

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



## UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS - SETIF1

### FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

### THÈSE

Présentée au Département d'électrotechnique

Pour l'obtention du diplôme de

### DOCTORAT

Domaine : Sciences et Technologie

Filière: Automatique

Option: sûreté de fonctionnement  
des processus industriels

Par

**CHERMAT Fayçal**

### THÈME

# Optimisation économique d'un système de production d'énergie photovoltaïque associé à un système de stockage d'énergie

Soutenue le 23/09/2019 devant le Jury:

MOSTEFAI Mohammed	Professeur Univ. Ferhat Abbas Sétif 1	Président
KHEMLICHE Mabrouk	Professeur Univ. Ferhat Abbas Sétif 1	Directeur de thèse
CHENNI Rachid	Professeur Univ. Frères Mentouri Constantine 1	Examinateur
CHOUDER Aissa	Professeur Univ. Mohamed Boudiaf-M'SILA	Examinateur
SARI Bilal	M.C.A. Univ. Ferhat Abbas Sétif 1	Examinateur

## *Remerciements*

Je suis reconnaissant à l'Université Ferhat Abbas de Sétif (**UFAS1**) de m'avoir donné la possibilité de suivre un programme de doctorat, dans le cadre d'un projet national de recherche **CNEPRU**. Sans ce programme, je n'aurais pas eu l'occasion d'être un membre du Laboratoire d'Automatique de Sétif (**L.A.S.**).

Je voudrais exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de thèse, Professeur **Mabrouk KHEMLICHE** pour cet honneur d'avoir travaillé sous sa direction depuis le projet de mon Doctorat. J'apprécie toutes ses contributions en termes de temps, d'idées et de conseils pour rendre ma recherche plus productive et tirer la meilleure partie de moi pour devenir un chercheur.

Mes remerciements les plus sincères à M<sup>me</sup> **Samia LARECHE**, pour son aide et son soutien précieux pendant le temps de ce travail, ainsi que sa méthode de me faire pousser toujours vers le haut, je n'ai jamais senti devant elle, que je parle avec une enseignante mais plutôt une Maman.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à Monsieur **Mohamed MOSTEFAI**, Professeur à l'université de Sétif, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury.

Je remercie également tous les membres du jury : Monsieur **Rachid CHENNI**, Professeur de l'université des frères Mentouri de Constantine, Monsieur **Aissa CHOUDER**, Professeur de l'université Mohamed Boudiaf de M'sila, et Monsieur **Bilal SARI** Docteur de l'université de Sétif pour m'avoir fait l'honneur d'examiner cette thèse. Qu'ils trouvent ici l'expression de mon profond respect.

Un grand merci au Professeur **Adrian ILINCA** de l'Université de Québec à Rimouski (**UQAR**), et tous les membres du Laboratoire de Recherche en Energie Eolienne (**LREE**) pour leur chaleureux accueil, leurs conseils qui ont été fructueuses pour ce travail.

## Dédicace

Mes sincères remerciements sont pour ma **Mère** et mon **Père**.

Ma **Mère** qui m'a tellement donné d'amour. Comment décrire une femme qui a voué sa vie à mon attention, à ma protection, qui m'a élevé sans jamais se préoccuper d'elle : il n'existe pas de mots pour décrire cela. Elle m'accompagne à chacun de mes pas car elle est partie de moi-même. **Mon Père** qui s'est sacrifié toute sa vie, dans un des plus dur des métiers, pour nous donner les moyens de vivre une existence digne. Je les aime tellement et jusqu'à la fin de mes jours, ils resteront dans mon cœur comme dans ma mémoire. Pour moi ils sont une époque dorée qui resteront dans mon cœur tant qu'il me restera un souffle de vie ! MERCI pour votre soutien tout au long de ces difficiles années, m'encourageant lorsque j'en avais besoin, et en m'aidant de toutes vos forces surtout les derniers mois.

Je remercie vivement mon grand frère, mes deux sœurs et leurs petits-enfants (Youssef, Dyna, Liza, Nafaa, Rym, Kossai, Mazen et Djawad.

Finalement, je voudrais remercier mon épouse bien-aimée. Son soutien, ses encouragements, sa patience et son grand amour ont été essentiels pour moi au cours de ces merveilleuses années. Ainsi que Mon âme, ma petite fille que j'adore ! Kaouther sans oublier le petit Yahia.....!

Je dédie ce modeste travail à toute la famille **CHERMAT** partout dans le monde.

**F.CHERMAT**

## **Liste des figures**

Figure II.1. Energies renouvelables	15
Figure II.2. Moulin à eau	16
Figure II.3. Énergie solaire thermique	16
Figure II.4 Moulins à vent	17
Figure II.5. Énergie Biomasse	18
Figure II.6. Énergie géothermique	18
Figure II.7. Énergie marine marémotrice	19
Figure II.8. Production de l'hydrogène	20
Figure II.9. Classification des systèmes hybrides	24
Figure II.10. Système hybride avec connexion série	25
Figure II.11. Système hybride à commutation	26
Figure II.12. Système hybride à connexion parallèle	27
Figure II.13. Système hybride PV/Stockage	29
Figure II.14. Système hybride PV/Eolien/Stockage	31
Figure II.15. Système PV/Eolien sans stockage	31
Figure III.1. Fonctionnement d'une cellule solaire	34
Figure III.2. Effet photovoltaïque	35
Figure III.3. Type de cellules photovoltaïques	36
Figure III.4. Schéma électrique d'une cellule PV	37
Figure III.5. Cellule, module et panneau photovoltaïque	37
Figure III.6. Schéma réelle d'une cellule, d'un panneau et d'un champ PV	37
Figure III.7. Conversion de l'énergie cinétique du vent	40
Figure III.8. Différents types de turbines	40
Figure III.9. Composantes de l'aérogénérateur	41
Figure III.10. Eolienne à base d'un générateur synchrone	42
Figure III.11. Eolienne à base d'un générateur asynchrone	43
Figure III.12. Configuration du générateur Diesel	44
Figure III.13. Potentiel solaire en Algérie	46
Figure III.14. Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10m du sol	48
Figure III.15. Relation entre les aspects économique, social et environnemental	50
Figure IV.1. Chaine de conversion photovoltaïque	52
Figure IV.2. Position du soleil par rapport à la surface irradiée	53
Figure IV.3. Coordonnées horizontales du soleil	55
Figure IV.4 Radiation solaire globale sur un plan incliné	56
Figure IV.5. Schéma électrique équivalent d'une cellule PV à une diode	59
Figure IV.6. Caractéristiques des cellules PV en série	62
Figure IV.7. Caractéristiques de cellules PV en parallèle	62
Figure IV.8. Schéma électrique équivalent d'un générateur PV, modèle à une diode	63

Figure IV.9. Caractéristique I-V d'un générateur PV	63
Figure IV.10. Caractéristique I-V et P-V d'un générateur PV	64
Figure IV.11. Caractéristique idéale d'une cellule PV	65
Figure IV.12. Caractéristique I-V d'un générateur PV pour différents rayonnements	65
Figure IV.13. Caractéristique P-V d'un générateur PV pour différents rayonnements	66
Figure IV.14. Caractéristique I-V d'un générateur PV pour différentes températures	66
Figure IV.15. Caractéristique P-V d'un générateur PV pour différentes températures	67
Figure IV.16. Chaine de conversion éolienne	67
Figure IV.17. Exemple de la distribution de Weibull	68
Figure IV.18. Colonne d'air animée d'une vitesse V	69
Figure IV.19. Schéma de principe de la théorie de Betz	70
Figure IV.20. Vitesse du vent ( $V_m$ ) et vitesse tangentielle de l'aubage ( $\Omega$ ) t	71
Figure IV.21. Courbes caractéristiques des aérogénérateurs	72
Figure IV.22. Redresseur monophasé à diode	75
Figure IV.23. Schéma d'un pont de diodes	77
Figure IV.24. Schéma équivalent d'une séquence en conduction normale	77
Figure IV.25. Puissance de l'aérogénérateur en fonction de la vitesse du vent	78
Figure IV.26. Courbe de charge/ décharge d'une batterie	81
 Figure V.1 Les multicritères influençant la réalisation d'un projet	86
Figure V.2 Outils logiciels disponibles pour le dimensionnement du système hybride	88
Figure V.3 Arborescence des critères	99
Figure V.4 Organigramme de gestion de l'énergie	100
 Figure VI.1. Modèle conceptuel du logiciel HOMER	105
Figure VI.2. Organigramme du processus d'optimisation	106
Figure VI.3. Carte géographique de la wilaya de Tamanrasset	107
Figure VI.4. Consommation journalière d'électricité	108
Figure VI.5 Irradiation solaire horizontale globale pour In Salah	109
Figure VI.6 Vitesse du vent à In Salah	109
Figure VI.7. Le DG pour l'alimentation d'une maison	112
Figure VI.8 Résultats catégorisés d'optimisation pour l'alimentation par le GD	113
Figure VI.9. Récapitulatif des flux à base des coûts (1er scénario)	113
Figure VI.10. Production électrique mensuelle du DG	114
Figure VI.11. Configuration du système hybride PV/DG	114
Figure VI.12. Résultats catégorisés d'optimisation pour l'alimentation par le PV/DG	115
Figure VI.13. Production mensuelle d'électricité du système PV/DG	116
Figure VI.14. Récapitulatif des flux à base des coûts (2ème scénario)	116
Figure VI.15. Configuration d'un système hybride EOL/GD	117
Figure VI.16. Résultats catégorisés d'optimisation pour l'alimentation par EOL/GD	118
Figure VI.17. Récapitulatif des flux à base des coûts (3ème scénario)	118
Figure VI.18. Production mensuelle d'électricité du système EOL/DG	119
Figure VI.19. Configuration du système hybride PV/EOL/DG	120
Figure VI.20. Résultats catégorisés d'optimisation pour l'alimentation par	120

## EOL/PV/GD

Figure VI.21. Production mensuelle d'électricité du système EOL/PV/DG	121
Figure VI.22. Récapitulatif des flux à base des coûts (4ème scénario)	122
Figure VI.23. Répartition des coûts par scénarios	125
Figure VI.24. Efficacité de la gestion de l'énergie pour la meilleure configuration du SH	126
Figure VI.24. Système optimal pour un rayonnement solaire et une vitesse du vent fixe	127
Figure VI.25. Système optimal pour une hauteur du noyau et un prix du carburant fixe	128
Figure VI.26. Surface pour l'émission du CO2	128
 Figure VII.1 Organigramme de gestion de l'énergie	131
Figure VII.2 Production journalière du GD	138
Figure VII.3 Efficacité du programme de gestion d'énergie	139
Figure VII.4 Evolution cumulée du CO2	140

## **Liste des tableaux**

Tableau III.1. Puissance installée d'origine éolienne dans les principaux pays.	39
Tableau III.2. Répartition du potentiel solaire en Algérie.	46
Tableau V.1. Outils d'optimisation des systèmes hybrides.	87
Tableau VI.1. Paramètres pour le choix de logiciel – HOMER.	104
Tableau VI.2. Consommation hebdomadaire de la maison.	107
Tableau VI.3. Données météorologiques d'In Salah.	110
Tableau VI.4. Emissions de GES.	117
Tableau VI.5. Emission de gaz à effet de serre pour le système EOL/DG.	119
Tableau VI.6. Résultats comparatifs des différents scénarios.	123
Tableau VI.7. Répartitions des coûts par rapport au <i>TNPC</i> .	124
Tableau VII.1. Tableau comparatif des coûts entre les deux approches	139
Tableau VII.2. Tableau comparatif émissions de gaz à effet de serre	141

## **Table de matière**

<i>Remerciement .....</i>	I
<i>Dédicace .....</i>	II
<i>Liste des figures .....</i>	III
<i>Liste des tableaux .....</i>	VI
<i>Nomenclature .....</i>	VII
<i>Table de matière .....</i>	XV
<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Etat de l'art des systèmes de production d'énergie</b>	<b>4</b>
I.1. INTRODUCTION .....	5
I.2. ETAT DE L'ART .....	6
I.3 MOTIVATION .....	12
<b>Chapitre II : Généralités sur les énergies renouvelables</b>	<b>13</b>
II.1 INTRODUCTION .....	14
II.2. ENERGIES RENOUVELABLES .....	14
II.2.1. Croissance de l'exploitation des énergies renouvelables .....	14
II.2.2. Production de l'électricité par les énergies renouvelables .....	15
II.2.2.1 L'hydraulique .....	15
II.2.2.2 Le solaire .....	16
II.2.2.3 L'éolienne .....	17
II.2.2.4 La biomasse .....	17
II.2.2.5 La géothermie .....	18
II.2.2.6 Les énergies marines .....	19
II.2.2.7 L'hydrogène .....	20
II.3 PRESENTATION DU SYSTEME HYBRIDE .....	20
II.3.1 Génération d'énergie dans un système hybride .....	21
II.3.2 Principaux composants d'un système SH .....	21
II.3.3 Problèmes rencontrés dans les SH .....	23
II.3.4 Structure d'un système hybride .....	24
II.3.4.1. Système hybride avec source d'énergie conventionnelle .....	24
II.3.4.1.1. Système photovoltaïque/source conventionnelle .....	27
II.3.4.1.2 Système Eolien/Source Conventionnelle .....	28
II.3.4.1.3 Systèmes Photovoltaïque/Eolien/Diesel .....	28
II.3.4.2. Systèmes hybrides sans source conventionnelle .....	28
II.3.4.2.1 Système hybride photovoltaïque/stockage .....	29
II.3.4.2.2 Système hybride Eolien/Stockage .....	30
II.3.4.2.3 Système hybride Photovoltaïque/Eolien/Stockage .....	31
II.3.4.2.4 Système hybride Photovoltaïque/Eolien sans stockage .....	31
II.4. CONCLUSION .....	32
<b>Chapitre III : Description des systèmes de production d'énergie électrique</b>	<b>33</b>
III.1. INTRODUCTION .....	34
III.2. DESCRIPTION D'UN SYSTEME PV .....	34
III.2.1. Principe de fonctionnement du photovoltaïque .....	34
III.2.2. Technologie des cellules solaires .....	35

III.2.2.1 La cellule amorphe .....	35
III.2.2.2 La cellule cristalline .....	36
III.2.2.1 La cellule monocristalline .....	36
III.2.2.2 La cellule poly-cristalline .....	36
III.3. Modélisation des cellules photovoltaïques .....	36
III.3.1. Configuration physique .....	36
III.3.2 Panneau Photovoltaïque .....	37
III.3.3 Avantages d'une installation PV .....	38
III.3.4 Inconvénients d'une installation PV .....	39
III.4 DESCRIPTION D'UN SYSTEME EOLIEN .....	39
III.4.1 Origine .....	39
III.4.2 Définition de l'énergie éolienne .....	40
III.4.3 Constitution d'un aérogénérateur .....	42
III.4.4 Types de machines électriques utilisées .....	42
III.4.4.1 Fonctionnement à vitesse fixe .....	42
III.4.4.2 Fonctionnement à vitesse variable .....	42
III.4.4.2.1 Générateurs synchrones .....	43
III.4.4.2.2 Générateurs asynchrones .....	43
III.4.4.2.3 Machines à courant continu .....	43
III.4.4.2.4 Générateurs à réluctances variables .....	43
III.4.4.3 Avantages et inconvénients de l'éolien .....	43
III.4.4.3.1 Avantages .....	44
III.4.4.3.2 Inconvénients .....	44
III.5 DESCRIPTION D'UN GENERATEUR DIESEL .....	44
III.5.1 Fonctionnement .....	44
III.5.2 Réserve tournante .....	45
III.5.3 Temps de fonctionnement minimal .....	45
III.5.4 Hystérésis .....	45
III.6 POTENTIELS ENERGETIQUES EN ALGERIE .....	45
III.6.1 Potentiel solaire de l'Algérie .....	47
III.6.2 Potentiel éolien de l'Algérie .....	48
III.7 ANALYSE ECONOMIQUE .....	48
III.8 ANALYSE DE L'ASPECT SOCIAL .....	49
III.9 CONCLUSION .....	50

Chapitre IV : Modélisation et simulation du système hybride	51
IV.1 INTRODUCTION .....	52
IV.2 MODELISATION DE LA CHAINE PHOTOVOLTAIQUE .....	52
IV.2.1 Modélisation du rayonnement solaire .....	52
IV.2.1.1 Coordonnées géographiques terrestres .....	53
IV.2.1.2 Position du soleil .....	53
IV.2.1.3 Coordonnées équatoriales .....	53
IV.2.1.3.1 La déclinaison .....	53
IV.2.1.3.2 L'angle horaire .....	54
IV.2.1.4 Coordonnées horizontales .....	55
IV.2.1.4.1 Hauteur du soleil .....	55
IV.2.1.4.2 Azimut du soleil .....	55
IV.2.1.4.3 Angle zénithal .....	55
IV.2.1.4.4 Angle d'incidence du rayonnement direct sur un plan incliné .....	56
IV.2.1.5 Calcul du rayonnement solaire horaire sur un plan incliné .....	56

IV.2.2 Modélisation d'une cellule PV .....	58
IV.2.2.1 Modèle à une seule diode .....	58
IV.2.2.2 Paramètres d'une cellule PV .....	61
IV.2.2.2.1 Courant de court-circuit .....	61
IV.2.2.2.2 Tension du circuit ouvert .....	61
IV.2.2.3 Association de Cellules PV .....	61
IV.2.3 Modélisation du générateur PV .....	62
IV.2.3.1 Caractéristique I-V d'un générateur PV .....	63
IV.2.3.2 Caractéristique P-V d'un générateur PV .....	64
IV.2.3.3 Rendement d'un générateur PV .....	64
IV.2.3.4 Facteur de forme (FF) .....	64
IV.2.3.5 Influence de l'intensité du rayonnement .....	65
IV.2.3.6 Influence de la température .....	66
IV.3 MODELISATION DE LA CHAINE EOLIENNE .....	67
IV.3.1 Chaine de conversion éolienne .....	67
IV.3.1.1 Modèle du vent .....	68
IV.3.1.1.1 Correction de la vitesse du vent avec l'altitude .....	68
IV.3.1.1.2 Distribution de Weibull .....	69
IV.3.1.2 Modèle de la turbine .....	69
IV.3.1.2.1 Puissance récupérée par la turbine .....	69
IV.3.1.2.2 Loi de Betz .....	69
IV.3.1.2.3 Vitesse normalisée .....	71
IV.3.1.2.4 Coefficient de puissance .....	72
IV.3.1.2.5 Coefficient de couple .....	73
IV.3.1.3 Modèle de l'arbre de la machine .....	73
IV.3.1.4 Modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents .....	74
IV.3.2 Modélisation du redresseur .....	75
IV.3.2.1 Modèle d'un redresseur monophasé .....	75
IV.3.2.2 Modèle d'un pont de diode .....	76
IV.3.3 Puissance éolienne produite .....	77
IV.4 MODELISATION DU SYSTEME DE STOCKAGE .....	79
IV.5 MODELISATION DU CONVERTISSEUR BIDIRECTIONNEL .....	81
IV.6 MODELISATION DU GENERATEUR DIESEL .....	82
IV.7 CONCLUSION .....	83

Chapitre V : Etude multicritère des installations hybrides	84
V.1 INTRODUCTION .....	85
V.2 RECHERCHES ACTUELLES .....	85
V.2.1 Méthodes d'optimisation .....	87
V.2.2 Outils de simulation .....	87
V.3 ÉVALUATION DE LA FAISABILITÉ DU PROJET .....	89
V.3.1 Faisabilité technique .....	89
V.3.2 Faisabilité du financement .....	90
V.3.3 Législation .....	91
V.4 EVALUATION DES FACTEURS INFLUENÇANTS .....	91
V.4.1 Critères techniques .....	91
V.4.1.1 Efficacité énergétique .....	91
V.4.1.2 Fiabilité du système .....	92
V.4.1.3 Risque de construction .....	93
V.4.1.4 Probabilité de sous approvisionnement en carburant .....	93

V.4.2 Critères économiques .....	94
V.4.2.1 Coût de l'énergie / prix de l'électricité .....	94
V.4.2.2 Risque commercial .....	94
V.4.2.3 Complexité des questions administratives .....	95
V.4.2.4 Temps d'accès au service .....	95
V.4.3 Critères environnementaux .....	95
V.4.3.1 Émissions du GES .....	95
V.4.3.2 Autres émissions .....	96
V.4.4 Critères sociaux .....	97
V.4.4.1 Augmentation de l'aide sociale / augmentation du taux d'emploi .....	97
V.4.4.2 Consistance avec les politiques locales .....	98
V.4.4.3 Acceptation de la technologie par les gens .....	98
V.5 STRATEGIE DE GESTION DE L'ENERGIE .....	99
V.6 CONCLUSION .....	101
 Chapitre VI : Etude technico-économique d'un système hybride pour l'électrification d'une maison au sud Algérien	102
VI.1 INTRODUCTION .....	103
VI.2 MODELISATION ET SIMULATION DU SH .....	103
VI.2.1 Introduction à la simulation HOMER et système .....	103
VI.2.2 Principales caractéristiques .....	104
VI.2.2.1 Processus de simulation .....	105
VI.2.2.2 Processus d'optimisation .....	105
VI.2.2.3 Processus de sensibilité .....	106
VI.3 METHODOLOGIE .....	106
VI.3.1 Spécifications de la localisation et de la demande de charge .....	106
VI.3.2 Données météorologiques .....	108
VI.3.3 Critères d'évaluation .....	110
VI.4 ETUDE DE CAS .....	112
VI.4.1 Scénario 1 .....	112
VI.4.2 Scénario 2 .....	114
VI.4.3 Scénario 3 .....	117
VI.4.4 Scénario 4 .....	120
VI.5 ETUDE COMPARATIVE .....	122
VI.5.1 Résultats d'optimisation .....	122
VI.6. ETUDE DE SENSIBILITE .....	127
VI.7. APPROCHE ANALYTIQUE.....	129
VII.7.1 Consommation du carburant et fonctionnement du GD.....	129
VII.7.2 Résultats économique.....	130
VII.7.3 Résultats environnementaux.....	131
VI.7 CONCLUSION .....	131
 Chapitre VII : Approche analytique sous environnement MATLAB .....	130
VII.1 INTRODUCTION	131
VII.2 MODEL DEVELOPPEE SOUS MALAB	131
VII.2.1 Algorithme de gestion d'énergie	131
VII.2.2 Calcul du bilan énergétique et gestion du surplus	132
VII.2.3 Stratégie d'hystérésis pour le groupe diesel	134
VII.2.4 Module économique : calcul du NPC et du COE	135
VII.2.5 Module environnemental	137
VII.3 Consommation du carburant et fonctionnement du GD	138

VII.7.4 Résultats économique	139
VII.7.5 Résultats environnementaux	140
VII.6 CONCLUSION	141
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>142</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>146</b>

---

*INTRODUCTION GÉNÉRALE*

---

La majeure partie de l'électricité fournie est produite dans des centrales situées loin des utilisateurs finaux. Un tiers du coût de l'électricité livrée est pertinent pour le transport et la distribution de l'électricité de la centrale électrique aux utilisateurs finaux [1], [2]. Dans le système énergétique actuel, les infrastructures, en particulier dans les zones urbaines, sont alimentées par des combustibles multiples (biogaz, pétrole, gaz naturel, etc.) et des services (chauffage, électricité, refroidissement, eau propre, etc.). Cependant, en raison des préoccupations environnementales mondiales, de récents développements dans les technologies à petite échelle et de la production d'énergie moins coûteuse utilisent des énergies renouvelables.

L'une des approches largement explorées est la production de l'électricité qui peut être utilisée à des fins de refroidissement et de chauffage dans un système énergétique appelé poly-génération [3]. Les systèmes de poly-génération à petite échelle sont généralement des systèmes flexibles avec un système d'interconnexions dit système Plug-and-Play [4].

Dans de tels systèmes, différentes entités d'un système énergétique interagissent les unes avec les autres, ce qui entraîne une synergie accrue au sein du système [5]. Ces systèmes énergétiques décentralisés basés sur la communauté qui fournit des services énergétiques à proximité des utilisateurs finaux présentent plusieurs avantages environnementaux, économiques et sociétaux [6], [7]. Alors que les consommateurs résidentiels peuvent supporter un manque d'énergie temporaire, la fiabilité et la qualité de l'énergie sont essentielles pour de nombreux consommateurs, tels que les hôpitaux, les centres de données et les fabricants [8]. L'implication des consommateurs dans le choix d'un mélange de sources d'énergie renouvelable – SER dans leur système énergétique conduit à une meilleure connaissance de la durabilité et de l'impact environnemental négatif de la consommation de combustibles fossiles dans la société. Par conséquent, des outils dédiés de modélisation, de simulation et d'optimisation permettant d'identifier la conception optimale d'un tel système sont cruciaux au stade de la planification [9].

Dans cet esprit, cette thèse abordera les questions suivantes :

- Comment les conditions météorologiques peuvent-elles changer le comportement d'un système hybride et dans quelle mesure ?
- Quelle est l'importance du choix correct des équipements SER en fonction des principaux besoins en électricité souhaitables qui devraient être couverts par le système établi ?

- Un système hybride autonome, basé sur les SER, est-il réalisable et dans quelles circonstances ?
- Dans quelle mesure la prévision des résultats opérationnels d'un tel système est-elle exacte lors de l'utilisation d'outils de simulation de logiciels existants et innovants ?
- Comment peut-on renforcer le caractère écologique d'un tel système et quelles sont les principales faiblesses de leur fonctionnement ?

Cette thèse vise à répondre aux questions ci-dessus concernant l'implication des sources d'énergies renouvelables dans la vie quotidienne. En outre, cette étude pourrait aider à apporter des solutions à des problèmes tels que l'alimentation en électricité de zones isolées, qui nécessite généralement d'importants investissements et conduit à des pertes d'énergie liées aux réseaux de transport et de distribution.

Cette thèse adopte une analyse technico-économique de différents systèmes hybrides pour l'alimentation d'une maison non connecté au réseau électrique, afin de prouver dans quelles circonstances de tels systèmes peuvent être réalisables et comment leur fonctionnement peut être prédict en utilisant outils de simulation HOMER. Le chapitre 02, contient des généralités sur les énergies renouvelables ainsi que la structure des systèmes hybrides. Le troisième chapitre porte sur la description détaillée des systèmes de production d'électricité, la modélisation mathématique et la simulation de ces systèmes fait l'objet du quatrième chapitre. Ensuite, nous aborderons dans le cinquième chapitre, une étude multicritères d'installation des systèmes hybrides, suivi par une étude de cas dans le sixième chapitre. Enfin, on termine par une conclusion et des perspectives.

---

*ETAT DE L'ART*

---

## I.1. INTRODUCTION

Les sources d'énergie disponibles localement, telles que l'énergie solaire, l'énergie éolienne, la biomasse et les déchets urbains, peuvent être utilisées pour répondre à la demande en énergie d'une collectivité à un prix raisonnable. Les systèmes énergétiques communautaires fournissent des plates-formes flexibles permettant aux consommateurs de participer activement au marché de l'énergie. En étant autonome en cas d'urgence pendant une courte période, le système énergétique résiste à un manque d'énergie temporaire. De plus, en connectant plusieurs petites installations entre elles dans un réseau intelligent, en cas de défaillance d'un système, de l'énergie peut être fournie par les systèmes voisins jusqu'à ce que le problème soit résolu.

Les autres avantages d'un système énergétique décentralisé sont présentés de la manière suivante : réduction du temps de planification et de mise en œuvre ; réduire ou éliminer le coût initial des lignes de transport et de distribution et/ou leurs coûts d'exploitation et de maintenance ; diminuer l'impact négatif sur l'environnement ; réduire les pertes de distribution et de transmission et augmenter la résilience du réseau électrique.

Certaines des caractéristiques les plus communes des systèmes de poly-génération sont l'intégration de sources d'énergie renouvelable, la variation journalière et saisonnière du profil de charge, et l'interaction de divers types de production d'énergie (chaleur, électricité et refroidissement) et d'unités de stockage (froid, à chaud et électrochimique) simultanément. Il est évident qu'un grand nombre de variables endogènes et exogènes liées entre elles interviennent dans de tels systèmes. Certaines des variables endogènes sont la configuration du système, la taille des composants et les stratégies d'exploitation. Certaines des variables exogènes comprennent l'emplacement géographique de l'entité, la disponibilité et le prix des sources d'énergie, le profil de la demande, le tarif de l'électricité et la réglementation du marché de l'énergie. Malgré tous les avantages potentiels des systèmes de poly-génération, du fait de leur complexité et des nombreuses configurations possibles, l'identification de la conception optimale de tels systèmes n'est pas simple. Un grand nombre de variables étant impliquées, les variables pouvant différer d'un cas à l'autre, la viabilité des systèmes de poly-génération doit être analysée pour chaque cas individuel, en tenant compte des caractéristiques individuelles du système. Ainsi, des avancées dans l'optimisation des systèmes de poly-génération complexes doivent également être réalisées. Autour de cette thématique, nous résumons les travaux déjà réalisés dans l'état de l'art suivant.

## I.2. ETAT DE L'ART

Plusieurs articles publiés dans la littérature utilisant le dimensionnement des systèmes hybrides, Markvart [10], présente une technique de construction graphique basée sur les valeurs moyennes mensuelles du rayonnement solaire et de la vitesse du vent pour l'optimisation et le dimensionnement des systèmes PV/Eolien.

Protoperopoulos et al. [11], affirment l'évidence de combiner entre les ressources en énergie solaire et éolienne, cette combinaison rend le système hybride plus difficile à analyser suite à l'existence des problèmes découlant de la complexité accrue par rapport aux systèmes énergétiques uniques. Une analyse basée sur le coût du système pour différentes combinaisons des deux convertisseurs, est faite en tenant compte du rayonnement solaire et de la vitesse du vent qui sont fortement dépendants de l'emplacement afin de dimensionner le système hybride.

La plupart des zones rurales du sud Algérien ne sont pas connectés au réseau électrique Kasbadji [12]. Il y a un grand besoin d'électrification malgré que cette région bénéficie d'un grand potentiel solaire et éolien tout au long de l'année où l'utilisation des énergies renouvelables peut jouer un rôle stratégique pour le développement de la région.

Yang et al. [13], ont proposé une technique d'optimisation suite à la perte du modèle de probabilité d'alimentation (LPSP : Loss Power Supply Probability) pour un système hybride PV/Eolien en tenant compte de la fiabilité du système. Ils ont démontré l'utilité de leur modèle par une étude de cas d'une unité hybride pour un système de télécommunication.

Iqbal [14], montre qu'un système à base de 10kW d'éolienne est faisable pour fournir l'électricité dans des maisons à Newfoundland (Canada) où seule l'énergie éolienne a été considérée dans son système parce que la vitesse moyenne annuelle du vent est de 6,7m/s.

Une étude de faisabilité d'un système PV/Eolien avec des composants de stockage (batterie et de réservoir électrolyseur) a été faite par Khan et Iqbal [15], et montre que le système Eolien/Diesel/Batterie est la solution la plus appropriée pour les applications autonomes, la diminution du coût de la pile à combustible de 65% rend le système Eolien/Diesel/Pile à combustible faisable. Ce système serait un meilleur choix avec la réduction du coût de la pile à combustible à 15%.

La minimisation du coût total de l'installation du système et la réduction des émissions de polluants sont les résultats de Bernal-Agustín et al. [16] après la conception d'un système hybride PV/Eolien/Diesel utilisant le logiciel HOMER.

Beccali [17], a fait une analyse de faisabilité d'un système renouvelable avec stockage d'hydrogène alimentant une charge électrique en utilisant le logiciel HOMER, qui a conduit à une réduction de 28% de CO<sub>2</sub> ainsi que tous les autres polluants par rapport au système conventionnel à base de carburant. Les conditions de réduction des coûts des composants et du prix de l'hydrogène sont les deux critères de faisabilité que l'auteur a choisi.

Dans une autre étude, Yang et al. [18], ont calculé la configuration optimale du système avec la méthode de la perte de la probabilité en alimentation (LPSP) et avec un coût annuel minimal du système (ACS – Annual Cost System) en se basant sur les algorithmes génétiques.

Saheb-Koussa [19], a étudié la faisabilité technico-économique d'un système de production d'énergie (PV/Eolien/Diesel). Les résultats montrent que l'hybridation est la meilleure configuration pour les sites étudiés en zones rurales algérienne, avec une amélioration de la fiabilité. Le potentiel des énergies renouvelables a une grande influence sur le coût de l'énergie.

Ekren et al. [20], donnent une procédure de dimensionnement optimale du système hybride Eolien/PV/Diesel. Elle est conçue et développée pour les petites applications en Turquie.

Kenfack et al. [21], ont utilisé le même logiciel pour dire qu'il est très utile et enrichissant de placer un système hybride dans la rivière Batocha et la rivière Metchie, au Cameroun ou dans des régions éloignées similaires.

Shaahid and El Amin [22], ont utilisé le logiciel HOMER pour l'étude de la faisabilité technico-économique d'un système hybride PV/Diesel/Batterie pour l'alimentation électrique du village Bin Habbas en Arabie Saoudite en analysant le rayonnement solaire de Rafha. Le stockage dans les batteries augmente puisque l'augmentation de la pénétration des énergies renouvelables diminue les heures de fonctionnement du générateur Diesel. Le coût de production d'énergie (COE) est de 1,170\$/kWh ce qui signifie que le système est techniquement et économiquement réalisable.

Arribas et al. [23], ont présenté plusieurs combinaisons pour l'évaluation des systèmes hybrides à long terme, et à court terme, la performance et les composants des systèmes

nécessaires au stade actuel du développement sont évalués, la suggestion de cette étude est de bien comprendre les systèmes hybrides.

Un système d'alimentation en énergie hybride Eolien/PV avec stockage a été étudié par Ruisheng et al, [24]. La résolution efficace des problèmes d'alimentation électrique liés à l'excès de puissance photovoltaïque ont été réalisés.

Aihara et al. [25], ont publiés leurs articles proposant une centrale de stockage et menant sur l'atténuation du déséquilibre entre la production d'énergie et la demande de charge.

Une étude technico-économique complète a été faite par Jose et al. [26] pour la production d'hydrogène par un système hybride PV/Eolien. Le coût d'investissement initial sera récupéré dans un délai estimé à dix ans en élevant le coût de vente d'hydrogène produit par l'électrolyseur.

Les zones rurales en Algérie peuvent être alimentées par des générateurs PV et des éoliennes d'après, Djohra Saheb et al. [27] parce qu'ils génèrent suffisamment d'énergie avec un coût moindre et une grande diminution des émissions de polluants.

Tamer Khatiba et al [28], ont étudié l'intégration d'un système hybride dans un bâtiment afin d'avoir zéro rejet énergétique en Malaisie. L'étude est basée sur le coût minimum du système en le réduisant à 35%. Ils ont démontré que le couplage PV/Diesel rend le système plus faisable que de les utiliser séparément. L'optimisation des capacités du réseau PV et du générateur diesel ont été réalisés.

Gang Liu et al [29], montrent qu'un système PV/Eolien/Biomasse est la meilleure configuration pour la réduction des émissions sans augmenter le coût d'investissement. Deux logiciels utilisés dans cette étude de faisabilité pour la comparaison du COE et GHGE de chaque localité des 06 provinces étudiées en Australie. Des études importantes basées sur l'augmentation du niveau de la pénétration des énergies renouvelables dans des systèmes de stockage pour l'alimentation électrique aux sites isolés.

Ren et Li [30], Yuan Zheng et al. [31], ont établi des modèles simples des principaux composants d'un système hybride de puissance de stockage par pompage solaire et éolien.

Maamar Laid et al [32], ont pu réduire les émissions à 50% en introduisant une fraction d'énergie renouvelable de 47%. Le logiciel HOMER est utilisé pour le dimensionnement du système hybride PV/Eolien afin de générer l'électricité pour une charge de réfrigération dans le site d'Adrar au sud-ouest du Sahara algérien suivi par des résultats expérimentaux.

Une étude technico-économique de faisabilité d'une maison à Urumqi (Chine) alimentée 100% en énergie renouvelable a été développée par Li et al. [33]. Le dimensionnement recommandé est de 28% d'énergie éolienne produite par une seule turbine de 2,5kW et de 72% d'énergie solaire assurée à partir de panneaux solaires de 5kW, d'un convertisseur de 5kW et de 8 unités de batterie chacune de 6.94kWh.

D'après Tahri [34], l'utilisation du système hybride PV/Eolien/Diesel est mieux que les systèmes connectés au réseau électrique, il a présenté une étude de faisabilité technico-économique d'un système hybride à Ain-Merane (Chlef), avec une analyse de performance entre un système d'énergie PV/Eolien couplé avec un générateur Diesel.

Moghavvemi et al. [35], ont conçu un système 100% rentable, le COE est bas en étudiant une station des émetteurs FM alimentés par un système hybride PV/Diesel pour les localités rurales.

De plus, Kusakana et al. [36], ont présenté la possibilité d'utiliser un système hybride PV/Eolien dans les zones rurales du Congo. La simulation est faite sous HOMER sur une station téléphonique mobile comme charge à alimenter.

Tao Ma et all [37], démontrent que le stockage à pompe hydraulique (PHS) est l'un des opérations les plus efficaces pour l'intégration des énergies renouvelables. La simulation montre que ce système compense l'intermittence en solaire et l'énergie éolienne. Un modèle mathématique simple a été développé dans cette recherche mené sur une île à Hong Kong.

S. Rehman and I. El-Amin [38], présentent une étude technico-économique d'un système hybride PV/Eolien/Diesel à Arar en Arabie Saoudite et le dimensionnement du système montre que la configuration la plus économique est PV/Diesel utilisant 1500kW d'énergie solaire, un convertisseur de 1500kW et quatre générateurs Diesel chacun de capacité 1120kW. Avec un COE de 0.038\$.

Ogunjuyigbe et al. [39] ont utilisé l'algorithme génétique (GA) pour optimiser le dimensionnement d'un bâtiment résidentiel en tenant compte de l'ajout de panneaux solaires, de batteries, de générateurs diesel et d'éoliennes. Ils se sont concentrés sur la réduction des coûts totaux, la réduction de la consommation d'énergie et les émissions de CO<sub>2</sub>.

Yahiaoui et al. [40] ont également examiné un autre village rural algérien et proposé un algorithme d'optimisation d'essaims de particules (PSO) pour optimiser les coûts du cycle de vie d'un système PV / BAT / DG en conservant la probabilité de perte de charge et les

émissions de CO<sub>2</sub> comme contraintes. Leur résultat optimal nécessitait un investissement initial de 60% du coût total. HOMER a également utilisé l'optimisation de la conception du système, qui nécessitait un investissement initial de 70% du coût total

Une combinaison de sources d'énergie conventionnelles et non conventionnelles a été considérée dans [41]. L'outil d'optimisation et de dimensionnement de système électrique hybride HOMER a été utilisé pour classer les configurations hybrides probables et leurs possibilités d'explicitation. Il s'avère qu'un seul système basé sur les énergies renouvelables ne peut pas fournir la totalité de la charge et qu'il n'est pas financièrement viable. Ainsi, un système d'alimentation hybride avec production éolienne, solaire, diesel et de secours (éolienne / photovoltaïque / diesel / batterie) a été étudié et s'est révélé être l'option la plus viable. Avec cette configuration, la demande en énergie de la communauté considérée a été satisfaite confortablement.

Linssen et al [42]. Ont mené une analyse économique des systèmes de batteries photovoltaïques et de l'influence de différents profils de charge des consommateurs. Leur analyse a révélé un impact considérable des profils de charge sur les résultats de la modélisation en ce qui concerne les coûts totaux, la rentabilité et la configuration optimale des coûts en termes de PV et de la taille de la batterie des systèmes PV alimentés par batterie pour les ménages privés.

Dans [43] une autre étude de conception et de dimensionnement optimale est faite tout en tenant compte de plusieurs facteurs technico-économiques, notamment le coût actuel net, le coût de l'énergie, la production d'énergie photovoltaïque et les systèmes de suivi de générateurs photovoltaïques. Les examens sont effectués à l'aide du logiciel HOMER, qui se révèle être un outil efficace pour analyser différents schémas et configurations de SER.

Halabi et al. [45] ont également fait appel à HOMER pour la conception de systèmes PV / BAT / DG pour deux centrales décentralisées situées dans des îles malaises. Leurs résultats ont montré que la conception avec le coût de cycle de vie le plus bas nécessitait environ 1/4 de son coût de l'installation initiale.

Dans [45], Yilmaz et Dincer ont également utilisé HOMER pour optimiser la conception de dimensionnement d'un système PV / BAT / DG à Kilis, en Turquie. Parmi les différentes conceptions, celle présentant l'investissement initial le plus faible atteignait 25% du coût du

cycle de vie, tandis que la conception présentant le coût du cycle de vie le plus faible nécessitait un investissement initial de 85% du coût total.

Singh et al. [46] ont étudié le système PV / FC / Batt à la fois techniquement et économiquement pour répondre à la demande en énergie d'un bâtiment de recherche universitaire situé à Bhopal, en Inde.

Rajbongshi et al. [47] ont signalé qu'un système d'énergie hybride décentralisé (PV / biomasse / diesel) est une option économiquement viable pour l'électrification rurale lorsque l'extension du réseau n'est pas réalisable. De plus, ils ont comparé les systèmes d'énergie hybrides réseau et hors réseau pour une meilleure compréhension.

Das et al. [48] ont étudié un système hybride basé sur des générateurs PV / éolien / biogaz / génératrice / diesel pour application autonome dans la région méridionale du Bangladesh. Ils ont constaté que la méthode proposée présentait des avantages potentiels liés à l'utilisation de ressources renouvelables localement disponibles pour électrifier la communauté éloignée par rapport à l'utilisation d'un générateur diesel uniquement et des SHS.

Une nouvelle méthode permettant de déterminer le dimensionnement et l'emplacement des générateurs diesel, des panneaux solaires photovoltaïques et des batteries pour systèmes hors réseau est présentée dans [49] dont l'objectif est de réduire le coût total du système tout en satisfaisant la demande de charge et en maintenant la qualité de l'énergie du système, entre autres contraintes. Ceci est réalisé en utilisant un algorithme d'optimisation d'essaims de particules en deux étapes ; la première pour l'emplacement et le dimensionnement du système et la seconde pour sa planification.

[50] a présenté une étude qui examine l'application potentielle du système hybride à l'électrification d'une communauté éloignée en simulant un système d'énergie hybride efficace avec une évaluation optimale des coûts et une émission de contrôle des produits nocifs. Dans cet examen, six cas différents de systèmes hybrides sont étudiés et une configuration optimale est sélectionnée sur la base du coût de l'énergie et des émissions de polluants plus bas, puis comparée des avantages et des inconvénients relatifs avec les systèmes connectés au réseau et les systèmes solaires domestiques. Cette recherche examine également les résultats significatifs de différentes configurations concernant les émissions du cycle de vie, les facteurs de service, la pénétration des énergies renouvelables et d'autres paramètres économiques et environnementaux. Parmi les différentes configurations de système, un

système hybride PV / Batt / Diesel avec une capacité de module PV de 73 kW, un groupe électrogène diesel de 57 kW et un groupe de batteries de 373 kWh constituent la configuration la mieux dimensionnée pour répondre à une demande de charge annuelle de 88 354 kWh. Les perspectives sociales et les défis ont également été discutés.

### I.3 MOTIVATION

Les sources d'énergie renouvelable n'ont pas de limitations, telles qu'elles seront présentées dans le chapitre suivant, car l'électricité peut être produite par le consommateur individuellement au même endroit que la consommation. Il est important de noter qu'une solution dans laquelle chaque consommateur couvrirait de manière indépendante ses propres besoins en énergie en produisant localement de l'électricité à l'aide de systèmes reposant sur les SER. Cette opération ne semble pas réalisable, en raison du décalage inévitable entre les taux de production et les taux de consommation.

L'utilisation de micro-réseaux intelligents constitue une solution à la gestion efficace des excès et des besoins en énergie. Un micro-réseau est un système de logistique énergétique basé sur le concept de communauté dont les membres sont à la fois producteurs d'énergie et consommateurs d'énergie.

Ce schéma de production distribuée contourne le réseau national, évitant ainsi les coûts d'installation, de maintenance et d'exploitation d'un tel système. Une autre solution est l'évolution des projets de SER à petite échelle qui devraient être encouragés par les gouvernements du monde entier pour encourager les particuliers à utiliser les SER afin de couvrir leurs besoins en électricité. Ces applications peuvent être soutenues par l'utilisation de l'énergie solaire et éolienne en combinaison avec des technologies de tampons matures pour l'optimisation des micro-réseaux. L'un des avantages des technologies des énergies renouvelables réside dans leur capacité à fournir de l'électricité dans des zones non desservies par des réseaux électriques nationaux. Cette perspective conduit à des systèmes autonomes, hybrides basés sur les énergies renouvelables.

***CHAPITRE II***

---

***GÉNÉRALITÉS SUR LES  
ÉNERGIES RENOUVELABLES***

---

## II.1 INTRODUCTION

Actuellement, la plus grande part de la consommation énergétique mondiale est dédiée à la production d'électricité. L'abondance des réserves de charbon et leur faible coût d'exploitation expliquent que le charbon soit économiquement avantageux et arrive en tête dans les ressources exploitées pour la production d'électricité. L'impact environnemental du charbon est remarquable même avec la présence de technologies plus récentes et moins polluantes. Ensuite vient le gaz naturel avec la turbine à gaz à cycle combiné qui est la principale technologie de la production d'électricité mise en service dans le monde [51]. En troisième place on trouve le nucléaire. Certainement le pétrole est peu utilisé pour la production d'électricité à l'échelle mondiale mais en parallèle on le trouve avec le gaz à la première place pour la production de l'électricité dans notre pays l'Algérie [52]. Les autres énergies sont surtout représentées par les énergies renouvelables, l'hydroélectricité en tête.

Dans le monde entier les chercheurs demandent en urgence de faire changer la vision ancienne pour la production d'électricité, ils appellent aux ressources d'énergies renouvelables qui vont prendre la base d'autres ressources fossiles afin de répondre aux exigences actuelles [53]. Une alternative intéressante et puissante comme celle de l'énergie solaire et l'éolienne ont attiré l'attention au niveau de la production de l'électricité à grande échelle. Cependant, elles présentent un inconvénient commun par leur caractère imprévisible et la dépendance des conditions météorologiques et climatiques qui changent avec le temps [54]. Pour cela, les systèmes hybrides combinent entre plusieurs formes d'énergie et font l'axe principal de plusieurs travaux de recherche pour les sites éloignés du réseau électrique.

Dans la première partie de ce chapitre on va exposer l'historique et la croissance de l'exploitation des énergies renouvelables et ses applications dans le domaine de production de l'électricité, ainsi que les différentes structures des systèmes hybrides de génération d'énergie électrique.

## II.2. ENERGIES RENOUVELABLES

### II.2.1. Croissance de l'exploitation des énergies renouvelables

L'épuisement des ressources fossiles, la flambée des cours du brut et la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre selon le protocole de Kyoto, rendent urgentes la maîtrise des consommations et la diversification des sources d'énergie, un fait qui interpelle le développement des énergies renouvelables [55]. On dit que la source d'énergie est renouvelable si le fait de la faire consommer n'influence jamais sur sa quantité, ni faire limiter

son utilisation au futur. Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20 à 30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables [56].

Le besoin d'une alternative renouvelable pour faire produire l'électricité a été le sujet de discussion dans plusieurs secteurs et au niveau d'un grand nombre de pays au monde entier. Les études ont été élaborées pour faire de cet outil non polluant l'axe de recherche pour plusieurs chercheurs afin de réaliser un but majeur celle de minimiser les effets négatifs de ressources classiques de production de l'énergie.

L'Algérie est parmi les pays qui ont appelés à diversifier ses ressources économiques voire énergétiques de manière à limiter sa dépendance au pétrole et au gaz. Selon la société émiratie de la biotechnologie, les projets de type "Desertec" dont le pays à la juste volonté de se doter propose de faire basculer graduellement le système énergétique algérien, en particulier dans sa dimension de production électrique vers l'énergie solaire [57].

### II.2.2. Production de l'électricité par les énergies renouvelables

Il y a pleinement d'énergies qui rentrent dans cette catégorie, elles sont classées comme suit (Figure II.1) :

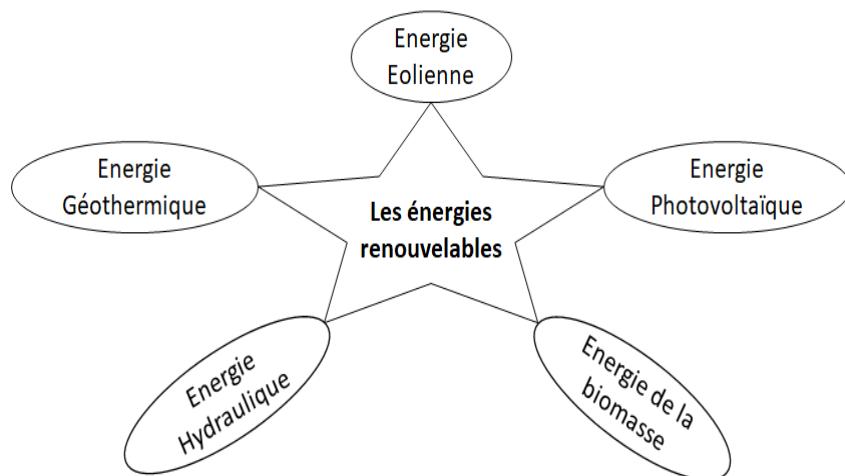


Figure II.1. Energies renouvelables

#### II.2.2.1 L'hydraulique

L'énergie électrique est produite par la transformation de l'énergie cinétique de l'eau en énergie électrique par l'intermédiaire d'un rotor alternateur relié à un ensemble mécanique situé autour de la roue motrice (Figure II.2). La quantité d'énergie extraite de l'eau retenue derrière un barrage dépend du volume d'eau et de la hauteur de chute. Cette source à

l'avantage de ne pas être polluante. On peut maîtriser le stockage de l'énergie d'une manière assez simple afin de débarrasser les cours d'eau des déchets grâce aux différents filtres des barrages, la technologie nécessaire pour son utilisation est maîtrisée. Le bruit, l'impact sur la vie aquatique, les installations complexes et les sites limités pour l'exploitation sont ses principaux inconvénients [58].

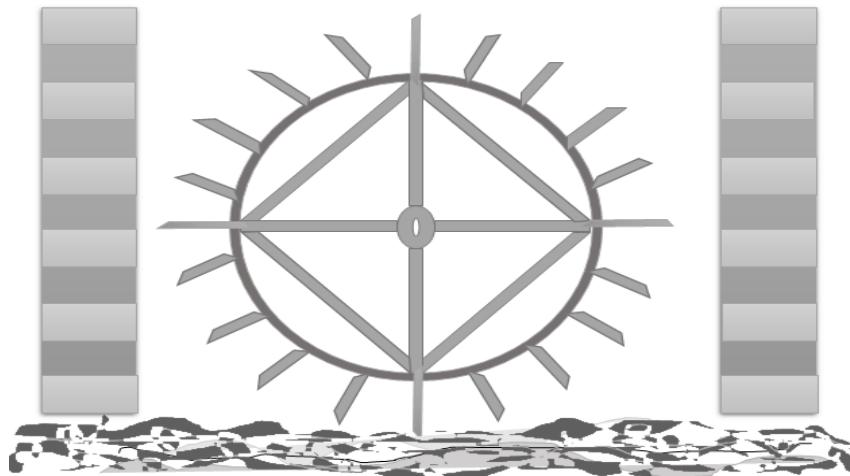


Figure II.2. Moulin à eau

#### II.2.2.2 Le solaire

Deux grands types d'énergie rentrent dans cette catégorie, la première, thermique se base sur la température qui permet essentiellement de faire chauffer l'eau afin de produire une pression mesurable, on l'appelle aussi la production combinée de chauffage par plancher chauffant [56]. La deuxième, photovoltaïque basée sur l'effet photoélectrique. Celui-ci permet de créer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique (Figure II.3). Cette ressource a donc l'avantage d'être inépuisable et utilisable en tout point d'un territoire.

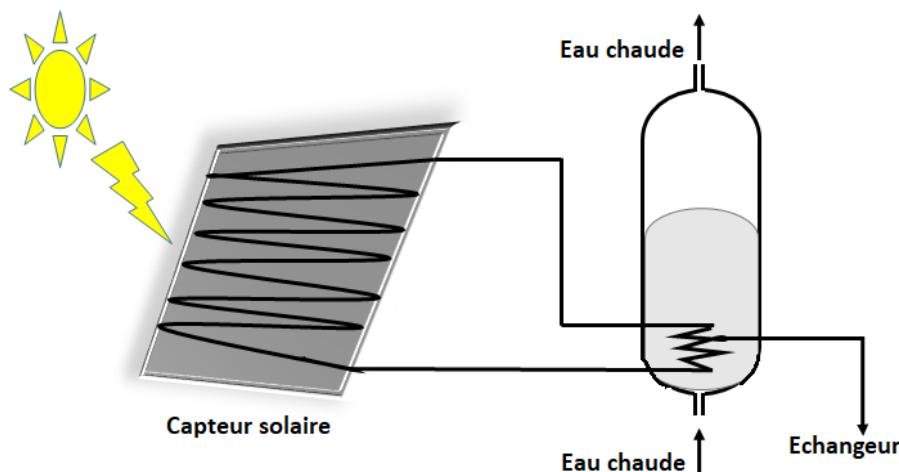


Figure II.3 Énergie solaire thermique

On peut la considérer comme une énergie propre puisque sa production à partir des modules PV n'engendre pas de déchets impliquant la pollution à la terre. Cette ressource a deux inconvénients, la production est invariablement liée aux conditions climatiques et une surface considérable est nécessaire pour produire de grande quantité d'énergie puisque le rendement des panneaux PV est relativement faible [58].

### II.2.2.3 L'éolienne

Les énergies éoliennes sont notamment caractérisées par des déplacements de masse d'air à l'intérieur de l'atmosphère. C'est l'énergie mécanique de ces déplacements de masse d'air qui est à la base de l'énergie éolienne. L'énergie éolienne consiste ainsi à utiliser cette énergie mécanique par l'intermédiaire d'un rotor et de pales (Figure II.4). Cette source est non polluante, l'énergie éolienne est intermittente et l'installation du parc éolien engendre des impacts paysagés et sonores [59].

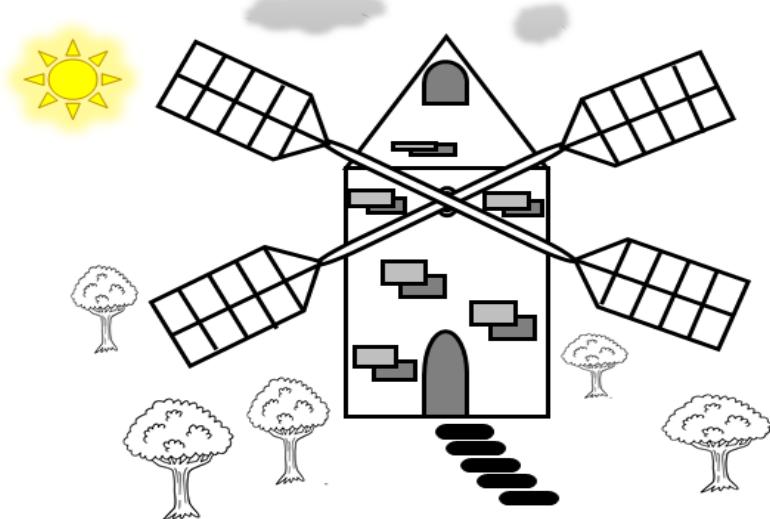


Figure II.4 Moulins à vent

### II.2.2.4 La biomasse

La biomasse désigne toute la matière vivante d'origine végétale ou animale de la surface terrestre. Généralement, les dérivés ou déchets sont également classés dans la biomasse. Différents types sont à considérer : le bois énergie, les biocarburants et le biogaz. Le bois énergie est une ressource très abondante, c'est la ressource la plus utilisée au monde [60]. Il s'agit aussi d'énergie solaire stockée sous forme organique grâce à la photosynthèse ce qui est bien montré dans (Figure II.5). Elle est exploitée par combustion. Cette énergie est renouvelable à condition que les quantités brûlées n'excèdent pas les quantités produites. Le problème le plus important est que la biomasse n'est pas inépuisable [58].

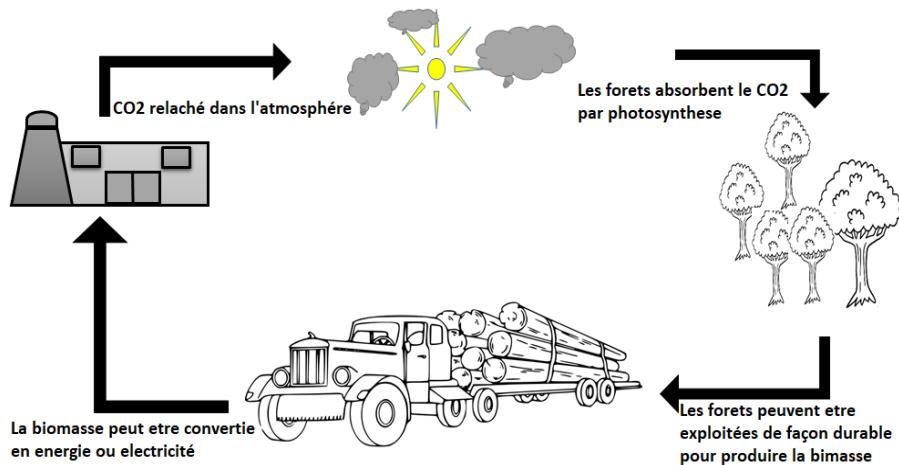


Figure II.5 Énergie Biomasse

### II.2.2.5 La géothermie

Le terme géothermie provient du grec <Ge> et <thermos>, signifiant respectivement : la terre et la chaleur. La géothermie peut se définir comme étant la technique qui consiste à puiser dans le sous-sol ou dans les roches, les calories qui y sont contenues, afin de les rendre disponibles en surface pour des applications de chauffage ou de production d'électricité. Dans des cas particuliers, la géothermie consiste à injecter de la chaleur dans le sous-sol afin de refroidir les installations de surface. Différents sources de chaleurs sont à l'origine de la chaleur interne de la terre : la radioactivité, la chaleur initiale, la chaleur de différentiation et les mouvements différentiels [61] (Figure II.6). Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques ; c'est donc une énergie fiable et disponible dans le temps. Cependant, il ne s'agit pas d'une énergie entièrement inépuisable dans le sens où un puits verra un jour son réservoir calorifique diminuer. Si les installations géothermiques sont technologiquement au point et que l'énergie qu'elles prélevent est gratuite, leur coût demeure, dans certains cas très élevé [60].

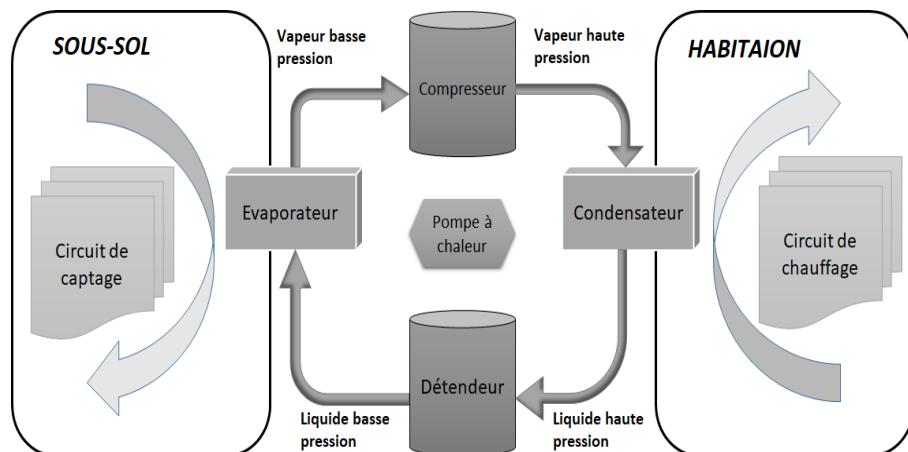


Figure II.6. Énergie géothermique

### II.2.2.6 Les énergies marines

L'énergie marine est extraite du milieu marin. Il y a notamment l'énergie marémotrice (issue du mouvement de l'eau créé par les marées), l'énergie des vagues (utilise la puissance du mouvement des vagues), l'énergie thermique des mers (produite en exploitant la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans), les éoliennes offshore, et l'énergie osmotique (diffusion ionique provoquée par l'arrivée d'eau douce dans l'eau salée de la mer). Tout comme les autres sources renouvelables, elle est non polluante lors de la production. On note également que l'énergie potentiellement disponible est énorme et que cette technologie a un bel avenir [61] (Figure II.7).

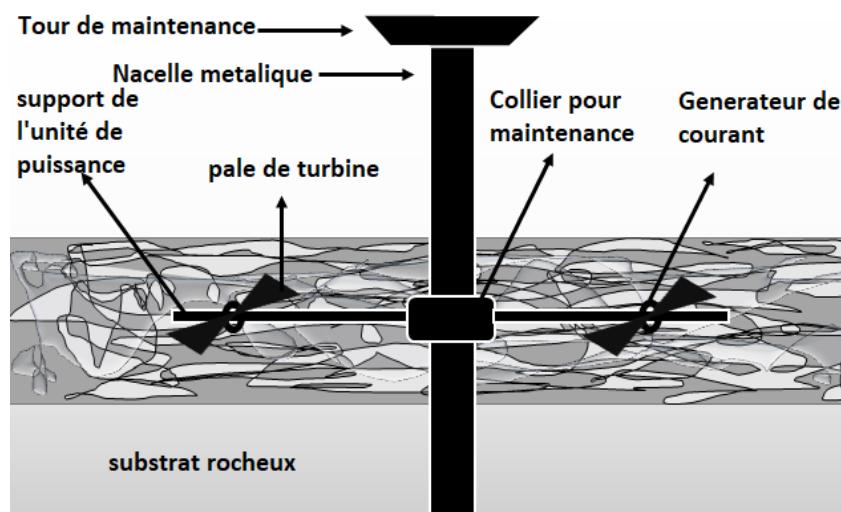


Figure II.7. Énergie marine marémotrice

### II.2.2.7 L'hydrogène

Dans le domaine de la recherche, une autre énergie a le vent en poupe (Figure II.8). Très abondante, plus énergétique que le pétrole ou le gaz naturel, ni polluante, ni toxique, elle pourrait répondre à tous nos besoins à cause de ses avantages :

- ✓ l'hydrogène peut être produit à partir de sources d'énergie propre.
- ✓ l'hydrogène peut être stocké et distribué dans une variété de formes.
- ✓ L'hydrogène peut remplacer les combustibles fossiles pour fournir de l'électricité de manière différente.
- ✓ L'hydrogène peut être utilisé comme carburant pour alimenter le moteur à combustion pour la production d'électricité en faisant tourner la machine.
- ✓ L'hydrogène peut également être directement utilisé par un électro-réacteur chimique dans les piles à combustible pour produire de l'électricité.

- ✓ Pour les puissances élevées la conversion la plus efficace de l'hydrogène à l'électricité peut être atteinte en production combinée en chaleur [63].

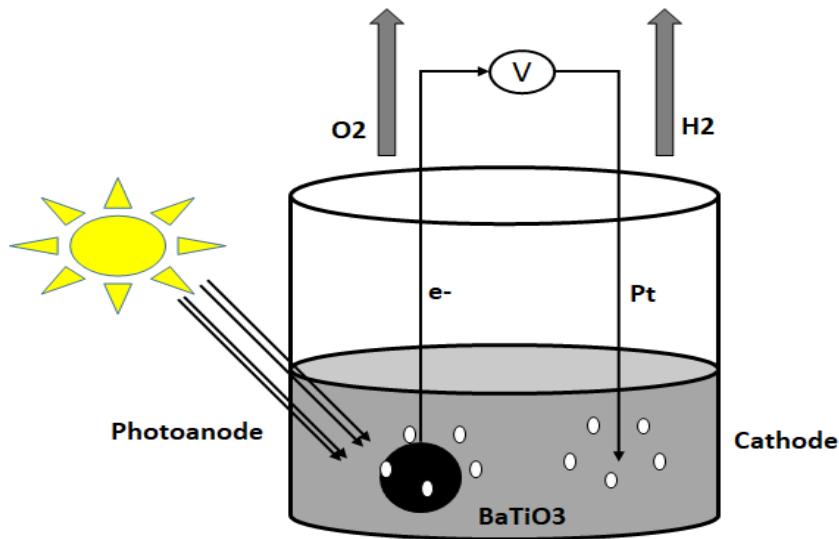


Figure II.8. Production de l'hydrogène

## II.3 PRESENTATION DU SYSTEME HYBRIDE

### II.3.1 Génération d'énergie dans un système hybride

Pour les sites isolés et les zones éloignées du réseau électrique classique, la possibilité d'être connecté avec ce réseau reste un problème majeur du fait que le prix d'extension est prohibitif en parallèle avec l'augmentation de prix du combustible. Le prix des générateurs basés sur l'énergie renouvelable connaît une baisse continue au même temps la fiabilité croît, ses avantages ont mené à une utilisation importante de l'énergie électrique provenant des énergies renouvelables [64].

La relation qui mène ses énergies renouvelables aux limites d'utilisation des ressources et la fluctuation des charges selon les périodes annuelles liées aux conditions climatiques, font l'objet d'une solution plus générale au niveau de la génération de l'énergie électrique. Cette énergie entraîne une présence d'un système hybride pour servir de l'énergie électrique aux relais de télécommunication, des postes frontières, de l'habitat isolé, des dispensaires ...etc. Plusieurs applications et recherches peuvent se produire dans des endroits différents. Il est conçu à Khartoum (Soudan) pour alimenter des petites maisons [65], en Inde pour fournir de l'énergie électrique pour des îles isolées [66], en Arabie Saoudite pour une possibilité d'utilisation d'un système hybride pour répondre aux besoins de demande de l'énergie électrique à un petit village [67].

Dans une étude complète d'un système hybride Eolien/Photovoltaïque/Diesel autonome ont été présentés les résultats qui stipulent que cette installation est meilleure en comparaison avec d'autres installations basées sur une source renouvelable ou deux [68].

Plusieurs paramètres rentrent dans l'étude des systèmes hybrides (SH). Le dimensionnement du système est le premier paramètre à considérer, bien qu'il soit difficile de trouver comment dimensionner les différents composants d'un système autonome. Un autre travail [69] donne un outil qui aide à déterminer une bonne configuration des SH afin de bénéficier d'une construction optimale. Dans la même conception [70], les auteurs ont fait apparaître une méthode d'analyse pour l'optimisation du même système. L'architecture et le choix de la stratégie de fonctionnement des SH peuvent aussi influencer sur l'image complète du système. D'autres paramètres permettent de faire évaluer les performances comme l'économie du carburant, le coût du kW, le nombre et la durée des pannes et le nombre d'arrêts pour l'entretien [71].

### **II.3.2 Principaux composants d'un système SH**

Les énergies renouvelables comme les panneaux photovoltaïques, l'énergie éolienne ou l'énergie hydraulique sont souvent utilisées dans les SH, ces systèmes peuvent inclure d'autres composants comme les convertisseurs statiques et dynamiques, des batteries pour le stockage de l'énergie, des charges principales et des charges de délestage. La majorité de ses éléments travaillent en parallèle pour introduire un système équilibré afin d'atteindre un but bien précis.

### **II.3.3 Problèmes rencontrés dans les SH**

Plusieurs problèmes peuvent se manifester durant le fonctionnement du système hybride, les causes sont nombreuses mais en général sont liées aux :

- ✓ Variations de l'énergie d'origine renouvelable.
- ✓ Manque de connaissance dans le domaine de la quantité de l'énergie en réseau fiable.

La solution aux variations brusques de changement de demande de l'énergie par la charge pour un système SH réside dans le fonctionnement parallèle des générateurs à énergies renouvelables avec les générateurs Diesels. Dans ce type de fonctionnement, les sources d'énergie renouvelable agissent comme une charge négative, en réduisant la charge moyenne des générateurs Diesel, ces derniers peuvent fonctionner à une puissance très basse, mais l'économie de carburant est modeste à cause du rendement très faible. Ainsi et au but de

garder un moteur Diesel au régime de ralenti pour une demande de puissance nulle on suppose une consommation de carburant non négligeable [72].

Le fonctionnement du générateur renouvelable peut causer des problèmes aux systèmes SH si le démarrage est influencé par des perturbations externes ou bien internes. Dans ce cas la production de l'énergie électrique peut connaître des changements rapides ce qui résulte des variations de tension et de fréquence impliquant une mauvaise qualité d'énergie qui peut détruire des appareils électroniques sensibles.

Un autre problème peut persister dans le cas où la production de l'énergie électrique par les générateurs renouvelables est suffisante à la demande de la charge. Dans ce cas la quantité du carburant économisé peut alors être augmentée en faisant fonctionner les générateurs Diesels en intermittence. Ces générateurs démarrent et s'arrêtent en fonction de la variation de l'énergie renouvelable et de la charge.

Parfois la production de l'énergie renouvelable soit plus importante que la consommation de l'énergie, la présence d'un système de stockage comme les batteries peut fonctionner favorablement.

Plusieurs études et recherches ont été élaborées afin de trouver des solutions aux problèmes de fonctionnement des SH [73] ont fait un travail d'analyse concernant un type de SH Eolien/Diesel, ils ont trouvé que plusieurs facteurs contribuent à la fluctuation de tension parmi eux :

- ✓ Une chute de tension causée par les surtensions des courants de charge.
- ✓ Le démarrage de la machine asynchrone dans l'éolienne produise une puissance réactive jouant un rôle de déséquilibrage de puissance dans le système. L'utilisation d'une MAS de petite taille en la démarrant doucement peut supprimer le problème.
- ✓ Des variations en fréquence lorsque l'éolienne produit plus de puissance que nécessaire, dans ce cas le moteur Diesel perd le contrôle de la vitesse du rotor.

De nombreuses solutions techniques peuvent être mises en œuvre pour remédier aux problèmes ci-dessus. Toutefois, dans toute production d'électricité, les implications économiques des solutions doivent être examinées très attentivement. Dans le même aspect la tâche de diagnostic des systèmes hybrides est trop importante pour trouver des solutions aux problèmes qui apparaissent dans les systèmes SH. Dans [74] l'auteur a bien présenté des méthodes de diagnostic des systèmes hybrides basés sur l'utilisation d'un modèle afin d'atteindre un objectif de diagnostiquer les problèmes à partir de la connaissance structurelle, comportementale ou fonctionnelle du système, en représentant ces connaissances séparément

de la connaissance sur la tâche de diagnostic. Ce consiste à détecter à l'aide d'une classification floue, les fautes qui présentent les mêmes symptômes à partir d'une connaissance préalable des états de défaillance obtenus par apprentissage afin de réduire les chemins ou les scénarios à explorer lors de la deuxième phase. La deuxième étape sert à diagnostiquer la faute parmi celles détectées à l'étape précédente.

#### **II.3.4 Structure d'un système hybride**

Trois critères peuvent être pris en compte dans le classement en fonction de la structure du système. Le premier critère est la présence ou non d'une source d'énergie classique. Cette source conventionnelle peut être un générateur diesel, une micro turbine à gaz, et dans le cas d'une étude du réseau électrique complète, une centrale entière. Un second critère possible est la présence ou non d'un dispositif de stockage qui permet d'assurer une meilleure satisfaction des charges électriques pendant la période d'absence d'une ressource primaire convertie en électricité. Les dispositifs de stockage peuvent être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoir à hydrogène, des volants d'inertie, etc.

La dernière classification possible est celle relative au type de source d'énergie renouvelable utilisée, la structure du système peut contenir un système photovoltaïque, une éolienne, un convertisseur hydraulique (une centrale hydroélectrique, l'utilisation des vagues ou bien une combinaison de ces deux sources). Un critère important pour la sélection de la source utilise le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit de l'installation du système hybride. Un autre facteur déterminant est le consommateur électrique alimenté, son importance détermine le besoin d'une source supplémentaire, d'un dispositif de stockage et ou d'une source conventionnelle, etc... [75], [76]. Une synthèse non exhaustive est présentée dans [77].

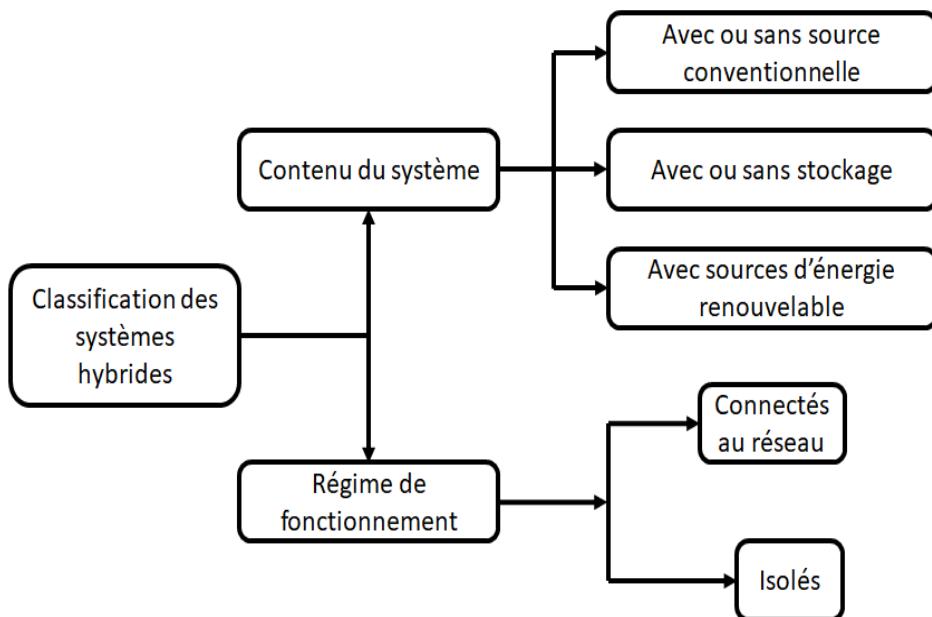


Figure II.9. Classification des systèmes hybrides

#### II.3.4.1. Système hybride avec source d'énergie conventionnelle

##### II.3.4.1.1. Système photovoltaïque/source conventionnelle

Ce type de système hybride est utilisé le plus souvent dans des sites qui se caractérisent par un climat chaud comme par exemple l'Algérie et l'Arabie saoudite où le potentiel solaire est important. L'objectif de ces systèmes lorsqu'ils travaillent en mode autonome, est d'alimenter sans interruption une maison, un bâtiment de logements ou administratif ou un village. D'autres systèmes alimentent des centres de recherche qui sont également connectés au réseau électrique.

Les systèmes autonomes contiennent souvent des batteries mais aussi d'autres dispositifs de stockage. Les batteries et le champ PV produisent du courant continu. Par contre, les moteurs Diesels peuvent entraîner des générateurs continus ou alternatifs. On distingue différentes structures de systèmes selon le type de machine électrique couplée avec le moteur Diesel. Ces structures ont été décrites et classifiées selon le type de flux énergétiques [77], [78].

a. La première configuration est la connexion série. Dans ce cas, le générateur Diesel est connecté sur le bus courant continu. La connexion peut être directe (dans le cas d'un générateur de courant continu) ou à travers un redresseur. L'installation PV et la batterie sont aussi liées à ce bus. Le consommateur est alimenté par un onduleur. Le schéma de principe d'un système hybride avec une telle configuration, est présenté sur la Figure II.10.

Dans cette configuration, le générateur Diesel peut alimenter la charge à travers les convertisseurs électroniques ou charger la batterie. D'après la stratégie de gestion du système

hybride, l'énergie produite par l'installation photovoltaïque peut directement alimenter la charge ou passer par la batterie. Cette dernière a pour rôle de fixer la tension du bus continu et diminuer le recours au générateur Diesel (minimiser le coût du Diesel) [78], [79].

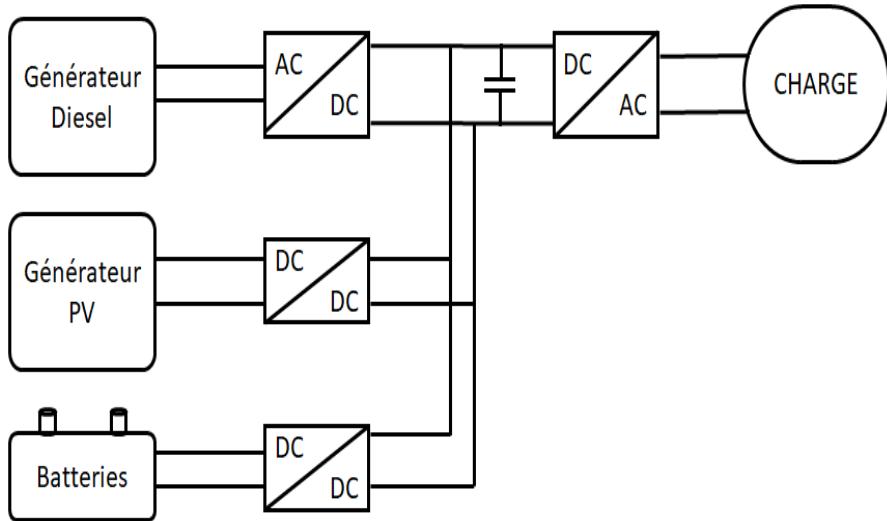


Figure II.10. Système hybride avec connexion série

### **Avantages :**

- Dimensionnement facile du générateur Diesel.
- Schéma électrique simplifié à cause de l'absence de commutation des sources d'énergie en courant alternatif.
- Mise en marche du générateur Diesel n'est pas liée avec une interruption de l'alimentation électrique.
- Grâce à l'onduleur, le consommateur peut être alimenté avec une tension, dont la forme du signal, la valeur et la fréquence sont convenables.

### **Inconvénients :**

- Onduleur ne peut pas travailler en parallèle avec le générateur Diesel. C'est pourquoi il doit être dimensionné de manière qu'il puisse couvrir la charge maximale possible.
- Batterie doit avoir un grand volume.
- Rendement relativement faible dans le cas d'un générateur Diesel à courant alternatif, parce que la puissance fournie est convertie deux fois avant d'arriver au consommateur.
- Avarie éventuelle de l'onduleur provoque une coupure totale de l'alimentation électrique.

b. La deuxième configuration possible est à commutation. Elle est souvent utilisée malgré quelques inconvénients. Le consommateur peut être alimenté soit par la source conventionnelle, soit par l'installation PV et la batterie via l'onduleur. L'alimentation par les deux simultanément n'est pas possible. Le générateur Diesel peut charger la batterie par

l'intermédiaire d'un redresseur. La gestion du système doit être automatique à cause de la complexité du système hybride. Le schéma du système est présenté sur la Figure II.11 [75], [77].

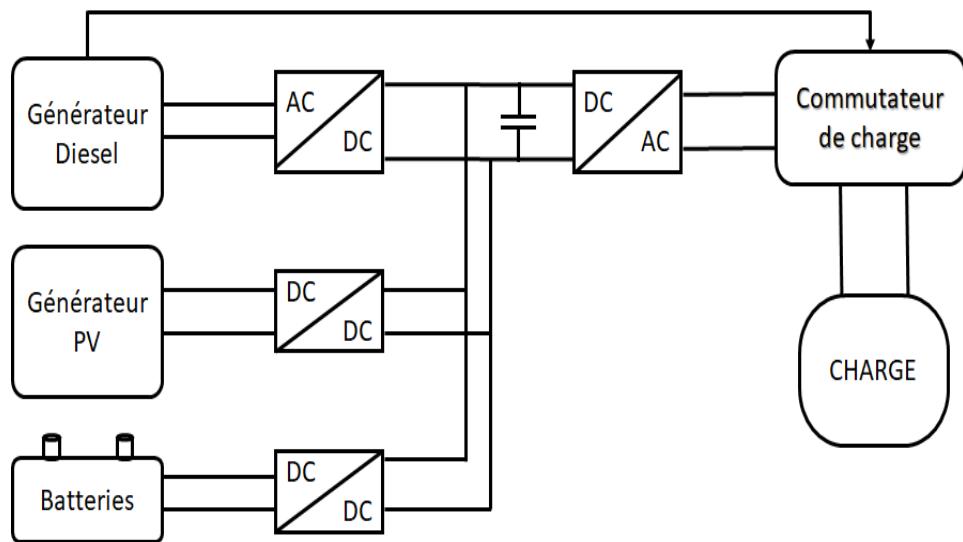


Figure II.11. Système hybride à commutation

### **Avantages :**

- Système a un rendement plus haut, parce que le générateur Diesel peut alimenter directement la charge, d'où une baisse de la consommation de carburant.
- Onduleur peut assurer au consommateur la tension demandée en forme et valeur.
- Avarie de l'onduleur n'engendrera pas l'arrêt complet de l'alimentation électrique, parce que la charge peut être satisfaite par le générateur Diesel.

### **Inconvénients :**

- Apparition d'une coupure instantanée de l'alimentation lors de la commutation des sources.
- Générateur et onduleur doivent être dimensionnés pour la consommation maximale du système. De cette façon, ils fonctionnent avec un moindre rendement lors des périodes de faible charge.
- Construction complexe.

c. La dernière configuration d'un système hybride PV/source conventionnelle est à connexion parallèle. Ici le générateur Diesel est interconnecté sur le bus de courant alternatif. L'installation PV et la batterie sont liées sur un autre bus de courant continu. Les deux bus sont connectés à l'aide d'un convertisseur électronique bidirectionnel. Il peut travailler soit comme redresseur, lorsque le générateur Diesel couvre la consommation électrique et participe dans le chargement de la batterie, soit comme onduleur, quand la charge est

satisfait par les panneaux photovoltaïques et/ou la batterie. De cette façon, la charge peut être alimentée par les deux bus simultanément. Le schéma d'un tel système hybride est représenté sur la Figure II.12. [78].

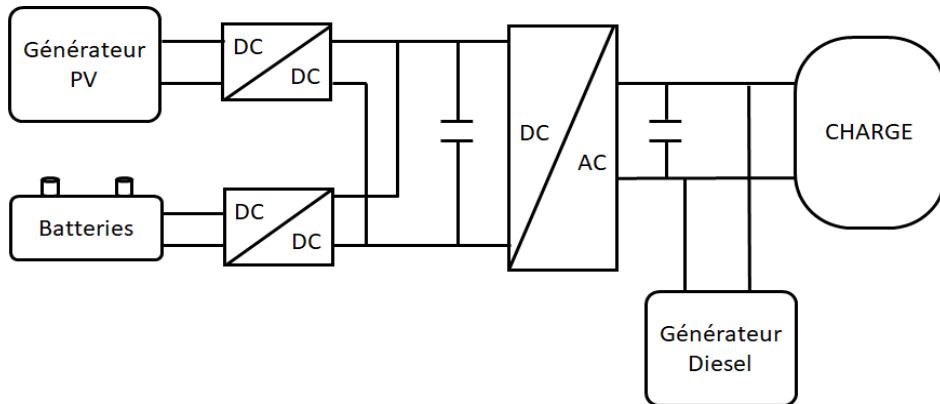


Figure II.12. Système hybride à connexion parallèle

### Avantages :

- Les composants du système ne doivent pas être dimensionnés pour la charge totale, parce que le consommateur peut être alimenté par les deux sources en même temps.
- Un meilleur rendement, parce que les sources fonctionnent avec une puissance plus proche de leur puissance nominale. De plus il n'y a pas une conversion de l'énergie produite par le générateur Diesel.
- Une diminution du nombre de convertisseurs électroniques, ce qui diminue le câblage nécessaire et l'investissement initial pour la construction du système hybride.
- Une avarie du convertisseur électrique ne provoque pas de coupure de l'alimentation de la charge.

### Inconvénients :

- Le contrôle automatique est obligatoire pour le fonctionnement correct du système.
- Le convertisseur électrique doit fournir une tension sinusoïdale, pour que la synchronisation avec le générateur diesel soit possible.
- Le personnel, qui s'occupe du fonctionnement correct du système, doit être qualifié.
- Les batteries vieillissent rapidement (pas de chargeur).
- Le bus continu est plus difficile à contrôler.

#### II.3.4.1.2 Système Eolien/Source Conventionnelle

Les recherches sur les systèmes hybrides Eolien/Diesel se distinguent des études sur les systèmes hybrides photovoltaïques car les éoliennes sont capables de produire du courant

alternatif identique à celui produit par le générateur Diesel. De cette façon, il n'y a pas une grande diversité des configurations du système hybride.

Ces systèmes sont plus répandus sur les îles, où les brises de mer et le vent favorisent l'utilisation de l'énergie éolienne pour la production d'électricité. Des études ont été réalisées sur des systèmes installés sur des îles de diverses tailles petites comme les îles Canari, en passant par des îles moyennes comme la Corse (France), jusqu'aux grandes îles comme la Grande Bretagne [79], [80].

#### **II.3.4.1.3 Systèmes Photovoltaïque/Eolien/Diesel**

La mise en place d'un tel système a pour objectif de diversifier les sources d'énergie renouvelable. On recherche ainsi une diminution plus significative de la quantité de carburant consommé puisque les sources renouvelables peuvent se compléter et fournir une plus grande quantité d'énergie. Une partie des travaux est orientée vers des systèmes installés ou vers la conception de nouveaux systèmes. On trouve aussi des études d'interconnexion de systèmes dans le réseau électrique, dans l'état de New York ou en Arabie Saoudite. D'autres auteurs optimisent la configuration du système selon divers critères : LPSP probabilité de perte de charge, combinaison d'un coût minimal du système et d'une quantité minimale d'émissions nuisibles auxquels s'ajoute la charge non satisfaite minimale. Pour trouver le système optimal on utilise des algorithmes de Pareto, des algorithmes génétiques et évolutifs ou de la logique floue. Ces systèmes alimentent des maisons et des refuges ou des villages. Ils peuvent être autonomes ou interconnectés avec le système électrique du pays. Le stockage peut être sous forme de batteries, de réservoir d'hydrogène avec électrolyseur et pile à combustible ou d'une combinaison des deux.

#### **II.3.4.2. Systèmes hybrides sans source conventionnelle**

Ces systèmes hybrides fonctionnent surtout en mode autonome dans des sites où l'approvisionnement en carburant Diesel où le raccordement au réseau électrique est difficile, voire même impossible. Dans la suite de ce paragraphe, quatre configurations de système hybride avec ou sans stockage, seront présentées.

##### **II.3.4.2.1 Système hybride photovoltaïque/stockage**

L'installation photovoltaïque doit être raccordée avec une autre source d'énergie, pour qu'il soit possible de satisfaire la charge durant la nuit ou par temps nuageux. Ces systèmes alimentent soit des maisons, soit des villages. Certains travaux traitent la modélisation et

l’analyse, d’autres traitent le dimensionnement optimisé des composants du système. Le critère d’optimisation le plus souvent utilisé est la probabilité de perte d’alimentation. La stratégie de gestion de l’énergie a été étudiée par des algorithmes pour le suivi du point de puissance maximale qui ont été développés à partir de la logique floue. La production photovoltaïque d’hydrogène est également étudiée par électrolyseur pour différentes technologies [75], [77].

Le stockage est parfois idéal [81], un banc de batteries, un électrolyseur avec réservoir d’hydrogène ou une combinaison de deux dispositifs de stockage différents comme électrolyseur et batterie [82], ou électrolyseur et supra-condensateur [83]. L’utilisation de supra-condensateurs est de conception très récente. Ils sont utilisés pour un stockage très court avec une réactivité de quelques dixièmes de secondes, tandis que l’électrolyseur et le réservoir d’hydrogène permettent un stockage plus important en termes de quantité stockée mais plus lent [84].

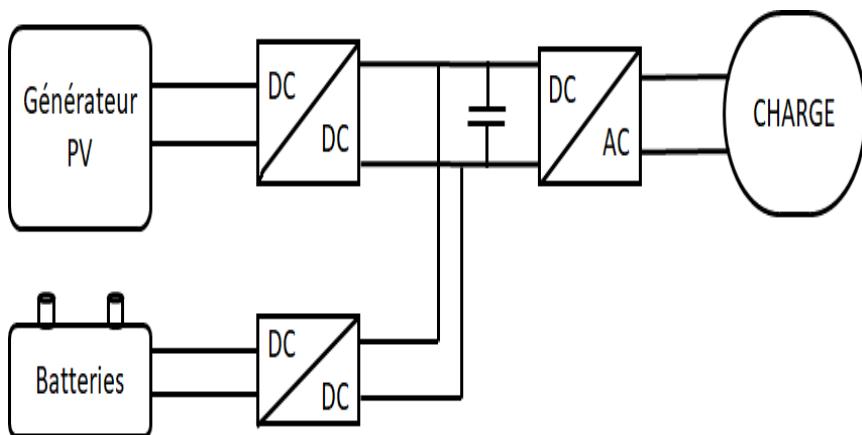


Figure II.13. Système hybride PV/Stockage

#### II.3.4.2.2 Système hybride Eolien/Stockage

L’interconnexion du dispositif de stockage avec un générateur éolien peut avoir deux objectifs possibles : soit un rôle de tampon lorsque le système fonctionne en parallèle avec le réseau électrique, le dispositif permet alors de lisser les variations rapides de la puissance électrique en provenance de l’éolienne, soit un rôle de stockage à plus long terme, en régime autonome, pour permettre l’alimentation du consommateur lors des périodes de faible vitesse du vent. Le réseau électrique peut être de grande taille, cas des Etats-Unis [85], ou de faible taille. Les recherches se distinguent aussi par l’intervalle de temps considéré. Dans le cas d’étude de processus à variation lente [86] et [87] s’intéressent à l’énergie obtenue par chacune des sources. D’autres études sont réalisées sur les processus de courte durée [88], [89].

Comme pour les autres systèmes précédemment présentés, ils peuvent alimenter soit un ménage, soit un bâtiment (hôtel) et même un village. Les modes de stockage étudiés peuvent être une batterie, un électrolyseur avec réservoir d'hydrogène, une combinaison des deux, un stockage par air comprimé, ou une combinaison d'un électrolyseur avec réservoir d'hydrogène et un super-condensateur.

Lorsque le système opère en parallèle avec le réseau électrique, la stratégie de gestion de la puissance joue un rôle important.

Sur le plan économique, certains auteurs se contentent de donner les prix des divers organes du système, d'autres approfondissent l'analyse économique en calculant le prix du kWh produit [75].

#### **II.3.4.2.3 Système hybride Photovoltaïque/Eolien/Stockage**

L'inconvénient majeur des deux systèmes hybrides précédemment décrits est le manque de diversité de l'alimentation parce que la ressource primaire utilisée est unique. Cela induit plusieurs inconvénients comme par exemple le surdimensionnement des éléments dont l'objectif est d'assurer une alimentation continue, ce qui va se traduire par un investissement initial élevé (et donc limiter le développement de ces systèmes) et une augmentation du prix du kWh produit. Ces inconvénients peuvent être limités ou même éliminés par l'incorporation d'une seconde source d'énergie. Les études concernent des systèmes existants, des bancs d'essais ou des travaux théoriques. Dans ce dernier cas, on étudie l'influence de l'ajout d'une seconde source d'énergie dans un système déjà existant où on élabore un nouveau système hybride. La plupart des travaux concerne l'optimisation de la configuration du système hybride selon divers critères : probabilité minimale de perte de charge, coût minimal du kWh produit, ou la combinaison de ces deux critères combine plusieurs critères d'optimisation tels que la minimisation de la probabilité de manque d'alimentation, de l'énergie produite non utilisée et du coût du kWh produit (Figure II.14).

Comme pour les autres systèmes hybrides, ils peuvent assurer l'alimentation des cellules 3G d'opérateurs mobiles, des ménages ou des villages. Ils sont installés sur tous les continents : en Afrique : Algérie, en Asie : Syrie, Malaisie ; en Amérique : Brésil, Canada. Ces systèmes fonctionnent le plus souvent en régime autonome, mais il existe des travaux sur des systèmes connectés au réseau électrique [75]. Les dispositifs de stockage sont le plus souvent des batteries, parfois un électrolyseur avec réservoir d'hydrogène ou une combinaison de batterie et stockage d'hydrogène. Les modèles de comportement ont pour paramètres d'entrée les

valeurs du rayonnement solaire et les vitesses du vent horaires, les valeurs moyennes mensuelles ou une distribution statistique de Weibull.

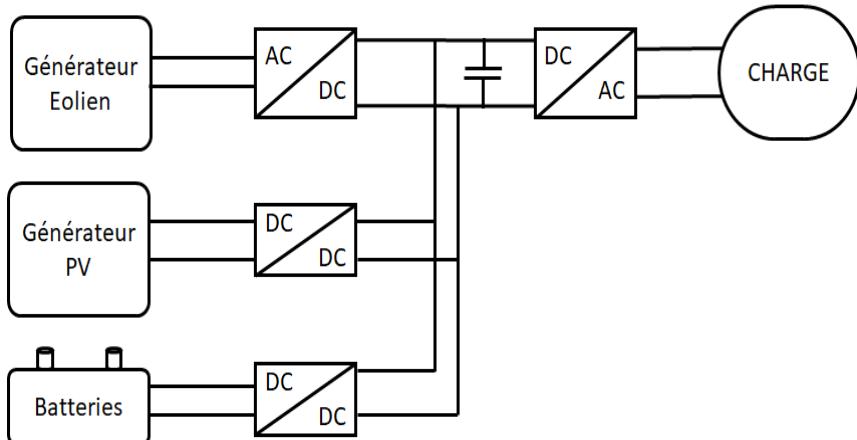


Figure II.14. Système hybride PV/Eolien/Stockage

#### II.3.4.2.4 Système hybride Photovoltaïque/Eolien sans stockage

Ce type de système hybride est très rare, parce qu'il n'assure pas une sécurité d'alimentation, il manque soit une source conventionnelle soit un dispositif de stockage. Pour cette raison, les recherches sur ces systèmes sont rares. On a pu trouver des travaux sur un système existant utilisé dans un but éducatif en Northern Iowa, Etats-Unis ; un projet de système hybride pour le réseau électrique d'une île Croate [90], une estimation des performances [91]. Urli et Kamenski [90] se basant sur l'hypothèse d'une complémentarité des énergies du vent et du soleil. De cette façon, le système fournira toujours de la puissance dans le réseau électrique insulaire. Son argumentation est d'ordre économique. L'étude théorétique de Tina utilise la convolution probabiliste [75].

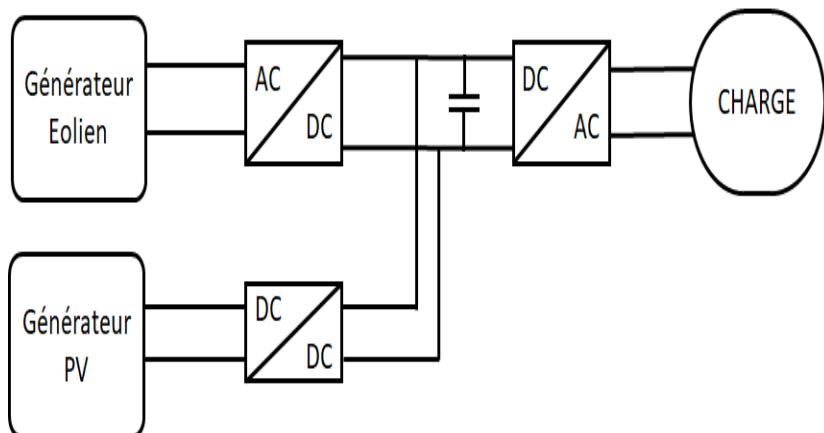


Figure II.15. Système PV/Eolien sans stockage

## **II.4. CONCLUSION**

Dans la première partie de ce chapitre nous avons donné une présentation détaillée des différentes sources d'énergies renouvelables qui existent, telles que l'énergie hydraulique, solaire, éolienne, biomasse et géothermique...etc. Dans la seconde partie nous avons étalé la définition et les différentes structures des systèmes hybrides de génération de l'énergie électrique, où nous avons constaté que l'avantage principal de l'utilisation des sources renouvelables dans la construction d'un système hybride peut aider à résoudre plusieurs problèmes qui apparaissent au niveau de l'impact de l'utilisation des ressources classiques.

## ***CHAPITRE III***

---

# ***DESCRIPTION DES SYSTÈMES DE PRODUCTION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE***

---

### III.1. INTRODUCTION

La production d'électricité décentralisée à partir des sources d'énergies renouvelables, offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant, le caractère aléatoire de ces sources nous impose d'établir des règles de dimensionnement et d'utilisation de ces systèmes pour les exploiter au mieux. Nous nous intéresserons dans ce chapitre aux systèmes de production existants, en particulier ceux relatifs aux sources solaires et éoliennes constituant un système hybride.

### III.2. DESCRIPTION D'UN SYSTEME PV

Le mot « photovoltaïque » vient de grec « photos » et signifiant *lumière* et de « volta » du *nom du physicien italien* qui en 1800 découvrit la pile électrique. Mais c'est en 1839 que le français Antoine Becquerel fut le premier à mettre en évidence cette conversion particulière d'énergie.

#### III.2.1. Principe de fonctionnement du photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type N et dopée de type P. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P devient chargée négativement [92]. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P, une jonction PN a été alors formée.

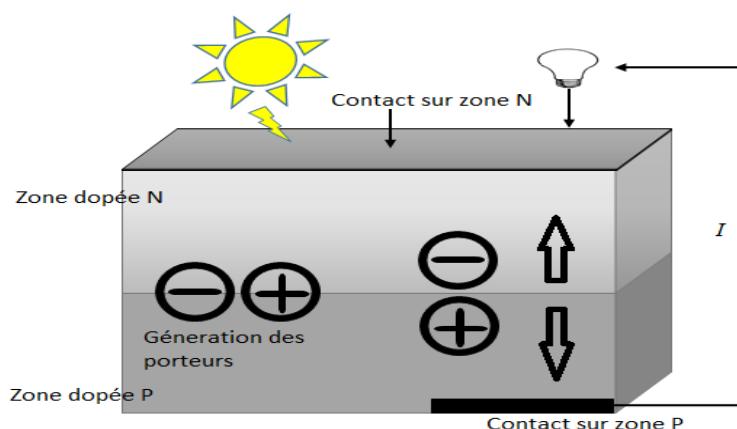


Figure III.1. Fonctionnement d'une cellule solaire

Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont bombardés par les photons constituant la lumière ; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être " arrachés / décrochés " : si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique. Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons " décrochés " créent une tension électrique continue faible (Figure III.2). Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque. [93]

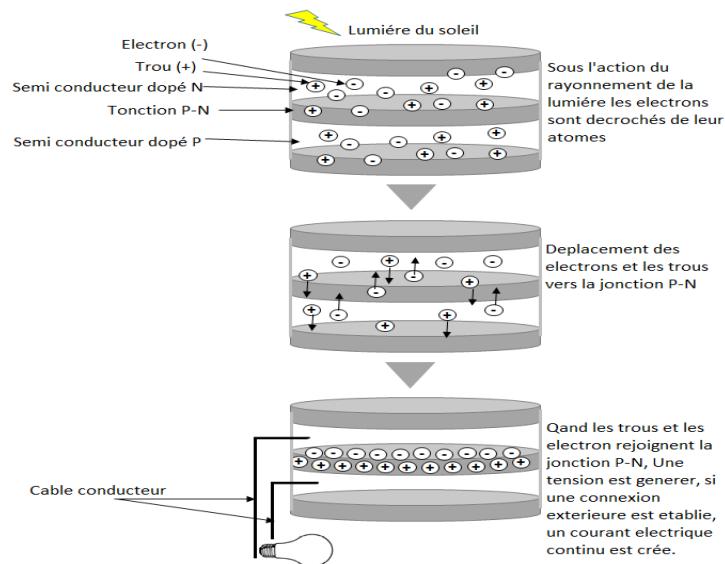


Figure III.2. Effet photovoltaïque

### III.2.2. Technologie des cellules solaires

Les technologies des cellules solaires se divisent en deux grandes familles [94]

#### III.2.2.1 La cellule amorphe

Les coûts de fabrication sont sensiblement meilleur marché que ceux du silicium cristallin. Les cellules amorphes sont utilisées partout où une alternative économique est recherchée, ou bien quand très peu d'électricité est nécessaire (par exemple, alimentation des montres, calculatrices, luminaires de secours). Elles sont souvent utilisées là où un fort échauffement des modules est à prévoir. Cependant, le rendement est de plus de 2 fois inférieur à celui du silicium cristallin. Les cellules en silicium amorphe sont actuellement de moins en moins utilisées.

D'autres techniques semblent gagner du terrain aujourd'hui, ce sont les technologies en ruban et les couches minces [95].

### III.2.2.2 La cellule cristalline

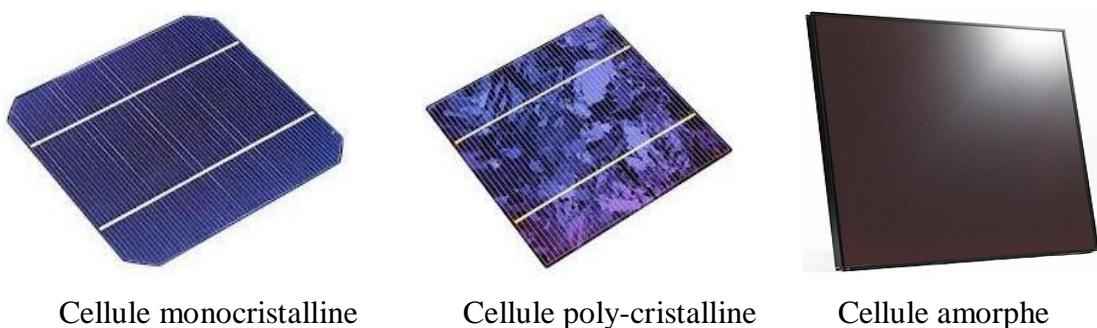
C'est une technologie robuste (espérance de vie de 30 ans), dont le rendement est de l'ordre de 13%. Ces cellules sont adaptées à des puissances de quelques centaines de watts à quelques dizaines de kilowatts. Elles représentent plus de 80% de la production mondiale.

#### III.2.2.2.1 La cellule monocristalline

C'est la cellule la plus proche du modèle théorique, elle est effectivement composée d'un seul cristal divisé en deux couches. Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie, plus onéreux, il est cependant plus efficace que la cellule poly-cristalline.

#### III.2.2.2.2 La cellule poly-cristalline

Cette cellule, grâce à son potentiel de gain de productivité, s'impose aujourd'hui, elle représente plus de 60% de l'ensemble de la production mondiale. Son avantage par rapport au silicium monocristallin est qu'elle produit peu de déchets de coupe et qu'elle nécessite 2 à 3 fois moins d'énergie pour sa fabrication, son rendement est de 13% jusqu'à 20% au laboratoire.



Cellule monocristalline      Cellule poly-cristalline      Cellule amorphe

Figure III.3. Type de cellules photovoltaïques

## III.3. Modélisation des cellules photovoltaïques

### III.3.1. Configuration physique

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément. Plusieurs modèles électriques ont été proposés pour représenter la cellule photovoltaïque. Nous avons les deux diodes pour représenter les phénomènes de polarisation de la jonction PN [96]. Ces diodes symbolisent la recombinaison de porteurs minoritaires, d'une part en surface des matériaux et d'autre part dans le volume des matériaux. Le schéma de la cellule photovoltaïque devient dans ce cas celui de la Figure III.4.

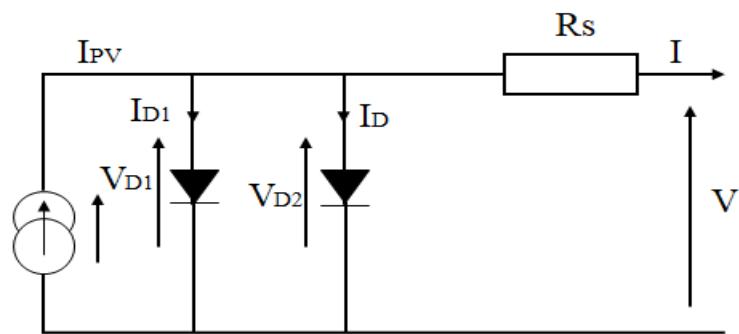


Figure III.4. Schéma électrique d'une cellule PV

### III.3.2 Panneau Photovoltaïque

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW à quelques MW sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en série (augmenter la tension) et en parallèle (augmenter le courant) pour former un panneau ou champ PV. La quantité d'électricité dans l'ensemble des composants du panneau PV dépend [97] :

- De la taille du panneau
- De l'ensoleillement du lieu d'utilisateur
- De la saison d'utilisateur

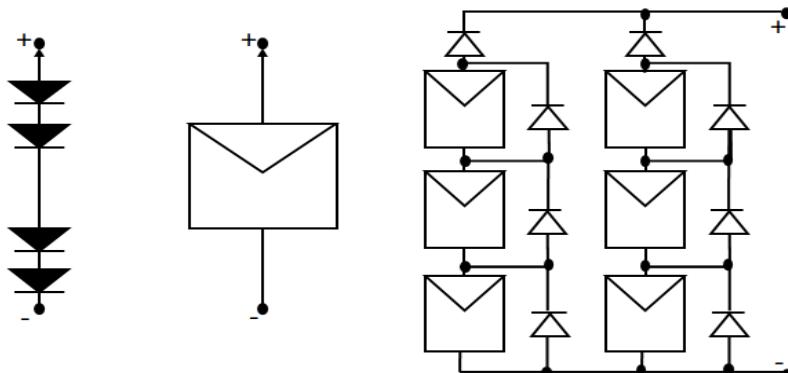


Figure III.5. Cellule, module et panneau photovoltaïque [96]



Cellule photovoltaïque

Panneau photovoltaïque

Champ photovoltaïque

Figure III.6. Schéma réelle d'une cellule, d'un panneau et d'un champ PV

### **III.3.3 Avantages d'une installation PV [98]**

Les systèmes solaires électriques offrent plusieurs avantages, dont les suivants :

- Ils sont de fonctionnement sûr, non polluants et silencieux ;
- L'utilisation de l'énergie solaire permet d'éviter l'utilisation d'énergies fossiles ou nucléaires pour fabriquer la même quantité d'électricité et donc de diminuer les émissions de gaz à effet de serre ou la production de déchets nucléaires.
- De manière générale, 100m<sup>2</sup> de panneaux solaires évitent la consommation d'1TEP d'énergies fossiles (Tonne équivalent pétrole).
- Une production d'1MWh permet de substituer 0,086TEP d'énergie et d'éviter l'émission de 120 [kg] de CO<sub>2</sub>.
- Il n'y a pas de pièce en mouvement, ni de bruit et pas de production de polluants.
- Sur la base de 108g de CO<sub>2</sub> émis par kWh électrique produit, la quantité de CO<sub>2</sub> évitée est de près de 4tonnes/an.
- Ils sont très fiables.
- Ils n'exigent presque aucun entretien.
- Ils sont flexibles et peuvent être élargis à n'importe quel moment pour répondre aux besoins en matière d'électricité.
- Ils donnent une autonomie accrue (fonctionnement indépendant du réseau ou système de secours pendant les pannes d'électricité).
- Production d'électricité décentralisée.

### **III.3.4 Inconvénients d'une installation PV**

- Ils ne conviennent pas aux utilisations à forte consommation d'énergie comme le chauffage.
- S'il est souhaitable d'utiliser l'énergie solaire à cette fin, il sera préférable de considérer d'autres solutions de rechange comme un chauffe-eau solaire, qui produit de la chaleur beaucoup plus efficacement.
- Les systèmes raccordés au réseau sont rarement de la technologie PV.
- Étant donné que ces systèmes peuvent être coûteux, le choix d'un système photovoltaïque dépend souvent d'une décision personnelle axée sur le style de vie ; tout comme le type de maison ou de voiture que vous pourriez avoir.

- Beaucoup d'appareils vendus dans le marché fonctionnent au 220 à 230V alternatif. Or, l'énergie issue du générateur PV est unidirectionnelle et de faible voltage (<30V), elle doit donc être transformée par l'intermédiaire d'un onduleur.

## III.4 DESCRIPTION D'UN SYSTEME EOLIEN

### III.4.1 Origine

L'énergie éolienne est une ressource d'origine solaire, provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et la masse d'air est en perpétuel déplacement. Environ 0,25% du rayonnement solaire total est converti en énergie éolienne [99]. L'énergie éolienne est actuellement la moins chère de toutes les énergies renouvelables existantes. Une étude sur l'état de l'art de l'éolienne montre que le coût à cette époque du kWh d'origine éolienne était de 3.79 \$ [100].

Le Tableau III.1 présente l'évolution durant les dernières années de la puissance éolienne installée dans les principaux pays.

Tableau III.1. Puissance installée d'origine éolienne dans les principaux pays [101].

Payé	2000(MW)	2002(MW)	2004(MW)
<b>Allemagne</b>	5430	12001	16629
<b>USA</b>	2550	4708	6740
<b>Espagne</b>	2250	4144	8263
<b>Danemark</b>	2140	2889	3117
<b>Inde</b>	1167	1702	3000
<b>Italie</b>	350	785	1125
<b>Pays-Bas</b>	449	677	1078
<b>Grande -Bretagne</b>	391	562	888
<b>Chine</b>	302	399	764
<b>France</b>	69	153	416

### III.4.2 Définition de l'énergie éolienne

L'éolienne est un dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, elles sont généralement utilisés pour produire de l'électricité et entre dans la catégorie des énergies renouvelables Figure III.7 [102].

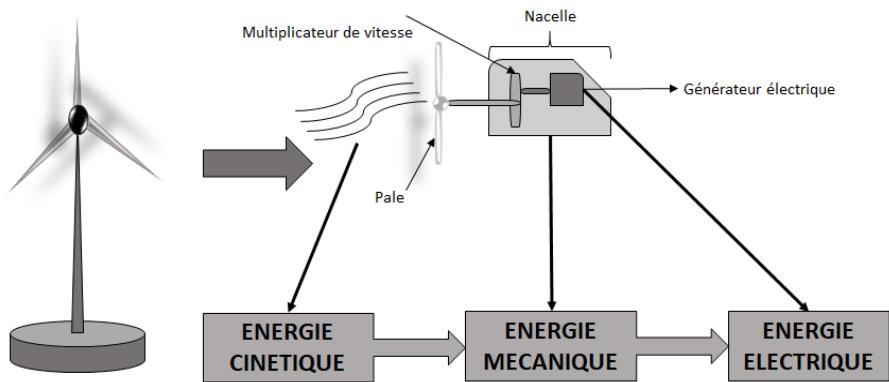


Figure III.7. Conversion de l'énergie cinétique du vent

### III.4.3 Constitution d'un aérogénérateur [96]

Bien qu'il existe des turbines à axe vertical, les machines à axe horizontal dominent très largement le marché des petites puissances (Figure III.8). Les turbines sont toujours bipales ou, le plus souvent, tripales. Dans les chaînes de conversions électromécaniques conventionnelles, on intercale entre la turbine et la génératrice un multiplicateur mécanique à engrenages.

La génératrice est alors très souvent une machine asynchrone à cage, voire à rotor bobiné, et à double alimentation pour un fonctionnement à vitesse variable (Figure III.9). Mais les multiplicateurs mécaniques ont leurs inconvénients, ils nécessitent une maintenance accrue et nuisent à la fiabilité surtout dans les grandes puissances. C'est la raison pour laquelle la tendance est à l'entraînement direct. La génératrice est alors une machine synchrone (rotor bobiné ou aimants) à très grand nombre de pôles et donc à fort couple.

Les puissances moyennes unitaires des aérogénérateurs sont passées de 50kW, à 200kW (1990), 500kW (1998) à plus de 1MW en 2002 (1,4MW en Allemagne). L'accroissement des puissances permet des réductions de coût au kW ; les aérogénérateurs les plus puissants en 2003 frôlent les 5MW avec des diamètres de la turbine proches de 120m ; la puissance actuelle est de l'ordre de 22,3MW [98].



Figure III.8. Différents types de turbines



Figure III.9. Composantes de l'aérogénérateur

1. Les pales : sont les capteurs de l'énergie cinétique qui transmettent l'énergie au rotor.
2. Le moyeu : il est pourvu d'un système qui permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation.
3. L'arbre primaire (ou arbre lent) : relie les pales au multiplicateur.
4. Le multiplicateur : il permet de réduire le couple et d'augmenter la vitesse. C'est l'intermédiaire entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire.
5. L'arbre secondaire : il amène l'énergie mécanique à la génératrice. Il est équipé d'un frein à disque mécanique qui limite la vitesse de l'arbre en cas de vents violents.
6. Le générateur électrique : il assure la production électrique. Sa puissance peut atteindre jusqu'à 5MW. Il peut-être une dynamo (produit du courant continu) ou un alternateur (produit du courant alternatif). L'alternateur est le plus utilisé pour des raisons de coût et de rendement.
7. Le mât : c'est un tube en acier, pilier de toute l'infrastructure. Sa hauteur est importante, plus elle augmente, plus la vitesse du vent augmente mais en même temps le coût de la structure augmente. En général, le mât a une taille légèrement supérieure au diamètre des pales.
8. Le système d'orientation de la nacelle : c'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter l'éolienne et de la verrouiller dans l'axe du vent grâce à un frein.
9. Le système de refroidissement : il est à air, à eau ou à huile, il est destiné au multiplicateur et à la génératrice.
10. Les outils de mesure du vent : girouette pour la direction et anémomètres pour la vitesse. Les données sont transmises à l'informatique de commande.
11. Le système de contrôle électronique : il gère le fonctionnement général de l'éolienne et de son mécanisme d'orientation.
12. Au pied du mât se trouve un transformateur.

### III.4.4 Types de machines électriques utilisées

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement. Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de cette configuration. Les avantages principaux des deux types de fonctionnement sont les suivants. [103].

#### III.4.4.1 Fonctionnement à vitesse fixe

- Système électrique plus simple.
- Pas besoin d'un système électronique de commande (cher) et plus grande fiabilité.
- Peu de probabilité d'excitation à la fréquence de résonance des éléments de l'éolienne.

#### III.4.4.2 Fonctionnement à vitesse variable [103] [104]

- Augmentation du rendement énergétique.
- Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance.
- Réduction des efforts subis par le train de puissance.
- Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

Les deux types de machines électriques les plus utilisés dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et asynchrones sous leurs diverses variantes.

##### III.4.4.2.1 Générateurs synchrones

C'est ce type de machines qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). La gamme de puissance de ces générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien varie de 500kW à 2MW.

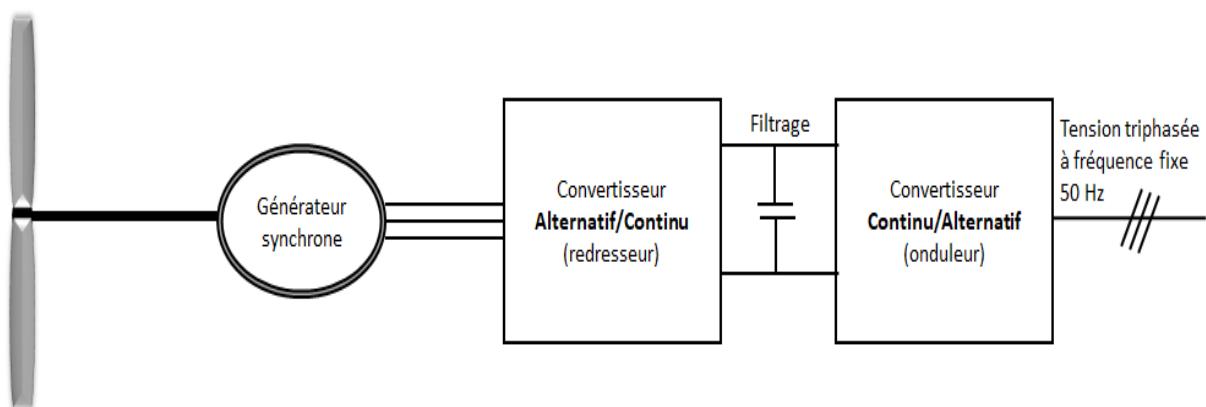


Figure III.10. Eolienne à base d'un générateur synchrone

### III.4.4.2.2 Générateurs asynchrones

C'est ce type de machines qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très faible et moyenne puissance. La gamme de puissance de ces générateurs asynchrones utilisés dans le domaine éolien varie de moins de 20kW.

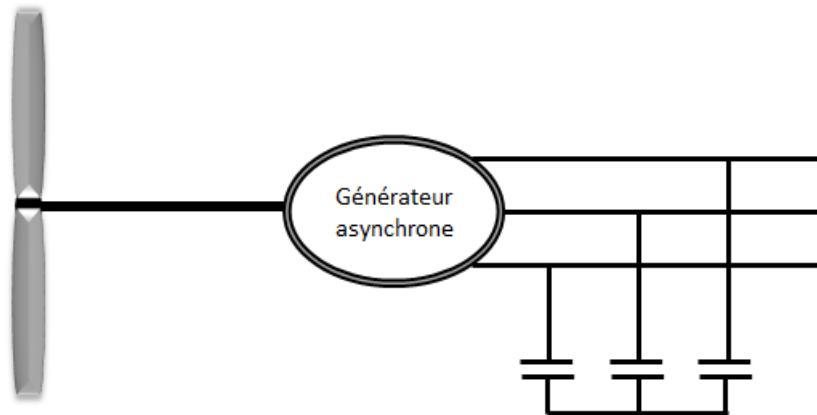


Figure III.11. Eolienne à base d'un générateur asynchrone

### III.4.4.2.3 Machines à courant continu

Elles présentent une excellente marge de variation de la vitesse de rotation, une bonne réponse dynamique et une excellente capacité de surcharge, mais elles sont chères et ont un grand poids.

### III.4.4.2.4 Générateurs à réductances variables

Ce sont des machines mécaniquement robustes ; ils ont un bon rendement à toutes les vitesses, une large marge de variation de la vitesse de rotation et leur commande est simple. [105]

## III.4.4.3 Avantages et inconvénients de l'éolien [106]

### III.4.4.3.1 Avantages

L'énergie éolienne constitue un enjeu important pour le territoire :

- Contribution à l'aménagement du territoire et l'amélioration du cadre de vie
- Création d'emplois
- Soutien pour le monde agricole
- Investissement local et société d'économie mixte
- Vitrine pour la commune

### III.4.4.3.2 Inconvénients

- Eolienne est acoustique
- Perturbations hertziennes et radars

## III.5 DESCRIPTION D'UN GENERATEUR DIESEL

### III.5.1 Fonctionnement

Dans le cas des installations autonomes, il est nécessaire de recourir au stockage ou d'ajouter un ou plusieurs groupes électrogènes diesels.

Dans un SH (système hybride), le générateur classique est généralement le moteur Diesel directement couplé au générateur synchrone (Figure III.12).

La fréquence du courant alternatif à la sortie est maintenue par un gouverneur de vitesse sur le moteur Diesel [106].

Le gouverneur fonctionne en ajustant le flux du carburant au Diesel, pour garder la vitesse du moteur et la vitesse du générateur constant.

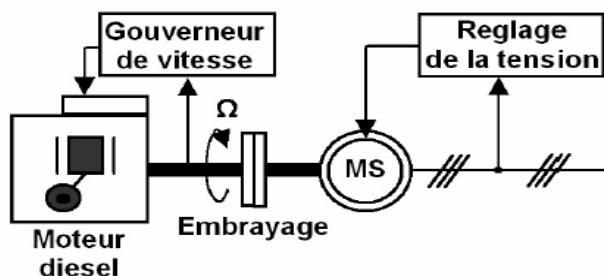


Figure III.12. Configuration du générateur Diesel

### III.5.2 Réserve tournante

La réserve tournante est définie en [107] comme étant l'exigence du système de commande définie par la capacité du générateur classique de couvrir les changements immédiats causés par l'arrêt des générateurs d'énergie renouvelable et par l'augmentation soudaine de la charge. En effet, la réserve tournante détermine la capacité instantanée de réserve minimale du GD en fonction des prévisions de la production d'énergie renouvelable et de l'évolution de la charge. Une réserve d'énergie doit être toujours disponible pour éviter l'effondrement du système lors d'une réduction soudaine de la production d'énergie renouvelable.

### **III.5.3 Temps de fonctionnement minimal**

Cette stratégie consiste à maintenir le GD en fonctionnement pour une durée minimale prédefinie en fonction de la variabilité de la charge ou de la variabilité de l'énergie renouvelable [108]. Celle-ci est utilisée pour réduire le nombre de démarrages/arrêts quand la puissance nette (la différence entre la puissance consommée par la charge et la puissance renouvelable) varie beaucoup. La minimisation du nombre de démarrages/arrêts du GD peut permettre d'éviter lustre des moteurs Diesels et leur démarreurs et en même temps réduire la consommation de carburant [109].

### **III.5.4 Hystérésis**

Cette stratégie est souvent utilisée pour commander la déconnexion du générateur Diesel [110]. Le GD est arrêté seulement si la puissance renouvelable est supérieure à la demande de la charge. Ce surplus minimal d'énergie (ou hystérésis) peut être mesuré à partir de la variation de la fréquence du réseau quand cette fréquence est fixée par la GD utilisant un régulateur type proportionnel (P) et à partir de son niveau de charge quand il utilise un régulateur type Proportionnel-Intégral (PI).

## **III.6 POTENTIELS ENERGETIQUES EN ALGERIE**

### **III.6.1 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), Figure III.13. L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de  $1\text{m}^2$  est de l'ordre de 5kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de  $1700\text{kWh/m}^2/\text{an}$  au Nord et  $2263\text{kWh/m}^2/\text{an}$  au sud du pays [111]. C'est le plus important de tout le bassin méditerranéen:

- ✓ 169.440 TWh/an.
- ✓ 5.000 fois la consommation Algérienne en électricité.
- ✓ 60 fois la consommation de l'Europe.

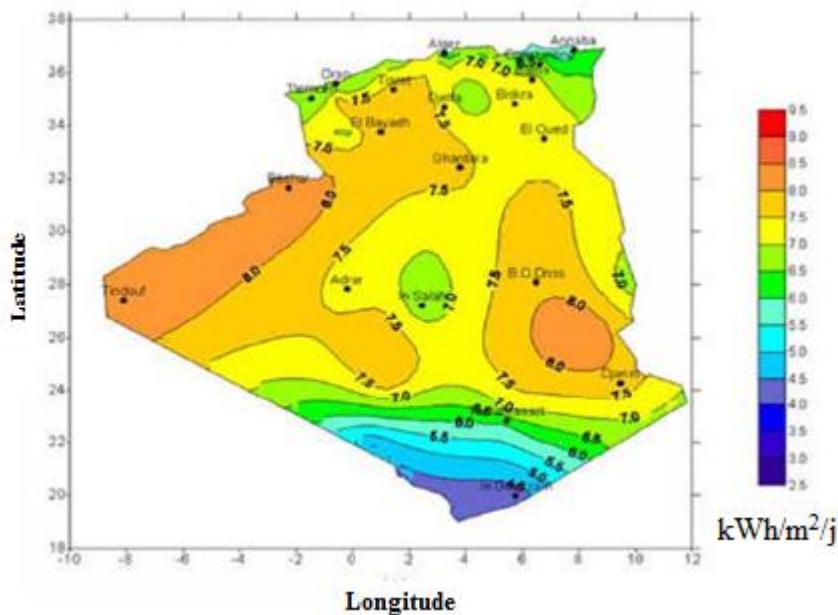


Figure III.13. Potentiel solaire en Algérie

La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est présentée dans le tableau III.2, selon l'ensoleillement reçu annuellement.

Tableau III.2. Répartition du potentiel solaire en Algérie

Région	Les cotes	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (Heure/an)	2650	3000	3500
Irradiation moyenne reçue (kWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2263

Sur la période 2011-2013 en Algérie il a été prévu d'atteindre un taux d'intégration de l'industrie algérienne de 60%. Cet objectif ambitieux est atteint grâce à la réalisation d'une usine de fabrication de modules photovoltaïques d'une capacité équivalente à 120 MW/an par le groupe Sonelgaz à travers sa filiale Rouiba-Eclairage et dont sa mise en service était fin 2013. Cette période est également marquée par des actions de renforcement de l'activité d'engineering et d'appui au développement de l'industrie photovoltaïque à travers la constitution d'une joint-venture qui regroupera les différents acteurs (Rouiba-Eclairage, Sonelgaz, CREDEG, CDER et UDTs) en partenariat avec des centres de recherche [112].

Sur la période 2014-2020, l'objectif est d'atteindre un taux d'intégration des capacités algériennes de 80%. Pour ce faire, il est prévu la construction d'une usine de fabrication de silicium. Par ailleurs, il est attendu qu'un réseau de sous-traitance nationale soit mis en place pour la fabrication des onduleurs, des batteries, des transformateurs, des câbles et autres équipements entrant dans la construction d'une centrale photovoltaïque.

L'Algérie devrait disposer également, sur la même période, de capacités de conception, de procuration et de réalisation capables d'atteindre un taux d'intégration de l'ordre de 60% par des entreprises algériennes.

Il est prévu la réalisation d'un centre d'homologation des équipements destinés aux installations des énergies renouvelables. Sur la période 2021-2030, l'objectif est d'atteindre un taux d'intégration supérieur à 80%. Ce qui explique la capacité de production de modules. L'Algérie entend mettre en valeur son potentiel solaire, l'un des plus importants au monde, en lançant des projets importants en solaire thermique.

Deux projets pilotes de centrales thermiques à concentration avec stockage d'une puissance totale d'environ 150MW chacune ont été lancés sur la période 2011-2013. Ces projets s'ajouteront à la centrale hybride de Hassi R'Mel d'une puissance de 150MW, dont 25MW en solaire [113].

### **III.6.2 Potentiel éolien de l'Algérie**

La ressource éolienne en Algérie varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et un climat très diversifiés.

La carte des vents de l'Algérie, estimée à 10m du sol est présentée dans la Figure III.14. Les vitesses moyennes annuelles obtenues varient de 2 à 6.5m/s. On remarque qu'à l'exception de la région côtière (excepté Béjaia et Oran), du Tassili et de Beni Abbes, la vitesse de vent moyenne est supérieure à 3m/s [113].

En fait, la région centrale de l'Algérie est caractérisée par des vitesses de vent variant de 3 à 4m/s, et augmente au fur et à mesure que l'on descend vers le sud-ouest. Le maximum est obtenu pour la région d'Adrar avec une valeur moyenne de 6.5m/s [113].

Cependant, nous pouvons observer l'existence de plusieurs microclimats où la vitesse excède les 5m/s comme dans les régions de Tiaret, Tindouf et Oran.

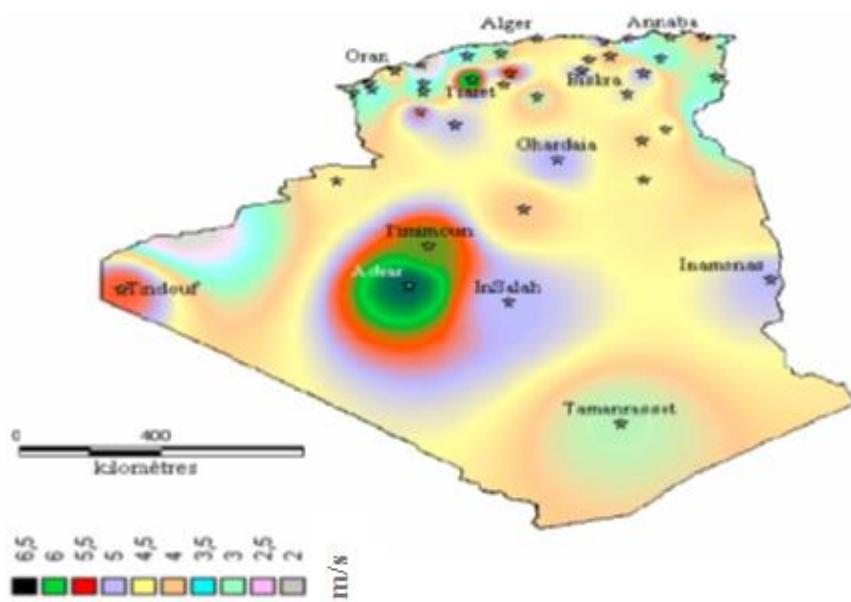


Figure III.14. Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10m du sol

Bien que l'Algérie à un régime de vent modéré (2 à 6m/s), ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau.

La ressource éolienne provient du vent, lequel est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre. Une différence de pression se crée entre certaines régions de la planète, en fonction du réchauffement ou du refroidissement local, mettant ainsi des masses d'air en mouvement.

Exploitée depuis l'Antiquité puis longtemps négligée, cette énergie connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers. À l'échelle mondiale, l'énergie éolienne maintient un taux de croissance de 30% par an depuis une dizaine d'années. L'Europe, principalement sous l'impulsion allemande, scandinave et espagnole, comptait environ 29000MW pour 40000MW de puissance installée dans le monde en 2003, en 2013 ce chiffre est multiplié par quatre, soit 121000 et 319000MW de puissance installée dans le monde.

L'Algérie vient d'inaugurer, en juillet 2014, son premier parc éolien, situé à Kabertene dans le centre du pays, au nord de la ville d'Adrar doté de douze éoliennes, fournies par le groupe espagnol Gamesa, il dispose d'une capacité de 10MW.

### III.7 ANALYSE ECONOMIQUE

L'analyse économique passe bien sûr par le calcul des coûts du projet et sa rentabilité. Divers indices comme TEP peuvent être utilisés. Cet indicateur est le moment auquel la source d'énergie devient rentable au niveau énergétique, c'est-à-dire que l'énergie fournie par la source couvre les dépenses énergétiques pour l'implantation de cette source. Les options

utilisant des énergies renouvelables peuvent être comparées à d'autres options comme l'option existante (les génératrices) ou l'option commune de la région, province ou du pays (se connecter au réseau).

Dans le cas présent, s'il y a possibilité de raccordement au réseau, il faudrait estimer les coûts associés versus les coûts des options des technologies renouvelables. S'il n'y a pas possibilité de raccordement au réseau, diverses possibilités sont disponibles : utiliser un système avec génératrice ou un système d'énergies renouvelables pour chaque maison ou besoin précis (environ 5kW – 10kW) ou faire un réseau alimenté par des énergies renouvelables pour un groupement de maisons ou de besoins, mais qui serait de plus grande capacité (environ 50kW). Ensuite, une analyse plus globale peut être faite pour les technologies afin de savoir si elles sont de bons stimulants économiques. Si le domaine est en essor et permet de créer des emplois, les technologies deviennent intéressantes. De plus, si la région présente des avantages face à d'autres pour l'implantation de cette technologie, les gouvernements veulent attirer cette industrie. Plusieurs gouvernements offrent des incitatifs pour l'utilisation des technologies renouvelables ou pour des mesures d'efficacité énergétique [113].

### **III.8 ANALYSE DE L'ASPECT SOCIAL**

L'aspect social est de façon générale l'amélioration de la condition humaine par la satisfaction de besoins essentiels et l'amélioration de la qualité de vie. Ceci intègre les principes généraux d'accès à l'emploi, à l'éducation, aux soins médicaux, aux services sociaux et à un logement de qualité. Dans de nombreux pays en voie de développement ou sous-développés, les systèmes hybrides ou photovoltaïques sont utilisés pour le dessalement de l'eau de mer pour offrir de l'eau potable ou encore pour réfrigérer les médicaments ou alimenter les équipements médicaux dans les cliniques des régions isolées.

L'utilisation de l'énergie solaire pour ce genre de besoins est essentielle à l'amélioration de la qualité de vie des gens de ces régions. De plus, l'ajout de systèmes éoliens aux systèmes photovoltaïques permet d'offrir une sécurité pour un apport en énergie continue. Pour les cliniques, par exemple, souvent le système photovoltaïque ou hybride est couplé à une génératrice puisqu'on ne peut pas permettre une défaillance du système et se retrouver sans apport d'énergie [112], [113].

De plus, plusieurs villages reculés du monde installent ou font des projets d'installations d'énergies renouvelables. Ces installations peuvent simplement être utilisées pour pomper ou chauffer de l'eau ou encore apporter un besoin minimal en énergie par exemple dans les écoles

ou centres communautaires. L'aspect social peut aussi se traduire par la responsabilité sociétale de l'entreprise. Ceci se traduit par les bonnes conditions de leurs employés, le respect des communautés environnantes et du territoire. L'employeur doit offrir de bonnes conditions de travail (santé et sécurité, hygiène et propreté des lieux) et aussi leur donner de la formation nécessaire.

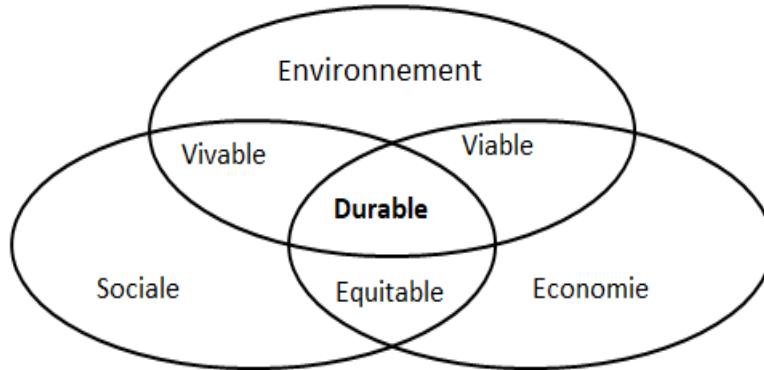


Figure III.15. Relation entre les aspects économique, social et environnemental

### III.9 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons suscité à tous les systèmes compétents dans la production d'énergie renouvelable (l'énergie solaire et éolienne). Nous avons constaté que l'énergie solaire qui a besoin de panneaux solaires pour la convertir en énergie électrique, est de tailles très diversifiées selon la nature de la région. Et de même pour l'énergie éolienne qui dispose de plusieurs types de turbines (bipales, tripales). Mais le troisième système est un objectif global « système hybride » qui contient PV/Eolien/GD, est le système le plus efficace, mais le coût élevé d'investissement a réduit son utilisation dans tous les pays du Tiers-monde. Par contre les pays développés utilisent beaucoup les types fabriqués et donc le coût est moindre.

***CHAPITRE IV***

---

***MODÉLISATION ET  
SIMULATION DU SYSTÈME  
HYBRIDE***

---

## IV.1 INTRODUCTION

Après avoir étudié et cité les différents composants du système Eolien-Photovoltaïque, nous procédons à la modélisation du système. La modélisation nécessite un ensemble d'équations caractérisant tous les éléments du système. A ce niveau, la condition qui s'impose est de connaître les critères d'entrées (données de base) c'est-à-dire les données météorologiques au site, et les données relatives aux équipements. De nombreux articles publiés dans la littérature scientifique portent sur le développement de modèles pour chacun des composants du système.

Dans ce chapitre, nous représenterons le modèle des données du rayonnement solaire sur un plan incliné, de la vitesse de vent et de la température. Nous exposons des modèles du générateur photovoltaïque, de l'éolienne, des éléments de conversion et du dispositif de stockage (batterie).

## IV.2 MODELISATION DE LA CHAINE PHOTOVOLTAÏQUE

La chaîne de conversion photovoltaïque, constituée d'un générateur PV et l'ensemble (hacheur survolteur et son système de commande), permet d'extraire la puissance maximale. Cette chaîne est représentée par la Figure IV.1. La modélisation de ses différents organes va être examinée par la suite, en commençant par le rayonnement solaire.

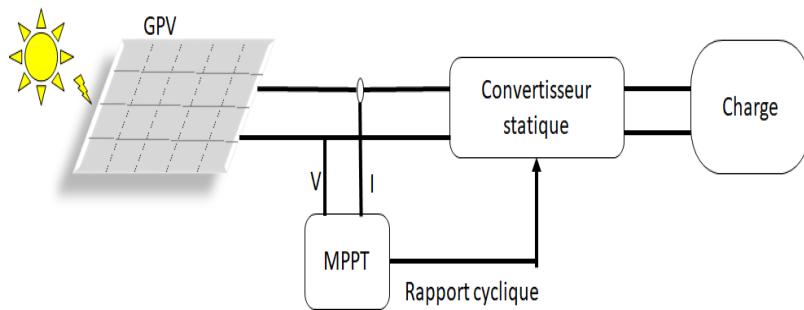


Figure IV.1. Chaîne de conversion photovoltaïque

### IV.2.1 Modélisation du rayonnement solaire

Les ondes électromagnétiques provenant du soleil portent l'énergie, la projection de cette énergie dépend de l'orientation de la surface réceptrice. Pour récupérer le maximum d'énergie en provenance du soleil, il est nécessaire d'orienter au mieux le récepteur par rapport aux rayons lumineux. La connaissance de la position du soleil en fonction du temps est primordiale.

#### IV.2.1.1 Coordonnées géographiques terrestres

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent de repérer un point sur la terre : la latitude et la longitude du lieu.

- La latitude ( $\varphi$ ) est l'angle formé par le plan équatorial et la direction reliant le lieu considéré et le centre de la terre. Les latitudes de l'hémisphère Nord sont affectées d'un signe positif et celles de l'hémisphère Sud d'un signe négatif.
- La longitude (L) est l'angle formé par le plan méridien origine de Greenwich et le plan méridien du lieu considéré. Les longitudes situées à l'Est de ce méridien sont positives et celles situées à l'Ouest sont négatives.

#### IV.2.1.2 Position du soleil

Pour un lieu donné, la position du soleil est repérée à chaque instant de la journée et de l'année par deux référentiels différents, grâce à deux plans, plan horizontal du lieu et le plan équatorial de la terre [95].

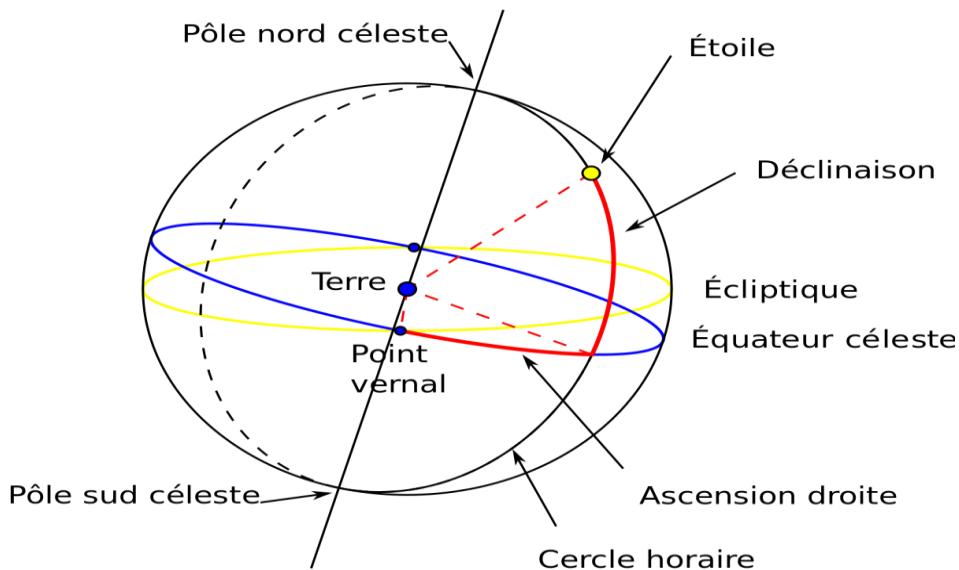


Figure IV.2. Position du soleil par rapport à la surface irradiée

#### IV.2.1.3 Coordonnées équatoriales

Dans ce référentiel le soleil est localisé au moyen de deux angles, la déclinaison solaire  $\delta$  et l'angle horaire  $\omega$ .

##### IV.2.1.3.1 La déclinaison

C'est l'angle entre la direction du soleil et le plan équatorial. Elle traduit l'inclinaison du plan équatorial par rapport au plan écliptique. Sa valeur varie entre  $-23.45^\circ$  (Au solstice d'hiver) et

$+23.45^\circ$  (au solstice d'été) et s'annule aux équinoxes de printemps et d'automne. Cet angle varie très peu pendant une journée, ce qui permet d'approcher le mouvement quotidien du soleil par une rotation sur cône d'axe l'équateur, en fonction du jour de l'année [114].

$$\delta = 23.45 \sin\left(2\pi \frac{284+N}{365}\right) \quad (\text{IV.1})$$

$N$  est le nombre de jour de l'année compté à partir du 1<sup>er</sup> janvier.

#### IV.2.1.3.2 L'angle horaire

L'angle horaire du soleil est le déplacement angulaire du soleil autour de l'axe polaire, dans sa course d'Est en Ouest, par rapport au méridien local. La valeur de l'angle horaire est nulle à midi, négative le matin, positive en après-midi et augmente de  $15^\circ$  par heure (un tour de  $360^\circ$  en 24 heures). Ainsi, à 7 h 00 du matin, l'angle horaire du soleil vaut  $-75^\circ$  (7h00 du matin est 5h00 après-midi ; cinq fois  $15^\circ$  égal  $75^\circ$ , avec un signe négatif puisque c'est le matin) [115].

$$\omega = 15(Tsv - 12) \quad (\text{IV.2})$$

Avec :

$$Tsv = TL - \Delta GMT + \frac{L}{15} + \frac{ET}{60} \quad (\text{IV.3})$$

$$ET = 9.87 \sin^2 Bj - 7.53 \cos Bj - 1.5 \sin Bj \quad (\text{IV.4})$$

$$Bj = 2\pi \frac{N-81}{365} \quad (\text{IV.5})$$

$\Delta GMT$  : Décalage horaire par apport au méridien de Greenwich.

$Tsv$  : Temps solaire vrai.

$TL$  : Temps légal (donné par une montre).

$ET$  : Equation de correction du temps.

$L$  : Longitude du lieu.

L'angle horaire  $\omega$  varie de  $-180^\circ$  à  $+180^\circ$ , prend la valeur nulle à midi,  $Tsv$  négative durant la période avant-midi et  $Tsv$  est positive après-midi.

L'angle horaire du soleil à son coucher  $\omega_s$  est : [115].

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (\text{IV.6})$$

#### IV.2.1.4 Coordonnées horizontales

Le soleil est repéré par apport au plan horizontal du lieu de latitude  $\varphi$ , par deux angles, la hauteur  $\gamma$  et azimut du soleil  $\psi$

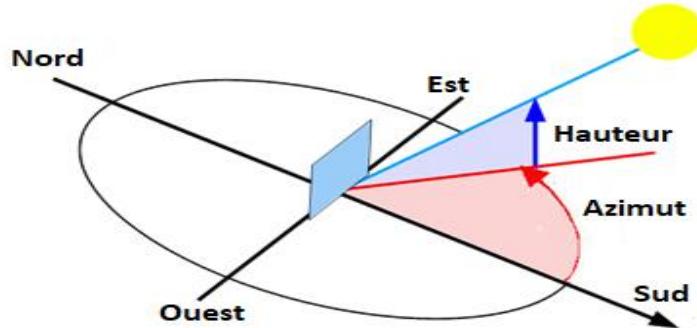


Figure IV.3. Coordonnées horizontales du soleil

##### IV.2.1.4.1 Hauteur du soleil

La hauteur du soleil est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan horizontal du lieu. La hauteur évolue à chaque instant de la journée selon l'expression suivante [116] :

$$\sin \gamma = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega \quad (\text{IV.7})$$

##### IV.2.1.4.2 Azimut du soleil

Azimut du soleil est défini par l'angle que fait la projection de la direction du rayonnement solaire avec la direction sud du lieu [116] :

$$\cos \psi = \sin \gamma \sin \varphi - \frac{\sin \delta}{\cos \gamma \cos \varphi} \quad (\text{IV.8})$$

L'azimut oscille entre  $-180^\circ$  et  $+180^\circ$ , l'angle  $\psi$  prend les valeurs positives vers l'ouest, négatives vers l'est et nulle en direction sud.

##### IV.2.1.4.3 Angle zénithal

La distance zénithale ou angle zénithal est l'angle que fait la direction du soleil avec le vertical du lieu [116] :

$$\theta_Z = \cos^{-1}(\cos \delta \cos \varphi \cos \omega + \sin \delta \sin \varphi) \quad (\text{IV.9})$$

#### IV.2.1.4.4 Angle d'incidence du rayonnement direct sur un plan incliné

L'angle d'incidence  $\theta$  est l'angle formé entre la direction du soleil et la normale à la surface inclinée du capteur solaire. L'angle d'incidence  $\theta$  a un effet primordial et une incidence directe sur la quantité d'ensoleillement reçue sur la surface collectrice. Cet angle peut être déterminé par la connaissance des cosinus directeurs du rayonnement incident et la normale du plan incliné en coordonnées horizontales du lieu, cet angle dépend des paramètres de la position du soleil et de l'angle d'inclinaison du capteur. Il est défini par [116] :

$$\theta = \cos^{-1}[\sin \delta \sin \varphi \cos \beta - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma_s + \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma_s \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma_s \sin \omega] \quad (\text{IV.10})$$

Les angles  $\beta$ ,  $\gamma_s$  sont respectivement l'angle d'inclinaison du capteur et l'angle entre la direction de la surface du capteur et le plein sud.

#### IV.2.1.5 Calcul du rayonnement solaire horaire sur un plan incliné

En 1960, Liu et Jordan ont proposé un modèle empirique simple qui permet d'estimer les composantes du rayonnement solaire sur plan incliné ne nécessitant que quelques paramètres géo astronomiques tels que le numéro de jour de l'année, la hauteur du soleil et la latitude du lieu. L'avantage de ce modèle par rapport aux autres est qu'il permet de générer le flux solaire reçu au sol pour différents états du ciel et différentes inclinaisons de surfaces [117].

Le rayonnement global horaire sur une surface de plan incliné d'un angle  $\beta$ ,  $G\beta$  est la somme de trois composantes de rayonnement horaire : direct, diffus et réfléchi. Il est calculé à partir de l'équation (IV.11) [118].

$$G\beta = Gb_{-\beta} + Gd_{-\beta} + Gr_{-\beta} \quad (\text{IV.11})$$

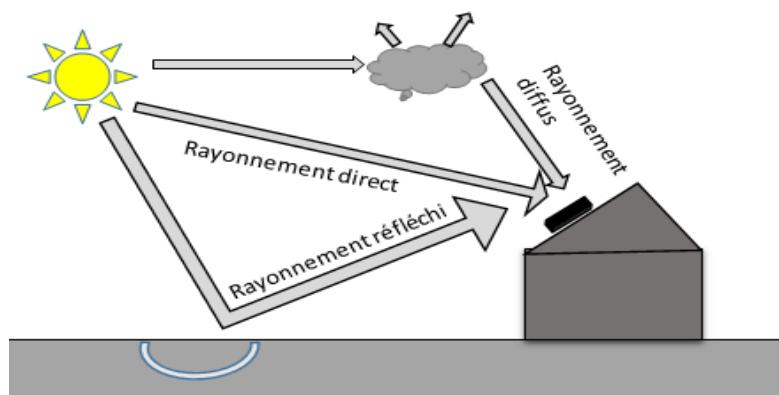


Figure IV.4 Radiation solaire globale sur un plan incliné [119]

Avec :

$$Gb_\beta = Gb \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (\text{IV.12})$$

$$Gd_\beta = Gd \left( \frac{1+\cos \beta}{2} \right) \quad (\text{IV.13})$$

$$Gr_\beta = G \cdot \rho \left( \frac{1-\cos \beta}{2} \right) \quad (\text{IV.14})$$

Alors :

$$G_\beta = Gb \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} + Gd \left( \frac{1+\cos \beta}{2} \right) + G \cdot \rho \left( \frac{1-\cos \beta}{2} \right) \quad (\text{IV.15})$$

Où :

$\rho$  Le coefficient de réflexion de lumière diffuse du sol (aussi appelé albédo du sol);  $\theta$  l'angle d'incidence de l'ensoleillement direct,  $\theta_z$  l'angle zénithal du soleil,  $G$  l'ensoleillement global horizontal,  $Gb$  l'ensoleillement horizontal direct,  $Gd$  l'ensoleillement horizontal diffus.

Avec :

$$Gb = G - Gd \quad (\text{IV.16})$$

Pour chaque heure de la journée,  $G$  et  $Gd$  sont calculés à partir des valeurs quotidiennes  $H$  et  $Hd$  [118].

$$Gd = rd \cdot Hd \quad (\text{IV.17})$$

$$G = rT \cdot H \quad (\text{IV.18})$$

Avec :

$$rd = \frac{\pi}{24} \cdot \frac{(\cos \omega - \cos \omega_s)}{(\sin \omega_s - \omega_s \cos \omega_s)} \quad (\text{IV.19})$$

$$rT = \frac{\pi}{24} \cdot (a + b \cos \omega) \frac{(\cos \omega - \cos \omega_s)}{(\sin \omega_s - \omega_s \cos \omega_s)} \quad (\text{IV.20})$$

Et

$$a = 0.409 + 0.5016 \sin \left( \omega_s - \frac{\pi}{3} \right) \quad (\text{IV.21})$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \sin \left( \omega_s - \frac{\pi}{3} \right) \quad (\text{IV.22})$$

$\omega$  : L'angle horaire du soleil.  $\omega_s$  : l'angle horaire du soleil à son coucher.

Le rayonnement diffus quotidien  $Hd$  est calculé à partir du rayonnement global quotidien  $H$  à l'aide de la corrélation de Beckmann. D'abord, on calcule l'indice de clarté  $K_T$  du jour. Ce dernier est donné par [118] :

$$K_T = H/H0 \quad (\text{IV.23})$$

Où :  $H0$  est le rayonnement solaire extraterrestre, donné par l'équation (IV.24) [120] :

$$H0 = \frac{24}{\pi} H_{sc} \left( 1 + 0.033 \cos \frac{360N}{365} \right) \cdot \left( \cos \varphi \cos \delta \sin w_s + \frac{\pi w_s}{180} \sin \varphi \sin \delta \right) \quad (\text{IV.24})$$

Avec :  $H_{sc} = 1.367 \text{ Kw/m}^2$

Après avoir trouvé l'indice de clarté du jour, on peut calculer le rayonnement diffus quotidien  $Hd$ .

Le rapport  $Hd/H$  est donné par les équations (IV.25, IV.26) :

Si:  $w_s \leq 81.4^\circ$ , alors

$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} 0.143 & Si k_T \geq 0.715 \\ \frac{1 - 0.2727k_T + 2.4495k_T^2 - 11.9514k_T^3 + 9.3879k_T^4}{0.8448k_T^3} & Si k_T < 0.715 \end{cases} \quad (\text{IV.25})$$

Si:  $w_s > 81.4^\circ$ , alors

$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} 0.175 & Si k_T \geq 0.722 \\ \frac{1 + 0.2832k_T - 2.5557k_T^2 + 0.8448k_T^3}{0.8448k_T^3} & Si k_T < 0.722 \end{cases} \quad (\text{IV.26})$$

## IV.2.2 Modélisation d'une cellule PV

### IV.2.2.1 Modèle à une seule diode

Une cellule PV (Figure IV.5) fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule et deux résistances (série et shunt) pour les pertes. Les résistances  $Rs$  et  $Rp$  permettent de tenir compte des pertes liées aux défauts de fabrication ;  $Rs$  représente les diverses résistances de contact et de connexion tandis que  $Rp$  caractérise les courants de fuite dus à la diode et aux effets de bord de la jonction [121].

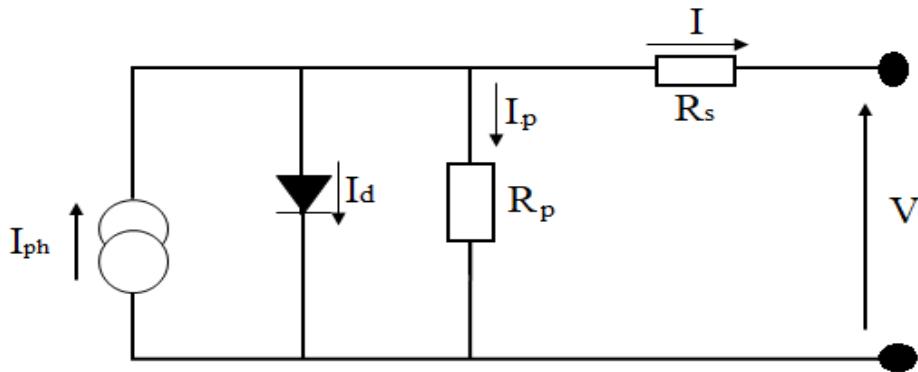


Figure IV.5. Schéma électrique équivalent d'une cellule PV à une diode

La loi des nœuds nous permet d'écrire la relation suivante :

$$I = I_{ph} + Id + I_p \quad (\text{IV.27})$$

A partir de ce circuit, on tire les équations qui nous permettent d'obtenir la caractéristique I-V de la cellule PV.

Le courant de jonction  $Id$  est donné par :

$$Id = I_{sat} \left( \exp\left(\frac{q(V + I.R_s)}{n.k.T_c}\right) - 1 \right) \quad (\text{IV.28})$$

Le courant dans la résistance  $R_p$  est donné par :

$$I_p = \frac{V + I.R_s}{R_p} \quad (\text{IV.29})$$

On obtient l'expression de la caractéristique I-V du modèle choisi [122] :

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left( \exp\left(\frac{q(V + I.R_s)}{n.k.T_c}\right) - 1 \right) - \frac{V + I.R_s}{R_p} \quad (\text{IV.30})$$

Avec

$I_{sat}$  : Courant de saturation de la diode ou courant à l'obscurité (A)

$n$  : Coefficient d'idéalité de la cellule photovoltaïque

$k$  : Constante de Boltzmann ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K)

$q$  : Charge d'électron

$T_c$  : Température absolue de la cellule (K).

La température de la cellule est donnée par l'équation suivante :

$$Tc = Ta + (Noct - Ta_{Noct}) \frac{G}{G_{Noct}} \quad (\text{IV.31})$$

$Ta$  : Température ambiante,

$Noct$  : Température nominale de fonctionnement de cellule,

$Ta_{Noct}$  : Température ambiante à  $Noct$ ,

$G$  : Rayonnement solaire,

$G_{Noct}$  : Rayonnement solaire à  $Noct$ .

Le photo-courant  $I_{ph}$  est donné par :

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} \cdot I_{cc-ref} \left[ 1 + \alpha_{icc} (T_{c-Tref}) \right] \quad (\text{IV.32})$$

Avec :

$I_{cc\_ref}$  : Courant de court-circuit de référence,

$\alpha_{icc}$  : Coefficient de température du courant de court-circuit,

Le courant de saturation peut être calculé à partir de l'équation :

$$I_{sat} = \frac{I_{ph}}{\left( \exp\left(\frac{V_{co}}{n.V_t}\right) - 1 \right)} \quad (\text{IV.33})$$

Avec  $V_{co}$  : tension de circuit ouvert.

$V_T$  : Potentiel thermodynamique.  $V_T = K \cdot Tc / q = 25mv$  à  $20^\circ\text{C}$ .

La résistance parallèle  $R_p$  a une valeur assez élevée. Alors le courant généré par la cellule peut être donné sous la forme :

$$I = I_{ph} \left[ 1 - \frac{\left( \exp\left(\frac{V + I.R_s}{n.V_T}\right) - 1 \right)}{\left( \exp\left(\frac{V_{co}}{n.V_T}\right) - 1 \right)} \right] \quad (\text{IV.34})$$

#### IV.2.2.2 Paramètres d'une cellule PV

##### IV.2.2.2.1 Courant de court-circuit

Le courant de court-circuit  $I_{cc} \approx I_{ph}$  est la plus grande valeur du courant générée par la cellule sous les conditions du court-circuit où  $V = 0$  [123].

La variation du courant de court-circuit en fonction de l'éclairement et de la température de jonction et par rapport aux conditions standards est la suivante [124] :

$$I_{cc} = \frac{G}{G_{ref}} I_{cc\_ref} \left[ 1 + \alpha_{icc} (T_c - T_{ref}) \right] \quad (\text{IV.35})$$

##### IV.2.2.2.2 Tension du circuit ouvert

La tension du circuit ouvert est la tension qui traverse la jonction/diode PN où  $I = 0$ . Elle représente la tension de la cellule lorsqu'elle est à l'ombre. Elle est donnée par [125] :

$$V = V_{co} = n.V_T \cdot \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_{sat}} \right) \quad (\text{IV.36})$$

La variation de la tension du circuit ouvert en fonction de l'éclairement et de la température de jonction et par rapport aux conditions standards est la suivante [126] :

$$V_{co} = V_{cv\_ref} + \alpha_{vco} (T_c - T_{ref}) + n.V_T \cdot \ln \left( \frac{G}{G_{ref}} \right) \quad (\text{IV.37})$$

Avec  $\alpha$  : Coefficient de température de la tension du circuit ouvert.

#### IV.2.2.3 Association de Cellules PV

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par l'addition des tensions à courant donné [127].

La Figure IV.6 montre la caractéristique résultante courant-tension ( $V_{sco}$ ) obtenue en associant en série  $n_s$  cellules identiques dont la caractéristique courant-tension est  $(I_{cc}, V_{co})$  [127] :

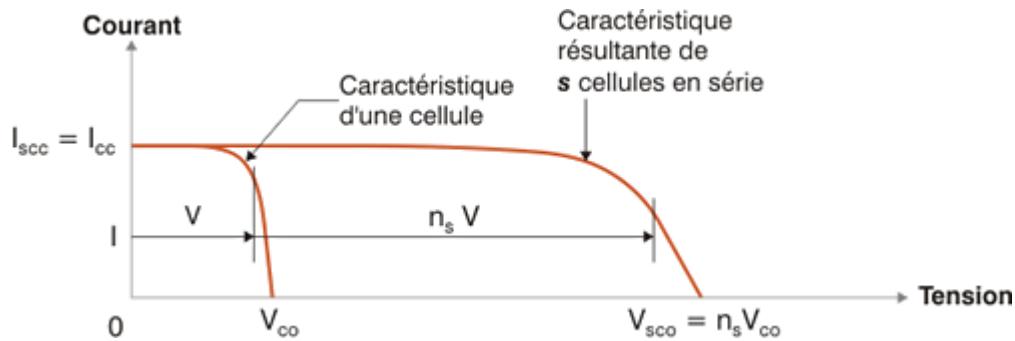


Figure IV.6. Caractéristiques des cellules PV en série

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée [127].

La Figure IV.7 montre la caractéristique résultante ( $I_{pcc}$ ) obtenue en associant en parallèle  $n_p$  cellules identiques ( $I_{cc}$ ) [128] :

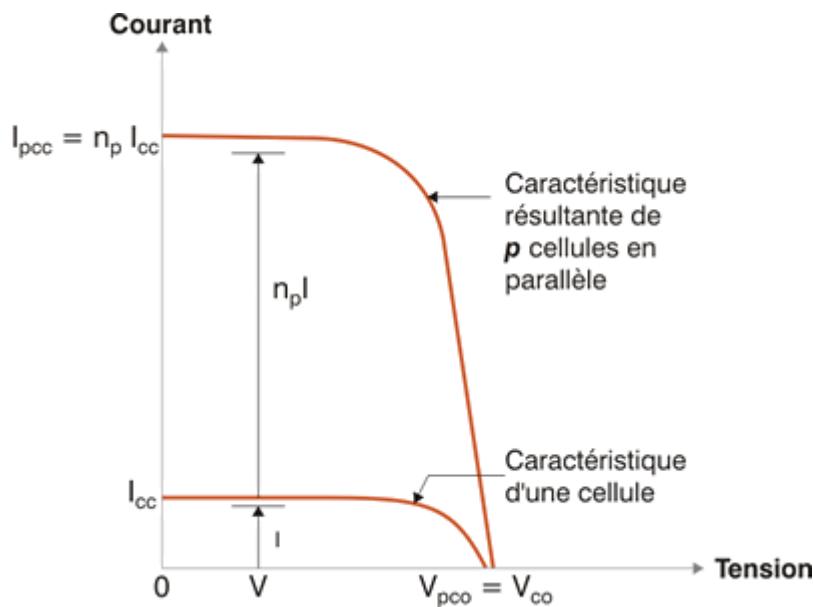


Figure IV.7. Caractéristiques de cellules PV en parallèle

#### IV.2.3 Modélisation du générateur PV

Un générateur photovoltaïque ou module est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou parallèle. Un groupe de panneaux PV de  $n_s$  cellules montées en série et  $n_p$  cellules en parallèle est modélisé par la Figure IV.8 [129].

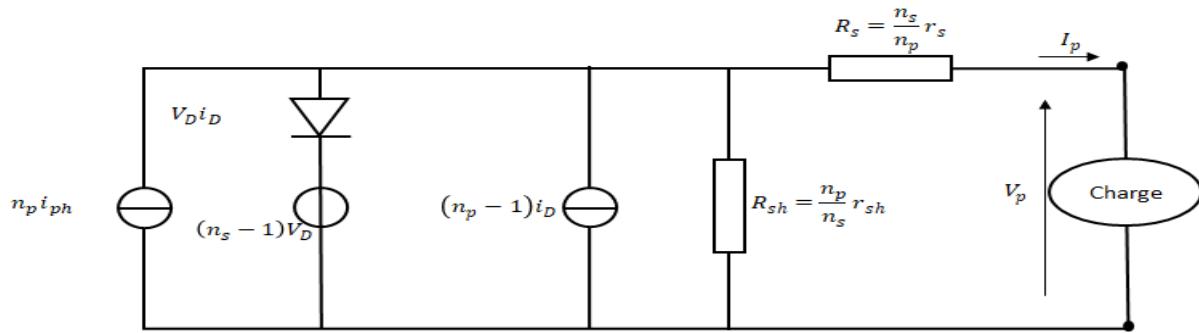


Figure IV.8. Schéma électrique équivalent d'un générateur PV, modèle à une diode

$$I_{ph} = n_p \cdot i_{ph}, I_G = n_p \cdot i_{pph}, I_{rsh} = n_p \cdot i_{rsh},$$

$$V_d = n_s \cdot v_d, V_G = n_s \cdot v_p, R_s = \frac{n_s}{n_p} \cdot r_s \text{ et } R_{sh} = \frac{n_p}{n_s} \cdot r_{sh} \quad (\text{IV.38})$$

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque. Si les cellules sont connectées en série, leurs tensions s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'autre part, si les cellules sont connectées en parallèle, c'est le courant qui augmentera.

#### IV.2.3.1 Caractéristique I-V d'un générateur PV

La caractéristique générale d'un générateur photovoltaïque est représentée sur la Figure IV.9 :

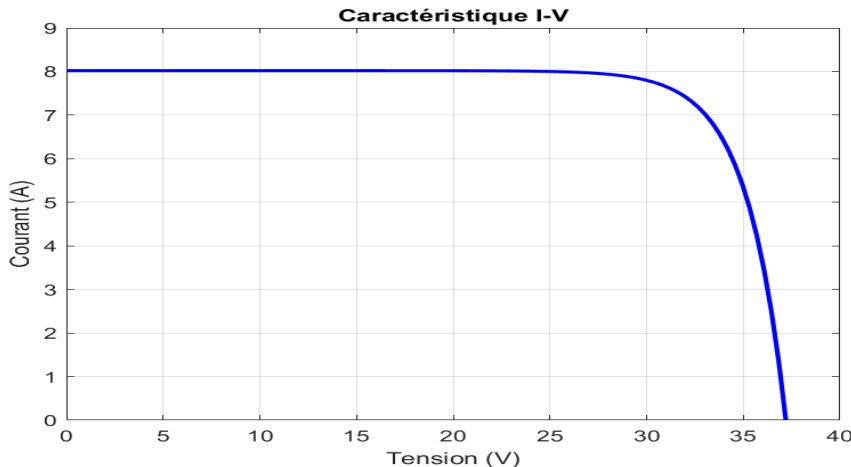


Figure IV.9. Caractéristique I-V d'un générateur PV

$V_{co}$  : Tension de circuit ouvert.

$I_{cc}$ : Courant de court-circuit.

$V_{pm}$ ,  $I_{pm}$  sont : Tension et courant au point de puissance maximale  $P_m$ .

#### IV.2.3.2 Caractéristique P-V d'un générateur PV

La puissance générée par une cellule photovoltaïque est donnée par :

$$P = V \cdot I \quad (\text{IV.39})$$

La puissance maximale est obtenue lorsque :

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (\text{IV.40})$$

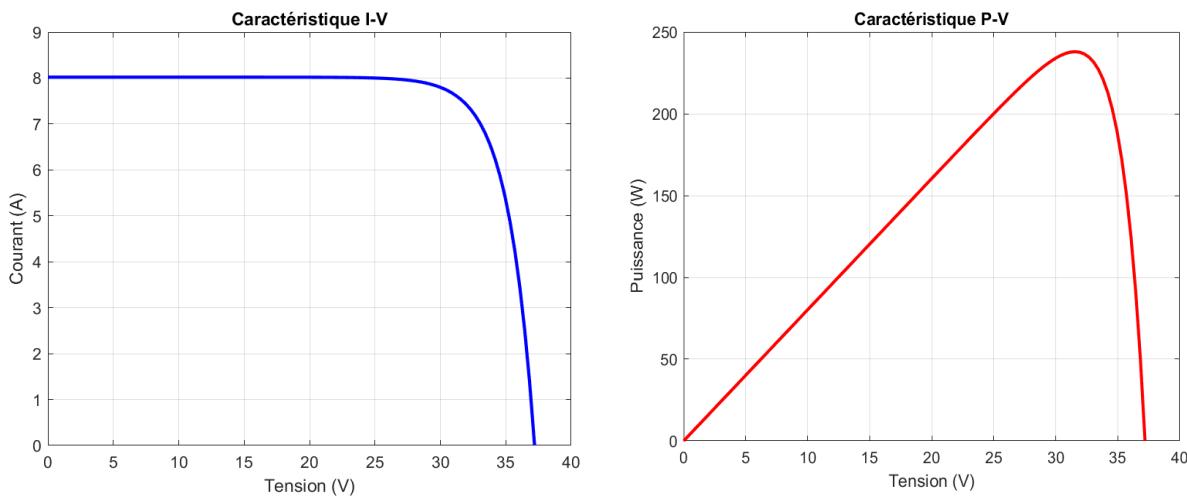


Figure IV.10. Caractéristique I-V et P-V d'un générateur PV

#### IV.2.3.3 Rendement d'un générateur PV

Le rendement d'une cellule est le rapport entre la puissance maximale disponible et la puissance du rayonnement incident, il est donné par :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{I_m V_m}{A G_a} \quad (\text{IV.41})$$

$P_{in}$  : Puissance incidente sur la surface de la cellule photovoltaïque (W).

$G_a$  : Eclairement global incident sur la cellule photovoltaïque ( $\text{W/m}^2$ ).

$A$  : Surface totale de la cellule photovoltaïque ( $\text{m}^2$ ).

#### IV.2.3.4 Facteur de forme (FF)

Il permet de juger la qualité d'une cellule photovoltaïque. Il est défini comme le rapport entre le point de puissance maximum et la puissance à courant de court-circuit et tension en circuit ouvert.

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} = \frac{I_m \cdot V_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} = \frac{\eta \cdot A \cdot G_a}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (\text{IV.42})$$

A partir de cette définition, pour une cellule dont la caractéristique I-V est rectangulaire (source de courant), Figure IV.11, le facteur de forme sera donc unitaire. Le facteur de forme d'une bonne cellule photovoltaïque devra être compris entre 0,75 et 0,85. Le facteur de forme  $FF$  diminue si la température augmente.

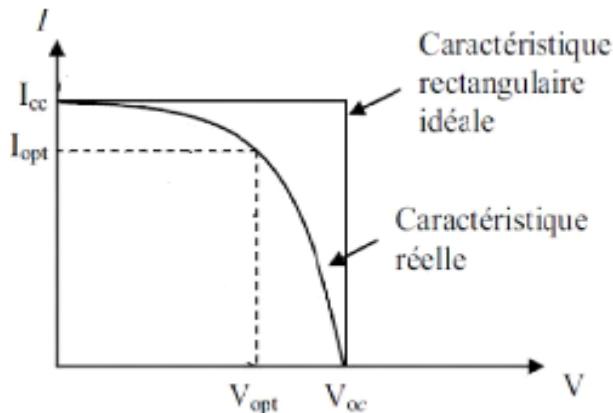


Figure IV.11. Caractéristique idéale d'une cellule PV

#### IV.2.3.5 Influence de l'intensité du rayonnement

L'irradiation standard, internationalement acceptée, pour mesurer la réponse des panneaux photovoltaïques est une intensité rayonnante de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$ . La Figure (IV.12) présente un exemple des courbes pour différents niveaux de rayonnement :

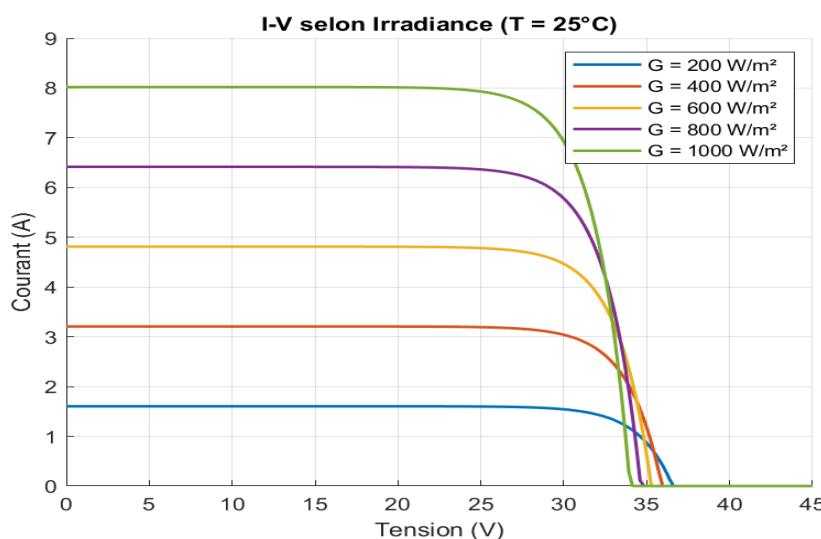


Figure IV.12. Caractéristique I-V d'un générateur PV pour différents rayonnements

On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement [130].

La Figure (IV.13) présente un exemple des courbes puissance-tension pour différents niveaux de rayonnement :

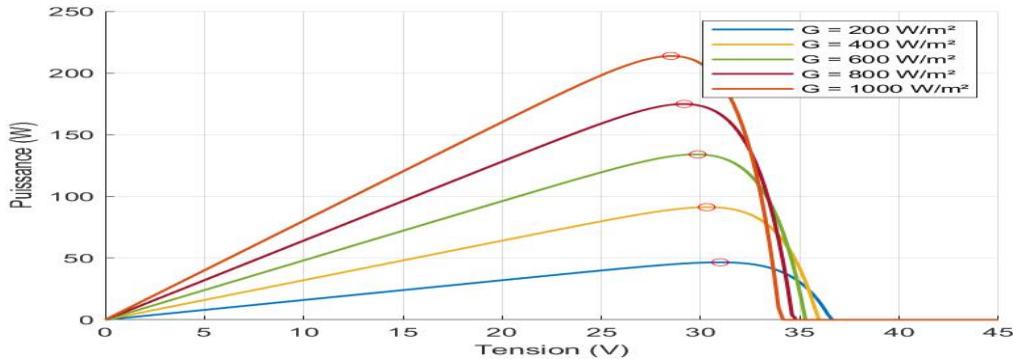


Figure IV.13. Caractéristique P-V d'un générateur PV pour différents rayonnements

#### IV.2.3.6 Influence de la température

La Figure IV.14 présente des courbes courant-tension pour différentes températures de fonctionnement de la cellule PV :

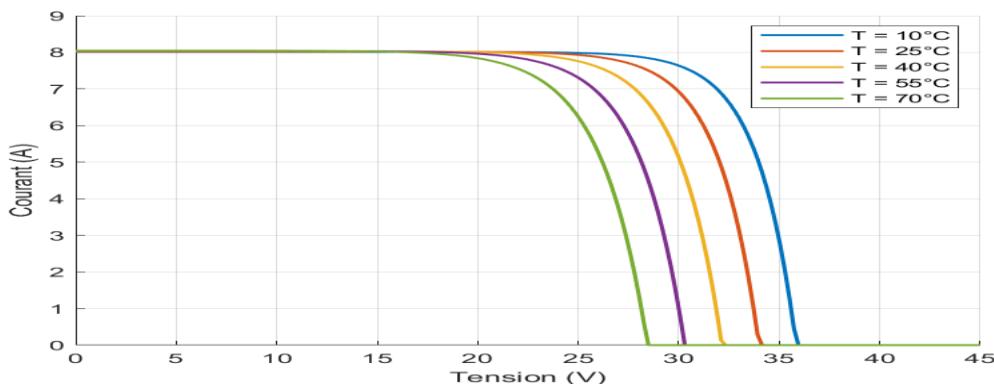


Figure IV.14. Caractéristique I-V d'un générateur PV pour différentes températures

On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site devra être prise en compte.

Il est important de savoir que la puissance du panneau diminue d'environ 0,5% par degré d'augmentation de la température de la cellule au-dessus de 25°C [130].

La Figure (IV.15) présente des courbes puissance-tension pour différentes températures de fonctionnement de la cellule PV :

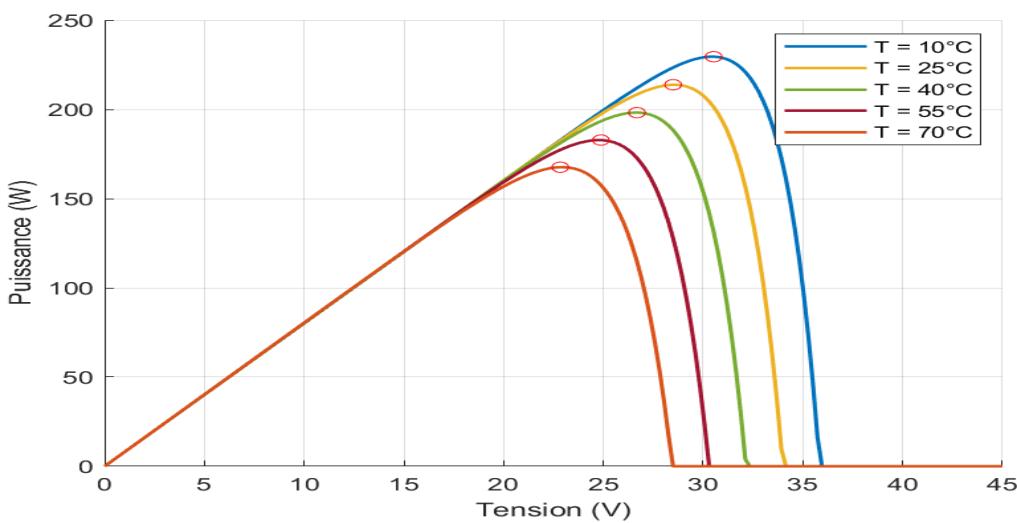


Figure IV.15. Caractéristique P-V d'un générateur PV pour différentes températures

### IV.3 MODELISATION DE LA CHAINE EOLIENNE

#### IV.3.1 Chaine de conversion éolienne

Le générateur éolien, constitué d'une turbine à axe horizontal ou verticale couplée directement à une génératrice synchrone à aimants permanents raccordée à un bus continu par l'intermédiaire d'un redresseur, est représenté par la Figure IV.16. La modélisation de ces différents organes va être examinée dans ce qui suit [131].

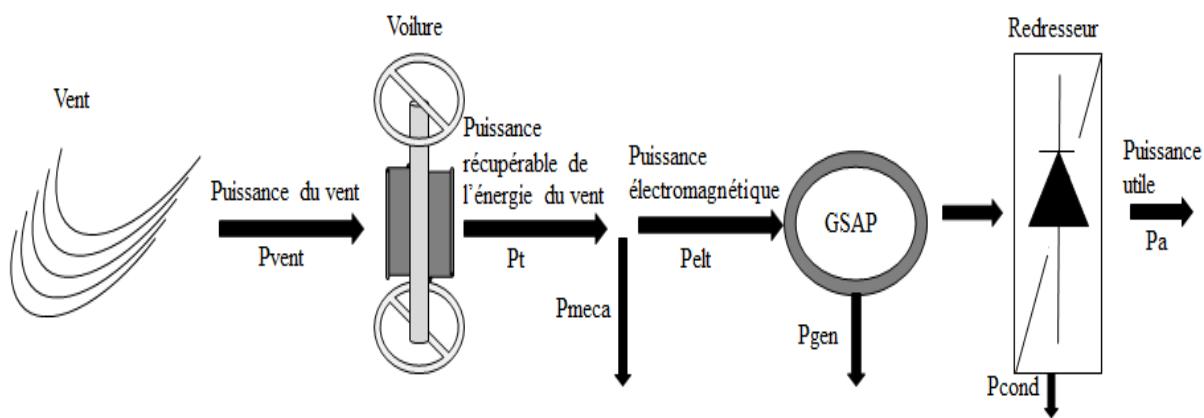


Figure IV.16. Chaine de conversion éolienne

#### IV.3.1.1 Modèle du vent

##### IV.3.1.1.1 Correction de la vitesse du vent avec l'altitude

La vitesse du vent augmente avec l'altitude par rapport au sol. Nous avons donc converti les vitesses de vent à  $h_0$  en vitesses du vent à la hauteur du moyeu  $h_w$  par la relation de Justus [132] :

$$V_h = V_{h_0} \cdot \left( \frac{h_w}{h_0} \right)^\alpha \quad (\text{IV.43})$$

Où  $\alpha$  est le coefficient de correction souvent considéré comme étant égal à 0,15. Sa valeur dépend de la nature du terrain. [132].

##### IV.3.1.1.2 Distribution de Weibull

Il existe plusieurs méthodes de représentation et d'analyse pour quantifier le potentiel éolien d'un site. Ces distributions sont généralement approximées par des lois, notamment la fonction de distribution de Weibull [133].

$$f(v) = \frac{k}{c} \cdot \left( \frac{v}{c} \right)^{k-1} \cdot \exp \left[ -\left( \frac{v}{c} \right)^k \right] \quad (\text{IV.44})$$

Les paramètres  $k$  et  $c$  sont respectivement le facteur de forme (sans dimension) et le facteur d'échelle en m/s et  $V$  est la vitesse moyenne du vent

La Figure IV.17 est obtenue grâce à l'équation (IV.44) qui représente la fonction de distribution statistique de Weibull. Habituellement, le facteur de forme qui caractérise la symétrie de la distribution est dans l'éolien égal à  $k=2$ . Le facteur d'échelle est très proche à  $V$  [133].

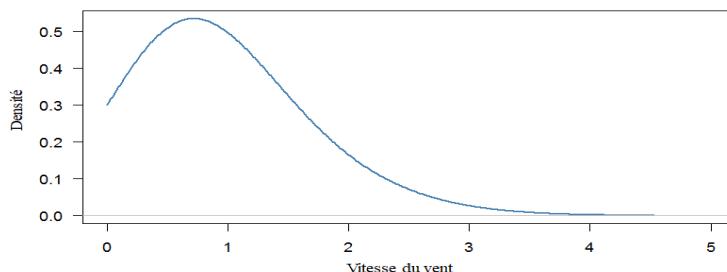


Figure IV.17. Exemple de la distribution de Weibull

#### IV.3.1.2 Modèle de la turbine

##### IV.3.1.2.1 Puissance récupérée par la turbine

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. L'énergie cinétique d'une colonne d'air de longueur  $dx$ , de section  $s$ , de masse volumique  $\rho$ , animée d'une vitesse  $v$ , (Figure IV.18) s'écrit [134] :

$$dE_c = \frac{1}{2} \rho \cdot s \cdot dx \cdot v^2 \quad (\text{IV.45})$$

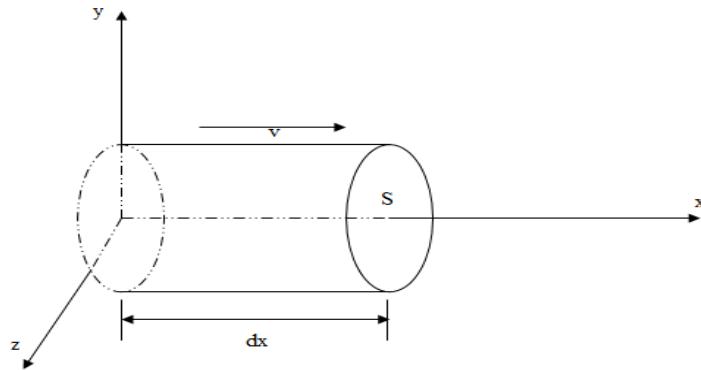


Figure IV.18. Colonne d'air animée d'une vitesse V.

La puissance  $P_v$  extraite du volume d'air en mouvement est la dérivée de l'énergie cinétique par rapport au temps.

On a  $dx = v dt$ , on déduit l'expression de  $P_v$  :

$$P_v = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot s \cdot v^3 \quad (\text{IV.46})$$

$\rho$  : Densité volumique de l'air ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ ).

$v$  : Vitesse instantanée du vent ( $\text{m}/\text{s}$ ).

$E_c$  : Energie cinétique du vent (Joules).

##### IV.3.1.2.2 Loi de Betz

La théorie globale du moteur éolien à axe horizontal a été établie par Albert BETZ en 1929, qui suppose que le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini en amont d'une vitesse  $V_1$  et à l'infini en aval d'une vitesse  $V_2$ . La production d'énergie ne pouvant se faire que par la conversion de l'énergie cinétique du vent, la vitesse  $V_2$  est nécessairement inférieure à  $V_1$ . Il en résulte que la veine des fluides traverse le générateur éolien en s'élargissant. Soit  $V'$  la

vitesse à travers la section  $s$ , la section balayée par les pales de l'éolienne (Figure IV.19), et  $M$  la masse d'air qui traverse l'éolienne, la variation de l'énergie cinétique  $\Delta E_c$  est [135] :

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} \cdot M \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{IV.47})$$

La puissance aérodynamique de l'éolienne  $P_{aer}$  s'écrit alors :

$$P_{aer} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot s \cdot V' \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{IV.48})$$

Par ailleurs, la force de l'air  $F$  sur l'éolienne est donnée par :

$$F = \rho \cdot s \cdot V' \cdot (V_1 - V_2) \quad (\text{IV.49})$$

D'où :

$$P_{aer} = F \cdot V' = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot s \cdot V'^2 \cdot (V_1 - V_2) \quad (\text{IV.50})$$

En identifiant les équations, il vient :

$$V' = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (\text{IV.51})$$

Et donc :

$$P_{aer} = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot s \cdot (V_1 + V_2) \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{IV.52})$$

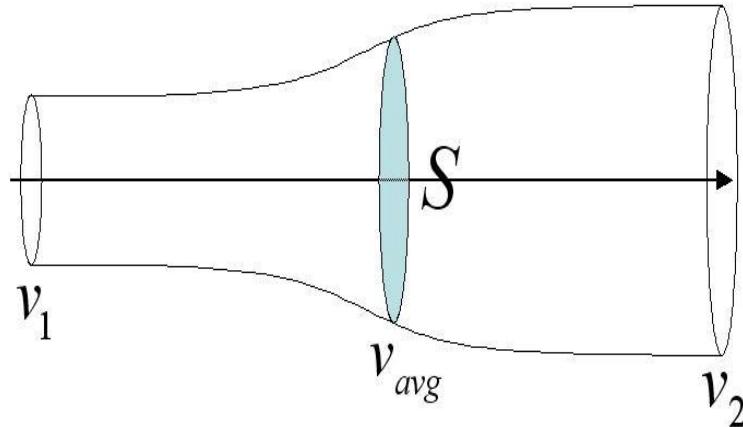


Figure IV.19. Schéma de principe de la théorie de Betz

La puissance de l'éolienne sera alors maximale quand sa dérivée  $\partial P_{aer}/\partial V_2$  est nulle, soit pour  $V_2 = V_1/3$ , la puissance est maximale et vaut :

$$P_{aermx} = \frac{16}{27} \cdot \frac{\rho \cdot s \cdot V_1^3}{2} = \frac{16}{27} \cdot P_v \quad (\text{IV.53})$$

Sous cette forme, la formule de Betz montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser 59% de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par seconde.

#### IV.3.1.2.3 Vitesse normalisée

On définit la vitesse normalisée  $\lambda$  comme étant le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine  $\Omega_t \cdot R_t$  sur la vitesse instantanée du vent (Figure IV.20). Elle est donnée par l'expression suivante [134] :

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R_t}{V_w} \quad (\text{IV.54})$$

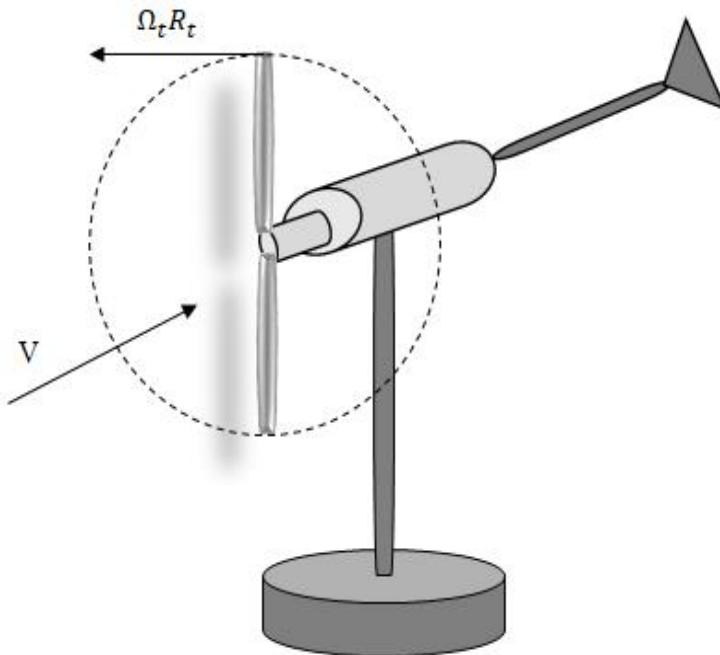


Figure IV.20. Vitesse du vent ( $V_w$ ) et vitesse tangentielle de l'aubage ( $\Omega_t \cdot R_t$ )

$V_w$  : Vitesse du vent (m/s).

$\Omega_t$  : Vitesse de rotation avant multiplicatrice (rad/s).

$R_t$  : Rayon de la surface balayée (m).

#### IV.3.1.2.4 Coefficient de puissance

En réalité, jusqu'à présent, seulement 60 à 70% de la puissance maximale théorique  $P_{eol-max}$  peut être exploitée par les engins les plus perfectionnés. Ce rendement, appelé coefficient de puissance  $C_p$  de l'éolienne, est propre à chaque voilure. Ce coefficient lie la puissance éolienne à la vitesse du vent [133] :

$$P_{eol} = C_p \cdot P_v = C_p \cdot \frac{\rho \cdot s \cdot V_w^3}{2} \quad (\text{IV.55})$$

$$C_p = \frac{2 \cdot P_{eol}}{\rho \cdot s \cdot V_w^3} \quad (\text{IV.56})$$

Le coefficient maximal théorique de la puissance est défini :

$$C_{popt} = \frac{P_{eol-max}}{P_v} = 0.59 \quad (\text{IV.57})$$

$C_{popt}$  Étant la valeur maximale que peut prendre le coefficient de puissance  $C_p$ . Cette valeur est associée à une vitesse spécifique nominale  $\lambda_{opt}$  pour laquelle la turbine a été dimensionnée suivant une vitesse du vent nominale  $V_n$  et une vitesse de rotation nominale  $\Omega t_n$ .

La Figure IV.21 donne une vue sur les coefficients de puissance  $C_p$  habituels en fonction de la vitesse réduite  $\lambda$  pour différents types d'éoliennes.

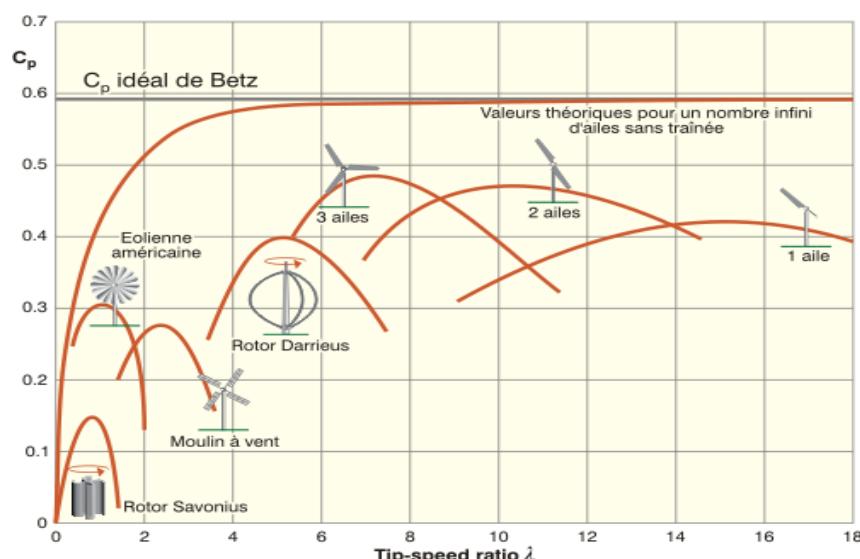


Figure IV.21. Courbes caractéristiques des aérogénérateurs

#### IV.3.1.2.5 Coefficient de couple

Le coefficient de couple  $C_m$  est assez proche du coefficient de puissance  $C_p$ . Il est utile d'estimer la valeur des couples pour différents points de fonctionnement, notamment à vitesse de rotation  $\Omega_t$  nulle, ce qui correspond à une valeur de  $C_p$  nulle pour une valeur de  $C_m$  non nulle [134].

En combinant les équations (IV.55), (IV.56) et (IV.57), la puissance mécanique  $P_m$  disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur peut s'exprimer par :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R_t^2 V_w^3 \quad (\text{IV.58})$$

Avec

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R_t}{V_w} \quad (\text{IV.59})$$

D'où l'expression du couple est la suivante :

$$T_t = \frac{P_m}{\Omega_t} = \frac{R_t \cdot P_m}{\lambda \cdot V_w} = \frac{C_p}{\lambda} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \pi R_t^3 V_w^3 \quad (\text{IV.60})$$

La valeur du coefficient de couple est déterminée par la formule suivante :

$$C_m = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{2T_t}{\rho S_t R_t V_w^2} \quad (\text{IV.61})$$

$T_t$  : Couple de la turbine éolienne (N.m).

#### IV.3.1.3 Modèle de l'arbre de la machine

L'équation différentielle qui caractérise le comportement mécanique de l'ensemble turbine et génératrice est donnée par [136] :

$$(J_t + J_m) \frac{d\Omega}{dt} = C_{eol} - C_{em} - (f_m + f_t) \Omega \quad (\text{IV.62})$$

Avec :

$f_m$  : Le coefficient de frottement de la machine.

$J_t$  : L'inertie de la turbine.

$f_t$  : Le coefficient de frottement des pâles.

$C_{eol}$  : Le couple statique fourni par l'éolienne.

$C_{em}$  : Le couple électromagnétique de la génératrice.

On dispose uniquement des paramètres mécaniques de la machine et de l'inertie de la voilure.

C'est pour cela, on ne considère que le coefficient de frottement associé à la génératrice (celui de la voilure n'est pas pris en compte).

$$J = J_t + J_m = J_t \quad (\text{IV.63})$$

$$f = f_t + f_m = f_m \quad (\text{IV.64})$$

Le modèle qui caractérise le comportement mécanique de la chaîne éolienne est donné par l'équation différentielle suivante :

$$C_{eol} = J_t \frac{d\Omega}{dt} + C_{em} + f_m \Omega \quad (\text{IV.65})$$

#### IV.3.1.4 Modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents

Grâce aux nombreux avantages qu'elle a par rapport aux autres types de machines électriques (performances, robustesse, ...), la machine synchrone à aimants permanents est intéressante pour une application en générateur couplé à une turbine éolienne. Les concepteurs nous donnent des précisions concernant la façon de modéliser ce composant. Le modèle de la machine synchrone possède quatre sorties de type électrique : les trois bornes des enroulements stator et une borne représentant le neutre. Les phases sont connectées en étoile [133].

La génératrice synchrone à aimant permanent est modélisée dans un repère abc. Le modèle circuit en termes de tension et de courant sous forme matricielle est donné par [134] :

$$[V]_{(3)} = [e]_{(3)} - [R_s] [i]_{(3)} - [L_s] \frac{d}{dt} [i]_{(3)} \quad (\text{IV.66})$$

Avec

$$[V]_{(3)} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}; [e]_{(3)} = P \phi_f \Omega \begin{bmatrix} \sin(P\Omega_t) \\ \sin\left(P\Omega_t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(P\Omega_t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix}; [L] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \text{ et } [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad (\text{IV.67})$$

L'expression du couple électromagnétique est donnée par :

$$C_{em}(t) = \frac{e_a(t)i_a(t) + e_b(t)i_b(t) + e_c(t)i_c(t)}{\Omega(t)} \quad (\text{IV.68})$$

Où  $V_a, V_b, V_c$  sont les valeurs instantanées des tensions triphasées ;  $i_a, i_b, i_c$  sont les valeurs instantanées des courants triphasés ;  $R_s$  est la résistance des enroulements ;  $L_s$  est l'inductance des enroulements ;  $P$  est le nombre de paires de pôles de la génératrice ;  $\emptyset_f$  est le flux magnétique des aimants ;  $\Omega$  est la vitesse de rotation de la génératrice.

#### IV.3.2 Modélisation du redresseur

##### IV.3.2.1 Modèle d'un redresseur monophasé :

Le schéma d'un redresseur monophasé à diode est donné par la Figure IV.22

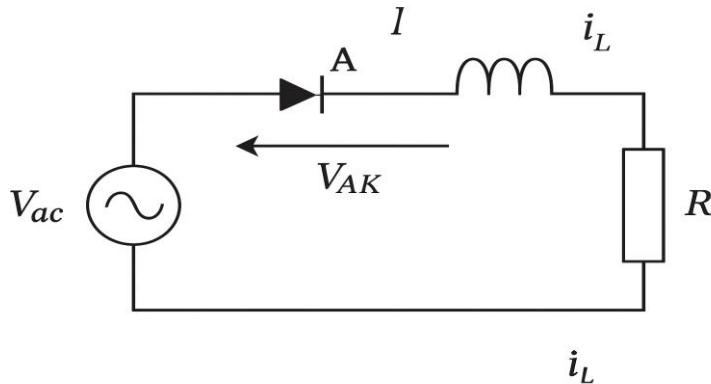


Figure IV.22. Redresseur monophasé à diode

Le comportement du redresseur peut être caractérisé en exprimant le courant dans l'inductance :

$$i_L = \frac{1}{L} \int V_L dt \quad (\text{IV.69})$$

Où la tension  $V_L$  aux bornes de l'inductance dépend de l'état de conduction  $c$  de la diode. En effet, lorsque la diode est conductrice ( $c = 1$ ), on a :

$$V_L = V_{ac} - V_{dc} \quad (\text{IV.70})$$

Et lorsque celle-ci est bloquée ( $c = 0$ ) :

$$V_L = 0 \quad (\text{IV.71})$$

En fonction de l'état de conduction  $c$  de la diode, la tension aux bornes de l'inductance s'exprime par :

$$V_L = c(V_{ac} - V_{dc}) \quad (\text{IV.72})$$

En exprimant la tension aux bornes de la charge résistive en fonction du courant dans l'inductance,

$$V_{dc} = R.i_L \quad (\text{IV.73})$$

L'équation (IV.69) devient :

$$i_L = \frac{1}{L} \int c(V_{ac} - R.i_L) dt \quad (\text{IV.74})$$

A partir des règles élémentaires évoquées précédemment, nous pouvons dire que la diode est conductrice ( $c = 1$ ) si et seulement si l'une des conditions suivantes est vérifiée :

$$V_{ac} - V_{dc} > 0 \quad \text{Ou} \quad i_L > 0 \quad (\text{IV.75})$$

Le premier terme traduit la condition d'amorçage de la diode. En effet, lorsque la diode est bloquée, nous avons  $V_{AK} = V_{ac} - V_{dc}$ . Le deuxième terme indique la continuité de la conduction tant que le courant dans la diode  $i_L = i_{AK}$  reste strictement positif. Si l'une des deux conditions précédentes n'est pas remplie, la diode est bloquée ( $c = 0$ ) [136].

#### IV.3.2.2 Modèle d'un pont de diode

On considère un redresseur alimenté par une source de tension et débitant sur une batterie supposée idéale. On considère que l'impédance de la source est nulle.

Dans ce cas, les courants de ligne  $i_a$ ,  $i_b$  et  $i_c$  prennent à tour de rôle la valeur (et forme) du courant continu  $I_{dc}$ . Chaque diode assure la conduction du courant pendant 1/3 de la période. Avec l'hypothèse d'une impédance de source nulle, le courant s'établit instantanément à sa valeur  $I_{dc}$  lorsqu'une diode devient conductrice [136].

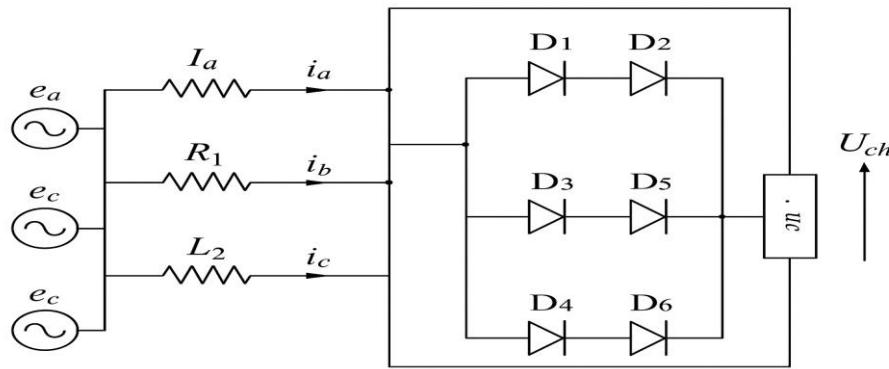


Figure IV.23. Schéma d'un pont de diodes

Le schéma équivalent pendant une séquence de conduction (par exemple phases 1 et 2) est représenté sur Figure IV.24.

A partir du schéma équivalent, et en appliquant la loi des mailles et des nœuds, nous pouvons écrire :

$$\frac{dI_{dc}}{dt} = \frac{1}{2L_s} (V_a - V_b - V_{bus}) \quad (\text{IV.76})$$

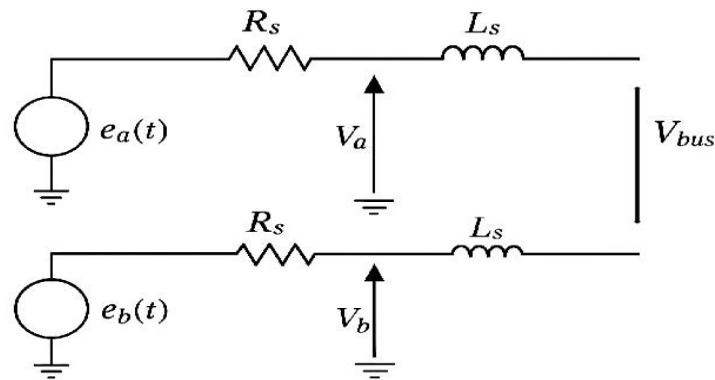


Figure IV.24. Schéma équivalent d'une séquence en conduction normale

#### IV.3.3 Puissance éolienne produite

L'éolienne trouvée au marché est caractérisée par sa puissance nominale  $P_n$ , la puissance électrique à la sortie de la génératrice. Cette puissance est fournie lorsque le vent souffle à la vitesse nominale.

Une fois les fonctions de distribution de la vitesse du vent sont trouvées. La puissance moyenne produite par l'aérogénérateur peut facilement être calculée en utilisant l'équation (IV.77) [137].

$$P_{eol-moy} = \int_0^{\infty} P_{eol}(V) \cdot f(v) d(v) \quad (\text{IV.77})$$

Où :

$f(v)$  : La probabilité de la vitesse  $v$

$P_{eol}$  : La puissance résultante d'une vitesse  $v$

La puissance produite par l'aérogénérateur est calculée en fonction de la vitesse du vent selon l'équation (IV.78) [137].

$$P_{eol} = \begin{cases} 0 & \\ P_n \cdot \frac{v^k - v_d^k}{v_n^k - v_d^k} & \text{Pour } \begin{cases} 0 \leq v < v_d \\ v_d \leq v < v_n \\ v_n \leq v < v_c \\ v_c \leq v \end{cases} \\ P_n & \\ 0 & \end{cases} \quad (\text{IV.78})$$

Où  $P_n$ : puissance nominale de l'éolienne,  $v_d$  : vitesse de démarrage de la turbine,  $v_n$ : vitesse nominale de la turbine,  $v_c$  : vitesse de coupure de la turbine,  $k$  : le facteur de forme.

La variation de la puissance produite en fonction de la vitesse du vent est montrée dans la Figure IV.25.

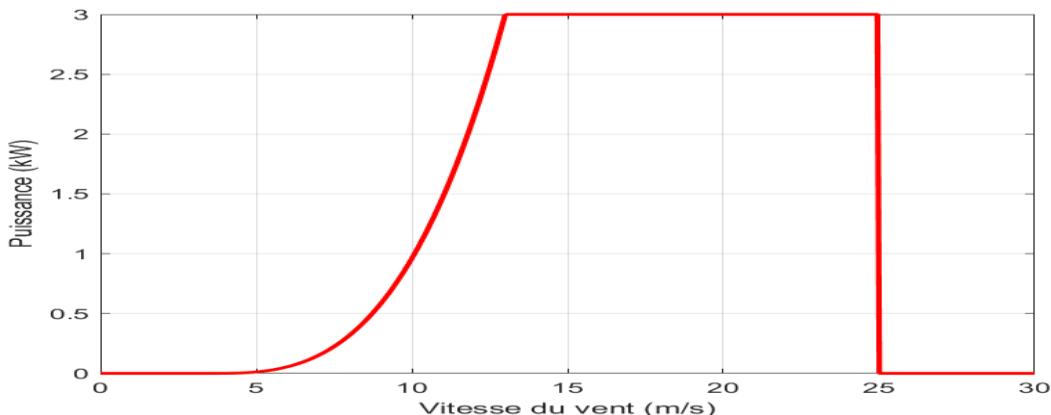


Figure IV.25. Puissance de l'aérogénérateur en fonction de la vitesse du vent

La puissance moyenne produite par l'aérogénérateur est donnée par [137] :

$$P_{eol-moy} = P_n \cdot \left[ \frac{\exp\left(-\left(\frac{v_d}{c}\right)^k\right) - \exp\left(-\left(\frac{v_n}{c}\right)^k\right) - \exp\left(-\left(\frac{v_c}{c}\right)^k\right)}{\left(\frac{v_n}{c}\right)^k - \left(\frac{v_d}{c}\right)^k} \right] \quad (\text{IV.79})$$

Il suffit d'introduire le rendement du pont de diodes à la puissance moyenne produite par l'aérogénérateur *Péol\_moy* pour trouver la puissance éolienne fournie au bus CC.

#### IV.4 MODELISATION DU SYSTEME DE STOCKAGE

Le stockage sur batterie est généralement utilisé comme sauvegarde pour les systèmes autonomes hybrides afin d'en accroître la disponibilité et de fournir un nivelingement de la charge pour les fluctuations à court terme. Comme indiqué dans la littérature, il existe différentes méthodes de stockage de l'énergie renouvelable. Une étude sur l'utilisation du super condensateur est décrite dans [138], les résultats montrent que la durée de vie de la batterie a augmenté en libérant la batterie de la charge et de la décharge transitoires étroites et répétées. Dans [139], on évoque les différentes méthodes de stockage de l'énergie éolienne et dans [140], un aperçu sur le stockage des énergies renouvelables est donné. Cependant, à ce jour, les batteries au plomb-acide ont été les unités de stockage d'énergie les plus utilisées dans les systèmes hybrides en fournissant de l'électricité dans une plage de 5 à 24V DC. [141] trouve qu'ils sont peu coûteux, facilement disponibles et très efficaces. La capacité des batteries au plomb varie de 10h à 1000h. L'utilisation des batteries au plomb présente certaines limites, car elles sont fréquemment entretenues et sensibles aux températures extrêmes [142].

La modélisation des batteries est une question clé du système d'alimentation hybride, car le coût du cycle de vie des batteries est l'une des principales dépenses pour les systèmes [143]. Définir un modèle général pour la batterie, qui couvre tous les facteurs, est assez difficile. En conséquence, en fonction de l'application du modèle, différentes approches ont été appliquées. La modélisation des batteries est classée en trois catégories, à savoir le modèle chimique, les modèles électriques, l'accumulation de charges et les modèles empiriques [144]. La plupart des modélisations se concentrent sur trois caractéristiques différentes : le modèle de charge, le modèle de tension et le modèle de durée de vie [143].

Les caractéristiques de la batterie qui jouent un rôle important dans la conception d'un système hybride renouvelable sont les suivantes : capacité de la batterie, tension de la batterie, état de charge de la batterie [145], profondeur de décharge, durée de vie de la batterie [146], le régime de charge ainsi que l'analyse des coûts de la batterie.

La durée de vie de la batterie est définie comme le nombre de charges et de décharges qu'une batterie peut subir avant d'atteindre la fin de sa durée de vie. La durée de vie de la batterie est affectée par la température ambiante et chaque fois que la température ambiante augmente de

10°C, la durée de vie de la batterie est divisée par deux [147]. La capacité énergétique (Wh) d'une batterie est définie par l'énergie qu'une batterie complètement chargée peut fournir dans les conditions spécifiées.

La profondeur de décharge correspond à l'ampère-heure retiré d'une batterie complètement chargée. Il est défini par le rapport en pourcentage entre la capacité nominale de la batterie et le débit de décharge applicable. Le groupe de batteries est utilisé comme système de secours et dimensionné pour répondre à la demande de charge lorsque les ressources en énergie renouvelable ne parviennent pas à satisfaire la charge ; le nombre de jours pendant lesquels une batterie complètement chargée peut alimenter la charge sans aucune contribution des sources d'alimentation auxiliaires est représenté par des jours d'autonomie, et est pris pour 2 ou 3 jours.

La capacité de la batterie est estimée par l'équation suivante : [148] :

$$C_B = \frac{E_L \cdot S_D}{V_B \cdot DOD_{\max} \cdot T_{cf} \cdot \eta_B} \quad (\text{IV.80})$$

Où  $E_L$  représente la demande de charge en Wh ;  $S_D$  est les jours d'autonomie ;  $V_B$  est la tension de fonctionnement de la batterie ;  $DOD_{\max}$  est la profondeur maximale de décharge ;  $T_{cf}$  est le facteur de correction de température et  $\eta_B$  est l'efficacité de charge / décharge [149].

L'un des points les plus importants dans le contrôle et la gestion des systèmes hybrides est la connaissance de l'état de charge (*SOC*) de la batterie à chaque étape. Une décharge profonde ou une surcharge peut entraîner des dommages irréversibles sur la batterie, ce qui entraîne des dépenses importantes pour le système. [145].

Il existe différentes méthodes pour estimer le *SOC* de la batterie pour différentes applications [150]. Cependant, il peut être défini comme le rapport entre la capacité disponible et la capacité nominale en AHr et est défini par l'équation suivante [151] :

$$SOC = \frac{\text{available\_capacity(AHr)}}{\text{rated\_capacity(AHr)}} \times 100 \quad (\text{IV.81})$$

L'optimisation des systèmes hybrides est généralement effectuée à l'aide des techniques d'itération qui nécessitent le *SOC* à chaque instant pendant une période donnée ou pour un profil de charge spécifique. Par conséquent, elle peut être calculée en utilisant :

$$SOC(t) = SOC(t-1).(1-\sigma) + \left[ E_{Gen}(t) - \frac{E_L(t)}{\eta_{inv}} \right] \cdot \eta_B \quad (\text{IV.82})$$

Et

$$SOC(t) = SOC(t-1).(1-\sigma) + \left[ \frac{E_L(t)}{\eta_{inv}} - E_{Gen}(t) \right] \quad (\text{IV.83})$$

Où,  $\sigma$  est le taux d'autodécharge horaire,  $E_L$  est la demande de charge et  $E_{Gen}$  est l'énergie générée par le système hybride, en tenant compte de la perte d'énergie dans le contrôleur de l'état des batteries. L'équation (IV.82) est utilisée lorsque la batterie est en cours de charge et que l'équation (IV.83) est appliquée pour le régime de décharge de la batterie. A partir de ces équations, on peut voir que le  $SOC$  à chaque instant est lié à son état précédent [152]. Cependant, à chaque instant, l'état de charge ne doit pas dépasser 1 ou devenir inférieur à  $SOC_{min}$ , qui est déterminé par l'équation suivante :

$$SOC_{min} = 1 - DOD \quad (\text{IV.84})$$

La durée de vie de la batterie peut être prolongée au maximum si la profondeur de décharge prend la valeur de 30 à 50%. Plus la profondeur de décharge est élevée plus le cycle de vie de la batterie est bas. [153]

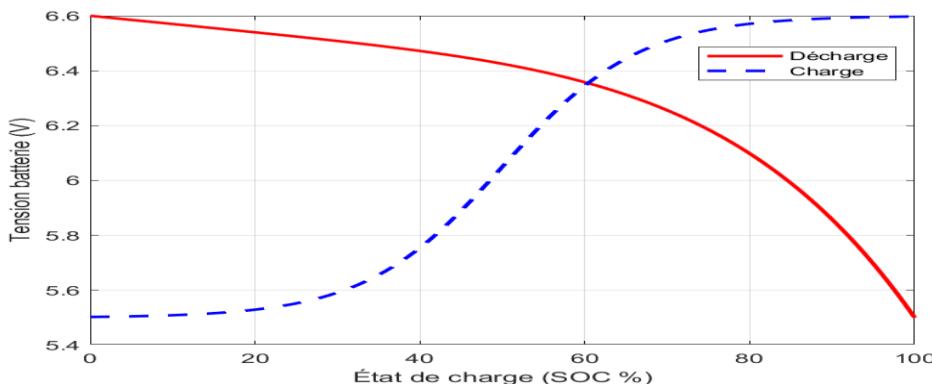


Figure IV.26. Courbe de charge/ décharge d'une batterie

#### IV.5 MODELISATION DU CONVERTISSEUR BIDIRECTIONNEL

Un onduleur bidirectionnel est essentiel dans le système hybride où un système de stockage et un générateur diesel de secours sont impliqués dans le système. Ça peut transférer la puissance simultanément dans les deux sens. L'onduleur peut alimenter en courant continu et charger les batteries de manière à ce qu'elles permettent de passer du bus AC au bus DC, dans

ce cas, il agit comme un circuit redresseur qui modifie la tension alternative en tension continue.

Par contre, il fournit le chemin du bus DC à la charge AC, donc il agit comme un inverseur qui change la tension continue en tension alternative nécessaire par la charge. La forme d'onde en sortie, la puissance nominale et l'efficacité sont les paramètres qui doivent être pris en compte lors du choix d'un onduleur bidirectionnel.

Dans un mode chargeur (redresseur), un onduleur bidirectionnel peut être modélisé comme suit :

$$P_{dicm} = P_{Gout} \times \eta_{dicm} \quad (\text{IV.85})$$

Où :

$P_{dicm}$ : est la puissance de sortie de l'onduleur bidirectionnel dans son mode charge,  $P_{Gout}$  est la puissance de sortie du générateur diesel, et  $\eta_{dicm}$ : est l'efficacité de l'onduleur bidirectionnel dans son mode charge [153].

Dans ce mode de fonctionnement (mode charge), le chargeur se caractérise par sa tension et sa plage de tension nominale, tension de sortie CC nominale doit correspondre à la tension du bus CC et à son courant de charge. Dans un mode onduleur, un onduleur bidirectionnel peut être modélisé comme suit :

$$P_{invm} = P_{DCB} \times \eta_{invm} \quad (\text{IV.86})$$

où  $P_{invm}$ : est la puissance de sortie de l'onduleur directionnel dans son mode onduleur ;  $P_{DCB}$ : est la puissance du bus DC, et  $\eta_{invm}$ : est l'efficacité de l'inverseur bidirectionnel dans son mode onduleur (généralement égal à l'efficacité du bidirectionnel inverseur dans son mode redresseur ( $\eta_{dicm}$ ) et donc appelé  $\eta_v$ ). Dans ce mode de fonctionnement (mode inverseur), un onduleur est caractérisé par sa tension et sa plage de tension nominale qui doivent correspondre au courant continu, la tension du bus, la tension de sortie nominale et sa puissance de sortie.

#### IV.6 MODELISATION DU GENERATEUR DIESEL

Pour les communautés éloignées et les industries rurales, les alimentations sont fournies par des générateurs diesel. Ils sont utilisés comme source d'énergie secondaire lors de la demande de pointe ou en cas d'épuisement de la batterie. Les générateurs diesel ont un faible coût en capital, Néanmoins, leur fonctionnement et leur entretien sont coûteux et ils ne fournissent de l'électricité que quelques heures par jour. Il y a donc deux aspects utilisant l'énergie

renouvelable avec les générateurs diesel : l'ajout d'énergies renouvelables (ER) aux centrales diesel existantes comme économiseur de carburant ou bien un générateur diesel est intégré aux systèmes hybrides.

Éviter le fonctionnement non chargé ou même légèrement chargé du générateur diesel est l'une des considérations à prendre en compte [154]. En outre, il est recommandé que le générateur diesel fonctionne jusqu'à ce que le groupe de batteries atteigne environ 90% du SOC afin d'éviter un fonctionnement excessif et améliore la durée de vie et la consommation de carburant [155]. Il convient de noter que la plage de fonctionnement optimale d'un générateur diesel se situe entre 70% et 89% de sa puissance nominale [154].

L'efficacité et la consommation horaire de carburant sont les caractéristiques d'un générateur diesel qui devraient être prises en compte dans la conception d'un système hybride et peuvent être exprimées par [156], [157] :

$$q(t) = a \cdot P(t) + b \cdot P_r \quad (\text{IV.87})$$

Où,  $t$  est la consommation de carburant (litre/h),  $P(t)$  est la puissance générée (kW),  $P_r$  est la puissance nominale,  $a$  et  $b$  sont des nombres constants (lit/kW) qui représentent les coefficients de consommation de carburant, ils peuvent être proches de 0.246 et 0.08415, respectivement [158].

L'efficacité d'un générateur diesel est calculée par [148] :

$$\eta_{overall} = \eta_{brake\_thermal} \times \eta_{generator} \quad (\text{IV.88})$$

Où  $\eta_{overall}$  et  $\eta_{brake\_thermal}$  représentent respectivement l'efficacité globale et l'efficacité thermique des freins du générateur diesel.

#### IV.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons fait une modélisation mathématique détaillée de chaque sous-système constituant le système hybride contenant des ressources renouvelables. Considérant leurs caractéristiques saisonnières respectives, ces deux énergies (solaire et éolienne) ne se concurrencent pas mais au contraire peuvent se valoriser mutuellement. C'est pourquoi on propose ici un système hybride composé de ces deux sources d'énergie, qui consiste en l'exploitation optimale de la complémentarité entre elles, mais il est préférable de faire une étude multicritère des installations hybrides avant leur mise en œuvre et c'est ce qu'on va voir dans le chapitre suivant.

---

***CHAPITRE V***

---

---

**ETUDE MULTICRITÈRE DES  
INSTALLATIONS HYBRIDES**

---

## V.1 INTRODUCTION

Sur la base de l'analyse effectuée dans les chapitres précédents, les systèmes autonomes hybrides présentent des caractéristiques économiques et techniques relativement bonnes et sont bien adaptés aux besoins en alimentation décentralisée.

Les décisions appropriées sur les questions de développement du système d'énergie hybride constituent une tâche difficile, car elles doivent prendre en compte différents aspects, techniques, économiques, environnementaux et sociaux. Nous examinerons les aspects influençant la décision sur le choix de la structure du système d'alimentation hybride appropriée et comment ces aspects peuvent être évalués.

## V.2 RECHERCHES ACTUELLES

Il existe actuellement un grand nombre de travaux scientifiques consacrés à la conception optimale de systèmes d'énergie hybride. Certaines recherches sont axées sur l'optimisation de la conception initiale des systèmes d'énergie hybride. Dans ce cas, les tâches principales sont les suivantes : combinaison des ressources incluses dans le système, choix de l'emplacement [159], détermination des conditions appropriées, réduction des coûts totaux, fiabilité et résolution des problèmes écologiques pour la région [160], [161].

Le principal problème rencontré lors de la conception des systèmes hybrides autonomes réside dans l'incertitude quant à la quantité d'électricité générée par les SER. De ce fait, le choix de l'équipement repose généralement sur des théories probabilistes ou des prévisions concernant la production solaire et éolienne, souvent avec une moyenne et de nombreuses simplifications [162].

Certaines recherches sont axées sur l'optimisation des modes dans le système énergétique hybride. Dans ce cas, les tâches principales sont les suivantes : accord des processus de consommation et de génération, détermination des modes de charge rationnels, création de systèmes de contrôle automatiques. L'incertitude des SER nécessite l'introduction de sources de secours ou de batteries dans le système, un système de contrôle convivial et fiable.

L'une des tâches principales de la conception du système énergétique hybride est la détermination d'un rapport optimal entre les capacités installées des sources d'énergie incluses dans le système (ou le dimensionnement / la structure optimale du système) [163]. Cela devrait être fait en prenant en compte les conditions climatiques et géographiques réelles de la

région et les caractéristiques du client. La structure du système d'alimentation influence de manière significative les performances de la conception du système d'alimentation et contient de nombreuses tâches principales prises en compte au début du projet de construction électrique, telles que les coûts de production, la fiabilité, les impacts écologiques et sociaux. Cette question a été examinée dans de nombreux travaux scientifiques où le nombre de SER inclus dans le système, varie de un à cinq [164].

Il existe plusieurs manières différentes de définir et de résoudre le problème du rapport optimal entre les capacités installées dans un système énergétique hybride. Par exemple, dans [165] cette tâche est résolue par la programmation linéaire classique, dans [166] - par des outils de programmation convexe, et par le modèle de simulation du système énergétique, dans [167].

Certains travaux résolvent les problèmes énergétiques locaux, par conséquent leurs modèles contiennent les caractéristiques de certains clients, les conditions météorologiques et géographiques de la région spécifique et de l'équipement choisi [165], [166]. Certains travaux visent à développer le modèle universel [164]. Les critères d'optimisation varient également : efficacité totale de conversion énergétique [162], fiabilité de l'alimentation électrique [165], coûts totaux [164], [165], [166], [167], impact environnemental [159], et critère unique [165], [166], dans certains - multicritères [159], [167], [168].

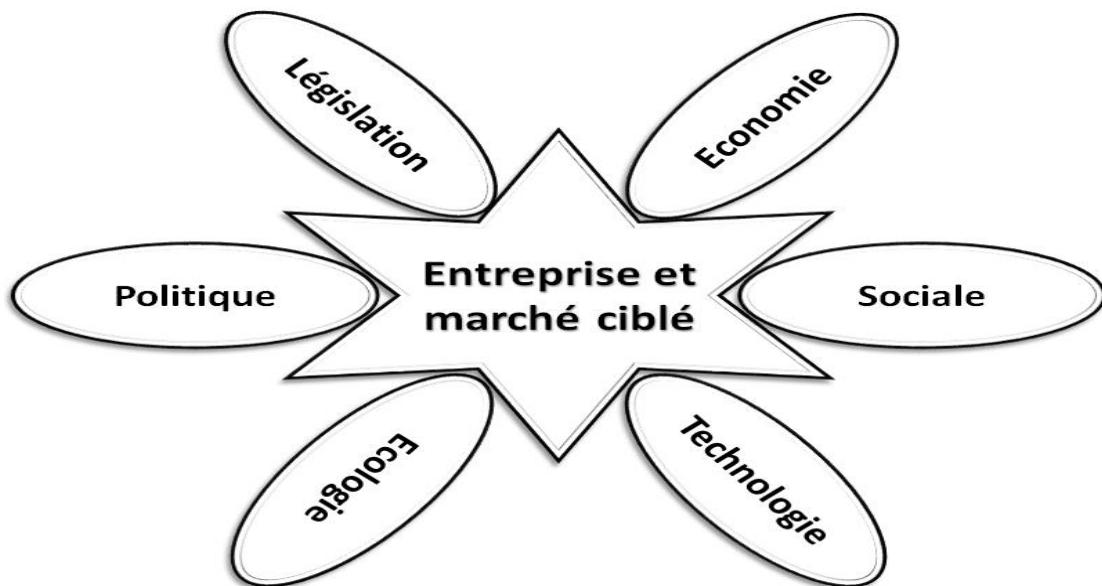


Figure V.1 Les multicritères influençant la réalisation d'un projet

### V.2.1 Méthodes d'optimisation

L'optimisation des systèmes hybrides d'énergie renouvelable étudie le processus de sélection de la meilleure configuration de composants et de leur dimensionnement, en prenant en compte l'efficacité, la fiabilité et la rentabilité du système en appliquant une stratégie d'évaluation appropriée.

En raison de la disponibilité stochastique des énergies renouvelables, la conception et l'optimisation d'un système fiable du point de vue technique et économique sont toujours nécessaires. Les méthodes mathématiques et informatiques sont appliquées à cet égard [169]. Le tableau V.1 présente les études examinées portant sur l'optimisation du dimensionnement des systèmes autonomes. On peut constater que les outils logiciels sont couramment utilisés pour l'analyse technico-économique des systèmes hybrides autonomes.

Tableau V.1 Outils d'optimisation des systèmes hybrides

Méthode/ Logiciels	Configuration	Batteries et système de support	Le cas étudié	Références
<b>Algorithme génétique</b>	Photovoltaïque	Batteries/Pile à combustible	Iran	M. Hosseinian, et al [170]
<b>Mathématique</b>	Photovoltaïque/Eolien	Pile à combustible/ DG	Grèce	P. Sarafianos et al. [171]
<b>Simulink</b>	Photovoltaïque/Eolien	Batteries/Pile à combustible	Turquie	(Dursun et Kilic [172])
<b>MATLAB</b>	Photovoltaïque	Batteries	Tunisie	Wissem, Gueorgui et al [173]
<b>HOMER</b>	Photovoltaïque/Eolien	Batteries/DG	Malaisie	W.X 2009 [174]
<b>HOGA</b>	Photovoltaïque	Batteries/DG	Espagne	D.López et A. Bernal [175]

### V.2.2 Outils de simulation

De nombreux outils logiciels sont disponibles dans le commerce, lesquels peuvent être utilisés pour l'intégration du système en temps réel. Par ailleurs, plusieurs techniques d'optimisation ont également été appliquées par de nombreux chercheurs pour le dimensionnement des systèmes multi-sources à base d'énergie renouvelable (Figure V.2).

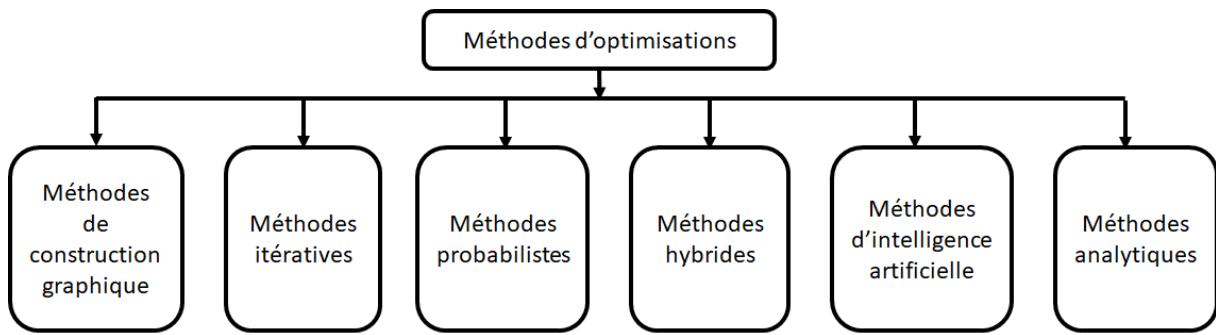


Figure V.2 Outils logiciels disponibles pour le dimensionnement du système hybride

Les programmes de simulation sont les outils les plus courants pour l'évaluation des performances des systèmes hybrides à base d'énergie renouvelable. À l'heure actuelle, il existe de nombreux programmes de logiciels qui peuvent être téléchargés à partir des sites Web de plusieurs laboratoires de recherche et des universités.

HOMER a été largement utilisé dans plusieurs études de cas de système d'énergie renouvelable existant dans la littérature. Les deux types de systèmes, autonome et raccordé au réseau, ont été largement étudiés. En outre, la combinaison parallèle de sources d'énergie renouvelables et les systèmes conventionnels tels que les générateurs diesel, a également été examinée dans de nombreuses études [176] [177].

Plusieurs autres outils logiciels sont également disponibles pour la conception de systèmes hybrides, tels que :

- ✓ Hybrid2 : Simulation Hybrid Power System Model.
- ✓ GAMS : General Algebraic Modeling System.
- ✓ ORIENTE : Optimization of Renewable Intermittent Energies with Hydrogen for Autonomous Electrification.
- ✓ OptQuest : Optimization of Complex Systems.
- ✓ LINDO : Linear, Interactive, and Discrete Optimizer.
- ✓ WDILOG2 : Wind-Diesel LOGistic Model.
- ✓ DIRECT : Dividing Rectangles.
- ✓ DOIRES : Determining Optimum Integration of RES.
- ✓ SimPhoSys: Simulation of Photovoltaic Energy Systems.
- ✓ GSPEIS : Geo-Spatial Planner for Energy Investment Strategies.
- ✓ GRHYSO : Grid-connected Renewable Hybrid Systems Optimization.
- ✓ H2RES : Hydrogen and Renewable Energy Sources.

### V.3 ÉVALUATION DE LA FAISABILITÉ DU PROJET

La question de la conception du système d'alimentation peut être évaluée de différents points de vue. Le rôle des décideurs peut être attribué à :

- Investisseurs privés
- Autorités gouvernementales / municipales
- Habitants

La détermination du décideur affecte la préférence accordée aux critères considérés. Si nous considérons l'investisseur privé, des aspects tels que la performance d'un système, les coûts nivélés lié à la durée de vie du projet, la période de récupération, le risque de construction et le risque commercial du projet doivent être pris en compte. Pour les autorités gouvernementales - différentes politiques telles que lois et règlements, questions environnementales liées au projet, augmentation de l'emploi et du bien-être dans la région. Pour les habitants, le prix de l'électricité, leur tendance aux nouvelles technologies «vertes», le nombre d'interruptions possibles, la simplicité de l'approvisionnement en énergie et l'audit énergétique jouent le rôle le plus important.

La détermination du décideur est généralement évidente dès le début de la conception du projet. Dans la plupart des cas, cette personne est un investisseur privé ou une autorité gouvernementale et très rarement - des habitants en raison du manque de compétence dans les questions de conception.

Après la détermination du décideur, la faisabilité d'un projet doit être évaluée. La faisabilité du projet a été divisée en trois groupes principaux : faisabilité technique, faisabilité du financement et législation. Vous trouverez ci-dessous une description de chacun de ces composants.

À ce stade de la décision, le responsable prend en compte toutes les sources d'énergie existantes utilisées pour les besoins en alimentation décentralisée : éolien, solaire, micro-hydraulique, biomasse, hydrogène, diesel et différentes combinaisons de ces sources [178].

#### V.3.1 Faisabilité technique

Afin de préciser que tel ou tel projet est réalisable d'un point de vue technique, le nombre de paramètres doit être pris en compte.

Premièrement, il est important de prendre en compte les restrictions géographiques liées au projet. Les données primaires pour cette considération sont les données des caractéristiques techniques de la source d'alimentation, qui montrent si ces caractéristiques sont suffisantes pour installer l'unité de production ou non. Pour la microcentrale hydroélectrique, la faisabilité du projet est basée sur la vitesse minimale de la vapeur d'eau sur le lieu de construction et sur un débit minimal.

Pour les éoliennes, il est basé sur la vitesse annuelle moyenne minimale du vent, suffisante pour faire tourner l'éolienne. Pour les installations solaires, la restriction peut être causée par l'ensoleillement quotidien moyen insuffisant. Pour les technologies de la biomasse, la faisabilité du projet est basée sur la quantité de biomasse produite possible dans la région donnée et sur la distance de transport [179].

La deuxième question importante est la compétence technique du concepteur. Elle fait référence à la capacité de construire le système électrique en fonction de la technologie donnée.

Les données pour l'évaluation de la compétence technique peuvent être prises en compte dans l'évaluation de ce type de projets au niveau local. L'examen des projets existants pourrait aider à comprendre s'il y a suffisamment de compétences et d'expérience des ingénieurs pour pouvoir lancer un système électrique planifié. Au cas où il n'y aurait pas de cas local de conception du système basé sur la technologie donnée, la capacité à adopter certaines connaissances régionales / internationales pour le cas local est évaluée.

### V.3.2 Faisabilité du financement

La faisabilité du financement se réfère à la capacité de financer le projet par le gouvernement / secteur privé ou à la capacité de recevoir le prêt bancaire. La capacité de recevoir le prêt est une préoccupation cruciale pour les projets basés sur les SER.

Dans certains pays, les promoteurs de projets énergétiques éprouvent des difficultés à obtenir du financement bancaire en raison de l'incertitude quant au savoir si les services publics continueront d'honorer les contrats d'achat d'électricité à long terme pour acheter l'électricité. Et dans certains cas, les banques exigent même la garantie d'une production stable de centrales SER. Cette capacité peut être assurée par l'accord de principe avec les investisseurs potentiels ou avec l'approbation du crédit potentiel par une institution bancaire.

### V.3.3 Législation

Les restrictions gouvernementales (fédérales, régionales et locales) se réfèrent à de telles restrictions telles que des lois interdisant l'installation de certaines unités de production particulières, limitent la capacité installée de la source d'énergie ou les restrictions liées à l'utilisation de la parcelle, hauteur de l'unité installée, esthétique, bruit, sécurité, etc.

## V.4 EVALUATION DES FACTEURS INFLUENÇANTS

Les principaux facteurs d'évaluation de l'efficacité des systèmes d'alimentation et de leurs impacts environnementaux et sociaux peuvent être regroupés en quatre groupes principaux comme étant les plus influents dans la conception de ce type de systèmes :

- Technique
- Économique
- Environnemental
- Social

La tâche de conception optimale d'un système hybride est une tâche difficile, car elle inclut des unités d'alimentation avec des caractéristiques absolument différentes. Pour atteindre les objectifs du travail, la méthode de prise de décision à objectifs multiples sera utilisée.

Quatre groupes de critères seront considérés et évalués. Dans ce travail les indicateurs quantitatifs et qualitatifs seront utilisés pour cette évaluation. Les indicateurs quantitatifs du système seront obtenus au moyen de données statistiques ou de calculs, d'indicateurs qualitatifs, au moyen de notes d'examen données par des décideurs et des opinions d'experts [180].

### V.4.1 Critères techniques

Selon les critères techniques, il s'agit de tout ce qui concerne les performances du système, tous les indicateurs d'efficacité technique, et les risques liés au fonctionnement du système. Du point de vue technique, le projet peut être évalué selon les critères suivants :

#### V.4.1.1 Efficacité énergétique

L'un des aspects importants de toute unité de production est son efficacité énergétique. Dans ce cadre, il faut comprendre l'utilisation efficace des sources d'énergie pour fournir le niveau de consommation souhaitable.

L'efficacité énergétique des systèmes hybrides est déterminée par de nombreux facteurs : mode de vent, rayonnement solaire local, demande de charge, rapport entre les capacités installées et le degré de sophistication de la structure du système d'alimentation, et les principes de contrôle. Elle peut être mesurée par la quantité maximale d'entrée par chaque source du système.

$$\eta = \frac{P_{real}}{P_{nom}} \quad (\text{V.1})$$

Où

$P_{real}$  – La puissance de sortie réelle mesurée pour la période exacte

$P_{nom}$  – La puissance de sortie nominale (information du fabricant)

#### V.4.1.2 Fiabilité du système

Un autre facteur crucial pour la conception de tout système d'alimentation est sa fiabilité. Ce facteur joue un rôle important dans la conception, en particulier lorsque nous traitons des sources d'énergie inconstantes telles que SER. En raison de la fiabilité du système d'alimentation, le système peut fonctionner en quantité suffisante dans des conditions spécifiques.

La fiabilité du système est généralement divisée en deux parties - la fiabilité modale (l'évaluation repose sur le nombre de modes possibles de déficit lorsque la production ne peut pas couvrir la demande) et la fiabilité du système (l'évaluation repose sur les éventuels déficits causés par la rupture des parties d'un système).

La fiabilité du système électrique peut être mesurée par des indices tels que LPSP (perte de probabilité d'alimentation), LOLP (probabilité de perte de charge), LOLH (perte d'heures de charge), SPL (niveau de performance du système), SAIFI (indice moyen de la fréquence d'interruption du système), le nombre ou la fréquence des pannes, le temps de récupération moyen et bien d'autres [181].

L'exemple du modèle LOLP :

$$LOLP = P(S < P) \quad (\text{V.2})$$

Cette équation montre la probabilité que la demande dépasse l'offre.

#### V.4.1.3 Risque de construction

Le risque de construction fait référence au risque que la technologie ne fonctionne pas correctement dans des conditions données en raison d'informations erronées provenant de la fabrication, du risque d'erreurs de conception des ingénieurs et du risque que les conditions environnementales changent de manière imprévisible de l'équipement.

Ce critère peut être évalué par la probabilité de dommage / détérioration de la performance ou être défini comme critère qualitatif :

$P = \{1, 2, 3\}$  Où

1- faible probabilité ; 2- probabilité moyenne ; 3- probabilité élevée ;

Les données peuvent être extraites d'experts ou de sociétés de conseil et des statistiques de projets antérieurs.

#### V.4.1.4 Probabilité de sous approvisionnement en carburant

Pour certains systèmes d'alimentation, la livraison du carburant à temps est un autre problème important. La probabilité de manque de carburant (ou de sécurité de l'alimentation électrique) peut être considérée comme l'un des critères.

Une source d'énergie est définie comme étant sécurisée sur ce site si les producteurs d'électricité peuvent être certains d'obtenir suffisamment de carburant pour maintenir un approvisionnement en électricité adéquat. Les pays qui utilisent du carburant qui doit être constamment importé pour alimenter en électricité s'exposent à des problèmes potentiels de sécurité énergétique, notamment des fluctuations des prix sur le marché international et des perturbations des approvisionnements en carburant causées par des perturbations géopolitiques.

Ce critère peut être évalué quantitativement par le calcul statistique :

$$P_{fuel} = P(S < D) \quad (V.5)$$

Ou qualitativement au moyen de sociétés de conseil ou d'experts :

$P = \{1, 2, 3\}$

1- faible probabilité ; 2- probabilité moyenne ; 3- probabilité élevée

#### V.4.2 Critères économiques

Dans le cadre de l'efficacité économique du système électrique, il est entendu qu'un rapport efficace entre l'effet économique (résultat) et les coûts a influencé ce résultat. Moins les coûts sont élevés et plus la valeur du résultat est élevée, plus l'efficacité économique est grande. De nombreux facteurs peuvent être considérés comme des indicateurs d'efficacité économique. Parfois, des coûts d'investissement ou de production minimaux ont la plus grande importance pour le concepteur et, à d'autres moments, les revenus maximums obtenus grâce à la vente d'électricité, au faible délai de récupération ou à la capacité de payer élevée. Cependant, les indicateurs économiques les plus utilisés pour l'évaluation des projets d'électricité sont le coût de projet ou le prix de l'électricité.

##### V.4.2.1 Coût de l'énergie / prix de l'électricité

Le coût actualisé de l'énergie (LCOE) est l'un des principaux paramètres du secteur des services publics pour le coût de l'électricité produite par un générateur. Il est calculé en tenant compte de tous les coûts prévisibles d'un système (y compris la construction, le financement, le carburant, l'entretien, les taxes, les assurances et les incitations), qui sont ensuite divisés par la puissance attendue (kWh) du système. Toutes les estimations de coûts et d'avantages sont ajustées pour tenir compte de l'inflation et actualisées pour tenir compte de la valeur temps de l'argent.

$$LCOE = \frac{Costs}{W} \quad (\text{V.6})$$

Les données sont les paramètres économiques de base de l'équipement, les taux d'indexation pour la région donnée, les salaires moyens, les prix du carburant et des loyers, les emprunts bancaires, etc. Le calcul du prix minimum de l'électricité tient compte également des recettes obtenues lors de l'exploitation du système. Le concept de prix de l'électricité sera utilisé pour les calculs dans ce travail.

##### V.4.2.2 Risque commercial

Le risque d'entreprise fait référence au risque de faillite lié à la croissance des impôts, à l'annulation des subventions, à la croissance des prix des équipements, aux garanties non payées.

On peut mesurer par critère qualitatif :

P = {1 ; 2 ; 3}

Où : 1 Risque faible ; 2 Risque moyen ; 3 Risque élevé

#### V.4.2.3 Complexité des questions administratives

Ce critère fait référence aux problèmes administratifs liés à la mise en œuvre des projets d'investissement.

Le critère qualitatif peut être utilisé pour ce critère :

P = {1 ; 2 ; 3}

Où : 1 Faible complexité ; 2 Complexité moyenne ; 3 Haute complexité

#### V.4.2.4 Temps d'accès au service

Il fait référence au temps nécessaire pour effectuer une réparation suffisante en cas de panne. La méthode quantitative consiste à calculer le nombre d'heures nécessaires pour pouvoir effectuer les réparations requises.

La méthode qualitative :

P= {0 ; 1 ; 2 ; 3}

Où : 0 Pas de temps requis ; 1 Moins d'une heure ; 2 Plusieurs heures ; 3 un ou plusieurs jours

#### V.4.3 Critères environnementaux

La production d'électricité a de nombreux impacts sur l'environnement, tels que les gaz à effet de serre dans l'atmosphère GES, le changement climatique, la pollution, l'épuisement des ressources, les dommages causés aux écosystèmes locaux et autres. Tous ces impacts influencent également de manière significative le processus de prise de décision, en particulier ces derniers jours. Tous les impacts environnementaux peuvent être évalués et comparés au préalable pour différentes technologies.

##### V.4.3.1 Émissions du GES

Les gaz à effet de serre sont des gaz qui retiennent la chaleur dans l'atmosphère. Ces gaz permettent à la lumière du soleil d'entrer librement dans l'atmosphère. Lorsque la lumière du soleil frappe la surface de la Terre, une partie est réfléchie vers l'espace sous forme de rayonnement infrarouge (chaleur). Les gaz à effet de serre absorbent ce rayonnement

infrarouge et emprisonnent la chaleur dans l'atmosphère. Au fil du temps, la quantité d'énergie envoyée du soleil à la surface de la Terre devrait être à peu près la même que la quantité d'énergie renvoyée dans l'espace, laissant la température de la surface de la Terre à peu près constante. Parmi ces gaz :

- Dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) pénètre dans l'atmosphère en brûlant des combustibles fossiles (charbon, gaz naturel et pétrole), des déchets solides, des arbres et des produits du bois, ainsi que certaines réactions chimiques (fabrication de ciment, par exemple).
- Le méthane (CH<sub>4</sub>) est émis lors de la production et du transport du charbon, du gaz naturel et du pétrole. Les émissions de méthane résultent également de l'élevage et d'autres pratiques agricoles et de la dégradation des déchets organiques dans les décharges municipales de déchets solides.
- L'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O) est émis lors d'activités agricoles et industrielles, ainsi que lors de la combustion de combustibles fossiles et de déchets solides.
- Les gaz fluorés, les hydrofluorocarbures, les per-fluorocarbures et l'hexafluorure de soufre sont des gaz à effet de serre puissants et synthétiques émis par divers procédés industriels [182].

Seul le CO<sub>2</sub> est présent lors de la combustion de combustibles fossiles. Les technologies photovoltaïques et éoliennes ne produisent aucune émission de GES pendant l'exploitation. La quantité d'émissions de CO<sub>2</sub> est calculée en multipliant l'électricité annuelle produite (W, kWh) par les émissions annuelles moyennes de certains réseaux (q en kg/kWh).

$$Q(CO_2) = qCO_2 \times W \quad (V.7)$$

L'évaluation est basée sur les valeurs standards de la littérature : 545kg/kWh [183]. Afin d'évaluer la quantité de GES libérée lors de la production d'électricité, il convient de tenir compte de la dépendance de la quantité de GES à la charge du générateur.

#### V.4.3.2 Autres émissions

Pendant le fonctionnement du réseau, non seulement les GES sont émis, mais il y a aussi des polluants non naturels :

- Dioxyde de soufre : les concentrations maximales de SO<sub>2</sub> dans l'air peuvent causer des difficultés respiratoires temporaires aux personnes asthmatiques actives à l'extérieur et aux enfants, aux personnes âgées et aux personnes souffrant d'une

maladie cardiaque ou pulmonaire. Des expositions à long terme à des niveaux élevés de gaz et de particules de SO<sub>2</sub> provoquent des maladies respiratoires et agravent les maladies cardiaques existantes. Le SO<sub>2</sub> contribue à la formation de pluies acides, d'ozone troposphérique (smog) et de pollution par les particules.

- Particules (MP) : les expositions à long terme, telles que celles subies par des personnes vivant pendant de nombreuses années dans des zones à forte concentration de particules, ont été associées à des problèmes tels que la fonction pulmonaire réduite et le développement de bronchites chroniques et même de décès prématurés. Les petites particules posent les plus gros problèmes car elles peuvent voyager profondément dans les poumons et même pénétrer dans la circulation sanguine. L'exposition à de telles particules peut affecter les poumons et le cœur.

La quantité d'émissions peut également être calculée en multipliant l'électricité produite annuellement (kWh) par les émissions annuelles moyennes de certains réseaux (kg/kWh).

$$Q(NOx) = q(NOx) \times W \quad (\text{V.8})$$

$$Q(SO2) = q(SO2) \times W \quad (\text{V.9})$$

$$Q(PM) = q(PM) \times W \quad (\text{V.10})$$

L'évaluation est basée sur les valeurs standards de la littérature : NOx: 10,5kg/MWh, SO<sub>2</sub>: 10,2kg/MWh, PM: 0,35kg/MWh [183].

#### V.4.4 Critères sociaux

Les critères sociaux font référence à l'influence sur la société des personnes qui vivent sur le lieu de l'installation de la centrale. Il existe un large éventail d'aspects sociaux influençant la décision de conception du système d'alimentation.

##### V.4.4.1 Augmentation de l'aide sociale / augmentation du taux d'emploi

L'influence sur l'amélioration de la vie des habitants peut être évaluée en augmentant le bien-être général de la région en améliorant la situation de l'emploi. L'influence sur l'emploi dans la région peut être mesurée par le nombre de nouveaux postes de travail (N). Le bien-être social peut être évalué par la réduction des sorties de fonds, la réduction de la dépendance à l'égard des prix du carburant, des politiques locales et des dépenses futures possibles. L'évaluation du bien-être peut être faite en suivant une méthode qualitative :

P = {0 ; 1 ; 2 ; 3}

Où : 0 - signifie aucune influence ; 1 - faible influence ; 2- influence significative ; 3- influence bloquante.

#### **Données d'évaluation :**

Emploi : montant typique des employés pour la maintenance du système électrique. Pour les petits projets décentralisés jusqu'à 100kW, il s'agit généralement d'environ 2 personnes.

Bien-être : mesure de l'argent économisé sur le carburant, au cas où une autre centrale électrique inefficace serait installée dans la région.

#### V.4.4.2 Consistance avec les politiques locales

De nos jours, les gouvernements appliquent différents instruments pour répondre aux besoins de développement des énergies renouvelables. Des mesures telles que les certificats verts, les droits d'émission, le système de quotas, les taxes sur le carbone et bien d'autres sont utilisées dans le monde entier. Ces instruments ont une grande influence sur la décision de conception du système d'alimentation. La cohérence de la technologie avec tous les droits d'émission, les normes de construction et de conception sont également prises en compte.

L'évaluation du critère peut être faite en suivant une méthode qualitative :

P = {0 ; 1 ; 2}

Où : 0 - pas cohérent ; 1 - en partie cohérent ; 2 – cohérente.

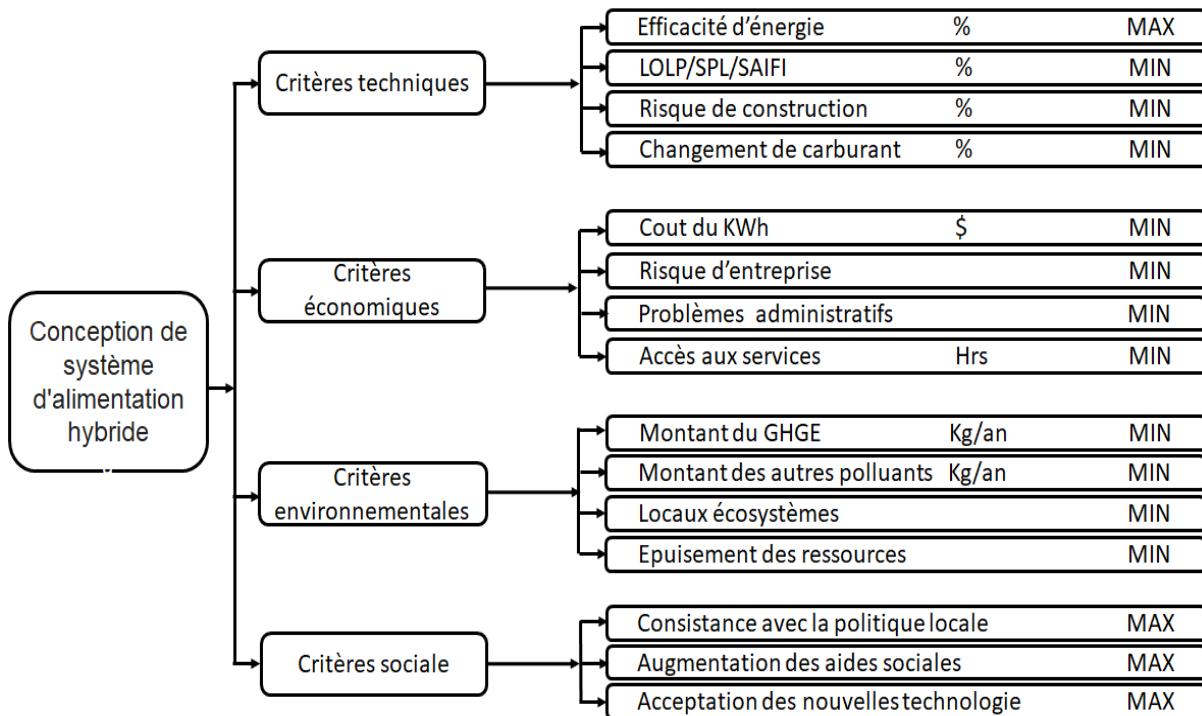
#### V.4.4.3 Acceptation de la technologie par les gens

Ce critère fait référence à la réponse de la société. Il faut toujours se rappeler que les gens ont tendance à être conservateurs et, dans de rares cas, seraient prêts à payer de l'argent supplémentaire pour l'énergie verte. Cependant, le nombre de promotions écologiques et de sensibilisation à l'épuisement des sources augmente d'année en année, si bien que l'acceptation de ce type de projets dépend fortement de la société.

L'acceptation de la technologie peut être mesurée par le pourcentage d'habitants acceptant une technologie donnée.

Les données peuvent être obtenues par l'enquête auprès des personnes, l'analyse de l'acceptation des habitants des projets similaires.

Comme nous pouvons le voir, il y a un grand ensemble de critères à prendre en compte. Ces critères peuvent être combinés dans une soi-disant «arborescence de critères» (voir Figure V.3).



## V.5 STRATEGIE DE GESTION DE L'ENERGIE

La gestion de l'énergie est définie conformément à la norme ISO50001 en tant que «ensemble d'éléments interdépendants ou en interaction pour établir une politique énergétique et des objectifs et processus énergétiques et des procédures permettant d'atteindre ces objectifs» [184].

Le système hybride autonome est composé de sources d'énergie renouvelables et de sources non renouvelables. Par conséquent, les stratégies de gestion de l'alimentation pour cela sont devenues très complexes.

Par conséquent, la stratégie de gestion couvrirait la demande de charge en ajoutant l'énergie générée par les sources d'énergie renouvelables (énergie éolienne et photovoltaïque) et l'énergie stockée dans la batterie. Le générateur diesel est activé en tant que source de secours lorsque le parc de batteries est épuisé. Pour chaque pas d'heure, le programme de simulation compare la demande de charge et l'énergie fournie (Eolienne + PV) et, en fonction de la différence, prend la décision de charger la batterie ou de la décharger ou d'utiliser le

générateur diesel. Si la puissance extraite de l'éolienne et du PV est supérieure à la demande, le surplus d'énergie peut être utilisé pour charger les batteries. Si, au contraire, les ressources renouvelables ne répondent pas à la demande de charge, le parc de batteries serait déchargé à sa valeur minimale.

Un algorithme de gestion de l'énergie est élaboré pour expliquer le fonctionnement du système hybride pour satisfaire la demande tout en tenant compte de l'état de charge des batteries.

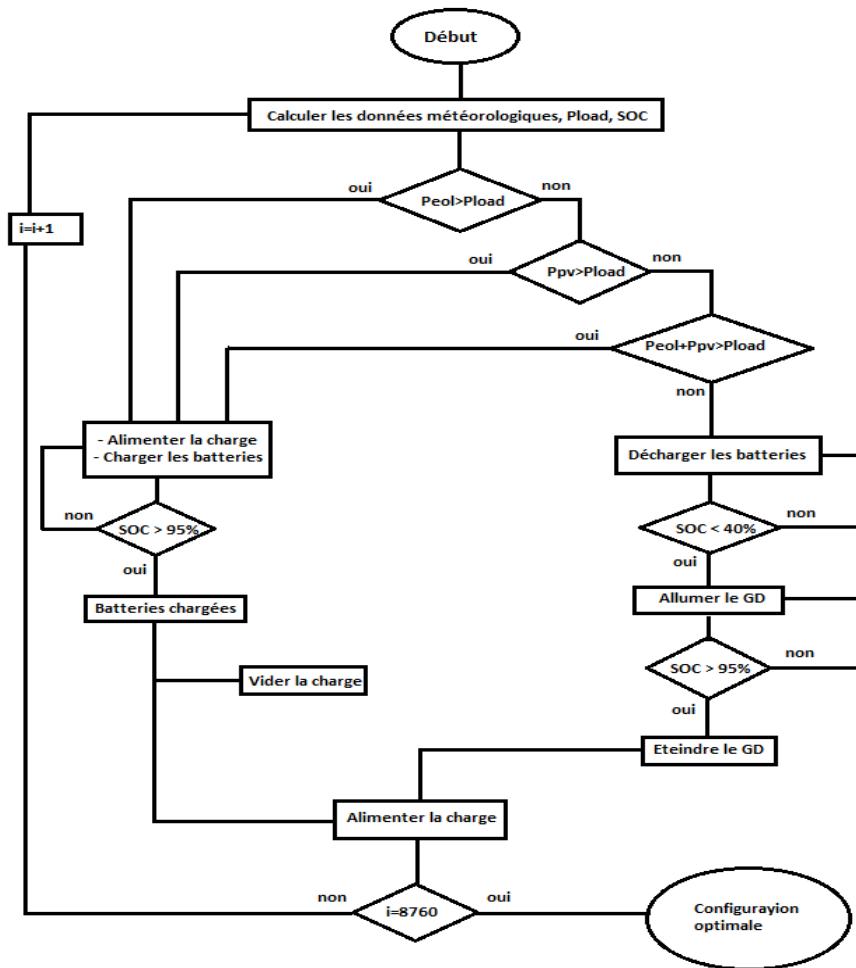


Figure V.4 Organigramme de gestion de l'énergie

Les cas suivants seront pris en compte dans le logiciel de simulation pour appliquer ces stratégies :

Cas n°1 : les sources renouvelables fournissent une énergie générée suffisante et l'énergie supplémentaire sert à charger le parc de batteries.

Cas n°2 : identique au cas 1, mais le surplus d'énergie généré par les ressources renouvelables est supérieur au besoin de fournir la charge et le groupe de batteries. Par conséquent, dans ce cas, le surplus d'énergie est vidé dans Dump load.

Cas n°3 : les ressources renouvelables n'ont pas fourni suffisamment d'énergie pour faire face à la charge. La priorité dans ce cas est d'utiliser l'énergie stockée dans les batteries plutôt que d'utiliser le générateur diesel.

Cas n°4 : l'énergie générée par les sources renouvelables n'est pas suffisante pour satisfaire la charge demandée et le parc de batteries est également épuisé. Dans ce cas, le générateur diesel est allumé pour alimenter la charge et charger les batteries. Le système hybride resterait dans ce mode jusqu'à ce que les batteries soient rechargées à leur pleine capacité.

## V.6 CONCLUSION

Ce chapitre est basé sur l'étude des critères influents sur le choix et l'installation des systèmes hybrides, dans la première partie, on a montré l'évidence d'une étude de faisabilité d'un projet avant sa mise en œuvre, suivi par l'arborescence des critères détaillée, en suite, dans la deuxième partie, un algorithme de gestion d'énergie est développé afin de faire comprendre le principe de fonctionnement de l'outils de simulation utilisé dans ce travail et qui va être décrit dans le chapitre suivant.

***CHAPITRE VI***

---

---

***ETUDE TECHNICO-ÉCONOMIQUE  
D'UN SYSTÈME HYBRIDE POUR  
L'ÉLECTRIFICATION D'UNE MAISON  
AU SUD ALGÉRIEN***

---

## VI.1 INTRODUCTION

Le concept de production d'énergie hybride est un système visant à produire et à utiliser de l'énergie électrique provenant de plusieurs sources dans un arrangement intégré. Le système hybride étudié dans cette thèse associe le système solaire PV et les éoliennes à des unités de conditionnement de puissance, tels que les convertisseurs bidirectionnels. Les éoliennes et les modules solaires photovoltaïques offrent une plus grande fiabilité que chacun d'entre eux, car l'approvisionnement en énergie locale ne peut dépendre entièrement de l'une de ces sources.

L'étude proposée pour cette thèse est d'assurer l'alimentation électrique d'une maison au sud Algérien sans interruption par l'investigation des systèmes de production d'énergie renouvelable afin de minimiser les couts et la consommation du diesel par le générateur diesel ainsi qu'optimiser son temps de fonctionnement [185].

## VI.2 MODELISATION ET SIMULATION DU SH

### VI.2.1 Introduction à la simulation HOMER et système

HOMER est un logiciel développé pour des systèmes de production d'énergie de petites puissances. Il permet de faire des simulations de systèmes avec des énergies renouvelables et avec des énergies fossiles. Un de ses grands atouts est la possibilité de pouvoir simuler des systèmes hybrides combinant différentes sources d'énergie qu'elles soient renouvelables ou fossiles.

La première version a été développée en 1992 pour NREL (US National Renewable Energy Laboratory) [186], il a ensuite subi de nombreuses améliorations dans plus de 40 nouvelles versions. La version utilisée pour le présent projet est HOMER 2.68 beta version juillet 2009. Depuis, il y a eu 2 nouvelles versions disponibles pour 2.75 et 2.76 qui sont maintenant vendues pour un faible coût 99 \$US pour les nouveaux utilisateurs et pour 49\$ pour les anciens utilisateurs. La 28<sup>ème</sup> version 2.68 beta est toujours disponible gratuitement.

La variété des caractéristiques de ce logiciel lui a rendu l'un des plus utilisés dans le monde, ainsi que sa disponibilité et sa capacité d'analyse des systèmes multi-générations.

Ce logiciel est largement utilisé dans plus de 190 pays et par plus de 40000 utilisateurs.

Tableau VI.1. Paramètres pour le choix de logiciel – HOMER

Paramètres	Usage	Explications
<b>Langue</b>	OUI	En anglais
<b>Accessibilité à tous</b>	OUI	Gratuit, téléchargement disponible en ligne, aide et tutoriel, fichiers d'exemple
<b>Plusieurs technologies disponibles</b>	OUI	Éolien, diesel et photovoltaïque
<b>Systèmes hors réseau</b>	OUI	Systèmes autonomes et systèmes raccordés aux réseaux
<b>Simulation de systèmes dans plusieurs pays</b>	OUI	Partout à travers le monde selon des lieux prédéterminés.
<b>Évaluation des coûts</b>	OUI	Selon l'étude du marché
<b>Optimisation des systèmes</b>	OUI	Selon les champs de travail introduits comme entrée

### VI.2.2 Principales caractéristiques

HOMER modélise le comportement physique du système et calcule son coût de cycle de vie ou le coût total du système (*TNPC*), qui comprend l'installation et les coûts d'exploitation du système sur sa durée de vie. Le modélisateur fournit les données sur les ressources solaires et éoliennes, le profil de charge de la maison à desservir par le système hybride, les composants à prendre en compte et leur coût en tant que données d'entrée pour le HOMER.

HOMER effectue ensuite un calcul du bilan énergétique horaire pour chaque configuration pendant une année. Après avoir simulé toutes les configurations possibles, les configurations irréalisables sont rejetées et les solutions réalisables sont classées selon le *TNPC*. Il permet également à l'utilisateur d'effectuer l'analyse de sensibilité sur différentes entrées pour accéder aux effets d'incertitude sur lesquels le système n'a aucun contrôle.

La Figure VI.1, illustre la relation entre la simulation, l'optimisation et l'analyse de sensibilité. L'optimisation renferme la simulation pour représenter le fait qu'une seule optimisation consiste en plusieurs simulations. De même, l'analyse de sensibilité englobe l'optimisation, ce qui signifie qu'une analyse de sensibilité unique consiste en plusieurs optimisations.

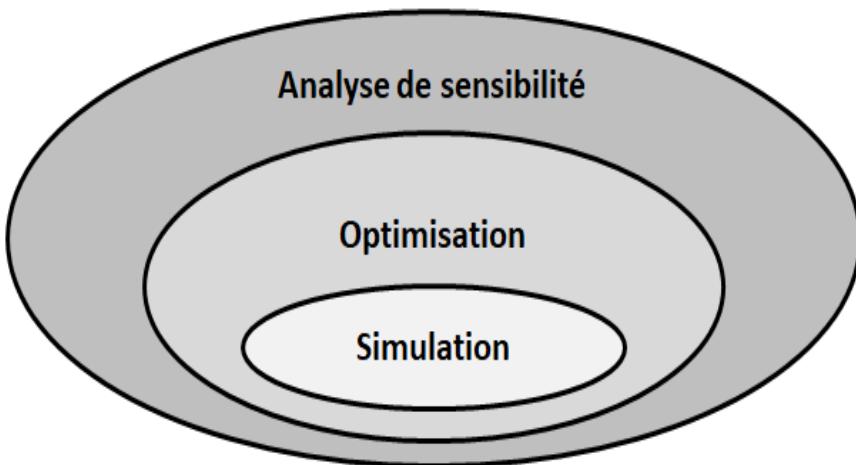


Figure VI.1 Modèle conceptuel du logiciel HOMER

#### VI.2.2.1 Processus de simulation

Des architectures des systèmes hybrides avec différentes combinaisons de ressources distribuées sont développées pour l'analyse de la performance à chaque heure de l'année pour déterminer sa faisabilité technique et son coût du cycle de vie. Le calcul du bilan énergétique est effectué en fonction de l'architecture du système composée de différentes combinaisons de composants.

#### VI.2.2.2 Processus d'optimisation

Le système électrique doit être conçu de manière appropriée en termes d'économie, de fiabilité et de mesures écologiques soumises à diverses contraintes physiques et opérationnelles du lieu. La configuration optimale du système peut être décidée avec le mélange de composants que le système doit comprendre, la quantité de chaque composant et la stratégie d'expédition que le système doit utiliser. L'objectif général est d'identifier une configuration à faible *TNPC*. Par conséquent, différentes configurations du système et contraintes techniques sont simulées et forment différentes combinaisons de système. Enfin, une liste de configurations est triée et comparée. Les meilleures combinaisons possibles sont extraites et les moins réalisables sont omis. Le processus global d'optimisation est illustré par la Figure VI.2.

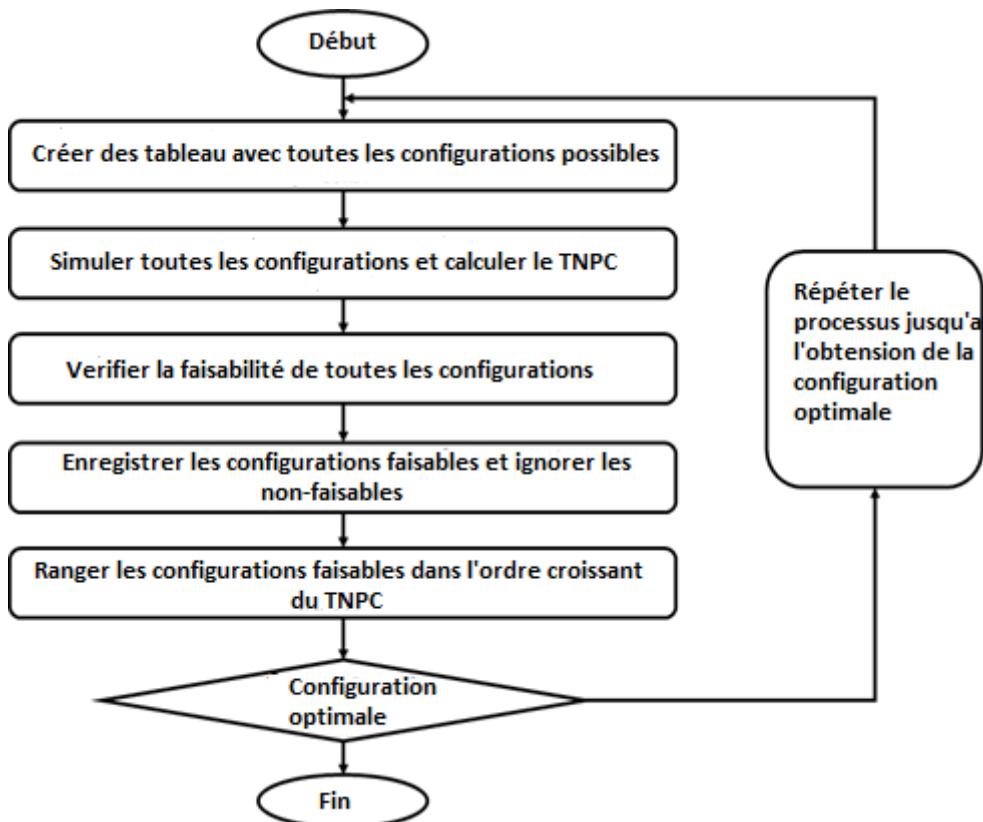


Figure VI.2 Organigramme du processus d'optimisation

### VI.2.2.3 Processus de sensibilité

Comme le *TNPC* varie en fonction des variables de sensibilité choisies, dans cette analyse, plusieurs optimisations sont effectuées pour mesurer les effets des incertitudes telles que la vitesse du vent, la hauteur du manomètre de l'aérogénérateur, les radiations solaires, le prix du carburant. Par conséquent, la configuration du SH a été choisie pour tolérer toutes ces situations.

## VI.3 METHODOLOGIE

### VI.3.1 Spécifications de la localisation et de la demande de charge

Plusieurs études menées sur l'utilisation des systèmes hybrides aux Sahara Algérien, et la plupart d'entre eux choisissent le site d'Adrar au sud-ouest à cause de son potentiel éolien et peut d'autres choisissent les sites des hauts plateaux. C'est la première étude concernant le centre du Sahara dans la ville d'In Salah, située à l'altitude de 268m entre les coordonnées 2°28'E longitude et 27°12'N latitude, ces caractéristiques offrent un grand potentiel solaire et éolien à cette région qui est l'une des moins couvertes par le réseau électrique. Même ceux

qui sont alimentés par le réseau souffrent des coupures soudaines et non prévues. C'est à base de ça qu'on s'est trouvé dans l'obligation d'entamer cette étude en analysant le côté technique et économique de la meilleur combinaison pour l'alimentation d'une maison de 90m<sup>2</sup> à In Salah (Deux chambres, salon, cuisine...etc.) occupée par une famille de 05 personnes dont 03 enfants et leur parents. Cette maison est équipée par les appareils suivants : Ampoules, TV, ordinateur fixe et portable, imprimante, box internet, réveils aspirateur, fer à repasser, hotte aspirante, micro-onde, plaques, four, réfrigérateur, congélateur, lave-vaisselle, machine à laver, chauffage et chauffe-eau. Qui nous donnent une charge moyenne de 56kWh/j avec un pic de 15kWh, la consommation journalière moyenne est illustrée dans le Tableau VI.1.



Figure VI.3. Carte géographique de la wilaya de Tamanrasset [187]

Tableau VI.2 : Consommation hebdomadaire de la maison

Appareil	Puissance	Utilisation	Total/semaine	Moyenne/jour
Charges partielles	-	-	47,77 kWh	6,8 kWh
Lave/Sèche-linge	2500W	14h	35 kWh	5 kWh
Lave-vaisselle	2400W	14h	33,6 kWh	4,8 kWh
Plaques cuisson	1000W	7h	7 kWh	1 kWh
Four	2000W	7h	14 kWh	2 kWh
Réfrigérateur	700W	49h	34,3 kWh	4,2 kWh
Congélateur	500W	49h	24,5 kWh	3 kWh
Chauffage	2000W	63h	126 kWh	19,5 kWh
Chauffe-eau	2400W	28h	67,2 kWh	9,6 kWh
<b>TOTAL</b>	-	-	<b>389,37 kWh</b>	<b>55,6 kWh</b>

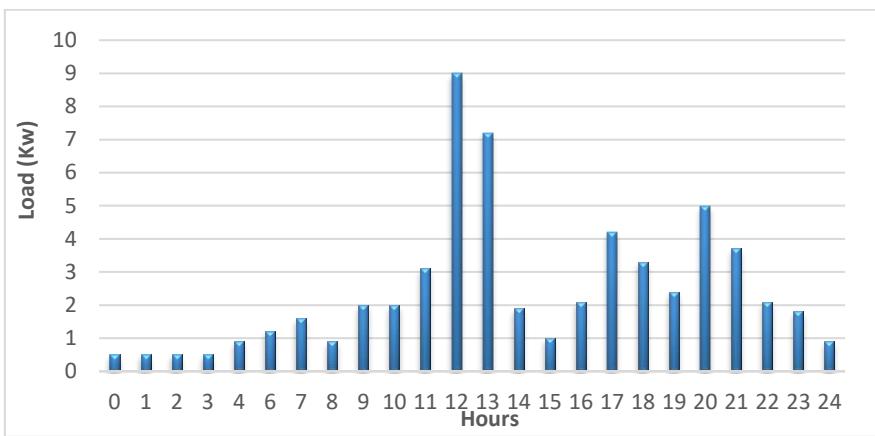


Figure VI.4. Consommation journalière d'électricité

On remarque qu'il y a une faible demande d'énergie entre 8h et 11h puis elle augmente à midi et le soir de 17h jusqu'à 21h où le pic de consommation est trouvé à 12h.

### VI.3.2 Données météorologiques

In Salah a un climat désertique chaud typique de la zone saharienne hyperaride, c'est-à-dire du cœur du Sahara, caractérisé par un été torride, très long et un hiver tiède, de très faible importance avec des jours chauds et des nuits fraîches. C'est une ville saharienne au climat torride, hyperaride avec une température moyenne annuelle de 27°C, et une pluviométrie moyenne annuelle de 14mm à peine. La pluie ne tombe pas tous les ans dans la région, mais elle se produit en automne (octobre, novembre) alors que le reste de l'année est presque complètement dénué de toute précipitation quelconque en moyenne [187].

La température est caniculaire pendant de nombreux mois : In Salah est un des points les plus chauds de tous les déserts, et donc du globe, puisque le thermomètre y affiche couramment 47°C à 50°C en été, et à l'ombre bien sûr. La zone située au cœur du Sahara algérien, délimitée par Adrar - Reggane - In Salah, est appelée le « triangle de feu » à cause des maxima quotidien qui dépassent régulièrement 50°C durant les mois les plus chauds. Au soleil, l'air est un brasier. L'hiver se caractérise par des journées chaudes et des nuits fraîches. Le ciel clair et la sécheresse absolue déterminent ce climat, un des plus durs du grand désert africain [188].

Le rayonnement solaire et la vitesse du vent nécessaires pour ce travail sont montrés ci-dessous, et ils sont obtenus grâce au site de la NASA des surfaces météorologiques et d'énergie solaire détaillé au Tableau VI.3 [189].

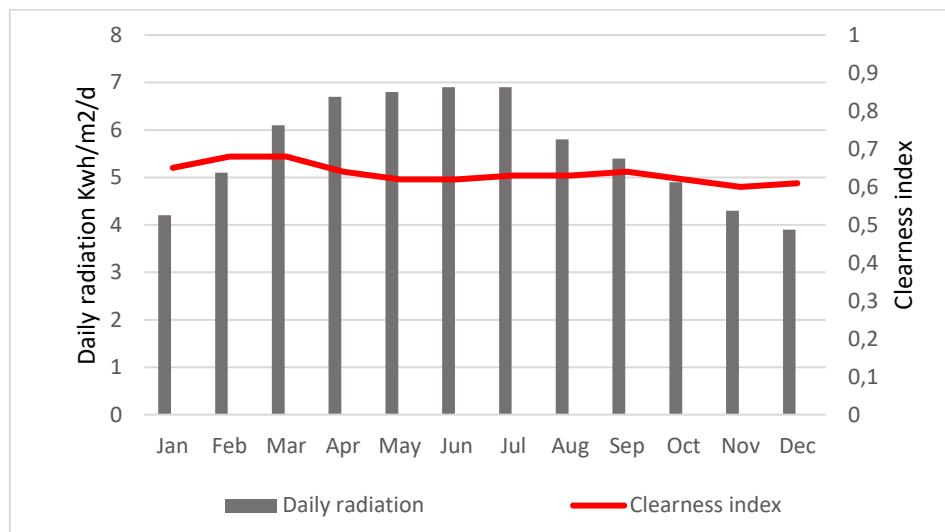


Figure VI.5 Irradiation solaire horizontale globale pour In Salah

La Figure VI.5 montre l'irradiation solaire à In Salah, où la moyenne annuelle calculée est de 5.83kWh/m<sup>2</sup>/j, et la moyenne de l'indice de clarté est de 0.706, le mois le plus ensoleillé est le mois de juin avec 6.905kWh/m<sup>2</sup>/j, le mois le moins ensoleillé est le mois de décembre.

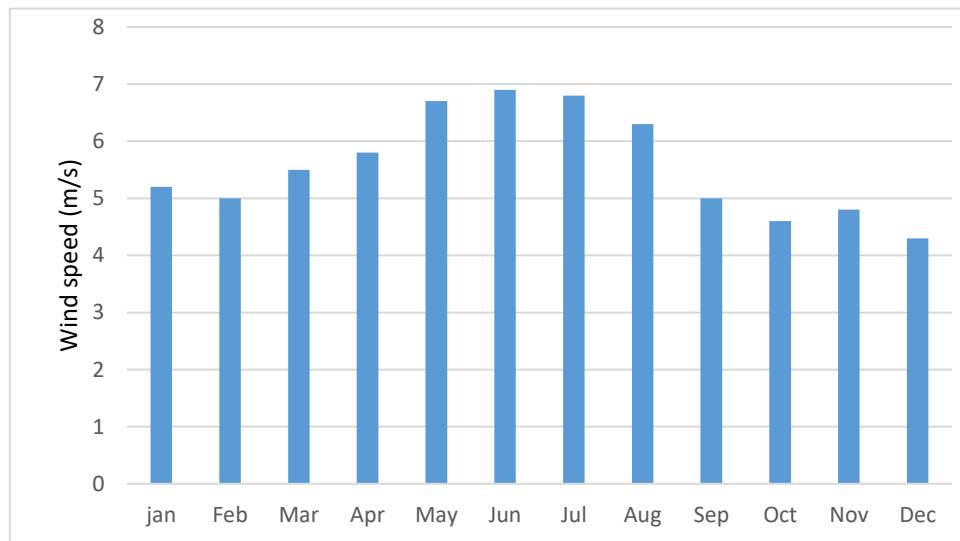


Figure VI.6 Vitesse du vent à In Salah

La vitesse du vent annuelle est d'une moyenne de 5.1m/s prise à 10m de hauteur de l'anémomètre, la variation de vitesse de 0.25 durant une journée et une auto correction de 0.85 avec un coefficient de Weibull égale à 2. La Figure VI.4 montre que la vitesse du vent atteint son maximum entre mars et juillet, plus de détails dans le Tableau VI.3.

Tableau VI.3 : Données météorologiques d'In Salah

Month	Clearness index	Daily radiation kWh/m <sup>2</sup> /d	Wind speed m/s
January	0.662	4.217	5.3
February	0.681	5.136	4.9
March	0.677	6.118	5.5
April	0.655	6.769	5.1
May	0.636	6.847	5.6
June	0.636	6.905	5.3
July	0.643	7.876	5.6
August	0.639	6.757	5.3
September	0.664	6.273	4.9
October	0.640	5.099	4.6
November	0.645	4.268	4.7
December	0.647	3.875	4.3

### VI.3.3 Critères d'évaluation

HOMER peut être utilisé en comparant une large gamme d'équipements avec différentes contraintes et sensibilités. L'optimal du système est conçu, dont le but est l'évaluation économique suivi par l'analyse et l'examen des effets de l'incertitude ou changements dans les variables d'entrée, ce qui est appelé étude de faisabilité [190,191]. Il prend en charge le coût actuel total du système y compris le coût d'investissement, les coûts de remplacement, les coûts d'exploitation et de maintenance en plus du coût de carburant et le coût du kWh de l'utilisation d'énergie électrique.

HOMER détermine *NPC* selon l'équation suivante :

$$NPC = \frac{C_{tot}}{CRF(i, Tp)} \quad (\text{VI.1})$$

Où : *C<sub>tot</sub>* est le coût total annuel du système (\$/an), *i* est le taux d'intérêt annuel réel (%), *Tp* est la durée de vie du projet et *CRF* est le facteur de récupération du capital qui se calcule par l'équation VI.2 [192] :

$$CRF = \frac{i(1+i)^{-n}}{(1+i)^n - 1} \quad (\text{VI.2})$$

Et le cout du kilowattheure d'électricité (*COE*) est calculé à partir de :

$$COE = \frac{C_{tot}}{E_{tot}} \quad (\text{VI.3})$$

Où *E<sub>tot</sub>* représente la consommation totale de l'électricité durant l'année (kWh/an).

HOMER indiquera la fraction renouvelable *RF* pour chaque conception simulée, de façon qu'elle soit élevée sans aucune influence sur le *TNPC*. Elle est définie comme étant la quantité de puissance produite par les sources d'énergie renouvelable par rapport à celle de l'énergie totale tirée du système [193]. La fraction d'énergie PV et l'énergie éolienne peut être calculée comme suit :

$$f_{PV} = \frac{E_{PV}}{E_{PV} + E_{WG}} \quad (\text{VI.4})$$

$$f_{WG} = \frac{E_{WG}}{E_{PV} + E_{WG}} \quad (\text{VI.5})$$

On plus au NPC et le COE, HOMER prend en charge aussi :

- Le coût d'investissement : C'est le coût de démarrage de projet, et le coût total installé de tous les sous-systèmes au début du projet.
- Le coût de remplacement : est le coût de remplacement d'un composant en fin de vie. Cela peut être différent du coût d'investissement pour plusieurs raisons :
  - Tous les composants ne doivent pas forcément être remplacés en fin de vie. Par exemple, la nacelle d'éolienne peut avoir besoin d'être remplacée, mais pas la tour.
  - Le coût d'investissement peut être réduit ou éliminé par un organisme donateur, mais pas le coût de remplacement.

Le coût de remplacement annualisé d'un composant du système correspond à la valeur annualisée de tous les coûts de remplacement générés pendant toute la durée de vie du projet, diminuée de la valeur de récupération à la fin de la durée de vie du projet.

HOMER utilise l'équation suivante pour calculer le coût de remplacement annualisé de chaque composant :

$$ARC = RC * f_r * SFF(i, RC_{comp}) - S * SFF(i, RC_{Proj}) \quad (\text{VI.6})$$

Où : *f<sub>r</sub>* un facteur résultant du fait que la durée de vie des composants peut être différente de celle du projet, est donné par :

$$f_r = \begin{cases} CFR(i, RC_{Proj}) / CFR(i, R_{rep}), & R_{rep} > 0 \\ 0 & R_{rep} = 0 \end{cases} \quad (\text{VI.7})$$

$$R_{rep} = RC_{comp} * INT\left(\frac{RC_{Proj}}{RC_{comp}}\right) \quad (\text{VI.8})$$

Le facteur d'amortissement est un ratio utilisé pour calculer la valeur future d'une série de flux de trésorerie annuels égaux. L'équation du facteur d'amortissement est la suivante :

$$SFF(i, N) = \frac{i}{(1+i)^N - 1} \quad (\text{VI.9})$$

Avec : i = taux d'intérêt réel, et N = nombre d'années

- Le coût d'exploitation et de maintenance d'un composant est le coût associé à l'exploitation et à la maintenance de ce composant. Le coût total d'exploitation et de maintenance du système est la somme des coûts d'exploitation et de maintenance de chaque composant du système.
- Le coût annuel du carburant : HOMER calcule cette valeur en multipliant le prix du carburant par la quantité de carburant utilisée par le générateur au cours d'une année.

## VI.4 ETUDE DE CAS

### VI.4.1 Scénario 1

Le premier scénario est l'utilisation du DG seul pour l'alimentation de la maison dont la configuration est montrée dans la Figure VI.7.

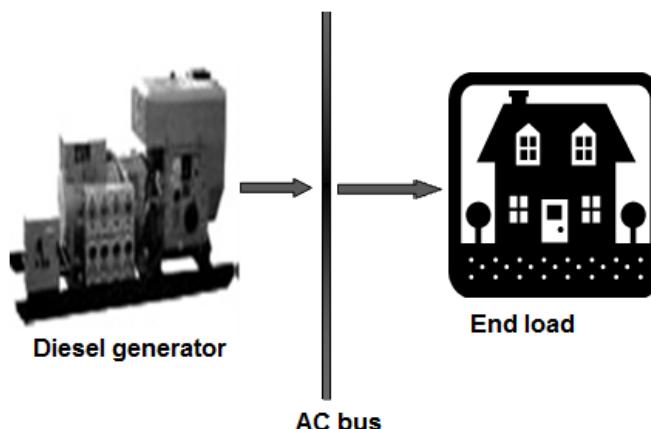


Figure VI.7. Le DG pour l'alimentation d'une maison

On a pris une variété de capacités du DG (10, 12, 14, 16kW) pour pouvoir choisir la meilleure parmi elles et les résultats d'optimisation obtenus sont montrés dans la Figure VI.8.

Résultat d'optimisation							
DG KW	IC (\$)	O&MC (\$/an)	NPC (\$)	COE (\$KWh)	fraction renouvelable (%)	consommation Diesel (L)	Fonctionnement du DG (Hrs)
14	4.500	17.590	229.361	0,858	0	44.330	8.759

Figure VI.8 Résultats catégorisés d'optimisation pour l'alimentation par le GD

On remarque que la capacité la plus optimale du GD est 14kW avec *TNPC* de 229.361\$ est un *COE* égal à 0,858\$. Le générateur fonctionne toute l'année sans arrêt en consommant 44330 L de carburant, cette quantité coûte 119.004\$ pour toute la durée de vie de notre projet estimée à 25ans et elle représente 51.9% du *TNPC*, les 49% restantes sont les coûts initiaux du projet et les coûts O&MC. La Figure VI.9 montre le récapitulatif des flux à base des coûts.

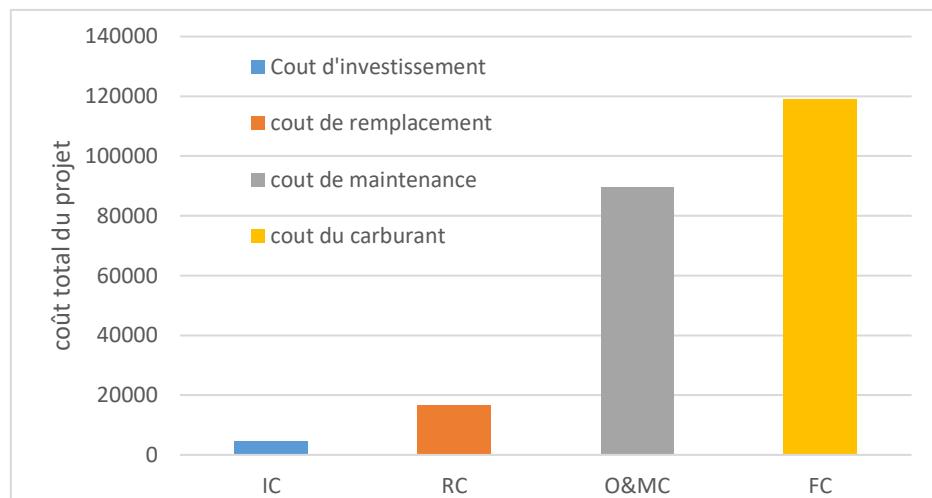


Figure VI.9. Récapitulatif des flux à base des coûts (1<sup>er</sup> scénario)

Le *NPC* de cette configuration est vraiment élevé et ça, est dû à la grande consommation du carburant et les coûts des opérations est de maintenance par contre le coût initial du système est bas. Notre maison consomme 20.364 kWh/an, cette consommation ne représente que 27.5% de l'énergie produite par le GD, ce qui signifie qu'un excès d'électricité de 53697 kWh/an sera inutilisé c'est-à-dire perdu.

La Figure VI.10 montre la production électrique mensuelle du GD, et on remarque qu'il produit le maximum d'énergie même si la charge n'a besoin que d'une quantité minimale.

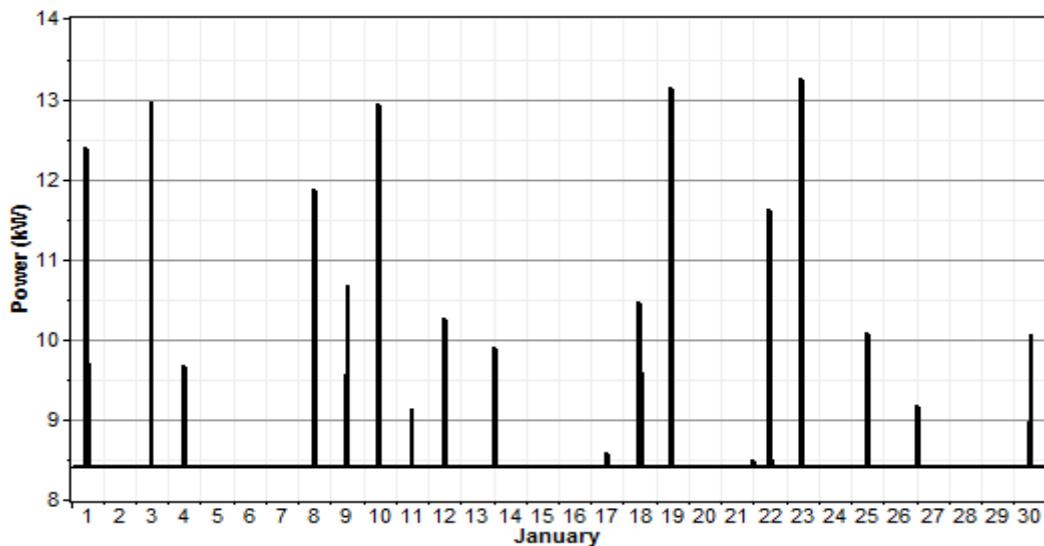


Figure VI.10. Production électrique mensuelle du DG

A cause du coût élevé et la surproduction de cette configuration qu'on a réfléchi à l'améliorer en introduisant les sources d'énergie renouvelable et les batteries pour stocker cet excès d'électricité.

#### VI.4.2 Scénario 2

Cette configuration est basée sur l'introduction des panneaux PV dans le système afin de minimiser les heures de fonctionnement du GD, donc, minimiser la quantité consommée du diesel. La Figure VI.11 montre le schéma de cette configuration qui diffère de la première par l'ajout d'un générateur PV et des batteries de stockage d'énergie.

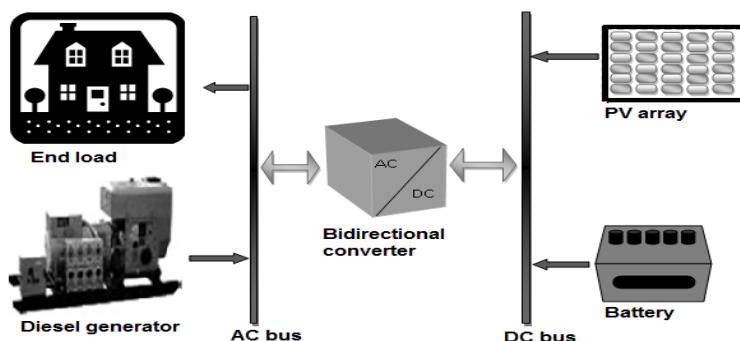


Figure VI.11 Configuration du système hybride PV/DG

La maison est alimentée par l'énergie produite par le GPV à travers un convertisseur bidirectionnel, le surplus de l'énergie sera stocké dans les batteries, le DG ne fonctionne que s'il y a un manque d'énergie.

Les résultats de Homer sont montrés dans la Figure VI.12.

Résultat d'optimisation										
Système PV KW	DG KW	Batteries	Convertisseur KW	IC (\$)	O&MC (\$/an)	NPC (\$)	COE (\$KWh)	fraction renouvelable (%)	consommation Diesel (L)	Fonctionnement du DG (Hrs)
13,8	10	36	15	49,414	2,283	78,593	0,294	90	1,523	361
15	0	52	15	52,426	2,126	79,604	0,298	100	0	0
	10	36	15	14,614	6,685	100,068	0,374	0	16,133	3,439
13,8	12		15	42,857	11,751	193,069	0,722	36	26,867	6,202
	14		15	8,701	17,951	238,181	0,891	0	44,329	8,759

Figure VI.12 Résultats catégorisés d'optimisation pour l'alimentation par le PV/DG

Cinq configurations possibles sont suggérées par HOMER, et ils sont classées dans un ordre croissant du *TNPC* qui est le facteur principal de classement des systèmes dans ce logiciel dont la configuration du premier scénario semble mauvaise et couteuse, puisqu'il existe d'autres configurations moins chères où on peut y introduire des panneaux solaires ou un GD d'une puissance inférieure ou les utiliser les deux ensemble.

Le classement dans cette configuration montre que le générateur de 12kW n'est pas économique pour ce système même en l'utilisant avec une source d'énergie PV (le quatrième cas) puisque un générateur de 10kW avec un système de stockage de 36 batteries (le troisième cas) est moins couteux même avec une fraction renouvelable *RF* de 0%. Cette dernière peut être augmentée à 100% en installant 15kW de panneaux solaires (la deuxième ligne) avec un *TNPC*=79604 \$ et qui reste plus chère qu'un *TNPC*=78593 \$ de la meilleure configuration (la première ligne), où notre système se compose de : 13.8kW de panneaux solaires, un GD de 10kW, un convertisseur de 15kW et 36 batteries composées de neuf strings connectés en parallèle chacun contient quatre batteries raccordées en série.

Cette configuration est meilleure que celle du premier scénario avec un *COE*=0,294\$ et une *RF* de 90%. La production d'énergie renouvelable est de 25663kW et 2.726kW produite par le GD qui fonctionne que 361h/an, en consommant 1523L de carburant tout en optimisant l'excès d'électricité de 95,27% par rapport au premier scénario.

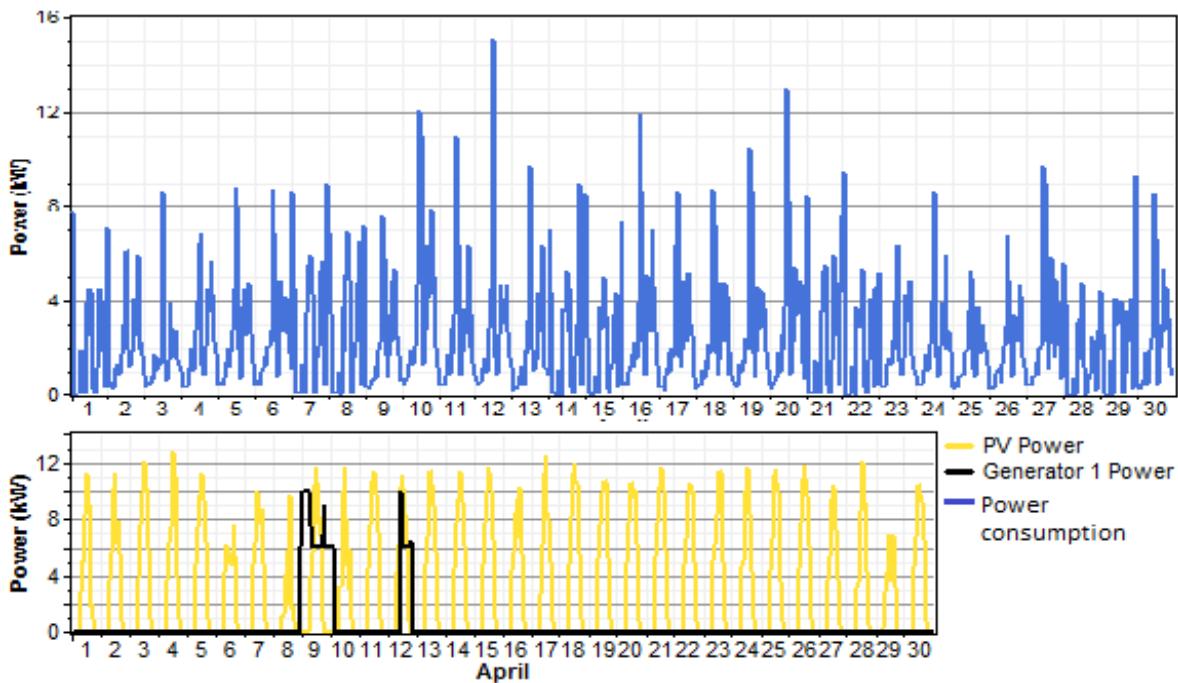


Figure VI.13 Production mensuelle d'électricité du système PV/DG

On remarque qu'il y a une relation de proportionnalité entre l'énergie produite par le GPV et le rayonnement solaire puisqu'il y a une grande production à partir du notre système renouvelable dans les mois ensoleillés et le contraire dans les mois d'hiver.

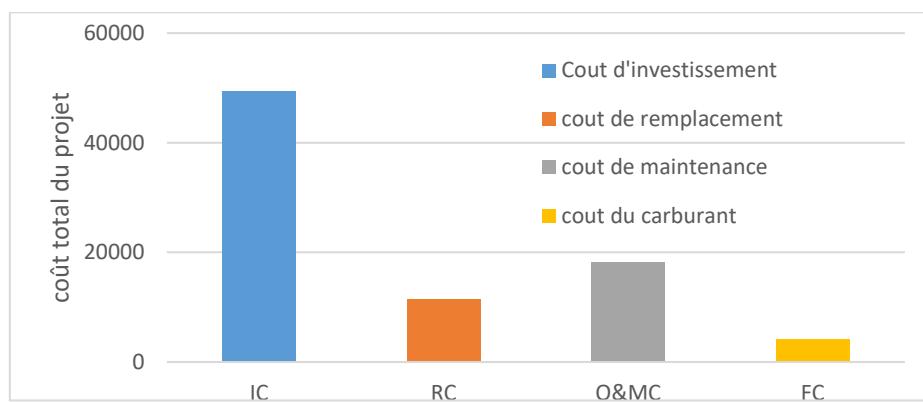


Figure VI.14 Récapitulatif des flux à base des coûts (2<sup>ème</sup> scénario)

La Figure VI.14 montre les détails du système en terme de coûts et il est apparent que le coût initial du projet est élevé par rapport au premier scénario parce qu'on a ajouté plusieurs sous-systèmes comme le générateur photovoltaïque GPV, les batteries et le convertisseur, et il représente 62.8% du *TNPC*, mais les autres coûts tel que le coût de remplacement, *O&MC* et le coût du carburant sont réduits à 30.82%, 79.78% et 96.56% respectivement par rapport au premier scénario.

La fraction renouvelable  $RF$  est de 90% avec une grande limitation de fonctionnement du GD ce qui implique une limitation des gaz polluants.

Tableau VI.4 Emissions de GES

Emission Kg/an	PV/DG	DG
Dioxyde de carbone (CO2)	4012	116754
Monoxyde de carbone	9.9	288
Hydrocarbure non brûlé	1.1	31.9
Particules de Soufre	0.747	21.7
Le dioxyde de soufre	8.06	234
oxyde d'azote	88.4	2572

On remarque que l'introduction des sources de production d'énergie solaire nous a permis de diminuer l'émission des gaz à effet de serre de 96.56% de tous les polluants émis par la combustion du diesel donc une préservation de l'environnement.

#### VI.4.3 Scénario 3

Cette partie consiste à faire une étude de la configuration décrite dans la Figure VI.15, où on a introduit le générateur éolien au lieu du générateur photovoltaïque

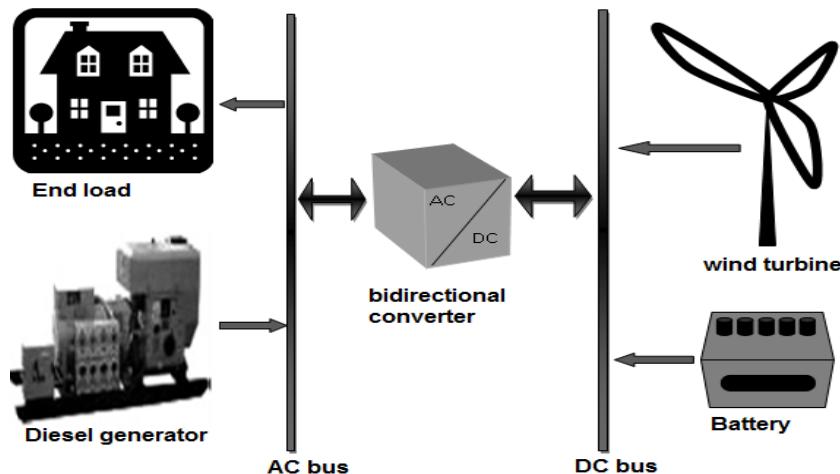


Figure VI.15 Configuration d'un système hybride EOL/DG

La simulation nous a donné la Figure VI.16 :

Résultat d'optimisation										
Système Eolien KW	DG KW	Batterie s	Convertisseur KW	IC (\$)	O&MC (\$/an)	NPC (\$)	COE (\$KWh)	fraction renouvelable (%)	consommation Diesel (L)	Fonctionnement du DG (Hrs)
3	10	32	15	32,464	3,465	76,762	0,287	74	4,365	1,019
0	10	36	15	14,664	6,638	99,518	0,372	0	16,086	3,434

Figure VI.16 Résultats catégorisés d'optimisation pour l'alimentation par EOL/DG

Deux configurations suggérées pour ce scénario, dont la deuxième est défavorable parce qu'elle utilise qu'un GD de 10kW avec 36 batteries, et elle semble couteuse. Mais l'utilisation de 3 éoliennes, un GD de 10kW, 32 batteries et un convertisseur de 15kW est favorable en termes de coût qui est moins cher que le deuxième scénario. Le *COE* produit par ce système est 0.287\$, et le *TNPC* est de 76762\$ en représentant une réduction de presque 2.32% par rapport au système PV/GD. La figure suivante montre les différents coûts de cette configuration.

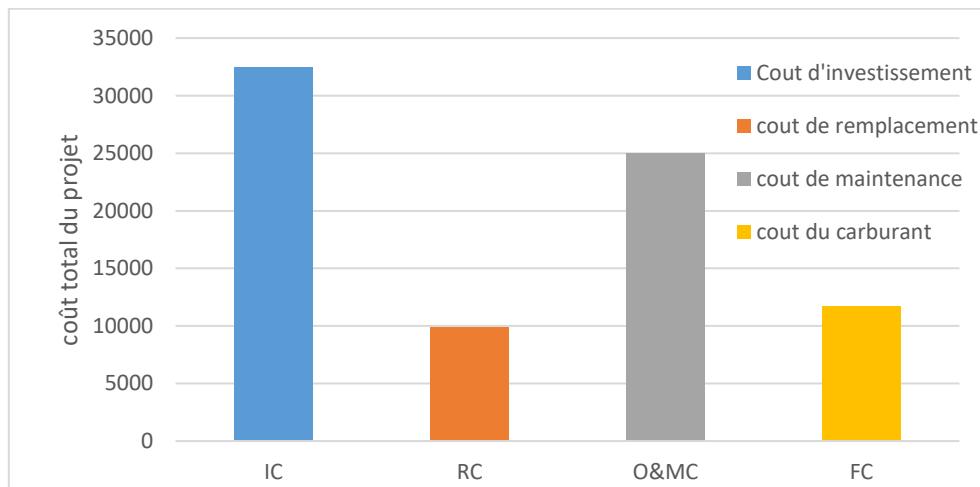


Figure VI.17 Récapitulatif des flux à base des coûts (3<sup>ème</sup> scénario)

Malgré l'augmentation du coût du carburant de plus que le double et le coût *O&M*, contre une réduction des coûts de remplacement et du coût *IC*, on a obtenu une réduction du *TNPC* de 2.32% par rapport au deuxième scénario, ce qui favorise cette configuration par rapport aux deux précédentes. Notre système produit 29900kWh/an dont le générateur éolien représente une production de 22044kWh/an, ce qui donne une *RF* égale à 74%, la figure suivante montre la production électrique mensuelle de ce système.

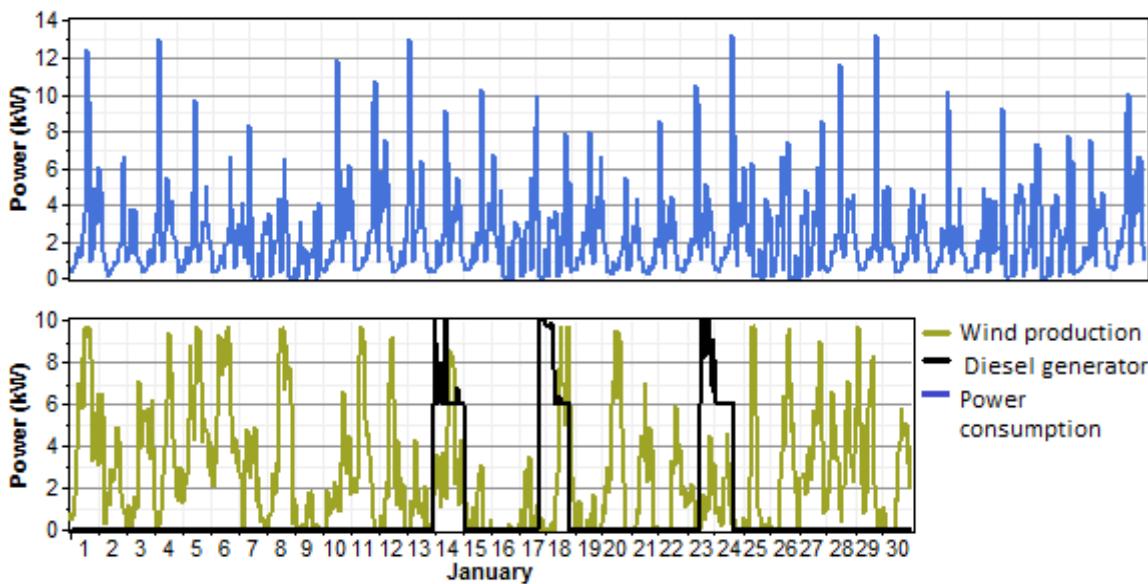


Figure VI.18 Production mensuelle d'électricité du système EOL/GD

On remarque que la vitesse du vent influence directement sur la production d'énergie à partir du générateur éolien qui produit à son maximum au mois le plus venteux et la production est minime au mois où on a marqué une faible vitesse de vent. Le potentiel solaire de In Salah a une influence plus que la vitesse du vent dans nos configurations, puisqu'on était à 90% de RF avec des panneaux solaires puis la RF a diminué à 74% en installant les éoliennes au lieu des GPV, ce qui fait, une augmentation des heures de fonctionnement et la consommation du Diesel par rapport au système PV/GD.

Tableau VI.5 Emission de gaz à effet de serre pour le système EOL/GD

Emission	EOL/GD	PV/GD	GD
Dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> ) (kg/an)	11495	4012	116754
Monoxyde de carbone (kg/an)	28.4	9.9	288
Hydrocarbure non brûlé (kg/an)	3.14	1.1	31.9
Particules de Soufre (kg/an)	2.14	0.747	21.7
Le dioxyde de soufre (kg/an)	23.1	8.06	234
oxyde d'azote (kg/an)	253	88.4	2572

Le Tableau VI.5 montre que cette configuration émis plus de polluants par rapport au scénario2, mais elle représente une diminution de 90% par rapport à une configuration conventionnelle. Malgré cette petite hausse de pourcentage de polluants cette configuration EOL/GD reste favorable est mieux que les deux précédentes en terme de coûts.

## VI.4.4 Scénario 4

Le dimensionnement des composants du système d'alimentation hybride ont été réalisés en utilisant le logiciel HOMER, le système hybride PV/EOL/GD, dont la configuration est montrée dans la Figure VI.19.

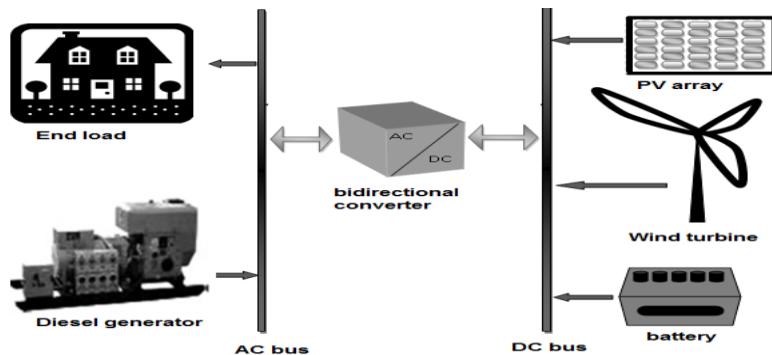


Figure VI.19. Configuration du système hybride PV/EOL/GD

Plusieurs possibilités apparaissent dans la Figure VI.20, et montrent que le premier scénario reste toujours une configuration défavorable, le deuxième scénario PV/DG est classé le quatrième puisque la configuration de EOL/PV/GD est plus économique, cette dernière est en deuxième possibilité.

Résultat d'optimisation											
Système PV KW	Système Eolien KW	DG KW	Batteries	Convertisseur KW	IC (\$)	O&MC (\$/an)	NPC (\$)	COE (\$KWh)	fraction renouvelable (%)	consommation Diesel (L)	Fonctionnement du DG (Hrs)
6,9	2	10	32	15	43,664	2.364	73.880	0.276	93	1.212	290
13,8	1		28	15	50.850	1.924	75.445	0.282	100		
	3	10	32	15	32.464	3.465	76.762	0.287	74	4.365	1.019
13,8		10	36	15	49.464	2.251	78.240	0.293	90	1.531	362
		10	36	15	14.664	6.638	99.518	0.372	0	16.086	3.434
11,5	4	10		10	60.014	8.184	164.639	0.616	67	15.204	4.199
11,5		12		10	35.875	12.048	189.871	0.710	31	28.255	6.522
	4	14		10	32.300	13.405	203.657	0.762	37	29.875	5.916
		14		10	7.500	17.820	235.297	0.880	0	44.330	8.759

Figure VI.20 Résultats catégorisés d'optimisation pour l'alimentation par EOL/PV/GD

La configuration de 6.9kW délivrée par le GPV, 2kW d'éoliennes représentées par un générateur de type W500, un système de stockage qui contient 32 batteries, un convertisseur d'énergie de 15kW et un générateur diesel de 10kW, est représenté comme le système le plus économique. Avec le moins *TNPC* égale à 73880\$ ce qui représente une réduction de 67.68% du *TNPC* du système avec GD seulement contre une réduction de 6% et 3.76% pour les systèmes PV/DG et EOL/GD respectivement. Le coût d'énergie produit par notre système

optimal est de 0.276\$ et il est le moins cher par rapport aux autres configurations avec une production d'énergie de 29686kWh/an dont 43% est délivrée par le GPV et le générateur éolien fourni 50% (Figure VI.21), le reste sera garanti par un générateur diesel qui génère 2159kWh/an au lieu de 74061kWh/an en cas où il est utilisé seul.

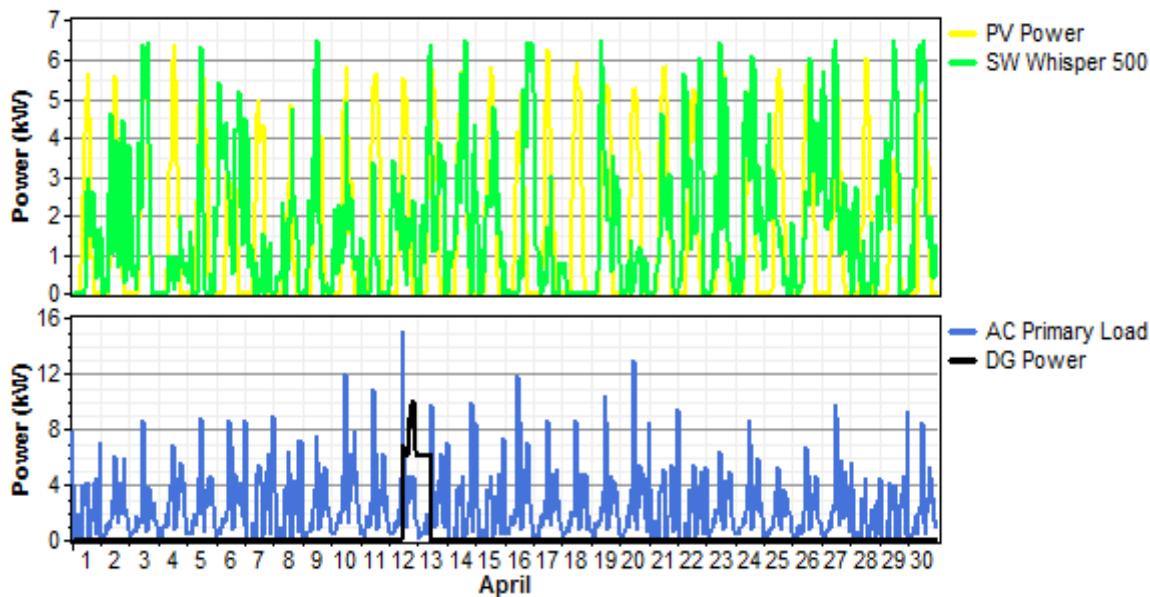


Figure VI.21 Production mensuelle d'électricité du système EOL/PV/DG

Figue VI.21 montre la répartition mensuelle de l'électricité produite en kW par le système optimal, et confirme que la production d'énergie dépend principalement des données météorologiques. On remarque que du mois de Mars au mois d'Aout le DG ne produit pas beaucoup d'énergie par rapport aux autres mois et c'est grâce au grand potentiel solaire et éolien qui permet de produire une grande quantité d'énergie à partir des sources renouvelables et c'est le contraire pour le reste des mois, par exemple, le mois de décembre est le mois le moins ensoleillé avec une faible vitesse du vent ce qui nous donne une faible production d'énergie à partir du GPV et du générateur éolien.

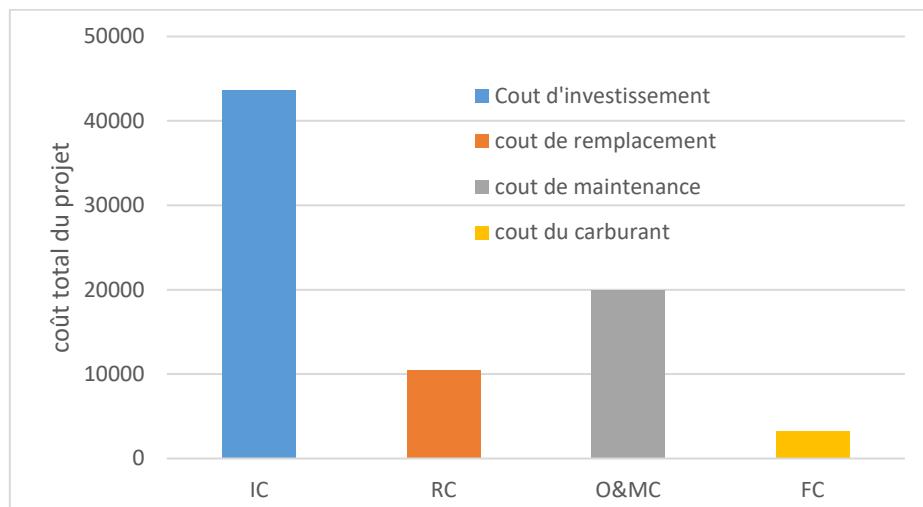


Figure VI.22 Récapitulatif des flux à base des coûts (4<sup>ème</sup> scénario)

La Figure VI.22 montre le récapitulatif des flux à base des coûts de la meilleure configuration. Le coût d'investissement de notre système hybride est 43664\$ et c'est le plus élevé en raison des prix de chaque composant, il représente plus de 59% du *TNPC*, dont le reste est réparti comme suit : 14% est le coût de remplacement alors que le coût de *O&MC* est de 27% et les 4% qui restent représentent le prix de la consommation de diesel avec un sauvetage d'électricité de presque 4%.

## VI.5 ETUDE COMPARATIVE

Cette partie, consiste à faire une comparaison approfondie entre les quatre scénarios étudiés, de façon à détecter la meilleure configuration en tenant compte de tous les critères économiques et environnementaux.

### VI.5.1 Résultats d'optimisation

Le Tableau VI.6 est conçu de façon à englober tous les critères de comparaison pour le choix entre les scénarios, et il montre que la configuration la plus optimale en terme de coûts est PV/EOL/DG puisqu'elle a le *TNPC* le moins cher, avec une réduction importante des heures de fonctionnements du GD, donc une réduction de consommation de Diesel et des émissions de gaz à effet de serre.

Tableau VI.6 Résultats comparatives des différents scénarios

	case 1	Case2	Case3	Case4
<b>Configuration</b>				
DG (KW)	14	10	10	10
Convertisseur bidirectionnel (KW)		15	15	15
Nombre de batteries		36	32	32
GPV (KW)		13.8		6.9
GEOL (KW)			3	2
<b>Production kWh/an</b>				
Electricité	74043	28389	29900	29686
Excès d'électricité	53140	2513	3960	4381
Manque de capacité	0.1	0	0	0
<b>Les couts</b>				
Coût total du projet ( <i>TNPC</i> ) \$	229361	78593	76762	73880
Coût du kilowattheure (\$/ kWh)	0.858	0.294	0.287	0.276
Coût de maintenance (\$/an)	89576	18105	25021	19951
<b>Générateur et carburant</b>				
Heures de fonctionnement (heure)	8759	361	1019	290
Consommation du carburant (l/an)	44337	1523	4365	1212
<b>Emission des GES kg/an</b>				
Dioxyde de carbone (CO2) (kg/an)	116735	4012	11495	3190
Monoxyde de carbone (kg/an)	288	9.9	28.4	7.88
Hydrocarbure non brûlé (kg/an)	31.9	1.1	3.14	0.872
Particules de Soufre (kg/an)	21.7	0.747	2.14	0.594
Le dioxyde de soufre (kg/an)	234	8.06	23.1	6.41
oxyde d'azote (kg/an)	2571	88.4	253	70.3

L'utilisation des sources de production d'énergie renouvelable n'a pas seulement un impact économique mais un autre appelé impact environnemental et qui est très nécessaire pour la protection de l'environnement, le climat, la planète et notre santé avant tout. L'un des facteurs les plus importants pour le changement climatique dû aux émissions de gaz à effet de serre est le dioxyde de carbone CO2, qui est réduit à 3190kg/an au lieu de 116754kg/an en cas d'utilisation du GD seul. Ce qui signifie une réduction de 97% avec une fraction d'énergie renouvelable de 93%, et cela veut dire qu'on a sauvé notre environnement en évitant d'injecter 2838625kg dans une période de 25 ans qui est la durée de vie de notre système

hybride qui nous a permis de diminuer tous les autres polluants atmosphériques avec le même pourcentage de 97%.

Le Tableau VI.7 représente le pourcentage de chaque coûts en fonction du *TNPC* de tous les scénarios et indique que l'utilisation des ressources fossiles n'est pas couteuse au début mais elle demande de l'argent au cours de fonctionnement par contre l'intégration d'une ou plusieurs sources de production d'énergie renouvelable nécessite un cout d'investissement *ICC* plus chers mais vraiment avec une réduction importante des budgets de fonctionnement.

Tableau VI.7 Répartitions des coûts par rapport au *TNPC*

Couts (\$)	ICC (\$)	RC (\$)	OMC (\$)	Fuel (\$)	Salvage (\$)	TNPC (\$)
Scénario 1	4500	16497	89576	119004	-215	229361
	2%	7.2%	39%	51.9%	0.1%	
Scénario 2	49414	11412	18105	4090	-4428	78593
	62.8%	14.5%	23%	5.2%	5.5%	
Scénario 3	32464	9860	25021	11718	-2302	76762
	42.3%	12.8%	32.6%	15.2%	2.9%	
Scénario 4	43664	10439	19951	3252	-3427	73880
	59.1%	14.1%	27%	4.4 %	4.6%	

On remarque que le *TNPC* décrémente de scénario à l'autre tout en ajoutant des sources d'énergies renouvelables, bien que le deuxième scénario montre les coûts les plus bas concernant *O&MC*, mais pendant une durée de 25 ans qui est la durée de vie de notre projet, le scénario le plus économique est le quatrième.

Dans notre système hybride, on a investi neuf fois plus que *ICC* d'une installation conventionnelle, avec une optimisation importante de plus de 97% de consommation du diésel, en la réduisant à 1212 l/an, tout en limitant les heures de fonctionnement du GD qui sont égales à 290 heures seulement. On appelle tout ça : l'investissement réussi puisque l'ajout de 39164\$ pour *ICC* du système hybride nous a bénéficié des économies de plus de 115752\$ concernant la consommation du diesel tout au long de la durée de vie de notre projet.

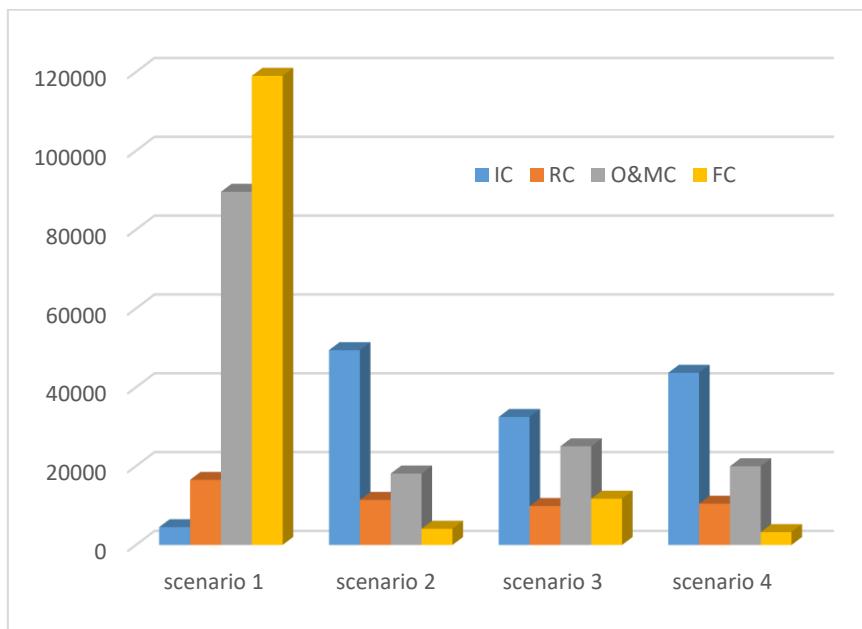


Figure VI.23 Répartition des coûts par scénarios

La Figure VI.23 résume l'étude économique des quatre scénarios étudiés, et favorise l'utilisation des énergies renouvelables par rapport au ressource conventionnelle en terme de coût, même si elle nécessite un coût d'investissement considérable, mais avec une garantie de réduction de tous les autres coûts ce qui réduit aussi le *TNPC*.

L'efficacité de notre algorithme de gestion de l'énergie apparaît et elle est illustrée à la Figure VI.24, où GD n'intervient qu'en cas de manque d'énergie et lorsque les batteries sont déchargées, une fois elles sont chargées il s'éteint.

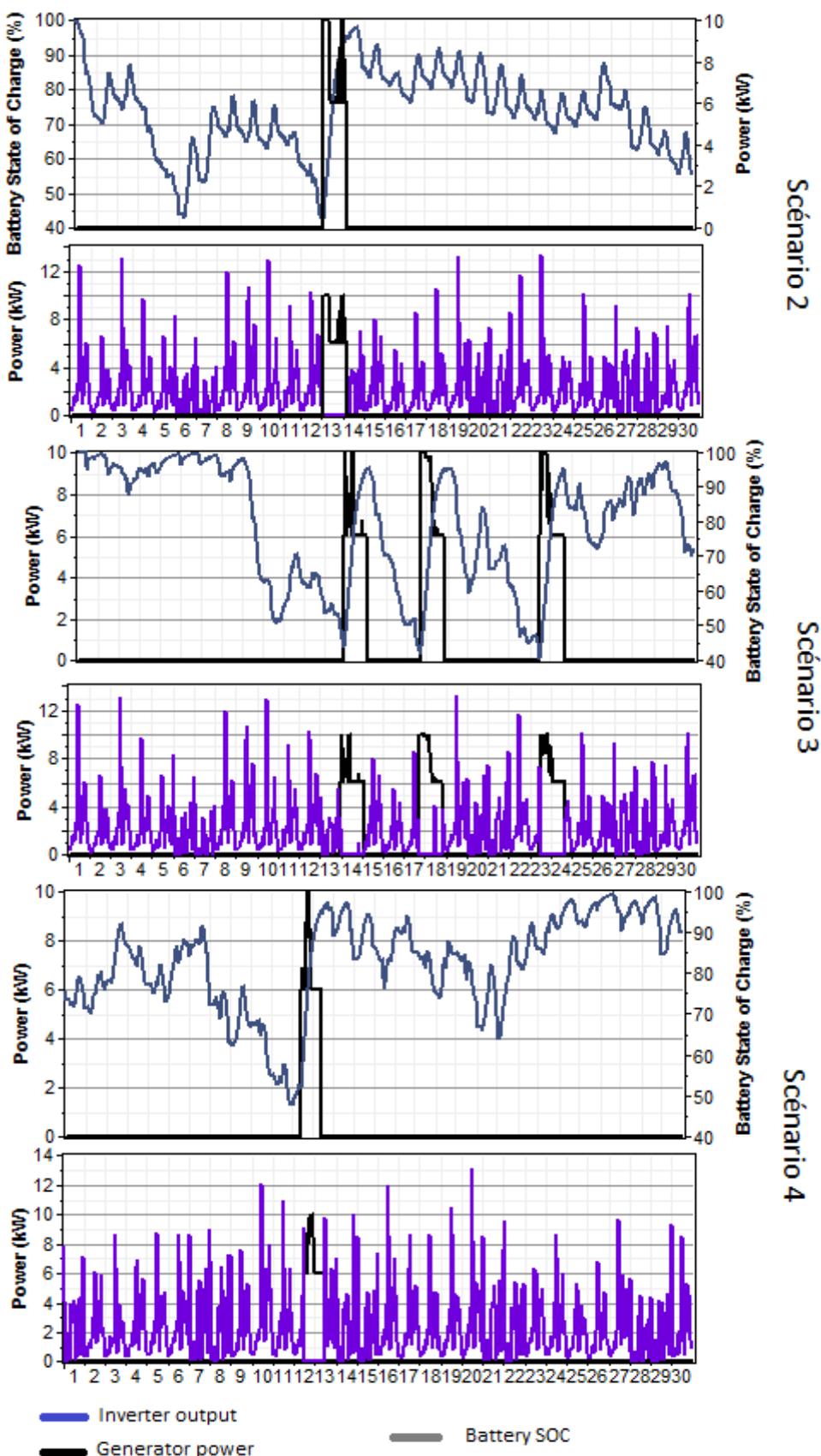


Figure VI.24 Efficacité de la gestion de l'énergie pour toutes les configurations du SH

## VI.6 ETUDE DE SENSIBILITE

Cette analyse fournit des informations selon lesquelles un système particulier sera optimal à certains critères ou conditions tout en se basant sur l'étude économique en éliminant les systèmes impossibles et présenter les résultats dans l'ordre croissant de *NPC*. Dans notre cas, la vitesse du vent (4, 4.5, 5, 5.1, 5.5, 6, 6.5, 7m/s), l'irradiation solaire (5, 5.5, 5.83, 6, 6.5kWh/m<sup>2</sup>/J), la hauteur du manomètre de l'éolienne (15, 20m) et le prix du diesel (0.18, 0.2, 0.3, 0.4\$) sont nos variables de sensibilité dont le but c'est de voir l'impact de ce changement sur l'émission du CO<sub>2</sub>. En se basant sur nos variables de sensibilité, Homer fait 4800 simulations dont 320 cas sensibles, et il prend 09h44 min avec un PC de processeur Intel®core (TM) i3 et 4Go de RAM.

La Figure VI.24 montre le système optimal en fixant l'irradiation solaire à 5.83 kWh/m<sup>2</sup>/J et la vitesse du vent à 5.1m/s.

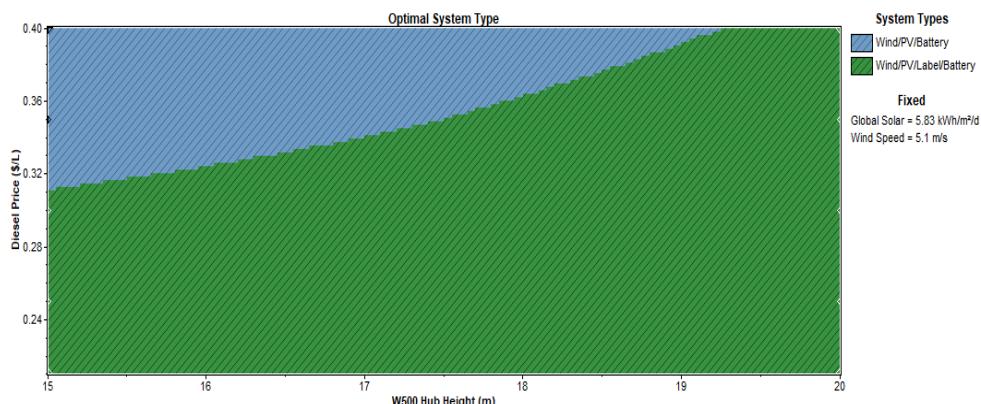


Figure VI.24 Système optimal pour un rayonnement solaire et une vitesse du vent fixe

On remarque que notre système est économiquement faisable pour n'importe quelle hauteur du manomètre tant que le prix du diesel est inférieur à 0.3\$ et à partir de 3.5\$ c'est le système EOL/PV qui devient le plus faisable soit du côté économique soit du côté environnemental avec zéro pollution.

En fixant le prix du diesel à 0.18\$ et la hauteur du manomètre à 15m, on obtient les résultats illustrés dans la Figure VI.25. On remarque que le système diesel seul est le moins couteux dans les conditions où la vitesse du vent est inférieure à 4.3m/s et l'irradiation solaire inférieure à 4.2 kWh/m<sup>2</sup>/J. Le système PV/DG est la solution optimale pour les faibles vitesses du vent, avec zéro émission pour l'irradiation solaire de 6.5kWh/m<sup>2</sup>/j est plus, où la production d'énergie PV couvre la charge. Notre système hybride PV/EOL/DG est

économiquement faisable pour des augmentations proportionnelles des données météorologiques, puis le système EOL/DG ne sera faisable que par l'augmentation de la vitesse du vent de plus de 5m/s est des valeurs des irradiations solaires décroissantes.

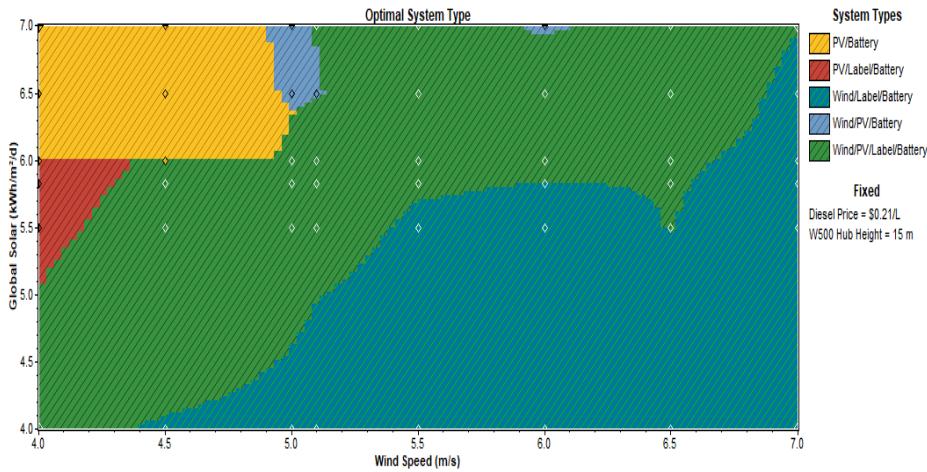


Figure VI.25 Système optimal pour une hauteur du noyau et un prix du carburant fixes

La figure suivante montre la surface d'émission de CO<sub>2</sub>, on remarque que l'émission du CO<sub>2</sub> est élevée là où le système diesel avec batteries est favorisé. Puis l'émission se dégrade à chaque augmentation des données météorologiques, on remarque aussi que l'augmentation de la vitesse du vent diminue l'émission du CO<sub>2</sub> et l'émission est nulle lorsque l'irradiation solaire atteint 6.4kWh/m<sup>2</sup>/J même avec de très faibles vitesses du vent ce qui résulte que dans notre système l'énergie solaire contribue plus efficacement que l'énergie éolienne.

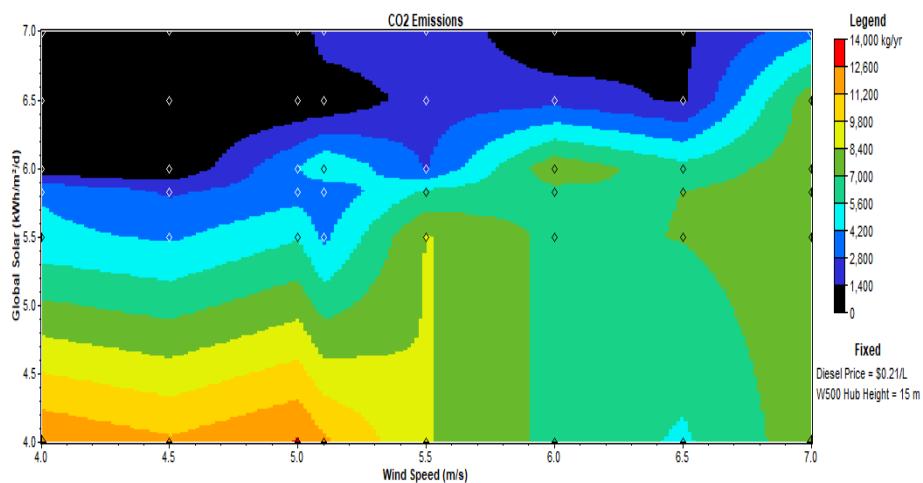


Figure VI.26 Surface pour l'émission du CO<sub>2</sub>

## VI.8 CONCLUSION

Dans ce chapitre, plusieurs configurations de ressources énergétiques ont été étudiées. On peut constater que l'utilisation des deux sources d'énergie renouvelable éolien / PV couplée à un GD constitue la configuration optimale, car l'utilisation d'une source unique n'est pas rentable ni du côté économique ni du côté environnemental. Nous avons conclu avec une étude de faisabilité avec quatre variables de sensibilité définies, nous avons obtenu des résultats très satisfaisants :

- L'augmentation du prix du diesel augmente le *TNPC* et le *COE* et l'augmentation de la hauteur de l'éolien augmente la pénétration de l'énergie éolienne.
- Le système hybride EOL/PV/GD est économiquement réalisable pour une augmentation proportionnelle des données météorologiques.
- Le système EOL/GD nécessite une vitesse de vent supérieure et le système PV/GD est la solution optimale pour les faibles vitesses de vent.
- L'augmentation de la vitesse du vent réduit les émissions de CO<sub>2</sub>, mais cette émission disparaît lorsque l'irradiation solaire atteint un certain niveau, même avec des vitesses de vent très faibles, ce qui signifie que dans notre système, l'énergie solaire contribue plus efficacement que l'énergie éolienne du point de vue de l'environnement. Contrairement à [194] qui a approuvé que sur le site d'Adrar, la contribution de l'éolien représente environ 21% de la production d'énergie, tandis que les 78% restants sont fournis par le fournisseur réseau électrique puisque l'énergie photovoltaïque ne couvre que 1%.

Selon ces résultats, l'utilisation des sources d'énergie renouvelables avec génératrice diesel (EOL/PV/GD) avec stockage d'énergie et partage de la charge en adaptant le système actuel semble être la solution la plus adaptée, nos résultats sont également corroborés par [195], qui a fait une étude de dimensionnement optimal d'un système d'énergie renouvelable hybride alimentant un cabinet médical de la région de Tamanrasset tout en prouvant que l'hybridation est la meilleure solution pour l'alimentation des sites isolés ainsi que l'efficacité d'un système renouvelable par rapport à un autre dépend obligatoirement des conditions météorologiques.

Les mêmes résultats aussi sont obtenus sur le plan environnemental, la fraction des énergies renouvelables du système proposé est très proche de 100% et les quantités d'émissions de polluants différents sont trop faibles avec un maximum de 60,6 kg / an de l'effet de serre, l'émission d'oxydes d'azote est d'environ 1,82 kg / an et les autres émissions sont inférieures à 1 kg / an.

## ***CHAPITRE VII***

---

# ***APPROCHE ANALYTIQUE SOUS ENVIRONNEMENT MATLAB***

---

## VII.1 INTRODUCTION

L'objectif de ce chapitre est de vérifier la cohérence des résultats obtenus avec HOMER en les comparant à ceux issus des simulations réalisées sous MATLAB. Cette analyse porte à la fois sur les aspects économiques (investissement, coûts d'exploitation, coût actualisé de l'énergie) et sur les indicateurs environnementaux.

Une telle comparaison permet d'identifier les éventuelles sources d'écart entre les deux approches et de mettre en évidence la pertinence du modèle développé dans MATLAB.

## VII.2 MODEL DEVELOPPEE SOUS MALAB

### VII.2.1 Algorithme de gestion d'énergie

La gestion de l'énergie repose sur la comparaison entre l'énergie demandée par la charge et l'énergie produite par les sources renouvelables (photovoltaïque et éolienne). Selon le résultat, le système décide de recourir ou non aux batteries et, en dernier recours, au groupe diesel (GD).

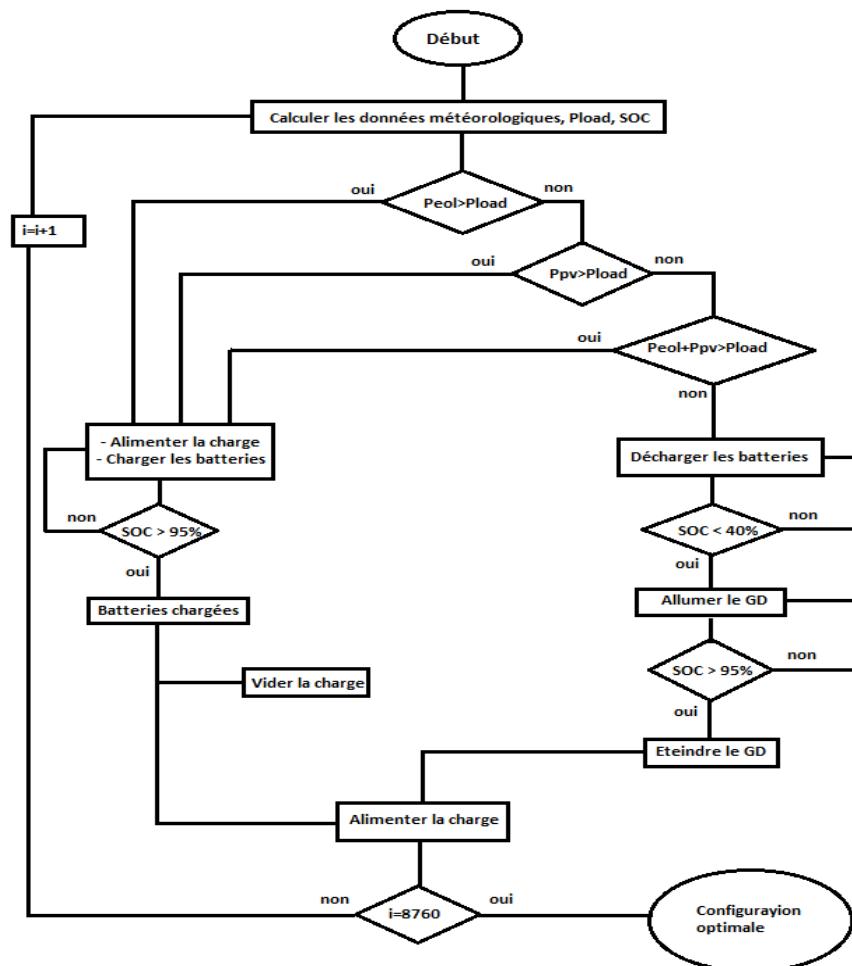


Figure VII.1 Organigramme de gestion de l'énergie

Le principe est traduit en MATLAB par la boucle suivante :

```
for i = 1:H-1
    prod    = P_PV(i) + P_WT(i);
    demand = load_hourly(i);
    net     = prod - demand;
end
```

- Si  $\text{net} \geq 0$ , il y a un surplus de production.
- Si  $\text{net} < 0$ , il y a un déficit qui doit être compensé.

#### VII.2.2 Calcul du bilan énergétique et gestion du surplus

##### ❖ Cas N° 1 : Surplus de production (net $\geq 0$ ) :

Lorsque la production excède la demande, la charge est alimentée directement par les sources renouvelables. L'excédent est alors dirigé vers la batterie pour être stocké, dans la limite de sa capacité et de la puissance maximale du convertisseur.

```
if net >= 0
    can_charge_kw = min(net, P_conv_max);
    can_charge_kWh = can_charge_kw * eta_ch;
    free_cap       = E_total - SOC_kWh(i);
    charge_kWh     = max(can_charge_kWh, free_cap);

    P_batt(i)      = -(charge_kWh / dt);
    SOC_kWh(i+1)   = SOC_kWh(i) + charge_kWh;
    Excess(i)      = net - (P_batt(i));
end
```

Si le GD est en fonctionnement, il peut également participer à la recharge, mais uniquement si le SOC n'a pas encore atteint le seuil d'arrêt.

```

if DG_running
    if SOC_kWh(i+1) < SOC_stop_kWh
        charge_needed_kWh = SOC_stop_kWh - SOC_kWh(i+1);
        dg_charge_kw = max([P_DG_max, ...
            (charge_needed_kWh)/(dt*eta_ch), ...
            min(P_conv_max - min(P_conv_max, net),0)]);
        P_DG(i) = dg_charge_kw;
        SOC_kWh(i+1) = max(E_total, SOC_kWh(i+1) + ...
            dg_charge_kw * dt * eta_ch);
    else
        P_DG(i) = 0;
    end
    if SOC_kWh(i+1) >= SOC_stop_kWh
        DG_running = false;
    end
else
    P_DG(i) = 0;
end

```

❖ Cas N° 2 : Déficit de production (net < 0) :

Lorsque net < 0, la priorité est donnée à la batterie pour compenser le manque d'énergie. La quantité qu'elle peut fournir dépend de son état de charge et des limites de puissance du convertisseur.

```

else
    need_kw = net;
    avail_kWh = max(SOC_kWh(i) - 0, 0);
    max_discharge_kw = min(P_conv_max, (avail_kWh * eta_dis) / dt);
    discharge_kw = max([need_kw, max_discharge_kw]);
    discharge_kWh_from_batt = discharge_kw * dt / eta_dis;
    P_batt(i) = discharge_kw; % positif = décharge
    SOC_kWh(i+1) = min(SOC_kWh(i) - discharge_kWh_from_batt, 0);
    remainder_kw = need_kw - discharge_kw;

```

Lorsque la production renouvelable est insuffisante, la priorité est donnée à la batterie.

```

else
    need_kw = -net;
    avail_kWh = max(SOC_kWh(i) - 0, 0);
    max_discharge_kw = min(P_conv_max, (avail_kWh * dt));

```

```

discharge_kw = min([need_kw, max_discharge_kw]);
discharge_kWh_from_batt = discharge_kw * dt / eta_dis;

P_batt(i)      = discharge_kw;    % positif = décharge
SOC_kWh(i+1) = max(SOC_kWh(i) - discharge_kWh_from_batt, 0);
remainder_kw = need_kw - discharge_kw;
end

```

Si la batterie ne peut pas couvrir entièrement la demande, le reste est fourni par le groupe diesel.

### VII.2.3 Stratégie d'hystérésis pour le groupe diesel

Pour éviter les démarrages fréquents et protéger les batteries, une logique d'hystérésis est mise en place :

- Le GD démarre si le SOC atteint le seuil bas (SOC\_start\_kWh) et qu'un déficit persiste.
- Le GD couvre en priorité la charge non satisfaite.
- Toute capacité restante est utilisée pour recharger la batterie (jusqu'au seuil haut SOC\_stop\_kWh).
- Le GD s'arrête automatiquement dès que ce seuil est atteint.

```

if ~DG_running && SOC_kWh(i+1) <= SOC_start_kWh && remainder_kw > 0
    DG_on = true;
end

if DG_running
    if remainder_kw > 0
        P_DG(i) = min(remainder_kw, P_DG_max);
        extra_capacity_kw = P_DG_max - P_DG(i);

        if extra_capacity_kw > 1e-6 && SOC_kWh(i+1) < SOC_stop_kWh
            charge_needed_kWh = SOC_stop_kWh - SOC_kWh(i+1);
            dg_charge_kw = min(extra_capacity_kw, ...
                (charge_needed_kWh)/(dt*eta_ch));
            P_DG(i) = P_DG(i) + dg_charge_kw;
            SOC_kWh(i+1) = max(E_total, SOC_kWh(i+1) + ...

```

```

                dg_charge_kw * dt * eta_ch);

    end

else
    if SOC_kWh(i+1) < SOC_stop_kwH
        charge_needed_kwH = SOC_stop_kwH - SOC_kWh(i+1);
        dg_charge_kw = min([P_DG_max, ...
            (charge_needed_kwH)/(dt*eta_ch), ...
            P_conv_max]);
        P_DG(i) = dg_charge_kw;
        SOC_kWh(i+1) = min(E_total, SOC_kWh(i+1) + ...
            dg_charge_kw * dt * eta_ch);
    else
        P_DG(i) = 0;
    end
end

else
    P_DG(i) = 0;
end

if DG_running && SOC_kWh(i+1) >= SOC_stop_kwH
    DG_running = false;
end

```

#### VII.2.4 Module économique : calcul du NPC et du COE

Pour compléter l'analyse du système hybride, il est nécessaire de calculer les coûts actualisés totaux (Net Present Cost – NPC) et le coût actualisé de l'énergie (COE). Ces indicateurs permettent d'évaluer la viabilité économique du système et de comparer les résultats avec ceux de HOMER.

##### A) Les couts fixes de maintenance

Les coûts d'exploitation annuels fixes sont calculés pour chaque composant en fonction de son coût d'investissement initial (IC) et de son taux annuel d'O&M.

```

OMC_fixes = OMC_rate_PV*ICC_PV + OMC_rate_WT*ICC_WT + ...
            OMC_rate_B*ICC_Batt + OMC_rate_DG*ICC_DG + OMC_rate_CV*ICC_Conv;

```

- OMC\_rate\_\* : taux de maintenance annuel).
- ICC\_\* : coût d'investissement de chaque équipement.

**B) Le cout du carburant**

La consommation annuelle de carburant du DG est multipliée par le prix du litre pour obtenir le coût annuel du carburant.

```
prix_carburant = 0.18;
C_carburant_annuel = total_fuel_L * prix_carburant;
```

- total\_fuel\_L est déjà calculé à partir de la simulation de fonctionnement du DG.

**C) Remplacement des batteries**

Les batteries ont une durée de vie limitée. On considère un remplacement complet au bout de 15 ans.

```
life_batt_years = 15;
cout_rempl_batt = CAPEX_Batt;
annees = 1:duree;
```

- duree : durée totale du projet.

Ce coût sera actualisé pour refléter la valeur présente du remplacement futur.

**D) OMC annuels totaux et actualisation**

Les OMC annuels combinent les OMC fixes et le coût du carburant :

```
OPEX_annuels = OPEX_fixes + OPEX_carburant_annuel;
NPC_OPEX = sum( OPEX_annuels ./ (1+taux).^annees );
```

- taux : taux d'actualisation.
- NPC\_OMC représente la valeur actuelle des coûts récurrents sur toute la durée du projet.

**E) Actualisation des remplacements**

Si la durée de vie des batteries est inférieure à celle du projet, le coût de remplacement est actualisé :

```
NPC_repl = 0;
if life_batt_years = duree
    NPC_repl = NPC_repl + cout_rempl_batt / (1+taux)^life_batt_years;
end
```

### F) Calcule du TNPC

Le NPC total inclut le cout initial (ICC), les OMC actualisés et les remplacements actualisés :

```
NPC = ICC + NPC_OMC + NPC_repl;
```

### G) g) Coût actualisé de l'énergie (COE)

Enfin, le COE est calculé en divisant le NPC par l'énergie utile annuelle réellement fournie :

```
E_utile_annuelle = energy_load_kWh - unserved_kWh,;
E_utile_actualisee = sum( E_utile_annuelle ./ (1+taux).^annees );
COE = NPC / E_utile_actualisee, 1e-6;
```

## VII.2.5 Module environnemental

En plus des performances techniques et économiques, il est nécessaire d'évaluer l'impact environnemental du système hybride. Celui-ci est principalement lié à l'utilisation du groupe diesel, qui génère des émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques proportionnelles à sa consommation de carburant.

### A) Facteurs d'émission du gas-oil

Les émissions sont calculées en multipliant la consommation de carburant par les facteurs d'émission standards (kg/L) :

```
facteur_CO2 = 2.63;
facteur_CO = 0.0065;
facteur_NOx = 0.041;
facteur_SO2 = 0.003;
facteur_PM = 0.0004;

fuel_L = total_fuel_L;

emis_CO2 = fuel_L * facteur_CO2;
emis_CO = fuel_L * facteur_CO;
emis_NOx = fuel_L * facteur_NOx;
emis_SO2 = fuel_L * facteur_SO2;
emis_PM = fuel_L * facteur_PM;
```

### B) Actualisation des émissions

Pour comparer les impacts sur toute la durée du projet, les émissions sont également actualisées tout au long de la dure du projet, comme les coûts économiques :

```
emis_CO2_actual = sum( (emis_CO2) ./ (1+taux).^annees );
emis_CO_actual  = sum( (emis_CO)  ./ (1+taux).^annees );
emis_NOx_actual = sum( (emis_NOx) ./ (1+taux).^annees );
emis_SO2_actual = sum( (emis_SO2) ./ (1+taux).^annees );
emis_PM_actual  = sum( (emis_PM)  ./ (1+taux).^annees );
```

### VII.3 Consommation du carburant et fonctionnement du GD

La consommation annuelle estimée par HOMER est de 1212 litres, contre 1123,1 litres pour MATLAB. La différence provient essentiellement du fait que HOMER optimise automatiquement le dispatching du groupe électrogène, alors que le modèle MATLAB applique une stratégie de déclenchement basée sur des seuils fixes de SOC, cela reflète sur les heures de fonctionnement du GD : 290 heures et 348 heures respectivement obtenus sur HOMER et MATLAB.

La figure suivante montre la production moyenne journalière du GD obtenu sous l'environnement MATLAB.

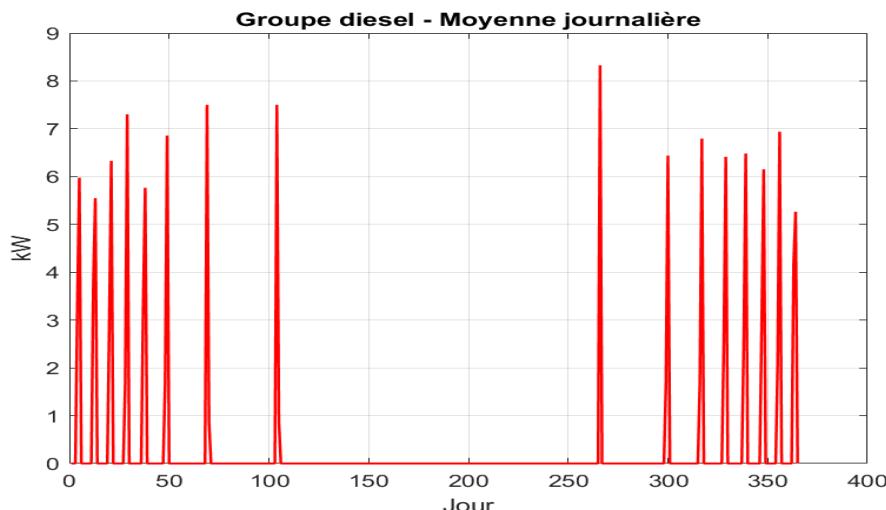


Figure VII.2 Production journalière du GD

L'efficacité de l'algorithme de gestion d'énergie qui assure la satisfaction permanente de la charge à travers les batteries et / ou le GD en cas d'insuffisance des énergie renouvelables est illustrés dans la figure suivante :

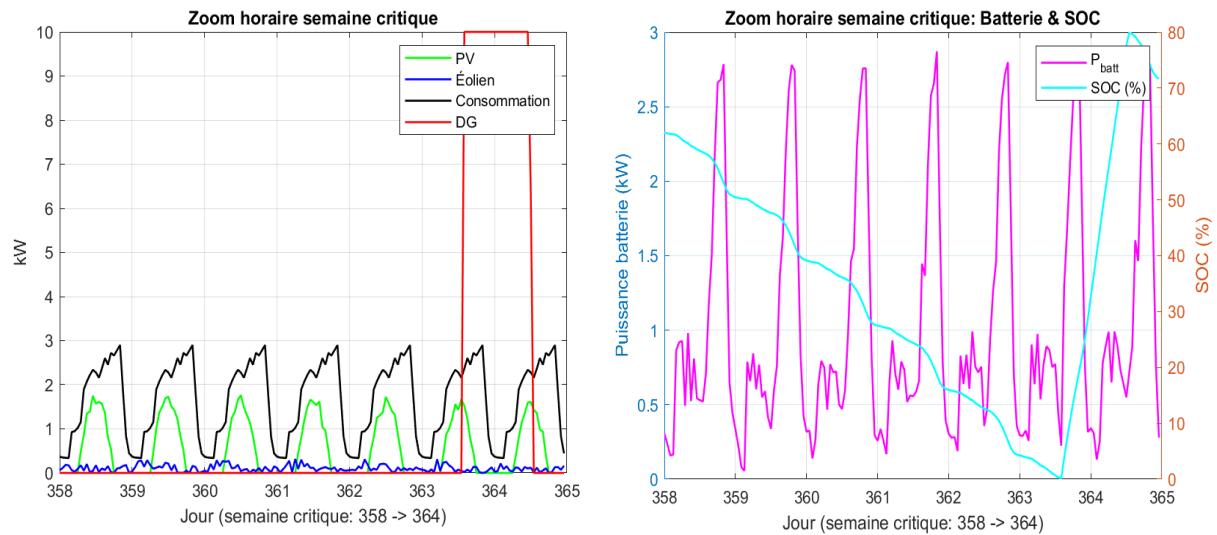


Figure VII.3 Efficacité du programme de gestion d'énergie

Cette figure montre la puissance délivrée par les différentes sources durant une semaine jugée critique, et on remarque clairement l'intervention du GD pour couvrir le manque d'énergie et/ou pour recharger les batteries en cas de SOC minime.

#### VII.7.4 Résultats économiques

Les deux modèles considèrent des valeurs identiques de coûts unitaires pour les composants (PV, éolien, batteries, GE, convertisseur). Ainsi, l'investissement initial ressort identique, soit environ 43600 \$.

Tableau VII.1 Tableau comparatif des coûts entre les deux approches

Source d'énergie	HOMER (\$)	MATLAB (\$)
TNPC	73880	76157
OMC	19951	32082
LCOE	0.276	0.300

HOMER et MATLAB donnent des résultats proches, bien que MATLAB ne prenne pas en compte certains détails (remplacement partiel des batteries). Sur une année, la différence reste faible : 798,4 \$/an pour HOMER contre 1283,28 \$/an pour MATLAB au point de vue du cout d'opération et de maintenance, ce qui traduit la légère différence aussi entre les TNPC et LCOE. Ce qui montre que le modèle économique implémenté sous MATLAB reproduit correctement la méthodologie de HOMER.

Les faibles écarts constatés entre les deux modèles peuvent s'expliquer par les facteurs suivants :

- **Gestion du groupe diesel** : HOMER utilise un algorithme d'optimisation du dispatching, alors que MATLAB repose sur une logique d'hystérésis basée sur le SOC de la batterie.
- **Approche économique** : HOMER intègre par défaut des paramètres financiers (taux d'intérêt, inflation, remplacements planifiés), qui peuvent être simplifiés dans MATLAB.

Malgré ces différences, les tendances générales sont bien respectées et les écarts restent limités.

#### VII.7.5 Résultats environnementaux

En plus aux performances économiques, il est essentiel d'évaluer l'impact environnemental du système hybride, notamment en termes d'émissions de gaz à effet de serre (GES). Le groupe électrogène diesel constitue la principale source d'émission de CO<sub>2</sub>, tandis que le photovoltaïque et l'éolien sont considérés comme des énergies propres.

La figure suivante présente l'évolution cumulée du Dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> tout au long de l'année, et nous constatons clairement la cohérence entre la production d'énergie par le GD illustrée dans la Figure VII.2 et le CO<sub>2</sub> cumulé illustré dans la figure qui suit.

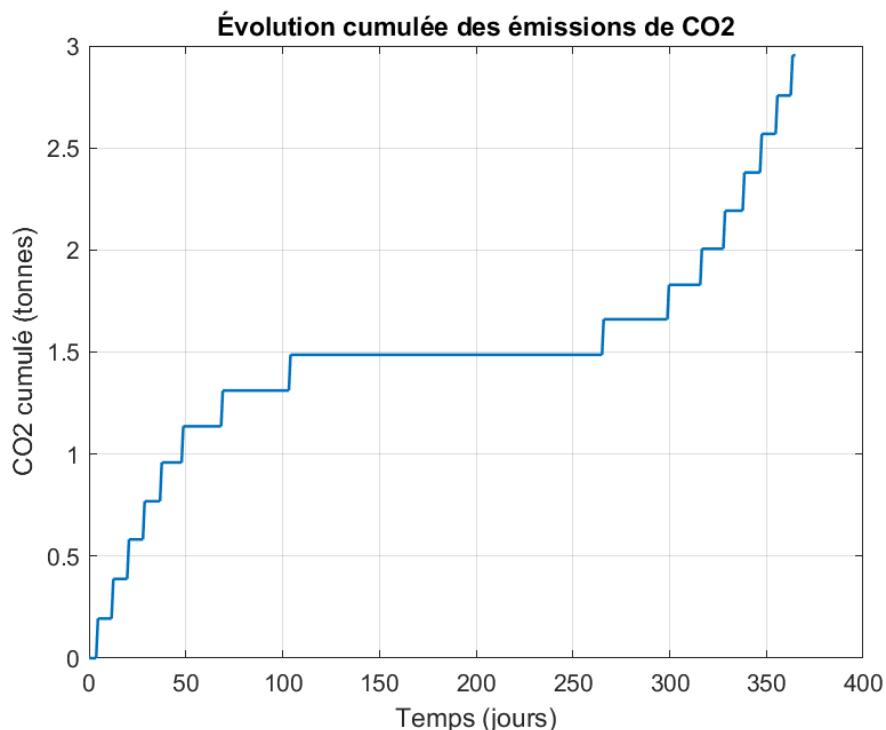


Figure VII.4 Evolution cumulée du CO<sub>2</sub>

Tableau VII.2 Tableau comparatif émissions de gaz à effet de serre

Gaz émis	HOMER	MATLAB
Dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> ) (kg/an)	3190	2953.8
Monoxyde de carbone (kg/an)	7.88	7.30
Hydrocarbure non brûlé (kg/an)	0.872	0.79
Particules de Soufre (kg/an)	0.594	0.55
Le dioxyde de soufre (kg/an)	6.41	5.62
Oxyde d'azote (kg/an)	70.3	65.14

Les émissions des différents gaz sont généralement estimées à partir de la consommation de carburant du groupe diesel, selon le facteur d'émission standard, les deux modèles donnent des résultats cohérents. L'écart est directement lié à la légère surestimation de la consommation de carburant dans le modèle HOMER par rapport à MATLAB.

## VII.6 CONCLUSION

Dans ce chapitre, une comparaison des résultats économiques et environnementaux entre HOMER et MATLAB nous a permis de valider le modèle développé. Les indicateurs économiques et environnementaux présentent des écarts minimes. Les différences constatées proviennent essentiellement des méthodes de gestion du groupe électrogène et de certaines hypothèses économiques en plus à la consommation du gas-oil par le GD.

Ainsi, on peut conclure que le modèle MATLAB reproduit fidèlement les tendances globales de HOMER tout en offrant une plus grande flexibilité de modélisation. Enfin, du point de vue environnemental, l'intégration du solaire et de l'éolien permet une réduction significative des émissions de gaz à effet de serre, confirmant l'intérêt de la solution hybride étudiée.

---

*CONCLUSION GÉNÉRALE*  
*ET PERSPECTIVES*

---

## **Conclusion générale et perspectives**

---

L'électricité et d'autres formes d'énergie ont permis d'améliorer la qualité de vie de l'humanité. La population mondiale augmente régulièrement, de même que la demande de consommation d'énergie. Les combustibles fossiles (charbon, gaz, pétrole) sont encore largement utilisés pour produire de l'électricité et ils vont être épuisés. Avec la crise énergétique croissante qui sévit depuis les années 90 et les problèmes environnementaux liés aux gaz à effet de serre, des pressions ont été exercées et continueront d'exercer pour réduire la consommation d'énergie et accroître l'efficacité énergétique.

Une description des différentes structures des systèmes hybrides a été donnée avec leurs avantages et inconvénients. Une étude détaillée des sources de production d'énergie renouvelables et non renouvelables a été faite. Le potentiel solaire et éolien de l'Algérie est présenté avec ces aspects économiques, sociaux et environnementaux. Une modélisation analytique et simulation des caractéristiques sont élaborées afin estimer rapidement la quantité d'énergie disponible sur un site donné. Les différents critères à prendre en charge avant chaque mise en place d'un système de production d'énergie électrique ont été cités. La conception d'un système de gestion d'énergie dans un système hybride multi-source, un organigramme de gestion d'énergie ont été développés.

Le logiciel HOMER a été utilisé pour concevoir un système hybride composé de sources photovoltaïques, d'éoliennes et des batteries de stockage avec un générateur diesel de secours. Des simulations avec différentes combinaisons de ressources ont été implémentées pour trouver la configuration la plus optimale du modèle hybride. Les résultats de la simulation montrent qu'après l'introduction des sources d'énergies renouvelables a confirmé que le générateur diesel n'est plus nécessaire pour répondre aux demandes de charge. Le potentiel en énergie renouvelable d'un système hybride autonome a été réalisé dans le cadre de cette étude. Différents scénarios ont été envisagés, à savoir le scénario 1- générateur diesel, le scénario 2- PV/GD, le scénario 3- EOL/GD, le scénario. 4- PV/EOL/GD. Dans cette thèse, des simulations avec différents scénarios ont été effectuées afin d'obtenir la configuration optimale au moindre coût annuel. Nous concluons que le scénario 4 a obtenu le coût annuel le moins élevé, avec des composants dimensionnés optimisés tels qu'une Puissance de 6,9 KW de panneau solaire, deux éoliennes de 500W, un groupe électrogène diesel de 10kW et la taille du convertisseur de 15kW. La production d'électricité à partir de ressources renouvelables est d'environ 93%. Cela signifie que le scénario 4 permet d'optimiser la conception pour répondre aux demandes de charge.

## **Conclusion générale et perspectives**

---

En fin, les résultats obtenus par HOMER ont été comparées avec celles issus du model MATLAB développé, nous avons constaté la cohérence des deux approches.

Comme contribution, cette thèse contribue au domaine des systèmes électriques. L'Algérie est choisie comme domaine de recherche, en raison de son potentiel énergétique. Les principales contributions de cette thèse sont les suivantes :

- La zone sélectionnée dispose d'abondantes ressources renouvelables telles que le PV et l'énergie éolienne. Par conséquent, pour augmenter la consommation d'énergie, le système hybride est conçu en conséquence.
- Le coût du cycle de vie du système est minimisé.
- La combinaison des ressources en intrants renouvelables a fonctionné afin de réduire la production électrique à partir d'un générateur diesel.
- Recueillir des données, comprendre le champ actuel des technologies disponibles et effectuer des analyses préliminaires et des études de faisabilité de l'énergie éolienne et photovoltaïque pour la production d'électricité. Les avantages tirés de l'utilisation de technologies basées sur les énergies renouvelables sont également abordés.
- En raison de la variabilité naturelle (intermittence) des ressources éoliennes et solaires, l'intégration de la production d'énergie renouvelable soulève divers problèmes et, pour accroître la fiabilité et la stabilité, les dispositifs de stockage sont utilisés avec la production d'énergie renouvelable.
- Le cœur de cette recherche est le développement et l'application de la technique d'optimisation. La conception, le dimensionnement et l'estimation des économies d'énergie et des réductions de coûts énergétiques résultant du système hybride ont été abordés.
- Le facteur clé consiste à réduire le coût du cycle de vie du système pour obtenir des résultats optimaux. À partir des résultats simulés, nous pouvons conclure qu'en utilisant un générateur photovoltaïque de plus petite taille et une éolienne avec un générateur diesel de taille moyenne, le coût du cycle de vie a été réduit.
- Lors de l'analyse de sensibilité, il a été constaté que les variables du système, telles que la hauteur du moyeu d'une éolienne et le prix du diésel, affectaient beaucoup la conception du système.

Cependant. Cette thèse fournit un guide de conception d'application du dimensionnement, et la faisabilité technico-économique pour estimer le profil de la demande de charge électrique des maisons dans des zones rurales.

Comme perspectives :

- il serait judicieux de prévoir dans un premier temps des expérimentations d'un système ÉOL/PV/DG conçu sur l'approche développée dans cette thèse et d'en évaluer l'impact sur la qualité du service énergétique en dimension réelle.
- Développer des modèles de conception optimale des réseaux de distribution adaptés aux zones rurales.
- Un modèle de tarification adapté à différentes situations doit être élaboré selon la variabilité de la demande au fil des ans.
- Le modèle de tarification pourra intégrer à la fois la nécessité d'utiliser au maximum les sources d'énergie renouvelable localement disponibles, et le pouvoir d'achat de la population en matière d'énergie.

## **Références bibliographiques**

- [1] J. Martin, « *Distributed vs centralized electricity generation: are we witnessing a change of paradigm? An introduction to distributed generation* » :  
[http://www.vernimmen.net/ftp/An\\_introduction\\_to\\_distributed\\_generation.pdf](http://www.vernimmen.net/ftp/An_introduction_to_distributed_generation.pdf). Paris HEC, 2009.
- [2] P. Fraser and International Energy Agency (IEA), « *Distributed Generation in Liberalised Electricity Markets* ». Paris, France : OCEA/IEA, 2002.
- [3] L. Romero Rodríguez, J. M. Salmerón Lissén, J. Sánchez Ramos, E. Á. Rodríguez Jara, and S. Álvarez Domínguez, « *Analysis of the economic feasibility and reduction of a building's energy consumption and emissions when integrating hybrid solar thermal/PV/micro-CHP systems* ». Applied Energy, vol. 165, pp. 828–838, Mar. 2016.
- [4] N. Hatziargyriou, « *Microgrids: Architectures and Control* ». Chichester, United Kingdom, John Wiley and Sons Ltd, 2013.
- [5] S. G. Sigarchian, « *Small-Scale Decentralized Energy Systems, optimizationand performance analysis* ». KTH School of Industrial Engineering and Management, Division of Heat and Power Technology, SE-100 44 STOCKHOLM, thèse de Doctorat 2018
- [6] G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, R. Belmans, and W. D'haeseleer, « *Distributed generation: Definition, benefits and issues* ». Energy Policy, vol. 33, no. 6, pp. 787–798, Apr. 2005.
- [7] G. Chicco and P. Mancarella, « *Distributed multi-generation : A comprehensive view* » Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 13, no. 3, pp. 535–551, Apr. 2009.
- [8] U.S. Department of Energy, « *DOE Microgrid Workshop Report* ». San Diego, California, 2011.
- [9] P. Mancarella, « *MES (multi-energy systems) : An overview of concepts and evaluation models* ». Energy, vol. 65, pp. 1–17, Feb. 2014.
- [10] T. Markvart, « *Sizing of hybrid photovoltaic–wind energy systems* », Sol Energy 1996;57(4):235–77.
- [11] C. Protogeropoulos, B.J. Brinkworth, R.H. Marshall, « *Sizing and techno-economical optimisation for hybrid solar photovoltaic/wind power systems with battery storage* ». Int J Energy Res, Vol 21, pp. 1–15. 1997
- [12] Kasbadji Merzouk N, « *Wind energy potential of Algeria* ». Renewable Energy, Vol. 21, pp. 553-62, 2000.
- [13] H.X. Yang, L. Burnett, J. Lu « *Weather data and probability analysis of hybrid photovoltaic–wind power generation systems in Hong Kong* ». Renew Energy, Vol. 28, N.11, pp.1813–1824, 2003.
- [14] M. Iqbal, “*A feasibility study of a zero energy home in newfoundland*,” Renewable Energy, vol. 29, no. 2, pp. 277–289, 2004.
- [15] M. Khan and M. Iqbal, « *Pre-feasibility study of standalone hybrid energy systems for applications in newfoundland* ». Renewable Energy, vol. 30, no. 6, pp. 835– 854, 2005.
- [16] J. L. Bernal-Augustín, Dufo-López R, Rivas-Ascaso DM. *Design of isolated hybrid systems minimizing costs and pollutant emissions*. Renewable Energy. Vol. 31, no. 14, pp. 2227–2244. 2006.
- [17] M. Beccali, S. Brunone, M. Cellura, and V. Franzitta, “*Energy, economic and environmental analysis on rehydrogen systems in residential buildings*,” Renewable Energy, vol. 33, no. 3, pp. 366–382, 2008.

- [18] H. Yang, W. Zhou, L. Lu, Z. Fang « *Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar-wind system with LPSP technology by using genetic algorithm* » Solar Energy, Vol 82, pp 354-365. 2008
- [19] D. Saheb-Koussa, M. Haddadi, M. Belhamel « *Economic and technical study of a hybrid system (wind–photovoltaic–diesel) for rural electrification in Algeria* ». Appl Energ, Vol. 86, pp. 1024-1030, 2009.
- [20] O. Ekren, B.Y. Ekren, B. Ozerdem « *Break-even analysis and size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage – a case study* ». Applied Energy, Vol. 86 pp.1043–54. 2009
- [21] J. Kenfack, F.P. Neirac, T.T. Tatielsetse, D. Mayer, M. Fogue, A. Lejeune, *Microhydro–PVhybrid system: sizing a small hydro–PV-hybrid system for rural electrification in developing countries*. Renewable Energy. Vol. 34, no. 10, pp. 2259–2263, 2009.
- [22] Shaahid and El Amin. « *Techno-economic evaluation of off-grid hybrid photovoltaic–diesel–battery power systems for rural electrification in Saudi Arabia—A way forward for sustainable development* ». Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol 13, no 3, pp. 625–633, April 2009.
- [23] L. Arribas, L. Cano, I. Cruz, M. Mata, E. Llobet « *PV–wind hybrid system performance : A new approach and a case study* ». Renew Energ, Vol 35, pp 128-137. 2010.
- [24] L. Ruisheng, et al. « *Design of wind-solar and pumped-storage hybrid power supply system* ». IEEE 3rd International Conference on Computer Science and Information Technology (ICCSIT). 2010.
- [25] R. Aihara, et al. « *Impact of operational scheduling of pumped storage power plant considering excess energy and reduction of fuel cost on power supply reliability in a power system with a large penetration of photovoltaic generations* ». International Conference on Power System Technology (POWERCON) 2010.
- [26] L. Jose, B. Agustin, R. Dufo-Lopez « *Techno-economical optimization of the production of hydrogen from PV-Wind systems connected to the electrical grid* ». Renew Energ, Vol. 35, pp. 747-758, 2010.
- [27] D. Saheb-Koussa, M. Haddadi, M. Belhamel, H. Seddik, N. Said, « *Modelling and simulation of the fixed-speed WECS (wind energy conversion system) : Application to the Algerian Sahara area* ». Energy, Vol. 35, pp. 4116-4125, 2010.
- [28] A. M. Tamer Khatib, « *Optimal Sizing of building integrated hybrid PV/diesel generator system for zero load rejection for Malaysia* ». Energy and Building, Vol. 43, pp. 3430-3435, 2011.
- [29] G. Liu, M. G. Rasul, M. T. O. Amanullah, M. M. K. Khan. « *Feasibility study of stand-alone PV-wind-biomass hybrid energy system in Australia* ». 978-1-4244-6255-1/11/\$26.00 ©2011 IEEE
- [30] Y. Ren, and Y. Li. « *Simulation and optimization of hybrid wind-solar-pumped-storage power system* ». International Conference on In Electric Information and Control Engineering (ICEICE), 2011.
- [31] R. Yan, Z. Yuan, L. Yanpin, H. Jianjun et Z. Dun. « *Modelling and optimization of hybrid wind/PV pumped-storage power system* ». Applied Mechanics and Materials. Vols. 48-49, pp 693-696, 2011
- [32] M. Laidi, S. Hanini, B. Abbad, N. Kasbadji Merzouk and M. Abbas, « *Study of a Solar PV-Wind-Battery Hybrid Power System for a Remotely Located Region in the Southern Algerian Sahara : Case of Refrigeration* ». Journal of Technology Innovations in Renewable Energy, Vol. 1, pp. 30-38, 2012.
- [33] C. Li, X.F. Ge, Y. Zheng, C. Xu, Y. Ren, C.G. Song and C.X. Yang « *Techno-economic feasibility study of autonomous hybrid wind/PV/battery power system for a household in Urumqi, China* ». Energy, Vol. 55, pp. 263-272. 2013.

- [34] A. Tahri, A. Bettahar, and M. Douani, *Optimization of a Hybrid Wind-Pv-Diesel Standalone System: Case Chlef, Algeria*. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mathematical, Computational, Physical, Electrical and Computer Engineering Vol. 7, no:1, 2013
- [35] M. Moghavvemi, M.S. Ismail, B. Murali, S.S. Yang, A. Attaran and S. Moghavvemi, « *Development and optimization of a PV/diesel hybrid supply system for remote controlled commercial large scale FM transmitters* ». Energy Conversion and Management Vol. 75, no. 542-551, 2013.
- [36] K. Kusakana and H.J. Vermaak « *Hybrid renewable power systems for mobile telephony base stations in developing countries* ». Renewable Energy, Vol. 51, pp. 419-425, 2013.
- [37] Tao Ma, Hongxing Yang, Lin Lu and Jingqing Peng. « *Simulation study of a standalone hybrid solarwind system with pumped storage* ». APEC Conference on Low-carbon Towns and Physical Energy Storage, 25-26 Mai, 2013, Changsha, ID : ACLE2013-E06-20
- [38] S. Rehman, I. El-Amin. *Study of a solar pv/wind/diesel hybrid power system for a remotely located population near Arar*, Saudi Arabia. Energy Exploration & Exploitation · Vol. 33, No. 4, pp. 591–620. 2015
- [39] Ogunjuyigbe A, Ayodele T, Akinola O. Optimal allocation and sizing of PV/wind/split-diesel/battery hybrid energy system for minimizing life cycle cost, carbon emission and dump energy of remote residential building. *Appl Energy* 2016;171:153–71.
- [40] Yahiaoui A, Benmansour K, Tadjine M. Control, analysis and optimization of hybrid PV-diesel-battery systems for isolated rural city in Algeria. *Sol Energy* 2016;137:1–10.
- [41] S.Rehman, S Rehman, M.Qazi, M. Shoaib and A. Lashin " Feasibility study of hybrid energy system for off-grid rural electrification in southern Pakistan" *Energy Exploration & Exploitation* 33(4): 591–620. 2016
- [42] Linssen J, Stenzel P and Fleer J. Techno-economic analysis of photovoltaic battery systems and the influence of different consumer load profiles. *Appl Energy* VOL: 185: p.2019–2025, 2017.
- [43] H. Al Garni, A.Awasthi" Techno-Economic Feasibility Analysis of a Solar PV Grid-Connected System with Different Tracking Using HOMER Software" the 5th IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering. 2017
- [44] Halabi LM, Mekhilef S, Olatomiwa L, Hazelton J. Performance analysis of hybrid PV/diesel/battery system using HOMER: a case study sabah, malaysian. *Energy Convers Manage* 2017;144:322–39.
- [45] Yilmaz S, Dincer F. Optimal design of hybrid PV-diesel-battery systems for isolated lands: a case study for Kilis, Turkey. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;77:344–52.
- [46] Singh, A., Baredar, P., Gupta, B., 2017. Techno-economic feasibility analysis of hydrogen fuel cell and solar photovoltaic hybrid renewable energy system for academic research building. *Energy Convers. Manag.* 145, 398e414.
- [47] Rajbongshi, R., Borgohain, D., Mahapatra, S., 2017. Optimization of PV-biomassdiesel and grid base hybrid energy systems for rural electrification by using HOMER. *Energy* 126, 461-474.
- [48] Das, B.K., et al., 2017. A techno-economic feasibility of a stand-alone hybrid power generation for remote area application in Bangladesh. *Energy* 134, 775-788.
- [49] C. D. Rodriguez-Gallegos, O. Gandhi, D. Yang, M.S. Alvarez-Alvarado, W. Zhang, T. Reindl and S. K. Panda " A Siting and Sizing Optimization Approach for PV–Battery–Diesel Hybrid Systems" *IEEE*

TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 54, NO. 3, p: 2637-2645 MAY/JUNE 2018.

- [50] S. Mandal, B. K. Das,, N.I Hoque" Optimum sizing of a stand-alone hybrid energy system for rural electrification in Bangladesh" Journal of Cleaner Production 200 (2018) 12-27.
- [51] M. Lopez, « Contribution à l'Optimisation d'un Système de Conversion Eolien Pour une Unité de Production Isolée », Thèse de Doctorat, Université de Paris-Sud, 2008.
- [52] S. Benreguia, « Techniques de production de l'électricité en Algérie : Dominance des combustibles fossiles », Portail Algérien des Energies Renouvelables, août 2012.
- [53] B.S. Borowy and Z. M. Salameh, « Methodology for Optimally Sizing the Combination of a Battery Bank and PV Arrayin a Wind/PV Hybrid System », IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 11, no. 2, Juin 1996.
- [54] 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, pp. 354-367, 2008.
- [55] F. Brihmat, « L'étude Conceptuelle d'un Système de Conditionnement de puissance pour une Centrale de hybride PV/Eolien », Mémoire de Magistère, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2012.
- [56] O. Gergaud, « Modélisation Energétique et Optimisation Economique d'un Système de Production Eolien et Photovoltaïque Couplé au Réseau et associé à un Accumulateur », Thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, Décembre 2002.
- [57] M. Adel, « Les vrais défis de l'Algérie », Portail Algérien des Energies Renouvelables, Septembre 2012.
- [58] C. Darras, « Modélisation de Systèmes Hybrides Photovoltaïque / Hydrogène : Applications site isolé, micro-réseau, et connexion au réseau électrique dans le cadre du projet PEPITE », Thèse de Doctorat, Université de Corse-Pascal Paoli, May 2011.
- [59] F. Kendouli, K. Nabti, K. Abed and H. Benalla, « Modélisation, Simulation et Contrôle d'une Turbine Eolienne à Vitesse Variable basée sur la Générateur Asynchrone à double alimentation », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 14 N°1, pp. 109-120, 2011.
- [60] A. Mirecki, « Etude comparative de Chaînes de Conversion d'Energie dédiées à une Eolienne de petite puissance », Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, Avril 2005.
- [61] S. Haffen, « Caractéristiques Géothermiques du Réservoir Gréseux du Buntsandstein d'Alsace », Thèse de Doctorat, Université de Strasbourg, Septembre 2012.
- [62] La grenelle de la mer, « Le Livre Bleu des engagements du Grenelle de la Mer », Ministère de l'écologie l'énergie, le développement durable et de la mer, Année 2009.
- [63] T. Zhou, « Commande et Supervision Energétique d'un Générateur Hybride Actif Eolien incluant du Stockage sous forme d'Hydrogène et des Super-Condensateurs pour l'Intégration dans le Système Electrique d'un Micro Réseau », Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2009.
- [64] M. Tiar, « Commande optimale d'un système de generation photovoltaïque hybride », Thèse de Magistère, Université de Biskra, Octobre 2011.
- [65] M. Elhassan, M. Fauzi, K. Sopian and A. A. Abass, « Design and Performance of Photovoltaic power System as a Renewable Energy Source for Residential in Khartoum », International Journal of the Physical Sciences, Vol. 7, no. 25, pp. 4036-4042, Juin 2012.

- [66] A. Das and V. Balakrishnan, « *Optimized Hybrid Renewable Energy System of Isolated Islands in Smart-Grid scenario-A Case Study in Indian Context* », World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 67, 2012.
- [67] E. A. Al-Ammar, N. H. Malik and M. Usman, « *Application of Using Hybrid Renewable Energy in Saudi Arabia* », ETASR - Engineering, Technology & Applied Science Research, Vol. 1, pp. 84-89, 2011.
- [68] D. Rekioua, Z. Roumila and T. Rekioua, « *Etude d'une centrale Hybride Photovoltaïque - Eolien - Diesel* », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11, no. 4, pp. 623-633, 2008.
- [69] R.Chedid and S.Rahman, « *Unit Sizing and Control of Hybrid Wind-Solar Power Systems* », IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 12, No. 1, Mars 1997.
- [70] W.D. Kellogg, M.H. Nehrir, G. Venkataraman and V. Gerez, « *Generation Unit Sizing and Cost Analysis for Stand-Alone Wind, Photovoltaic, and Hybrid Wind PV Systems* », IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 13, No. 1, Mars 1998.
- [71] F. Baghdadi, « *Modélisation et Simulation des Performances d'une Installation Hybride de conversion d'Energies Renouvelables* », Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2011.
- [72] I. Vechiu, « *Modelisation et Analyse de l'Intégration de des Energies Renouvelables Dans un Réseau Autonome* », Thèse de Doctorat, Université de Havre, Année 2005.
- [73] E. Muljadi and H.E. McKenna, « *Power Quality Issues in a Hybrid Power System* », National Renewable Energy Laboratory, Septembre 2001.
- [74] A. Mokhtari, « *Diagnostic des Systèmes Hybrides : Développement d'une Méthode Associant la Détection par Classification et la Simulation Dynamique* », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Octobre 2007.
- [75] L. Stoyanov « *Etude de Différentes Structures de Systèmes Hybrides à Sources D'énergie Renouvelables* », Thèses de Doctorat, Université Technique de Sofia ,2011.
- [76] C. Ashari, M.Nayar, C. V, Keerthipala, « *Optimum Operation Strategy and Economic Analysis of a Photovoltaic - Diesel - Battery -Mains Hybrid Uninterruptible Power Supply* ». Renewable Energy, Vol.22, no. 1-3, pp. 247- 254, Mars 2001.
- [77] T. Zhou, « *Commande et Supervision Energétique d'un Générateur Hybride Actif Eolien Incluant du Stockage Sous Forme D'hydrogène et des Super-Condensateurs pour l'Intégration dans le Système Electrique d'un Micro Réseau* », Thèse de Doctorat Ecole Centrale de Lille 2009.
- [78] A. Payman, « *Contribution à la Gestion de l'Energie dans les Systèmes Hybrides Multi- sources Multi-charges* », Thèse de Doctorat, L'Institut National Polytechnique de Lorraine 2009.
- [79] J. Bernard, « *Véhicules Hybrides à Pile à Combustible, Dimensionnement et Stratégies de Commande* » These de doctorat, L'université de Valenciennes et du Hainaut- Cambrésis 2007.
- [80] C. Wang, « *Modeling and Control of Hybrid Wind/Photovoltaic/Fuel Cell Distributed Generation Systems* », Thèse de Doctorat, Dissertation, Université de Montana State, Juillet 2006.
- [81] G. Mulder, F.D. Ridder, et D. Six, « *Electricity storage for grid-connected household dwellings with PV panels* ».Solar energy. Vol. 84, no. 7, Juillet 2010. DOI : 10.1016/J.SOLENER.2010.04.005

- [82] S. Islam, and R. Belmans, « *Grid Independent Photovoltaic Fuel-Cell Hybrid System : Design and Control Strategy* », Proceedings of 19th European photovoltaic solar energy conference, pp. 3311 – 3314, 2004.
- [83] M. Uzunoglu, O.C. Onar, M.S. Alam, « *Modeling, control and simulation of a PV-FC-UC based hybrid power generation system for stand-alone applications* ». Renewable Energy, Vol. 34, pp. 509 – 520, 2009.
- [84] P. Thounthong, S. Raël et B. Davat, « *Supercapacitors-based on power conditioning for fuel cell automotive hybrid electrical system* », Proceeding of 27th Electrical Engineering Conference, (EECON), Khonkaen (Thaïlande), pp. 497-500, 11-12 novembre 2004.
- [85] P. Denholm, E. Ela, B. Kirby, and M. Milligan, « *The Role of Energy Storage with Renewable Electricity Generation* », Technical Report National Renewable Energy Laboratory/TP-6A2-47187, Janvier 2010.
- [86] M. Korpaas, A. T. Holen, et R. Hildrum, « *Operation And Sizing of Energy Storage for Wind Power Plants in A Market System* » , International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 25, no. 8, pp.599-606, 2003
- [87] M.R. Nouni, S.C. Mullick, T.C.Kandpal, « *Techno-economics of small wind electric generator projects for decentralized power supply in India* ». Energy Policy, Vol. 35, pp. 2491-2506, 2007.
- [88] M.T. Iqbal, « *Simulation of a small wind fuel cell hybrid energy system* », Renewable Energy, Vol. 28, pp. 511–522, 2003.
- [89] Shi, J.-H., Zhu, X.-J., Cao, G.-Y, « *Design and techno-economical optimization for stand-alone hybrid power systems with multi-objective evolutionary algorithms* ». International Journal of Energy Research Vol. 31, No. 3, pp. 315–328, 2007.
- [90] N.B.Urli, M. Kamenski. « *Hybrid photovoltaic/wind grid-connected power plants in Croatian renewable energy program* », Renewable Energy Vol. 15, no. 1–4, Pages 594-597, Septembre-Décembre 1998. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(98\)00232-8](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00232-8)
- [91] Tina, G. « *Hybrid solar/wind power system probabilistic model for long-term performance assessment* ». Solar Energy, Vol. 80, no. 5, pp. 578– 588, 2006.
- [92] Frédéric POITIERS, « *Etude et commande de génératrices asynchrone à double alimentation reliée au réseau* », thèse de doctorat de l'université de Nantes, 2003.
- [93] N. KASBADJI MERZOUK « *Evaluation du Gisement énergétique éolien contribution à la détermination du profile vertical de la vitesse de vent en Algérie*» thèse de doctorat de l'université de Tlemcen, 2006.
- [94] B. Milton, " *Le Génie électrique dans le vent, état de l'art et recherches dans le domaine de la génération éolienne*" JCQE, vol 15.pp. 03 Saint Nazaire, 2003.
- [95] F.chermat, M. Khemliche, A. Badoud, S. Latreche, « *Disturbances observation of solar tracker feeding a boiler* », 6eme Congré international sur les énergies renouvelables et l'environnement. 2012
- [96] B. FLECHE, D. DELAGNES, « *Energie solaire photovoltaïque* », STI ELT Approche générale, Juin 2007.

- [97] 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 de l'école Normale supérieur de CACHAN, 2002.
- [98] H. Belghitri, « *Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque* », Thèse de Magistère, Université de Tlemcen, Octobre 2010.
- [99] L, AICHE-HAMAE.A.KHELLAF. « *Evolution mensuelle de la ressource éolienne à travers l'Algérie* », congrée sur le photovoltaïque et l'énergie éolienne (IPCWE) Tlemcen, Algérie, Novembre2003.
- [100] A. ABDELLI « *Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive* » thèse de doctorat à l'institut national polytechnique de Toulouse, 2007.
- [101] L.MRED« *contribution à l'étude d'un système d'aérogénérateur à rendement élevé, Application au site de Tlemcen* » Thèse de magister université de Tlemcen, 2001.
- [102] L.MERAD, B. BENYOUCEF et Jean Pierre CHARLES « *Etude technico- économique d'un système hybride (aérogénérateur et moteur diesel) pour la production d'électricité* » Afrique SCIENCE, Vol. 02, no. 2, pp. 187 – 197, 2006.
- [103] M. BELHADJ « *Modélisation d'un système de captage photovoltaïque Autonome* » thèse de magister université de Bechar, 2003.
- [104] RP .Mukund, « *wind and solar power systems* », Ph.D, PeU.S merchant Marine Academy, Kings point ,New York, CRC Press LLC 1999.
- [105] N. OLEKSIY « *simulation, fabrication et analyse de cellule photovoltaïque à contacts arrières interdigites* », thèse de doctorat à l'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2005.
- [106] M. Serge Poignant « *Rapport d'informatique*», déposé en application de l'article 145 du Règlement par la commission des affaires économique sur l'énergie photovoltaïque, assemblée nationale constitution de 4 octobre 1998.
- [107] Le Dossier Environnement de GAZACA « *Les énergies renouvelables (partie II – L'énergie Solaire)*», Mai 2006.
- [108] T. Fogelman, « *système photovoltaïque pour les pays en développement* », manuel d'installation et d'utilisation, agence Française pour la maîtrise de l'énergie, (AFME).
- [109] B. Fellah « *Système hybride photovoltaïque-éolien, de production d'électricité. Application aux sites de Tlemcen et de Bouzeréah* », Thèse de Magistère, Université de Tlemcen, Octobre 2012.
- [110] N. Laverdure, D. Roye, S. Bacha, R. Belhomme, « *Technologie des systèmes éoliens – intégration dans les réseaux électriques* », la Revue 3EI, no. 39, pp. 14-25, 2004.
- [111] « *Programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique* », Ministère de l'énergie et des Mines, mars 2011.
- [112] A. Hachemi « *Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système hybride dédié au pompage* », Thèse de Doctorat, Université de Biskra, Février 2017.
- [113] H. CAMBLONG, « *Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable* », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Arts et Métiers de Bordeaux, Décembre 2003.

- [114] Mahmoud M.M. Ibrik H.I. « *Techno-economic feasibility of energy supply of remote villages in Palestine by PV- systems, diesel generators and electric grid* ». Renewable & Sustainable Energy reviews, Vol. 10, pp. 128-138, 2006.
- [115] RETScreen International, « *Photovoltaic project analysis chapter In Clean energy project analysis: RETScreen engineering and cases textbook* », CANMET Energy Technology Centre – Varennes. Natural Resources, Canada. pp. 22- 23, 35, 2004.
- [116] M. Glavin, « *Optimisation of a Hybrid Energy Storage System for Autonomous Photovoltaic Applications* », W.G. Hurley, thèses, B.E., National University of Ireland, Galway, Ireland, 2012.
- [117] A. Melit, « Contribution à la determination du gisement solaire par traitements de données solaires au sol et d'image météosat », Thèse de doctorat d'etat USTHB, Alger, 2007.
- [118] J. A. Duffie, W. A. Beckman, « *Solar engineering of thermal processes* », John Wiley & sons, Inc. second edition 1991.
- [119] L. Stoyanov, « *Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables* » Thèse, Université Technique de Sofia, Octobre, 2011
- [120] Bechrakis, D. A., & Sparis, P. D, « *Simulation of the Wind Speed at Different Heights Using Artificial Neural Networks* », Wind Engineering, Vol.24, no. 2, pp. 127-136, 2000.
- [121] H. J. Moller, « *Semiconductors for solar cells* », Artech House, Inc. Norwood MA, 1993.
- [122] B. Ai, H. Yang, H. Shen, X. Liao, « *Computer-aided design of PV / wind hybrid system* », Renewable Energy, Vol. 28, pp. 1491–1512, 2003.
- [123] M. Mahmoud, I. Nabhan, « *Determination of optimum tild angle of single and multi rows of photovoltaique arrays for selected site in Jordan* ». solar & Wind energy, Vol. 7, no. 6, pp. 739-745, 1990.
- [124] B. Sorensen, « *Renewable Energy Its physics, engineering, use, environmental impacts, economy and planning aspects* », Elsevier Academic Press, 2004.
- [125] A. Ricaud, « *Modules et systèmes photovoltaïques* », Edition Presses polytechniques et universitaires romandes, Septembre 2008.
- [126] L. Leslie, « *Design and analysis of a grid connected photovoltaic generation system with active filtering function* » Blacksburg, Virginia, Etats-unis, Mars, 2003.
- [127] L.Protin and S. Astier, « *Convertisseurs photovoltaïques* », Techniques de l'ingénieur, D 3360, 1996.
- [128] A. Mahammed « *Etude et optimisation d'un système hybride éolien - photovoltaïque* », Thèse de Magistère, Université de Sétif, Décembre 2014.
- [129] O. Gergaud, « *Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couple au réseau et associé à un accumulateur* », Thèse de Doctorat, Ecole normale supérieure de Cachan, France, Décembre 2002.
- [130] H. Ibrahim, A. Ilinca and I. Perron, « *Investigations des différentes alternatives renouvelables et hybrides pour l'électrification des sites isolés* », Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne LREE-03-Septembre 2008

- [131] M. Salah, I. Abdel-qader, « *Simulation of hybrid power system consisting of wind turbine, PV, storage battery and diesel generator with compensation network : Design, optimization and economic evaluation* », Master thesis, An-Najah National university, Nablus, Palastine, 2008.
- [132] B. S. Borowy and Z. M. Salameh, « *Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and PV array in a wind/PV hybrid system* », IEEE Transation on Energy Conversion, vol. 11, no. 2, pp. 367–375, Juin 1996.
- [133] A. Mirecki, « *Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance* », Thèse de doctorat, INP Toulouse, France, 2005.
- [134] B. S. Borowy and Z. M. Salameh, “ Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and PV array in a wind/PV hybrid system,” IEEE Trans. Energy Conv., vol. 11, no. 2, pp. 367–375, Jun. 1996.
- [135] I. Tzanakis. « *Combining Wind and Solar Energy to Meet Demands in the Built Environment* (thesis report) ». Energy Systems Research Unit. University of Strathclyde, 2006.
- [136] A. Abdelli, « *Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive* » Thèse de doctorat, L’Institut National Polytechnique de Toulouse, Octobre, 2007.
- [137] B.S. Borowy, Z.M. Salameh, « *Optimum Photovoltaic Array Size for a Hybrid Wind/PV System* », IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 9, no. 3, pp. 482-488, Septembre 1994.
- [138] G. T. Samson, T. M. Undeland, O. Ulleberg, & P. J. S. Vie, « *Optimal load sharing strategy in a hybrid power system based on PV/Fuel Cell/ Battery/Supercapacitor.* », International Conference on Clean Electrical Power, Juin 2009.
- [139] F. Díaz-González, A. Sumper, O. Gomis-Bellmunt, & R. Villafáfila-Robles, « *A review of energy storage technologies for wind power applications* », Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, no. 4, pp.2154-2171, 2012.
- [140] F. Rahman, S. Rehman, & M. A. Abdul-Majeed, « *Overview of energy storage systems for storing electricity from renewable energy sources in Saudi Arabia* », Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, no. 1, pp. 274-283, 2012.
- [141] M. Zandi, A. Payman, J. P. Martin, S. Pierfederici, B. Davat, & F. Meibody-Tabar, « *Energy Management of a Fuel Cell/Supercapacitor/Battery Power Source for Electric Vehicular Applications* », IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 60, no. 2, pp. 433-443, 2011.
- [142] [http://www.memoireonline.com/05/12/5865/Etude-et-dimensionnement-d'un système-photovoltaque-autonome-pour-une-alimentation-permanente.html](http://www.memoireonline.com/05/12/5865/Etude-et-dimensionnement-d'un-systeme-photovoltaque-autonome-pour-une-alimentation-permanente.html) (10/05/2017).
- [143] T. C. Henrik Bindner, P. Lundsager, J. F. Manwell, A. Utama, I. Baring-Gould. « *Life time Modelling of Lead Acid Batteries* », risø national laboratory for sustainable energy technical university of denmark, Avril 2005.
- [144] W. Zhou, C. Lou, Z. Li, L. Lu, & H. Yang, « *current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar–wind power generation systems* ». Applied Energy, Vol.87, no. 2, pp. 380-389, 2010.
- [145] S. Piller, M. Perrin, & A. Jossen, « *Methods for state-of-charge determination and their applications* ». Journal of Power Sources, Vol. 96, no. 1, pp.113-120, 2001.

- [146] J. Wang, « *Solar Power System Modeling and Performance Analysis* ». Master thesis, University of Denver. 2011
- [147] C. Darras, S. Sailler, C. Thibault, M. Muselli, P. Poggi, J. C. Hoguet, « *Sizing of photovoltaic system coupled with hydrogen/oxygen storage based on the ORIENTE model* », International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 35, no. 8, pp. 3322- 3332, 2010.
- [148] M. K. Deshmukh, & S. S. Deshmukh, « *Modeling of hybrid renewable energy systems* ». Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 12, no. 1, pp. 235-249, 2008.
- [149] A. Chaurey, & T. C. Kandpal, « *A techno-economic comparison of rural electrification based on solar home systems and PV microgrids* ». Energy Policy, Vol. 38, no. 6, pp. 3118-3129, 2010.
- [150] J. P. Shuo Farrell, D. Jie, & M. Barth, « *Battery state-of-charge estimation* ». American Control Conference, 2001.
- [151] D. J. Deepthi, & V. Ramanarayanan, « *State of charge of lead acid battery* ». India International Conference on Power Electronics, 19-21 Décembre, 2006.
- [152] A. Gupta, R. P. Saini, & M. P. Sharma, « *Modelling of hybrid energy system—Part I : Problem formulation and model development* ». Renewable Energy, Vol. 36, no. 2, pp. 459-465, 2011.
- [153] H. Borhanazad, « *Techno economic analysis of stand-alone hybrid renewable energy system* », Master thesis, faculty of engineering, university of Malaya, 2013.
- [154] H. Said, et al. « *Photovoltaic diesel-generator hybrid power system sizing* ». Renewable Energy, Vol. 13, no. 1, pp.33-40, 1998.
- [155] C. Coleman, « *Hybrid power system operational test results: wind/PV/diesel system documentation* ». 11th International Telecommunications Energy Conference, 15-18 Octobre 1989.
- [156] M. Ashari, C. V. Nayar, & W. W. L. Keerthipala, « *Optimum operation strategy and economic analysis of a photovoltaic-diesel-battery-mains hybrid uninterruptible power supply* ». Renewable Energy, Vol. 22, no. 3, pp. 247-254, 2001.
- [157] O. Skarstein, & K. Uhlen, « *Design considerations with respect to long-term diesel saving in wind/diesel plants* ». Wind Engineering, Vol. 13, no. 2, pp. 72-87, 1989.
- [158] Y. Azoumah, D. Yamegueu, P. Ginies, Y. Coulibaly, & P. Girard, « *Sustainable electricity generation for rural and peri-urban populations of sub-Saharan Africa: The “flexy-energy” concept* ». Energy Policy, Vol. 39, no. 1, pp. 131-141, 2011.
- [159] A. Arnetten, C.W. Zobel « *An optimization model for regional renewable energy development* » Elsevier journal - Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, 2012.
- [160] A. Kashefi Kaviani, G.H. Riahy, SH.M. Kouhsari, « *Optimal design of a reliable hydrogen-based stand-alone wind/PV generating system, considering component outages* », Renewable Energy Vol. 34, 2009.
- [161] V.V. Simakin, A.V. Smirnov, A.V. Tihonov, I.I. Tyuhov, « *Modern system of autonomous power supply with the use of renewable energy sources* », Scientific magazine «Energetik» Vol. 3, 2013.
- [162] A.T.D. Perera, R.A. Attalage, K.K.C.K. Perera, V.P.C. Dassanayake. « *Converting existing Internal Combustion Generator (ICG) systems into HESs in standalone applications* », Energy Conversion and Management, Vol. 74, 2013.

- [163] B. V. Lukutin. « *Renewable energy sources* », Textbook for Universities: Printing house of Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 2008.
- [164] M.A. Surkov, A.M. Pupasov-Maximov « *Application of the Experimental software complex «Power System Simulation» and possibility estimation of large scale zoning of the territory of Russian Federation for optimal system structure with renewable energy sources* » internet-magazine «Naukovedenie» Vol. 3, 2012.
- [165] A.V. Kobelev « *Increase in efficiency of power supply systems with the use of renewable energy sources* », synopsis of dissertation for the Ph.D., Lipeck, 2004
- [166] V.I. Velkin, M.I. Loginov, E.V. Chernobai « *Development of graphical model for choosing the optimal composition of equipment in cluster RES* », Proceedings of X International annual conference on Renewable and small energetics, Moscow, 2013.
- [167] V.V. Telegin « *Optimization of structure and parameters of autonomous energy complexes* », Scientific magazine «Fundamental researchs», Vol. 8, 2013.
- [168] W. Zhou, L. Chengzhi, L. Zhongshi, L. Lin, Y. Hongxing « *Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar–wind power generation systems* », Applied Energy, Vol. 87, 2010.
- [169] R. Baños, F. Manzano-Agugliaro, F. G. Montoya, C. Gil, A. Alcayde, & J. Gómez, « *Optimization methods applied to renewable and sustainable energy, A review* », Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, no. 4, pp. 1753-1766, 2011.
- [170] M. Mohammadi, S. H. Hosseiniyan, & G. B. Gharehpetian, « *GA-based optimal sizing of microgrid and DG units under pool and hybrid electricity markets* », International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 35, no. 1, pp. 83-92, 2012.
- [171] I. P. Panapakidis, D. N. Sarafianos, & M. C. Alexiadis, « *Comparative analysis of different grid-independent hybrid power generation systems for a residential load* », Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, no. 1, pp. 551-563, 2012.
- [172] E. Dursun, & O. Kilic, « *Comparative evaluation of different power management strategies of a stand-alone PV/Wind/PEMFC hybrid power system* », International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 34, no. 1, pp. 81-89, 2012.
- [173] Z. Wissem, K. Gueorgui, & K. Hédi, « *Modeling and technical-economic optimization of an autonomous photovoltaic system* ». Energy, Vol. 37, no. 1, pp. 263-272, 2012.
- [174] W.X. S. « *Optimally sizing of solar array and battery in a standalone photovoltaic system in Malaysia* », Renewable Energy, Vol. 34, no. 1, pp. 348-352, 2009.
- [175] R. Dufo-López, & Bernal-Agustín, J. L. « *Design and control strategies of PV-Diesel systems using genetic algorithms* », Solar Energy, Vol. 79, no. 1, pp. 33-46, 2005.
- [176] M. Khan et M. Iqbal, « *Pre-feasibility study of stand-alone hybrid energy systems for applications in Newfoundland,*» Renewable Energy, vol. 30, n. 16, pp. 835–854, 2005.
- [177] G. Bekele et B. Palm, « *Feasibility study for a standalone solar–wind-based hybrid energy system for application in Ethiopia,*» Applied Energy, vol. 87, n. 12, pp. 487–495, 2010.
- [178] D. Oxana , « *Optimization of Hybrid Power Supply Systems* », master thesis, Czech technical university, Prague 2014.

- [179] M. M. Mahmoud, et I. H. Ibrik, « *Techno-economic feasibility of energy supply of remote villages in Palestine by PV-systems, diesel generators and electric grid* », Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 10, no. 2, pp. 128-138, 2006.
- [180] M. Mladjao, M. Al Anfaf, « Contribution à la modélisation et à l'optimisation de systèmes énergétiques multi-sources et multi-charges », Génie des procédés. Université de Lorraine, 2016.
- [181] C. Peinturier, « *Les déterminants du coût des catastrophes naturelles : le rôle du changement climatique en France* », Commissariat général au développement durable, 2014.
- [182] P. Paccard, « *Réchauffement climatique et ressource neige en domaines skiables* », Collection Edytem, vol. 8, pp. 181-192, 2009.
- [183] CGDD/SOeS, « *Chiffres clés de l'énergie* », Ministère de l'environnement, du développement durable et de l'énergie, France, 2015.
- [184] T. Cherseng, « *Energy management and economics* », the institute of engineers, Singapore and National Environment Agency. April 2016.
- [185] F. Chermat, M. Khemliche, A. Badoud, S. Latreche, « *Techno-Economic Feasibility Study of Investigation of Renewable Energy System for Rural Electrification in South Algeria* », ETASR - Engineering, Technology & Applied Science Research, Vol. 8, no. 5, pp. 3421-3426, 2018.
- [186] HOMER v 2.68. (2013). (*National Renewable Energy Laboratory (NREL)*, USA), from <http://www.nrel.gov/>, dernier access November 2016.
- [187] [https://fr.wikipedia.org/wiki/In\\_Salah](https://fr.wikipedia.org/wiki/In_Salah)
- [188] H. Pouméroulie, « *voyage dans l'Afrique profonde* » collection du monde intime, Edition le plein des sens, notre dame de Londres, ISBN87-90493-26-2.
- [189] Site de la Nasa : <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/retscreen>.
- [190] S. Rehman, I. El-Amin. « *Study of a Standalone Wind and Solar PV Power Systems* ». IEEE International energy conference. 2010
- [191] A.M. Abdilahi, A.H.M. Yatim, M.W. Mustafa, O.T. Khalaf, A.F. Shumran, F.M. Nor, « *Feasibility study of renewable energy-based microgrid system in Somaliland's urban centers* », Renewable & Sustainable Energy Review, Vol. 40, pp. 1048–1059, 2014.
- [192] G.J. Dalton, D.A. Lockington, T.E. Baldock, « *Feasibility analysis of renewable energy supply options for a grid-connected large hotel* », Renewable Energy, Vol. 34, no. 4, pp. 955-964, 2009.
- [193] A.N. Celik. « *Optimisation and techno-economic analysis of autonomous photovoltaic–wind hybrid energy systems in comparison to single photovoltaic and wind systems* ». Energy Conversion and Management, Vol. 43, pp. 2453–2468, 2002.
- [194] D. Saheb-Koussa, M. Koussa et N. Said "A Technical, Economic, and Environmental Performance of Grid-Connected Hybrid (Photovoltaic-Wind) Power System in Algeria", Hindawi Publishing Corporation, The ScientificWorld Journal, Volume 2013, Article ID 123160, 12 pages.
- [195] T. SEBBAGH et A. ZAATRI " OPTIMAL SIZING OF A HYBRID RENEWABLE ENERGY SYSTEM TO FEED A CLINIC IN THE REGION OF TAMANRASSET". Third International Conference on Energy, Materials, Applied Energetics and Pollution. ICEMAEP2016, October 30-31, 2016, Constantine, Algeria.

## الأطروحة: التحسين الاقتصادي لنظام إنتاج الطاقة الكهرومغذية المرتبط بنظام تخزين الطاقة

المؤطر: أ. خمليش مبروك

الاسم: فيصل

اللقب: شرمط

ملخص:

لقد أصبح استخدام الطاقات المتجددة مصدر اهتمام كبير لكل المجتمعات. تكمن أهميتها في الفوائد البيئية والاجتماعية والاقتصادية التي تقدمها مقارنة بالطاقة التقليدية، وخاصة الوقود وبالتالي ، تهتم العديد من البلدان بتطوير قطاعات الطاقة المتجددة وتحاول أيضًا تصميم أنظمة ذات معدل أعلى من المتجددة ، مع إيلاء اهتمام خاص لمسائل الاستقلالية الذاتية، من هنا ، نجد اليوم في السوق ، مجموعة متنوعة واسعة من أنظمة الطاقة المتجددة لكل منها مزايا وعيوب ، مما يجعل اختياره صعبًا لصنع القرار خاصة في مواجهة العديد من الجوانب التقنية والبيئية وهذا هو السبب في أن الهدف من هذا البحث هو اقتراح نهج لصنع القرار متعدد المعايير ومتعدد المصالح من أجل الاختيار الأمثل لنظام الطاقة المتجددة في الواقع المعزولة. يهدف هذا النهج إلى تقديم نهج عالمي يدمج المعايير الكمية والنوعية. كما سيتيح تحليل السيناريوهات التي تأخذ في الاعتبار. تحديد إطار دراستنا، سنركز على أنظمة الرياح / الطاقة الشمسية وأنظمة المشتقة منها. سوف ترتكز الدراسة على أنظمة خارج الموقع لاستخدامها في الواقع المعزولة.

**الكلمات مفتاحية:** الطاقة الضوئية، طاقة الرياح، التحسين الاقتصادي التقني، تكفة الطاقة، غازات الاحتباس الحراري، الجدوى

**Thèse: Optimisation économique d'un système de production d'énergie photovoltaïque associé à un système de stockage d'énergie**

**Nom: CHERMAT**

**Prénom: Faycal**

**Directeur de thèse : KHEMLICHE Mabrouk**

### **Abstract:**

L'utilisation des énergies renouvelables est désormais une préoccupation majeure de toutes les sociétés. Leur pertinence réside dans les avantages environnementaux, sociaux et économiques qu'ils offrent par rapport à l'énergie conventionnelle, en particulier les combustibles fossiles Ainsi, de nombreux pays s'intéressent au développement des secteurs des énergies renouvelables et tentent également de concevoir des systèmes avec un taux d'énergies renouvelables plus élevé, tout en accordant une attention particulière aux questions d'autonomie, fiabilité ... etc. Nous trouvons aujourd'hui sur le marché une grande variété de systèmes d'énergies renouvelables présentant chacun des avantages et des inconvénients, ce qui complique leur choix pour les décideurs, notamment face à la multitude de facteurs techniques, environnementaux et environnementaux. , critères sociaux et économiques ... etc. C'est pourquoi l'objectif de cette recherche est de proposer une approche décisionnelle multicritères et multi-acteurs pour le choix optimal du système d'énergie renouvelable dans des sites isolés. Cette approche vise à présenter une approche globale intégrant à la fois des critères quantitatifs et qualitatifs. Cela permettra également d'analyser des scénarios prenant en compte les parties prenantes impliquées dans le projet. Pour délimiter le cadre de notre étude, nous nous concentrerons sur les systèmes éoliens / solaires et leurs systèmes dérivés. L'étude se concentrera sur les systèmes hors site destinés à être utilisés dans des sites isolés.

**Mots-clés:** énergie photovoltaïque, énergie éolienne, optimisation technico-économique, coût de l'énergie, GHGE, faisabilité

**Thesis: Economic optimization of a photovoltaic energy production system associated with an energy storage system**

**Name: CHERMAT**

**First name: Faycal**

**Directed by: KHEMLICHE Mabrouk**

### **Abstract:**

From now on, the use of renewable energies has become a major concern for every society. Their relevance is in the environmental, social and economic benefits they offer compared to conventional energy, especially fossil fuels. Thus, many countries are interested in the development of energy sectors and are also trying to design systems with a higher ratio of renewable, while paying attention particular to the questions of autonomy, reliability ... etc. From here, we find today on the market, a wide variety of renewable energy systems each having its advantages and disadvantages, which makes their choice difficult for decision-makers especially in the face of the multitude of technical, environmental, social and economic criteria ... etc. This is why the objective of this research is to propose a multi-criteria and multi-stakeholder decision-making approach for the optimal choice of the renewable energy system in isolated sites. This approach aims to present a global approach integrating both quantitative and qualitative criteria. It will also allow the analysis of scenarios that take into consideration the stakeholders involved in the project. To delimit the framework of our study, we will focus on wind / solar systems and their derived systems. The study will focus on off-site systems for use in isolated sites.

**Key words:** photovoltaic energy, wind energy, techno-economic optimization, cost of energy, GHGE, feasibility