé au sud-ouest d'Algérie. Le choix de ce site a été fait sur la base d'importants potentiels éolien et solaire et sur la disponibilité de données météorologiques obtenues du logiciel METEONORM.

La sous-section suivante présente les résultats obtenus, la gestion du système basé sur la validation du modèle sur HOMER. Nous réalisons une analyse du fonctionnement de l'installation à l'aide du programme du calcul établi, qui repose sur plusieurs tests et en imposant un profil de charge constant et sur les modèles énergétiques établis précédemment.

Nous donnons sur les figures ci-dessous les évolutions annuelles des caractéristiques climatiques du site choisi. Une simulation est réalisée pour tester l'efficacité de la stratégie de fonctionnement et de poursuivre sa puissance de sortie. Les profils horaires de la vitesse du vent et de la température ambiante sont présentés à la figure 3-8, respectivement. Ils montrent les séries chronologiques sur un an utilisé dans l'étude. De même, la figure 3-9 illustre le profil horaire du rayonnement solaire.

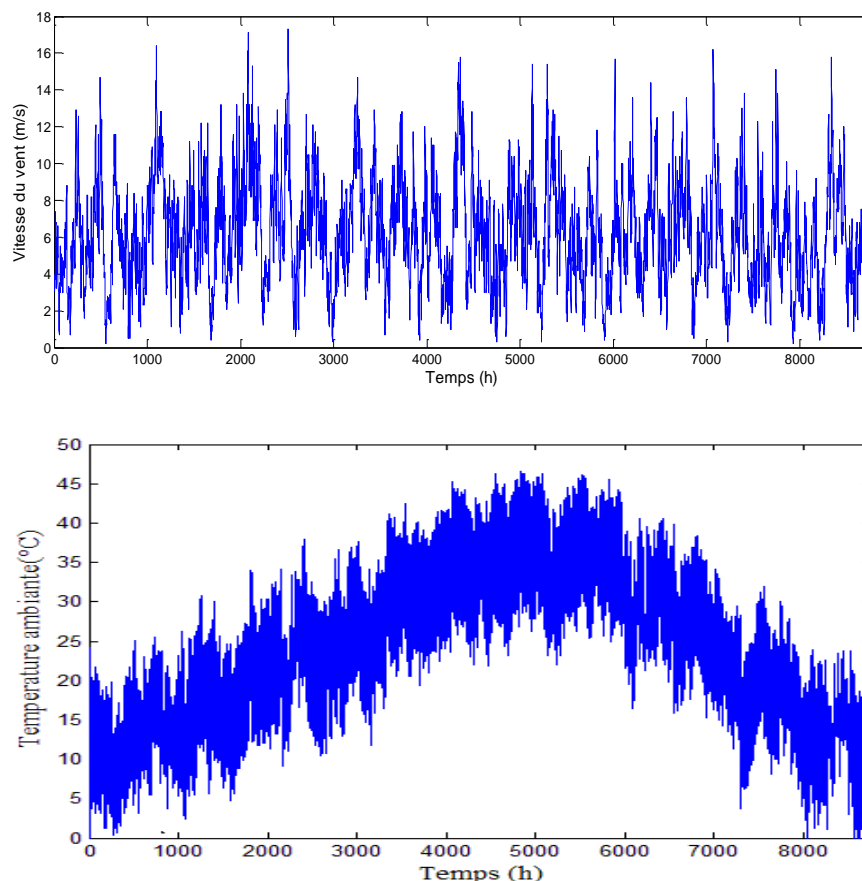


Figure 3-8 : Évolution de la vitesse du vent et de la température sur un an.

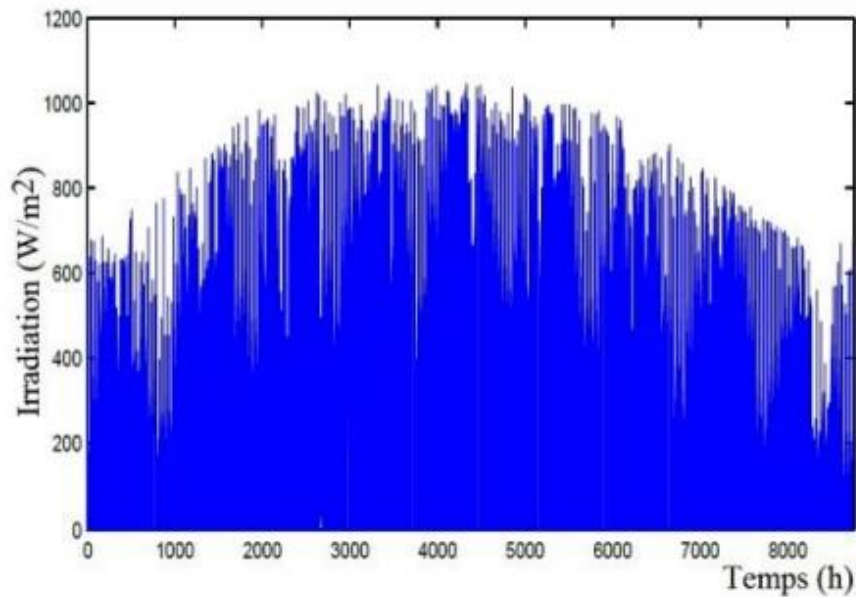


Figure 3-9: Variations de l'ensoleillement sur le site choisi.

A présent que nous avons la totalité des éléments à notre disposition (taille des composants, profils de charge,...), nous allons maintenant simuler ce système suivant les différents modes de fonctionnements. Les résultats de simulation obtenus pour le système testé permettent une évaluation complète des paramètres du SEH dans la sous-section suivante. Les paramètres de performance, le fonctionnement du système et l'influence de ses paramètres décrits ci-dessous, proviennent de l'analyse de l'ensemble des simulations réalisées.

3.3.10 Résultats et discussions

La production mensuelle d'énergie de chaque composant est présentée dans la figure 3-10. Une charge uniforme d'environ 7500 kW h par mois est observée dans la région d'Adrar. La plus grande partie de cette quantité (environ 6000 kW h) est fournie par le système renouvelable comprenant le PV et éolien.

3.3.10.1 Bilan énergétique mensuel

Un bilan d'énergies est établi dans le but de calculer des paramètres clés du système comme par exemple la fraction solaire ou l'énergie utile. Différents bilans d'énergie servent à déterminer les puissances moyennes des composants durant le fonctionnement du système entier. La figure 3-10 représente l'énergie mensuelle délivrée par chaque générateur, ainsi que l'énergie totale produite, l'énergie excédentaire et celle consommée pour le site d'Adrar. Le modèle présente les résultats en kilowatts-heures (kWh).

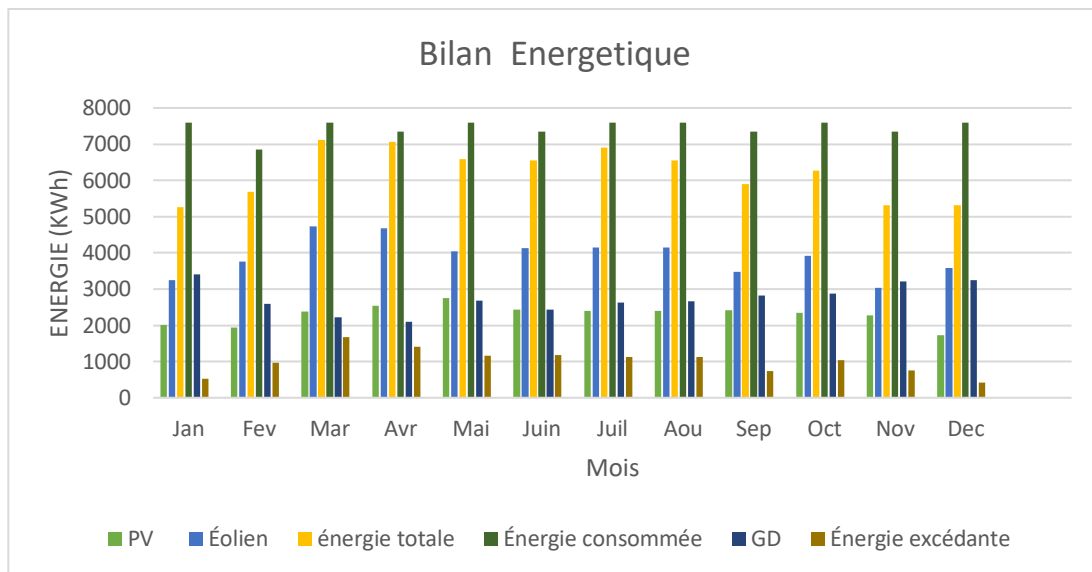


Figure 3-10 : Production mensuelle d'énergie par chaque partie du système hybride et la consommation d'énergie.

Les résultats de simulation présentés dans le graphique montrent que la configuration du système hybride est capable de satisfaire la charge électrique du site étudié, et produit un excédent énergétique mensuel qui varie de 5% à 17% de la production totale du système. L'excédent énergétique est la quantité d'énergie produite par les générateurs à sources renouvelables qui n'est pas consommée par la charge. Cet excédent peut être injecté sur le réseau électrique ou utilisé pour d'autres applications, telles que le stockage d'énergie ou la production de chaleur. La réduction de l'excédent énergétique peut être réalisée en réduisant la taille des générateurs à sources renouvelables. Cela peut être avantageux dans les cas où l'énergie produite par ces générateurs n'est pas utilisée. Cependant, cela nécessite également une augmentation de la durée de fonctionnement du groupe diesel pour maintenir la satisfaction des besoins de la charge en énergie.

Le système est capable de satisfaire la charge électrique, même pendant les périodes où la production des générateurs à sources renouvelables est faible.

On remarque que la charge est complètement couverte respectivement par 81 modules PV de puissance totale de 14,6 kW et un aérogénérateur de 15 kW. Cela signifie que le groupe diesel n'est utilisé que pour couvrir les quelques mois exceptionnels où la couverture de la charge représente un faible déficit. On note aussi que les mois les plus ventilés et/ou les plus ensoleillés correspondent au plus grand excès de la production électrique. Cela est logique, car les générateurs à sources renouvelables produisent plus d'énergie pendant ces mois.

La figure (3-11) montre la production d'électricité par les énergies renouvelable (PV + Vent).

Les énergies mises en jeu dans le système durant une année de fonctionnement, présente un caractère continu de la disponibilité de l'énergie produite tout au long de l'année. Cela est important pour l'atténuation de la part allouée au stockage.

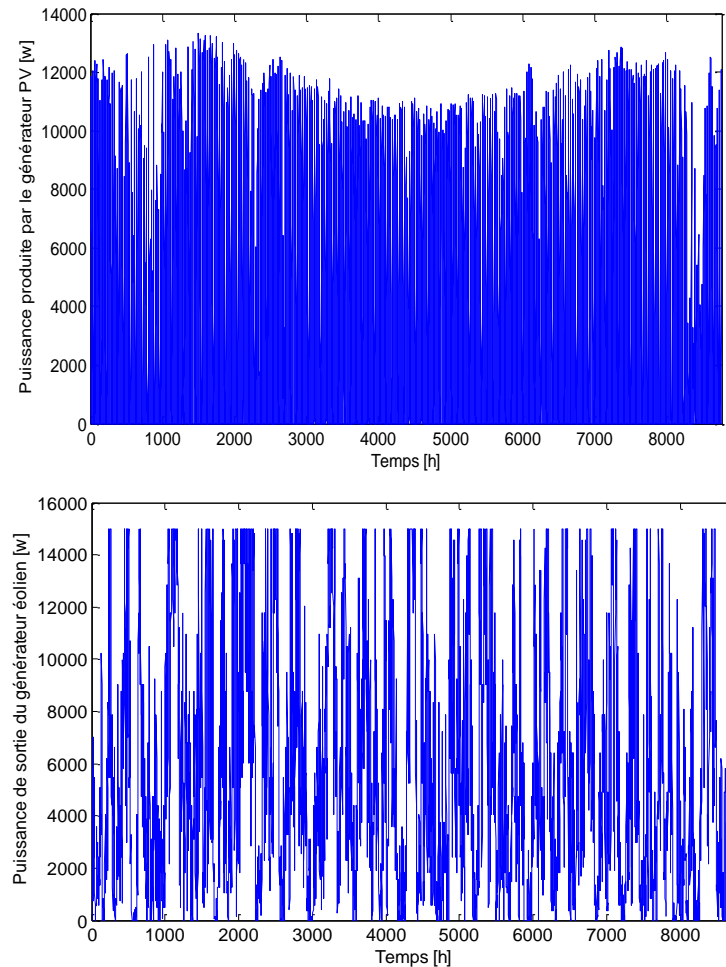


Figure 3-11 : Variations de la puissance produite par le générateur PV et l'éolienne.

Les performances des systèmes évalués sont fortement dépendantes du profil de consommation et des profils de production des sources renouvelables (profil d'irradiation solaire, et vitesse du vent).

3.3.10.2 État de charge des batteries

L'un des paramètres essentiels régissant le fonctionnement des stratégies de gestion est l'état de charge (SOC) des batteries. Pour un fonctionnement efficace des batteries et une durée de vie plus longue, il est important de maintenir le SOC entre SOC_{min} et SOC_{max} . Maintenir l'état de charge au minimum pour des périodes prolongées est connu être nuisible pour les batteries. D'ailleurs, les fabricants des batteries au Plomb-acide recommandent d'éviter une valeur faible du SOC afin de prolonger la durée de vie de ces batteries. Dans cette étude, l'état de charge des batteries est maintenu entre 50% et 100%. Nous supposons que l'état de charge de la batterie est de 100% (Plleine) pour pouvoir fier tous les cas de fonctionnement.

Les résultats des tests montrent que la stratégie de gestion développée est efficace pour atteindre cet objectif. En effet, la stratégie de gestion permet de faire fonctionner les batteries entre l'état de charge minimum et maximum, ce qui prolonge leur durée de vie. De plus, la

stratégie de gestion permet de répondre aux besoins en énergie des charges électriques, même pendant les périodes où la production des générateurs à sources renouvelables est faible.

L'évolution annuelle de l'état de charge des batteries est donnée en figure 3-12.

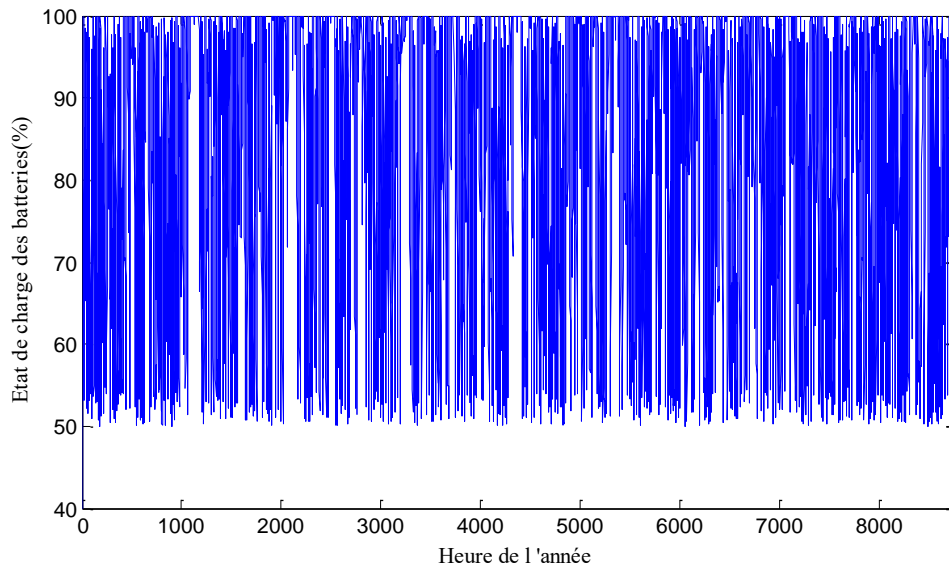


Figure 3-12 : L'état de charge des batteries en fonction du temps au cours de l'année.

Concernant l'état de charge des batteries, il est important de signaler que durant toute l'année celui-ci est toujours compris entre 50 % et 100% ; ce qui respecte l'objectif que nous nous étions fixé au niveau de la gestion de la batterie.

3.3.10.3 Évolution des énergies échangées

La figure 3-13 représente la performance annuelle du système hybride étudié. Il s'agit d'énergie de la consommation et de l'énergie produite par les Enr (PV et éolien) ainsi que de l'énergie produite par le groupe diesel pour une année de fonctionnement du système.

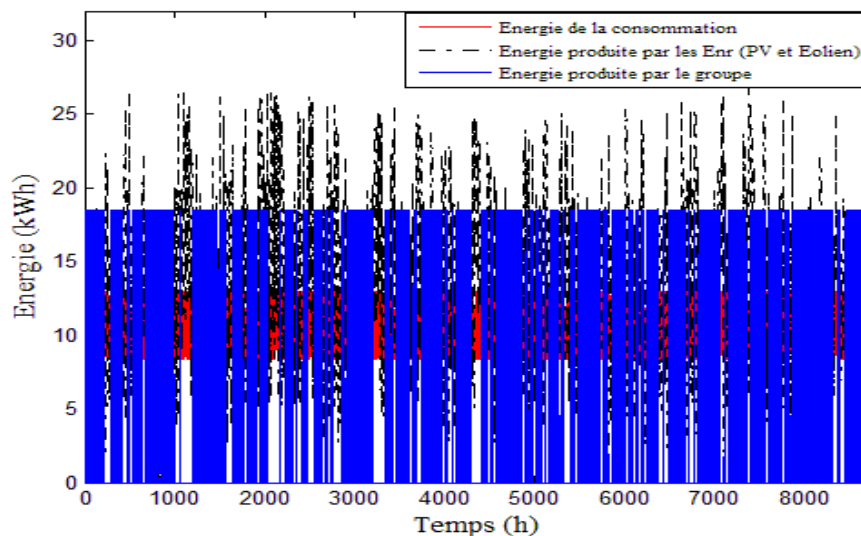


Figure 3-13 : Performance annuelle du système hybride étudié.

La température est le principal facteur qui affecte l'efficacité des panneaux photovoltaïques. À des températures élevées, les performances des panneaux diminuent, en particulier au-dessus de 32-33 degrés Celsius. Cela est dû à la dégradation des matériaux qui produisent de l'électricité. D'autres facteurs environnementaux, tels que l'irradiation solaire reçue, peuvent également affecter l'efficacité des panneaux photovoltaïques, mais la température est le facteur le plus important.

Afin d'étudier l'impact de la température de l'air sur la puissance générée par le système PV, la température moyenne annuelle de l'air à Adrar a été utilisée. En raison du coefficient de température des panneaux solaires, la puissance produite par le système PV diminue lorsque la température augmente. Pendant la saison estivale où la température moyenne se situe entre 30 et 45°C l'efficacité du système diminue, comme le montre la figure 3-14.

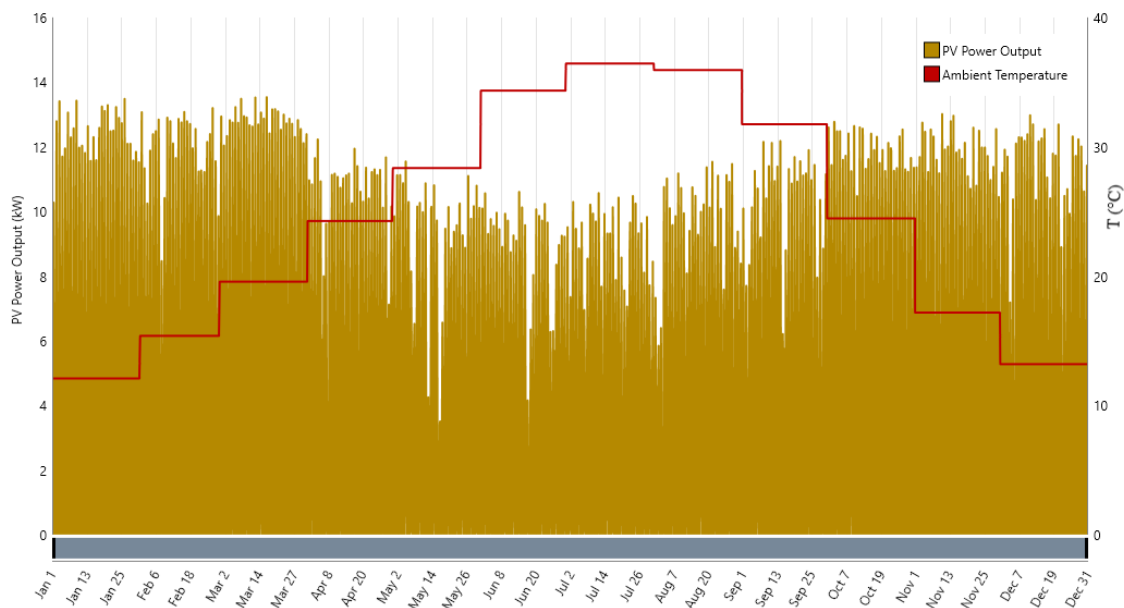


Figure 3-14: Production solaire PV en fonction de la température ambiante tout au long de l'année

3.3.10.4 Résultats de simulation de la stratégie de gestion pour une semaine

La figure 3-15 indique les irradiances solaires, la figure 3.16 illustre le profil de la vitesse du vent durant la première semaine de janvier.

La figure 3.17 montre la production d'électricité par les énergies renouvelable (PV + Vent) et le générateur diesel ainsi que la demande en énergie. Sur cette figure, à environ 4 heures de fonctionnement du système, on constate que le SOC varie beaucoup, les batteries se déchargent et les charges sont très peu alimentées. Cela est dû au fait que pendant cette plage de fonctionnement, le système éolien ne fournit presque pas d'énergie. C'est les batteries qui fournissent l'énergie nécessaire au bon fonctionnement de l'ensemble du système hybride. Quand le système éolien et le PV commencent à produire de l'énergie, on remarque que le SOC dans les batteries augmente et finir par se maintenir à 100 %, les batteries se chargent et les

charges sont alimentées. L'éolien, le PV et les batteries fournissent l'énergie nécessaire au bon fonctionnement de l'ensemble du système hybride.

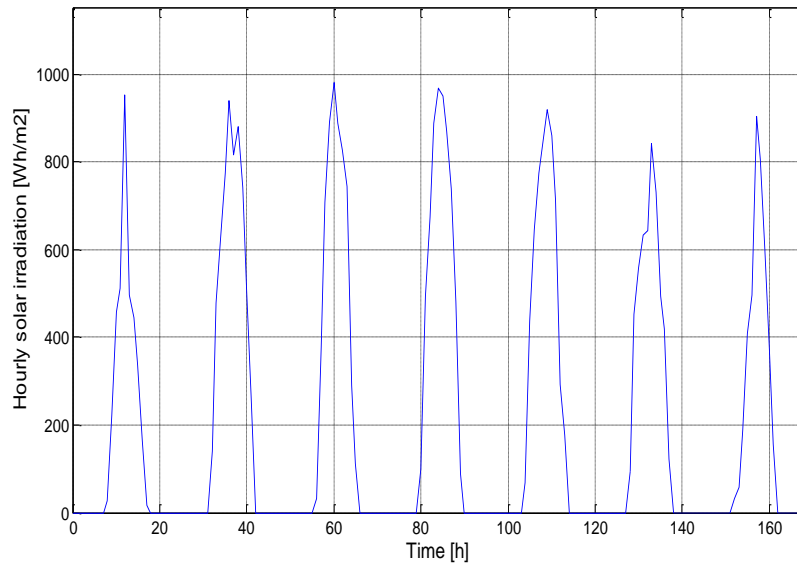


Figure 3-15: Évolution de l'irradiation solaire

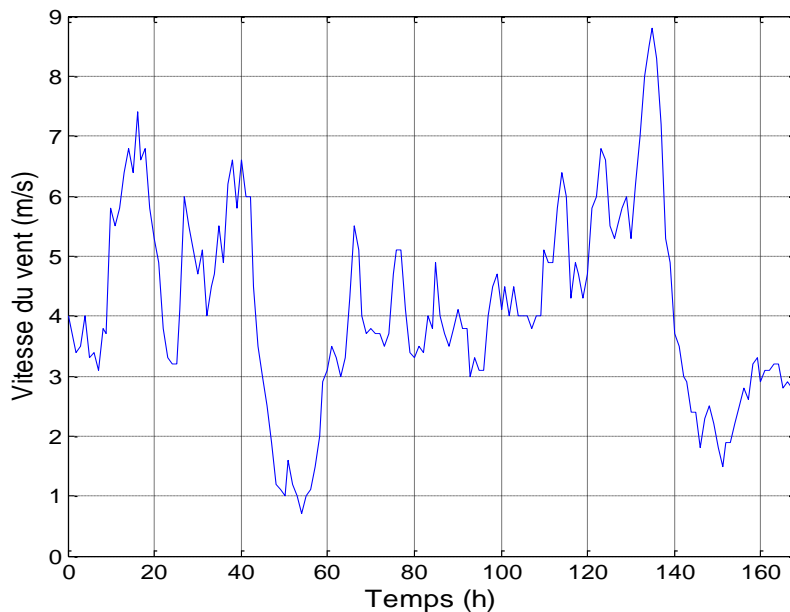


Figure 3-16 Évolution de la vitesse du vent

Nous pouvons dire qu'aux premières heures de la journée ce sont les batteries qui assurent la sécurité d'approvisionnement des consommateurs sans interruption. Le groupe diesel quant à lui, il démarre quand l'état de charge des batteries est au-dessous d'un certain seuil et devient faible. Pendant le fonctionnement du groupe diesel, il alimente directement les besoins énergétiques des charges et charge l'ensemble batteries simultanément. Une fois l'état de charge des batteries dépasse une certaine limite et le stockage des batteries devient important, le système reprend son fonctionnement normal

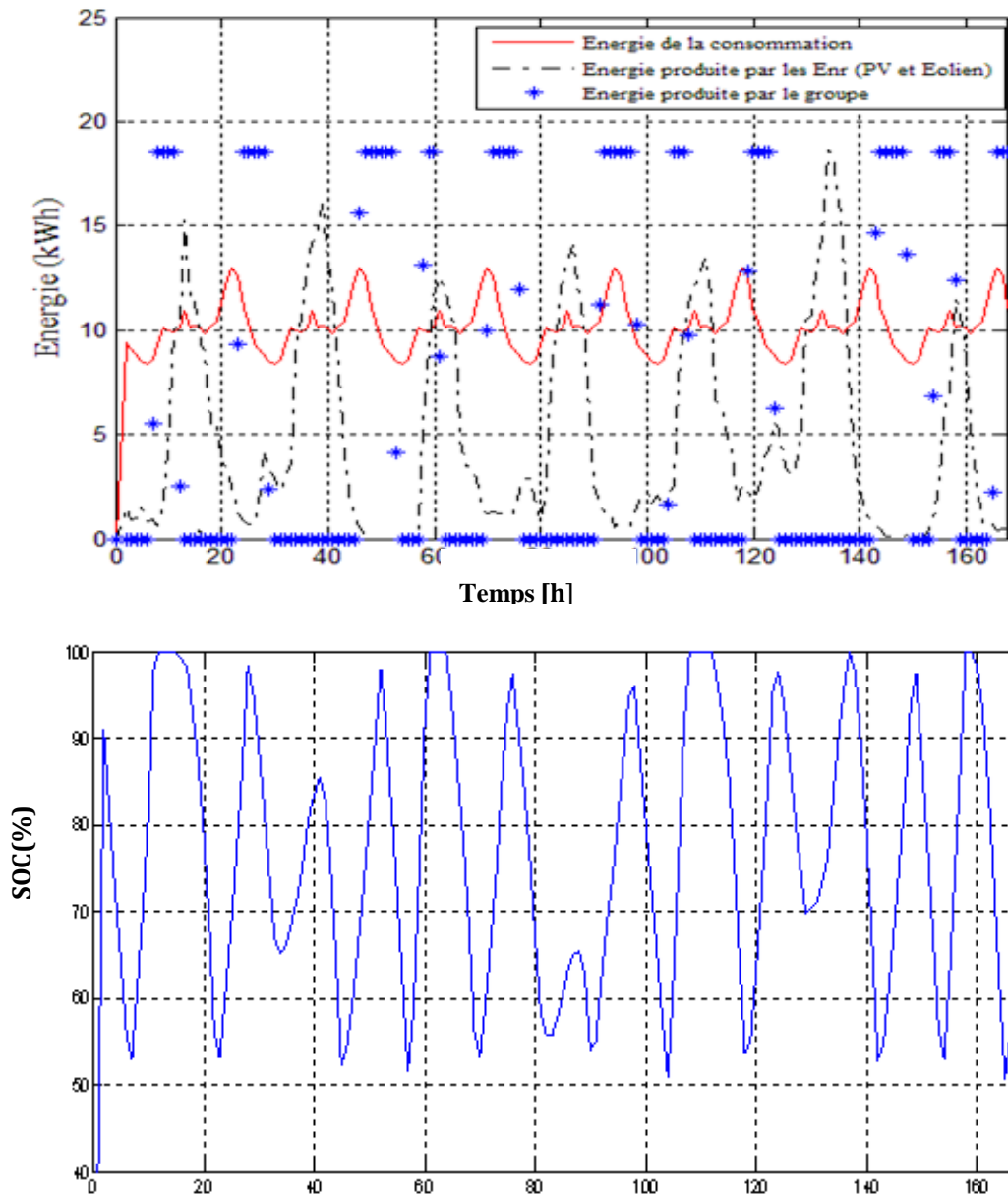


Figure 3-17: Evolution de la charge P_{ch} , de P_{tot} , de P_{dg} et du SoC durant une semaine.

L'état de charge journalière est caractérisé par un minimum à environ 5h du matin. Ce minimum se situe juste avant le premier pic de production du diesel. Un état de charge minimal signifie que le système de stockage a fourni de l'énergie au bus CA. Pour cette période de la journée (5h du matin), les batteries fournissent le maximum d'énergie, La courbe d'état de charge des batteries est croissante entre l'heure du minimum 5h et 12h du matin, c'est la période de recharge.

L'un des objectifs de la procédure de gestion est d'obtenir un système de production qui assure les besoins en électricité des habitants avec un excès de production réduit, garantissant un système bien dimensionné. A travers ce paragraphe, nous avons cherché à évaluer les performances obtenues selon le critère de fiabilité. En effet, environ 70 % de l'énergie produite est assurée par les deux sources renouvelables, 25,71 % par le générateur photovoltaïque, 43,69 % par l'éolienne et 31% par le générateur diesel. Cependant, il y a un excès de production qui est surtout lié à une surproduction en printemps et en été par rapport aux besoins énergétiques en ces deux saisons. Cet excès pourrait être utilisé à bon escient, pour la cuisson ou le chauffage de l'eau et permet ainsi d'éviter la dégradation du point de fonctionnement des générateurs éolien et photovoltaïque.

Le taux de la contribution des énergies renouvelables du projet d'étude se situe aux alentours de 70% de l'énergie totale produite laissant dire que ces résultats sont acceptables. Cela confirme les résultats des différents travaux présentés dans la littérature, pour une configuration optimale du système hybride (PV/éolien et groupe diesel).

3.3.10.5 Étude comparative avec le logiciel HOMER

Pour tester l'efficacité de notre méthode, nous comparons les résultats trouvés au logiciel de simulation HOMER qui est actuellement la référence dans le domaine de l'optimisation de systèmes hybrides pour sites isolés (voir revue de littérature). HOMER a une stratégie fixée et simule toutes les combinaisons possibles au coût le plus bas.

La figure 3-18 établit une comparaison entre les résultats obtenus par HOMER et par notre modèle développé sous Matlab. L'objectif de cette étude est de valider le modèle proposé. Pour y parvenir, nous avons étudié, modélisé et simulé l'ensemble du système hybride dans l'environnement MATLAB/Simulink. Pour le modèle proposé, la production moyenne annuelle d'électricité à partir des deux sources renouvelables est d'environ (84540 kWh/an) de la production totale, tandis que le reste de l'énergie nécessaire dans ce cas est fournie par le groupe électrogène, comme le montre le tableau ci-dessous. La majeure partie de l'énergie est donc produite par le PV et l'éolienne pour répondre aux besoins du site. À l'aide du logiciel HOMER on a effectué une étude technico-économique détaillée du système hybride en chapitre 2. Comparons à présent les résultats issus de ce logiciel à ceux du modèle proposé. Le tableau 3-2 compare les résultats obtenus, pour le même profil de charge. Pour se faire, nous avons choisi les bilans annuels afin de faire coïncider les puissances installées des deux logiciels. En effet, le système optimum pour HOMER est à une puissance PV différente. Il y a donc un écart admissible entre les deux bilans prévisionnels.

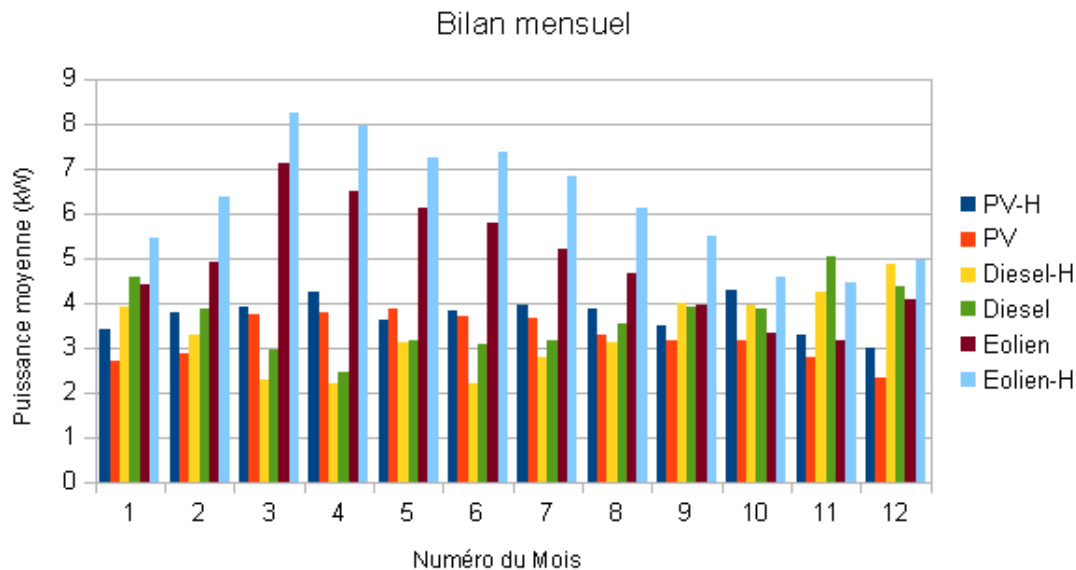


Figure 3-18 : Bilans de puissance des trois générateurs solaire PV, éolienne et diesel pour les deux modèles.

Avec la méthode proposée la fraction moyenne d'électricité provenant de chaque composant de la centrale hybride est présentée dans le tableau 3-4. L'éolienne devrait fournir environ la moitié de la demande totale d'électricité (43,69 %), tandis que le photovoltaïque arrive en deuxième position (25,71 %). Le générateur diesel n'est utilisé que pour répondre à la pénurie pendant la nuit. C'est pourquoi sa fraction d'électricité ne dépasse pas 31%. Cela signifie que le système hybride permet d'économiser environ 70 % de la consommation de combustible fossile.

Pour les productions : PV, éolien et diesel la différence est beaucoup plus importante. La marge d'erreur est supérieure à 10%. On peut attribuer une partie de cet écart à différents paramètres tels que : le rendement des différents convertisseurs, les pertes des générateurs PV et éolien considérés dans le programme proposé, HOMER ne considère pas les pertes et l'effet de la température pour le PV, pour la turbine éolienne, la somme des pertes électriques de 3,1% est proposée, et un rendement de 95% pour le convertisseur. Le taux d'utilisation de la génératrice diesel pour le modèle est de 25 %. Cela provoque une surconsommation de diesel. Ce taux d'utilisation minimal est de 30 % pour le modèle de HOMER, il n'est pas le même.

HOMER et la méthode proposée se basent sur les mêmes données d'entrée. En étudiant le même site isolé, nous pourrions donc comparer les deux approches.

Pour l'éolienne, les données manquantes sont inférieures à 10%. En effet l'évaluation de la production d'énergie par l'éolienne durant une année de fonctionnement est effectuée en utilisant les données de l'éolienne. Ces sorties obtenues par simulations en tenant compte de la vitesse du vent disponible, et de la courbe de puissance de l'éolienne correspondante. Il est montré que le calcul de la puissance éolienne annuelle (PEA) basé sur les conditions atmosphériques standard conduit à une estimation de la puissance au-dessous de sa valeur de plus de 12%, c'est le cas du modèle de puissance utilisé dans la thèse qui est en fonction de vitesses et de puissance nominale alors que l'erreur de prédiction est inférieure à 6% en

considérant la densité de l'air local. C'est le cas pour le model HOMER, il est fonction de puissance nominale et de masse volumique. Ces résultats ont montré l'importance de considérer la densité de l'air local dans l'évaluation de l'énergie éolienne. Les auteurs dans la référence [143] ont conclu qu'il était important de prendre en compte la variabilité spatiale de la densité de l'air. Ils ont montré que l'erreur est plus importante dans les zones de haute altitude si le calcul du PEA est basé sur des conditions atmosphériques standard.

En cumul à long terme (un mois à un an), il n'y pas de différences significatives entre les valeurs d'énergies obtenue avec le model HOMER et celles calculée avec le model propose (écart inférieur à 10 %). Ainsi un échantillon toutes les heures sur un an donne une précision satisfaisante pour l'estimation de l'énergie du vent ou de l'énergie fournie par une éolienne. La détermination des puissances installées a permis de noter quelques différences par rapport au modèle de HOMER. Il n'est malheureusement pas possible de faire coïncider tous les paramètres puisque nous n'avons pas accès aux données précises de l'optimisation effectuée par HOMER. Notre approche donne des résultats concluants. Les résultats sont confrontés avec succès à ceux issus du logiciel HOMER qui est un code essentiellement numérique basé sur une fonction objective : Coût net actuel (NPC) et des contraintes : Contrainte d'équilibre énergétique et contraintes techniques des ressource.

Tableau 3-4 : Bilans d'énergies des générateurs du SEH pour les deux modèles

Source	Modèle proposé		HOMER	
	Production (MWh /an)	Fraction %	Production (MWh /an)	Fraction%
Eolienne	46,922	43.69	54,765	47
PV	27,618	25.71	32,655	28
Diesel	32,868	30.60	29,420	25
Total	107,408	100	116,608	100

3.4 Conclusion

Ce chapitre a eu pour objectif principal de développer un algorithme de gestion pour le système autonome hybride photovoltaïque-éolien-diesel avec stockage pour application en site isolé, il s'agit de l'électrification en milieu rural. Pour atteindre cet objectif principal, nous nous sommes fixés les objectifs spécifiques ci-dessous:

- Modéliser les deux sous-systèmes de production d'énergie renouvelable (solaire, éolien), le sous-système de stockage d'énergie (banc de batteries), le sous-système de de production d'énergie fossile (génératrice diesel).
- Proposer un algorithme de gestion de puissance du système hybride ;
- Implémenter l'algorithme de gestion.

Ainsi donc la modélisation et la stratégie de gestion de puissance photovoltaïque éolienne diesel d'un système autonome hybride en isolé ont été développées. Nous avons, dans un premier temps procédé à la modélisation du système hybride, puis les performances du système hybride ont été testées. Pour cela, nous avons utilisé l'algorithme développé. Le modèle global a été construit en associant les modèles de chaque composant : éolienne, panneaux photovoltaïques et un groupe électrogène. Le système a pour but d'alimenter le site à l'échelle du MW. En raison de la nature intermittente des sources d'énergie disponibles, les batteries ont été choisies comme système de stockage d'énergie à court terme. Vu leur capacités à répondre aux pics de puissance dans un court laps de temps.

Le modèle a été réalisé dans Matlab pour évaluer ses performances dans différentes conditions de fonctionnement. L'objectif principal de ce modèle est de déterminer le comportement, les performances et le type de stockage qui convient pour un système hybride alimenté par des énergies renouvelables, et une source fossile. Afin de satisfaire la demande à toute heure, une stratégie de gestion d'énergie basée sur des règles et des prévisions des flux de puissances qui interagissent dans le système a été conçue. Cette opération a été réalisée dans les limites maximale et minimale de son état de charge afin de garantir un fonctionnement sûr. La stratégie a démontré une excellente robustesse et une faible complexité de calcul. Les résultats montrent que l'utilisation de la stratégie de gestion proposée donne de bon résultat pour l'alimentation de charges électriques. Les résultats obtenus affirment que l'alimentation d'une zone rurale en ressources renouvelables est faisable à condition que le système soit correctement dimensionné. En conclusion, nous pouvons aussi dire que les principaux avantages de ces modèles, sont de pouvoir simuler tout type d'éoliennes, tout type de module PV, et génératrice diesel simplement à partir des caractéristiques techniques du constructeur, et de donner des résultats avec un faible temps de calcul. Ils nous seront utiles pour la prochaine partie du travail.

Améliorer l'efficacité des unités de conversion est indispensable pour réduire l'impact environnemental associé à la consommation. Donc le chapitre suivant présente une analyse exergetique et énergétique du système multi-sources proposé, l'apport et la distribution de l'énergie provenant de diverses sources doivent être analysés et évalués.

Chapitre 4 : Analyse énergétique et exergétique du système de production d'électricité

Dans cette étude, une approche d'exergie standard sera appliquée pour évaluer les performances des composants principaux d'un système hybride de production d'électricité pour une région située dans le sud-ouest d'Algérie. Une analyse thermodynamique est réalisée dans des conditions de fonctionnement et d'environnement dynamiquement changeant, en utilisant les résultats obtenus dans le troisième chapitre par simulation par Matlab. L'application du bilan exergétique va nous renseigner, en particulier, sur la quantité d'exergie requise pour la production d'une quantité déterminée d'électricité. L'analyse exergétique est capable d'identifier les sources de destruction d'exergie dans un procédé, pour ensuite chercher à les réduire. L'objectif principal de cette partie est de présenter une étude de cas sur l'analyse d'un micro réseau, en utilisant des approches énergétiques et exergétiques. Dans ce chapitre, après une brève introduction au concept d'exergie, suivie des explications des équations utilisées, en mettant l'accent sur le calcul des rendements les analyses sont essentiellement réalisées pour les composants principaux. Ce chapitre se terminera par la présentation des résultats d'évaluations des performances et une conclusion.

4.1 Introduction

Nous avons vu dans les chapitres précédents comment nous avons modélisé les composants du système hybride et la stratégie de gestion énergétique qui doit être faite pour choisir la répartition de puissance entre les différents sous-systèmes. Les flux de puissance possibles dans la structure du micro réseau sont obtenus dans les résultats de simulations

Ce chapitre 4 est consacré à l'analyse exergétique des composants pour la production d'énergie électrique. Il est courant d'exprimer l'efficacité des transformations énergétiques en calculant le rendement énergétique, c'est-à-dire le rapport entre l'énergie utile qui est produite et l'énergie consommée. En effet, selon le premier principe de la thermodynamique, l'énergie est conservée dans chaque équipement ou procédure. Dans tout processus, l'énergie entrante avec les flux de combustible, d'électricité et de matière sera comptabilisée dans les produits. Elle ne peut être ni détruite ni produite. C'est ainsi que s'exprime la conservation de l'énergie selon le premier principe de la thermodynamique [142]. La méthode de l'exergie, tout aussi rigoureuse que la méthode de l'énergie, est dérivée, comme l'analyse de l'entropie, du second principe de la thermodynamique, et traduit la dégradation de l'énergie lors d'une transformation. Le concept d'exergie est un moyen pratique pour évaluer la qualité des flux d'entrée et de sortie dans un système (processus) de conversion de matière et/ou d'énergie, indépendamment du nombre et de la nature des flux de matière et d'énergie impliqués.

Notre étude se concentre dans ce chapitre sur les performances énergétique et exergétique, une analyse est effectuée pour les sources de production (éolienne, PV, Générateur DG) dans le but est d'évaluer les rendements énergétiques exergétiques de chaque générateur, cela nous permet de classer ces derniers selon les irréversibilités qu'ils présentent. On peut ainsi avoir une idée assez précise sur les taux de conversion des trois types d'énergies primaire (chimique, éolienne et solaire) en énergie utile (électricité).

Le travail utile maximum peut être produit lorsqu'un système est amené à l'état de mort par un processus réversible qui amène le système en équilibre avec l'environnement. Il présente le potentiel de travail utile du système dans le cas particulier et est appelé exergie [143]. De même, l'analyse de l'exergie est définie comme une méthode thermodynamique qui utilise la deuxième loi de la thermodynamique avec les principes de conservation de la masse et de l'énergie [144]. En outre, l'exergie peut être considérée comme une mesure du potentiel à provoquer un changement de référence de l'environnement avec un système totalement hors équilibre ou un courant. Contrairement à l'énergie, elle peut être détruite en raison de l'irréversibilité des processus réels [145].

Dans cette étude, des analyses énergétiques et exergétiques du système hybride pour produire de l'électricité sont réalisées. En prenant les modules PV, l'éolienne et la génératrice diesel comme équipements principaux, leur efficacités énergétique et exergétiques sont calculés sur une base horaire. Les informations techniques sur l'équipement sont données en détail dans les chapitres précédents. Dans cette étude, hypothèses suivantes sont faites pour les analyses et les évaluations :

Le système hybride fonctionne en régime permanent. Les fluctuations de l'irradiation solaire, de la vitesse du vent et de la demande d'énergie électrique ne sont pas prises en compte puisque les valeurs moyennes sont utilisées. Nous utiliserons les valeurs moyennes mensuelles dans les calculs.

4.2 Équations générales de masse, d'énergie et d'exergie

Les principes fondamentaux de la conversion de la masse, de l'énergie, de l'exergie sont les éléments clés pour les applications dans le domaine des systèmes énergétiques. Dans cette partie on rappelle les expressions mathématiques de ces principes, appliqué à un volume de contrôle (VC).

Le bilan massique est donné pour un volume de contrôle sous forme de taux, comme suit:

$$\frac{dm_{cv}}{dt} = \sum \dot{m}_{in} - \sum \dot{m}_{out} \quad (4.1)$$

Où le côté gauche montre la variation dans le temps du débit massique dans le volume de contrôle. Ici, \dot{m} est le débit massique et les indices in et out représentent les états d'entrée et de sortie. En régime permanent, $\frac{dm_{cv}}{dt} = 0$. Donc, l'équation (4.1) se réduit à :

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (4.2)$$

Le bilan énergétique général peut être écrit pour un volume de contrôle comme suit [146]:

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + \sum \dot{m}_{in} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) - \sum \dot{m}_{out} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \quad (4.3)$$

Où $\frac{dE_{cv}}{dt}$ donne le taux de changement de l'énergie, \dot{Q} et \dot{W} indiquent le taux de transfert de chaleur et le taux de travail à la frontière du volume de contrôle. De plus, h, v, z et g indiquent l'enthalpie spécifique, la vitesse, l'élévation et l'accélération de la gravité, respectivement. En régime permanent, $\frac{dE_{cv}}{dt} = 0$. Par conséquent, l'équation (4.3) se réduit à :

$$\dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} = \sum \dot{m}_{out} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) - \sum \dot{m}_{in} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \quad (4.4)$$

Si les calculs révèlent que $\dot{Q}_{cv} < 0$, cela signifie que le système perd de la chaleur au profit du milieu extérieur. De même, si $\dot{W}_{cv} < 0$, cela signifie que du travail est fait sur le système.

4.3 Analyse de l'exergie

L'exergie peut être décrite comme le travail maximum qui peut être tiré d'un système en interaction avec un environnement de référence [147]. Appliquées à un volume de contrôle (VC), les équations d'exergies générales sont données ci-après [148], [149], [150].

L'équation du bilan exergetique de tout système peut être exprimée, sous une forme générale, de la manière suivante par:

$$\frac{dEX_{cv}}{dt} = \dot{E}_{XQ} - \dot{E}_{XW} + \sum \dot{m}_{in} ex_{in} - \sum \dot{m}_{out} ex_{out} - \dot{E}X_{dst} \quad (4.5)$$

Où $\frac{dEX_{cv}}{dt}$ est le taux de variation de l'exergie associé au volume de contrôle tandis que $\sum m_{in} ex_{in}$ et $\sum m_{out} ex_{out}$ sont respectivement les exergies totales des fluides entrant et sortant. Le terme E_{XQ} correspond à l'exergie de la chaleur transférée au volume de contrôle tandis que le second terme E_{XW} représente le travail net. Finalement, le dernier terme fait référence à la destruction exergetique, c'est-à-dire la mesure des imperfections. Le schéma du bilan d'exergie d'un volume de contrôle est indiqué sur la figure 4-1.

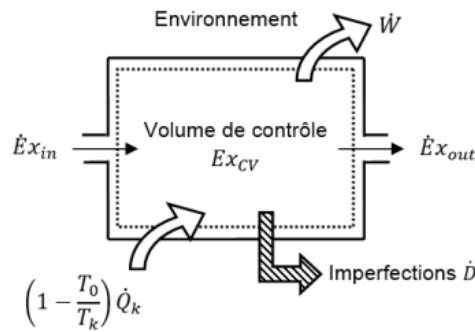


Figure 4-1 : Schéma du bilan d'exergie d'un volume de contrôle [151].

4.3.1 Exergie relative au transfert de chaleur

L'exergie de la chaleur transférée au volume de contrôle est le taux maximal de conversion de l'énergie thermique en travail utile, il décrit le flux d'exergie thermique, ce dernier peut être exprimé comme suit [149] :

$$E_{XQ} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q} \quad (4.6)$$

Où $\left(1 - \frac{T_0}{T}\right)$ est défini comme le terme sans dimension de la température exergetique. Ce terme reflète l'efficacité de Carnot qui fonctionne entre la température de l'environnement de référence à T_0 et la température T de la surface à laquelle le transfert de chaleur a lieu. Le terme \dot{Q} représente le taux de transfert d'exergie par la chaleur

4.3.2 Exergie associée à un travail mécanique

Le travail équivalent d'une forme d'énergie donnée est une mesure de son exergie [152]. Cette définition permet d'affirmer que le transfert d'exergie avec l'arbre est égal au travail.

$$\dot{E}_{XW} = \dot{W} - P_0 \frac{dV_{cv}}{dt} \quad (4.7)$$

Où \dot{W} et $\frac{dV_{cv}}{dt}$ représentent respectivement les termes de travail et le taux de variation du volume associé au volume de contrôle. L'environnement de référence est défini avec la température T_0 et la pression P_0 .

Le travail mécanique et le travail électrique sont des exergies pures. Ce sont des énergies ordonnées qui peuvent être complètement transformées en d'autres formes d'énergie. L'équation (4.7) se réduit à :

$$E_{XW} = \dot{W} \quad (4.8)$$

Le travail mécanique et le travail électrique sont des exergies pures. On a alors l'exergie du travail est égal à l'exergie électriques.

Où $\frac{dEX_{cv}}{dt}$ donne le taux de changement d'exergie dans le volume de contrôle. De même, les taux d'exergie du taux de transfert de chaleur à la température, T , à la frontière du système sont inférieurs à leurs taux d'énergie correspondants. Le taux d'exergie du taux de travail, W , est égal à lui-même, où dV/dt est le taux de changement temporel du volume du système. Aussi, ex est l'exergie spécifique pour l'entrée et la sortie. Ex_{dst} signifie le taux de destruction de l'exergie dû à l'irréversibilité. En même temps, cela signifie les occasions perdues de faire du travail. En régime permanent, $\frac{dEX_{cv}}{dt} = 0$. Par conséquent, l'équation (4.5) se réduit à :

$$\dot{E}_{XQ} - \dot{E}_{XW} + \sum \dot{m}_{in} ex_{in} - \sum \dot{m}_{out} ex_{out} - \dot{E}X_{dst} = 0 \quad (4.9)$$

D'après les équations ci-dessus, nous pouvons écrire les deux rendements énergétique et exergetique sous une forme générale comme suit :

Pour l'énergie,

$$\eta_{en} = \frac{\dot{E}_{out}}{\dot{E}_{in}} \quad (4.10)$$

Et pour l'exergie

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}x_{out}}{\dot{E}x_{in}} \quad (4.11)$$

4.3.3 Évaluation exergetique

À chaque forme d'énergie peut être associée une forme d'exergie correspondante. Il existe, quatre formes d'exergie à savoir [153]:

L'exergie chimique,

L'exergie potentielle,

L'exergie cinématique,

L'exergie physique (mécanique, électriques, phénomènes nucléaires,...).

L'exergie totale de l'écoulement d'un fluide peut être exprimé, en termes d'exergie spécifique à partir de la somme des termes physique, cinétique (ke), potentiel (pe) et chimique (ch) [151] :

$$\dot{E}_x = [(\dot{H} - \dot{H}_0) - T_0(\dot{S} - \dot{S}_0)] + \dot{E}_{xke} + \dot{E}_{xpe} + \dot{E}_{xch} \quad (4.12)$$

Où H et S sont l'enthalpie et l'entropie par unité de temps et l'indice 0 réfère à l'environnement de référence. Tandis que l'exergie chimique \dot{E}_{xch} fait intervenir les potentiels chimiques et les fractions molaires, l'exergie cinétique, comme potentielle, est une puissance mécanique et correspond directement à la puissance cinétique (potentielle) elle-même ; ils correspondent directement au travail disponible. Toutefois, ce n'est pas le cas de l'exergie

physique qui évalue le potentiel thermodynamique du fluide par rapport à l'environnement de référence et ainsi, exprime explicitement la création d'entropie.

4.3.4 Critères d'évaluation exergetique

Pour caractériser les performances exergetiques d'un équipement ou plus généralement d'un procédé, on utilise le plus souvent les deux critères suivants [154]:

- L'efficacité exergetique ($\phi_{exergetique}$)
- Le rendement exergetique ($\eta_{exergetique}$)

On peut définir le rendement d'un système comme la mesure de sa performance. L'efficacité énergétique d'un système ou d'un processus thermodynamique peut être définie comme le rapport entre la quantité d'énergie utile produite et la quantité d'énergie consommée par le système.

4.3.4.1 L'efficacité exergetique

Par définition, L'efficacité exergetique est le rapport entre la somme de toutes les formes d'exergie sortantes du système et de la somme des exergies entrantes au système (équation 4.13):

$$\phi_{exergetique} = \frac{\sum_s Ex_s}{\sum_e Ex_e} = \frac{Ex_{sotante}}{Ex_{entrante}} \quad (4.13)$$

En tenant compte de l'équation du bilan exergetique, l'efficacité exergetique peut être écrite sous la forme de l'Equation (4.14) :

$$\phi_{exergetique} = 1 - \frac{Ex_{destruite}}{\sum_e Ex_e} = 1 - \frac{Ex_{destruite}}{Ex_{entrante}} \quad (4.14)$$

Ainsi, puisque l'exergie détruite est toujours positive ou nulle, la valeur de l'efficacité exergetique ($\phi_{exergetique}$) est toujours comprise entre zéro et l'unité.

4.3.4.2 Le rendement exergetique

Le rendement exergetique ($\eta_{exergetique}$) est obtenu par le rapport entre l'exergie utile (Ex_{utile}) et l'exergie entrante ($Ex_{entrante}$), équation (4.15) [154]:

$$\eta_{exergetique} = \frac{Ex_{utile}}{\sum_e Ex_e} = \frac{Ex_{utile}}{Ex_{entrante}} \quad (4.15)$$

$$Ex_{entrante} = Ex_{utile} + Ex_{non\ utilisée} \quad (4.16)$$

$$Ex_{non\ utilisée} = Ex_{destruite} + Ex_{rejetée} \quad (4.17)$$

$Ex_{rejetée}$: exergie rejetée par le système non exploitée dans le(s) produit(s) utile(s).

L'équation (4.18) donne l'expression du rendement exergetique en fonction de l'exergie non utilisée.

$$\eta_{exergetique} = 1 - \frac{Ex_{non\ utilis\ ee}}{Ex_{entrante}} \quad (4.18)$$

Pour calculer des rendements de chaque g\en\erateur on utilise une approche mensuelle, qui consiste \`a \`evaluer pour chaque mois de l'ann\ee les \`energies et les exergeries entrantes et sortantes des g\en\erateurs et leurs rendements.

4.4 Exergie et \`energie du g\en\erateur Diesel

4.4.1 Exergie du carburant \`a l'entr\ee

L'exergie totale du carburant est la somme de l'exergie thermom\ecanique et de l'exergie chimique du flux d'entr\ee et du flux de sortie. On consid\ere que l'exergie en amont Ex_{in} est limit\ee \`a celle contenue dans le combustible (exergie chimique), l'exergie thermom\ecanique du combustible \`a l'entr\ee est nulle [155], car les conditions ressemblent \`a celles de l'environnement, tandis que l'exergie thermom\ecanique et chimique du flux de sortie est nulle car les composants de la r\eeaction sont \`elimin\es. Ainsi, l'exergie du combustible selon Kotak est exprim\ee comme l'exergie chimique du flux d'entr\ee par l'\`equation (4.19) [152].

$$\bar{X}_{in} = (ex_{fuel}^{chem})_{in} = \left[\left\{ 1,0401 + 0,1728 \left(\frac{H}{C} \right) + 0,0432 \left(\frac{O}{C} \right) + 0,2169 \left(\frac{S}{C} \right) \cdot \left(1 - 2,0268 \left(\frac{H}{C} \right) \right) \right\} \right] \cdot |LHV_{fuel}| \quad (4.19)$$

O\`u H, C, O et S sont les fractions massiques d'hydrog\ene, carbone, oxyg\ene et soufre, respectivement.

$$\dot{n}_F \bar{X}_{in} = \dot{W}_{cv} + \dot{n}_F (\bar{X}_{pertes\ de\ chaleur} + \bar{X}_{gaz\ echapements}) + \dot{X}_{det} \quad (4.20)$$

On utilisant les volumes de fuel consomm\es pour chaque mois et son exergie sp\ecifique, on peut remonter aux exergeries mensuelles. On consid\ere que la formule chimique moyenne de fuel est celle de $C_{13}H_{28}$, dont les caract\eristiques sont r\eesum\ees dans le tableau 4-1:

Tableau 4-1 Rapport des fractions de masse de H, C et O du diesel.

El\ements	Diesel
H/C	0,18
O/C	-
S/C	-

Tableau 4-2 : Formule moléculaire, Poids moléculaire, Pouvoir calorifique inférieur, et exerergie spécifique de diesel C₁₃H₂₈ [156].

Carburant n- tridecane	Formule moléculaire	Poids moléculaire moyen (kg. kmol ⁻¹)	Pouvoir calorifique inférieur (KJ. kmol ⁻¹)	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Exergie spécifique (kJ .mol ⁻¹)
Diesel	C ₁₃ H ₂₈	184,3681	8 123,3644	800	8692

Exergie spécifique : $\bar{X}_{in} = 37717509,22 \text{ kJ/m}^3$.

Ex_{in} en [kW] est donnée par la relation suivante :

$$Ex_{in} = \dot{n}_F \cdot \bar{X}_{inC_{13}H_{28}} \quad (4.21)$$

Calcul des débits volumiques mensuels du fuel

A partir des puissances mensuelles développées par le diesel et la consommation spécifique du combustible qui est de 0,297 l /kWh, on calcul les volumes consommés pour chaque mois comme suit :

$$\dot{n}_F = \frac{10^{-3} \cdot E_i \cdot C_s}{(24 \times 3600 \times N_i)} \quad (4.22)$$

Où E_i : est le taux d'énergie électrique générée par le groupe diesel [kWh/mois].

Le dénominateur de l'équation (4.20) est dû au fait que : $1[\text{m}^3/\text{mois}] = \frac{1}{24 \times 3600 \times N_i} [\text{m}^3/\text{s}]$

4.4.2 Rendement énergétique et exergetique

Le rendement énergétique est donc donné par le rapport entre la puissance électrique produite et la puissance fournie par le carburant diesel, exprimé en termes de pouvoir calorifique inférieur (LHV) de diesel. Le rendement énergétique est calculé à l'aide de la formule suivante [157] :

$$\eta_{en dg} = \frac{\dot{W}_{cv}}{\dot{n}_F \times LHV_{C_{13}H_{28}}} \quad (4.23)$$

Avec : LHV = pouvoir Calorifique Inférieur [MJ/ m³], \dot{W}_{cv} = travail fourni par le volume de contrôle, kW et \dot{n}_F = débit volumique de consommation en carburant du groupe diesel en [m³/s].

Et le rendement exergetique est calculé comme suit [158] :

$$\eta_{ex dg} = \frac{EX_{out}}{\dot{n}_F \times \bar{X}_{inC_{13}H_{28}}} = \frac{E_{out}}{\dot{n}_F (ex_{th} + ex_{ch})_{C_{13}H_{28}}} \quad (4.24)$$

Etant donné que ex_{th} est nul, et que l'exergie à la sortie est égale à l'énergie électrique elle-même, puisque la part de l'exergie de l'énergie électrique est de 100 %. Alors $EX_{out} = E_{out} = \dot{W}_{DG}$ en [kW].

La simplification suivante, proposée par Szargut et Styrylska [159] peut également être utilisée pour calculer l'exergie chimique d'un combustible alors on écrit :

$$\eta_{ex\ dg} = \frac{\dot{W}_{cv}}{\dot{n}_F(exch)_{C_{13}H_{28}}} = \frac{\dot{W}_{cv}}{\dot{n}_F \cdot \bar{X}_{inC_{13}H_{28}}} \quad (4.25)$$

4.4.3 Rendement énergétique et exergetique de l'ensemble des modules photovoltaïques

4.4.3.1 Rendement énergétique

Selon la première loi de la thermodynamique, le rendement des panneaux solaires photovoltaïques est influencé par la température ambiante et la température du module [162].

$$P_{in} = E_s \times A_c \quad (4.26)$$

Par conséquent, le rendement énergétique (η_{en}) du générateur PV est défini comme le rapport entre la puissance de sortie et la puissance d'entrée d'un générateur PV, comme indiqué ci-dessous [163, 164] :

$$\eta_{en\ PV} = \frac{P_{PVs}}{E_s \times A_c} \quad (4.27)$$

Où E_s est l'ensoleillement en (W/m^2), A_c est la surface totale de captation du générateur photovoltaïque elle est de $107,5\ m^2$.

Sur la base des résultats des recherches antérieurs et selon Xydis G concernant les pertes il y a [165]:

Facteur de correction de la température (pertes dues à l'augmentation de la température) : -1.3%

Facteur de pertes optiques (pertes par accumulation de cendres, etc.) : -2%.

Pertes de l'onduleur : -4,8%.

Pertes de câblage, de dispositifs de protection, de récepteurs de données, etc. : -8%.

Pertes par transfert d'énergie : -0,5%.

Pertes dans les transformateurs : -0,6%.

Vieillessement des modules PV : -1%.

Facteur d'intensité de la lumière du soleil : +4.8%

En additionnant ces pertes, les pertes totales du parc photovoltaïque est maintenant de 21,6 %.

4.4.3.2 Rendement exergetique

L'efficacité d'un générateur photovoltaïque est un indicateur clé de sa performance. Elle est calculée comme le rapport entre l'énergie électrique produite par les panneaux photovoltaïques et l'énergie du rayonnement solaire incident sur ces panneaux. L'énergie solaire est une énergie radiative, plusieurs méthodes sont proposées pour le calcul de l'exergie radiative. Dans notre cas l'exergie du rayonnement solaire est calculée à l'aide de la corrélation

de Petela qui est donnée en fonction de la température du soleil T_s dans l'équation (4-28) [166-167]:

$$Ex_{in PV} = E_s \times A_c \left(1 - \frac{4.T_a}{3.T_s} + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_s} \right)^4 \right) \quad (4.28)$$

Où T_s est la température du soleil, qui est de 5777 K. T_a est la température de référence de l'analyse exergetique et correspond généralement à celle de l'air ambiant.

Le rendement exergetique du générateur photovoltaïque peut être défini comme le rapport entre l'exergie produite par le module solaire photovoltaïque et l'exergie apportée par le rayonnement solaire donné par l'expression suivante selon [168, 169]. En termes mathématiques, l'efficacité peut être exprimée par la formule suivante :

$$\eta_{ex PV} = \frac{Ex_{out PV}}{Ex_{in PV}} = \frac{P_{PVs}}{E_s \times A_c \left(1 - \frac{4.T_a}{3.T_s} + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_s} \right)^4 \right)} \quad (4.29)$$

Étant donné que l'énergie électrique peut être entièrement convertie en travail par l'application d'un processus réversible, la valeur exergetique de l'électricité est également égale à sa valeur énergétique $Ex_{el} = E_{el}$.

4.4.4 Performances du générateur éolien

4.4.4.1 Evaluation de la puissance du vent

La puissance du vent dépend principalement de sa vitesse. Elle est proportionnelle à la densité de l'air instantanée, à la surface de captation du vent et au cube de la vitesse du vent. Elle varie aussi légèrement avec les conditions climatiques de température, de pression et d'altitude. Pour déterminer l'énergie produite par l'éolienne il suffit de connaître la vitesse moyenne du vent en un point donné. La puissance disponible du vent est donnée par la formule suivante :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho A V_1^3 \quad (4.30)$$

Où P_{vent} , ρ , A et V_1 représentent respectivement la puissance du vent en Watt, la masse volumique de l'air en kg/m^3 , la surface de contact avec l'air perpendiculairement au mouvement de l'air en m^2 et la vitesse de l'air en m/s .

4.4.4.2 Masse volumique de l'air

La masse volumique de l'air caractérise la masse d'air qui est contenue dans un mètre cube. À une altitude (H) donnée, l'air subit une pression induite par la masse de la colonne d'air située au-dessus. La masse volumique de l'air est plus importante au niveau de la mer ($1,225 kg/m^3$ à $15^\circ C$) et décroît avec l'altitude.

Toutes les données météorologiques doivent être modifiées en fonction de la hauteur du moyeu de l'éolienne

Pour la masse volumique de l'air (ρ), elle est une fonction de la pression atmosphérique, de la température de l'air et de l'altitude. Elle est donnée par l'expression ci-dessous [170] :

$$\rho(H) = \left(\frac{P_0}{RT} \right) \cdot \exp\left(\frac{-gH}{RT} \right) \quad (4.31)$$

Où P_0 , T , R et g sont respectivement la pression atmosphérique au niveau de la mer, la température de l'air, la constante spécifique des gaz parfaits et l'accélération de la pesanteur. ($R=287.04$ J/kg.K), ($g=9,81$ m/s²) et T la température en Kelvin.

Grâce à ces données, nous avons évalué l'évolution de la densité moyenne de l'air au cours de l'année et les densités moyennes mensuelles.

4.4.4.3 Le facteur de charge

Les performances techniques et économiques d'une éolienne (WT) sur un site dépendent largement de l'efficacité avec laquelle l'éolienne installée interagit avec le régime de vent existant sur le site. Ainsi, il est d'une importance capitale que les caractéristiques de l'éolienne soient correctement adaptées au régime éolien du site pour une performance optimale [171].

Le facteur de capacité (FC) est l'un des principaux indices utilisés pour déterminer l'efficacité de l'adaptation d'une éolienne au régime éolien d'un site. L'une des manières de mesurer le potentiel éolien est de calculer le facteur CF. Ainsi, à l'aide de l'indice du FC, une étude d'adaptation au site a été réalisée pour la turbine considérée. En utilisant les conditions climatiques du site et afin de vérifier si la turbine choisie est bien adaptée au site, le moyen de mesurer le potentiel éolien est d'estimer son facteur de capacité, qui est définie comme est le rapport entre la puissance moyenne produite sur une période donnée et la puissance nominale du générateur, ou à la puissance maximale possible qu'il peut produire au cours du même intervalle. La puissance moyenne générée par une éolienne peut être estimée en utilisant l'équation (4.7) du chapitre 3. Ainsi, le CF est une quantité sans dimension donnée généralement par l'équation (4.32) suivante [172]:

$$CF = \frac{P_{\text{éol,moy}}}{P_n} \quad (4.32)$$

Pour un régime de vent donné, une éolienne ayant un CF plus élevé est mieux adaptée au site et produira une plus grande quantité d'énergie.

4.4.4.4 Rendement énergétique

L'efficacité de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique par les pales de l'éolienne peut être évaluée en fonction de la vitesse du vent. Le rendement énergétique de l'éolienne peut être estimé comme le rapport entre la puissance moyenne produite et l'énergie totale disponible, comme il suit [172]:

$$\eta_{en WT} = \frac{P_{\acute{e}ol,moy}}{P_{vent}} = \frac{P_{\acute{e}ol,moy}}{\frac{1}{2} \rho \pi R_1^2 V_1^3} \quad (4.32)$$

4.4.4.5 Heures de pleine charge

Le nombre d'heures de pleine charge de l'éolienne N_h est utilisé pour analyser les performances d'une éolienne ou d'un parc éolien installé sur un site spécifique. Ce paramètre est calculé à l'aide de la relation suivante [173] :

$$N_h = \frac{NetPEM}{P_n} \quad (4.33)$$

Où $NetPEM$ et P_n représentent simultanément la production d'énergie mensuelle de l'éolienne en kWh et la puissance nominale de l'éolienne.

Production mensuelle d'énergie

L'énergie éolienne produite pendant une période (T_{prod}) est calculée à l'aide de la relation suivante [174].

$$NetPEM = P_{\acute{e}ol,moy} \times T_{prod}$$

L'unité utilisée est le temps/année ou le temps/mois. La valeur maximale théorique de N_h est de 8760 h/an (ou 730 h/mois). Cela suppose que l'éolienne fonctionne toute l'année (ou tout le mois) à sa puissance nominale. Cependant, la vitesse du vent n'est pas aussi élevée tout au long de l'année, de sorte que la valeur N_h est encore bien inférieure à cette valeur.

Rendement exergetique

En suivant l'approche de Xydis [165], l'efficacité énergétique moyenne du éolienne proposée, incluant toutes les pertes, l'efficacité exergetique est le rapport entre le flux d'exergie total sortant et le flux d'exergie total entrant, dans un système, le facteur de capacité énergétique (ExCF) du l'éolienne , $(ExCF)_{\acute{e}ol}$, peut être estimée en utilisant l'équation suivante :

$$\eta_{ex WT} = (ExCF)_{\acute{e}ol} = \frac{NetPEM}{N_i \times C_i} \cdot 100\% \quad (4.34)$$

Où $NetPEM$ est l'énergie nette [KWh] produite, N_i sont les heures totales d'un mois, et C_i la capacité installée du l'éolienne [kW].

ExCF : facteur de capacité énergétique.

4.5 Résultats et discussions:

Sur la base de l'analyse présentée dans la section 3, deux analyses énergétique et exergetique sont effectuées pour les deux sources d'énergie renouvelables solaire PV et éolien ainsi que pour la génératrice diesel.

4.5.1 Performances énergétique du générateur Diesel

L'analyse énergétique indique qu'environ 34,386 % de l'énergie d'entrée est convertie en capacité de travail. La consommation dans le modèle présenté est remplacée par une interpolation linéaire comme dans Barley et Winn [160] et HOMER [161].

Les résultats sont résumés dans les deux tableaux ci-dessous :

Tableau 4-3 : Performances énergétique du générateur Diesel

Mois	\bar{P}_i [kW]	E_i [kWh]	n_f [m ³ /mois]	Rendement η_{en} [%]
Janvier	4,589	3671,640	1,013	34,386
Février	3,853	2841,216	0,769	34,386
Mars	2,958	2315,328	0,653	34,386
Avril	2,459	2131,200	0,525	34,386
Mai	3,138	2804,880	0,693	34,386
Juin	3,078	2232,000	0,658	34,386
Juillet	3,136	2723,040	0,692	34,386
Août	3,530	2990,880	0,779	34,386
Septembre	3,918	3744,000	0,837	34,386
Octobre	3,866	4039,920	0,854	34,386
Novembre	5,035	4089,600	1,076	34,386
Décembre	4,355	4486,320	0,962	34,386

4.5.2 Performances exergetiques du générateur Diesel

Le rendement exergetique du DG est de 32,137%, c'est-à-dire que 32,137% de l'énergie utile disponible sous forme chimique dans le fuel est transformée en électricité. L'efficacité est constante, bien que l'efficacité change suivant le taux d'utilisation de fait que la courbure réelle

de consommation n'est pas très prononcée dans le modèle présentée et elle est remplacée par une interpolation linéaire. Nous perdons alors l'objectif dans notre optimisation d'utiliser les génératrices a un taux de 70-80 % synonyme d'efficacité maximale. En effet, avec l'interpolation linéaire entre 0 et 100 % du taux d'utilisation, nous perdons l'information de différence d'efficacité puisque celle-ci devient constante en linéarisant.

Le taux d'utilisation de la génératrice est toujours supérieur à 25 % afin d'éviter toutes pertes d'étanchéité et d'encrassement des pistons du moteur des génératrices. Ce phénomène provoque une usure excessive de la génératrice en plus d'une surconsommation de diesel.

Tableau 4-4 : Performances exergetiques du générateur Diesel

Mois	Ex _{in} [kW]	Ex _{out} [kW]	Rendement η_{ex} [%]
Janvier	10622,992	3413,893	32,137
Février	8057,089	2589,293	32,137
Mars	6849,107	2201,086	32,137
Avril	5509,978	1770,732	32,137
Mai	7265,435	2334,881	32,137
Juin	6895,700	2216,060	32,137
Juillet	7259,475	2332,965	32,137
Août	8171,224	2625,972	32,137
Septembre	8779,028	2821,302	32,137
Octobre	8950,281	2876,337	32,137
Novembre	11281,338	3625,465	32,137
Décembre	10081,666	3239,928	32,137

Des expériences ont été réalisées sur un moteur à diesel dans la référence [175], et l'analyse énergétique indiquait qu'environ 37,23 % de l'énergie d'entrée est convertie en capacité de travail pour le diesel. Le rendement exergetique était de 34,8 % pour le diesel. Pour les deux analyses, énergétique et exergetique du générateur DG effectués dans la thèse, ils indiquent que le rendement est de 34,38 et 32,13 % pour l'énergie et l'exergie, respectivement.

L'étude comparative indique que les performances énergétiques et exergetiques du moteur diesel ressemblent à celles du générateur diesel de l'étude. En effet un générateur diesel (DG) est la combinaison d'un moteur diesel et d'un générateur électrique (souvent un alternateur), La fonction d'un générateur est de convertir l'énergie mécanique produite par le moteur diesel en

électricité. Il est couplé à l'arbre du moteur diesel. Le rendement des groupes électrogènes diesel est donc exprimé en tant que rendement combiné du moteur et de l'alternateur. Généralement, le rendement combiné des groupes électrogènes diesel varie entre 30 et 55 %, tandis que le rendement autonome du moteur diesel et de l'alternateur se situe entre 35 et 60 % et 85 et 95 % respectivement [176].

4.5.3 Les performances de l'éolienne sur le site

La figure (4-2), montre les valeurs mensuelles de la vitesse du vent pour deux hauteurs dans le site étudié. On peut voir que la vitesse du vent augmente avec l'altitude. Par conséquent, la vitesse du vent mesurée à 25 mètres est plus élevée que la vitesse du vent mesurée à 10 mètres. La différence de vitesse peut être significative, en particulier dans des conditions de vent modérées. La hauteur de l'éolienne affectera la vitesse du vent. Cette différence de vitesse peut avoir un impact important sur la production d'énergie d'une éolienne. Une éolienne située à une altitude plus élevée produira plus de puissance qu'une éolienne située à une altitude plus basse. La vitesse du vent à 25 mètres est comprise entre 6,3 et 7,9 m/s.

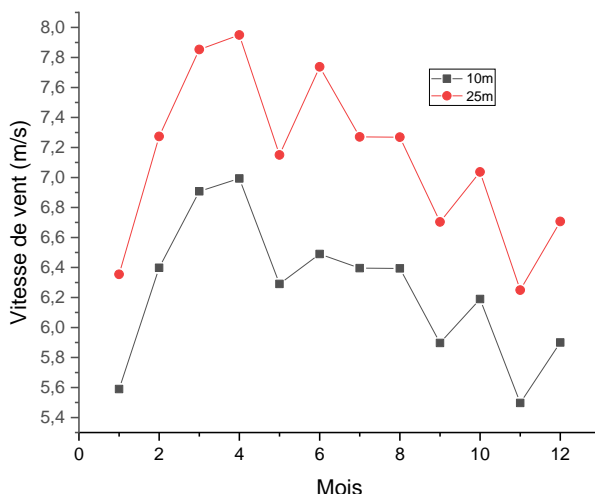


Figure 4-2 : Variation mensuelle de la vitesse de vent.

Par exemple, en février l'augmentation en pourcentage de la vitesse du vent moyenne entre 10 mètres et 25 mètres est de 12,5 %, Cela engendre une augmentation de 23 % de la puissance.

La figure 4-3 montre la répartition mensuelle de la puissance moyenne pour les sites. Comme prévu, les tendances suivent de près celles des vitesses de vent mensuelles.

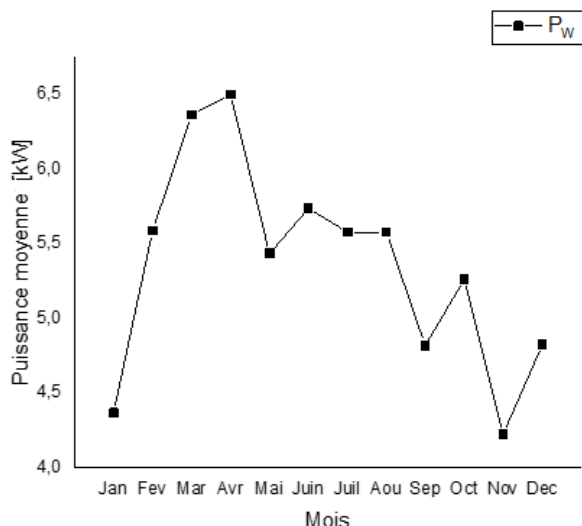


Figure 4-3 : Puissance mensuelle de WT.

La quantité d'énergie éolienne est proportionnelle à la densité de l'air instantanée, à la surface de captation du vent et au cube de la vitesse du vent. Le fait d'augmenter l'un de ces paramètres renforcera la puissance disponible du vent, cependant, de faibles variations de la vitesse du vent ont un impact significatif sur la puissance disponible.

4.5.3.1 Facteur de capacité

Le facteur de capacité est une mesure importante pour évaluer l'efficacité d'une éolienne. Il est estimé par un modèle qui prend en compte les facteurs suivants : la vitesse du vent, la température de l'air, la direction du vent, la topographie du site, la hauteur de l'éolienne et le diamètre des pales.

D'après les résultats obtenus en figure (4-4) en utilisant le modèle de cette thèse, les valeurs (minimale et maximale) du facteur de capacité sont 29% et 44,6% respectivement. Cela signifie qu'une éolienne moyenne fonctionnera à pleine puissance pendant environ 29 à 44.6 % du temps. Le facteur de capacité (FC) annuel est de 36,7% alors que le CF annuel rapporté pour un parc éolien dans [171] est de 36%, ce qui représente une erreur de seulement 0,7 %. Ainsi, les résultats présentés dans ce document peuvent être considérés comme raisonnablement justes.

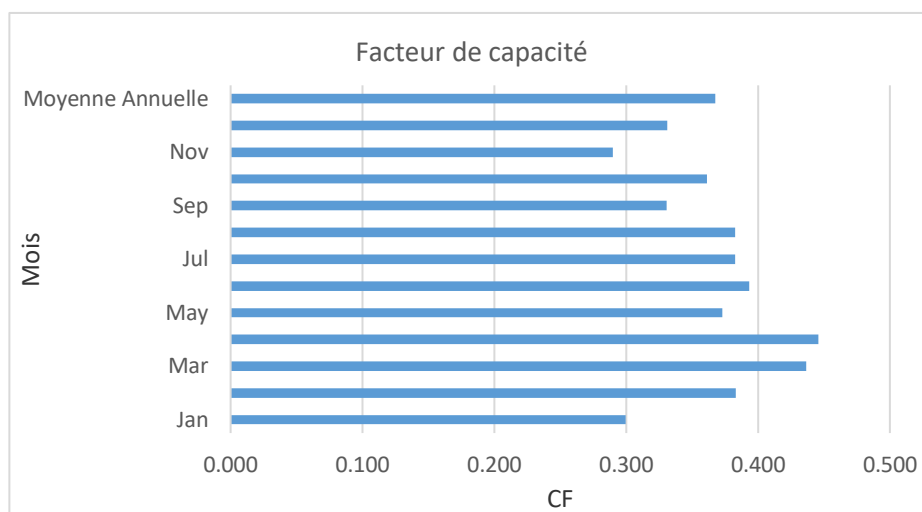


Figure 4-4 : Facteur de capacité CF estime par le model de l'éolien.

La vitesse du vent est le facteur le plus important qui influence le facteur de capacité. En avril la vitesse du vent est plus élevée ce qui entraîne un facteur de capacité plus élevé.

Les installations électriques renouvelables, telles que les centrales solaires ou éoliennes, sont plus vulnérables aux conditions météorologiques que les centrales électriques non renouvelables. Par exemple, une centrale solaire ne peut pas produire d'électricité la nuit ou par temps nuageux. Le facteur de capacité d'une centrale électrique peut également être affecté par la demande en énergie. Par exemple, une centrale électrique peut avoir un facteur de capacité plus faible en été, lorsque la demande en énergie est plus élevée, car elle doit fonctionner à pleine puissance plus souvent.

4.5.3.2 Production d'énergie et heures de pleine charge

La production d'énergie mensuelle et les heures de pleine charge sont représentées dans la figure 4-5, qui indique que les mois de mars, avril, ont été les plus productifs, La production annuelle éolienne était de 46,922 MWh. Les heures de pleine charge NH varient de 202 h en octobre, et 316 h en mars. D'après ces résultats, il semble que l'éolienne ait été moins productive en novembre et en janvier. La production annuelle (NH) de l'éolienne est de 3398h/an. Cette valeur est acceptable de fait que, ce chiffre est compris entre 500 heures/an pour les éoliennes mal situées, exposées à des vents faibles, et peut atteindre 4500 heures/an pour les éoliennes installées sur des sites bien exposés [177].

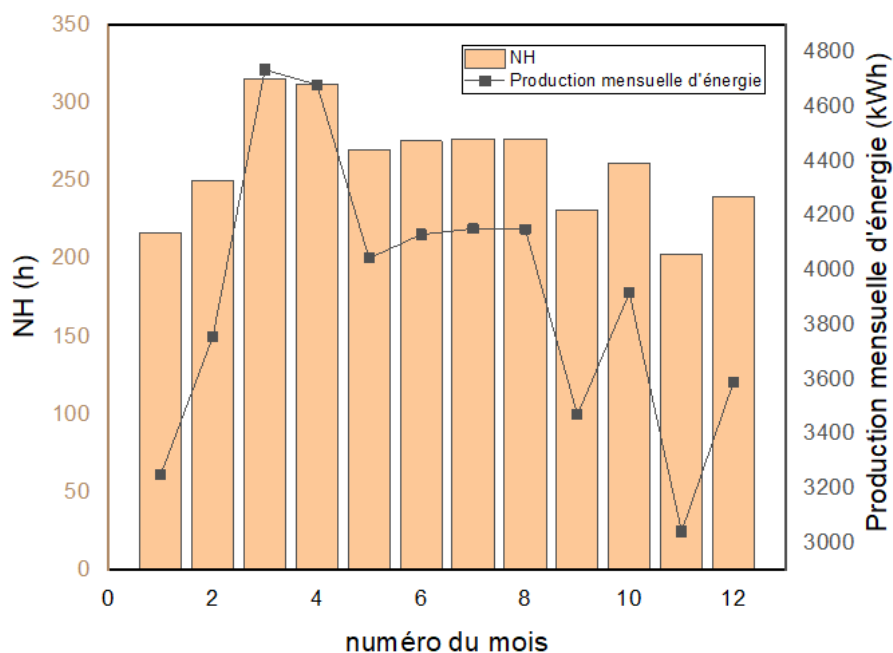


Figure 4-5 : Production mensuelle d'énergie et nombre d'heures de pleine charge.

La production énergétique moyenne fluctue mensuellement en fonction de la vitesse du vent du mois.

4.5.3.3 Rendement énergétique et exergetique de l'éolienne

Selon les données météorologiques du site d'Adrar, les rendements exergetique et énergétique de l'éolienne pour chaque mois sur une année sont représentées dans la figure (4-6). Bien que ces deux rendements suivent la même tendance tout au long de l'année, l'efficacité exergetique tend à être plus faible que l'efficacité énergétique car l'efficacité énergétique est surestimée. L'efficacité énergétique ne peut pas fournir les performances précises d'un système, ce qui conduit souvent à des résultats inexacts et nous égare par rapport à l'évaluation factuelle. Cela est dû au fait que l'efficacité énergétique ne prend en compte que l'effet de la puissance nominale générée en fonction de la conversion de l'énergie cinétique en énergie électrique. Au contraire, elle ignore le fait le plus important que la conversion de l'énergie cinétique est influencée par la vitesse du vent, et que cette vitesse du vent dépend de variables météorologiques telles que la température et la pression.

En conséquence, la variation de l'efficacité exergétique peut être comprise par les trois paramètres les plus prédominants : le changement de vitesse ; le changement de température ; et le changement de pression.

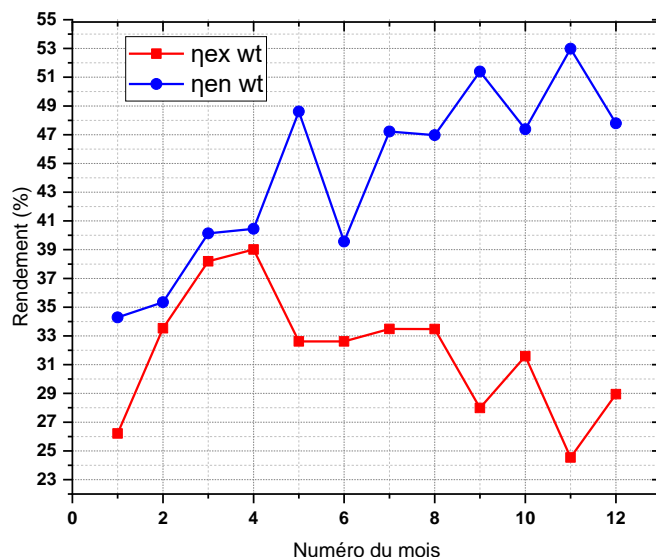


Figure 4-6: Variation moyenne mensuelle de rendement énergétique et exergétique de l'éolienne.

L'augmentation de rendement exergétique est associée à une hausse de la température qui augmente la vitesse du vent.

Comme on peut le voir, le rendement exergétique a suivi la même tendance que la puissance moyenne. On peut voir aussi, qu'il a affiché presque la même tendance que le facteur de capacité. Ceci suggère que le rendement exergétique peut décrire la performance d'une éolienne plus précisément que le rendement énergétique. La différence entre l'efficacité énergétique et l'efficacité exergétique résulte de l'irréversibilité du système qui ne peut être prise en compte dans l'efficacité énergétique. En outre, on peut constater qu'il y a une fluctuation de l'efficacité énergétique et exergétiques au cours des mois, avec une faible efficacité énergétique certains mois. Ceci est probablement dû à la variation quotidienne de la vitesse du vent et de la température. Dans les mois avec une faible efficacité énergétique et exergétique, les conditions environnementales n'étaient pas assez bonnes pour obtenir une production suffisante et souhaitée.

Les résultats des calculs des rendements exergétiques et énergétique moyens ne dépasse pas 60 %. Ceci est due à la limite de Betz est égale à $16/27$, soit environ 59,3 %. Cela signifie qu'une éolienne ne peut jamais convertir plus de 60 % de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Cette limite est due à la conservation de l'énergie. L'énergie cinétique du vent est convertie en énergie mécanique par le rotor de l'éolienne, puis en énergie électrique par le générateur. Cependant, une partie de l'énergie cinétique du vent est perdue en raison de la friction de l'air sur le rotor et les pales, ainsi que des pertes mécaniques dans le générateur.

Les éoliennes réelles ne peuvent pas atteindre cette limite théorique. L'efficacité des éoliennes actuelles est généralement d'environ 40 %. Cette différence est due aux frictions de

l'air sur le rotor et les pales qui entraîne une perte d'énergie cinétique, les pertes mécaniques dans le générateur et la géométrie du rotor. Les ingénieurs travaillent à améliorer l'efficacité des éoliennes en réduisant la friction et les pertes mécaniques, et en optimisant la géométrie du rotor. Cependant, il est impossible de dépasser la limite de Betz.

Les résultats obtenus indiquent que les valeurs d'énergie du vent estimées varient de manière aléatoire. Le fait d'augmenter l'un de ces paramètres renforcera la puissance disponible du vent, cependant, de faibles variations de la vitesse du vent ont un impact significatif sur la puissance disponible.

La température de l'air affecte la densité de l'air. Une température de l'air plus élevée entraînera une diminution de la densité de l'air, ce qui entraînera une diminution de la puissance récupérée par l'éolienne.

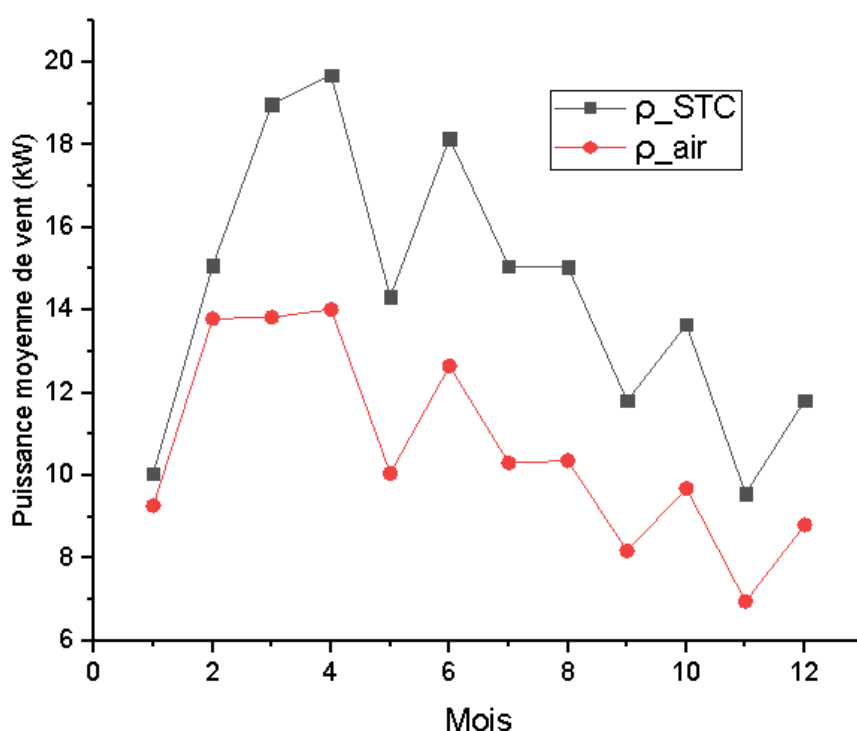


Figure 4-7 : Valeurs moyenne de puissance de vent à l'entrée de l'éolienne.

4.5.4 Performances du système photovoltaïque

Les performances de l'ensemble de modules PV de 14,6 KW ont été évalué pour l'année 2014. Divers facteurs ont été utilisés comme le rayonnement solaire, la température ambiante, la température de surface du module photovoltaïque. Pour l'efficacité électrique on constate qu'avec l'augmentation de la température de surface de module photovoltaïque l'efficacité diminue.

4.5.5 Rendement exergetique et énergétique moyen

La figure (4.8) ci-dessous illustre les rendements exergetiques et énergétiques en fonction des mois de l'année. Comme on peut le voir, l'efficacité énergétique a suivi la même tendance que la puissance moyenne. Le rendement exergetique moyen varie d'un mois à un autre. On

remarque que ce rendement est inversement proportionnel avec l'irradiation solaire, il est faible pour les mois les plus ensoleillé (Mai, Juin, Juillet et Août), et est important pour les mois d'hiver (Novembre, Décembre, Janvier, et Février). Pour l'effet de la température, on constate qu'avec l'augmentation de la température de surface de module photovoltaïque l'efficacité diminue.

Les résultats montrent que les deux rendements (énergétique et exergetique) sont minimaux pendant le mois de Juillet.

Les rendements énergétiques varient de 10,76% à 13,33 %, Alors que les rendements exergetiques varient entre 10% et 12,33%, comme le montre la figure 4-9. Comme indiqué précédemment, la température ambiante de la zone d'étude est supérieure à 25 °C pendant les mois d'avril à octobre. Dans ces conditions, la température de surface des panneaux peut atteindre plus de 35°C. Une température de surface supérieure à 25 °C entraîne une diminution du rendement des panneaux. Cette valeur de la température peut diminuer l'efficacité des modules PV (comme on peut l'observer sur la fig. 4.8).

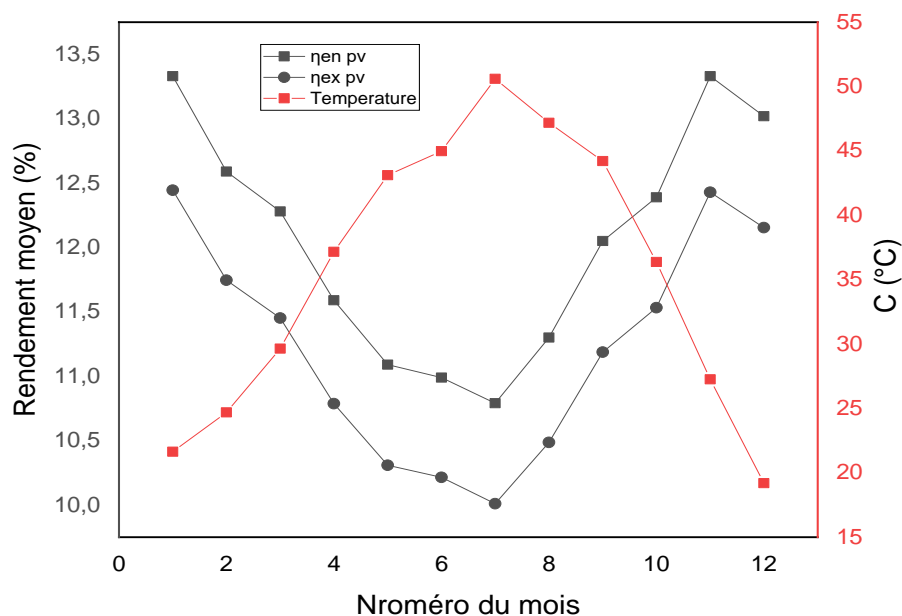


Figure 4-8: Efficacité énergétique et exergetique du GPV et l'influence de la température de surface de générateur.

Pour l'évolution de la température des modules. On remarque que la température varie avec une valeur minimum de 292,34 K (19,19°C) pour le mois de décembre et le maximum est de 323,75K (50,6°C) pour le mois de juillet.

4.5.5.1.1 Caractéristiques météorologiques

Les détails des conditions météorologiques (rayonnement solaire, température ambiante), sont présentés dans cette section. La figure 4-9 représente l'évolution de la température ambiante et du rayonnement solaire moyen dans le site. On constate que la température varie avec une valeur minimum de 286,35°K pour le mois de décembre et le maximum est de

312,45°K pour le mois de juillet. Le rayonnement solaire moyen dans l'année, la température ambiante moyenne sont de 273 W/m², 27,38 °C, respectivement. Le rayonnement solaire est compris entre 4,26 et 8,4(kWh/m²/J). Le rayonnement solaire le plus élevé a été enregistré en mois de mai.

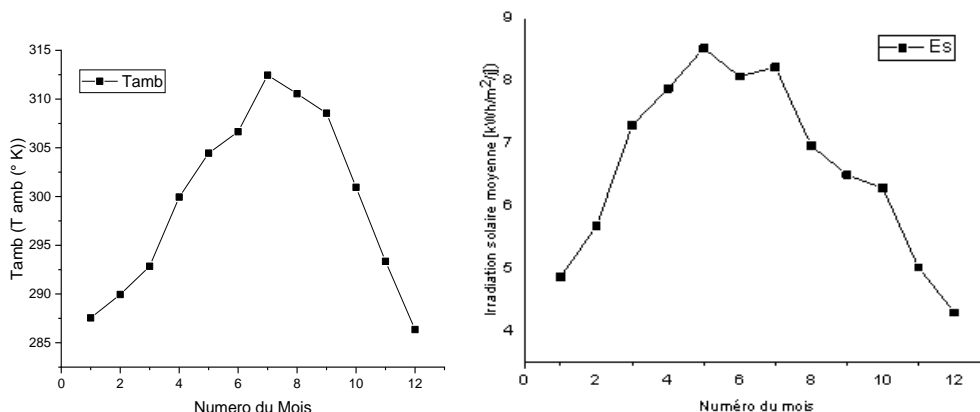


Figure 4-9 : Evolutions moyennes mensuelles (température ambiante, rayonnement solaire)

La variation de la température ou de l'irradiation implique la variation de la puissance photovoltaïque, une diminution de la température se traduit par une augmentation de la puissance photovoltaïque générée. Elle confirme le bon fonctionnement de l'algorithme implémenté sous Matlab pour la supervision du fonctionnement du générateur photovoltaïque.

4.5.5.2 Influence de la température et du l'éclairement

La température a une influence non négligeable sur la puissance du générateur PV. Une diminution de la puissance peut être remarquée quand la température augmente, et une augmentation de l'éclairement, conduit à une augmentation de puissance produite par le générateur PV. Les figures (4-10) et (4-11) montrent la variation puissance pour deux valeurs de températures 25°C et 47°C, et différentes valeurs d'éclairement (40, 150, 500, 750, 1000 W/m²). L'effet de la température et le rayonnement solaire global sur la puissance (obtenu à partir du logiciel PVsyst).

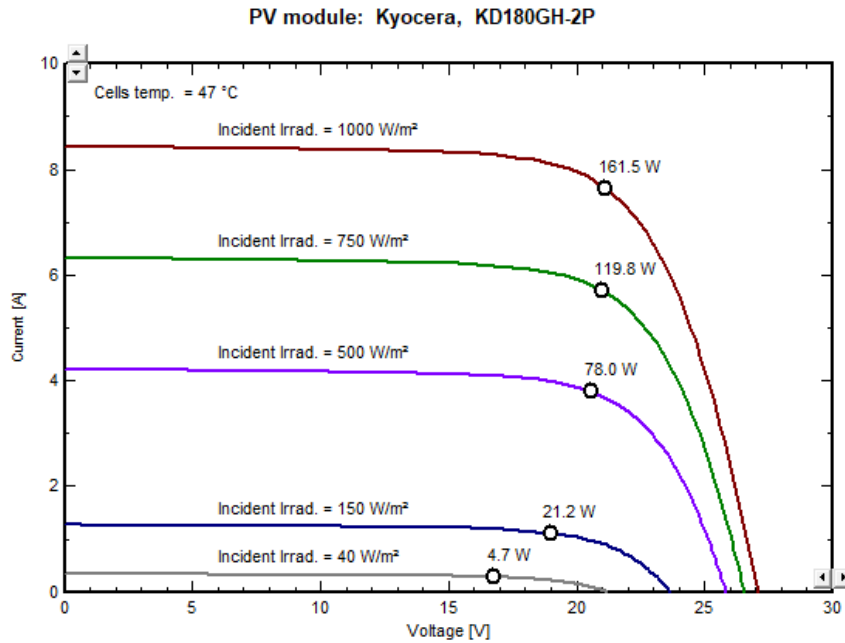


Figure 4-10: Effet du rayonnement incident sur le tracé de la courbe (I-V) a température de 47 °C (obtenue à partir d'un logiciel PVsyst).

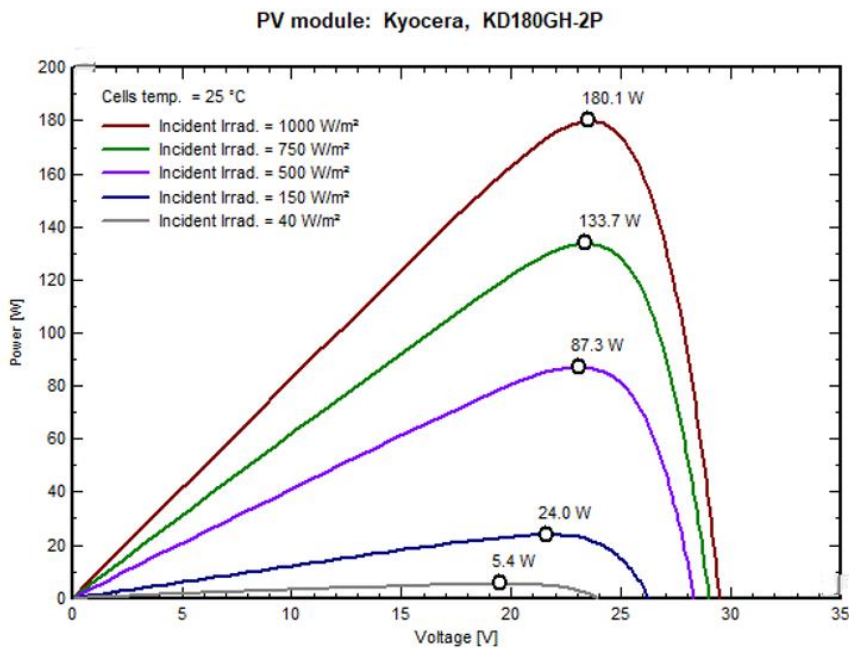


Figure 4-11 : Effet du rayonnement incident sur le tracé de la courbe P-V a température de 25°C (obtenue à partir d'un logiciel PVsyst).

4.5.6 Rendements énergétique et exergetique des sous-systèmes de la génération d'électricité.

Un système énergétique de production d'énergie électrique en site isolé à partir des énergies renouvelables pour application au cas de l'Algérie a été examiné dans cette étude. L'électricité

nécessaire au fonctionnement du site est produite par sources d'énergie renouvelables (énergie éolienne et solaire) et une source fossile, le groupe électrogène.

Une analyse pour le système mentionné a été réalisée afin d'évaluer les efficacités exergetique et énergétique du système. Les pertes d'énergie sont attribuées aux irréversibilités du système étudié.

Les rendements exergetiques et énergétiques de chaque générateur sont donnés dans la figure (4-12). D'après les résultats, on peut voir que certains sous-systèmes semblent avoir des rendements élevés. Dans d'autres cas, comme la conversion de l'énergie solaire en électricité, les efficacités sont plus faibles

Il faut noter que les modules PV utilisés dans cette étude ne reflètent pas l'état de l'art, on peut s'attendre à une amélioration significative de l'efficacité du système PV, étant donné que les meilleurs modules de leur catégorie ont aujourd'hui un taux de conversion bien supérieur à 20%.

Pour l'évaluation de la puissance du vent lorsqu'on prend en considération les variations mensuelles de la température et de la densité de l'air, le rendement énergétique moyen annuel est de 44%, alors que le rendement basé sur des conditions atmosphériques standard en supposant une densité d'air standard constante est de 41, 41%. On note que l'hypothèse d'une densité d'air standard constante de 1,225 (kg/m³) est une simplification utilisée dans certains calculs pour faciliter les estimations. Cette hypothèse est valide dans la plupart des cas, mais elle peut ne pas être exacte dans des conditions extrêmes, telles que de fortes variations de température ou de pression.

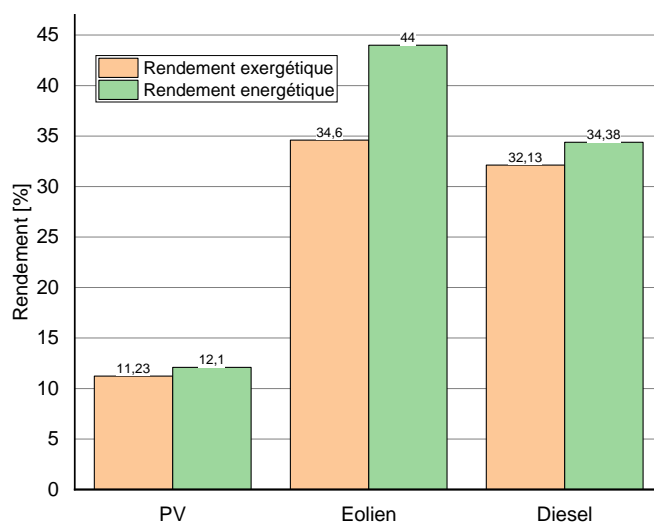


Figure 4-12: Rendements énergétique et exergetique des différents sous-systèmes de la génération d'électricité.

Le nombre relativement important d'études existantes sur les systèmes hybrides montre leur rôle essentiel dans la communauté scientifique. Cependant, il n'existe que peu de travaux sur les systèmes hybrides spécifiquement conçus pour les applications hors réseau et, jusqu'à présent. Il existe donc un besoin d'une comparaison approfondie et cohérente du couplage de

plusieurs technologies renouvelables afin de révéler les alternatives possibles et alternatives possibles et prometteuses. Ce manque d'une évaluation étendue et robuste constitue la motivation et souligne l'originalité de ce travail.

Ce chapitre présente la simulation dynamique et l'évaluation thermodynamique d'un micro réseau électrique hybride pour l'autonomie électrique d'environ 70% renouvelable d'une région rurale en Algérie. Les résultats de la recherche peuvent être utilisés comme un exemple pour les organismes académiques et privés ainsi qu'aux décideurs politiques. Le système hybride combinait un parc photovoltaïque, une turbine éolienne et un groupe électrogène, des batteries de stockage de l'électricité.

Pour inclure les fluctuations opérationnelles dans l'évaluation globale de l'installation, une efficacité annuelle moyenne du système a été calculée en se basant sur les séries chronologiques générées de l'entrée et de la sortie d'énergie sur un an. L'efficacité annuelle du système multi sources (c'est-à-dire la contribution nette moyenne de chaque technologie d'énergie renouvelable primaire)

Dans l'ensemble, l'hybridation de l'énergie éolienne et de l'énergie solaire avec le diesel a fourni une solution robuste pour l'objectif de 70% d'énergies renouvelables. Les trois technologies se complètent et offrent la possibilité d'obtenir des performances plus stables et plus performances.

L'efficacité d'une centrale électrique est une mesure de la quantité d'énergie électrique produite par rapport à la quantité d'énergie primaire consommée. Les centrales hybrides renouvelables sont moins efficaces que les centrales hybrides qui incluent des combustibles fossiles, car les sources d'énergie renouvelables, comme l'énergie solaire et l'énergie éolienne, sont intermittentes.

Les facteurs de capacité moyens des panneaux photovoltaïques et éolienne s'avèrent 22,2 et 35,7 %, respectivement. Le facteur de capacité de générateur diesel est de 19,72 %.

Les analyses sont essentiellement réalisées pour les principaux équipements dans des conditions de fonctionnement et d'environnement changeant de manière dynamique. En outre, les distributions horaires de l'évolution des taux d'énergie et d'exergie sont illustrées.

Il en résulte que les efficacités énergétiques et exergetiques moyennes mensuelle du champ photovoltaïque sont de 12,10% et 11,23%. De même, les valeurs d'efficacité calculées pour l'éolienne sont de 44 % pour l'énergie et 34,6 % pour l'exergie, et pour le générateur diesel de 34,38 % pour l'énergie et 32,13 % pour l'exergie, respectivement.

Tableau 4-5 : Tableau de la variation de l'efficacité énergétique de chaque composant.

Études		Rendement (%)	
		énergétique	exergetique
PV	Refs. [118], [121], [119], [117], [177], [178], [179]	8-15	
	[30]		12,74
WT	Refs. [118], [121], [119]	25-40	
Moteur Diesel	[175]	37,23	34,8
PV	Le model proposé dans cette thèse	11,23	12,10
		41,41	34,60
		34,38	32,14
WT			
GD			

4.6 Conclusion

L'analyse énergétique et exergetique des éoliennes, des panneaux photovoltaïques et des générateurs diesel est un outil important pour évaluer l'efficacité de ces technologies de production d'énergie. Elle permet d'identifier les facteurs qui affectent l'efficacité des éoliennes et de développer des solutions pour améliorer leur performance. Ces deux analyses sont appliquées pour déterminer l'emplacement du site et l'ampleur des inefficacités du système.

Il est clair que l'exergie d'entrée et de sortie du système sont principalement attribuées à la vitesse du vent. En raison de la nature oscillante du vent, l'efficacité énergétique a des valeurs différentes à chaque instant. Au premier coup d'œil, il est clair que la plus grande partie de l'exergie d'entrée appartient au PVS avec environ 80%. La faible efficacité des capteurs PV provoque la destruction maximale d'exergie de ce système d'environ 65%.

L'efficacité énergétique maximale pour chaque WTS a été rapportée à 59,3% par Betz [176].

Le rendement énergétique d'un générateur diesel est généralement compris entre 20 et 35 %. Cela signifie qu'environ 70 à 80 % de l'énergie contenue dans le diesel est perdue sous forme de chaleur. Le rendement énergétique d'un générateur diesel peut être amélioré par plusieurs moyens, notamment :

- L'utilisation d'un carburant de meilleure qualité
- L'optimisation du processus de combustion
- L'utilisation d'un système de refroidissement plus efficace

L'analyse énergétique et l'analyse exergétique sont deux outils complémentaires qui permettent d'évaluer l'efficacité des technologies de production d'énergie renouvelable. Cette étude a permis de déterminer les principaux facteurs qui affectent l'efficacité du système étudié. Les deux analyses ont permis de comparer l'efficacité de différentes technologies, et de prendre en compte la qualité de l'énergie produite.

L'analyse énergétique et exergétique des éoliennes et des panneaux photovoltaïques est un outil important pour évaluer l'efficacité de ces technologies. Elle permet d'identifier les facteurs qui affectent l'efficacité de ces technologies et de développer des solutions pour améliorer leur performance.

Conclusion générale et travaux futurs

Conclusion générale et travaux futurs

La recherche de sources d'énergie alternatives reste une préoccupation majeure pour les décideurs du secteur de l'électricité en Algérie. Les besoins en électricité des populations algériennes vivant en milieu rural non couvert par le réseau électrique interconnecté dans le sud algérien sont satisfaits par des groupes électrogènes fonctionnant au gazole et des réseaux isolés. La production et la distribution de l'énergie électrique sont locales. Cette solution reste intéressante, car elle est moins chère que le raccordement au réseau national (interconnecté) ; cependant, l'utilisation de cette source d'énergie fossile comporte des risques. Ces risques sont notamment la menace sur l'approvisionnement en électricité de ces zones, liée à l'instabilité du prix de cette source d'énergie. De plus, l'accroissement des émissions de gaz à effet de serre à l'origine du réchauffement climatique et ses nombreuses conséquences désastreuses sont également à prendre en compte.

Les potentiels solaire et éolien importants dans la région d'Adrar ajoutés à une étendue de territoire permettent d'installer des composants de production d'électricité sur place. Pour cela, nous avons proposé une configuration permettant de coupler un système multi-sources à base d'énergies renouvelables et fossiles avec stockage pour les zones rurales isolées.

Cette thèse a permis de mettre en évidence les performances dynamiques d'un générateur diesel et des batteries (système de stockage) associés à deux sources intermittentes. Le système hybride proposé est constitué d'un générateur PV, d'une éolienne, d'un système de stockage par batterie, d'une charge AC et des différents convertisseurs statiques nécessaires à chaque étage de conversion d'énergie électrique.

Nous nous sommes efforcés d'élaborer des modèles pour l'aide à la décision en termes de configuration du réseau et le contrôle des flux d'énergie échangés dans un système multi-sources (système hybride). Ces modèles ont été développés sous HOMER et Matlab. Afin de valider nos modèles, nous nous sommes appuyés sur un projet d'électrification rurale d'un village éloigné pour couvrir les besoins des habitants en matière d'électricité de manière technico-économique. Cependant, avant d'envisager un tel projet, il importe d'en étudier la faisabilité et d'analyser les performances exégétiques et énergétiques du système.

Le critère économique à optimiser est le coût net actuel total, qui est fonction des coûts d'investissement, de remplacement et d'exploitation. Les résultats ont révélé plusieurs points importants : la fiabilité de l'hybridation des énergies PV/éolienne/diesel, le fort impact du coût de générateur diesel dans le NPC du système et l'importance de raccorder le système avec une charge auxiliaire tel que le pompage d'eau pour rentabiliser l'énergie excédentaire produite. L'analyse de sensibilité menée a permis de valider la pertinence du modèle proposé selon les contraintes imposées. Toutefois, l'optimisation du dimensionnement du système s'avère essentielle pour éviter toute éventuelle panne de courant, qui pourrait entraîner des dommages financiers colossaux. L'enjeu est de trouver un compromis entre les coûts d'investissement et les bénéfices apportés en termes de prolongation de la durée de vie des sources énergétiques et de réduction des émissions de CO₂.

Le recours à un système hybride est un choix stratégique justifié sur les plans économique, environnemental et d'intégration des énergies renouvelables.

Conclusion générale et travaux futurs

Le critère économique est fondamental dans cette étude où l'optimisation cherche à réduire les coûts des constituants tout en satisfaisant les besoins en électricités des villageois. Différentes optimisations sont conduites en tenant compte de contraintes sur les sources. Des indicateurs de performance sont ainsi utilisés: COE (\$/kWh), NPC (\$).

Sur le plan économique, le système hybride est plus rentable que le système conventionnel à générateur diesel. En effet, le coût net de production (NPC) du système hybride est de 250 794 \$, contre 306 800 \$ pour le système conventionnel. Le coût de l'énergie (LCOE) du système hybride est également inférieur, à 0,22 \$/kWh contre 0,27 \$/kWh pour le système conventionnel.

Sur le plan environnemental, le système hybride émet moins de gaz à effet de serre que le système conventionnel. En effet, les émissions de CO₂ du système hybride sont de 23,5 tonnes par an, contre 32,5 tonnes par an pour le système conventionnel (générateur diesel).

Sur le plan d'intégration des énergies renouvelables, le système hybride permet d'augmenter la pénétration des énergies renouvelables. En effet, le système hybride produit 75 % de son électricité à partir d'énergies renouvelables, contre 25 % pour le système conventionnel.

Nous avons contribué à la modélisation d'un système multi-sources, avec un système de stockage. Un modèle d'interconnexion original pour le contrôle et la gestion d'énergie est élaboré. Afin de valider notre modèle une région est choisie, nous avons sélectionné grâce à ces propres ressources énergétiques un système hybride photovoltaïque/éolienne/diesel avec stockage) et leur connexion au bus alternatif AC. Par conséquent, un algorithme itératif pour la gestion des flux d'énergie basée sur l'écart horaire entre la capacité de production (photovoltaïque, éolienne) et la demande des utilisateurs est développé. Elle est conçue en tenant compte de tous les scénarios de fonctionnement de ce système étudié, qui respecte les contraintes techniques de chaque composant et les critères de disponibilité et de fiabilité du système afin de disposer à 100% de l'énergie électrique.

Sur la base d'un modèle en régime permanent des processus de conversion d'énergie, les rendements exergetiques et énergétique sont calculés pour les trois sous-systèmes principaux. Il est montré que le générateur PV a un rendement exergetique de 12,06%, l'éolienne de 34,6%, et le groupe électrogène de 32,14%.

A l'issue de cette thèse, nous souhaitant mettre en évidence les principales contributions amenées par cette recherche à l'étude de dimensionnement et de la gestion énergétique ainsi qu'à l'étude énergétique et exergetique d'un micro réseau dans les sites isolés (système hybride). Globalement l'ensemble, des études présentés dans cette thèse permettent d'appréhender le fonctionnement des systèmes énergétiques hybrides et de faire face à leur complexité en adaptant la gestion d'énergie en fonction de l'application et des moyens financiers et techniques mis à disposition.

La vision ambitieuse de l'autonomie totale en énergie renouvelable hors réseau des régions éloignées ne s'est pas encore concrétisée. Le développement de systèmes complets de production d'énergie serait nécessaire pour atteindre un tel objectif.

Conclusion générale et travaux futurs

Les résultats de simulation montrent l'efficacité de l'algorithme de gestion d'énergie et des modèles énergétique utilisées afin de maximiser la production et l'apport incontestable du Système de stockage dans l'équilibrage de la demande et de l'offre. Les performances de la génératrice diesel et l'ensemble des batteries à réagir aux intermittences de la production PV - éolien (compensation) et aux variations brusques de la charge validée par simulation soulignant l'importance du système du stockage et d'une source de secours dans le système hybride autonome.

Ce travail a montré que les micro-réseaux hybrides renouvelables constituent une importante alternative aux sources de combustibles fossiles. Les progrès récents de la science et des technologies d'énergie propre ont rendu le coût de la construction et de la mise en œuvre des systèmes de production d'énergie à partir de sources renouvelables plus bas et plus économique que par le passé.

Les études ont également montré que l'utilisation de plus d'une source d'énergie renouvelable pour produire de l'électricité augmente également la fiabilité du système de production d'électricité. Les résultats ont été positifs. En général, le modèle a suivi la stratégie souhaitée et a fourni une idée représentative de la performance du micro-réseau

A l'issue de ce travail de recherche, plusieurs pistes peuvent être explorées :

La mise en œuvre des méthodes d'apprentissage automatique pour la recherche du MPPT dans le système de conversion d'énergie éolien et photovoltaïque;

Pour aboutir à une gestion d'énergie plus réaliste. Il faut introduction des modèles de prévision de charge et des données météorologiques ;

L'étude d'autres types de dispositifs de stockage à long terme, tels que l'hydrogène,

L'intégration de la stratégie de gestion d'énergie proposée au chapitre 3 dans l'algorithme de dimensionnement pour une optimisation multi objective en utilisant des méthodes d'optimisation récente et développer des modèles de conception optimale des réseaux de distribution adaptés aux zones rurales. Compte tenu d'une croissance continue de la demande en énergie.

La planification online d'énergie (en temps réel) avec la mise en place d'un banc d'essai expérimental, capable d'émuler les performances des différents éléments du système (éoliennes, panneaux photovoltaïques, batteries en lithium, électrolyseurs, piles à combustible, convertisseurs de puissance, etc.).

L'étude exergétique approfondie du système en analysant les performances thermo-économique et exergétique approfondie afin de valoriser les pertes thermiques des générateurs, l'idée est de monter un système de cogénération pour alimenter une machine de froid à absorption, ce qui dans une localité, pourra servir d'entrepôt frigorifique pour la conservation des denrées alimentaires.

Un modèle de tarification pourra intégrer à la fois la nécessité d'utiliser au maximum les sources d'énergies renouvelables localement disponibles, et le pouvoir d'achat de la population consterné.

Conclusion générale et travaux futurs

Des études approfondies devraient également être réalisées sur les nouveaux dispositifs de stockage de l'énergie, tels que les piles à combustible, et sur les carburants propres tels que les carburants à faible teneur en carbone (biodiesel, biogaz, gaz de synthèse) et les carburants à zéro carbone (hydrogène vert H_2 et ammoniac NH_3) pour les travaux futurs, les analyses environnementales telles que l'analyse du cycle de vie (LCA) et des analyses exergétiques, énergétiques et économiques devraient faire l'objet d'une plus grande attention pour ce type de système.

Des algorithmes d'optimisation méta-heuristiques devraient être développés avec plus de rapidité et de précision.

Développer des réseaux électriques intelligents pour faciliter l'intégration des énergies renouvelables intermittentes.

Bibliographie et Références

Bibliographie et Références

- [1] World Energy Outlook. Executive summary; 2014.
- [2] World Energy Outlook. Executive summary; 2012.
- [3] Wu, J.; Yan, J.; Jia, H.; Hatziargyriou, N.; Djilali, N.; Sun, H. Integrated Energy Systems. *Appl. Energy* 2016, 167, 155–157.
- [4] Renewables. Int Energy Agency. 2019. Available online: <https://www.iea.org/topics/renewables/>.
- [5] Solangi KH, Islam MR, Saidur R, Rahim NA, Fayaz H. A review on global solar energy policy. *Renew Sustain Energy Rev* 2011; 15:2149–63.
- [6] Fernandez-Garcia A, Zarza E, Valenzuela L, Perez M. Parabolic-trough solar collectors and their applications. *Renew Sustain Energy Rev* 2010; 14:1695–721.
- [7] Trieb F, Schillings C, Pregger T, O’Sullivan M. Solar electricity imports from the Middle East and North Africa to Europe. *Energy Policy* 2012; 42:341–53.
- [8] Kost C, Engelken M, Schlegl T. Value generation of future CSP projects in North Africa. *Energy Policy* 2012; 46:88–99.
- [9] Brand B, Stambouli AB, Zejli D. The value of dispatchability of CSP plants in the electricity systems of Morocco and Algeria. *Energy Policy* 2012;47:321–31.
- [10] CDER, 2024-annee-des-energies-renouvelables-et-de-la-transition-energetique-en-algerie, disponible sur l’adresse web [.https://portail.cder.dz](https://portail.cder.dz) (consulté le 30/11/2023).
- [11] Pitz-Paal R, Dersch J, Milow B. ECOSTAR: European concentrated solar thermal road-mapping. Roadmap document; 2005.
- [12] Renewable energy technologies: cost analysis series. Volume 1: Power Sector, Issue 2/5. IRENA working paper; June 2012.
- [13] Quaschnig V. Technical and economical system comparison of photovoltaic and concentrating solar thermal power systems depending on annual global irradiation. *Sol Energy* 2004;77:171–8.
- [14] Li C, Ge X, Zheng Y, Xu C, Ren Y, Song Y, et al. Techno-economic feasibility study of autonomous hybrid wind/PV/battery power system for a household in Urumqi, China. *Energy* 2013;55:263–72.
- [15] IRENA (2021), Perspectives pour les transitions énergétiques mondiales : Trajectoire vers l’objectif de 1.5°C, Agence internationale pour les énergies renouvelables, Abou Dhabi. www.irena.org/publications
- [16] S. Singh, M. Singh and S. Kaushik, "Feasibility study of an islanded microgrid in rural area consisting of PV, wind, biomass and battery energy storage system", *Energy Convers. Manag.*, vol. 128, pp. 178-190, 2016.
- [17] A. Nag and S. Sarkar, "Modeling of hybrid energy system for futuristic energy demand of an Indian rural area and their optimal and sensitivity analysis", *Renew. Energ.*, vol. 118, pp. 477-488, 2018.
- [18] A. Harrouz, M. Abbes, I. Colak, and K. Kayisli, “Smart grid and renewable energy in Algeria,” 2017 IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), San Diego, CA, USA, pp. 1166-1171, 5-8 November 2017.

Bibliographie et Références

- [19] K. D. Mercado, J. Jimenez, and M. C. G. Quintero, "Hybrid renewable energy system based on intelligent optimization techniques," 2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Birmingham, UK, pp. 661-666, 20-23 November 2016.
- [20] IRENA (2019), Global energy transformation: The REmap transition pathway (Background report to 2019 edition), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. www.irena.org/publications
- [21] H. Al Garni, A. Awasthi and M. Ramli, "Optimal design and analysis of grid-connected photovoltaic under different tracking systems using HOMER", Energy Convers. Manag., vol. 155, pp. 42-57, 2018.
- [22] Kamarposhti, M.A.; Colak, I.; Eguchi, K. Optimal energy management of distributed generation in micro-grids using artificial bee colony algorithm. Math. Biosci. Eng. 2021, 18, 7402–7418.
- [23] Fan, S.; He, G.; Zhou, X.; Cui, M. Online Optimization for Networked Distributed Energy Resources with Time-Coupling Constraints. IEEE Trans. Smart Grid 2020, 12, 251–267.
- [24] Lenoir D., Comité de Liaison Energies Renouvelables « CLER » (2007), Energie : changeons de cap !, éditions Terre vivante, p. 43-50, ISBN : 978-2-914717-37-3.
- [25] IRENA, Renewable capacity highlights, 31 March 2020. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Mar/IRENA_RE_Capacity_Highlights_2020.
- [26] Global Wind Report 2019, Global Wind Energy Council (GWEC), edition 2020. <https://www.igwindkraft.at>.
- [27] Solar Energy, IRENA, <https://www.irena.org/solar>.
- [28] Hannah Ritchie and Max Roser, Renewable Energy, <https://ourworldindata.org/renewable-energy>.
- [29] Observatoire de l'énergie solaire photovoltaïque en France 43ème édition – Publication trimestrielle – 2ème trimestre 2022 www.observatoire-energie-photovoltaique.com.
- [30] Future of solar photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socioeconomic aspects, IRENA, https://www.irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Nov/IRENA_Future_of_Solar_PV_2019.pdf
- [31] IFP-Energies Nouvelles, 34_Panorama-2013-Le-stockage-massif-de-l-energie.pdf, <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/sites/ifpen.fr/files/inlineimages/NEWSROOM/Regards%20%C3%A9conomiques/Etudes%20%C3%A9conomiques/Panorama%202013/08-VF-Panorama-2013-Le-stockage-massif-de-lenergie.pdf>
- [32] Electric Energy Storage Technology Options: A White Paper Primer on Applications, Costs, and Benefits. EPRI, Palo Alto, CA, 2010. 1020676. <http://large.stanford.edu/courses/2012/ph240/doshay1/docs/EPRI.pdf>.
- [33] Electricity Storage Valuation Framework: Assessing system value and ensuring project viability, IRENA (2020), https://www.irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Mar/IRENA_Storage_valuation_2020.pdf.

Bibliographie et Références

- [34] Clean Energy, Australia Report 2020, Clean Energy Council, <https://assets.cleanenergycouncil.org.au/documents/resources/reports/clean-energy-australia/clean-energy-australia-report-2020.pdf>.
- [35] M. BOUTHAINA, " Architectures intégrées de gestion de l'énergie pour les multi-systèmes autonomes utilisant le stockage par accumulateurs ", Thèse de Doctorat, Université des Frères Mentouri –Constantine, 2018.
- [36] B. BOYA BI and P. GBAHA, "Sizing of an electric energy production hybrid system", Asian Journal of Science and Technology, Vol. 08, Issue, 11, pp.6669-6676, November 2017.
- [37] Reda Mohamed Nezzarion "Approches multi-modèle pour la prévision de la charge électrique à moyen long terme Filière ", Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar – Annaba 2016.
- [38] Echo Sonelgaz Groupe N°13 de 2013.
- [39] CEREFÉ (2020) : Transition Energétique en Algérie : Leçons, Etat des Lieux et Perspectives pour un Développement Accéléré des Energies Renouvelables, (Edition 2020) : Commissariat aux Energies Renouvelables et à l'Efficacité Energétique, Alger. EISSN/ISSN 2716-8654
- [41] D. Rekioua, Z. Roumila et T. Rekioua, 'Etude d'une Centrale Hybride Photovoltaïque - Eolien – Diesel', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11, N°4, pp. 623 – 633, 2008.
- [42] Résumé d'Etude du Potentiel Eolien d'Adrar, CREG, Filiale Sonelgaz, greg.dz.
- [43] N. K. Merzouk, 'Evaluation du Gisement Energétique Eolien, Contribution à la Détermination du Profil Vertical de la Vitesse du Vent en Algérie', Thèse de Doctorat, Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, 2006.
- [44] CHENNOUF Nasreddine « Perspectives de développement de la production industrielle de l'hydrogène dans le sud algérien a partir des énergies renouvelables » thèse doctorat UNIVERSITE D'OUARGLA; 21 /06/2014.
- [45] Atlas des Ressources Energétiques Renouvelables de l'Algérie (Algerian Renewable Energy Resource Atlas), <https://www.cder.dz/spip.php?article4444>
- [46] D. Abbes, "Contribution au dimensionnement et à l'optimisation des systèmes hybrides éoliens-photovoltaïques avec batteries pour l'habitat résidentiel autonome ", Thèse Doctorat, Université de Poitiers, 2012.
- [47] Ludmil STOYANOV « Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables » thèse de Doctorat de l'université technique de SOFIA, octobre 2011.
- [48] Menad DAHMANE « Gestion, optimisation et conversion des énergies pour habitat autonome » thèse de Doctorat de l'université Jules Verne de Picardie, Novembre 2013.
- [49] I. Vechiu, "modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome " Thèse Doctorat, Université du Havre, 2005.
- [50] L. Croci, "Gestion de l'Energie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/supercondensateurs ", Thèse Doctorat, Université de Poitiers, 2013.

Bibliographie et Références

- [51] H. Karel, “Stockage d’énergies renouvelables sous forme d’hydrogène pour sites isolés,” Encyclopédie de l’Energie.
- [52] “Status of Remote/Off-Grid Communities in Canada,” Government of Canada, 2011.
- [53] Youssef Saad «Gestion optimale des systèmes hybrides pour la production de l’énergie dans les sites isolés » thèse de Doctorat de l’université Bourgogne Franche-Comté, 2019
- [54] A. Ricaud, Photopiles solaires : de la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés, 1ère ed. Lausanne, Suisse: Presses polytechniques et universitaires romandes, 1997.
- [55] A. De Vos, Thermodynamics of Solar Energy Conversion. Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 2008
- [56] Conversion photovoltaïque : du rayonnement solaire à la cellule. Ed. Techniques Ingénieur.
- [57] Zafeiropoulou M., Mentis I., Sijakovic N., Terzic A., Fotis, G., Maris, T.I., Vita, V., Zoulias E., Ristic V., Ekonomou, L., Fore casting Transmission and Distribution System Flexibility Needs for Severe Weather Condition Resilience and Outage Management. Applied Sciences, Vol. 12, No. 14, 2022. <https://doi.org/10.3390/app12147334>.
- [58] F. Blaabjerg, K. Ma, and Y. Yang, “Power Electronics for Renewable Energy Systems – Status and Trends,” 8th Int. Conf. Integr. Power Syst., pp. 25–27, 2014.
- [59] R. Lasseter, “MicroGrids,” in IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2002, vol. 1, pp. 305–308 vol.1.
- [60] NZEB. Wind energy, on-line, net zero energy buildings. February 2016. <http://www.nzeb.in/knowledge-centre/renewable-energy/wind/>.
- [61] Oh, H., et B. Kim. 2015. Comparaison et vérification de l’écart entre les performances de puissance des éoliennes garanties et mesurées en terrain complexe. Energy 85:23-29. doi:10.1016/j.energy.2015.02.115.
- [62] MOUSSA, S. B., Resource-Batterie-Solaire. SCRIBD, 2017.
- [63] T. Kousksou, P. Bruel, A. Jamil, T. El Rhafiki, and Y. Zeraouli, “Energy storage: Applications and challenges,” Sol. Energy Mater. Sol. Cells, vol. 120, pp. 59–80, 2014.
- [64] Huff, G., DOE Global Energy Storage Data base. 2015, Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (United States).
- [65] S. Kapila, A. O. Oni, and A. Kumar, “The development of techno-economic models for large-scale energy storage systems,” Energy, vol. 140, no. Part 1, pp. 656–672, 2017.
- [66] M. Aneke and M. Wang, “Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review,” Appl. Energy, vol. 179, pp. 350–377, 2016.
- [67] Benelmir R, Lallemand A, Feidt M, Analyse exergétique, Les techniques de l’Ingénieur, BE 8015, 2002.
- [68] Rivero-Rodriguez R., L’analyse d’exergie: application à la distillation adiabatique et aux pompes à chaleur à absorption, Thèse, INPL France, 1993.
- [69] Szargut J., Morris DR., Steward FR., Exergy analysis of a thermal, chemical and metallurgical processes, New York Hemisphere Publishing Corporation, 1988.

Bibliographie et Références

- [70] S. Redha, „Intérêt d’une Source d’énergie Electrique Hybride pour véhicule électrique urbain – dimensionnement et tests de cyclage“, Thèse doctorat, Ecole Centrale De Lille, 2013.
- [71] G. Mouloud. Heuristiques optimisées et robustes de résolution du problème de gestion d’énergie pour les véhicules électriques et hybrides. Traitement du signal et de l’image. Institut, Thèse doctorat, National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2013.
- [72] C. Barley, «Modeling and Optimization of Dispatch Strategies for Remote Hybrid Power Systems», PhD, Department of Mechanical Engineering, Colorado State University, Fort Collins, 1996.
- [73] Sawle, Y., Gupta, S.C., Bohre, A.K., 2018. Review of hybrid renewable energy systems with comparative analysis of off-grid hybrid system Loss of Power Supply Probability Loss of Load Probability. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 81, 2217–2235. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.03>
- [74] Zeraïa H, Larbès C, Ali M. Optimal operational strategy of hybrid renewable energy system for rural electrification of a remote Algeria. *Energy Proc* 2013;36:1060–9.
- [75] Rezzouk H, Mellit A. Feasibility study and sensitivity analysis of a stand-alone photovoltaic–diesel–battery hybrid energy system in the north of Algeria. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;43:1134–50.
- [76] Himri Y, Stambouli AB, Draoui B, Himri S. Techno-economical study of hybrid power system for a remote village in Algeria. *Energy* 2008;33:1128–36.
- [77] S.K.A. Shezan, et al., Performance analysis of an off-grid wind-PV (photovoltaic) - diesel- battery hybrid energy system feasible for remote areas, *J. Clean. Prod.* 125 (2016) 121–132, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.014>.
- [78] H. Kim, T. Yong, Independent solar photovoltaic with Energy Storage Systems (ESS) for rural electrification in Myanmar, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 82 (2018) 1187–1194, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.037>.
- [79] Almashakbeh, A. S., A. A. Arfoa, and E. S. Hrayshat. 2019. Techno-economic evaluation of an off-grid hybrid PV-wind-diesel-battery system with various scenarios of system’s renewable energy fraction. *Energy Sources Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* 1–24. doi:10.1080/15567036.2019.1673515.
- [80] L. Lozano, E.M. Querikiol, M.L.S. Abundo, L.M. Bellotindos, Techno-economic analysis of a cost-effective power generation system for off-grid island communities: a case study of Gilutongan Island, Cordova, Cebu, Philippines, *Renew. Energy* 140 (9513) (2019) 905–911, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.124>.
- [81] Li, C., D. Zhou, H. Wang, Y. Lu, and D. Li. 2020. Techno-economic performance study of stand-alone wind/diesel/ battery hybrid system with different battery technologies in the cold region of China. *Energy* 192:116702. doi:10.1016/ j.energy.2019.116702.
- [82] www.mathworks.com/products/matlab/ [Online].
- [83] Aissou S, Rekioua D, Mezzai N, Rekioua T, Bacha S. Modeling and control of hybrid photovoltaic wind power system with battery storage. *Energy Convers Manage* 2015;89:615–25.

Bibliographie et Références

- [84] Saheb-Koussa D, Haddadi M, Belhamel M. Economic and technical study of a hybrid system (wind–photovoltaic–diesel) for rural electrification in Algeria. *Appl Energy* 2009;86:1024–30.
- [85] Rehman S, Mahbub A, Meyer JP, Al-Hadhrami LM. Feasibility study of a wind– PV– diesel hybrid power system for a village. *Renewable Energy* 2012;38(1):258–68.
- [86] Daud A-K, Ismail MS. Design of isolated hybrid systems minimizing costs and pollutant emissions. *Renewable Energy* 2012;44:215–24.
- [87] Colantoni A, Allegrini E, Boubaker K, Longo L, Giacinto LD, Biondi P. New insights for renewable energy hybrid photovoltaic/wind installations in Tunisia through a mathematical model. *Energy Convers Manage* 2013;75:398–401.
- [88] Kumar US, Manoharan PS. Economic analysis of hybrid power systems (PV/diesel) in different climatic zones of Tamil Nadu. *Energy Convers Manage* 2014;80:469–76.
- [89] Hafez O, Bhattacharya K. Optimal planning and design of a renewable energy based supply system for microgrids. *Renew Energy* 2012;45:7–15.
- [90] Akms I, Rahman MM, Mondal M, Alam F. Hybrid energy system for St. Martin Island, Bangladesh: an optimized model. *Proc Eng* 2012;49:179–88.
- [91] Hoque MM, Bhuiyan I, Ahmed R, Farooque AA, sesign A. Analysis and performance study of a hybrid PV–diesel–wind system for a village Goplal Nagar in Comilla. *Global J Sci Frontier Res Phys Space Sci* 2012;12:13–7.
- [92] Lal S, Raturi A. Techno-economic analysis of a hybrid mini-grid system for Fiji islands. *Int J Energy Environ Eng* 2012;3:1–10.
- [93] Khelif A, Talha A, Belhamel A, Hadj-Arab A. Feasibility study of hybrid Diesel– PV power plants in the southern of Algeria: case study on AFRA power plant. *Electrical Power Energy Syst* 2012;43:546–53.
- [94] Ding, Z., et al., Performance analysis of a wind-solar-hybrid power generation system. *Energy Conversion and Management*, 2019. 181: p. 223-234.
- [95] J. L. Bemal-Agustin and R. Dufo-Lapez, "Simulation and optimization of standalone hybrid renewable energy systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, pp. 2111 - 2118, 2009. doi: 10.1016/j.rser.2009.01.010
- [96] B. Durlinger, A. Reinders, M. Toxopeus, A comparative life cycle analysis of low power PV lighting products for rural areas in South East Asia, *Renew. Energy* 41 (2012) 96–104, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.10.006>.
- [97] P. Bajpai and V. Dash, "Hybrid renewable energy systems for power generation in stand-alone applications: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 5, pp. 2926-2939, 2012. doi: 10.1016/j.rser.2012.02.009
- [98] M. A. Sendhil, S. Balasubramanian, and G. Arunkumar, "Current Status of Research on Hybrid Power Generation Systems," *Res. 1. Appl. Sei. Eng. Technol.*, vol. 8, no. 14, pp. 1684-1690, 2014.
- [99] Paul, S., T. Schirmer, K. Kairies, H. Axelsen, and D. Uwe. 2017. Comparison of off-grid power supply systems using lead-acid and lithium-ion batteries. *Solar Energy* 162:140–52. doi:10.1016/j.solener.2017.12.049, December.

Bibliographie et Références

- [100] C.D. Rodríguez-Gallegos, O. Gandhi, M. Bieri, T. Reindl, S.K. Panda, A diesel replacement strategy for off-grid systems based on progressive introduction of PV and batteries: an Indonesian case study, *Appl. Energy* 229 (2018) 1218–1232, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.019> no. April.
- [101] S. Kohsri, A. Meechai, C. Prapainainar, Chemical engineering research and design design and preliminary operation of a hybrid syngas / solar PV / battery power system for off-grid applications : a case study in Thailand, *Chem. Eng. Res. Des.* 131 (2018) 346–361, <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.01.003>.
- [102] Tutkun, N., N. Çelebi, and N. Bozok. Optimum unit sizing of wind-PV-battery system components in a typical residential home. in 2016 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC). 2016.
- [103] Sinha S, Chandel SS. Review of recent trends in optimization techniques for solar photovoltaic–wind based hybrid energy systems. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;50:755–69.
- [104] Mahesh A, Sandhu KS. Hybrid wind/photovoltaic energy system developments: Critical review and findings. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;52:1135–47.
- [105] Upadhyay S, Sharma MP. A review on configurations, control and sizing methodologies of hybrid energy systems. *Renew Sustain Energy Rev* 2014;38:47–63.
- [106] Fadaee M, Radzi MAM. Multi-objective optimization of a stand-alone hybrid renewable energy system by using evolutionary algorithms: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2012;16:3364–9.
- [107] M.D.A. Al-falahi et al. A review on recent size optimization methodologies for standalone solar and wind hybrid renewable energy system. *Energy Conversion and Management* 2017; 143: 252–274.
- [108] Bahramara, S., Moghaddam, M.P., Haghifam, M.R.: Optimal planning of hybrid renewable energy systems using HOMER: a review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 62, 609–620 (2016). <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.05.039>
- [109] Dogahe, S.A., Javaran, E.J., Abdolzadeh, M.: Energy and economic analysis of photovoltaic, concentrating photovoltaic, and combined concentrating photovoltaic/thermal-organic rankine cycle power plants in Iran. *Environ. Prog. Sustain. Energy* 41, e13763 (2022). <https://doi.org/10.1002/EP.13763>
- [110] Dogahe, S.A., Javaran, E.J., Abdolzadeh, M.: Energy and economic analysis of photovoltaic, concentrating photovoltaic, and combined concentrating photovoltaic/thermal-organic rankine cycle power plants in Iran. *Environ. Prog. Sustain. Energy* 41, e13763 (2022). <https://doi.org/10.1002/EP.13763>.
- [111] Djamai M, Merzouk NK (2011) Wind farm feasibility study and site selection in Adrar, Algeria. *Energy Procedia* 6:136–142. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.05.016>
- [112] <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen>.
- [113] A. Singh, P. Baredar, B. Gupta, Techno-economic feasibility analysis of hydrogen fuel cell and solar photovoltaic hybrid renewable energy system for academic research building, *Energy Convers. Manag.* 145 (2017) 398–414.

Bibliographie et Références

- [114] Yun Wang, Qinghua Hu, Linhao Li, Aoife M.Foley, Dipti Srinivasan, Approaches to wind power curve modeling: A review 1129 and discussion, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 116, December 2019, 109422, 1130.
- [115] A. Singho Boly & al, “Energy Management Strategies for PV/Diesel Hybrid Systems in Remote Areas: Effects of Flexy Energy Strateg”, *International Journal Of Renewable Energy Research*, Vol.11, No.1, March, 2021.
- [116] B.K. Das, Optimal sizing of stand-alone and grid-connected solar pv systems in Bangladesh, *Int. J. Energy a Clean Environ. (IJECE)* 21 (2) (2020).
- [117] M.A.V. Rad, et al., A comprehensive study of techno-economic and environmental features of different solar tracking systems for residential photovoltaic installations, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 129 (2020) 109923.
- [118] R. Arya, Economic and reliability evaluation of hybrid photovoltaic energy systems for rural electrification, *Int. J. Renew. Energy Resour.* 9 (1) (2019) 515–524.
- [119] O.D.T. Odou, R. Bhandari, R. Adamou, Hybrid Off-Grid Renewable Power System for Sustainable Rural Electrification in Benin, *Renewable Energy*, 2019.
- [120] C. Li, et al., Feasibility assessment of a hybrid PV/diesel/battery power system for a housing estate in the severe cold zone—a case study of Harbin, China. *Energy* 185 (2019) 671–681.
- [121] S. Rashid, et al., Optimized design of a hybrid PV-wind-diesel energy system for sustainable development at coastal areas in Bangladesh, *Environ. Prog. Sustain. Energy* 36 (1) (2017) 297–304.
- [122] M. Hossain, S. Mekhilef, L. Olatomiwa, Performance evaluation of a stand-alone PV-wind-diesel-battery hybrid system feasible for a large resort center in South China Sea, Malaysia, *Sustainable Cities and Society* 28 (2017) 358–366.
- [123] M.J. Khan, A.K. Yadav, L. Mathew, Techno economic feasibility analysis of different combinations of PV-Wind-Diesel-Battery hybrid system for telecommunication applications in different cities of Punjab, India, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 76 (2017) 577–607.
- [124] F. Benyarou “ Conception assistée par ordinateur des systèmes photovoltaïques modélisation, dimensionnement et simulation ”, Thèse de Doctorat d’état. Université de Tlemcen Juillet 2004.
- [125] O. GERGAUD, “Modélisation énergétique et optimisation économique d’un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », thèse de doctorat, l’ENS de Cachan France, p 6, 2002.
- [126] A. Ricaud, *Photopiles solaires : de la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés*, 1ère ed. Lausanne, Suisse: Presses polytechniques et universitaires romandes, 1997.
- [127] N. Mohsen, B. Martin, and T. Stefan, “Optimization of unit commitment and economic dispatch in microgrids based on genetic algorithm and mixed integer linear programming,” *Applied Energy*, vol. 210, pp. 944–963, 2018.
- [128] Markvard T. *Solar electricity*. 2ed ed. USA. Willey; 2000.

Bibliographie et Références

- [129] Skoplaki, E.; Palyvos, J.A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Sol. Energy* 2009, 83, 614–624.
- [130] H. Hou, M. Y. Xue, Y. Xu et al., “Multi-objective economic dispatch of a microgrid considering electric vehicle and transferable load,” *Applied Energy*, vol. 262, Article ID 114489, 2020.
- [131] Manwell JF, McGowan JG, Rogers AL (2009) *Wind energy explained: Theory, design and application* (2nd edn). Wiley, USA. p. 704.
- [132] Hongxing Y, Lu L, Wei Z. A novel optimization sizing model for hybrid solar wind power generation system. *Sol Energy* 2007;81:7684.
- [133] Lu L, Yang H, Burnett J. Investigation on wind power potential on Hong Kong Islands an analysis of wind power and wind turbine characteristics. *Renewable Energy* 2002;27:1–12.
- [134] Akpinar K, Akpinar S. An assessment on seasonal analysis of wind energy characteristics and wind turbine characteristics. *Energy Convers Manage* 2005; 146:848–186.
- [135] BOGDAN S.B., SALAMEH Z.M., « methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and pv array in a wind/pv hybrid system », *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 11, n°2, pages 367-375, juin 1996.
- [136] AI B., YANG H., SHEN H., LIAO X., « computer-aided design of pv/wind hybrid system », *Renewable Energy*, vol. 28, n°10, pages 1491-1512, août 2003.
- [137] B. Borowy et Z. Salameh, «Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and pv array in wind/pv hybrid system,» *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 12, n° 1, pp. 367-375, 1996.
- [138] MARKVART T., Castañer L., MCEVOY A., « practical handbook of photovoltaic fundamentals and applications », second edition, academic press, 2012.
- [139] R. Luna-Rubio, M. Trejo-Perea, D. Vargas-Vazquez, and G. J. Rios-Moreno, “Optimal sizing of renewable hybrids energy systems: a review of methodologies,” *Solar Energy*, vol. 86, no. 4, pp. 1077–1088, 2012.
- [140] H. Yang, W. Zhou, L. Lu, and Z. Fang, “Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar-wind system with LPSP technology by using genetic algorithm,” *Solar Energy*, vol. 82, no. 4, pp. 354–367, 2008.
- [141] Jung, C., and S. Dirk. 2019. The role of air density in wind energy assessment – A case study from Germany. *Energy* 171:385–92. doi:10.1016/j.energy.2019.01.041.
- [142] Moran M.S., Shapiro H. N., *Fundamentals of engineering thermodynamics*, John Willey & sons inc. USA, 1988.
- [143] Cengel YA, Boles MA. *Thermodynamics an engineering approach*. 5th ed. Izmir: Guven Bilimsel; 2008.
- [144] Dincer I, Rosen MA. Thermodynamics aspects of renewables and sustainable development. *Renew Sustain Energy Rev* 2005;9(2):169e89.

Bibliographie et Références

- [145] Calderon M, Calderon AJ, Ramiro A, Gonzalez JF, Gonzalez I. Evaluation of a hybrid photovoltaic-wind system with hydrogen storage performance using exergy analysis. *Int J Hydrogen Energy* 2011;36(10):5751e62.
- [146] Cengel, Y.A., Boles, M.A., 2011. *Thermodynamics an Engineering Approach*, 7th ed. McGraw-Hill, New York
- [147] Dincer I, Rossen MA. *Exergy, energy, environment and sustainable development*. 2nd ed. Burlington, Massachusetts: Elsevier Science; 2012.
- [148] Y. A. Cengel and M. A. Boles, *Thermodynamics An Engineering Approach*, 4th ed. New York: McGraw Hill, 2002.
- [149] Dincer I, Midili A, Kucuk Moran, M.J., Shapiro, H.N., Boettner, D.D., Bailey, M.B., 2011. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, 7 ed. Wiley.
- [150] Y.A. Cengel, M.A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 6th edn. (Tata McGRAW Hill Companies, New Delhi, 2009)
- [151] E. SALOUX. *Optimisation structurelle des systèmes énergétiques*. Département de génie physique, thèse doctorat, école polytechnique de Montréal, 2014.
- [152] Kotas T.J., *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*. 2nd Ed., Krieger Publish in Company, Malabar, Florida, USA, 1995.
- [153] Szargut, J., Morris, D.R., Steward, F.R., *Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes*, Hemisphere Publishing Corporation, 1988.
- [154] Simpson A.P., Lutz A.E., *Exergy analysis of hydrogen production via steam methane reforming*, *Int. J. Hydrogen Energy*, 2007, 32, pp. 4811-4820.
- [155] M. Canakci and M. Hosoz, "Energy and exergy analyses of a diesel engine fuelled with various biodiesels," *Energy Sources B: Economics, Planning and Policy*, vol. 1, no. 4, pp. 379–394, 2006.
- [156] Eda Cetinkaya ,*Experimental Investigation and Modeling of Integrated Tri-generation Systems* ,Mechanical Engineering Program ,University of Ontario Institute of Technology Oshawa, Canada Thesis,2013.
- [157] M. Kopac, L. Kokturk, *Determination of optimum speed of an internal combustion engine by exergy analysis*. *Int. J. Exergy* 2(1), 44–54 (2005)
- [158] C.D. Rakopoulos, E.G. Giakoumis, *Second-law analyses applied to internal combustion engines operation*. *Prog. Energy Combust. Sci.* 32, 2–47 (2006)
- [159] Szargut, J., Styrylska, T., 1964. *Approximate evaluation of the exergy of fuels*. *Brennst.Wärme Kraft* 16, 589-596.
- [160] BARLEY, C. D. et WINN, C. B. (1996). *Optimal dispatch strategy in remote hybrid power systems*. *Solar Energy*, 58, 165 – 179. *Selected Proceedings of the ISES 1995 : Solar World Congress. Part II*.
- [161] HOMER (2011). *Getting started*. National renewable energy laboratory.
- [162] Rezvanpour, M.; Borooghani, D.; Torabi, F.; Pazoki, M. *Using CaCl₂ ·6H₂O as a phase change material for thermo-regulation and enhancing photovoltaic panels' conversion efficiency: Experimental study and TRNSYS validation*. *Renew. Energy* 2020, 146, 1907–1921.

Bibliographie et Références

- [163] PraveenKumar, S.; Agyekum, E.B.; Alwan, N.T.; Velkin, I.; Yaqoob, S.J.; Adebayo, T.S. Thermal Management of Solar Photovoltaic Module to Enhance Output Performance: An Experimental Passive Cooling Approach Using Discontinuous Aluminium Heat Sink. *Int. J. Renew. Energy Res.* 2021, 11, 1700–1712
- [164] Agyekum, E.B.; PraveenKumar, S.; Alwan, N.T.; Velkin, V.I.; Adebayo, T.S. Experimental Study on Performance Enhancement of a Photovoltaic Module Using a Combination of Phase Change Material and Aluminum Fins—Exergy, Energy and Economic (3E) Analysis. *Inventions* 2021, 6, 69.
- [165] Xydis G, On the exergetic capacity factor of a wind – Solar power generation system, *Journal of Cleaner Production* (2012), doi: 10.1016/j.jclepro.2012.07.014.
- [166] R. Petela, Exergy of undiluted thermal radiation, *Solar Energy*, 74, (2003), 469-488.
- [167] R. Petela, An approach to the exergy analysis of photosynthesis, *Solar Energy*, 82, 2008, 311-328.
- [168] Calderon M, Calder on AJ, Ramiro A, Gonz alez JF, Gonz alez I. Evaluation of a hybrid photovoltaic-wind system with hydrogen storage performance using exergy analysis. *Int J Hydrogen Energy* 2011;36(10):5751e62.
- [169] Joshi AS, Dincer I, Reddy BV. Thermodynamic assessment of photovoltaic systems. *Sol Energy* 2009;83(8):1139e49.
- [170] T. Ackermann, *Wind Power in Power Systems*. 2005.
- [171] Diyoke, Chidiebere. (2019). A new approximate capacity factor method for matching wind turbines to a site: case study of Humber region, UK. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 1–12. <https://doi.org/10.1007/s40095-019-00320-5>.
- [172] Diyoke, C. (2020) Comparative Thermo-Economic and Advanced Exergy Performance Assessment of Wind Energy for Distributed Generation in Four Sites in Nigeria. *International Journal of Renewable Energy Development*, 9(3), 339-351 <https://doi.org/10.14710/ijred.9.3.339-351>.
- [173] Samira Louassa, Ouahiba Guerri, Abdelhamid Kaabeche & Nouredine Yassaa (2019): Effects of local ambient air temperatures on wind park performance: case of the Kaberten wind park, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, DOI: 10.1080/15567036.2019.1673509.
- [174] Dahmouni, A., M. Salah, F. Askri, C. Kerkeni, and S. Nasrallah. 2011. Assessment of wind energy potential and optimal electricity generation in Borj-Cedria, Tunisia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15:815–20. doi:10.1016/j.rser.2010.07.020
- [175] Nabnit Panigrahi Mohanty and all, Energy and Exergy Analysis of a Diesel Engine Fuelled with Diesel and Simarouba Biodiesel Blends . *J. Inst. Eng. India Ser. C* DOI 10.1007/s40032-016-0335-9Prog. 271 (2016).
- [176] ICF analysis based on typical fuel consumption of diesel generators available at www.dieselserviceandsupply.com/Diesel_Fuel_Consumption.aspx.
- [177] Krohn, S., P.-E. Morthorst, et S. Awerbuch. 2009. L'économie de l'énergie éolienne. Rapport technique de l'European Wind Energy Association.

Bibliographie et Références

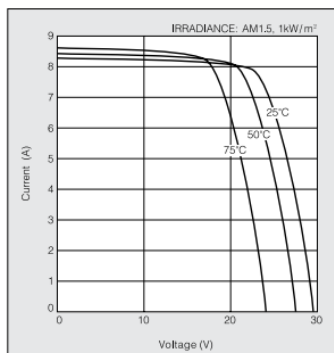
- [178] Lu, J.X., Wang, W.J., Zhang, Y.C., Ye, S. (2017). Techno-economic feasibility of PV-wind-diesel-battery hybrid energy system in a remote island in the south China sea. Modelling, Measurement and Control A, Vol. 90, No. 2, pp. 161-180. https://doi.org/10.18280/mmc_a.900204.
- [179] Eda Cetinkaya ,Experimental Investigation and Modeling of Integrated Tri-generation Systems , Mechanical Engineering Program ,University of Ontario Institute of Technology Oshawa, Canada Thesis,2013.

Annexes

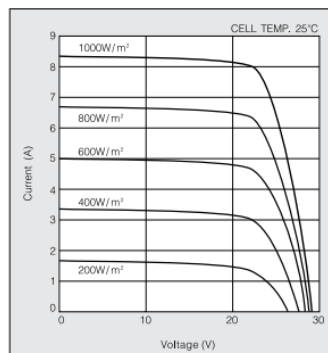
Annexe A : Données du constructeur pour module photovoltaïque : KD180-LP

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Current-Voltage characteristics of Photovoltaic Module KD180GX-LP at various cell temperatures



Current-Voltage characteristics of Photovoltaic Module KD180GX-LP at various irradiance levels



Annexe B : Données constructeurs pour l'onduleur photovoltaïque : Sunny Mini Central 6000 A

Entrée (DC)	Puissance DC max.	6300 W
	Tension DC max.	600 V
	Plage de tension PV, MPPT	246 V – 480 V
	Courant d'entrée max.	26 A
	Nombre de trackers MPP	1
	Nombre max. de strings (parallèle)	4
Sortie (AC)	Puissance AC nominale	6000 W
	Puissance AC max.	6000 W
	Courant de sortie max.	26 A
	Tension nominale AC / plage	220 V – 240 V / 180 V – 260 V
	Fréquence du réseau AC (autoréglable) / plage	50 Hz / 60 Hz / ± 4,5 Hz
	Facteur de puissance (cos φ)	1
	Raccordement AC	monophasé
Rendement	Rendement max. / Euro ETA	96,1% / 95,2 %
Caractéristiques générales	Dimensions (l / h / p) en mm	468 / 613 / 242
	Poids	63 kg
	Plage de température de fonctionnement	-25 °C ... +60 °C
	Autoconsommation : service (veille) / nuit	< 7 W / 0,25 W

Annexe C: Données constructeurs pour l'onduleur pour la turbine: WB6000 (SMA Windy Boy)

Caractéristique		Valeurs
Valeurs d'entrée	Tension max. DC	600 V
	Plage de variation de tension	246 ... 600 V
	Tension DC nominal	270 V
	Puissance recommandée du générateur à 2500 heures/ans (en pleine charge)	5400 W
	Puissance recommandée du générateur à 5000 heures/ans (en pleine charge)	4800 W
	Courant max. (Imax)	26 A
	Autoconsommation	< 7 W
	Variation du courant DC délivré (précision)	< 10 %
Valeurs de sortie	Puissance max. AC à la sortie	6000 W
	Puissance nominale	6000 W
	Consommation en mode veille	0,25 W
	Détection automatique 50/60 Hz	Oui
Rendement	Rendement max. / Euro ETA	96,1%/95,2 %
Conditions ambiantes	Plage de températures	-25°C ... 60°C
	Humidité relative permise	0...100 %
Montage		Intérieur/Extérieur
Type de refroidissement		OptiCool
Dimensions (w x h x d) mm		468 x 613 x 242
Poids		63 kg
Compatible avec les convertisseurs Sunny Island		Oui

Annexe D : Données constructeurs pour le convertisseur Sunny Island 5048.

Désignation	Symbole	Valeur/unité
Valeurs de sortie		
Tension nominale AC (réglable)	$U_{AC, nom}$	230 V (202 – 253 V)
Fréquence nominale (réglable)	f	50 Hz (45 – 65 Hz)
Puissance continue AC à 25 °C	P_{nom}	5000 W
Puissance continue AC à 45 °C	P_{nom}	4000 W
Puissance AC pour 30 min à 25 °C	P_{30}	6500 W
Puissance AC pour 5 min à 25 °C	P_5	7200 W
Puissance AC pour 1 min à 25 °C	P_1	8400 W
Courant nominal AC	$I_{AC nom}$	21,7 A
Courant max. (valeur crête / valeur effective)		120 A (env. 60 ms) / 52 A (3 s)
Facteur de déphasage	$\cos \varphi$	de -1 à +1
Valeurs d'entrée		
Tension nominale (plage)	$U_{AC, ext}$	230 V (172,5 – 250 V)
Fréquence	f_{ext}	50 Hz (40 – 70 Hz)
Courant AC max.	$I_{AC, ext}$	56 A (2 – 56 A)
Puissance continue max.	$P_{AC, ext}$	12,8 kW
Caractéristiques de la batterie		
Tension de la batterie (plage)	$U_{Bat, nom}$	48 V (41 – 63 V)
Int. de charge max. batterie	$I_{Bat, max}$	120 A
Courant de charge continu	$I_{Bat, nom}$	100 A
Capacité de la batterie	C_{Bat}	100 – 10000 Ah
Rendement max. (typique)	η_{max}	95 %
Largeur x hauteur x profondeur en mm / Poids en kg		467 x 612 x 235/ env. 63 kg
Température ambiante (service)		-25 °C ... +50 °C

Annexe E : Données constructeurs pour le générateur diesel.

Diesel Engine			
Manufacturer		PERKINS	
Origin		UK	
Model		404C-22G	
Governor type (standard)		Mechanical	
Speed	rpm	1500	
Net stand-by power	kW	20.4	
Net prime power	kW	18.5	
Cylinder number and configuration		line	
Bore/stroke	mm	84/100	
Displacement	Litre	2.21	
Aspiration		Naturally aspirated	
Cooling		Water cooled	
Electrical system (DC)	V	12	
Fuel consumption	Litre/h	100% load	5.4
		75 % load	4.0
		50% load	2.9
		25% load	2.27
Lubrication oil capacity	Litre	10.6	
Coolant capacity with radiator	Litre	6.98	

Automatic control panel	
Instrumentation	<ul style="list-style-type: none"> • Generating set voltage • Generating set frequency • Generator set current • voltage. • Hours-counter. • Mains voltage.
Commands	<ul style="list-style-type: none"> • Selector switch with six positions: Automatic test - Automatic starting – Engine locked - Mains contactor forced - Manual starting - Genset contactor forced • Push-buttons: start/stop, up/down selection, reset • Emergency stop button • Remote starting availability • Automatic battery charger
Protections with Alarm	<ul style="list-style-type: none"> • Engine protection: low oil pressure, high engine temperature • Genset protection: under/over voltage, overload, battery charger failure, battery voltage out of limits, under/over frequency, start failure
Protections with shutdown	<ul style="list-style-type: none"> • Engine protection: low oil pressure, high engine temperature • Genset protection: under/over voltage, overload, battery charger failure, battery voltage out of limits, under/over frequency, start failure. • Circuit breaker protection: III poles • Differential protection
Output and Sockets	<ul style="list-style-type: none"> • Plinth row for connection from ACP to LTS panel. <p style="margin-left: 20px;">1 x 400V/32A 3P+N+T CE</p>
Alternator	
Manufacturer	
origin	Austria
model	
insulation class	H

Mechanical degree of protection type	IP23
Voltage regulation type	Compound
Number of Bearings	single
Leads number	12
voltage	
Voltage regulation accuracy	+ - 1 %
Excitation System	Brushless
Connection	star

Annexe F : Données pour la classification du potentiel (solaire et éolien) [178].

Tab.1. Solar Power Classification.

Solar power class	Potential	Total solar irradiation (kWh/m ² /year)
1	Very good	>1850
2	Good	1750-1850
3	Fair	1400-1750
4	Poor	<1400

Tab.3. Wind Power Classification at 10m Above the Surface.

Wind power class	Potential	Wind power density (W/m ²)	Annual average wind speed (m/s)
1	Poor	<100	4.4
2	Marginal	100-150	5.1
3	Moderate	150-200	5.6
4	Good	200-250	6
5	Excellent	250-300	6.4
6	Excellent	300-400	7

Annexe H : Données pour le calcul d'exergie du génératrice diesel (Enthalpie de formation, entropie, énergie de Gibbs, et exergie chimique) pour les alcanes produits par le système Fischer Tropsch [179].

M molecular mass (kg/kmol)

$\Delta_f H^0$ formation enthalpy (kJ/mol)

Formation entropy: $\Delta_f S^0 = s^0 - \sum_{elements} \nu s_{f,element}^0$ (J/mol K), where ν is the number of moles of the element in chemical equation of formation of the substance

Gibbs free energy of formation: $\Delta_f G^0 = \Delta_f H^0 - T_0 \Delta_f S^0$ (kJ/mol)

Chemical exergy: $ex^{ch} = \Delta_f G^0 + \sum_{elements} \nu \times ex_{element}^{ch}$ (kJ/mol)

Reference temperature: $T_0=298.15$ K

Reference pressure: $P_0=1$ bar; superscript 0 in above notations refers to standard pressure

Carbon Number	Substance Name	Chemical Formula	M	$\Delta_f H^0$	$\Delta_f S^0$	$\Delta_f G^0$	ex^{ch}
1	methane	CH ₄	16	-74.595	186	-50.529	832
2	ethane	C ₂ H ₆	30	-83.846	229	-31.885	1497
3	propane	C ₃ H ₈	44	-104.674	270	-24.294	2151
4	n-butane	C ₄ H ₁₀	58	-125.782	310	-16.529	2805
5	n-pentane	C ₅ H ₁₂	72	-146.751	350	-8.658	3459
6	n-hexane	C ₆ H ₁₄	86	-166.910	389	0.140	4115
7	n-heptane	C ₇ H ₁₆	100	-187.768	428	8.252	4769
8	n-octane	C ₈ H ₁₈	114	-208.737	423	14.184	5421
9	n-nonane	C ₉ H ₂₀	128	-229.632	448	22.639	6076
10	n-decane	C ₁₀ H ₂₂	142	-250.546	465	30.303	6730
11	n-undecane	C ₁₁ H ₂₄	156	-271.459	482	37.967	7384
12	n-dodecane	C ₁₂ H ₂₆	170	-292.373	499	45.630	8038
13	n-tridecane	C ₁₃ H ₂₈	184	-313.286	516	53.294	8692
14	n-tetradecane	C ₁₄ H ₃₀	198	-334.200	533	60.958	9346
15	n-pentadecane	C ₁₅ H ₃₂	212	-355.113	551	68.622	10000
16	n-hexadecane	C ₁₆ H ₃₄	226	-376.027	568	76.286	10654
17	n-heptadecane	C ₁₇ H ₃₆	240	-396.940	585	83.950	11308
18	n-octadecane	C ₁₈ H ₃₈	254	-417.854	602	91.613	11962
19	n-nonadecane	C ₁₉ H ₄₀	268	-438.767	619	99.277	12616
20	n-eicosane	C ₂₀ H ₄₂	282	-459.681	636	106.941	13270
21	n-henicosane	C ₂₁ H ₄₄	296	-480.594	653	114.605	13924
22	n-docosane	C ₂₂ H ₄₆	310	-501.508	671	122.269	14578
23	n-tricosane	C ₂₃ H ₄₈	324	-522.421	688	129.933	15232
24	n-tetracosane	C ₂₄ H ₅₀	338	-543.335	705	137.596	15886
25	n-pentacosane	C ₂₅ H ₅₂	352	-564.248	722	145.260	16540
26	n-hexacosane	C ₂₆ H ₅₄	366	-585.162	739	152.924	17194

Résumé

L'objectif principal de cette thèse est le dimensionnement et l'étude de la gestion des flux énergétiques et l'évaluation des performances énergétique et exégétique dans un système hybride PV-éolien-Diesel-Batterie. Tout d'abord, le système hybride proposé a été optimisé à l'aide du logiciel HOMER. Dans la deuxième étape, un modèle mathématique a été développé pour assurer une gestion efficace de l'énergie sur la base de différentes stratégies d'exploitation pour un fonctionnement global du système. L'analyse a montré que le système d'énergie renouvelable (PV-éolien) est capable de fournir environ 70 % de la demande. L'énergie éolienne occupe la première place avec 43% de la production totale annuelle d'électricité, suivi par le générateur diesel (avec 31%) tandis que la fraction restante est attribuée aux panneaux PV, en outre les résultats des analyses d'énergies et d'exergies ont donné les moyennes annuelles d'énergie et d'exergie du générateur photovoltaïque qui sont de 11,23% et de 12,10% respectivement. De même, les valeurs d'efficacité sont calculées pour l'éolienne, elle est de 41,41% pour l'énergie et 34,60% pour l'exergie, pour le générateur diesel à 34,38 % pour l'énergie et 32,14 % pour l'exergie, respectivement. Le système répond efficacement à la demande en énergie avec une performance optimale et un investissement minimal. Le coût net actuel et le coût de l'énergie de la configuration proposée sont 250794 \$ et 0,22 \$/kWh, respectivement.

Mots – clés : Systèmes Hybrides, Modélisation, Simulation, Electricité, PV, Eolienne, Générateur Diesel, sites isolés.

Abstract

The main objective of this thesis is the dimensioning and study of the energy flow management and the evaluation of the energy and exergy performances in a PV-wind-Diesel-Battery hybrid system. First of all, the proposed hybrid system has been optimized using HOMER software. The goal was to maximize the use of renewable electricity and save fuel while limiting the cost of the installation. In the second step, a mathematical model was developed to ensure efficient energy management based on different operating strategies for overall system operation. The analysis showed that the renewable energy system (PV-wind) is able to supply about 70% of the demand. The wind power occupies the first place with 43% of the total annual electricity production, followed by the diesel generator (with 31%) while the remaining fraction is attributed to the PV panels. In addition the results of the energy and exergy analysis, gave the annual energy and exergy averages of the PV generator are 11.23% and 12.10% respectively. Similarly, the efficiency values are calculated for the wind turbine at 41.41% for energy and 34.60% for exergy and for the diesel generator at 34.38% for energy and 32.14% for exergy, respectively. The system efficiently meets the energy demand with optimal performance and minimal investment. The current net cost and energy cost of the proposed configuration are \$250794 and \$0.22/kWh, respectively.

Keywords : Hybrid systems, Modelling, Simulation, Electricity, PV, Wind, Diesel generator, remote site.

الملخص

الهدف الرئيسي من هذه الأطروحة هو تحديد أبعاد ودراسة إدارة تدفق الطاقة وتقييم أداء الطاقة والطاقة الخارجية في نظام هجين من الطاقة الكهروضوئية والرياح والديزل والبطارية.

أولاً تم ، تحسين النظام الهجين المقترح باستخدام برنامج HO MER .

في المرحلة الثانية، تم تطوير نموذج رياضي لضمان الإدارة الفعالة للطاقة استناداً إلى استراتيجيات تشغيل مختلفة لتشغيل النظام بشكل عام. وأظهر التحليل أن نظام الطاقة المتجددة (الطاقة الكهروضوئية - طاقة الرياح) قادر على توفير حوالي 70% من الطلب. تحتل طاقة الرياح المرتبة الأولى بنسبة 43% من إجمالي الإنتاج السنوي للكهرباء، يليها مولد الديزل (بنسبة 31%) بينما يُعزى الجزء المتبقي إلى الألواح الكهروضوئية. بالإضافة إلى ذلك، أعطت نتائج تحليلات الطاقة والطاقة الطارئة متوسطات الطاقة والطاقة الطارئة السنوية للمولد الكهروضوئي بنسبة 11.23% و 12.10% على التوالي. وبالمثل، حُسبت قيم الكفاءة لتوربينات الرياح بنسبة 41.41% للطاقة و 34.60% للطاقة الخارجية، ولمولد الديزل بنسبة 34.38% للطاقة و 32.14% للطاقة الخارجية على التوالي. يلبي النظام الطلب على الطاقة بكفاءة مع أداء مثالي وأقل قدر من الاستثمار. يبلغ صافي التكلفة الحالية وتكلفة الطاقة للتكوين المقترح 250794 دولارًا أمريكيًا و 0.22 دولارًا أمريكيًا/كيلووات ساعة، على التوالي .

الكلمات المفتاحية: الأنظمة الهجينة، النمذجة، المحاكاة، الكهرباء، الطاقة الكهروضوئية، طاقة الرياح، مولدات الديزل، المواقع النائية