

Université Assane Seck de Ziguinchor



U.F.R Sciences et Technologies

Département de physique

Mémoire de Master

Mention : Physique et Applications

Spécialité : Physique de l'Atmosphère et de l'Océan

Etude et modélisation d'un système hybride PV/Eolien/GE : impacts de la température et de la pression

Présenté par : Makhary NIASS

Sous la direction de : Dr. Ababacar NDIAYE

Soutenu publiquement le 24 Mai 2022 devant le jury composé de :

Qualité du jury	Nom et Prénom (s)	Grade	Etablissement
Président	DIATTA Samo	Maître de conférences	UASZ/UFR-ST
Rapporteur	DIATTA Joseph S.	Maître-Assistant	UASZ/UFR-ST
Examineur	MBAYE Mamadou L.	Maître-Assistant	UASZ/UFR-ST
Examineur	THIAME Moustapha	Maître de conférences	UASZ/UFR-ST
Encadrant	NDIAYE Ababacar	Maître de conférences	ESP/UCAD

Année universitaire :2020/2021

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

A mes parents.

*Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont ils ne cessent de me combler.
Que Dieu leur procure une bonne santé et longue vie.*

A mes oncles et tantes

A mon grand frère Abou Diouf

*A mes frères et sœurs que ce travail soit pour eux une satisfaction pour l'espoir qu'il garde en
moi*

A mes amis qui de près ou de loin ont participé à mon réconfort moral

Remerciements

Avant tout, je rends grâce à DIEU, le tout puissant, pour m'avoir donné la santé, le courage et la volonté pour accomplir ce travail de recherche. Le travail présenté dans ce mémoire a été mené au Laboratoire d'Océanographie des Sciences de l'Environnement et du climat (L.O.S.E.C.) de l'université Assane Seck de Ziguinchor. Mais avant de présenter les résultats du travail, permettez-moi de témoigner ici ma très grande reconnaissance à toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Je voudrais aussi, dans un premier temps, remercier vivement mon encadrant M. Ababacar NDIAYE pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

J'associe également à ces remerciements, tous les membres du jury, avec à sa tête Pr Samo Diatta, à Dr Joseph Sambasene Diatta, à Dr Mamadou Lamine Mbaye, à Pr Moustapha Thiame, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'évaluer ce travail.

Je remercie aussi tous les professeurs du département de physique et en particulier ceux intervenant dans ce Master de m'avoir sélectionné et aussi de fournir les outils nécessaires à la réussite de mes études de Master.

Mes remerciements vont aussi à l'endroit de mes camarades de classes (Souleymane Thiam, Ibrahima Thiam Gaye, Massamba Diouf, Issa Ba, Massara Diakhate, Pape Mar Sene, Edouard Badiate Diedhiou, Raoul Sylva, Cheikh Faye) et à tous les doctorants et post-master du L.O.S.E.C pour l'aide précieuse qu'ils m'ont apporté.

Je remercie tous ceux et celles qui m'ont épaulé durant toutes ces années. Sans eux ce mémoire n'aurait pas lieu. Je veux citer mon grand frère Abou Diouf, mes oncles Modou Sow, Amar Kouta et Samba Niass, etc.

Je tenais également à remercier et témoigner ma reconnaissance envers mes chers condisciples du daara Jazbul Mourid et Matlaboul Fawseyini, ces personnes avec lesquelles je me suis forgé davantage dans la pratique culturelle à travers les enseignements de Cheikhoul Khadim et de Mame Cheikh Ibrahima Fall. Je ne vous remercierai jamais assez de ces moments inoubliables.

Un grand merci à ma mère et à mon père, qui m'ont toujours fait confiance dans mes études et m'ont soutenu dans tous les domaines.

Enfin, je voudrais m'excuser auprès de tous ceux que j'aurai oublié dans mes remerciements.

Sommaire

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES SYSTEMES HYBRIDES	3
INTRODUCTION	3
I.1 – CLASSIFICATION	3
I.1.1 – Le régime du fonctionnement.....	3
I.1.2 – La structure du système hybride	3
I.2 – ETUDE DES SYSTEMES HYBRIDES	4
I.2.1 – Critères d’optimisation et logiciel de dimensionnement	4
I.2.1.1 – Critères d’optimisation d’un système hybride	4
I.2.1.2 – Logiciels pour l’étude des systèmes hybrides.....	5
I.2.2 – Etudes des structures de systèmes hybrides	6
I.2.2.1 – Systèmes hybrides sans source conventionnelle.....	6
I.2.2.1.1 - Systèmes hybrides photovoltaïque/stockage.....	6
I.2.2.1.2 – Systèmes hybrides éolien/stockage	6
I.2.2.1.3 – Systèmes hybrides photovoltaïque/éolien/stockage	7
I.2.2.1.4 – Systèmes hybrides photovoltaïque/éolien sans stockage	7
I.2.2.2 – Systèmes hybrides avec source d’énergie conventionnelle	8
I.2.2.2.1 – Systèmes photovoltaïque/source conventionnelle.....	8
I.2.2.2.2 – Systèmes éolien/source conventionnelle	12
I.2.2.2.3 – Systèmes photovoltaïque/éolien/diesel	13
CONCLUSION	13
CHAPITRE II : MODELISATION D’UN SYSTEME HYBRIDE PV/EOLIEN/GE	14
INTRODUCTION	14
II.1 – POTENTIEL ENERGETIQUE.....	14
II.1.1 – Description des données météorologiques	14
II.1.2 – Généralités sur l’énergie éolienne	15
II.1.2.1 – Vitesse et puissance disponibles du vent.....	16
II.1.2.2 – Caractérisation énergétique d’un site éolien.....	18
II.1.2.3 – Modélisation des variations de la vitesse du vent.....	18
II.1.3 – Généralités sur le rayonnement solaire	19
II.1.3.1 – Mesure du rayonnement solaire.....	21
II.1.3.2 – Modélisation du rayonnement solaire sur un plan horizontal.....	22
II.1.3.3 – Modélisation du rayonnement solaire sur un plan incliné.....	24
II.2 – STRUCTURE DU SYSTEME HYBRIDE PV/EOLIEN/GE	25
II.3 – MODELE DES SOUS-SYSTEMES	26
II.3.1 – Modèle du générateur PV	26
II.3.2 – Modèle d’un aérogénérateur.....	27
II.3.3 – Modélisation du groupe électrogène	29
CONCLUSION	29
CHAPITRE III : APPLICATION	30
INTRODUCTION	30
III.1 – ÉVALUATION DES POTENTIELS EOLIEN ET SOLAIRE DU SITE	30

III.1.1 – Etude du potentiel éolien	30
III.1.1.1 – Variation mensuelle, annuelle et interannuelle de la vitesse moyenne du vent	30
III.1.1.2 – Variation des vitesses moyennes horaires	32
III.1.1.3 – Rose des vents	32
III.1.1.4 - Modélisation du vent par la distribution de Weibull	33
III.1.2 – Etude du potentiel solaire.....	35
III.1.2.1 – Variation horaire du rayonnement solaire par site	35
III.1.2.2 – Evaluation du potentiel solaire sur le site.....	36
III.2 – CHOIX D’UN AEROGENERATEUR ADAPTE A CE SITE.....	37
III.2.1 – Caractéristiques des éoliennes utilisées	37
III.2.2 – Facteur de capacité des éoliennes sur le site.....	38
III.2.3 – Etude de la production d’énergie sur le site.....	38
III.3 – CHOIX D’UN GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE.....	39
III.3.1 – Caractéristiques d’un module solaire.....	39
III.3.2 - Etude de Performance du champ photovoltaïque sur ce site	39
III.4 – ANALYSE DE SENSIBILITE DES PARAMETRES ENVIRONNEMENTAUX	40
III.4.1 - Variation de la pression et de la température moyenne mensuelle.....	40
III.4.2 – Influence de la pression atmosphérique	41
III.4.3 – Influence de la température.....	43
CONCLUSION	48
CONCLUSION GENERALE	49
BIBLIOGRAPHIE	51

Liste des figures

FIGURE I. 1: CLASSIFICATION DES SYSTEMES HYBRIDES	4
FIGURE I. 2: SYSTEME HYBRIDE AVEC CONNEXION SERIE	9
FIGURE I. 3: SYSTEME HYBRIDE A COMMUTATION	10
FIGURE I. 4: SYSTEME HYBRIDE A CONNEXION PARALLELE.....	11
FIGURE II. 1: POSITION GEOGRAPHIQUE DE LA STATION METEOROLOGIQUE	15
FIGURE II. 2: TEMPERATURE DES MASSES D'AIR SUR LE GLOBE TERRESTRE	16
FIGURE II. 3: REPARTITION SPECTRALE DU RAYONNEMENT SOLAIRE HORS ATMOSPHERE.....	20
FIGURE II. 4: DIAGRAMME D'UN SYSTEME HYBRIDE EOLIEN-SOLAIRE-GROUPE ELECTROGENE	26
FIGURE III. 1: COURBE DE LA VITESSE MOYENNE MENSUELLE ANNUELLE ET INTERANNUELLE	31
FIGURE III. 2: HISTOGRAMME DE LA VITESSE MOYENNE ANNUELLE.....	31
FIGURE III. 3: VARIATION DES VITESSE MOYENNES HORAIRE 2016-2018	32
FIGURE III. 4: ROSE DES VENTS DU SITE.....	33
FIGURE III. 5: DISTRIBUTION DES FREQUENCES DE LA VITESSE MOYENNE DU VENT	34
FIGURE III. 6: PROFILS DU RAYONNEMENT SOLAIRE A INCLINAISON 15DEGRES SUR CE SITE ...	36
FIGURE III. 7: ENERGIE SOLAIRE MENSUELLE DISPONIBLE : ETUDE COMPARATIVE DES ANNEES 2016 ET 2017	36
FIGURE III. 8: FACTEUR DE CAPACITE SUR LE SITE POUR LES DIFFERENTS TYPES D'EOLIENNE .	38
FIGURE III. 9: ENERGIE PRODUITE MENSUELLE PAR EOLSENEGAL500W/24V	39
FIGURE III. 10: ENERGIE PRODUITE MENSUELLE DU MODULE PV	40
FIGURE III. 11: EVOLUTION DE LA TEMPERATURE EN 2016	41
FIGURE III. 12: EVOLUTION DE LA PRESSION ATMOSPHERIQUE EN 2016.....	41
FIGURE III. 13: COURBE DE PUISSANCE EN FONCTION DE LA PRESSION ATMOSPHERIQUE A UNE VITESSE DU VENT DE 3.54M/S.....	43
FIGURE III. 14: PUISSANCE D'UNE EOLIENNE A DIFFERENTES TEMPERATURES A UNE VITESSE DU VENT DE 3.54M/S.....	44
FIGURE III. 15: PUISSANCE D'UNE EOLIENNE DONNEE A DIFFERENTES TEMPERATURES POUR UNE VITESSE DONNEE	45
FIGURE III. 16: PUISSANCE OPTIMALE D'UNE EOLIENNE A DIFFERENTES TEMPERATURES ET POUR UNE VITESSE DU VENT DONNEE	45
FIGURE III. 17: VARIATION DE LA PUISSANCE MAXIMALE AVEC LA TEMPERATURE POUR UNE VITESSE DE 3.54M/S	47

Liste des Tableaux

TABLEAU II. 1: COORDONNEES GEOGRAPHIQUES DE LA STATION METEOROLOGIQUE	15
TABLEAU III. 1: PARAMETRES DE WEIBULL MENSUELLE 2016 A 2018	35
TABLEAU III. 2: MOYENNE MENSUELLE DE L'ENERGIE SOLAIRE DISPONIBLE	37
TABLEAU III. 3: CARACTERISTIQUES DES EOLIENNES DE PETITES PUISSANCES	37
TABLEAU III. 4: CARACTERISTIQUES D'UN MODULE SOLAIRE	39
TABLEAU III. 5: VALEURS DE LA PUISSANCE EN FONCTION DE LA PRESSION ATMOSPHERIQUE	42
TABLEAU III. 6: VALEURS DE LA PUISSANCE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE	44
TABLEAU III. 7: VALEURS DE PUISSANCE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE POUR UNE VITESSE DE 3,54M/S.....	45
TABLEAU III. 8: TAUX DE VARIATION DE LA PUISSANCE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE POUR UNE VITESSE DE 3,54M/S	47

Liste des abréviations

PV : Photovoltaïque

Wind : éolien

GE : Groupe Electrogène

SH : Système Hybride

SHSER : Système Hybride à Source d'Energie Renouvelable

LOLP : lost of load probability (la probabilité de perte de la charge)

HOMER: Hybrid Optimization Model for Electric Renewables

RAPSIM: Remote Ares Power Supply Simulator

P : puissance disponible

ρ : masse volumique de l'air (kg/m^3)

V : vitesse du vent (m/s)

S : surface traversée par le vent (m^2)

F_i : facteur d'irrégularité

T : temps

I_n : indice de turbulence

σ_v : écart type de la distribution (m/s)

$\langle V \rangle$: vitesse moyenne du vent (m/s)

A : paramètre d'échelle (m/s)

F(V) : fonction de densité de probabilité de Weibull

K : paramètre de forme

P_w : densité de puissance

I : ensoleillement direct sur un plan perpendiculaire

T_L : facteur de Linke

β : facteur de trouble atmosphérique

P_v : pression partielle de vapeur d'eau (Hg)

P_{at} : pression atmosphérique en Pascal

P_{sec} : pression de l'air sec (101222Pa)

hs : hauteur solaire

E_{air} : éclairement direct sur plan horizontal

E_{dif} : éclairement diffus sur un plan horizontal

G : éclairement global sur un plan horizontal

I_i : rayonnement solaire direct pour un plan incliné

D_i : rayonnement solaire diffuse sur un plan incliné

G_i : rayonnement global sur un plan incliné

P_{pv} : puissance photovoltaïque

P_{moy} : puissance moyenne d'une éolienne

C_f : facteur de capacité

E : énergie moyenne produite par un aérogénérateur

P_{og} : puissance produite par le groupe électrogène

Résumé

Ce travail portant sur étude et modélisation d'un système hybride PV/Eolien/GE : impacts de la température et de la pression. Dans cette étude, nous avons utilisé les données de la station météorologique de l'université Assane Seck de Ziguinchor. Le travail réalisé consiste à évaluer le potentiel éolien et solaire du site de Ziguinchor et de modéliser les différents sous systèmes d'énergie. En plus de cela, de voir comment la température et la pression influent sur la production d'énergie du système hybride. Les résultats obtenus montrent que le potentiel éolien et solaire est plus favorable durant les mois d'Avril, Mai et Juin. De plus, en choisissant un type d'éolienne et de PV, on constate qu'il y a une forte production d'énergie éolienne et solaire vers les mois d'Avril, Mai et Juin. Enfin, nous avons étendu notre analyse par l'étude des impacts des paramètres de température et de pression sur l'évolution de la puissance de l'éolienne. On voit que la température réagit d'une façon plus dynamique que la pression, on constate que : la puissance maximale de l'aérogénérateur augmente par 8,14%, si la température diminue de 45 à 20°C et la puissance augmente légèrement avec l'augmentation de la pression.

Mots clés : modélisation, système hybride, impact de la température et de la pression, potentiel éolien et solaire

Abstract

This work on the study and modeling of a hybrid PV / Wind / GE system: impacts of temperature and pressure. In this study, we used data from the weather station of the Assane Seck University of Ziguinchor. The work carried out consists of evaluating the wind and solar potential of the Ziguinchor site and modeling the various energy subsystems. In addition to this, to see how temperature and pressure affect the energy production of the hybrid system. The results obtained show that the wind and solar potential is more favorable during the months of April, May and June. In addition, by choosing a type of wind turbine and PV, we see that there is a strong production of wind and solar energy around the months of April, May and June. Finally, we extended our analysis by studying the impacts of temperature and pressure parameters on the evolution of the power of the wind turbine. We see that the temperature reacts in a more dynamic way than the pressure, we see that: the maximum power of the aerogenerator increases by 8.14%, if the temperature decreases from 45 to 20°C and the power increases slightly with the increase in pressure.

Keywords: modelling, hybrid system, impact of temperature and pressure, wind and solar potential

Introduction générale

La consommation énergétique mondiale n'a cessé de croître au cours de ces dernières décennies. Cette croissance est la conséquence de plusieurs facteurs combinés que sont une augmentation de la population mondiale, un besoin accru de développer de nouvelles industries pour un développement technologique accéléré, etc.

Les prévisions sur l'énergie rapportent que la consommation énergétique totale augmentera de 30% en 2030, comparée à 2011 ; et il est prévu pour cet horizon une dépendance de 82% aux ressources fossiles [1].

L'augmentation sans cesse de la demande en énergie à l'échelle mondiale constitue une contrainte pesante sur la préservation de l'environnement. La satisfaction de cette demande repose en grande partie sur l'utilisation de combustibles fossiles jouant un rôle prépondérant dans le réchauffement climatique et dans la dégradation de la couche d'ozone [2 ;3 ;4]. Cet impact des énergies d'origine fossile sur l'environnement, notamment réchauffement climatique ont été clairement établis depuis la conférence de Kyoto en 1997. De plus, leur exploitation abusive a provoqué l'épuisement progressif de ces sources d'énergie qui deviennent de plus en plus rares. D'où, la nécessité d'envisager de nouveaux modes de production d'énergie pour la satisfaction de la demande mondiale.

Les énergies renouvelables comme l'éolienne, le solaire, l'hydraulique, la biomasse, etc. sont disponibles et inépuisables. Elles peuvent être utilisées pour la production d'électricité dans plusieurs régions du monde diversifiant ainsi les sources d'énergie électrique et contribuant également à la réduction des émissions de gaz à effet de serre [5]. Cela va permettre un développement de ces régions n'ayant pas accès à l'électricité en créant des activités génératrices de revenus.

De nos jours, après l'hydraulique, les énergies éolienne et solaire sont considérées comme des sources d'énergies prometteuses en raison de leur disponibilité dans la plupart des régions du monde [6]. Il s'y ajoute que ces sources d'énergie sont devenues compétitives en termes de coûts de production et contribuent à la réduction des rejets de gaz à effet de serre.

En effet, l'exploitation des énergies éolienne et solaire pour la production d'électricité est en croissance depuis la crise pétrolière de 1970 [6]. Cependant, la vitesse du vent et le rayonnement solaire ont un caractère aléatoire et imprévisible. Elles dépendent des conditions météorologiques et de changement climatique. En outre, la fluctuation du rayonnement solaire et de la vitesse du vent n'est pas toujours adaptée à la variation des profils de la demande

d'électricité [7] ; d'où, la nécessité de faire une estimation précise de leurs potentiels. Un dimensionnement des systèmes de sources renouvelables adaptées et une gestion intelligente de la consommation de l'énergie produite afin de réduire les composants du système et l'excès d'énergie est également primordial.

Dans plusieurs régions isolées n'ayant pas accès au réseau traditionnel, l'énergie électrique est généralement fournie par des générateurs diesel. Dans la plupart des cas, la satisfaction de la demande énergétique à l'aide de carburant diesel est coûteuse et a des effets négatifs sur l'environnement. Ainsi, le système hybride photovoltaïque-éolien (PV-Wind) peut devenir compétitif face à l'utilisation de générateurs diesel [8].

L'apport envisagé sur ce travail de mémoire est d'évaluer le potentiel éolien et solaire du site de Ziguinchor, ensuite de modéliser les différents sous-systèmes de source d'énergie sur Matlab et enfin de faire une analyse de sensibilité des différents paramètres sur la production éolienne. Ce document est divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre fait une présentation en détails de la classification des systèmes hybrides en marquant le pas sur chacun de ces systèmes. Enfin faire état de l'état de l'art des différentes structures qui existent.

Le deuxième chapitre fait le point sur l'étude et la modélisation des potentiels éolien et solaire du site Ziguinchor d'une part, d'autre part la modélisation des différents sous-systèmes.

Enfin dans le dernier chapitre, nous allons présenter les résultats de quelques modèles mathématiques du deuxième chapitre. D'abord, nous évaluons les potentiels éolien et solaire du site de Ziguinchor. Ensuite, nous allons faire le choix des composants. Enfin, nous simulons la variation du modèle de puissance mécanique en fonction des paramètres météorologiques considérés.

Chapitre I : Généralités sur les systèmes hybrides

Introduction

Le problème avec la puissance variable et non garantie produite par les sources d'énergie renouvelables, peut être résolu par un couplage des sources d'approvisionnement et la formation d'un système dit hybride (SH). Un système hybride à sources d'énergie renouvelables (SHSER) est un système électrique, comprenant plus d'une source d'énergie, parmi lesquelles une au moins est renouvelable. Dans ce chapitre nous présentons en détail la classification des systèmes hybrides, ensuite nous allons faire une étude de ces systèmes c'est-à-dire présenter leurs critères d'optimisation et les logiciels de dimensionnement et enfin faire l'état de l'art des différentes structures qui existent.

I.1 – Classification

Plusieurs classifications de systèmes hybrides sont réalisées selon le critère choisi. Les plus répandues sont présentées dans la suite :

I.1.1 – Le régime du fonctionnement

Les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux groupes. Dans le premier groupe, on trouve les systèmes hybrides, travaillant en parallèle avec le réseau électrique, appelés aussi connectés réseau. Ces systèmes permettent de satisfaire la charge électrique du pays. Les systèmes hybrides du deuxième groupe fonctionnent en régime isolé ou en mode autonome. Ils doivent répondre aux besoins des consommateurs situés dans des sites éloignés du réseau électrique : refuges de montagne, îles, villages isolés, panneaux de signalisation routière etc.

I.1.2 – La structure du 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 complet – une centrale tout entière.
- Un second critère possible est la présence ou non d'un dispositif de stockage. La présence d'éléments de stockage permet d'assurer une meilleure satisfaction des charges électriques pendant les périodes d'absence d'une ressource primaire. Les dispositifs de stockage peuvent être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène, des volants d'inertie, etc.

- La dernière classification possible est celle relative au type de sources d'énergies renouvelables utilisées. La structure du système peut contenir un système photovoltaïque ou éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique (centrales hydroélectrique ou utilisation des vagues) ou une combinaison de ces sources. Un critère important pour la sélection de la source utilisée est le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit d'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.

La figure I.1 présente une généralisation de la classification.

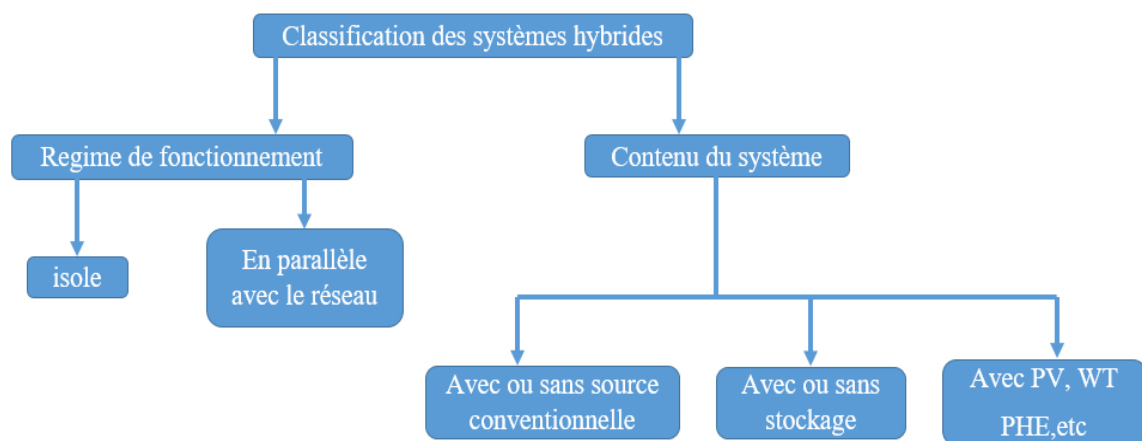


Figure I. 1: Classification des systèmes hybrides

I.2 – Etude des systèmes hybrides

De nombreux critères permettent de faire la diversité des études sur les systèmes hybrides disponibles. Une synthèse non exhaustive des études réalisées sur ces systèmes est présentée dans ce paragraphe.

I.2.1 – Critères d'optimisation et logiciel de dimensionnement

I.2.1.1 – Critères d'optimisation d'un système hybride

Différents critères sont utilisés pour optimiser un système en fonction du site d'installation.

Les critères les plus fréquemment utilisés sont :

- **La probabilité de perte de la charge** (lost of load probability) ou **la probabilité de perte d'approvisionnement** (loss of power supply probability) : ces deux critères

sont univoques et rendent compte du rapport d'énergie non satisfait et d'énergie totale consommée sur la période d'étude choisie. En général, le calcul de ce paramètre est réalisé en utilisant l'équation (I.1).

$$LOLP = \frac{\sum_{i=1}^m (E_{load,i} - E_{prod,i})}{\sum_{i=1}^m E_{load,i}} \quad (I.1)$$

où $E_{load,i}$ est l'énergie demandée par le consommateur pour la période i , $E_{prod,i}$ est l'énergie produite, et m est le nombre de périodes pour lesquelles la recherche est réalisée.

- **Le coût d'énergie produite** - Diverses approches sont utilisées pour le calcul du coût : il dépend de l'énergie demandée par le consommateur, du coût d'investissement initial pour l'achat des composants du système, du coût de leur installation, du coût de maintenance et de remplacement (pour les éléments qui ont une vie d'exploitation plus courte que celle de l'élément qui définit la vie d'exploitation du système hybride) etc.

I.2.1.2 – Logiciels pour l'étude des systèmes hybrides

Il existe plusieurs logiciels de dimensionnement parmi lesquels les plus connus sont :

- Hybrid2 : ce logiciel est destiné à l'étude de différents systèmes hybrides avec divers éléments. Il dispose d'outils pour effectuer une analyse économique. La présentation des résultats peut être réalisée de deux manières – des résultats synthétisés ou des résultats détaillés avec variation dans le temps ;
- HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables) : avec ce logiciel, il est possible de modéliser des systèmes hybrides qui travaillent en parallèle avec le réseau électrique ou en régime autonome. Il dispose de modèles de générateurs conventionnels et à sources d'énergies renouvelables. De plus, le logiciel contient des algorithmes d'optimisation à l'aide desquels il est possible de choisir le meilleur système hybride ;
- RAPSIM (Remote Area Power Supply Simulator) : c'est un logiciel de simulation pour différents modes d'un approvisionnement en courant alternatif. Il peut être utilisé pour le dimensionnement d'installations photovoltaïques, de générateurs éoliens et diesel dans des systèmes hybrides isolés.

De plus, il faut signaler que l'utilisation de ces logiciels a des inconvénients puisqu'ils limitent les modifications de l'utilisateur et empêchent une analyse approfondie des systèmes hybrides à cause du code protégé.

I.2.2 – Etudes des structures de systèmes hybrides

I.2.2.1 – Systèmes hybrides sans source conventionnelle

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

I.2.2.1.1 - Systèmes hybrides photovoltaïque/stockage

L’installation photovoltaïque doit être raccordée avec une autre source d’énergie pour qu’il soit possible de satisfaire la charge durant la nuit ou par temps nuageux. Ces systèmes alimentent soit des maisons [9,10], soit des villages [11]. Certains travaux traitent de la modélisation et de l’analyse à d’autres de dimensionnement optimisé des composants du système [9,13]. Le critère d’optimisation le plus souvent utilisé est la probabilité de perte d’alimentation [14,13]. La stratégie de gestion de l’énergie a été étudiée par [15] et [13]. Des algorithmes pour le suivi du point de puissance maximale ont été développés à partir de la logique floue par [16]. La production photovoltaïque d’hydrogène est également étudiée par électrolyseur par [17] et pour différentes technologies par [18]. Le stockage est parfois idéal [9], un banc de batteries [9,13,11], un électrolyseur avec réservoir d’hydrogène [19,16] ou une combinaison de deux dispositifs de stockage différents comme électrolyseur et batteries [10] ou électrolyseur et super condensateurs [15]. L’utilisation de super condensateurs est un concept très récent ; ils sont utilisés pour un stockage très court terme 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 [20]. [9] étudie un système hybride alimentant un ensemble d’habitations en parallèle avec le réseau électrique. Il surmonte ainsi les surtensions en bout de lignes électriques et les manques d’alimentation lors des coupures du réseau. Différents logiciels ont été utilisés dans les études : Matlab [10,15,16] et ESRA [14].

I.2.2.1.2 – Systèmes hybrides éolien/stockage

L’interconnexion du dispositif de stockage avec un générateur éolien peut avoir deux objectifs possibles : soit un rôle de tampon lorsque le système fonctionne en parallèle avec le réseau électrique, le dispositif permet alors de lisser les variations rapides de la puissance électrique en provenance de l’éolienne [21], soit un rôle de stockage à plus long terme, en régime autonome pour permettre l’alimentation du consommateur lors de périodes de faible vitesse du vent [22,23]. Les recherches se distinguent aussi par l’intervalle de temps considéré. Dans le

cas d'étude de processus à variation lente, les auteurs [26,21] s'intéressent à l'énergie obtenue par chacune des sources. D'autres études sont réalisées sur les processus de courte durée [27,28]. Comme pour les autres systèmes précédemment présentés, ils peuvent alimenter soit un ménage [29], soit un bâtiment (hôtel) [30] et même un village [21]. Les modes de stockage étudiés peuvent être une batterie [21], un électrolyseur avec réservoir d'hydrogène [25,32], une combinaison des deux [22], un stockage par air comprimé [24], des aimants supraconducteurs [28] 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 ([23] ; [25]). Sur le plan économique, certains auteurs se contentent de donner les prix des divers organes du système ([24] ; [25]), d'autres approfondissent l'analyse économique en calculant le prix de kilowattheure produit ([30]; [21]). L'analyse du comportement du système hybride peut être réalisée à partir d'algorithmes de programmation dynamique [26] ou de logiciels commerciaux comme Matlab ([30] ; [27] et [28]) ou SIMNON [29].

I.2.2.1.3 – Systèmes hybrides photovoltaïque/éolien/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 désavantages 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 de kilowattheure produit. Ces inconvénients peuvent être limités ou même éliminés par l'incorporation d'une seconde source d'énergie [31,32,33]. La plupart des travaux concerne l'optimisation de la configuration du système hybride selon divers critères : probabilité minimale de perte de charge ([34] ; [35] ; [36] ; [37]), coût minimal du kilowattheure produit [33], ou combinaison de ces deux critères ([38] ; [31]) ; [39] combine plusieurs critères d'optimisation tels que minimisation de la probabilité de manque d'alimentation, de l'énergie produite non utilisée et du coût du kilowattheure produit. Les procédures d'optimisation utilisent soit des algorithmes génétiques [40], soit des méthodes heuristiques [38] ou de surfaces [36] ou encore des logiciels commerciaux tels que HOMER [41,42], Hybrid 2 [42], Matlab [37], PSCAD/EMTDC [43] et ARENA v10 [36] ou v12 [38].

I.2.2.1.4 – Systèmes hybrides photovoltaïque/éolien sans stockage

Ce type de système hybride s'utilisent très rarement, 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 [44] utilisé dans un but éducatif en Northern Iowa, Etats-Unis ; un projet de système hybride pour le réseau électrique d'une île Croate [45] ; une estimation des performances [46]. [45] se basent sur l'hypothèse d'une complémentarité des énergies du vent et soleil. De cette façon, le système fournira toujours de la puissance dans le réseau électrique insulaire. Son argumentation est d'ordre économique. L'étude théorique de [46] utilise la convolution probabiliste.

I.2.2.2 – Systèmes hybrides avec source d'énergie conventionnelle

I.2.2.2.1 – Systèmes 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'Arabie saoudite [47], le Maroc [48], les Maldives [49], la Corse [50] etc., où le potentiel solaire est important. L'objectif de ces systèmes lorsqu'ils travaillent en mode autonome, est d'alimenter sans interruption une maison [50], un bâtiment de logements [47] ou administratif [51]. D'autres systèmes alimentent des centres de recherches [52] qui sont également connectés au réseau électrique [49]. Les systèmes autonomes contiennent souvent des batteries ou d'autres dispositifs de stockage. Les batteries et le champ photovoltaïque produisent du courant continu. Par contre, les moteurs diesel peuvent entraîner des générateurs continus ou alternatifs. Le plus souvent les consommateurs demandent du courant alternatif ; on distingue alors différentes structures de systèmes selon le type de la machine électrique couplée avec le moteur diesel. Ces structures ont été décrites et classifiées selon le type de flux énergétiques par [53]. Chaque configuration, ses avantages et inconvénients sont présentés maintenant.

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 photovoltaïque 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 I.2. Dans cette configuration, le générateur diesel peut alimenter la charge à travers les convertisseurs électroniques ou charger les batteries. 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.

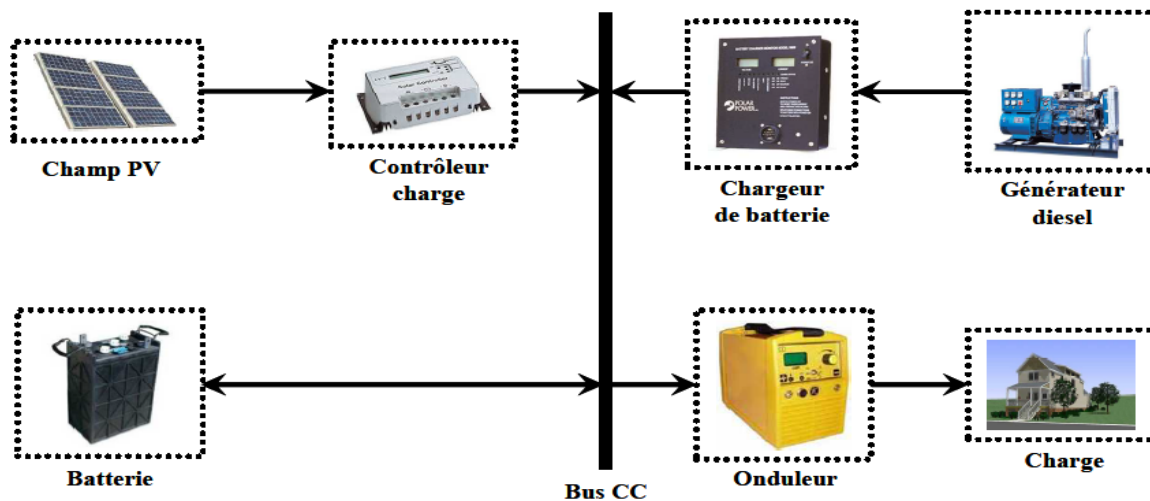


Figure I. 2: Système hybride avec connexion série [52]

Les avantages de cette structure de système sont :

- Un dimensionnement facile du générateur diesel ;
- Un schéma électrique simplifié à cause d'une absence de commutation des sources d'énergie en courant alternatif ;
- La 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.

Les inconvénients sont :

- L'onduleur ne peut pas travailler en parallèle avec le générateur diesel. C'est pourquoi il doit être dimensionné de manière à ce qu'il puisse couvrir la charge maximale possible
- La batterie doit avoir une grande capacité ;
- Un 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
- Une avarie éventuelle de l'onduleur provoque une coupure totale de l'alimentation électrique.

Des systèmes de ce type ont été étudiés par différents auteurs [52,50,54].

La deuxième configuration possible est à commutation. Elle est souvent utilisée malgré quelques désavantages. Le consommateur peut être alimenté soit par la source conventionnelle, soit par l'installation photovoltaïque 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 I.3.

Les avantages de cette configuration sont :

- Le système possède un rendement plus haut, parce que le générateur diesel peut alimenter directement la charge, d'où une baisse de la consommation de fuel ;
- L'onduleur peut assurer au consommateur la tension demandée en forme et valeur ;
- Une 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.

Les inconvénients sont :

- L'apparition d'une coupure instantanée de l'alimentation lors de la commutation des sources ;
- Le générateur et l'onduleur doivent être dimensionnés pour la consommation maximale du système. De cette façon, ils fonctionnent avec un moindre rendement lors les périodes de faible charge ;
- Une construction complexe.

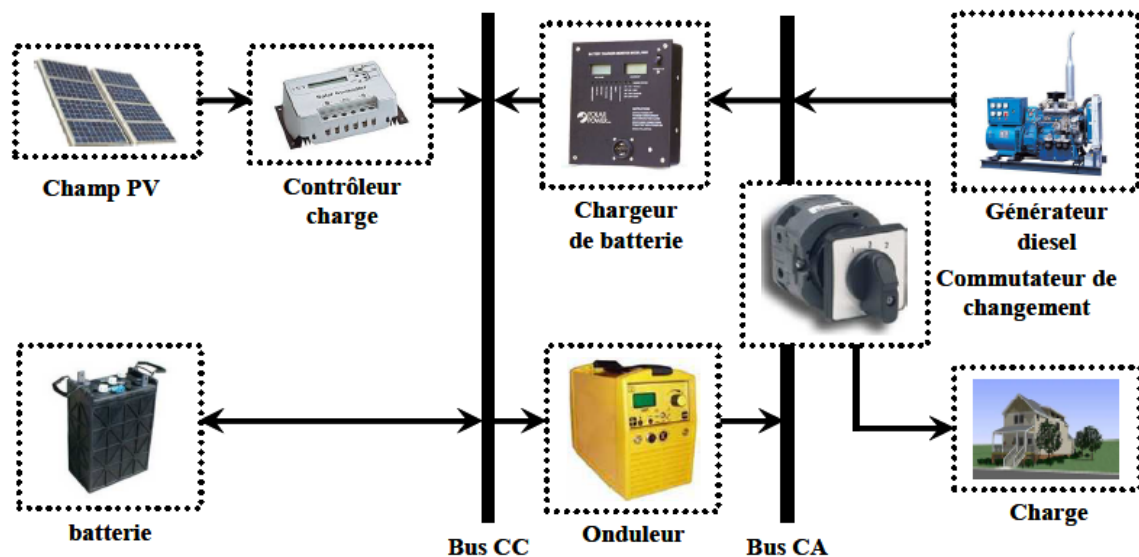


Figure I. 3: Système hybride à commutation [48].

Un tel système fut étudié par [48].

La dernière configuration d'un système hybride photovoltaïque/source conventionnelle est à connexion parallèle. Ici le générateur diesel est interconnecté sur le bus de courant alternatif.

L'installation photovoltaïque 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 (ou une part d'elle) est satisfaite 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 I.4.

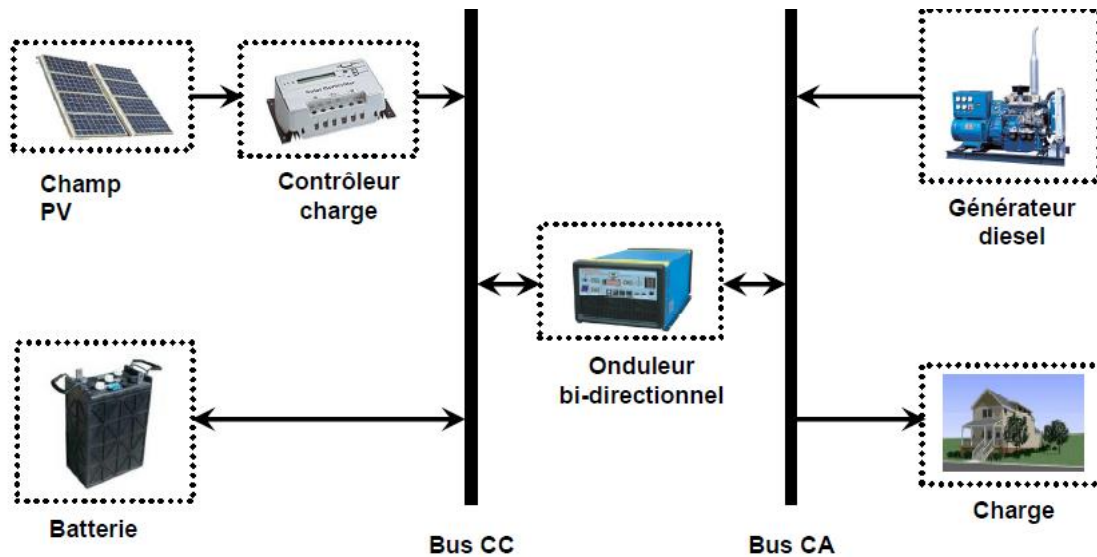


Figure I. 4: Système hybride a connexion parallèle [54]

Les avantages de cette configuration sont :

- 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 ;
- Diminution du nombre des convertisseurs électroniques, ce qui diminue le câblage nécessaire et l'investissement initial pour la construction du système hybride ;
- Une avarie du convertisseur électronique ne provoque pas de coupure de l'alimentation de la charge.

Les inconvénients de la configuration sont :

- Le contrôle automatique est obligatoire pour le fonctionnement correct du système ;

- Le convertisseur électronique doit fournir une tension sinusoïdale pour que la synchronisation avec le générateur diesel soit possible ;
- Les batteries vieillissent rapidement (pas de chargeur) ;
- Le bus continu est plus difficile à contrôler.

Des systèmes hybrides avec une telle structure ont été étudiés [54], [55], [51], [47]. Les publications consacrées aux systèmes hybrides photovoltaïques/sources conventionnelles présentent des résultats issus de systèmes existants et installés [52,48], d'autres examinent la possibilité d'implantation de panneaux photovoltaïques comme source d'énergie supplémentaire dans des installations existantes avec une source conventionnelle [51,56]. Des auteurs ont réalisé des études théoriques sur l'analyse des processus qui prennent place au sein du système [47,55], sur l'optimisation du dimensionnement du système hybride [50] ou sur celle de la stratégie de gestion de l'énergie. Certains travaux ont fait appel à des logiciels commerciaux comme HOMER [49], Hybrid2 [54] et LabView [50].

La plupart des publications sur ces systèmes suppose que la source conventionnelle d'énergie est un générateur diesel.

I.2.2.2.2 – Systèmes éolien/source conventionnelle

Les recherches sur les systèmes hybrides éolien/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 [57], en passant par des îles moyennes comme la Corse [58], jusqu'au grandes îles comme l'Angleterre [59]. Certaines publications concernent des systèmes hybrides existants et présentent des résultats de mesures [59]. On peut citer également des travaux sur les aspects politiques des systèmes hybrides ([60] ; [61]), sur l'analyse des flux d'énergie ([62] ; [63]) ou sur l'optimisation de sa structure ([64] ; [65] ; [54]). Les charges, alimentées par le système hybride, sont de différents types : des habitations isolées [54], des bâtiments de logements des bâtiments publics, des villages ou même des îles. Dans ces cas, le système hybride fonctionne en régime autonome.

Des logiciels connus ont été parfois utilisés comme EnergyPLAN et TRNSYS [66]. D'autres auteurs ont développé des codes informatiques spécifiques pour des procédures d'optimisation en utilisant soit des calculs multi variant [58], soit une programmation linéaire [65] ou dynamique [64], soit des algorithmes heuristiques [65].

I.2.2.2.3 – Systèmes photovoltaïque/éolien/diesel

La mise en place d'un tel système a pour objectif de diversifier les sources d'énergies renouvelables. On recherche ainsi une diminution plus significative de la quantité de fuel 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 [67] ou vers la conception de nouveaux systèmes [68]. D'autres auteurs optimisent la configuration du système selon divers critères : probabilité de perte de charges [69], combinaison d'un coût minimal du système et d'une quantité minimale d'émissions nuisibles [70] auxquels s'ajoutent la charge non satisfaite minimale [71]. Pour trouver le système optimal on utilise des algorithmes de Pareto [70], des algorithmes génétiques et évolutifs [71] ou de la logique floue [69]. Ces systèmes alimentent des maisons, 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 ([68] ; [70]), de réservoirs d'hydrogène avec électrolyseur et piles à combustible ou d'une combinaison des deux [71]. [72] développant ainsi une stratégie optimale de gestion du dispositif de stockage. Les logiciels commerciaux de simulation disponibles sont : HOMER [70], Hybrid2 et SOMES [68].

Conclusion

Ce chapitre est consacré aux généralités sur des systèmes hybrides. Dans ce chapitre, nous avons présenté en détails la classification des systèmes hybrides dans un premier temps. Ensuite, dans la deuxième partie, nous avons fait une étude de ces systèmes. Enfin, les études des différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergies renouvelables sont réalisées sur la base de divers modèles en fonction de l'objectif recherché. Ces modèles ont en commun l'utilisation de données météorologiques comme variables d'entrées. Sur la base de l'étude bibliographique réalisée, on constate que les systèmes hybrides éolien/photovoltaïque ont été peu étudiés particulièrement et ils sont appliqués à un réseau électrique en complément de sources conventionnelles.

Chapitre II : Modélisation d'un système hybride PV/Eolien/GE

Introduction

Les ressources d'énergies renouvelables (vent et solaire) possèdent un caractère aléatoire. La détermination des potentiels éolien et solaire nécessite donc de recourir à des campagnes de mesure durant une année au moins. Ce chapitre est consacré à la présentation de l'état de l'art sur l'étude et la modélisation des potentiels éolien et solaire d'un site d'une part, d'autre part la modélisation des différents sous-systèmes. Dans la première partie, nous mettons en exergue les paramètres permettant d'évaluer le potentiel, telles que les caractéristiques moyennes. La deuxième partie est consacrée à la présentation de la modélisation des différents sous-systèmes.

II.1 – Potentiel énergétique

II.1.1 – Description des données météorologiques

Les données météorologiques utilisées pour nos études sont :

- L'irradiation solaire globale sur un plan horizontal (G , W/m^2) ;
- La vitesse de vent à une hauteur de 10 m (V_{10} , m/s) ;
- La direction du vent à 10m (D , degrés) ;
- La température ambiante (T_a , °C) ;
- La pression atmosphérique (P_{at} , Pa).

Il a été montré dans des études précédentes que pour réaliser une étude correcte des systèmes utilisant des sources d'énergie renouvelable, il convenait d'une part d'avoir des données météorologiques mesurées sur une durée longue (au moins une année) pour que l'étude puisse être statistiquement réaliste et d'autre part qu'elles aient été obtenues avec un pas de temps suffisamment fin afin que puissent être pris en compte les différents déphasages entre les sources mais également entre la production et la consommation.

Les données utilisées ici ont été mesurées par la station de l'Université Assane Seck de Ziguinchor sur une durée de trois années avec un pas de temps d'une heure. L'altitude, la latitude et longitude géographiques de la station météorologique sont présentés dans Tableau II.1.

La Figure II.1 présente la région de Ziguinchor qui se trouve dans la partie sud-ouest du Sénégal, située au Nord par la République de Gambie, au Sud par la République de Guinée

Bissau, à l'Est par les régions de Kolda et Bignona et à l'Ouest par l'Océan Atlantique. Elle couvre une superficie de 7 339Km² soit 3,73% du territoire national.

Tableau II. 1: Coordonnées géographiques de la station météorologique

Région	Station	Longitude °O	Latitude °N	Altitude (m)	Période
Ziguinchor	UASZ	16.23	12.46	30	2016-2018

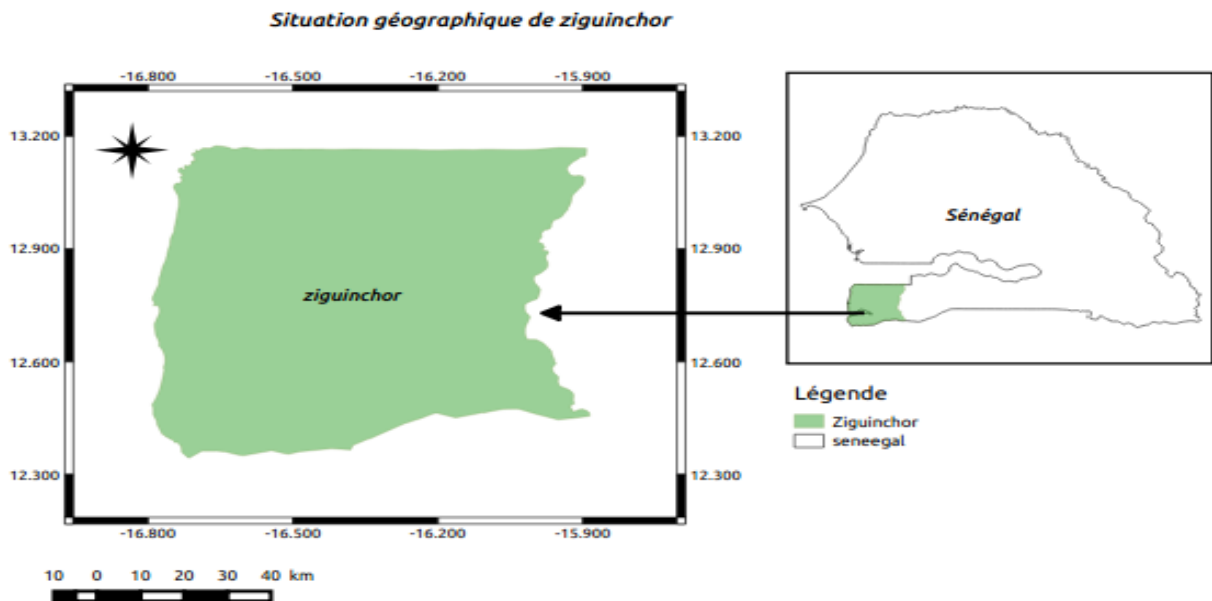


Figure II. 1: Position géographique de la station météorologique

II.1.2 – Généralités sur l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une conséquence indirecte de l'énergie solaire. Le soleil chauffe de manière hétérogène la surface de la terre, produisant également des différences de pression dans l'atmosphère, entraînant alors le déplacement des masses d'air. De ce fait, l'énergie éolienne est présente quasiment dans la totalité de la planète, mais son intensité et sa régularité restent différentes d'un lieu à un autre. La figure II.2 illustre la différence de température sur le globe terrestre. Les lieux en rouge et jaune représentent des régions dont la température est plus élevée.

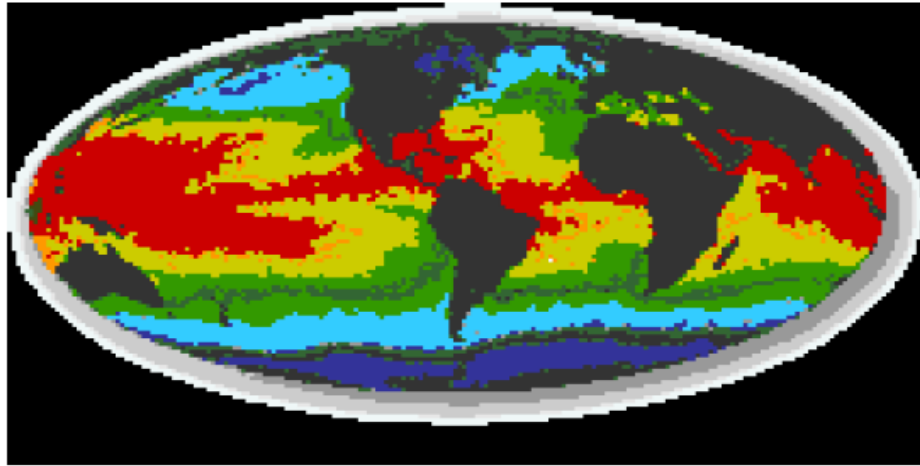


Figure II. 2: Température des masses d'air sur le globe terrestre

II.1.2.1 – Vitesse et puissance disponibles du vent

La puissance P disponible à travers une surface balayée par les pâles d'une éolienne de section S perpendiculaire à l'écoulement du vent de vitesse V correspond au flux de l'énergie par unité de temps [73], elle est donnée par la formule suivante :

$$P = \frac{1}{2} \rho V^3 S \quad (\text{II.1})$$

ρ est la masse volumique de l'air donnée en (kg/m^3). Elle est égale à $1,225 \text{ kg}/\text{m}^3$ au niveau de la mer. V est la vitesse du vent, elle est donnée en (m/s), S est la surface traversée par le vent (m^2).

D'après la relation (II.1), si la masse volumique de l'air est constante, la puissance disponible du vent est une fonction du cube de la vitesse V et de la surface S balayée par les pâles de l'éolienne. Dans la pratique, la masse volumique de l'air varie légèrement avec la température et la pression.

A partir de la relation (II.1) on déduit la puissance moyenne disponible en (W) [79] :

$$\langle P \rangle = \frac{1}{2} \rho \langle V^3 \rangle S \quad (\text{II.2})$$

En multipliant cette relation par le nombre d'heures dans l'année (8760 h), il est possible de calculer l'énergie éolienne disponible sur une année exprimée en (Wh) [73]. Le calcul de la vitesse moyenne du vent nécessite la connaissance de la fréquence relative de chaque vitesse $f(V)$ appelée fonction de densité de probabilité. En connaissant cette fonction, la vitesse moyenne du vent peut être donnée par la formule suivante [73] :

$$\langle V \rangle = \int_0^{\infty} V \cdot f(V) \cdot dV \quad (\text{II.3})$$

La moyenne du cube de la vitesse est donnée par la formule :

$$\langle V^3 \rangle = \int_0^{\infty} V^3 \cdot f(V^3) \cdot dV \quad (\text{II.4})$$

Dans la pratique on assimile $f(V^3) = f(V)$ et on définit un facteur d'irrégularité par l'expression suivante.

$$F_i = \frac{\langle V^3 \rangle}{\langle V \rangle^3} \quad (\text{II.5})$$

Si la fonction de distribution du vent n'est pas connue, et que l'on ne dispose que de la valeur instantanée $V(t)$ ($0 < t < T$) pendant l'intervalle de temps T , les valeurs moyennes obtenues en (II.3) et (II.4) sont équivalentes à :

$$\langle V \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) \cdot dt \quad (\text{II.6})$$

$$\langle V^3 \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T [V(t)]^3 \cdot dt \quad (\text{II.7})$$

T est la période sur laquelle est moyennée la vitesse.

La fluctuation de la vitesse du vent autour de la vitesse moyenne peut être estimée à partir de l'écart type de la distribution V qui s'écrit :

$$\sigma_v^2 = \frac{1}{T} \int_0^T [V(t) - \langle V \rangle]^2 \cdot dt \quad (\text{II.8})$$

On définit également un indice de turbulence qui exprime les fluctuations de la vitesse du vent par rapport au vent régulier. Il est donné par le rapport suivant :

$$I_n = \frac{\sigma_v}{\langle V \rangle} \quad (\text{II.9})$$

σ_v est l'écart type de la distribution (m/s)

$\langle V \rangle$ est la vitesse moyenne du vent (m/s)

L'indice de turbulence est une fonction croissante avec la rugosité et décroissante avec la hauteur au-dessus du sol. Ce facteur qui dépend de la répartition de la vitesse est généralement

compris entre 1,5 et 3. Il permet de calculer une valeur approchée de la puissance moyenne disponible à partir de la vitesse moyenne du vent [73].

II.1.2.2 – Caractérisation énergétique d'un site éolien

L'évaluation et l'exploitation des ressources en énergie éolienne présente une difficulté majeure, contrairement aux réserves fossiles. La puissance disponible du vent varie avec la saison et l'heure du jour. Elle est aussi influencée par la topologie du site. Le choix optimal d'une installation d'énergies renouvelables nécessite en général une étude diversifiée et fine qui commence par le choix du site. Les cartes des vents fournies par les services de la météorologie donnent une bonne idée des endroits favorables à l'exploitation des énergies éoliennes.

Pour bien caractériser les ressources en énergie éolienne, il y a lieu de distinguer l'énergie éolienne disponible qui est l'énergie qui pourrait être transformée par une éolienne et l'énergie récupérable qui dépend des caractéristiques du système de conversion utilisé. Pour les éoliennes, BETZ a montré que cette énergie ne peut dépasser 16/27 de l'énergie disponible dans le vent. L'estimation de l'énergie du vent se fait en utilisant des vitesses collectées sur le site ou modélisées à partir des modèles théoriques, comme par exemple, la fonction de Weibull. Dans les deux cas, la période d'étude doit être assez longue pour bien caractériser le site et permettre l'établissement des courbes caractéristiques du site [74]. Les courbes généralement utilisées sont :

- La courbe de variation des vitesses moyennes mensuelles,
- La courbe de variation des vitesses moyennes horaires,
- La courbe de distribution des vitesses,
- La rose de vent.

II.1.2.3 – Modélisation des variations de la vitesse du vent

Les variations de la vitesse du vent peuvent être modélisées en utilisant la distribution de Weibull. Cette distribution est un cas particulier de la distribution de gamma généralisée. Elle a été utilisée, tout d'abord, pour le calcul des contraintes exercées par le vent par Davenport en 1963 [75], c'est en 1974 que Justus utilise une distribution de Weibull à deux paramètres pour l'étude de l'énergie éolienne. La fonction de densité de probabilité de Weibull s'écrit [75] ; [74] :

$$f(V) = \frac{K}{A} \left(\frac{V}{A}\right)^{K-1} \exp \left[- \left(\frac{V}{A}\right)^K \right] \quad (\text{II.10})$$

V est la vitesse du vent (m/s), A est un paramètre d'échelle (m/s) et proportionnel à la vitesse moyenne de vent, K est le paramètre de forme, il exprime la dissymétrie de la distribution de la vitesse du vent (sans dimension).

Une fois connue la valeur de la vitesse moyenne du vent $\langle V \rangle$ et de la variance σ_v^2 correspondantes on peut déduire les paramètres de Weibull A et K à partir des équations suivantes :

$$K = \left(\frac{\sigma_v^2}{\langle V \rangle} \right)^{1,086} \quad (\text{II.11})$$

Avec $1 < K < 10$

$$A = \frac{\langle V \rangle}{\tau \left(1 + \frac{1}{K} \right)} \quad (\text{II.12})$$

La formule standard de la fonction gamma est donnée par l'expression suivante :

$$\tau(r') = \int_0^{+\infty} e^{-u} \cdot u^{r'-1} \cdot du \quad (\text{II.13})$$

Les deux paramètres de Weibull permettent de calculer la densité de puissance en utilisant le modèle mathématique suivant [76] :

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A^3 \cdot \tau \left(1 + \frac{1}{K} \right) \quad (\text{II.14})$$

La forme de la fonction de densité de probabilité de Weibull est très variable avec le facteur de forme K et le paramètre d'échelle A.

II.1.3 – Généralités sur le rayonnement solaire

Le soleil, situé à 150.106 kilomètres de la terre [77], émet un rayonnement électromagnétique appelé rayonnement solaire qui est approximativement celui qu'émettrait un corps noir à la température 6000°K. Le rayonnement solaire couvre un domaine très étendu de longueurs d'onde qu'on appelle spectre solaire, allant de 10^{-4} micromètres (μm) jusqu'à 10^6 centimètres (cm).

Ce spectre comporte trois parties principales subdivisées en zones [78] :

- Ultraviolet (UV) de longueurs d'onde comprises entre 0 μm et 0,4 μm .
- Visible de longueurs d'onde comprises entre 0,4 μm et 0,75 μm .
- Infrarouge de longueurs d'onde comprises entre 0,75 μm et 24 μm .

L'énergie solaire nous provient dans la gamme des courtes longueurs d'onde, c'est-à-dire, des longueurs d'onde inférieures à 4 μm (98%), (voir figure II.3). L'énergie solaire reste donc très faible dans l'infrarouge. C'est pourquoi le rayonnement solaire porte encore le nom de « flux onde courte ».

Cependant l'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à un éclairement moyen de 1,37 kW/m², à plus ou moins 3 %, selon que la terre s'éloigne ou se rapproche du soleil dans sa rotation autour de celui-ci [77]. L'atmosphère en absorbant toutefois une partie de sorte que l'éclairement atteignant la surface terrestre dépasse rarement 1,2 kW/m². La rotation et l'inclinaison de la terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison. Enfin, les nuages, le brouillard, les particules atmosphériques et divers autres phénomènes météorologiques causent des variations horaires et quotidiennes qui tantôt augmentent, tantôt diminuent le rayonnement solaire et le rendent diffus. La figure II.3 illustre la répartition spectrale du rayonnement solaire hors atmosphère [77].

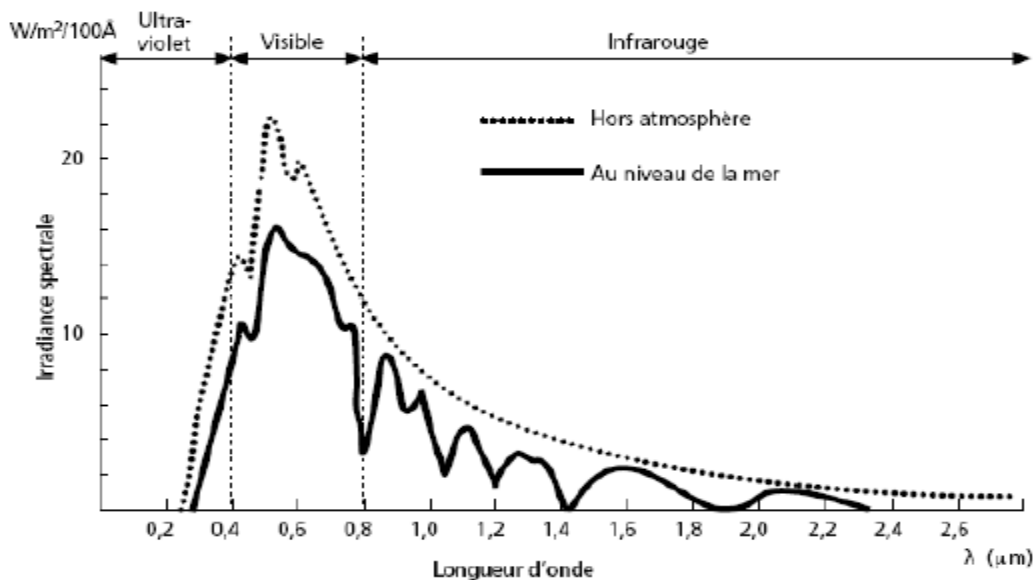


Figure II. 3: Répartition spectrale du rayonnement solaire hors atmosphère

L'exploitation du rayonnement solaire comme source d'énergie pose donc un problème bien particulier. En effet, le rayonnement solaire n'est pas toujours disponible. En outre, on ne peut l'emmagasiner ni le transporter. Le concepteur d'un système qui emploie le rayonnement

solaire comme source d'énergie doit alors déterminer la quantité d'énergie solaire à l'endroit visé et le moment où cette énergie est disponible.

L'intensité du rayonnement solaire est très variable suivant :

- La localisation géographique du site (spécialement par rapport à sa latitude),
- La saison,
- L'heure dans la journée,
- Les conditions météorologiques (nébulosité, poussière, humidité...).

II.1.3.1 – Mesure du rayonnement solaire

L'ensoleillement correspond à l'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan à un moment donné. Il s'exprime habituellement en Watt par mètre carré (W/m²). L'ensoleillement varie de zéro, au lever et au coucher du soleil à sa valeur maximale, typiquement au midi solaire. L'ensoleillement peut également exprimer la quantité d'énergie solaire captée sur un plan pendant un intervalle déterminé. Il s'exprime habituellement en kilowattheure par mètre carré par jour (kWh/m²/d), ou en « heure de soleil maximum », pour l'intervalle déterminé, une journée ou une heure. Les valeurs quotidiennes d'ensoleillement sont habituellement présentées sous forme de moyennes mensuelles pour différentes latitudes et inclinaisons à des endroits précis (afin de rendre compte de l'effet de conditions météorologiques différentes).

Le rayonnement solaire nous arrive au sol sous deux formes :

- Rayonnement direct issu du disque solaire. On le mesure en le faisant arriver perpendiculairement à la surface du capteur.
- Rayonnement solaire diffus, provenant de toute la voûte céleste après diffusion par les constituants de l'atmosphère.

La somme du rayonnement direct et diffus définit le rayonnement global sur une surface plane (souvent horizontale).

La meilleure façon d'évaluer le potentiel solaire sur un site donné est d'effectuer une campagne de mesures de deux composantes du rayonnement solaire sur une période assez longue. Il existe plusieurs types de capteurs permettant de mesurer le rayonnement solaire.

Dans certains cas on peut utiliser l'insolation pour déterminer l'énergie solaire disponible sur un site donné.

II.1.3.2 – Modélisation du rayonnement solaire sur un plan horizontal

Si on ne dispose pas des mesures, comme dans beaucoup de régions du monde notamment en Afrique, on peut estimer l'ensoleillement direct sur un plan perpendiculaire au rayonnement solaire en utilisant l'expression suivante [51] :

$$I = 1370. \exp \left[- \frac{T_L}{0,9+9,4.\sin(hs)} \right] \quad (\text{II.15})$$

Où, T_L est le facteur de trouble de Linke compris entre 2 et 6 et peut être donné par l'équation suivante :

$$T_L = 2,4 + 14,6. \beta + 0,4. (1 + 2. \beta). \ln(P_v) \quad (\text{II.16})$$

β est le facteur de trouble atmosphérique qui prend les valeurs suivantes selon le site :

$\beta = 0,05$ en zone rurale

$\beta = 0,1$ en zone urbaine

$\beta = 0,2$ en zone industrielle ou polluée

P_v est la pression partielle de vapeur d'eau exprimée en mm Hg calculée par l'équation suivante

$$: P_v = \frac{760}{101325} (P_{at} - P_{sec}) \quad (\text{II.17})$$

Avec P_{at} la pression atmosphérique en Pascal et P_{sec} la pression de l'air sec égale à 101222 Pa

hs est la hauteur solaire calculée par l'équation suivante :

$$\sin(hs) = \sin(\Psi) . \sin(\delta) + \cos(\Psi) . \cos(\delta) . \cos(\omega) \quad (\text{II.18})$$

Ψ est la latitude du lieu (°)

δ est la déclinaison solaire donnée par l'équation II.19

$$\delta = 23,45. \sin \left[\frac{360}{365} (284 + j) \right] \quad (\text{II.19})$$

ω est l'angle horaire donné par l'équation :

$$\omega = 15(T_s - 12) \quad (\text{II.20})$$

T_s est le temps solaire vrai égal à 12 h lorsque le soleil est à son zénith, qui peut être donné par l'équation II.21 :

$$T_s = T_u + \frac{\phi}{15} + \frac{E_t}{60} \quad (\text{II.21})$$

Avec T_u le temps universel en (h), ϕ la longitude du lieu ($^\circ$), E_t la correction de l'équation de temps due à la variation de la vitesse de la terre sur sa trajectoire autour du soleil et peut être donnée par l'expression suivante [57] :

$$E_t = 4. (R - C) \quad (\text{II.22})$$

Avec

$$R = 2,466. \sin(2L_v) - 0,053. \sin(4L_v) \quad (\text{II.23})$$

$$L_v = 280 + C + 0,9856. j \quad (\text{II.24})$$

$$C = 1,914. \sin(M_o) + 0,02. \sin(M_o) \quad (\text{II.25})$$

$$M_o = 357 + 0,9856. j \quad (\text{II.26})$$

Où, j est le numéro du jour calendaire : j égal 1 le 1er janvier et j égal 32 le 1er février. Au lever du soleil, l'angle horaire peut être calculé par l'expression II.27 :

$$\omega = \arccos(-tg(\psi). tg(\delta)) \quad (\text{II.27})$$

Le temps solaire vrai et le temps universel au lever du soleil sont donc calculés à partir des expressions II.28 et II.29 :

$$T_{sl} = 12 - \frac{\omega}{15} \quad (\text{II.28})$$

$$T_{ul} = T_{sl} - \frac{\phi}{15} - \frac{E_t}{60} \quad (\text{II.29})$$

Au passage du soleil au plan méridien du lieu le temps solaire vrai T_{sm} est égal à 12 h. En utilisant cette valeur, on peut calculer le temps universel par :

$$T_{um} = T_{sm} - \frac{\phi}{15} - \frac{E_t}{60} \quad (\text{II.30})$$

Le temps solaire et le temps universel au coucher du soleil sont donnés par les équations suivantes :

$$T_{sc} = 12 + \frac{\omega}{15} \quad (\text{II.31})$$

$$T_{uc} = T_{sc} - \frac{\phi}{15} - \frac{E_t}{60} \quad (\text{II.32})$$

La durée du jour D peut être obtenue de deux façons :

- La différence entre le temps solaire au lever et au coucher du soleil,
- La différence entre le temps universel au lever et au coucher du soleil. L'équation II.33 donne la durée du jour.

$$D = T_{uc} - T_{ul} = T_{sc} - T_{sl} = 2 \cdot \frac{\omega}{15} \quad (\text{II.33})$$

❖ Eclairage direct sur un plan horizontal

L'éclairage direct sur un plan horizontal est donné par l'équation II.34 :

$$E_{dir} = I \cdot \sin(hs) \quad (\text{II.34})$$

❖ Eclairage diffus sur un plan horizontal

Le rayonnement diffus est calculé par l'équation suivante :

$$E_{dif} = 54,8 \sqrt{\sin(hs)} \cdot (T_L - 0,5 - \sqrt{\sin(hs)}) \quad (\text{II.35})$$

❖ Eclairage global sur un plan horizontal

L'éclairage global sur un plan horizontal est la somme des éclairages diffus et directe, il est donné par l'équation II.36 :

$$G = E_{dir} + E_{dif} \quad (\text{II.36})$$

II.1.3.3 – Modélisation du rayonnement solaire sur un plan incliné

❖ Composante directe sur un plan incliné

Pour un azimut $b=0$ le rayonnement solaire direct peut être donné par l'équation II.37 (pour un plan incliné avec une inclinaison in) :

$$I_i = I \cdot \sin(hs + in) \quad (\text{II.37})$$

Pour un plan incliné sur l'horizontal, d'orientation quelconque ($b \neq 0$) dans ce cas le rayonnement solaire direct est donné par :

$$I_i = I[\sin(hs) \cdot \cos(in) + \cos(hs) \cdot \cos(b) \cdot \sin(in)] \quad (\text{II.38})$$

Pour un plan vertical d'orientation quelconque dont la normale au plan fait un angle ε avec le plan méridien du lieu, l'équation du rayonnement direct est donnée par :

$$I_i = I \cdot \cos(hs) \cdot \cos(\varepsilon - b) \quad (\text{II.39})$$

Si le plan est d'inclinaison quelconque et d'orientation quelconque le rayonnement solaire direct est donné par :

$$I_i = I \cdot [\sin(hs) \cdot \cos(in) + \cos(hs) \cdot \cos(\varepsilon - b) \cdot \sin(in)] \quad (\text{II.40})$$

❖ Composante diffuse sur un plan incliné

La composante diffuse sur un plan d'inclinaison quelconque peut être donnée par l'équation suivante, quel que soit l'orientation du plan.

$$D_i = \frac{1 + \cos(in)}{2} \cdot E_{dif} \quad (\text{II.41})$$

❖ Composante globale sur un plan incliné

La composante globale pour un plan incliné orienté plein sud peut être donnée par l'équation suivante :

$$G_i = I_i + D_i \quad (\text{II.42})$$

II.2 – Structure du système hybride PV/Eolien/GE

Le schéma synoptique du système hybride éolien-solaire-groupe électrogène destiné à l'électrification rurale est indiqué par la figure II.4.

Il comprend :

- Un générateur photovoltaïque (PV)
- Un aérogénérateur
- Un groupe électrogène de secours.

L'énergie produite par le générateur PV et l'aérogénérateur est utilisée pour alimenter la charge, le surplus est envoyé dans la batterie pour y être stockée. La batterie prend le relai de couverture de la charge lorsque l'énergie produite par les deux générateurs n'est pas suffisante. Lorsque

l'énergie produite par les deux générateurs (éolien et solaire) et la batterie n'est pas suffisante, le groupe électrogène alimente le profil de charge. Il sert également à charger la batterie.

Afin d'évaluer la performance globale d'un tel système hybride, il est d'abord important d'étudier le modèle de chaque composant.

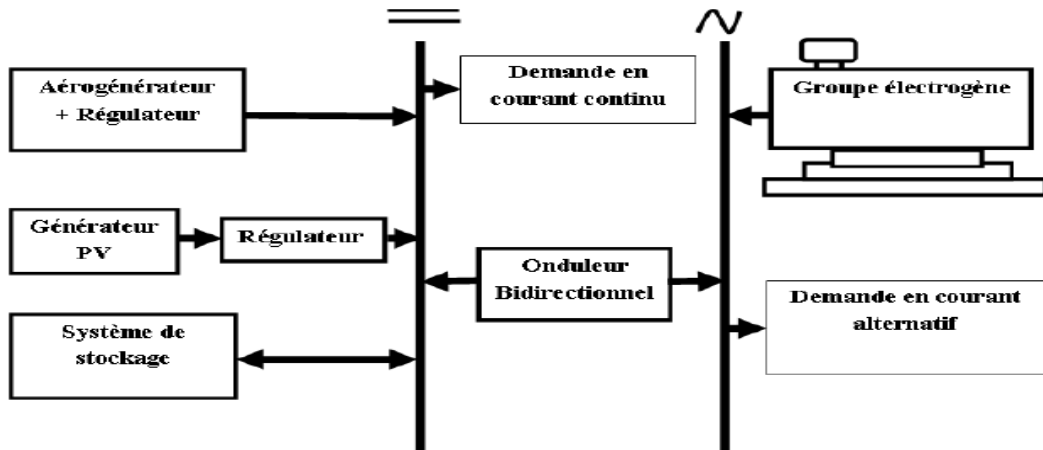


Figure II. 4: Diagramme d'un système hybride éolien-solaire-groupe électrogène

II.3 – Modèle des sous-systèmes

II.3.1 – Modèle du générateur PV

La connaissance du modèle de performance de module solaire PV est essentielle car elle permet d'estimer l'énergie produite. De plus, ce modèle intervient dans le dimensionnement et dans l'optimisation du système hybride. A ce titre, plusieurs travaux ont été effectués pour évaluer les performances de quelques modèles proposés.

[79] ; [80] ont utilisé un modèle de performance d'un module solaire PV dépendant du rayonnement solaire, de la température et des coefficients de performances du module solaire photovoltaïque. Ce modèle présente l'avantage de prendre en considération la variation horaire du rayonnement solaire et de la température, ce qui permet d'évaluer la performance horaire des modules solaire PV. L'équation II.43 donne l'expression du modèle utilisé dans le cadre de ce travail.

$$P_{pv} = V_{co} \cdot I_{cs} \cdot FF \quad (II.43)$$

Où

$$I_{cs}(t) = [I_{cst} + K_i \cdot (T_c(t) - 25)] \cdot \frac{G(t)}{1000} \quad (II.44)$$

$$V_{co}(t) = V_{cost} - K_v \cdot T_c(t) \quad (\text{II.45})$$

$$T_c(t) = T_a(t) + \left(\frac{NCOT-20}{800} \right) \cdot G(t) \quad (\text{II.46})$$

Où

P_{pv} (W) est la puissance maximale à la sortie du générateur photovoltaïque ;

I_{cs} (A) est le courant de court-circuit ;

V_{co} (V) est la tension de circuit ouvert ;

T_c (°C) est la température de la cellule ;

$NCOT$ (°C) est la température nominale de fonctionnement des cellules ;

I_{cst} (A) et V_{cost} (V) sont respectivement le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert standards ;

K_i (A/°C) et K_v (V/°C) sont les coefficients de température de courant de court-circuit et de tension de circuit ouvert ;

G (W/m²) est le rayonnement solaire mesuré ;

t (h) est l'instant de la valeur calculée ;

FF (sans unité) est le facteur de forme du module solaire PV

II.3.2 – Modèle d'un aérogénérateur

Le vent fait partie des paramètres métrologiques les plus variables dans le temps et dans l'espace, il représente ainsi un paramètre complexe. Son exploitation à l'aide d'aérogénérateurs pour la production d'électricité nécessite d'abord une bonne connaissance de sa variation spatio-temporelle. Cependant, il faut noter que les aérogénérateurs sont disponibles en plusieurs tailles : petites, moyennes et grandes puissances (BWE, 2006). Chaque aérogénérateur est caractérisé par sa propre courbe de puissance et possède ses propres caractéristiques.

Le choix d'un type d'aérogénérateurs à installer sur un site va dépendre, donc, non seulement des caractéristiques des aérogénérateurs généralement fournis par les constructeurs ; mais également des données de vent disponible pour ce site fournis sous forme de grandeurs moyennes ou grandeurs statistiques (moyenne annuelle, mensuelle, journalière et/ou horaire).

[81] a proposé un modèle de simulation simplifié permettant de calculer la puissance à la sortie de l'aérogénérateur. Ils ont considéré que la puissance produite varie linéairement en fonction de la vitesse du vent. Ce modèle est un cas particulier du modèle proposé par [82] en fixant le paramètre de forme de Weibull (k) à la valeur 1.

Le modèle proposé par [82] permet, en effet, de calculer la puissance produite par un aérogénérateur en tenant compte du facteur de forme de Weibull (k) calculé sur le site et de la variation instantanée de la vitesse de vent. Ce modèle est donné par l'équation II.47.

$$P_{moy} = P_n \left\{ \frac{\exp\left[-\left(\frac{V_d}{A}\right)^k\right] - \exp\left[-\left(\frac{V_n}{A}\right)^k\right]}{\left(\frac{V_n}{A}\right)^k - \left(\frac{V_d}{A}\right)^k} - \exp\left[-\left(\frac{V_c}{A}\right)^k\right] \right\} \quad (\text{II.47})$$

Ce modèle est aussi utilisé dans le cadre de ce travail pour calculer la puissance à la sortie d'un aérogénérateur.

$$P_w = \begin{cases} P_n \cdot \left(\frac{V^k - V_d^k}{V_n^k - V_d^k} \right) & \text{si } V_d < V < V_n \\ P_n & \text{si } V_n < V < V_c \\ 0 & \text{si } V \leq V_c \text{ ou } V \geq V_c \end{cases} \quad (\text{II.48})$$

V_d ; V_n et V_c sont les vitesses de démarrage, nominale et de coupure de l'aérogénérateur.

Nous avons aussi effectué une étude de choix d'aérogénérateurs adaptés à un site donné pour une application isolée ou à injecter dans le réseau.

Les aérogénérateurs disponibles sur le marché peuvent ne pas être adaptés aux potentiels du site d'étude. Pour cette raison, il est important de proposer une méthodologie permettant de faire le choix d'un aérogénérateur adapté au potentiel disponible afin de récupérer le maximum d'énergie. Ce choix va dépendre également du type d'application : aérogénérateurs à connecter à un réseau ou aérogénérateurs pour une application autonome.

Les facteurs capacité et énergie produite peuvent être utilisés comme des critères de choix pour une application autonome (isolé). L'aérogénérateur qui a le facteur de capacité le plus élevé est le plus adapté pour ces types d'applications.

Le facteur de capacité, appelé aussi le facteur d'utilisation, représente le rapport entre la puissance moyenne produite et la puissance nominale de l'aérogénérateur.

$$C_f = \frac{P_{moy}}{P_n} \quad (\text{II.49})$$

L'énergie moyenne produite par un aérogénérateur peut, donc, être exprimée par l'équation (II.50).

$$E = P_{moy} \cdot T \quad (II.50)$$

T représente le nombre d'heures dans l'année. Elle est estimée à 8760 h pour une période d'une année.

II.3.3 – Modélisation du groupe électrogène

Le groupe électrogène est l'élément permettant d'apporter l'énergie nécessaire lorsque l'énergie produite par les sources éolienne, solaire et la batterie ne parvient pas à couvrir la charge. L'utilisation du groupe électrogène dans un système hybride éolien-solaire peut rendre la configuration du système hybride plus économique. Cependant, il présente comme inconvénient un impact néfaste sur l'environnement. En effet l'utilisation du groupe électrogène implique le dégagement de gaz à effet de serre notamment le CO₂ qui est la cause principale du changement climatique.

P_{og} (W) est la puissance produite par les groupes électrogènes donnée par l'expression II-51.

$$P_{og} = P_{ng} \cdot N_{gr} \cdot \eta_g \quad (II.51)$$

Où

N_{gr} est le nombre total des groupes électrogènes ;

P_{ng} (W) est la puissance nominale du groupe électrogène ;

η_g est le pourcentage de la puissance produite par groupe électrogène. Le modèle est conçu de sorte que le groupe électrogène peut fonctionner entre 30 % et 100 % de sa puissance nominale.

Conclusion

Ce chapitre est consacré à la présentation de la modélisation d'un système hybride PV/Eolien/Diesel. En première partie, nous avons étudié la modélisation du potentiel énergétique (solaire et éolien) du site. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons étudiés les différents modèles des sous-systèmes. L'application de cette méthodologie de modélisation d'un système hybride PV/Eolien/Diesel dans notre site d'étude fera l'objet du chapitre III.

Chapitre III : Application

Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats de quelques modèles mathématiques du deuxième chapitre. Pour cela, nous avons implémenté dans l'environnement MATLAB le modèle complet de la puissance en fonction des paramètres météorologiques (vitesse du vent, pression atmosphérique, température ambiante et humidité relative). Les résultats obtenus ont permis d'analyser la production en fonction des paramètres météorologiques de l'atmosphère.

En premier lieu, nous évaluons les potentiels éolien et solaire du site de Ziguinchor. Ensuite, nous allons faire le choix des composants. Enfin, nous allons simuler la variation du modèle de puissance mécanique en fonctions des paramètres météorologiques considérés.

III.1 – Evaluation des potentiels éolien et solaire du site

III.1.1 – Etude du potentiel éolien

Cette étude porte sur la détermination du calcul de la vitesse moyenne du vent de la station météorologique de l'université Assane Seck de Ziguinchor.

III.1.1.1 – Variations mensuelle, annuelle et interannuelle de la vitesse moyenne du vent

Le traitement des données nous a permis d'abord, de calculer les vitesses moyennes mensuelles, annuelles et interannuelles. De présenter ensuite, leur courbe d'évolution. Les résultats de la comparaison entre les moyennes mensuelles sur la période de trois ans et les moyennes mensuelles de chaque année sont présentés sur les figures III.1 et III.2 pour le site de Ziguinchor.

La figure III.1 montre les variations de la vitesse du vent sur une période de 3 ans (2016 à 2018). Chaque année présente les mêmes variations avec un écart maximal de 22% constaté pour le mois de Janvier de 2016. Les maximums des vitesses moyennes mensuelles, annuelles et interannuelles sont observés pour les mois d'Avril et Juin pour l'année 2016 et pour les mois de Février et Mai pour les années 2017 et 2018. On peut dire que le potentiel éolien est plus important durant ces mois. On constate que le mois le plus défavorable sur la période de mesure pour ce site est le mois de Novembre (2.64m/s). On remarque aussi que l'année la plus favorable est 2018 avec une vitesse moyenne de 3,68 m/s, tandis que l'année la plus défavorable est 2016 où la vitesse moyenne ne dépasse pas 3.35 m/s comme le montre la figure III.2.

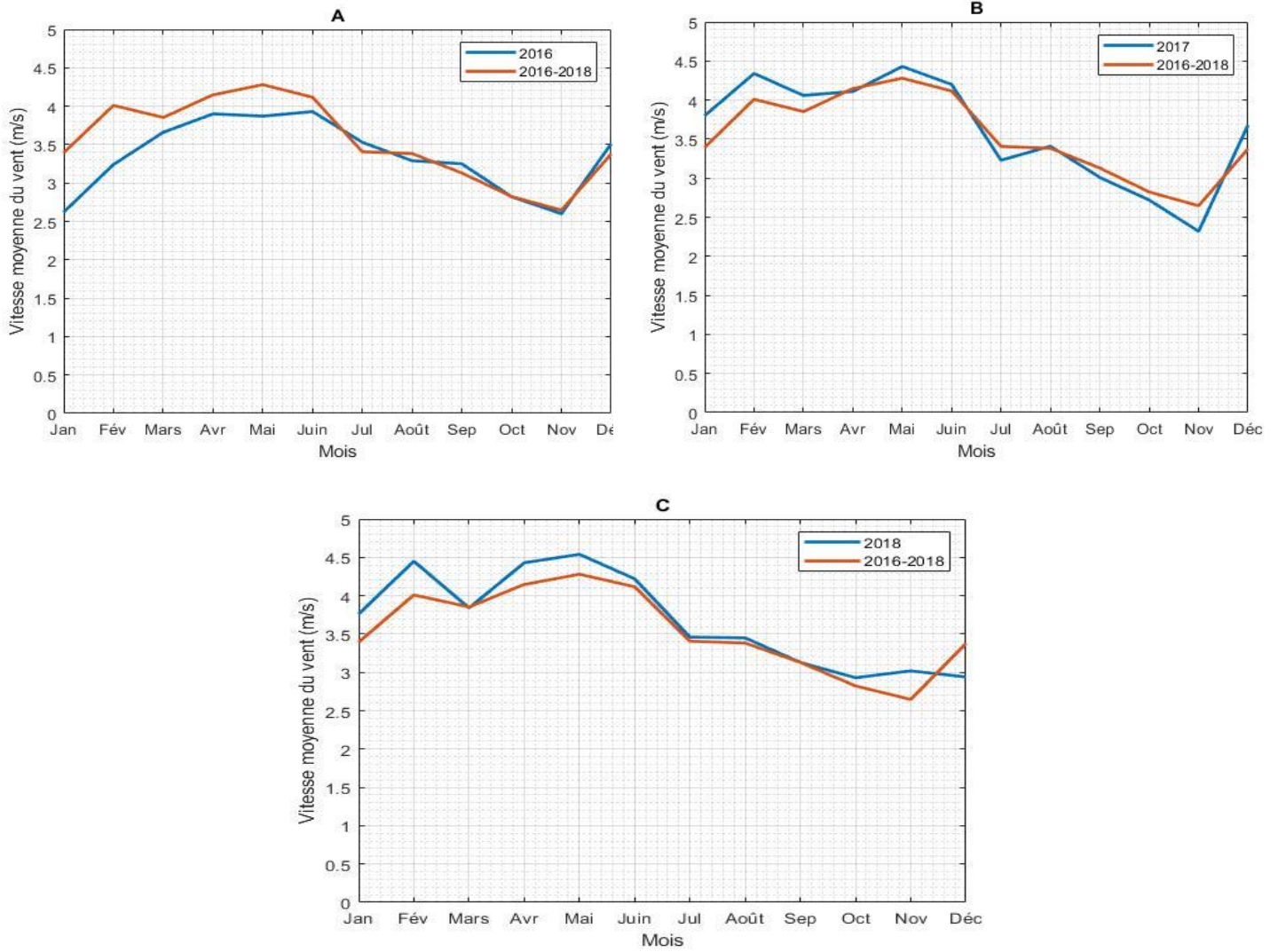


Figure III. 1: Evolution de la vitesse moyenne mensuelle annuelle et interannuelle

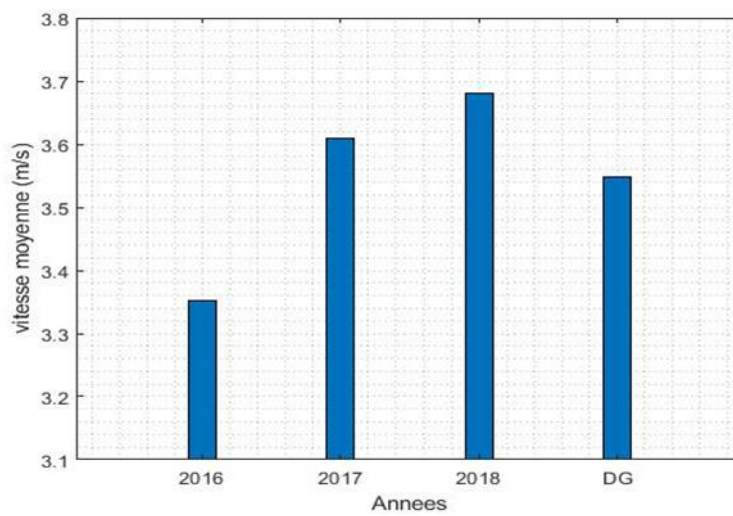


Figure III. 2: Histogramme de la vitesse moyenne annuelle

III.1.1.2 – Variation des vitesses moyennes horaires

La figure III.3 montre la variation horaire de la vitesse moyenne du vent sur le site. L'étude de cette variation horaire du vent a montré l'existence de deux périodes : une période de vent fort durant la journée et une période de vent faible durant la nuit. Ces deux périodes correspondent à la brise de mer et à la brise de terre respectivement.

Cela s'explique par le fait qu'en cours de la journée, la terre se réchauffe plus rapidement que la mer, ce qui provoque un soulèvement de l'air chaud qui s'étend ensuite vers la mer. Ainsi, une dépression se crée près de la surface de la terre, attirant l'air froid provenant de la mer. On parle alors d'une brise de mer.

Pendant la nuit, le vent commence à souffler dans le sens inverse (brise de terre). En général, la vitesse de cette brise de terre est moins forte que celle de la brise de mer, étant donné que la différence de température entre la terre et la mer est moins importante la nuit.

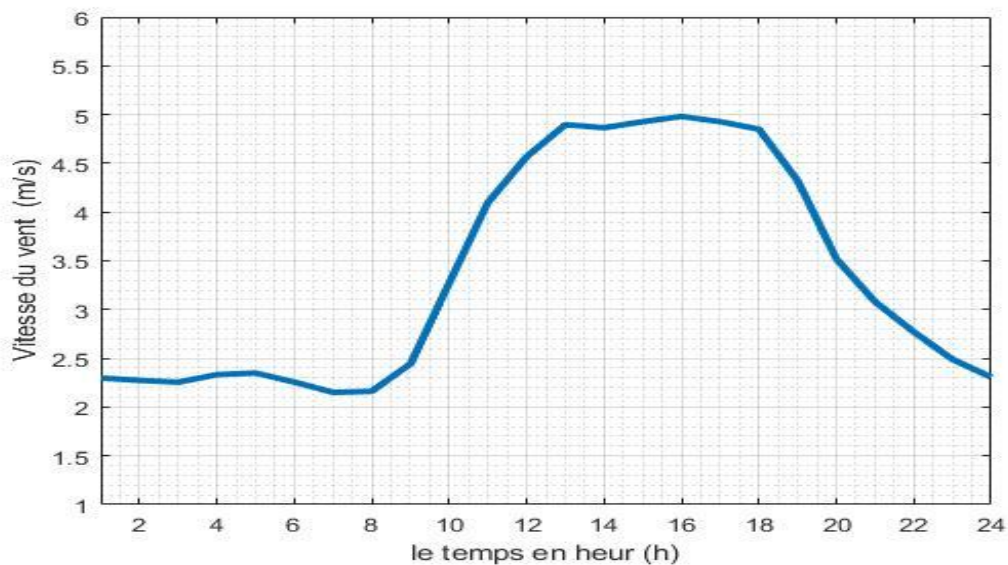


Figure III. 3: Variation des vitesses moyennes horaires 2016-2018

III.1.1.3 – Rose des vents

L'étude statistique des données a permis la détermination de la rose des vents qui est la représentation graphique de la fréquence de la vitesse moyenne des vents en fonction de la direction dans un repère polaire. La rose des vents est déterminée pour chaque année et pour l'ensemble des données du site. Les résultats obtenus montrent que la direction dominante du vent est le nord-ouest, comme le montre les figures III.4

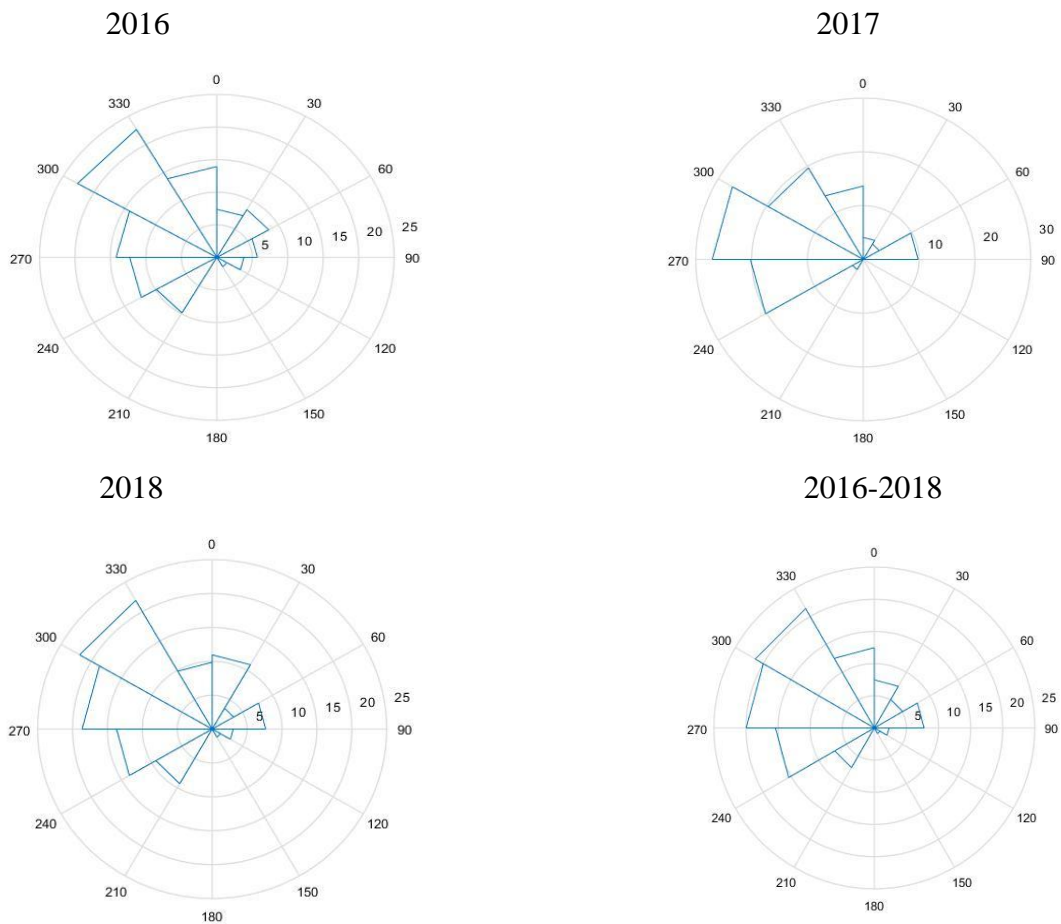


Figure III. 4: Rose des vents du site

III.1.1.4 - Modélisation du vent par la distribution de Weibull

Les données collectées sur la station météorologique de l'Université Assane Seck de Ziguinchor sont aussi ajustées à la loi de Weibull. La vitesse moyenne, les paramètres de Weibull et la densité de puissance sont calculés.

Les histogrammes des fréquences associés à la courbe de distribution de Weibull pour chaque année et pour l'ensemble des données sur la période de mesure sont aussi déterminés. Les résultats (figures III.5) montrent que la distribution observée suit bien la distribution de Weibull.

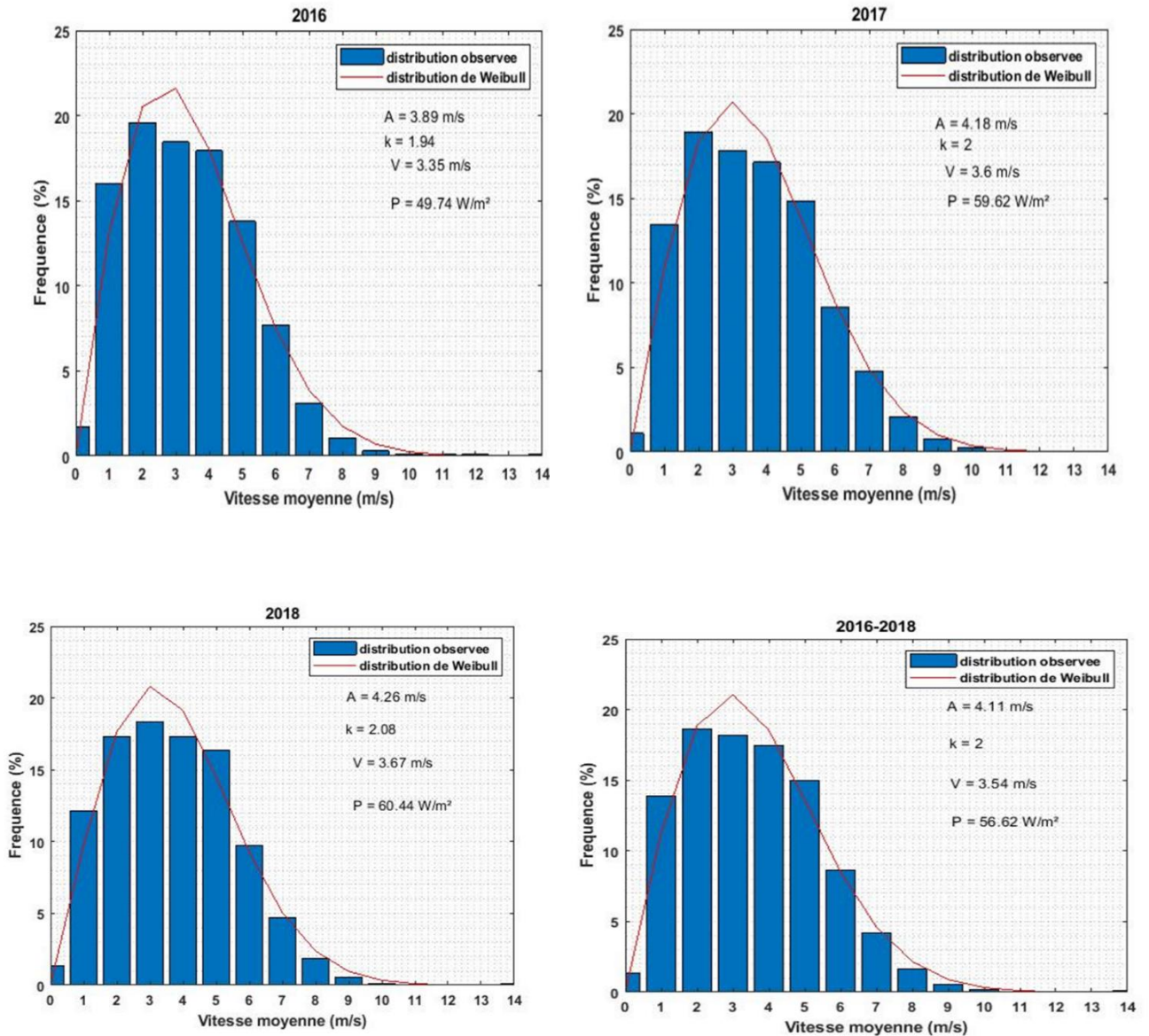


Figure III. 5: Distribution des fréquences de la vitesse moyenne du vent

Le tableau III.1 présente les paramètres d'échelles, de formes et la densité de puissance déterminés sur le site de Ziguinchor. Nous constatons que la densité de puissance la plus grande est de 71,94 W/m² en 2016 observée pendant le mois de Juin, 80,96 W/m² et 84,33W/m² sont respectivement des années 2017 et 2018 observées pendant le mois de Mai. Ces valeurs correspondent aux mois les plus favorables dont le paramètre d'échelle tourne au tour de 4,55m/s à 5,19m/s et le paramètre de forme entre 2,13 à 3,12 pour les années 2016-2018.

La densité de puissance la plus faible est constatée pour les mois de novembre (26,62W/m²) en 2016, (18,2W/m²) en 2017 et (40,17W/m²) en 2018.

Tableau III. 1: Paramètres de Weibull mensuelle 2016 a 2018

Mois	Coefficient d'échelle A (m/s)			Coefficient de forme (K)			Vitesse moyenne (m/s)			Densité de puissance (W/m ²)		
	2016	2017	2018	2016	2017	2018	2016	2017	2018	2016	2017	2018
1	3,03	4,41	4,35	1,54	2,05	2,21	2,62	3,8	3,76	32,2	67,92	61,04
2	3,76	4,99	5,12	1,81	2,57	2,68	3,24	4,34	4,45	48,66	82,47	86,87
3	4,22	4,68	4,44	2,67	2,77	2,56	3,66	4,06	3,84	48,83	65,42	57,96
4	4,46	4,75	5,06	3,31	2,56	3,19	3,9	4,11	4,43	52,34	71,06	77,29
5	4,45	5,09	5,19	3	2,97	3,12	3,87	4,43	4,54	53,92	80,96	84,33
6	4,55	4,86	4,87	2,13	2,47	2,4	3,93	4,2	4,22	71,94	77,87	80,13
7	4,11	3,76	4,03	1,94	1,76	1,92	3,53	3,23	3,46	58,33	50,35	55,61
8	3,83	3,96	4,01	1,78	1,8	2,01	3,29	3,41	3,45	52,69	57,43	52,41
9	3,77	3,5	3,64	1,73	1,7	1,78	3,25	3,01	3,13	51,91	42,59	45,05
10	3,29	3,18	3,42	1,79	1,92	1,81	2,82	2,72	2,93	33,1	27,45	36,63
11	3,03	2,72	3,51	1,74	1,77	1,79	2,6	2,32	3,02	26,62	18,2	40,17
12	4,07	4,26	3,39	1,81	1,89	1,63	3,51	3,68	2,94	61,45	66,92	41,68

III.1.2 – Etude du potentiel solaire

III.1.2.1 – Variation horaire du rayonnement solaire sur ce site

Nous avons étudié le rayonnement solaire théorique global sur le site de Ziguinchor dont les coordonnées géographiques sont présentées dans le chapitre II. En utilisant la valeur de facteur de trouble atmosphérique 0,05 (zone rurale) et en considérant la valeur de la pression atmosphérique 1013 hPa. Nous avons tracé la courbe théorique du rayonnement solaire sur ce site. Les résultats des simulations sont présentés sur la figure III.5 qui présente le rayonnement solaire moyenné sur une année. Ce courbe présente la valeur maximale du rayonnement solaire (1100W/m²) observée aux environs de 13h.

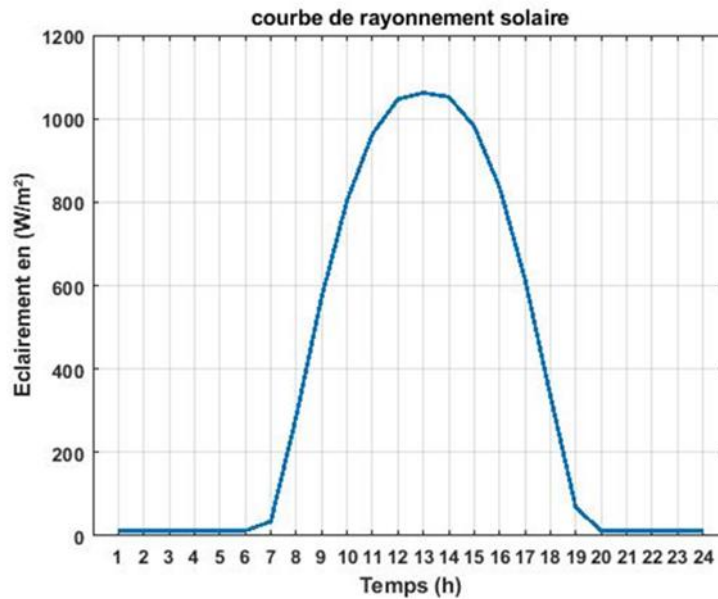


Figure III. 6: Profils du rayonnement solaire a inclinaison 15degres sur ce site

III.1.2.2 – Evaluation du potentiel solaire sur le site

Nous avons étudié le potentiel solaire sur le site de Ziguinchor en déterminant la moyenne d'énergie solaire disponible par mois. Le tableau III.2 présente les résultats obtenus. Ces énergies sont calculées à partir des données collectées pendant les années 2016 et 2017 sur le site. La figure III.7 montre que les mois les plus favorables des années 2016 et 2017 sont respectivement Mai et Avril avec 5,81 kWh/m²/d et 6,02 kWh/m²/d d'énergie disponible sur le site. Les mois les plus défavorables sont Janvier avec 2,94 kWh/m²/d pour 2016 et septembre avec 3,65 kWh/m²/d pour 2017.

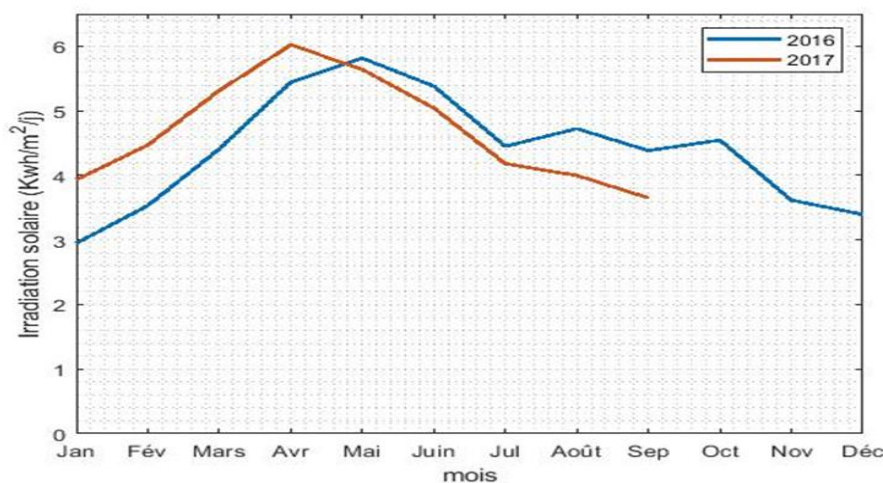


Figure III. 7: Energie solaire mensuelle disponible : étude comparative des années 2016 et 2017

Tableau III. 2: Moyenne mensuelle de l'énergie solaire disponible

Années\Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Moyenne annuelle
2016(kWh/m ² /d)	2,94	3,53	4,41	5,44	5,81	5,38	4,44	4,72	4,38	4,54	3,61	3,39	4,386
2017(kWh/m ² /d)	3,93	4,47	5,31	6,02	5,64	5,04	4,18	3,99	3,65	X	X	X	4,694

III.2 – Choix d'un aérogénérateur adapté à ce site

L'énergie produite par une éolienne sur un site donné dépend de la vitesse moyenne disponible, des paramètres météorologiques du site tels que la température, la pression, l'humidité, le niveau de turbulence et des caractéristiques de la courbe de puissance de l'éolienne [83] ; [84].

III.2.1 – Caractéristiques des éoliennes utilisées

Le tableau III.3 présente les caractéristiques de quelques éoliennes du commerce. En guise d'application, nous utilisons ce tableau pour choisir une éolienne adaptée au site. La vitesse de démarrage est comprise entre 3 m/s et 3,5 m/s. Or la vitesse nominale est très variable selon le type d'éolienne. La vitesse nominale la plus faible est de 7 m/s observée pour les éoliennes Navitron/200W/24V et Elosénégal/500W/24.

Tableau III. 3: Caractéristiques des éoliennes de petites puissances

	Type d'éolienne	Vd (m/s)	Vn(m/s)	Vc(m/s)	Pn(W)	Uel(V)	Coût (Euro/W)
1	Eol/300W/12V	3,3	8	25	300	12	2,11
2	Eol/300W/12V	3,5	11	15	300	12	2,03
3	WS 400W/12V	3	12	17	400	12	1,80
4	Navitron/200W/24V	3	7	25	200	24	3,62
5	Navitron/300W/24V	3	8	25	300	24	2,66
6	WS 400W/ 24V	3	12	17	400	24	1,49
7	Eol 500W /24V	3,3	8	25	500	24	1,80
8	Eolsénégal/500W/24V	2	7	10	500	24	2,15
9	Navitron/500W/24V	3	8	25	500	24	2,12
10	HWG600/ 24V	3,5	12,5	17	600	24	1,83
11	Barney InclIn/250W/48V	3	11	13	250	48	9,29
12	Barney InclIn/600W/48V	3,5	11	13	600	48	5,75
13	Navitron/1000W/48V	3	12	25	1000	48	3,35
14	Barney InclIn/1500W/48V	3,5	12	14	1500	48	3,30
15	Barney InclIn/3000W/48V	3,5	12,5	14	3000	48	2,56
16	Barney InclIn/6000W/48V	3,5	12	14	6000	48	2,17

III.2.2 – Facteur de capacité des éoliennes sur le site

A l'aide de l'équation (II.49) et des paramètres de Weibull rapportés au site, nous avons déterminé la puissance moyenne à la sortie de chacune des éoliennes et le facteur de capacité correspondant à chaque éolienne.

Les résultats montrent que l'éolienne EolSenegal/500W/24V est le plus adaptés au site. Le facteur de capacité représente le rendement de l'éolienne sur un site donné. Plus, il est élevé et plus l'éolienne est adaptée au site. Sa valeur élevée traduit le fait que l'éolienne produit le maximum de sa puissance sur une longue durée.

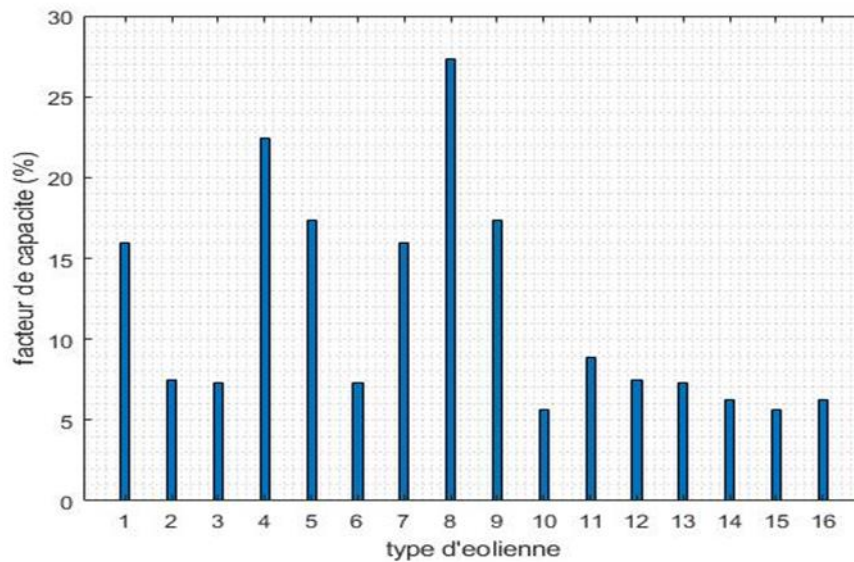


Figure III. 8: Facteur de capacité sur le site pour les différents types d'éolienne

III.2.3 – Etude de la production d'énergie sur le site

L'intérêt de choisir une éolienne de petite puissance adaptée aux sites est qu'elle produit le maximum de sa puissance sur une longue période. On constate pour l'EolSenegal, l'énergie produite est plus importante vers les mois d'avril, mai, juin avec une énergie moyenne de 1,195 Mwh par an.

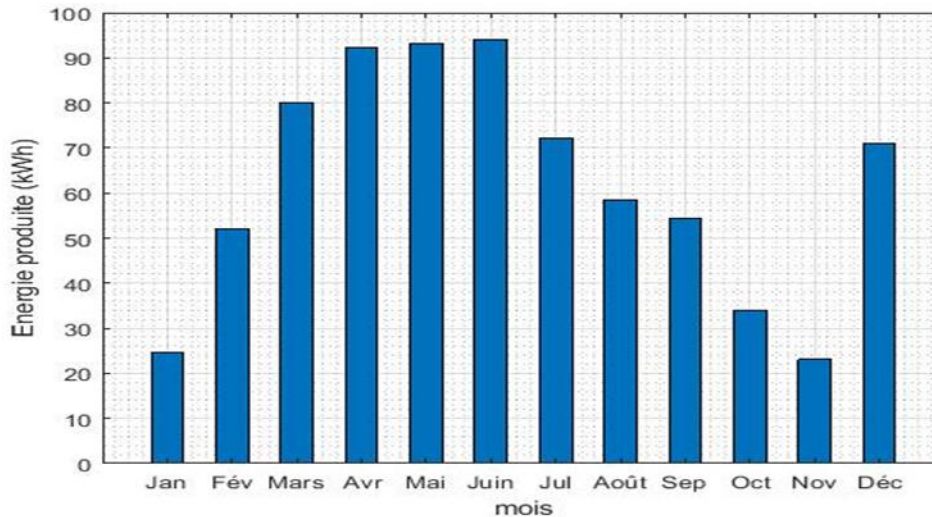


Figure III. 9: Energie produite mensuelle par EolSenegal500W/24V

III.3 – Choix d’un générateur photovoltaïque

III.3.1 – Caractéristiques d’un module solaire

Le tableau III.4 présente les caractéristiques d’un module solaire pour calculer l’énergie produite sur ce site.

Tableau III. 4: Caractéristiques d'un module solaire

Type de panneau	Tension nominale (V)	Puissance crête (W)	Courant de court-circuit (A)	Tension de circuit ouvert (V)	Fill factor
P(150W)	24	150	4,7	43,4	0,74

III.3.2 - Etude de Performance du champ photovoltaïque sur ce site

L’étude de performances du champ PV consiste à évaluer l’énergie qu’il produit. Pour estimer l’énergie produite par le champ PV sur le site, nous avons étudié le potentiel solaire. Dans notre cas, nous avons déterminé une journée type de rayonnement solaire et évaluer l’énergie moyenne mensuelle disponible sur ce site à partir des données collectées sur la station de l’UASZ. En effet, nous avons calculé la moyenne du rayonnement solaire et de la température pour chaque mois.

Nous avons calculé l’énergie mensuelle produite par le module solaire photovoltaïque sur le site. Les résultats obtenus sont donnés dans la figure III.10. On constate que ce module PV

présente une production importante sur le site. L'énergie produite est plus importante aux mois d'Avril, de Mai, de Juin avec une énergie moyenne de 0,2053Mwh par an.

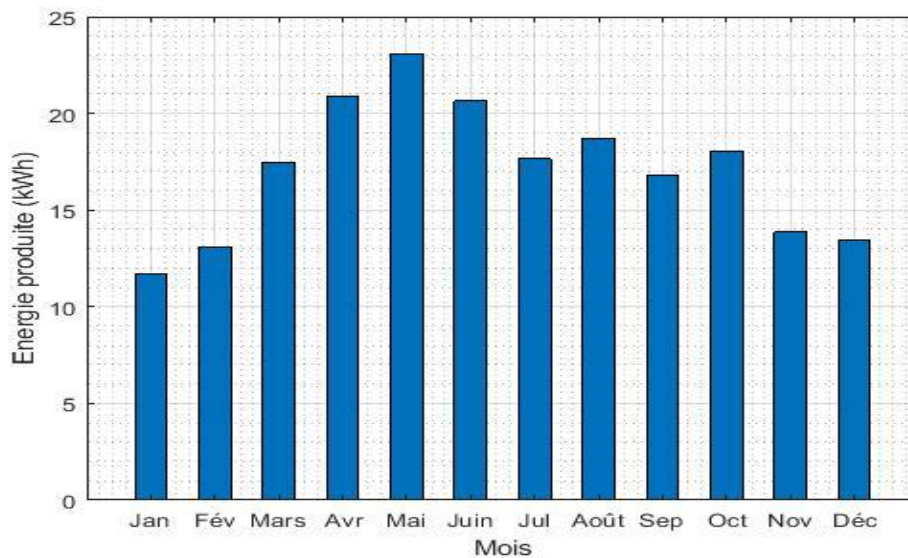


Figure III. 10: Energie produite mensuelle du module PV

III.4 – Analyse de sensibilité des paramètres environnementaux

Pour simuler le modèle de la puissance en fonction des paramètres météorologiques, nous avons considéré les données de la turbine de l'éolienne de diamètre 4m dont la surface est de $S=12,26m^2$, l'angle de calage est de $\beta=2$ et la hauteur de référence $h=10m$. Nous sommes intéressés par l'influence de la température et de la pression sur la production d'énergie

III.4.1 - Variation de la pression et de la température moyenne mensuelle

Pour améliorer notre vision de l'influence des paramètres météorologiques, nous avons utilisé les données de la température et de la pression pour représenter au mieux l'impact de leur influence sur la puissance produite.

Les figures III.11 et III.12 montrent l'évolution de ces paramètres au cours de l'année 2016.



Figure III. 11: Evolution de la température en 2016



Figure III. 12: Evolution de la pression atmosphérique en 2016

On constate qu'il y a une variation de la température et de la pression au cours de l'année. C'est la raison pour laquelle nous allons nous intéresser par ces paramètres pour voir leurs influences sur la production d'énergie.

III.4.2 – Influence de la pression atmosphérique

La pression atmosphérique en un point est le résultat du poids de la colonne d'air au-dessus de ce point. Les différences de pression qu'on note sur le globe terrestre sont dues à un réchauffement différentiel entre ces points.

La pression atmosphérique est un paramètre qui varie avec l'altitude, elle s'abaisse au fur et à mesure que l'altitude augmente mais, par contre, cette diminution n'influe pas sur la puissance délivrée par l'éolienne devant l'augmentation de la vitesse du vent avec la hauteur. Dans ce cas

on s'intéresse ici à la variation moyenne de ce paramètre dans le temps et pour une altitude et une vitesse du vent donnée (3,54m/s).

La moyenne de la pression varie très peu dans les environs de 1000hPa et 1020hPa dans certaines zones en Afrique, selon les données météorologiques de l'ASECNA.

En considérant cet intervalle, la figure III.13 représente les données du tableau III.5 qui montre les résultats de simulation de la puissance mécanique d'une turbine dans les conditions de température 27°C et la valeur de la vitesse du vent 3,54m/s et 3 valeurs de pression différentes.

Tableau III. 5: Valeurs de la puissance en fonction de la pression atmosphérique

λ	Cp	Ω	Pm (1000hPa)	Pm (1010hPa)	Pm (1020hPa)
0	0	0	0	0	0
1	8.48348E-08	1.77	2.67752E-07	2.70429E-07	2.73107E-07
2	0.00034	3.54	0.00107	0.00108	0.00109
3	0.00591	5.31	0.01866	0.01885	0.01903
4	0.02325	7.08	0.07341	0.07414	0.07487
5	0.04977	8.85	0.15709	0.15866	0.16023
6	0.07830	10.62	0.24715	0.24962	0.25209
7	0.10315	12.39	0.32557	0.32883	0.33208
8	0.12136	14.16	0.38303	0.38686	0.39069
9	0.13203	15.93	0.41672	0.42089	0.42505
10	0.13546	17.7	0.42754	0.43181	0.43609
11	0.13248	19.47	0.41813	0.42231	0.42650
12	0.12411	21.24	0.39171	0.39563	0.39955
13	0.11135	23.01	0.35146	0.35498	0.35849
14	0.09513	24.78	0.30027	0.30327	0.30627
15	0.07623	26.55	0.24061	0.24302	0.24543
16	0.05531	28.32	0.17459	0.17634	0.17808
17	0.03292	30.09	0.10391	0.10495	0.10599
18	0.00949	31.86	0.02997	0.03027	0.03057

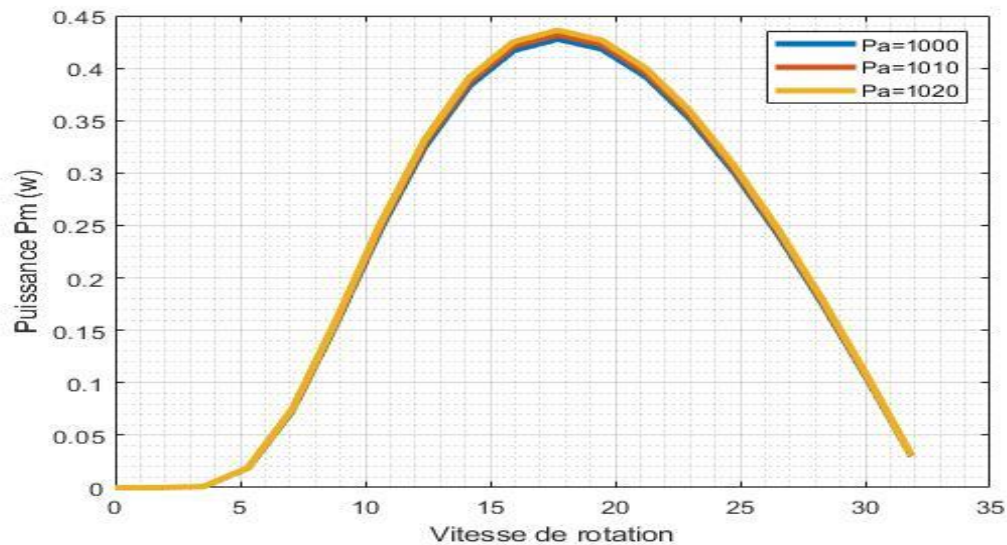


Figure III. 13: Courbe de puissance en fonction de la pression atmosphérique a une vitesse du vent de 3.54m/s

La figure III.13 montre l'évolution de la puissance en tenant compte la variation de la pression. Cette dernière varie entre 1000hPa et 1020hPa ce qui représente un écart limité à 2%. Cet écart provoque une légère augmentation de la puissance maximale qui ne dépasse pas 2% pour une vitesse de 3,54m/s.

Cette valeur nous indique que l'influence de la pression sur la production des turbines éoliennes est limitée et peut être négligée.

III.4.3 – Influence de la température

Dans ce paragraphe on présente une simulation de la puissance mécanique avec le deuxième composant de la masse volumique de l'air. Plus l'air est frais, plus il est dense et l'air dense augmente la puissance produite par les éoliennes.

Les figures illustrées à la fin de ce chapitre permettent de donner une idée sur comment réagit l'éolien lors de la variation de la température.

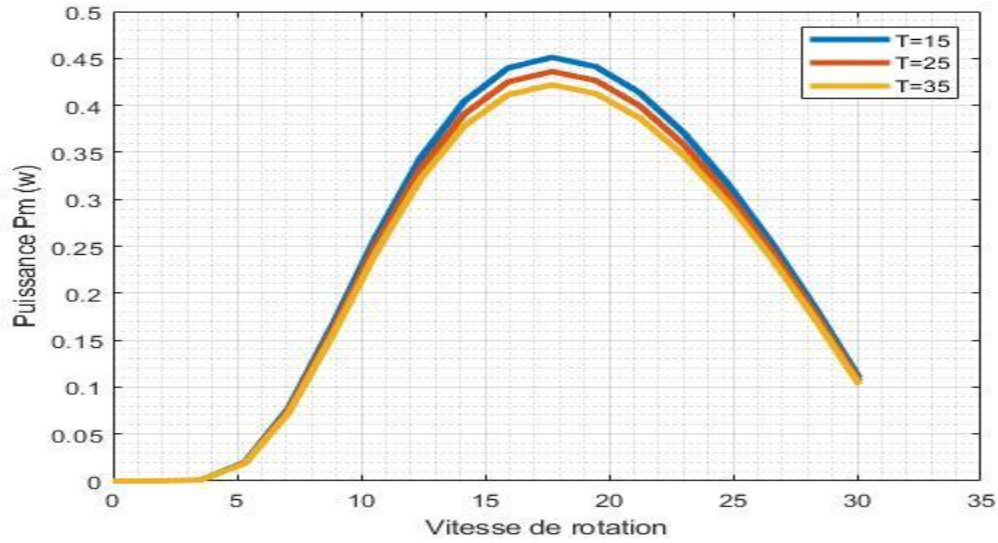


Figure III. 14: Puissance d'une éolienne a différentes températures a une vitesse du vent de 3.54m/s

Cette figure montre que la puissance diminue si la température augmente. Le tableau III.6 donne les valeurs de la variation relative de la puissance maximale à la température minimale donnée par rapport à d'autres températures.

Tableau III. 6: Valeurs de la puissance en fonction de la température

λ	Cp	Ω	Pm (T=15)	Pm (T=25)	Pm (T=35)
0	0	0	0	0	0
1	8.48348E-08	1.77	2.82528E-07	2.73052E-07	2.64191E-07
2	0.00034	3.54	0.00113	0.00109	0.00106
3	0.00591	5.31	0.01969	0.01903	0.01841
4	0.02325	7.08	0.07746	0.07486	0.07243
5	0.04977	8.85	0.16576	0.16020	0.15500
6	0.07830	10.62	0.26079	0.25204	0.24386
7	0.10315	12.39	0.34354	0.33202	0.32124
8	0.12136	14.16	0.40417	0.39062	0.37794
9	0.13203	15.93	0.43972	0.42497	0.41118
10	0.13546	17.7	0.45113	0.43600	0.42185
11	0.13248	19.47	0.44121	0.42641	0.41257
12	0.12411	21.24	0.41333	0.39947	0.38650
13	0.11135	23.01	0.37086	0.35842	0.34679
14	0.09513	24.78	0.31684	0.30621	0.29628
15	0.07623	26.55	0.25389	0.24538	0.23741
16	0.05531	28.32	0.18423	0.17805	0.17227
17	0.03292	30.09	0.10965	0.10597	0.10253

Les figures III.15 et III.16 ont été faites pour montrer cette variation de la puissance en fonction de plusieurs valeurs de température (Tableau III.7) pour pouvoir estimer à quel degré de température le rendement de l'éolien diminue (Tableau III.8) à une vitesse du vent donnée.

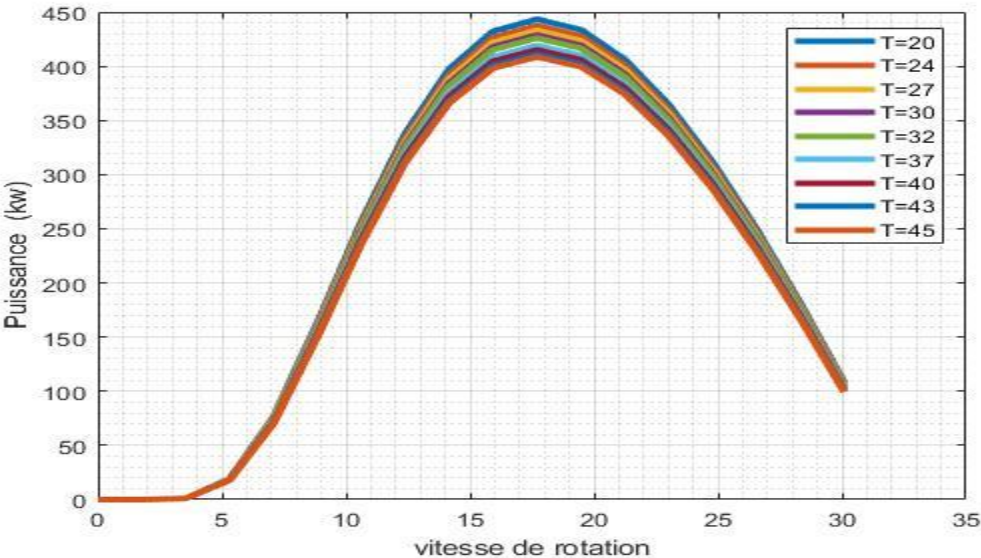


Figure III. 15: Puissance d'une éolienne donnée à différentes températures pour une vitesse donnée

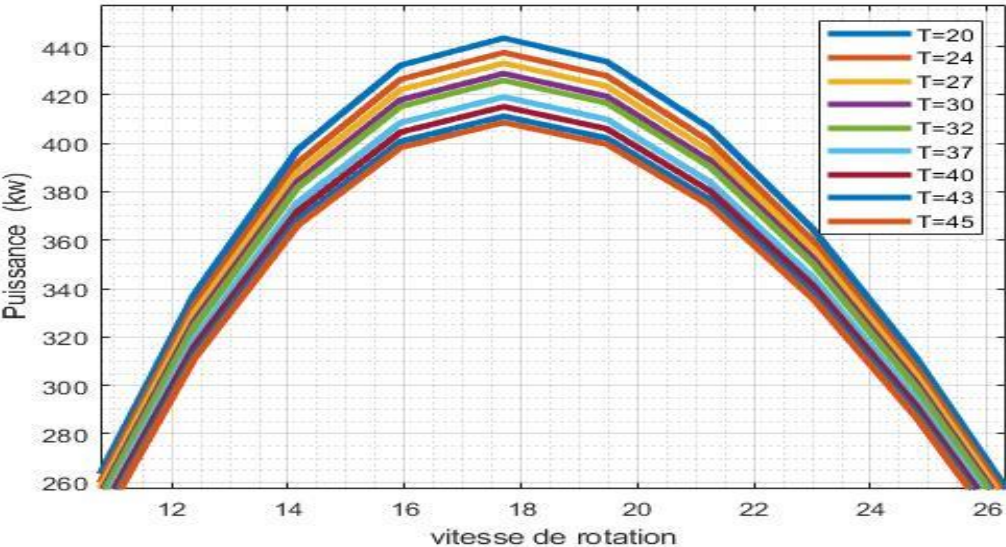


Figure III. 16: Puissance optimale d'une éolienne à différentes températures et pour une vitesse du vent donnée

Dans un intervalle de température de 20 à 45°C, le tableau III.7 montre les valeurs théoriques de la puissance mécanique d'une éolienne de diamètre 4m à une vitesse du vent de 3,54m/s.

Tableau III. 7: Valeurs de puissance en fonction de la température pour une vitesse de 3,54m/s

λ	Cp	Ω	Pm(T=20)	Pm(T=24)	Pm(T=27)	Pm(T=30)	Pm(T=32)	Pm(T=37)	Pm(T=40)	Pm(T=43)	Pm(T=45)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0.000000 0848	1.7 7	0.000 27	0.000 27	0.000 27	0.000 26	0.000 26	0.000 26	0.000 25	0.000 25	0.000 25
2	0.000341 022	3.5 4	1.116 34	1.101 32	1.090 31	1.079 52	1.072 44	1.055 15	1.045 05	1.035 13	1.028 62
3	0.005913 364	5.3 1	19.35 76	19.09 70	18.90 61	18.71 90	18.59 63	18.29 65	18.12 12	17.94 93	17.83 65
4	0.023259 576	7.0 8	76.14 10	75.11 61	74.36 53	73.62 93	73.14 68	71.96 76	71.27 81	70.60 17	70.15 79
5	0.049774 04	8.8 5	162.9 37	160.7 43	159.1 37	157.5 62	156.5 29	154.0 06	152.5 30	151.0 83	150.1 33
6	0.078307 469	10. 62	256.3 42	252.8 91	250.3 63	247.8 86	246.2 61	242.2 91	239.9 70	237.6 93	236.1 99
7	0.103156 022	12. 39	337.6 84	333.1 39	329.8 09	326.5 45	324.4 05	319.1 75	316.1 17	313.1 18	311.1 49
8	0.121362 048	14. 16	397.2 83	391.9 35	388.0 17	384.1 77	381.6 59	375.5 07	371.9 09	368.3 80	366.0 64
9	0.132035 046	15. 93	432.2 21	426.4 03	422.1 41	417.9 63	415.2 24	408.5 30	404.6 16	400.7 77	398.2 57
10	0.135463 238	17. 7	443.4 43	437.4 74	433.1 01	428.8 15	426.0 05	419.1 37	415.1 22	411.1 83	408.5 98
11	0.132483 204	19. 47	433.6 88	427.8 50	423.5 74	419.3 82	416.6 33	409.9 17	405.9 90	402.1 37	399.6 09
12	0.124112 491	21. 24	406.2 86	400.8 17	396.8 11	392.8 84	390.3 09	384.0 17	380.3 38	376.7 29	374.3 60
13	0.111359 783	23. 01	364.5 40	359.6 33	356.0 38	352.5 15	350.2 04	344.5 59	341.2 58	338.0 19	335.8 94
14	0.095138 824	24. 78	311.4 40	307.2 48	304.1 77	301.1 66	299.1 93	294.3 69	291.5 49	288.7 82	286.9 67
15	0.076238 166	26. 55	249.5 68	246.2 08	243.7 48	241.3 35	239.7 54	235.8 88	233.6 29	231.4 12	229.9 57
16	0.055318 877	28. 32	181.0 88	178.6 50	176.8 65	175.1 14	173.9 67	171.1 62	169.5 22	167.9 14	166.8 58
17	0.032924 923	30. 09	107.7 80	106.3 30	105.2 67	104.2 25	103.5 42	101.8 73	100.8 97	99.93 98	99.31 15

Les figures III.15 et III.16 montrent que la valeur de la puissance maximale P_{max} à la température $t=20^{\circ}\text{C}$ diminue, suivant l'échelle d'augmentation de la température comme le montre le tableau III.8 :

Tableau III. 8: Taux de variation de la puissance en fonction de la température pour une vitesse de 3,54m/s

T(°C)	20	24	27	30	32	37	40	43	45
Pmax	443,443	437,474	433,102	428,816	426,005	419,138	415,122	411,183	408,599
δP(%)	0	-1,346	-2,346	-3,335	-3,991	-5,603	-6,561	-7,510	-8,138

Les résultats de simulation montrent que l'augmentation de la température initiale 20°C apporte les résultats suivants :

- L'augmentation de la température par 3°C, provoque une perte de 0,99% de la puissance d'une éolienne,
- L'ajout de 4°C sur la température initiale diminue la puissance par 1,3%,
- Si la température initiale augmente par 25°C, cette variation apporte une perte de 8,14% au niveau de la puissance.

Ces résultats ont montré que la puissance à une vitesse donnée diminue linéairement avec l'augmentation de la température (figure III.17). Cette figure représente l'allure d'évolution linéaire de la puissance en fonction de la température ambiante. L'équation s'écrit :

$$P_{\max} = -4,3982x + 446,76 \quad R^2 = 0,9934$$

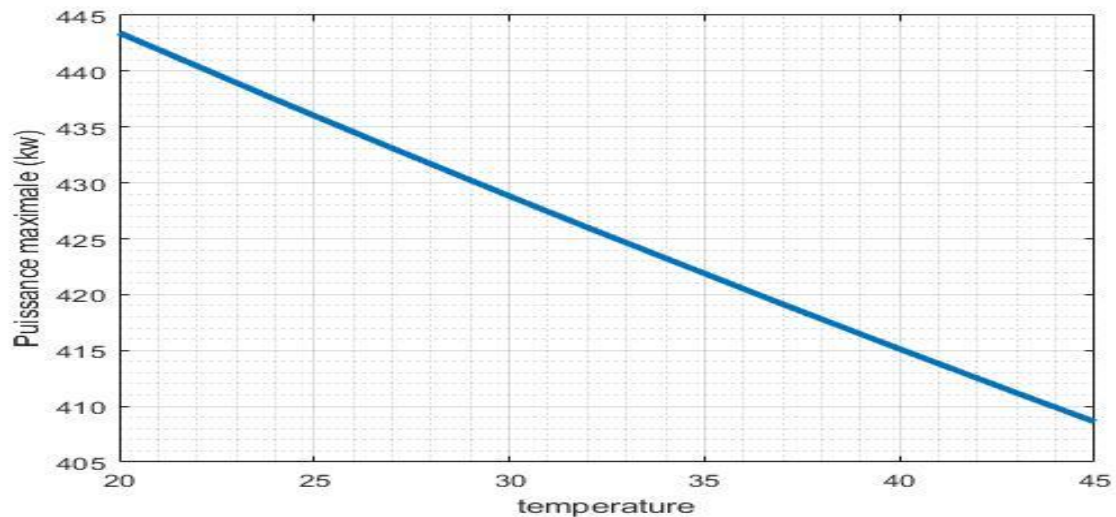


Figure III. 17: Variation de la puissance maximale avec la température pour une vitesse de 3.54m/s

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons évalué le potentiel éolien et solaire du site. Ensuite, nous allons fait le choix de l'aérogénérateur et le module PV le plus adapté au site. Enfin nous avons effectué plusieurs simulations du comportement de la production d'un générateur éolien en fonction des paramètres météorologiques. Ceci nous a permis de voir l'évolution de la puissance en fonction de la masse volumique de l'air qui varie avec les paramètres météorologiques de l'atmosphère.

Les applications retenues dans notre travail, nous ont montré qu'il est nécessaire d'étudier l'évolution de la puissance en fonction des paramètres météorologiques dans les conditions de l'air humide. Cette étude nous a permis de voir l'effet de la température et de la pression dans lequel nous avons tires les conclusions suivantes :

- ❖ La puissance produite augmente, si la température diminue,
- ❖ La puissance augmente légèrement avec l'augmentation de la pression

En conclusion, l'analyse des résultats de simulation a permis de définir la diminution de la température entraine une production importante pour l'aérogénérateur par contre une diminution de la vitesse du vent liée à la rugosité peut conduire à une production non satisfaisante qui ne justifie pas l'installation d'un aérogénérateur. Le choix du site est un élément important dans le choix de l'option éolienne pour la production d'électricité.

Conclusion générale

Ce travail portant sur étude et modélisation d'un système hybride PV/Eolien/GE : impacts de la température et de la pression. Dans cette étude, nous avons utilisé les données de la station météorologique de l'université Assane Seck de Ziguinchor. Notre travail est subdivisé en trois (3) chapitres.

Le chapitre I est une étude de généralité sur les systèmes hybrides qui est scindée en deux parties. Dans la première partie l'étude de classification de système hybrides à savoir le régime de fonctionnement et la structure du système hybride. Les résultats ont montré que les systèmes hybrides sont plus fiables et moins coûteux que les systèmes autonomes. Dans la deuxième partie présente l'étude des systèmes hybrides à savoir les critères d'optimisation et logiciel de dimensionnement et l'étude des différentes structures de systèmes hybrides.

Le chapitre II porte sur la modélisation d'un système hybride PV/Eolien/GE. Dans la première partie nous avons étudiée le potentiel énergétique (éolienne et solaire) du site en faisant la description des données météorologiques utilisées. Ensuite dans la deuxième partie présente la structure du système hybride PV/Eolien/GE. Enfin dans la troisième partie de ce chapitre, nous avons étudié les différents modèles des sous-systèmes d'énergie.

Le chapitre III est consacré à l'application et l'analyse des résultats obtenus. Nous avons utilisé le logiciel MATLAB pour implémenter le modèle complet de la puissance en fonction des paramètres météorologiques. Dans un premier temps, une étude d'évaluation des potentiels éolien et solaire. Les résultats obtenus montrent que le potentiel énergétique (éolien et solaire) est plus favorable aux mois d'Avril, Mai et Juin. Ensuite le choix de l'aérogénérateur le plus adapté sur ce site en calculant le facteur de capacité. On a choisi l'EolSenegal500W/24V parce qu'il a le facteur de capacité le plus grand. Un type de panneau photovoltaïque a été choisi dans la littérature pour étudier la production. On constate qu'il ait une forte production d'énergie éolienne et solaire vers les mois d'Avril, Mai et Juin. Enfin nous avons ensuite étendu notre analyse par l'étude des impacts des paramètres température et pression sur l'évolution de la puissance de l'éolien. On voit que la température réagit d'une façon plus dynamique que la pression.

En conclusion, à partir des résultats menés dans le troisième chapitre, nous avons constaté que le choix d'un site est un élément important dans le cadre du choix de l'option éolienne et solaire pour la production d'électricité. Ainsi que la température influe plus que la pression d'où :

- La puissance maximale de l'aérogénérateur augmente par 8,14%, si la température diminue de 45 à 20°C
- La puissance augmente légèrement avec l'augmentation de la pression

Il serait aussi intéressant d'intégrer l'étude de l'influence d'autres paramètres comme l'humidité sur la production de l'éolienne. Cela permettra de voir comment il influe sur la production du système hybride.

Il serait aussi intéressant d'intégrer l'étude des paramètres météorologiques (ensoleillement et la température) sur la production du champ PV. Cela permettra de voir l'influence de ces paramètres météorologiques sur la production du système hybride.

Bibliographie

- [1] A.S.Mercado L.G.Acuna, R.V.Padilla. Measuring reliability of hybrid photovoltaicwind energy system: A new indicator. *Renewable Energy*, 106 :68-77, 2017.
- [2] Ball M, Wietschel M, Rentz O (2007). Integration of a hydrogen economy into the German energy system: an optimizing modeling approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32: 1355-68.
- [3] Shaahid SM and Elhadidy MA (2007). Technical and economic assessment of gridindependent hybrid photovoltaic–diesel–battery power systems for ommercial loads in desert environments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(8):1794-810.
- [4] Ould Bilal B, Kebe CMF, Ndiaye PA., Sambou V, Ndongo M (2012a). Evaluation of wind energy potential and electricity generation in the northwestern coast of Senegal. *International Metrology Conference CAFMET*, 22-27 Avril. 1-9.
- [5] Akdag et al., 2009. A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications. *Sol Energy*, 1761-1766
- [6] Zhou W, Lou C, Li Z, Lu L, Yang HX (2010). Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar–wind power generation systems. *Appl Energy*, 87: 380-9.
- [7] Yang HX, Zhou W, Lu L, Fang ZH (2008). Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar–wind system with LPSP technology by using genetic algorithm. *Solar Energy*, 82(4): 354-67.
- [8] Colle S, Abreu SL, Ruther R (2004). Economic evaluation and optimisation of hybrid diesel/photovoltaic systems integrated to electricity grid. *Sol Energy*, 76:295-9.
- [9] Mulder, G., De Ridder, F., Six D., (2010). Electricity storage for grid-connected household dwellings with PV panels. *Solar Energy*, vol. 84, pp. 1284-1293, 2010.
- [10] Islam, S., Belmans, R., (2004). Grid independent PV fuel-cell hybrid system-optimal design and control strategy. 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 7-11 June 2004, Paris, France, pp. 3311-3314, 2004.
- [11] Vosseler, I., Ramírez, E., Vallvé, X., Carreras, J.M., (2004). PV hybrid village electrification in Spain-6 years experience with multi-user solar hybrid grids. 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 7-11 June 2004, Paris, France, pp. 3361-3364, 2004.
- [12] Kaushika, N.D., Gautam, N.K., Kaushik, K., (2005). Simulation model for sizing of stand-alone solar PV system with interconnected array. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 85, pp. 499–519, 2005.
- [13] Fragaki, A., Markvart, T., (2008). Stand-alone PV system design- Results using a new sizing approach. *Renewable Energy*, vol. 33, pp. 162–167, 2008.
- [14] Uzunoglu, M., Onar, O.C., Alam, M.S., (2009). 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.
- [15] El-Shatter, Th.F., Eskandar, M.N., El-Hagry, M.T., (2002). Hybrid PV/fuel cell system design and simulation. *Renewable Energy*, vol. 27, pp. 479-485, 2002.

- [16] McConnell, R.D., Lasich, J.B., Elam C., (2005). A hybrid solar concentrator PV system for the electrolytic production of hydrogen. 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 6 –10 June 2005, Barcelona, Spain, pp 167-170, 2005.
- [17] Conibeera, G.J., Richards, B.S., (2007). Acomparison of PV-electrolyser and photoelectrolytic technologies for use in solar to hydrogen energy storage systems. International Journal of Hydrogen Energy, vol. 32, pp. 2703 – 2711, 2007.
- [18] Busquet, S., Leroux, P., Albuissou, M., Gatt, P., Ménard, L., Mayer, D., Metkemeijer, R., (2004). PV/fuel cell hybrid systems perfrmance analysis and possible improvements. 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 7-11 June 2004, Paris, France, pp. 2426-2429, 2004.
- [19] Thounthong, P., Raël, S., Davat, B., (2009). Analysis of supercapacitor as second source based on fuel cell power generation. IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 24, issue 1, pp. 247-255, 2009.
- [20] Nouni, M.R., Mullick, S.C., Kandpal, T.C., (2007). Techno-economics of small wind electric generator projects for decentralized power supply in India. Energy Policy, vol. 35, pp. 2491–2506, 2007.
- [21] Zini, G., Tartarini, P., (2010). Wind-hydrogen energy stand-alone system with carbon storage: Modeling and simulation. Renewable Energy, vol. 35, pp. 2461-2467, 2010.
- [22] Ntziachristos, L., Kouridis, C., Samaras, Z., Pattas, K., 2005. A wind-power fuel-cell hybrid system study on the non-interconnected Aegean islands grid. Renewable Energy, vol. 30, pp. 1471–1487, 2005.
- [23] Denholm, P., (2006). Improving the technical, environmental and social performance of wind energy systems using biomass-based energy storage. Renewable Energy, vol. 31, pp. 1355–1370, 2006.
- [24] Kasseris, E., Samaras, Z., Zafeiris, D., (2007). Optimization of a wind-power fuel-cell hybrid system in an autonomous electrical network environment. Renewable Energy, vol. 32, pp. 57–79, 2007.
- [25] Korpaas, M., Holen, A.T., Hildrum, R., (2003). Operation and sizing of energy storage for wind power plants in a market system. Electrical Power and Energy Systems, vol. 25, pp. 599–606, 2003.
- [26] Iqbal, M.T., (2003a). Simulation of a small wind fuel cell hybrid energy system. Renewable Energy, vol. 28, pp. 511–522, 2003.
- [27] Shi, J., Tang, Y.J., Ren, L., Li, J.D., Chen, S.J., (2008). Application of SMES in wind farm to improve voltage stability. Physica C, vol. 468, pp. 2100-2103, 2008.
- [28] Iqbal, M.T., (2003b). “Modeling and control of a wind fuel cell hybrid energy system. Renewable Energy, vol. 28, pp. 223–237, 2003.
- [29] Bechrakis, D.A., McKeogh, E.J., Gallagher, P.D., (2006). Simulation and operational assessment for a small autonomous wind-hydrogen energy system. Energy Conversion and Management, vol. 47, pp. 46–59, 2006

- [31] Diaf, S., Notton, G., Belhamel, M., Haddadi, M., Louche, A., (2008). Design and techno-economical optimization for hybrid PV/wind system under various meteorological conditions. *Applied Energy*, vol. 85, pp. 968–987, 2008.
- [32] Bitterlin, I.F., (2006). Modelling a reliable wind/PV/storage power system for remote radio base station sites without utility power. *Journal of Power Sources*, vol. 162, pp. 906–912, 2006.
- [33] Krauter, S.C.W., Calvacante, F.S.A., Cunha, M.S., de Lima L.C., (2004). PV in combination with micro wind turbines for rural household electrification in the northeast of Brazil. 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 7-11 June 2004, Paris, France, pp. 3531-3531, 2004.
- [34] Ai, B., Yang, H., Shen, H., Liao, X., (2003). Computer-aided design of PV/wind hybrid system. *Renewable Energy*, vol. 28, pp. 1491–1512, 2003.
- [35] Kaabeche, A., Belhamel, M., Ibtouen, R., Moussa, S., Benhaddadi, M.R., (2006). Optimisation d'un système hybride (éolien – photovoltaïque) totalement autonome. *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 9, n. 3, pp. 199-209, 2006.
- [36] Ekren, O., Ekren, B.Y., (2008). Size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage using response surface methodology. *Applied Energy*, vol. 85, pp. 1086–1101, 2008.
- [37] Nelson, D.B., Nehrir, M.H., Wang, C., (2006). Unit sizing and cost analysis of stand-alone hybrid wind/PV/fuel cell power generation systems. *Renewable Energy*, vol. 31, pp. 1641–1656, 2006.
- [38] Ekren, B.Y., Ekren, O., (2009). Simulation based size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage under various load and auxiliary energy conditions. *Applied Energy*, vol. 86, pp. 1387–1394, 2009.
- [39] Prasad, A.R., Natarajan, E., (2006). Optimization of integrated photovoltaic–wind power generation systems with battery storage. *Energy*, vol. 31, pp. 1943-1954, 2006.
- [40] Koutroulis, E., Kolokotsa, D., Potirakis, A., Kalaitzakis, K., (2006). Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind-generator systems using genetic algorithms. *Solar Energy*, vol. 80, pp. 1072–1088, 2006
- [41] Iqbal, M.T., (2002). Design of a hybrid energy system for households in Newfoundland. IEEE 12th, NECEC conference, St. John's NF, 2002.
- [42] Lew, D.J., Barley, C.D., Flowers, L.T., (1997). Hybrid Wind/Photovoltaic Systems for households in Inner Mongolia. International Conference on Village Electrification through Renewable Energy, New Delhi, 3-5 March, 1997
- [43] Azbe, V., Mihalic, R., (2006). Distributed generation from renewable sources in an isolated DC network. *Renewable Energy*, vol. 31, pp. 2370–2384, 2006.
- [44] Pecen, R., Salim, M.D., Zora, A., (2004). A LabView Based Instrumentation System for a Wind-Solar Hybrid Power Station. *Journal of Industrial Technology*, vol. 20, n 3, 2004.
- [45] Urli, N.B., Kamenski, M., (1998). Hybrid photovoltaic/wind grid-connected power plants in Croatian renewable energy program. *Renewable Energy*, vol. 15, pp. 594-597, 1998.

- [46] Tina, G., Gagliano, S., Raiti, S., (2006). Hybrid solar/wind power system probabilistic modelling for long-term performance assessment. *Solar Energy*, vol. 80, pp. 578–588, 2006.
- [47] Shaahid, S.M., Elhadidy, M.A., (2003). Opportunities for utilization of stand-alone hybrid (photovoltaic+diesel+battery) power systems in hot climates. *Renewable Energy*, vol. 28, pp. 1741–1753, 2003.
- [48] Muñoz, J., Narvarte, L., Lorenzo, E., (2004). First operating year of two village PV-diesel plants in the south of Morocco. 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 7-11 June 2004, Paris, France, pp. 3462-3465, 2004.
- [49] van Sark, W.G.J.H.M., Lysen, E.H., Cocard, D., Beutin, P., Merlo, G.F., Mohanty, B., van den Akker, J., Razzak Idris, A., Firag, A., Waheed, A., Shaheed, A., Latheef, M., Wajeeh, A., (2006). The first PV-diesel hybrid system in the Maldives installed at Mandhoo Island. 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, 4-8 September 2006, Dresden, Germany, pp. 3039-3043, 2006.
- [50] Muselli, M., Notton, G., Poggi, P., Louche, A., (2000). PV-hybrid power systems sizing incorporating battery storage: analysis via simulation calculations. *Renewable Energy*, vol. 20, pp. 1-7, 2000.
- [51] Ajan, C. W., Ahmed, S. S., Ahmad, H. B., Taha, F., Mohd Zin, A. A. B., (2003). On the policy of photovoltaic and diesel generation mix for an off-grid site: East Malaysian perspectives, *Solar Energy*, vol. 74, pp. 453–467, 2003.
- [52] Tina, G.M., Brunetto, C., Gagliano, S., Petino, S., Guerra, M., Schioppo, R., Candio, A., (2005). Monte Aquilone hybrid Photovoltaic-Diesel power generation system testing site-experimental tuning of subsystem models. 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 6 –10 June 2005, Barcelona, Spain, pp. 2319-2322, 2005.
- [53] Wickert, B., Nayar, C.V., Lawrance, W.B., (1999). Photovoltaic-Diesel Hybrid Energy Systems for Off-Grid Rural Electrification. *International Journal of Renewable Energy Engineering*, vol. 1, n. 1, pp. 7-17, 1999.
- [54] Ashari, M., Nayar, C. V., (1999). An optimum dispatch strategy using set points for a photovoltaic (PV)–diesel–battery hybrid power system. *Solar Energy*, vol. 66, Issue 1, pp 1-9, may 1999.
- [55] Wichert, B., Dymond, M., Lawrance, W., Friese, T., (2001). Development of a test facility for photovoltaic-diesel hybrid energy systems. *Renewable Energy*, vol. 22, pp. 311-319, 2001.
- [56] Rana, S., Chandra, R., Singh, S.P., Sodha, M.S., (1998). Optimal mix of renewable energy resources to meet the electrical energy demand in villages of Madhya Pradesh. *Energy Conversion and Management*, vol 39, issues 3-4, pp 203-216, 1998.
- [57] Carta, J.A., González, J., Gómez, C., (2003). Operating results of a wind-diesel system which supplies the full energy needs of an isolated village community in the Canary Islands. *Solar Energy*, vol. 74, pp. 53–63, 2003.
- [58] Notton, G., Cristofari, C., Poggi, P., Musseli, M., (2001). Wind hybrid electrical supply system: behaviour simulation and sizing optimization. *Wind Energy*, vol. 4, pp. 43-59, 2001.

- [59] Bowen, A.J., Cowie, M., Zakay, N., (2001). The performance of a remote wind-diesel power system. *Renewable Energy*, vol. 22, pp. 429–445, 2001.
- [60] Lund, H., Østergaard, P.A., (2000). Electric grid and heat planning scenarios with centralised and distributed sources of conventional, CHP and wind generation. *Energy*, vol. 25, pp. 299–312, 2000.
- [61] Lund, H., Clark, W.W., (2002). Management of fluctuations in wind power and CHP comparing two possible Danish strategies. *Energy*, vol. 27, pp. 471-483, 2002.
- [62] Muljadi, E., Bialasiewicz, J.T., (2003). Hybrid Power System with a Controlled Energy Storage. 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society Roanoke, Virginia, November 2–6, 2003.
- [63] Elhadidy, M.A., Shaahid, S.M., (2004). Role of hybrid (wind + diesel) power systems in meeting commercial loads. *Renewable Energy*, vol. 29, pp. 109–118, 2004.
- [64] Hongwei, Z., Xuanfu, L., Yuzhao, F., (1999). Optimum operation of large scale wind-diesel generation systems. *Renewable Energy*, vol. 16, pp. 851-854, 1999.
- [65] Garcia, R.S., Weisser, D., (2006). A wind-diesel system with hydrogen storage: Joint optimisation of design and dispatch. *Renewable Energy*, vol. 31, pp. 2296–2320, 2006.
- [66] Ulleberg, Ø., Pryor, T.L., (2002). Optimization of Integrated Renewable Energy Hydrogen Systems in Diesel Engine Mini-grids. 14th World Hydrogen Energy Conference, Montreal, 9-14 June 2002.
- [67] McGowan, J.G., Manwell, J.F., (1999). Hybrid wind/PV/diesel system experiences. *Renewable Energy*, vol. 16, pp. 928-933, 1999.
- [68] McGowan, J.G., Manwell, J.F., Avelar, C., Warner, C.L., (1996). Hybrid wind/PV/diesel hybrid power systems modeling and South American applications. *Renewable Energy*, vol 9, Issues 1-4, pp. 836-847, 1996
- [69] El-Tamaly, H.H., Mohammed, A.A.E., (2006). Impact of interconnection photovoltaic/wind system with utility on their reliability using a fuzzy scheme. *Renewable Energy*, vol. 31, pp. 2475–2491, 2006.
- [70] Bernal-Agustín, J.L., Dufo-López, R., Rivas-Ascaso, D.M., (2006). Design of isolated hybrid systems minimizing costs and pollutant emissions. *Renewable Energy*, vol. 31, pp. 2227–2244, 2006.
- [71] Dufo-López, R., Bernal-Agustín, J.L., (2008). Multi-objective design of PV–wind–diesel–hydrogen– battery systems. *Renewable Energy*, vol. 33, pp. 2559-2572, 2008.
- [72] Rothert, M., Wollny, M., (2006). Optimized operation management in hybrid systems. 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, 4-8 September 2006, Dresden, Germany, pp. 2335-2337, 2006.
- [73] P.A. Ndiaye. Contribution à l'étude et à la réalisation d'un simulateur électrotechnique de turbine d'éolienne : Simulation des paramètres d'une éolienne adaptée sur le site du Havre. Thèse de Doctorat de l'Université du Havre, France, Janvier, 119, p. 1998.

- [74] P. Ndiaye, C. Kraif, L. Protin and G. Fleury. Study and modelling of the wind power on the site of Dakar by a microcomputer. 12 th IMACS World Congress on Scientific Computation-Paris, July 1988. Publié dans Electrical and Power System, Modelling and Simulation.
- [75] Ph. Duchene-Marullaz and C. Sacre. Traitement statistique de données du vent pour la détermination de l'énergie produite par les systèmes éoliens. pp. 536-560.
- [76] A. Al-Mohamad and H. Karmeh. Wind energy potential in Syria. Renewable Energy, Vol. 28, pp.1039-1046, 2003.
- [77] N. Ndong. Modélisation du potentiel solaire par temps claire à Dakar. Mémoire de DEA, ESP, UCAD, 55 p, 2003.
- [78] Y. Jannot. Thermique solaire. 57p, octobre, 2003.
- [79] Koutroulis E, Kolokotsa D, Potirakis A, Kalaitzakis K (2006). Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind- generator systems using genetic algorithms. Solar Energy, 80: 1072-88.
- [80] Abedi S, Alimardani A, Gharehpetian GB, Riahy GH, Hosseinian SH (2012). A Comprehensive method for optimal power management and design of hybrid ES-based Autonomous energy systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16:1577-87.
- [81] Yang HX, Lu L, Zhou W (2007). A novel optimization sizing model for hybrid solar wind power generation system. Solar energy, 81(1): 76-84.
- [82] Borowy BS and Salameh ZM (1994). Optimum Photovoltaic Array Size for a Hybrid Wind/PV System. IEEE Transactions on Energy Conversion, 9(3): 482-88.
- [83] B.S. Borowy, Z.M.Salameh. Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and PV array in a wind-PV hybrid system. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.11, pp.367-373, 1996.
- [84] J.K. Kaldellis, K Kavadias and G. Korbakis. The impact of local ambient conditions on the energy production of contemporary wind power stations. Seventh Hellenic conference in meteorology, climatology and atmospheric physics. Nicosia, Cyprus:University of Cyprus, 2004.