



**REPUBLIQUE DU NIGER
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR DE LA
RECHERCHE ET DE L'INNOVATION**



**Université Dan Dicko Dankoulodo de Maradi
Faculté des Sciences et Techniques
Département de Physique**

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DE MASTER

**Spécialité : Système Énergétique Durable pour Société en Développement
(2SED)**

**Thème : Etude et conception d'un système hybride photovoltaïque - éolien
de production d'énergie : Cas de la ville de Maradi**

Présenté par : **DADI MOUSSA Saidou**

Encadré par :
Dr. ELHADJI AMADOU Hamissou

Supervisé par :
Prof. MADOUGOU Saïdou

Soutenu devant le jury composé de :

Prof. SEIDOU H. MAÏGA Amadou, UGB/Sénégal (Président)

Prof. MADOUGOU Saïdou, UAM/Niger (Membre)

Dr. ELHADJI AMADOU Hamissou, Maître-Assistant, UDDM/Niger (Membre)

Année académique : 2019-2020

DEDICACES

*A la mémoire de mon père DADI MOUSSA,
Qu'Allah vous accueille dans son vaste paradis.*

*A ma mère,
Qu'Allah vous garde toujours près de moi.*

*A ma femme,
Qu'Allah bénisse d'avantage notre union.*

REMERCIEMENTS

Avant tout, je remercie Allah, le tout puissant de m'avoir donné la force nécessaire pour mener à terme ce travail ;

*Ensuite, Je voudrais exprimer ma reconnaissance au **Docteur Elhadji Amadou Hamissou**, chef de département de Physique adjoint à l'Université Dan Dicko Dankoulodo de Maradi, pour son encadrement efficace, son soutien, et sa disponibilité. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude ;*

*J'adresse mes vifs remerciements au **Prof. MADOUGOU Saidou**, UAM / Niger pour la supervision de mon travail.*

*Je remercie tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté pour mon travail : **Prof. SEIDOU H. MAIGA Amadou**, UGB / Sénégal de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de master.*

***Prof. MADOUGOU Saidou**, UAM / Niger pour sa participation au jury, sa gentillesse et sa bonne humeur.*

Mes remerciements vont également à l'ensemble des enseignants et chercheurs de l'Université Dan Dicko Dankoulodo de Maradi plus particulièrement ceux de département de Physique ayant contribué à ma formation ;

J'exprime ma profonde gratitude à tous les membres de ma famille de m'avoir toujours encouragé et soutenu ;

Enfin, je remercie, tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire, qu'ils trouvent ici, l'expression de ma profonde gratitude.

RESUME

La demande croissante de l'énergie et le problème de l'environnement constituent notre réelle motivation de concevoir un système hybride de production d'électricité en utilisant des sources d'énergie renouvelables dont le solaire et le vent. Notre projet de mémoire de fin d'études est destiné à concevoir un système hybride photovoltaïque-éolien de 7,26 MW raccordé au réseau afin de contribuer à satisfaire la charge du système électrique de la région et de réduire la dépendance énergétique de la ville. Pour ce faire, des recherches documentaires, une descente sur le terrain sont entreprises avant toute rédaction. Avec les données ainsi récoltées, les dimensionnements des générateurs solaire et éolien sont effectués. Etant donné que Maradi est une région bien ensoleillée en générale et la ville en particulier, la charge est répartie comme suit : 75% pour le générateur photovoltaïque soit 5 445 kW et 25% de la charge pour le générateur éolien soit 1 815 kW. Le champ photovoltaïque est composé de 29 019 modules photovoltaïques monocristallins ayant une capacité de produire une puissance crête de 330 Wc chacun, dont dix-sept (17) en séries et mille sept cent sept (1 707) en parallèles et d'un onduleur centralisé de 9,2 MW. Le parc éolien comprend dix-neuf (19) éoliennes de puissance unitaire 100 KW. La taille du rotor d'une éolienne est de 48 m et la taille du mat est de 37 m de hauteur. Le coût du projet s'élève à un montant de trois milliards cinq cent quatre-vingt-douze millions huit cent cinq mille francs CFA (3 592 805 000 F), un coût trouvé, en se basant essentiellement sur le prix des principaux composants du système.

Mots clés: Système photovoltaïque, Système éolien, Système hybride photovoltaïque-éolien, Dimensionnement, Technico-économique

ABSTRACT

The growing demand for energy and the environment are our real motivation to design a hybrid system for producing electricity using renewable energy sources including solar and wind. Our final thesis project is intended to design a 7,26MW hybrid photovoltaic-wind system connected to the grid in order to help satisfy the region's electricity system and reduce the city's energy dependence. To do this, documentary research and a field trip are undertaken before any writing. With the data thus collected, the sizing of the solar and wind generators are carried out. Given that Maradi is a very sunny region in general and the city in particular, the load is distributed as follows : 75% for the photovoltaic generator or 5 445 kW and 25% of the load for the wind generator or 1 815 kW : the photovoltaic field is composed of 29,019

monocrystalline photovoltaic modules with a capacity to produce a peak power of 330Wp each, including 17 in series and 1 707 in parallel and a centralized inverter of 9.2 MW. The wind farm includes 19 wind turbines of 100 kW unit power. The rotor size of a wind turbine is 48m, and the mast size is 37 m high. The cost of the project amounts to an amount of three billion five hundred and ninety-two million eight hundred and five thousand CFA francs, a cost found, based essentially on the price of the main components of the system.

Keywords : Photovoltaic System, Wind System, Photovoltaic-Wind Hybrid System, Sizing, Optimization, Technical and Economic.

Sommaire

Table des matières

<i>DÉDICACES</i>	i
<i>REMERCIEMENTS</i>	ii
RESUME	iii
LISTE DES TABLEAUX	viii
LISTE DES FIGURES	ix
SIGLES ET ABREVIATIONS	x
Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables (solaire et éolien)	
Introduction Générale	2
Introduction	5
1.1 Energie Solaire Photovoltaïque	5
1.1.1 Définition	5
1.1.2 Cellules photovoltaïques	6
1.1.3 Circuit équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque	7
1.1.3 Fonctionnement des cellules photovoltaïques	8
1.1.4 Différents types des cellules photovoltaïques	8
1.1.5 Modules (ou panneaux)	10
1.1.6 Générateur photovoltaïque :	10
1.1.7 Conversion de l'énergie solaire photovoltaïque	13
1.1.7.1 Chaîne de conversion électrique	13
1.2 Energie Eolienne :	14
1.2.1 Définition	14
1.2.2 Principaux composants d'une éolienne	14
1.2.3 Puissance fournie par un aérogénérateur	16
1.2.3.1 Potentiel éolien disponible	16
1.2.3.2 Puissance moyenne récupérable	16
1.2.4 Différents types d'éoliennes	20
1.2.4.1 Eoliennes à axe horizontal	20
1.2.4.2 Eoliennes à axe vertical	21

1.2.4.3 Principe de fonctionnement des éoliennes	22
1.3 Energies solaire et éolienne au Niger	23
1.3.1 Potentiels solaires et éoliens :	23
1.3.2 Energie solaire photovoltaïque	23
1.3.3 Energie éolienne	24
Conclusion	24
Chapitre II : Caractéristiques du système hybride photovoltaïque-éolien	
Introduction	26
2.1 Définition du système d'énergie hybride (S.E.H)	26
2.3 Présentation du système hybride photovoltaïque-éolien	26
2.4 Principaux composants du Système d'énergie hybride (PV-E)	27
2.5 Descriptions des composants du système hybride photovoltaïque-éolien	28
2.5.1 Générateurs photovoltaïques	28
2.5.2 Générateur éolien	28
2.5.3 Systèmes de stockage	29
2.5.4 Convertisseurs	29
2.5.5 Charges	30
Conclusion	30
Chapitre III : Analyse Technico-Economique du système Hybride (PV/E) raccordé au réseau	
Introduction	32
3.1 Détermination de la puissance crête	32
3.2 Dimensionnement du champ photovoltaïque	33
3.2.1 Evaluation du besoin énergétique	33
3.2.2 Calcul de la puissance nominale du champ photovoltaïque	34
3.2.3 Détermination de nombre des modules à installer	35
3.2.4 Dimensionnement de l'onduleur	37
3.2.5 Dimensionnement des câbles :	38
3.3 Dimensionnement de la taille du générateur éolien	40
3.3.1 Dimensionnement de la longueur des pales	41
3.3.2 Détermination de la taille du mat	44
3.4 Analyse économique du système	44
3.5 Résultats et discussions	45
Conclusion	46

Conclusion générale	49
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	I
ANNEXES	I
Annexe 1 : LE SCHEMA ELECTRIQUE DE LA REGION DE MARADI.....	IV
Annexe 2 : COMPTEUR NUMERIQUE DE LA NIGELEC CENTRALE DE MARADI	V

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Comparaisons de trois principales technologies des capteurs.....	9
Tableau 3.1 : Caractéristiques des modules.....	35
Tableau 3.2 : Valeurs du coefficient de gradient vertical de la vitesse du vent en fonction de la topographie	
Tableau 3.3 : coût du système	45
Tableau 3.4 : Résumé de dimensionnement des panneaux solaires	46
Tableau 3.5 : Résumé de dimensionnement de l'onduleur.....	46
Tableau 3.5 : Résumé de dimensionnement l'éolienne.....	46

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : <i>Système Photovoltaïque</i>	6
Figure 1.2 : <i>Coupe transversale d'une cellule PV typique</i>	7
Figure 1.3 : <i>circuit équivalent de la cellule solaire</i>	7
Figure 1.4 : <i>Cellules, module et panneau photovoltaïque</i>	10
Figure 1.5 : <i>Caractéristiques résultantes d'un groupement de ns cellules en série</i>	11
Figure 1.6 : <i>Caractéristiques résultant d'un groupement de np cellules en parallèle</i>	12
Figure 1.7 : <i>Installation photovoltaïque autonome</i>	13
Figure 1.8 : <i>Conversion de l'énergie cinétique du vent</i>	14
Figure 1.9 : <i>Tube de courant autour d'une éolienne</i>	17
Figure 1.10 : <i>Coefficient de puissance</i>	18
Figure 1.11 : <i>Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes</i>	19
Figure 1.12 : <i>configuration à axe horizontal</i>	21
Figure 1.13 : <i>éolienne de type Darrieus et Savonius</i>	22
Figure 2.1 : <i>Schéma synoptique du système hybride (PV-E)</i>	27
Figure 3.1: <i>Courbes du coefficient de puissance selon le type du rotor</i>	41

SIGLES ET ABRÉVIATIONS

CA : Courant alternatif

CC : Courant continu

C_{pv} : Coût des modules photovoltaïques

C_{eol} : Coût du générateur éolien

E_c : Energie cinétique du vent

E_{total} : Energie totale

F : Facteur de charge

GPV : Générateur photovoltaïque

H_T : Irradiation solaire mensuelle moyenne sur une surface inclinée

H : Irradiation mensuelle moyenne sur une surface horizontale

I_{cc} : Courant de court-circuit

PV-E : Photovoltaïque-Eolien

PPM : Point de puissance maximal

P_m : Puissance extraite

P_{disp} : Puissance disponible

P_{rec} : Puissance récupérable

P_{max} : Puissance maximale

S.E.H : Système d'énergie hybride

V : Vitesse du vent

V_{co} : Tension de circuit ouvert

UCP : Unité de Couplage Parallèle

MW : Mégawatts

PV : Photovoltaïque

Introduction Générale

Introduction Générale

L'énergie est la base de toute activité humaine. De nos jours, une grande partie de la demande mondiale en énergie est assurée à partir de ressources fossiles. Cependant, les réserves de combustibles fossiles sont limitées. Certains pays développés se sont orientés vers l'énergie nucléaire, alors que cette dernière n'est pas à la portée de tous les états et surtout des pays en voie de développement et présente des risques d'accidents graves.

En effet, la croissance de la demande énergétique mondiale, l'épuisement inévitable des ressources fossiles, à plus ou moins long terme, et la détérioration de l'environnement causée par ces types d'énergies, a incité au développement de nouvelles sources d'énergies, renouvelables, assurant ainsi une durabilité et une protection de l'environnement qui est devenue un point très important [1].

Les énergies renouvelables sont devenues une forme d'énergie indispensable par leur souplesse, la simplicité d'utilisation et la multiplicité des domaines d'activités où elles sont appelées à jouer un rôle. Ces modes de production ainsi que les moyens de distribution associés sont amenés à subir de profonds changements au cours des prochaines décennies.

Disponibles en quantité supérieure aux besoins énergétiques actuels de l'humanité, les ressources d'énergie renouvelable représentent par ailleurs une chance pour plus de deux milliards de personnes, habitant des régions isolées, d'accéder à l'électricité. Ces atouts, alliés à des filières de plus en plus performantes, favorisent le développement des énergies renouvelables.

L'utilisation d'un aérogénérateur ou un système photovoltaïque peut ne pas subvenir à lui seul aux besoins énergétiques souhaités. En effet, l'énergie éolienne ou l'énergie solaire peut nous faire défaut au moment où nous en avons le plus besoin. Pour assurer le fonctionnement d'une installation durant toute l'année, on envisage l'utilisation d'un système d'appoint [2].

Plusieurs travaux ont été réalisés en utilisant comme système d'appoint un groupe électrogène ou autre dont le fonctionnement dans ces installations est lié à la nature des besoins. Un système d'appoint à base d'énergie fossile réduit la capacité de stockage nécessaire et le coût, mais d'une part, il nécessite la maintenance et le carburant et d'autre part, il présente comme inconvénients le bruit et la pollution.

Pour un développement écologique et économique, le couplage d'un système photovoltaïque - éolien (PV-E) peut être très intéressant lorsque les conditions locales sont favorables du point de vue vent et ensoleillement [3].

Considérant leurs caractéristiques saisonnières respectives, ces deux énergies ne se concurrencent pas mais au contraire peuvent se valoriser mutuellement. C'est pourquoi on propose ici un système hybride composé de ces deux sources d'énergie, qui consiste en l'exploitation optimale de la complémentarité entre elles.

L'objectif principal de notre travail est d'effectuer le dimensionnement et l'analyse technico-économique d'un système hybride photovoltaïque-éolien raccordé au réseau qui contribue à l'alimentation de la ville de Maradi en énergie électrique.

Le travail est présenté en trois chapitres :

Le premier chapitre présente et expose les deux sources d'énergies renouvelables : l'énergie solaire et éolienne, ainsi que le principe de fonctionnement des systèmes qui les entraînent.

Le deuxième chapitre sera consacré à une étude qui décrira et justifiera les différentes composantes d'un système hybride photovoltaïque-éolien en question.

Le troisième chapitre sera consacré à l'analyse technico économique des résultats de la conception du système hybride (photovoltaïque-éolien) raccordé au réseau pour la ville de Maradi.

Enfin, nous achèverons notre travail par une conclusion générale suivi d'un récapitulatif des principaux résultats obtenus.

Chapitre I

*Généralités sur les énergies renouvelables :
solaire et éolien*

Introduction

On appelle énergie renouvelable un ensemble de sources d'énergie qui sont inépuisables à l'échelle humaine, largement disponibles, essentiellement gratuites et sont compatibles avec un certain respect environnemental. Elles peuvent être converties, selon les besoins, en électricité ou en chaleur. La cogénération d'électricité et de chaleur est possible dans le cas de la géothermie, de la biomasse et de l'énergie solaire.

- ✓ Le solaire est une utilisation directe des rayons du soleil pour produire chaleur ou électricité.
- ✓ La biomasse regroupe l'ensemble des énergies provenant de la dégradation de la matière organique. C'est de l'énergie solaire transformée par les plantes chlorophylliennes qui sont utilisées soit directement (bois de chauffage) soit après de nouvelles transformations chimiques (biogaz, biocarburant).
- ✓ L'éolienne utilise l'énergie du vent de manière mécanique.
- ✓ La géothermie est l'utilisation directe des gradients des températures terrestres ou de sources chaudes.

Dans ce premier chapitre, nous allons décrire les différentes caractéristiques des deux énergies renouvelables étudiées dans ce mémoire : le solaire photovoltaïque et l'éolien.

1.1 Energie Solaire Photovoltaïque

1.1.1 Définition

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant de photons, compris dans le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en énergie électrique. Elle utilise pour ce faire des modules photovoltaïques composés de cellules ou de photopiles fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible qui réalisent cette transformation d'énergie. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique statique courant-tension $I(V)$ non linéaire et présentant un point de puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble [4].

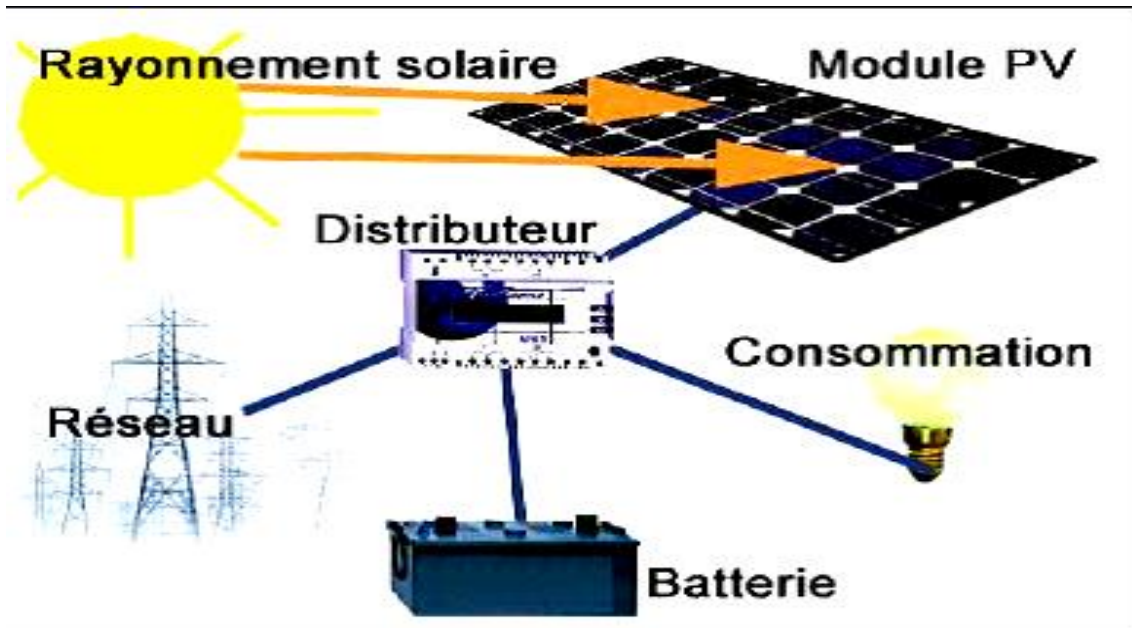


Figure 1.1 : Système Photovoltaïque. [5]

1.1.2 Cellules photovoltaïques

La cellule photovoltaïque est un moyen de conversion de la lumière en énergie électrique par le processus « effet photovoltaïque ». Elle est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction P-N avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction P-N de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. A travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs. La tension maximale de la cellule est d'environ 0,6V pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert (V_{co}), (Voir Figure I.2). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit (I_{cc}) et dépend fortement du niveau d'éclairement [4].

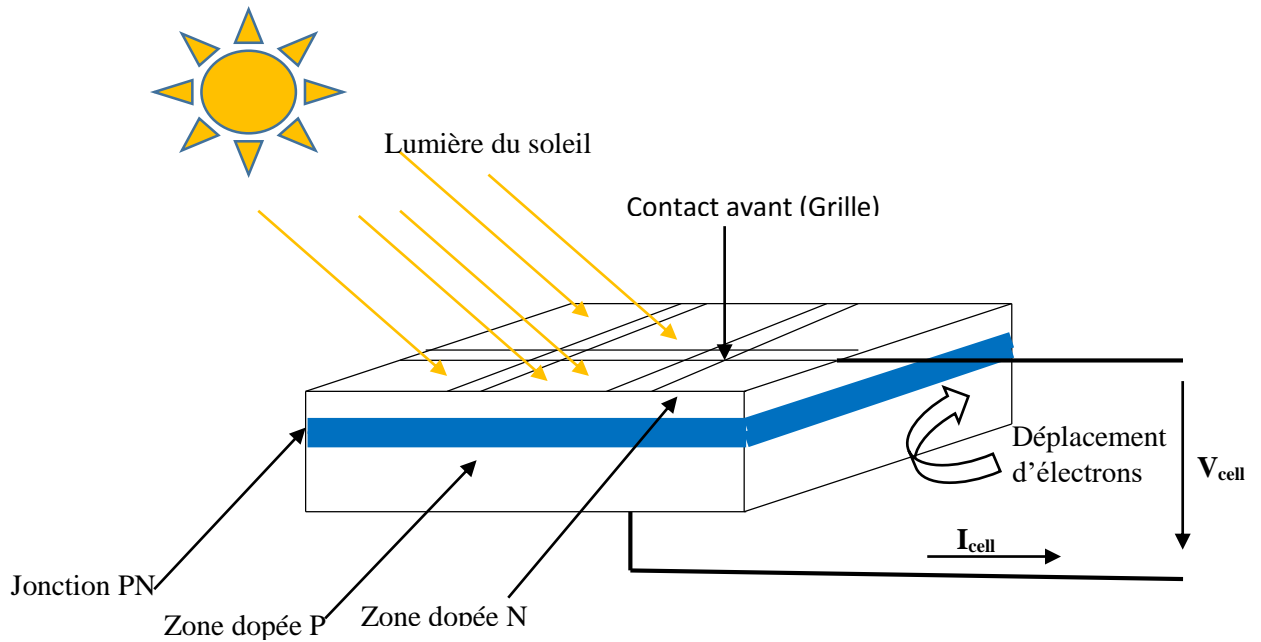


Figure 1.2 : Coupe transversale d'une cellule PV typique [4].

1.1.3 Circuit équivalent d'une cellule solaire photovoltaïque

Dans la littérature, une cellule photovoltaïque est souvent présentée comme un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à une source de courant shuntée par une diode. Pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, le modèle est complété par deux résistances série R_s et R_{sh} (voir figure 1.3).

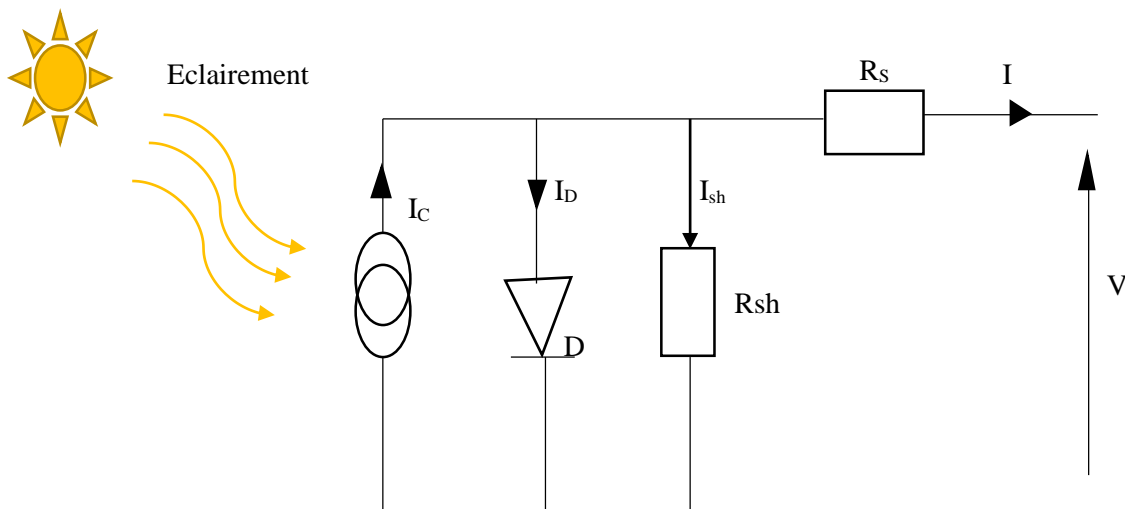


Figure 1.3 : circuit équivalent de la cellule solaire [4].

La cellule comporte une résistance série R_s et une résistance en dérivation ou Shunt R_{sh} . Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique de la photopile :

La résistance série est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles ;

La résistance shunt est une conséquence de l'état de surface le long de la périphérie de la cellule ; elle est réduite à la suite de pénétration des impuretés métalliques dans la jonction (surtout si elle est profonde), lors du dépôt de la grille métallique ou des prises de contacts sur la face diffusée de la cellule [20].

1.1.3 Fonctionnement des cellules photovoltaïques

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Le régime photovoltaïque est un régime où aucun potentiel n'est appliqué, mais où un courant circule à travers une charge.

Le système développe donc une puissance électrique. Le principe de fonctionnement de la cellule fait appel aux propriétés du rayonnement et celles des semi-conducteurs.

La conversion de photons en électrons dans un matériau pouvant produire un courant électrique nécessite :

- ✓ Absorption des photons par le matériau (absorption optique) et la génération des porteurs de charges.
- ✓ Collecte des porteurs excités avant qu'ils ne reprennent leur énergie initiale (relaxation).

Une cellule photovoltaïque produit une tension de 0,5V en circuit ouvert. L'intensité du courant fourni par cette cellule dépend des conditions environnantes et en fonction de la charge [4].

1.1.4 Différents types des cellules photovoltaïques

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres.

Cependant, quel que soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent. Actuellement, il existe trois principaux types de cellules tableau 1.1 [7]:

Tableau 1.1 : Comparaisons de trois principales technologies des capteurs [7]

Technologie	Monocristallin	Polycristallin	Amorphe
Cellule et module			
Caractéristiques	<ul style="list-style-type: none"> • Très bon rendement : 14 à 20 %. • Durée de vie : importante (30 ans) • Coût de fabrication : élevé. • Puissance : 100 à 150 Wh/m². 7 m²/kWh. • Rendement faible Sous un faible éclairement. • perte de rendement avec l'élévation de la température. • Fabrication : élaborés à partir d'un bloc de silicium fondu qui s'est solidifié en formant un seul cristal • Couleur bleue uniforme. 	<ul style="list-style-type: none"> • Bon rendement : 11 à 15 %. • Durée de vie : importante (30 ans) • Coût de fabrication : meilleur marché que les panneaux monocristallins • Puissance : 100 Wh/m². 8 m²/kWh. • Rendement faible sous un faible éclairement. • perte de rendement avec l'élévation de la température. • Fabrication : élaborés à partir de silicium de qualité électronique qui en se refroidissant forme plusieurs cristaux. • Ces cellules sont bleues, mais non uniforme : on distingue des motifs créés car les différents cristaux. 	<ul style="list-style-type: none"> • Rendement faible : 5 à 9 %. • Durée de vie : assez importante (20 ans) • Coût de fabrication : peu onéreux par rapport aux autres technologies • Puissance : 50 Wh/m². 16 m²/kWh. • Fonctionnement correct avec un éclairage faible. • Peu sensible aux températures élevées. • Utilisables en panneaux souples. • Surface de panneaux plus importante que pour les autres panneaux au silicium. • Rendement faible en plein soleil. • Performances diminuant avec le temps. • Fabrication : couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.
Part de marché	43%	47%	10%

1.1.5 Modules (ou panneaux)

Typiquement une cellule photovoltaïque produit moins de 2 watts sous approximativement 0,5 Volt. Alors Pour produire plus de puissance les cellules sont assemblées pour former un module. Une association série de plusieurs cellules donne un module et une association série et/ou parallèle de plusieurs modules permet de réaliser un panneau photovoltaïque (Voir Figure I.4). [8]

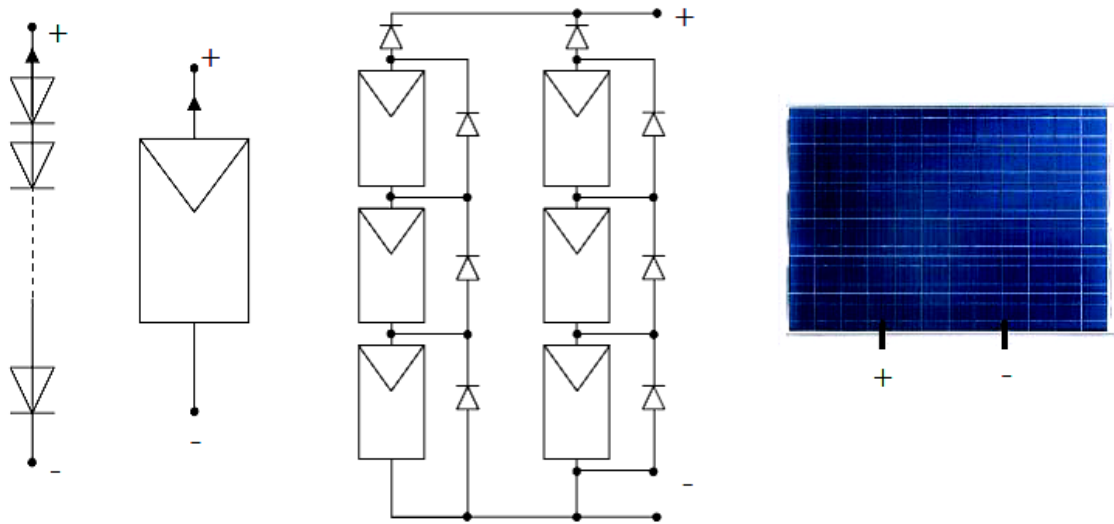


Figure I.4 : Cellules, module et panneau photovoltaïques. [4]

1.1.6 Générateur photovoltaïque :

Dans des conditions d'ensoleillement standard (1000W/m^2 ; 25°C ; AM1.5), la puissance maximale délivrée par une cellule silicium de 150 cm^2 est d'environ $2,3\text{Wc}$ sous une tension de $0,5\text{V}$. Une cellule photovoltaïque élémentaire constitue donc un générateur électrique de faible puissance insuffisante en tant que telle pour la plupart des applications domestiques ou industrielles. Les générateurs photovoltaïques sont, de ce fait réalisés par association, en série et/ou en parallèle, d'un grand nombre de cellules élémentaires [4].

$$V_{\text{co}(n_s)} = n_s \cdot V_{\text{co}} \quad \text{avec} \quad I_{\text{cc}} = I_{\text{cc}(n_s)} \quad (1.1)$$

Une association de n_s cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, (Voir Figure 1.5). L'équation (1.1) résume les caractéristiques électriques d'une association série de n_s cellules.

Ce système d'association est généralement le plus communément utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce. Comme la surface des cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible. L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble. Les panneaux commerciaux constitués de cellules de première génération sont habituellement réalisés en associant 36 cellules en série ($V_{co(n_s)} = 0,6 \times 36 = 21,6V$) afin d'obtenir une tension optimale du panneau V_{opt} proche de celle d'une tension de batterie de 12V.

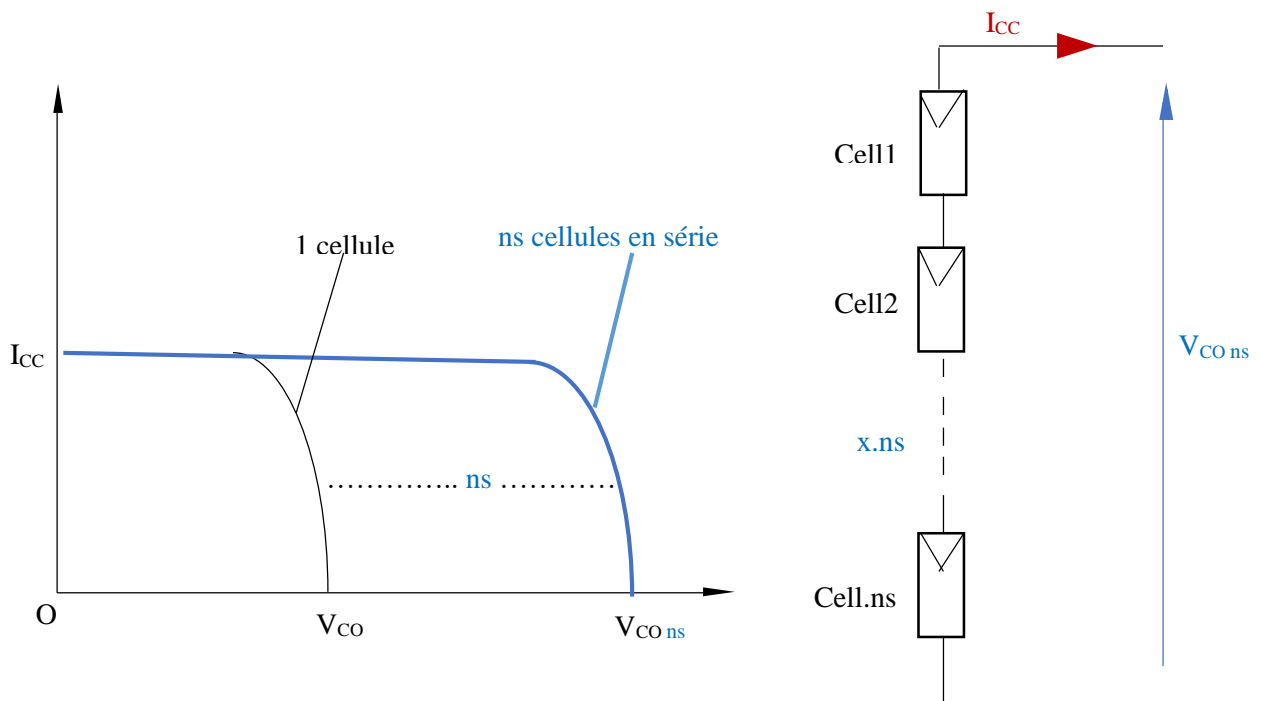


Figure 1.5 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de n_s cellules en série [4].

D'autre part, une association parallèle de n_p cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants, (Voir Figure 1.6). L'équation (1.2) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de n_p cellules.

$$I_{SC(n_p)} = n_p \times I_{SC} \quad \text{avec} \quad V_{CO(n_p)} = V_{CO} \quad (1.2)$$

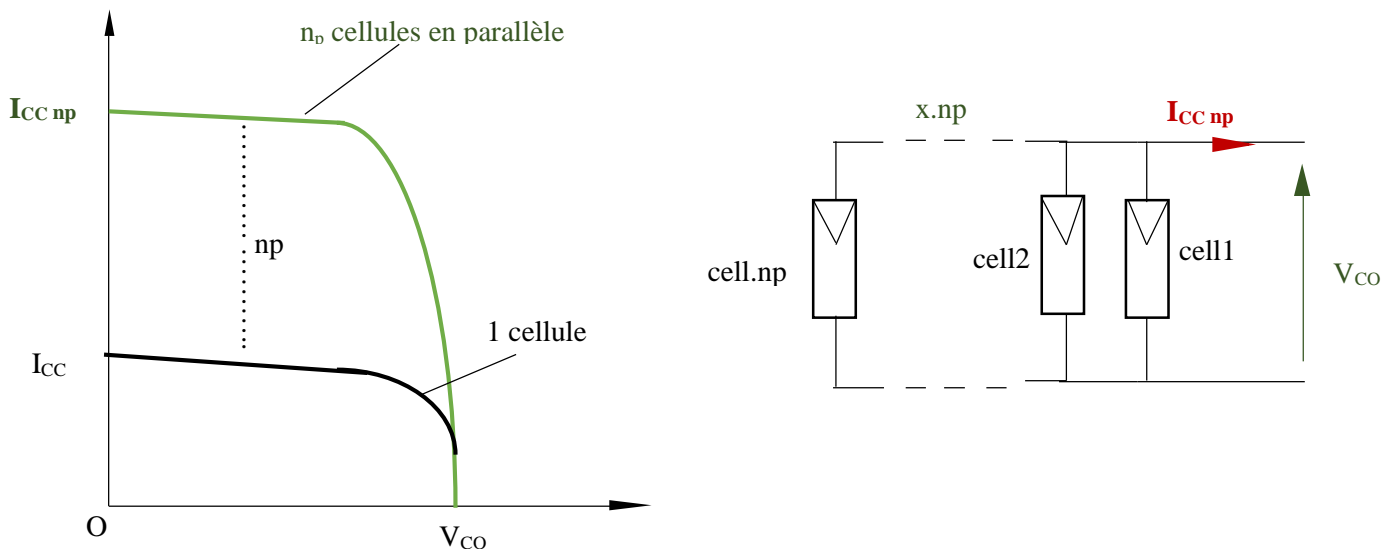


Figure 1.6 : Caractéristiques résultant d'un groupement de n_p cellules en parallèle [4].

Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaités.

Ainsi, pour n_s cellules en série, constituant des branches elles-mêmes n_p en parallèle, la puissance disponible en sortie du générateur PV est donnée par :

$$P_{pv} = n_s V_{pv} \cdot n_p I_{pv} \quad (1.3)$$

Si l'on désire avoir un générateur PV ayant un courant de sortie plus intense, on peut soit faire appel à des cellules PV de plus grande surface et de meilleur rendement, soit associer

en parallèle plusieurs modules PV de caractéristiques similaires. Pour qu'un générateur PV ainsi constitué puisse fonctionner de façon optimale, il faut que les (n_s , n_p) cellules se comportent toutes de façon identique. Elles doivent pour cela être issues de la même technologie, du même lot de fabrication et qu'elles soient soumises aux mêmes conditions de fonctionnement (éclairage, température, vieillissement et inclinaison).

La puissance du générateur PV sera optimale si chaque cellule fonctionne à sa puissance maximale notée P_{max} . Cette puissance est le maximum d'une caractéristique $P(V)$ du générateur, et correspond au produit d'une tension optimale notée V_{opt} et d'un courant optimal noté I_{opt} [5]. Cette caractéristique dépend fortement de l'éclairage auquel est soumis le générateur et de sa température.

1.1.7 Conversion de l'énergie solaire photovoltaïque

1.1.7.1 Chaîne de conversion électrique

Dans le cas d'installations autonomes, l'énergie produite par les panneaux solaires photovoltaïques est utilisée immédiatement (pompage, ventilation, etc...) ou stockée dans des batteries pour une utilisation différée (Voir Figure I.6). Le courant continu produit alimente directement des appareils prévus à cet effet ou est transformé en 230 Volts alternatif [8].

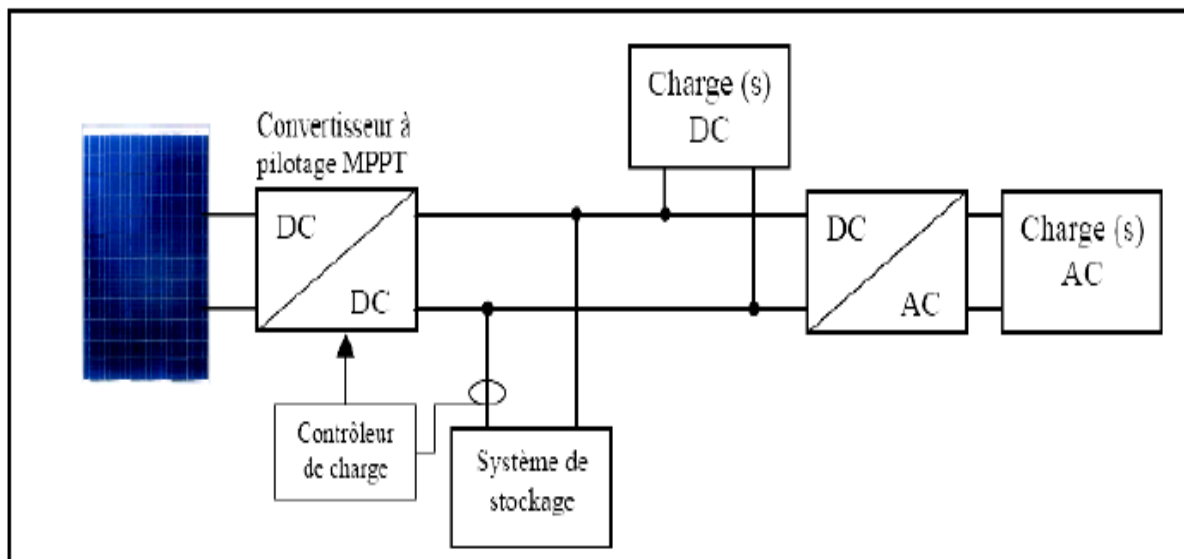


Figure 1.7 : Installation photovoltaïque autonome. [8]

1.2 Energie Eolienne :

1.2.1 Définition

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'un générateur [21].

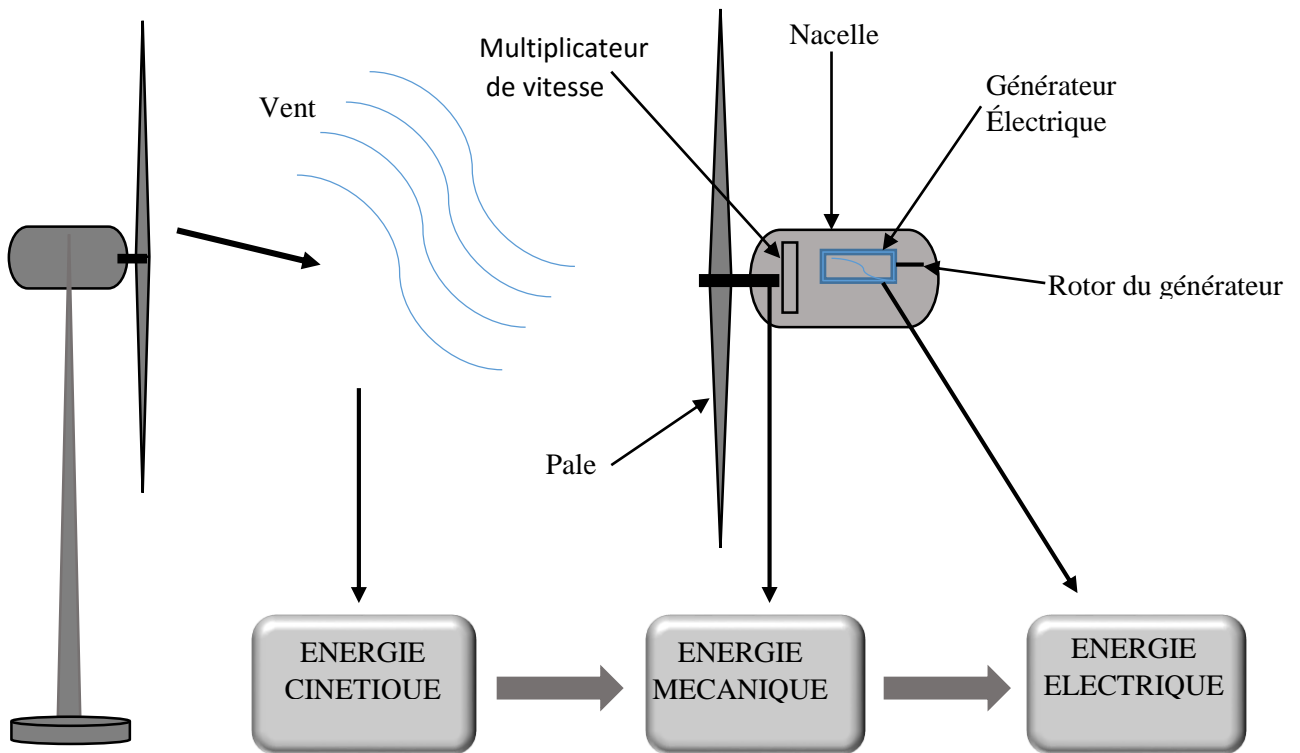


Figure 1.8 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [21]

1.2.2 Principaux composants d'une éolienne

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux:

- ✓ Le mât, généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière

mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur (exemple : éolienne NORDEX N90 2,3 MW: diamètre de 90m, mât de 80 m de hauteur).

- ✓ La nacelle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne.
- ✓ Le rotor, formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit [3]. Les rotors à vitesse fixe sont souvent munis d'un système d'orientation de la pale permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Ce système allie ainsi simplicité et faible coût.

Les rotors à vitesse variable sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié voire supprimé (La société Jeumont Industrie utilise un rotor à pas fixe). Toutefois, une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge est nécessaire. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites tels la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique).

1.2.3 Puissance fournie par un aérogénérateur

1.2.3.1 Potentiel éolien disponible

L'énergie cinétique d'une masse d'air m qui se déplace avec la vitesse V , est:

$$E_c = \frac{1}{2} mV^2 \quad (1.4)$$

Si cette énergie pouvait être complètement récupérée à l'aide d'un dispositif ayant la surface A ($A = \pi R^2$), situé perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent

Le potentiel éolien moyen disponible sur un site est donnée par:

$$P_{\text{disp}} = \frac{1}{2} \rho AV^3 \quad (1.5)$$

ρ : densité de l'air

1.2.3.2 Puissance moyenne récupérable

En réalité, le dispositif de conversion (turbine éolienne) extrait une puissance P_{rec} inférieure à la puissance disponible P_{disp} . Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure (1-3) sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval.

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 .

Soit $(V_1+V_2)/2$ est la vitesse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est :

$$m = \frac{\rho S(V_1 + V_2)}{2} \quad (1.6)$$

La puissance P_m alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$P_m = \frac{m(v_1^2 - v_2^2)}{2} \quad (1.7)$$

Soit en remplaçant m par son expression dans (1.1):

$$P_m = \frac{\rho S (v_1 + v_2)(v_1^2 - v_2^2)}{4} \quad (1.8)$$

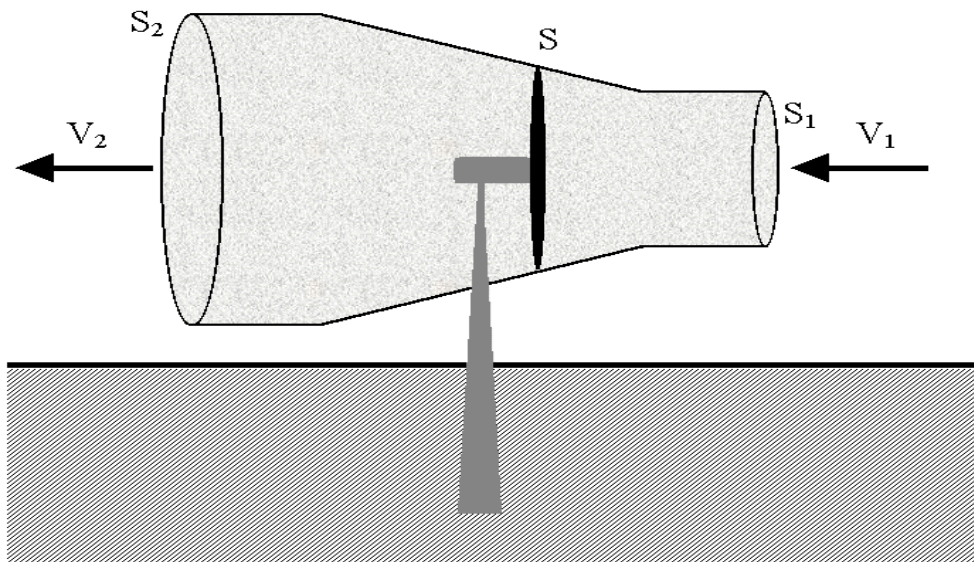


Figure 1.9 : Tube de courant autour d'une éolienne [11]

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance P_{mt} correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (1.9)$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{v_1}{v_2}\right)\right)\left(1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^2\right)}{2} \quad (1.10)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (Figure 2), on s'aperçoit que le ratio P_m/P_{mt} appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maxima de $16/27$ soit $0,59$. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée.

$$P_{rec} = \frac{1}{2} C_p \rho A V^3 \quad (1.11)$$

En prend en considération la limite de Betz et en remplaçant la densité de l'air par sa valeur moyenne, la moyenne maximale récupérable par unité de surface est donnée par [10] :

$$P_{rec} = 0,37 V^3 \quad (1.12)$$

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V} \quad (1.13)$$

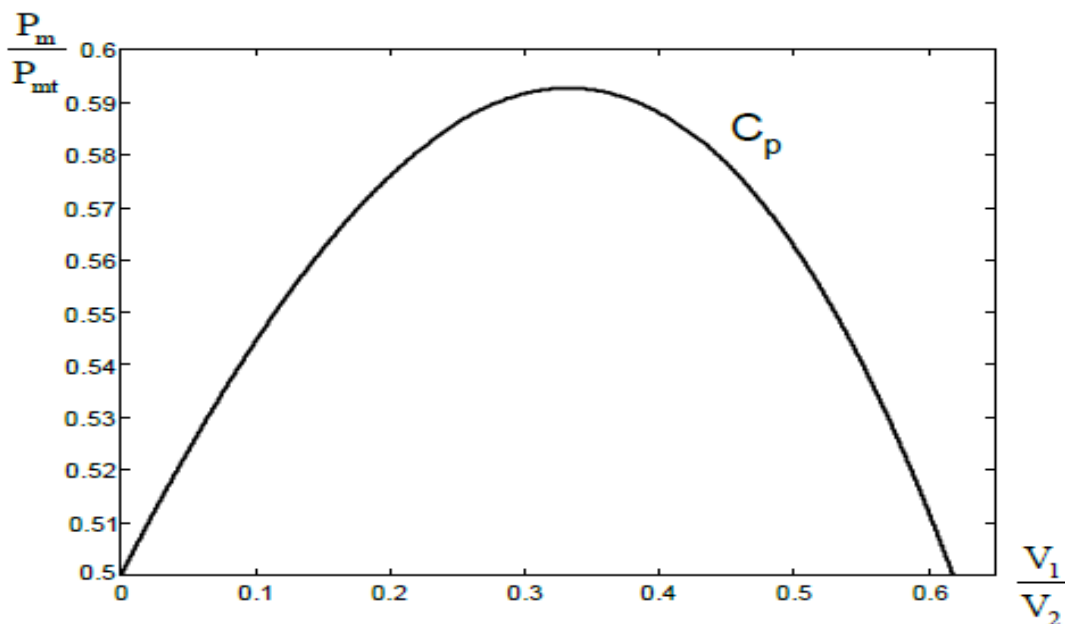


Figure 1.10 : Coefficient de puissance [11]

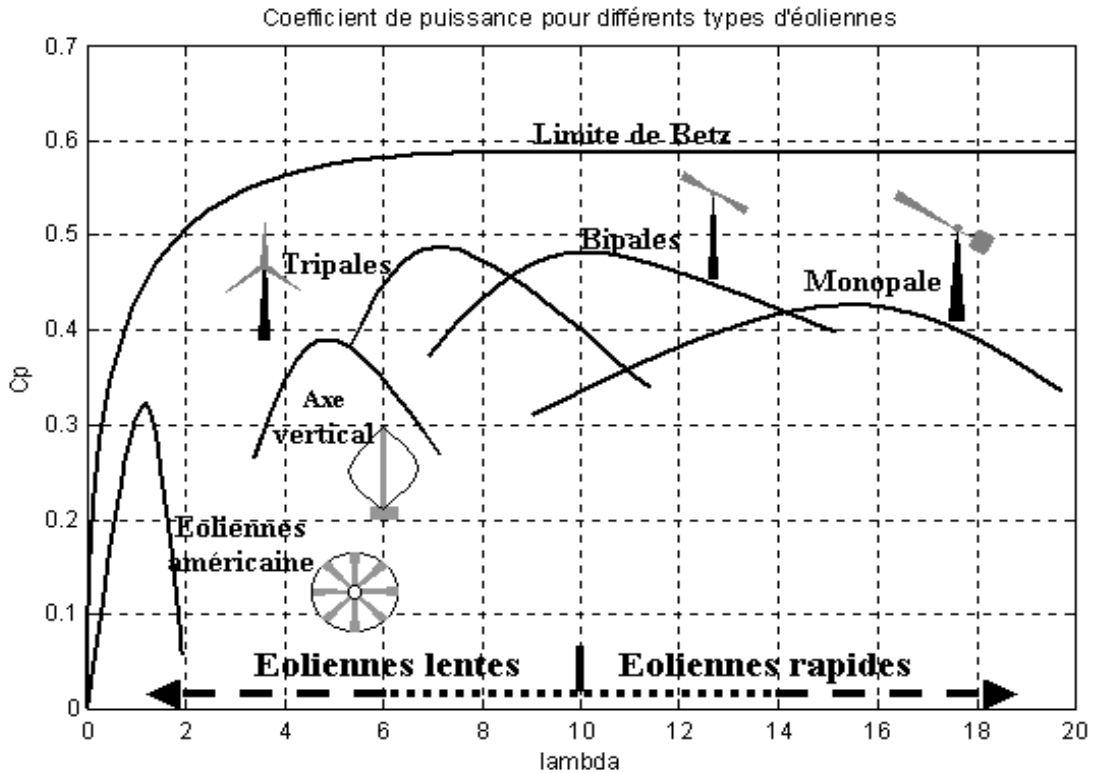


Figure 1.11 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes [11]

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance (Figure I.10) atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite.

Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts.

Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur. De plus, leur coefficient de puissance (Figure 1.10) atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au-dessous d'une vitesse de vent de 3 m/s [11].

1.2.4 Différents types d'éoliennes

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal :

1.2.4.1 Eoliennes à axe horizontal

Ce sont les machines les plus répandues actuellement du fait de :

- ✓ Leur rendement est supérieur à celui de toutes les autres machines. Elles sont appelées éoliennes à axe horizontal car l'axe de rotation du rotor est horizontal, parallèle à la direction de vent. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales, ou des hélices multi pales pour le pompage de l'eau.
- ✓ Elles ont un rendement élevé.
- ✓ Les éoliennes à axe horizontal (ou à hélice) sont de conception simple. Sur la base du nombre de pales que compte l'hélice, on peut distinguer deux groupes:
 - *les éoliennes à rotation lente "multi pales"*

Elles sont, depuis longtemps, relativement répandues dans les campagnes, et servent quasi-exclusivement au pompage de l'eau.

- *Aérogénérateurs*

Les éoliennes à rotation rapide, bi- ou tripales en général, constituent actuellement la catégorie des éoliennes en vogue, et sont essentiellement affectées à la production d'électricité, d'où leur nom le plus courant "**d'aérogénérateurs**".

Parmi les machines à axe horizontal parallèle à la direction du vent, il faut encore différencier l'aérogénérateur dont l'hélice est en amont de machine par rapport au vent « *hélice au vent* » et celle dont l'hélice est en aval de la machine par rapport au vent « *hélice sous le vent* ».

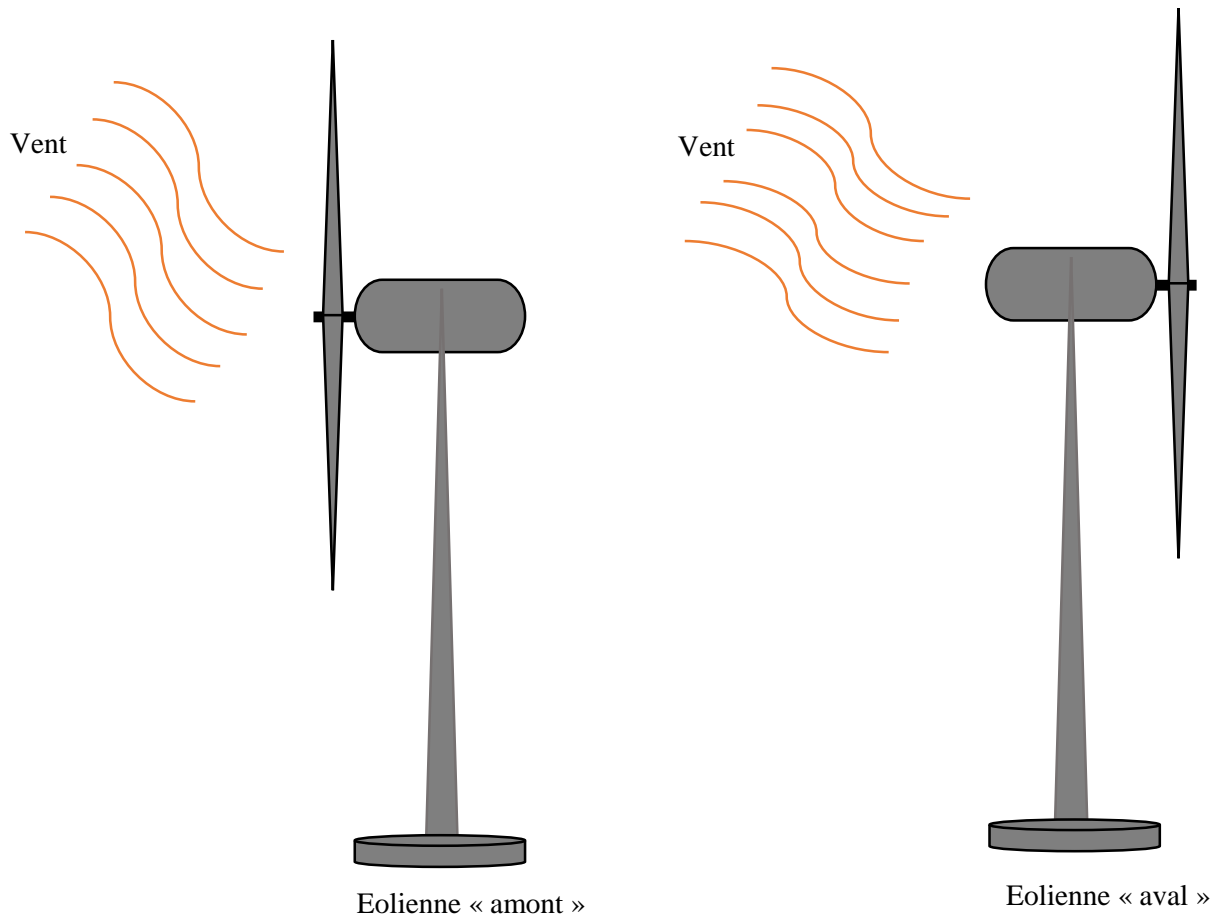


Figure 1.12 : configuration à axe horizontal [21]

1.2.4.2 Eoliennes à axe vertical

Pour ces capteurs, l'axe de rotation est vertical et perpendiculaire à la direction du vent, et sont les premières structures développées pour produire de l'électricité. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol, donc elles sont facilement accessibles. Elles sont adaptées à tous les vents et ne nécessitent pas de dispositif d'orientation. Deux d'entre elles sont particulièrement remarquables : Savonius et Darrieus.

✓ L'éolienne Savonius comporte principalement deux demi cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre. Comme les machines à aubes, elle utilise essentiellement la traînée pour tourner. Cette machine présente deux avantages :

- Elle est simple à fabriquer

- Elle démarre avec des vitesses de vent de l'ordre de 2 m/s
- ✓ L'éolienne inventée par le Français Darrieus est un rotor dont la forme la plus courante rappelle vaguement un fouet à battre les œufs. Cette machine est bien adaptée à la fourniture d'électricité. Malheureusement, elle ne peut pas démarrer seule. Ce type de machine, qui peut offrir les puissances les plus fortes n'a pas connu le développement technologique qu'il méritait à cause de la fragilité du mécanisme encore mal maîtrisée. Toutefois, cela devrait pouvoir être résolu si des efforts supplémentaires étaient faits dans la recherche sur ce sujet.



Éolienne de type Darrieus.



Éolienne de type Savonius.

Figure 1.13 : éolienne de type Darrieus et Savonius [12]

1.2.4.3 Principe de fonctionnement des éoliennes

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes:

- Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique [13].

1.3 Energies solaire et éolienne au Niger

1.3.1 Potentiels solaires et éoliens :

Le Niger possède un ensoleillement important sur toute son étendue avec des maxima dans sa partie nord. L'ensoleillement est assez régulier sauf au mois d'août où il est fortement réduit par la présence de nuages. Les valeurs moyennes mensuelles observées varient de 5 à 7 kWh/m² par jour, et l'insolation moyenne est de 8 heures par jour.

Par ailleurs, le Niger possède des potentiels éoliens intéressants dans le nord du pays avec une vitesse moyenne de 5 m/s alors que la vitesse moyenne dans le sud se situe autour de 2,5 m/s. Cette ressource pourrait être exploitée notamment pour l'exhaure de l'eau à des fins domestique, agricole et pastorale.

1.3.2 Energie solaire photovoltaïque

Les premières utilisations à grande échelle de l'énergie solaire photovoltaïque au Niger ont commencé au milieu des années 1970 avec l'installation de 1 370 postes téléviseurs, alimentés par des modules solaires photovoltaïques, sur toute l'étendue du territoire. À la fin de l'année 1993, la puissance totale atteignait 280 kWc. En 2001, la puissance installée dans le secteur du solaire photovoltaïque est globalement estimée à 435,3 kWc ; en 2010, elle a atteint 4 MW.

L'utilisation la plus importante concerne l'exhaure de l'eau (56,31 %), suivie des télécommunications (21,6 %). La prépondérance de l'exhaure de l'eau s'explique d'une part, par la fiabilité des équipements et leur degré d'automatisation et, d'autre part, par l'importance du secteur hydraulique pour un pays sahélien où l'eau de surface est très rare. Le secteur des télécommunications bénéficie lui aussi du développement de l'énergie solaire photovoltaïque pour alimenter des relais qui se situent naturellement en brousse, loin de toute agglomération.

L'électricité solaire photovoltaïque intervient aussi dans le secteur de la santé pour l'éclairage, la production de froid et le brassage d'air. Elle améliore nettement le service de santé en rendant possible la conservation de vaccins et autres produits pharmaceutiques, en augmentant le confort du personnel médical et des malades, et en créant les conditions de meilleures interventions nocturnes. [2]

1.3.3 Energie éolienne

Le vent est présent au Niger sur l'ensemble du pays avec des vents plus forts et réguliers, et donc exploitables, dans sa partie nord. Les éoliennes sont utilisées pour la production électrique mais elles servent aussi comme force motrice pour l'exhaure de l'eau. Tout comme pour le solaire photovoltaïque, cette technologie s'adapte bien aux besoins ruraux. L'avantage marqué des éoliennes réside dans le coût des équipements qui est sensiblement inférieur à celui des installations équivalentes en photovoltaïques. Cependant, l'indisponibilité et l'instabilité des régimes de vents peuvent limiter son application dans certaines régions du Niger comme les régions plus au sud.

De façon générale, plus l'on se déplace dans le nord du pays plus les régimes de vent augmentent. Les éoliennes nécessitant des vents supérieurs à 2 m/s, seule la partie plus au sud du pays ne serait pas propice à leur utilisation. À la latitude d'Agadez et de Tahoua les régimes de vents permettraient d'utiliser des éoliennes avec des performances plus intéressantes.

Conclusion

Nous avons présenté dans ce présent chapitre d'une part les différentes notions qui entrent dans la conception des deux énergies : solaire photovoltaïque et éolienne. Et d'autre part, nous avons évoquée tous les éléments constitutifs des deux systèmes photovoltaïques et éoliens, ainsi que leurs principes de fonctionnements, ce qui permet d'introduire à l'analyse du système hybride formé par ces deux systèmes au chapitre II.

Chapitre II

Caractéristiques du système hybride
photovoltaïque-éolien

Introduction

Pour un développement durable, le recours à l'utilisation des systèmes énergétiques à sources d'énergies renouvelables est devenu indispensable.

Les solutions technologiques nouvelles proposées par les générateurs hybrides, même si elles sont très complexes comparativement aux solutions courantes mono source, présentent par contre un intérêt évident considérable par leur flexibilité incomparable, leur souplesse de fonctionnement et leur prix de revient vraiment attractif. Cependant, ces solutions exigent au préalable un dimensionnement laborieux basé sur une connaissance approfondie du gisement en énergies renouvelables du site d'implantation à l'amont, une gestion rigoureuse de l'énergie électrique produite à l'aval et un savoir-faire que seule l'expérience dans l'ingénierie des systèmes énergétiques pourra assurer.

Nous allons présenter dans ce chapitre les différentes caractéristiques du système hybride photovoltaïque-éolien, en se basant sur les différentes définitions des constitutifs de ce système.

2.1 Définition du système d'énergie hybride (S.E.H)

Le système hybride de production de l'énergie dans sa vue la plus générale, est celui qui combine et exploite plusieurs sources disponibles facilement mobilisables [14].

Il consiste en l'association de deux ou plusieurs technologies complémentaires de manière à accroître la fourniture d'énergie par une meilleure disponibilité. Les sources d'énergie comme le soleil et le vent ne délivrent pas une puissance constante, et leur combinaison peut permettre de parvenir à une production électrique plus continue. Dans bien de régions, les journées ensoleillées sont en général caractérisées par une activité éolienne faible alors que les vents forts sont observés plutôt lors de journées nuageuses ou la nuit (figure 2.1) [15].

2.3 Présentation du système hybride photovoltaïque-éolien

Dans notre cas précis, le système hybride regroupe deux parties à savoir l'éolienne et les panneaux solaires. Ces deux sources de production de l'énergie sont raccordées au réseau électrique de distribution via un bus CC. Le courant continu produit par le générateur PV est converti en courant alternatif, grâce à l'intégration d'un onduleur centralisé dans le circuit.

En couplant ces systèmes et en les raccordant au réseau électrique, nous aurons alors les avantages suivants :

- Exploitation du système sans interruption;
- Sécurité d'approvisionnement quelles que soient les conditions météorologiques.

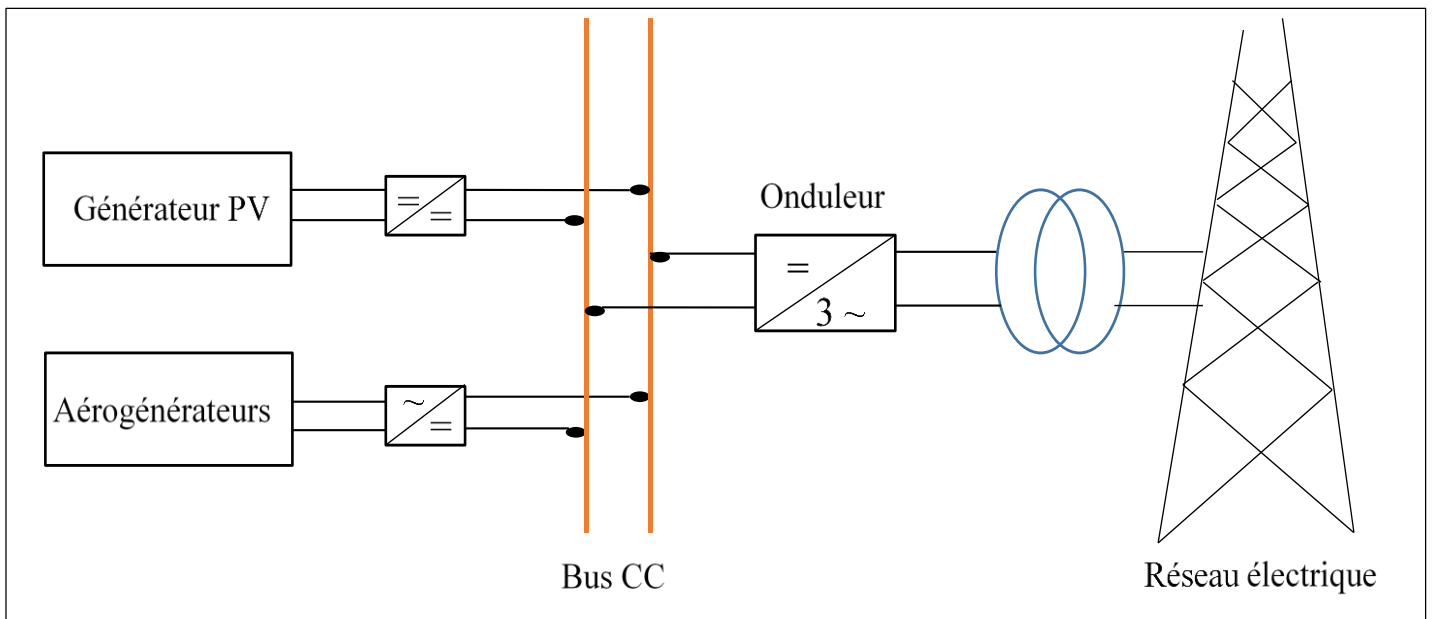


Figure 2.1 : Schéma synoptique du système hybride PV-E raccordé au réseau.

- ✓ L'installation ne nécessite pas de système de stockage d'énergie (batteries d'accumulateurs)
- ✓ Le réseau électrique joue un rôle de système de stockage de capacité infinie

2.4 Principaux composants du Système d'énergie hybride (PV-E)

Les systèmes hybrides photovoltaïque-éolien comprennent généralement :

- Un système générateur ;
- Un système de régulation ;
- Un système de stockage ;
- Des équipements de puissance ;
- Une charge.

Le système générateur est composé par les modules photovoltaïques et les aérogénérateurs. Il est indispensable que les deux fonctionnent à la même tension nominale 12 ou 24 V et en courant continu. La régulation doit tenir compte du fait qu'il s'agit de deux courants de nature différents :

- ✓ Le photovoltaïque assez constant et d'un seuil bas
- ✓ L'éolien, très variable.

Le système de régulation se chargera donc de faire fonctionner le système générateur en un point optimal pour la charge des batteries.

2.5 Descriptions des composantes du système hybride photovoltaïque-éolien

2.5.1 Générateurs photovoltaïques

Un générateur photovoltaïque est constitué à la base par des cellules photovoltaïques. Elles produisent de l'électricité du moment où elles sont exposées au rayonnement solaire. Elles ne polluent pas, n'ont aucune pièce mobile, ne nécessitent pratiquement aucun entretien et ne produisent aucun bruit. La cellule photovoltaïque est donc un moyen sûr et écologique de produire de l'énergie.

2.5.2 Générateur éolien

Un système éolien ou un aérogénérateur ou encore une éolienne peut être défini comme étant : un système composé d'éléments aptes à transformer une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique puis en énergie électrique.

La plupart des aérogénérateurs commerciaux, surtout les grands, sont à axe horizontal. La part de marché représentée par les systèmes à axe vertical est minuscule. Les aérogénérateurs de grande taille sont parfois construits isolément ou rassemblés en groupes (parcs d'éoliennes) comportant dix éléments ou plus, parfois même des centaines [17].

Les différents éléments d'une éolienne sont conçus d'une manière à maximiser la conversion énergétique, pour cela, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est nécessaire [18].

2.5.3 Systèmes de stockage

Le stockage d'énergie est souvent utilisé dans les petits systèmes hybrides à fin de pouvoir alimenter la charge pour une durée relativement longue (des heures ou même des jours). Il est parfois aussi utilisé avec les SEH connectés à des grands réseaux de courant alternatif isolés. Dans ce cas, il est utilisé pour éliminer les fluctuations de puissance à court terme.

Le stockage d'énergie est généralement réalisé grâce aux batteries. Les batteries sont, d'habitude, du type plomb – acide. Les batteries nickel – cadmium sont rarement utilisées. Il y a d'autres formes de stockage, mais peu utilisées, comme le pompage de l'eau, les volants d'inertie et le stockage de l'hydrogène.

Dans le cas de stockage par pompage de l'eau, l'énergie produite sert à remplir un réservoir de stockage dont l'eau sera turbinée pour restituer l'énergie.

Le principe du volant d'inertie est simple. Il s'agit d'emmagasiner l'énergie en mettant en rotation une masse importante.

L'énergie cinétique obtenue peut être restituée à la demande sous forme d'énergie électrique, en utilisant une machine électrique en régime générateur.

L'hydrogène alimente les piles à combustible. Il possède un grand pouvoir énergétique gravimétrique (120 MJ/kg) en comparaison au pétrole (45 MJ/kg), au méthanol (20 MJ/kg) et au gaz naturel (50 MJ/kg). Cependant, il est aussi le gaz le plus léger. Ceci pose un véritable problème de stockage. La densité énergétique volumétrique de l'hydrogène n'est intéressante qu'à l'état liquide ou comprimé (700 bars). Il existe de multiples modes de stockage de l'hydrogène : comprimé, liquéfié, hydrures métalliques, charbon actif, nano fibres et nanotubes en carbone etc. Si les deux premiers modes de stockage sont actuellement les plus utilisés, ils sont loin d'être satisfaisants. [19]

2.5.4 Convertisseurs

Dans un SEH, des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le CC en CA et vice-versa. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les SEH : les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs.

Les redresseurs réalisent la conversion CA/CC. Dans le SEH, ils sont souvent utilisés pour charger des batteries à partir d'une source à CA. Ce sont des appareils relativement simples,

pas chers et à bon rendement. Les onduleurs convertissent le CC en CA. Ils peuvent fonctionner en autonome pour alimenter des charges à CA ou en parallèle avec des sources à CA. Les onduleurs sont autonomes lorsqu'ils imposent leur propre fréquence à la charge. L'onduleur non autonome exige la présence d'une source à CA pour fonctionner. Il y a aussi des onduleurs qui peuvent assurer les deux régimes de fonctionnement : autonome ou en parallèle avec un autre générateur. Ceux-ci sont les plus flexibles, mais sont aussi les plus chers. Parfois, les fonctions de redresseur et d'onduleur sont réalisées par un seul appareil.

2.5.5 Charges

Les charges électriques rendent utile la puissance électrique. Il existe des charges à caractère résistif et inductif. Les charges résistives incluent les ampoules à incandescence, les chauffe-eau etc. Les appareils utilisant des machines électriques sont des charges résistives et inductives. Elles sont les principaux consommateurs de puissance réactive. Les charges à CC peuvent avoir aussi des composants inductifs, mais les seuls effets introduits par ceux-ci sont les variations transitoires de tension et courant pendant les changements dans le fonctionnement du système.

Conclusion

Ce chapitre nous a permis de donner un aperçu général sur le système d'énergie hybride (S.E.H) qui combine deux systèmes très populaires actuellement dans le marché de la production d'énergie électrique d'origine renouvelable, les systèmes photovoltaïques et les systèmes éoliens.

CHAPITRE III

*Analyse technico économique d'un système
hybride (PV/E) raccordé au réseau*

Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons d'une part, le dimensionnement du générateur photovoltaïque par la méthode du mois le plus défavorable et le dimensionnement du générateur éolien. D'autre part, nous dégageons une analyse technico-économique du système hybride photovoltaïque – éolien raccordé au réseau électrique de distribution pour le cas de la ville de Maradi.

3.1 Détermination de la puissance crête

Pour un bon dimensionnement, il est nécessaire de connaître précisément la puissance crête à installer.

La ville de Maradi est alimentée par la ligne 132 kV provenant de Gazaoua subdivisée en six (6) départs :

- Départ ville (20kV) et Départ Dan kassawa alimentent exclusivement les quartiers du centre-ville ;
- Départ Madarounfa (20kV) : alimente aussi une partie non négligeable des quartiers de la ville et le département de Madarounfa ;
- Départ Tchadoua (20kV) : couvre les quartiers périphériques traversés par la ligne et la commune de Tchadoua ;
- Départ Tibiri (20kV) : alimente les quartiers traversés par la ligne et commune urbaine de Tibiri.
- Départ Dakoro (32kV) : alimente sur son passage une petite partie de la ville de Maradi et le département de Dakoro.

La puissance demandée à la pointe pour satisfaire les charges supportées par ces six (6) départs (lignes électriques) est de 17 MW à la date du 20 avril 2020, donnée prélevée au compteur numérique de la NIGELEC centrale de Maradi.

Pour notre projet, nous intéressons à la puissance crête de trois départs (départ ville, départ Dan kassawa et départ Madarounfa) qui est de 7 260 kW soit 7,26 MW, que nous considérons ici comme celle de la ville de Maradi.

Il nous est important de préciser les apports en pourcentage de la puissance crête à installer pour chaque source. Cela nous permettra de bien déterminer les tailles de ces deux générateurs photovoltaïque et éolien.

Etant donné que Maradi est une région bien ensoleillée en générale et la ville en particulier, nous avons jugé de répartir la puissance comme suit :

- Générateur photovoltaïque : 75% de la puissance crête à installer pour le projet soit 5 445 kW
- Générateur éolien : 25% de la puissance crête du projet soit 1 815 kW

Ces apports contribueront à satisfaire la charge du système électrique de la région.

3.2 Dimensionnement du champ photovoltaïque

Pour déterminer la taille des modules ou panneaux solaires requis, il faut connaître le besoin énergétique total et la ressource solaire disponible. Le Niger possède un ensoleillement important sur toute son étendue avec des maxima dans sa partie nord. L'ensoleillement est assez régulier sauf au mois d'août où il est fortement réduit par la présence de nuages. Ce mois est considéré comme le mois le plus défavorable avec l'irradiation de 6,4 kWh/j.

La puissance à installer du générateur photovoltaïque dans le cadre de ce projet est estimée à 5,445 MW pour pouvoir répondre à l'apport au besoin énergétique journalier (de 8h à 17h) injectée au réseau.

3.2.1 Evaluation du besoin énergétique

Il est indispensable de connaître précisément le besoin en énergie d'une installation afin de concevoir un système photovoltaïque adéquat. Au vu du coût encore élevé du Watt solaire, il est souhaitable d'éviter le surdimensionnement pour économiser les modules et les autres accessoires.

Le besoin énergétique journalier de cet apport est estimé à 49 005 kWh/J. la formule utilisée pour trouver ce besoin énergétique est la suivante :

$$B_j = P * t \quad (3.1)$$

Avec :

P : puissance

t = temps d'utilisation

Application :

$$B_j = 5\,445 \times 9 = 49\,005 \text{ kWh/J}$$

3.2.2 Calcul de la puissance nominale du champ photovoltaïque

La puissance crête totale du champ PV, dépend de l'irradiation quotidienne du lieu d'utilisation, est calculée par la formule suivante :

$$P_C = \frac{B_j}{H_i \times R_{gen}} \quad (3.2)$$

Avec :

B_j : Besoin énergétique journalier

H_i : Ensoleillement global moyen du mois le moins ensoleillé dans le plan des modules

R_{gen} (%) : Rendement du générateur PV (Pertes dues à la poussière, à l'échauffement des modules, au câblage, etc..). Valeur typique de 80 %

Application :

$$P_C = \frac{49\,005 \times 1000}{6,4 \times 0,8} = 9\,571\,289,0625 \text{ Wc}$$

$$P_C = 9\,571\,289 \text{ Wc}$$

Alors pour assurer l'apport en énergie solaire, il sera nécessaire d'installer un champ solaire photovoltaïque d'une puissance crête de **9 571 289 Wc**.

3.2.3 Détermination de nombre des modules à installer

Le nombre des modules photovoltaïques est calculé en fonction des caractéristiques du module choisi et de la puissance crête du générateur par l'équation suivante :

$$N_m = \frac{P_c}{P_u} \quad (3.3)$$

Avec :

N_m : Nombre total des modules

P_c : Puissance crête de l'installation

P_u : Puissance crête unitaire

- **Choix de la technologie des modules**

Les modules choisis pour cette étude sont des modules monocristallins avec une capacité de produire une puissance crête de 330 Wc chacun.

Le tableau suivant affiche les caractéristiques de ces modules.

Tableau 3.1 : Caractéristiques des modules

P_{max}	330 Wc
V_{oc}	45,6 V
I_{cc}	9,40 A
I_n	9,06 A
V_{mp}	36,55 V

Les valeurs sont mesurées à 25°C et avec une irradiation de 1000W/m². AM = 1,5

Application :

$$N_m = \frac{9\,571\,289}{330} = 29\,003,90$$

$$N_m = 29\,004$$

La puissance unitaire des modules photovoltaïques utilisée est de 330Wc, il nous faudrait donc un nombre provisoire de 29 004 modules à installer dans le cadre de ce projet.

3.2.3.1 Nombre des modules en série

En général, les modules solaires sont raccordés en série sur une entrée de l'onduleur. La plage de tension d'entrée d'onduleur fixe alors le nombre de modules solaires montés en série (string).

Le nombre de modules photovoltaïques en série compatible avec la plage MPPT [300-900] en entrée de l'onduleur qui sera utilisé.

- Nombre minimal de modules en série = $E_+ \left[\frac{U_{MPPT,MIN}}{U_{co} * 0,85} \right]$ [26] (3.4)

- Nombre maximal de modules en série = $E_- \left[\frac{U_{MPPT,MAX}}{U_{co} * K} \right]$ [26] (3.5)

Avec :

$U_{MPPT, MIN}$: Tension minimale admissible en entrée de l'onduleur

$U_{MPPT, MAX}$: Tension maximale admissible en entrée de l'onduleur

U_{co} : Tension du circuit ouvert unitaire

K : Constante = 1,14

Applications :

$$N_{ms,min} = \frac{300}{45,6 * 0,86} = 7,65$$

$$N_{ms,max} = \frac{900}{45,6 * 1,14} = 17,31$$

Pour que la plage de tension MPP de l'onduleur soit respectée, il doit être branché en série sur l'onduleur : 8 modules au minimum et 17 modules au maximum.

3.2.3.2 Nombre des modules en parallèles

$$N_{m,p} = \frac{N_m}{N_{m,s}} \quad (3.6)$$

$$N_{m,p} = \frac{29\,004}{17} = 1\,706,11$$

Le nombre des modules PV en parallèle est de 1 707 modules.

Le nombre total des modules PV à installer en tenant compte de la correction est :

$$N_m = N_{m,p} \times N_{m,s}$$

$$N_m = 17 \times 1\,707 = 29\,019 \text{ modules.}$$

On déduit la puissance nominale du générateur photovoltaïque $P_{NG} = 9\,576\,270 \text{ W}$

3.2.4 Dimensionnement de l'onduleur

Pour une installation raccordée au réseau l'onduleur est dimensionné en fonction des caractéristiques des modules et du réseau électrique. A l'exception de la tension de sortie, les paramètres de dimensionnement sont ceux d'une installation autonome.

La tension de sortie : les onduleurs raccordés au réseau doivent convertir le courant continu en courant alternatif strictement identique à celui du réseau. La tension de sortie est celle du réseau de distribution (220V) et parfaitement synchronisée avec le réseau (fréquence $50\text{Hz} \pm 1\%$).

La puissance nominale : l'onduleur devrait délivrer la même puissance que celle du générateur PV. Elle est minorée de 10 à 15 % de la puissance crête des modules installés. La puissance nominale de l'onduleur et celle du générateur sont données respectivement par les équations suivantes :

$$PNO = 0,90 \times \dots \times 0,95 \times PNG \quad (3.7)$$

$$PNG = 1,05 \times \dots \times 1,10 \times PNO \quad (3.8)$$

Application :

$$PNO = 0,95 \times 9\,576\,270 = 9\,097\,457 \text{ W}$$

Alors pour cette installation il nous faudrait un onduleur centralisé d'une puissance nominale de **9 092,75 kW soit 9,2 MW**.

a) Caractéristiques en entrée DC onduleur

Caractéristiques en entrée DC :

- Puissance nominale d'entrée ($P_{\text{nom DC}}$) : kW ou MW
- Tension d'entrée optimale de fonctionnement ($U_{\text{opt DC}}$)
- Plage de tension de fonctionnement MPP
- Tension maximale d'entrée ($U_{\text{max DC}}$)
- Courant maximal d'entrée ($I_{\text{max DC}}$)

b) Caractéristiques de sortie AC d'onduleur

Caractéristiques électriques de sortie (AC) :

- Puissance nominale de sortie P_{ac} (kVA ou kW)
- Tension nominale de sortie : 230V (monophasé) ou 400V (triphase)
- Fréquence nominale de sortie : 50 ou 60 Hz
- Courant de sortie I_{ac} (A)
- Taux de distorsion d'harmoniques en courant : THD (de l'ordre de 3%)
- Facteur de puissance : de l'ordre de 1 (courant injecté en phase avec la tension du réseau)

3.2.5 Dimensionnement des câbles :

Il est nécessaire de limiter la longueur des câbles électriques entre le générateur photovoltaïque et les récepteurs. Cette distance n'excède jamais quelques mètres.

En effet, les systèmes solaires fonctionnent généralement sous faible tension (12V, 24V, 48V), donc avec un courant élevé ($P = U \times I$), si U est faible, I est très élevé pour la même puissance). Le transport à distance de ce courant de plusieurs ampères provoque des pertes par effet joule aux niveaux des conducteurs [22].

$$P_j = \Delta V * I = R * I^2 \quad (3.9)$$

Avec :

ΔV : la perte par effet joule ;

R : Résistance du câble (Ω) ;

I : Intensité maximale délivrée (A).

Pour déterminer la section du câble on applique la formule suivante :

Or
$$R = \rho \frac{L}{S}$$

ρ : la résistivité du matériel ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)

L : la longueur total du câble (m)

S : la section du câble (mm^2)

V_A : la tension a l'origine du câble (V)

D'où

$$S = \frac{\rho * L * I_{max}}{\varepsilon * V_A} \quad (3.9)$$

Pour le calcul de la section d'un câble bifilaire correspondant à la somme des conducteurs positifs et négatifs, la formule devient :

$$S = \frac{\rho * 2L * I_{max}}{\varepsilon * V_A} \quad (3.10)$$

- **Section câble entre les panneaux et UCP**

La chute de tension admissible tolérée Epsilon = 0,04 [22]

$\rho = 0,017 \text{ mm}^2/\text{m}$ (câble de cuivre)

$L = 2\text{m}$

$I_{\max} = 9,40 \times 1\,707 = 16\,045,8 \text{ A}$

$V_A = 48 \text{ V}$

Application:

$$S = \frac{0,017 * 2 * 2 * 16\,045,8}{0,04 * 48} = 568,28$$

$S = 568,28 \text{ mm}^2$

- **Section câble entre UCP et onduleur**

La chute de tension admissible tolérée Epsilon = 0,04

$\rho = 0,017 \text{ mm}^2/\text{m}$ (câble de cuivre)

$L = 50 \text{ m}$

$S = 15\,859,22 \text{ mm}^2$

- **Section câble entre l'onduleur et le transformateur**

La chute de tension admissible tolérée Epsilon = 0,04

$\rho = 0,017 \text{ mm}^2/\text{m}$ (câble de cuivre)

$L = 80 \text{ m}$

$S = 20\,731,55 \text{ mm}^2$

3.3 Dimensionnement de la taille du générateur éolien

Nous allons dans cette partie dimensionner l'éolienne de manière à être plus spécifique au lieu d'étude.

Pour cela nous allons dimensionner simplement le diamètre du rotor, le mat de l'éolienne et déterminer le nombre d'éoliennes nécessaires pour produire le cote part de l'énergie éolienne mentionné ci-haut.

Nous nous apercevons qu'il nous faudrait une éolienne produisant 1 815 kW pour pouvoir satisfaire le pourcentage en énergie éolienne. Pour être plus raisonnable, nous pourrions imaginer de prendre plusieurs éoliennes. Si nous décidons de choisir 19 éoliennes, nous arrivons à avoir une puissance de 100 kW par éolienne. Ce qui nous amène à déterminer la longueur des pales de cette dernière.

3.3.1 Dimensionnement de la longueur des pales

Les pales forment le cœur de l'éolienne car ils captent l'énergie cinétique du vent et les transforment en énergie mécanique de rotation. Pour déterminer la longueur des pales, il faut tenir compte de la puissance générée par le générateur et la vitesse du vent du site d'implantation.

3.3.1.1 Evaluation de la puissance de l'éolienne

La vitesse moyenne annuelle du vent de la ville de Maradi est de 13,7 km/h soit 3,8 m/s à une hauteur de 10m au-dessus du sol, donnée fournie par la station météorologique : 610800 (DRRM). Alors la vitesse du vent à une hauteur de 35m du sol est donnée par la formule

$$\frac{V_{\text{vent}}}{V_0} = \left(\frac{h}{h_0}\right)^\alpha \quad (3.11)$$

L'indice du milieu α varie selon la nature du milieu comme le montre le tableau 3.2.

Tableau 3.2 : Valeurs du coefficient de gradient vertical de la vitesse du vent en fonction de la topographie, [23].

Topographie du lieu	Coefficient α
Glace	0,07
Neige sur sol plat	0,09
Mer calme	0,09
Littoral avec brise de mer	0,11
Herbe coupée	0,14
Prairie à herbe courte	0,16
Cultures, prairie à herbe haute	0,19
Haies	0,21
Arbres et haies épars	0,24
Arbres, haies, quelques bâtiments	0,29
Banlieues	0,31
Bois	0,43

Valeurs du coefficient de gradient vertical de la vitesse du vent en fonction de la topographie (source : wind power)

L'indice du milieu α de notre site d'installation est comme celui d'une banlieue, alors $\alpha = 0,31$.

$$\text{Soit } V_{\text{vent}} = V_0 * \left(\frac{h}{h_0}\right)^\alpha \quad (3.12)$$

Application :

$$V_{\text{vent}} = 3,8 * \frac{35^{0,31}}{10^{0,31}} = 5,60 \text{ m/s}$$

$V_{\text{vent}} = 5,60 \text{ m/s}$

La puissance du vent au sein du site d'installation de l'éolienne peut se calculer en utilisant la formule suivante, [23] :

$$P_{\text{vent}} = \frac{1}{2} \dot{m} V_{\text{vent}}^2 \quad (3.13)$$

$$\dot{m} = \rho V_{\text{vent}} S$$

$$S = \pi \frac{D^2}{4}$$

En combinant ces trois dernières équations la puissance du vent, il vient :

$$P_{vent} = \frac{1}{8} \pi \rho D^2 V_{vent}^3 \tag{3.14}$$

Avec $\rho = \frac{1.25 \text{ kg}}{\text{m}^3}$ indiquant la masse volumique de l'air.

La puissance du vent exprimée par la formule (3.12) n'est pas récupérable totalement par la machine.

3.3.1.2 Diamètre du rotor

La puissance du vent récupérée par la machine est donnée par la formule (3.14) suivante [23] :

$$P_{elec} = C_p(\lambda) P_{vent} \tag{3.15}$$

Avec :

C_p : coefficient de performance

λ : la vitesse spécifique de l'éolienne

Notre projet porte sur une éolienne tripale à axe horizontal car, c'est la seule éolienne qui récupère la plus grande puissance de vent. Son coefficient de performance est déduit en fonction de la vitesse spécifique de l'éolienne.

La figure 3.1 donne les courbes des coefficients de puissance pour différents types d'éolienne, [23].

La courbe $C_p(\lambda)$, spécifique à chaque éolienne permet de classer les différents types d'éoliennes.

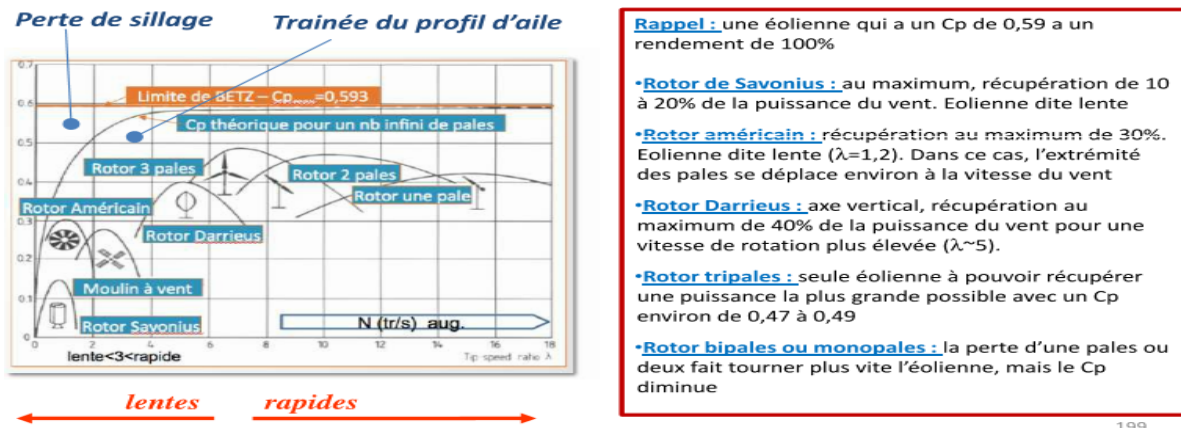


Figure 3.1: Courbes du coefficient de puissance selon le type du rotor, [23].

Les éoliennes actuelles s'opèrent à des vitesses de rotation variables (jusqu'à une certaine vitesse de vent) de manière à maintenir une vitesse spécifique constante. La vitesse spécifique est le rapport entre la vitesse circonférentielle du bout des pales et la vitesse du vent, [23].

$$\lambda = \frac{\Omega_{turb} R}{V_{vent}} \quad (3.16)$$

D'après les courbes caractéristiques de $C_p(\lambda)$, $C_p = 0,48 \pm 0,1$ car $\lambda = 7,5$ pour les éoliennes tripales.

En combinant les équations (3.13) et (3.14), nous en déduisons le diamètre du rotor de notre éolienne.

$$P_{elec} = \frac{1}{7,5} C_p \pi \rho D^2 V_{vent}^3 \quad (3.17)$$

$$D = \sqrt{\frac{7,5 P_{elec}}{C_p \pi \rho V_{vent}^3}} \quad (3.18)$$

Application : $D = \sqrt{\frac{7,5 * 100\,000}{0,48 * \pi * 1,225 * (5,60)^3}} = 48 \text{ m}$

D = 48 m → R = 24 m

3.3.2 Détermination de la taille du mat

Le mat supporte la nacelle et le rotor de l'éolienne. Il doit être d'une taille supérieure à la pale (sinon elle toucherait la terre en rotation). La pale ne doit pas descendre à moins 3m du sol (hauteur de sécurité). [24]

Les pales font généralement entre 50 et 65% de la taille du mat [24]. Partant de cette affirmation, nous déduisons la taille du mat de notre éolienne à 37 m.

3.4 Analyse économique du système

Dans cette partie, nous présentons l'analyse économique du système. Une telle analyse nécessite des données précises sur le prix des différents éléments du système.

Pour simplifier, seulement les coûts capitaux des composants photovoltaïques et éoliens sont considérés dans cette étude. Nous n'avons pas tenu compte du coût de tous les autres accessoires. Le coût total du système est donné par la relation suivante :

$$C_{\text{total}} = C_{\text{pv}} + C_{\text{eol}} \quad (3.19)$$

- Le prix unitaire de module photovoltaïque monocristallin 24/330Wc est de 95 000 F CFA sur le marché de la ville de Maradi.
- Le prix unitaire d'une éolienne tripales de 100W est de 80 000 \$US soit 44 000 000 F CFA [25]

Le tableau ci-dessous présente le coût du système.

Tableau 3.3 : coût du système

Désignation	Nombre	Prix unitaire (F CFA)	Prix total (F CFA)
Module monocristallin 24V/330Wc	29 019	95 000	2 756 805 000
Eolienne tripales de 100kW	19	44 000 000	836 000 000
Montant total			3 592 805 000

3.5 Résultats et discussions

Les résultats obtenus des dimensionnements de ces deux générateurs solaire et éolien, nous ont donné le nombre et caractéristiques des composants constituant le système, ainsi que leurs coûts.

Pour le générateur photovoltaïque, le **tableau 3.4** et **tableau 3.5** présentent respectivement le résumé de dimensionnement des panneaux solaires et celui de l'onduleur.

Tableau 3.4 : Résumé de dimensionnement des panneaux solaires

Panneaux solaires	Puissance crête (Wc)		9 575 280	
	Tension (V)		24	
	Nombre du module	29 019	En série	17
			En parallèle	1 707

Tableau 3.5 : Résumé de dimensionnement de l'onduleur

Onduleur centralisé	Puissance nominale (MW)	9,2
	Plage MPP	[300 - 900]
	Nombre	1

En ce qui concerne le générateur éolien, **le tableau 3.6** affiche le résumé de dimensionnement de ce dernier.

Tableau 3.6 : Résumé de dimensionnement de l'éolienne

Eolienne tripales	Nombre	19	Puissance nominale (KW)	100
			Diamètre du rotor (m)	48
			Taille du mat (m)	37

D'après l'analyse économique du système, le coût du projet en se basant sur les prix capitaux des composants s'élève à un montant de trois milliards cinq cent quatre-vingt-douze millions huit cent cinq mille francs CFA (3 592 805 000F).

Conclusion

Dans ce chapitre, la taille du générateur solaire a été déterminée à travers les dimensionnements de ces principaux composants. La taille du générateur éolien a été aussi déterminée, ainsi que le coût du projet.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Le présent mémoire consiste à concevoir un système hybride photovoltaïque-éolien raccordé au réseau pour la ville de Maradi pour une charge estimée à 7,26 MW. Pour ce faire, les dimensionnements du générateur photovoltaïque et celui du générateur éolien ont été effectués. Etant donné que Maradi est une région bien ensoleillée en générale et la ville en particulier, la charge est répartie comme suit : 75% pour le générateur photovoltaïque soit 5 445 kW et 25% de la charge pour le générateur éolien soit 1 815 kW.

Nous aboutissons à un champ photovoltaïque composé de 29 019 modules solaires monocristallins ayant une capacité de produire une puissance crête de 330 Wc chacun, dont 17 montés en série et 1 707 en parallèles et d'un onduleur centralisé de 9,2 MW. Et à un parc éolien de 19 éoliennes de puissance unitaire 100 kW avec un rotor de 48 m de diamètre et un mat de 37 m de hauteur.

Le coût du projet s'élève à un montant de trois milliards cinq cent quatre-vingt-douze millions huit cent cinq mille francs CFA (3 592 805 000 F), un coût trouvé , en se basant essentiellement sur le prix des principaux composants du système.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Trahi Fatiha, « *Prédiction de l'irradiation solaire globale pour la région de Tizi-Ouzou par les réseaux de neurones artificiels. Application pour le dimensionnement d'une installation photovoltaïque pour l'alimentation du laboratoire de recherche LAMPA* », mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 92 p, 2011.
- [2] Ministère de l'énergie et du pétrole (Niger) « *Plan d'Actions National des Energies Renouvelables (PANER)* » dans le cadre de la mise en œuvre de la Politique d'Energies Renouvelables de la CEDEAO (PERC), 78 p, 2015
- [3] A. El Khadimi, L. Bchir et A. « *Zeroual Dimensionnement et Optimisation Technico économique d'un Système d'Energie Hybride Photovoltaïque - Eolien avec Système de Stockage* » Rev. Energ. Ren. Vol. 7 (2004) 73-83
- [4] Fellah Boumediene « *Système hybride photovoltaïque-éolien, de production d'électricité. Application aux sites de Tlemcen et de Bouzaréah* », mémoire de magister, école doctorale : Energies Renouvelables, 132 p, 2012
- [5] F. LASNIER, T.G. ANGEL, « *Photovoltaic Engineering Handbook* », IOP Publishing Ltd. 1980. ISBN 0-85274-311-4.
- [6] PETROS AXAPOULOS TEI D'ATHENES, Grèce, « *4. Rayonnement Solaire sur les surfaces inclinées* », Chapitre 4, 16 p
- [7] LYCEE DES METIERS DE L'ENERGIE, DE LA METALLURGIE ET DE LA VENTE, « *Energie Solaire Photovoltaïque* », 12 p, 2013.
- [8] Olivier GERGAUD, « *Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur* », Thèse de Doctorat en électrotechnique, Ecole normale supérieure de Cachan, 161 p, 2002.
- [9].S.PETIBON, « *Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques* », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 120 p, 2009.
- [10] J. BERNARD, « *Energie solaire Calculs et optimisation* », Edition ellipses, 252 p, 2004.
- [11] Frédéric Poitiers, « *Etude et Commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne - Machine asynchrone à cage autonome – Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau. Energie électrique* », Université de Nantes, 160 p, 2003.

- [12] HASSINI NEE BELGHITRI HOUDA, « *Modélisation, Simulation et Optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque* », mémoire de magister, Université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen, 92 p, 2010.
- [13] N. La verdure, D. Roye, S. Bacha, R. Belhomme, « *Technologie des systèmes éoliens – Intégration dans les réseaux électriques* », la Revue 3EL, no. 39, 12 p, 2004.
- [14] D. SAHEB-KOUSSA, M.BELHAMEL, « *Production d'électricité sans interruption moyennant un système hybride (éolien – photovoltaïque – diesel)* » Revue des Energies Renouvelables, ICRES-07 Tlemcen 121 – 128, 2007.
- [15] D. REKIOUA, Z. ROUMILA et T. REKIOUA, « *Etude d'une centrale hybride photovoltaïque - éolien – diesel* », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11 N°4 623 – 633, 2008.
- [16] A. KAABECHE, M. BELHAMEL, R. IBTIOUEN, S. MOUSSA et M. R. BENHADDADI, « *Optimisation d'un système hybride (éolien – photovoltaïque) totalement autonome* », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 9, N°3 199 – 209, 2006.
- [17] V .ROGEZ, « *Modélisation simplifiée de sources de production décentralisée pour des études de dynamique des réseaux. Application à l'intégration d'une production éolienne dans un réseau de distribution insulaire* », Thèse de Doctorat, Université d'Artois, France, 196 p, 2004.
- [18] S. EL AIMANI, « *modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension* », Thèse de Doctorat, Université Lille, France, 175 p 2004.
- [19] F. FAURE, « *Suspension magnétique pour volant d'inertie* », Thèse de Doctorat, INPG, France, 162 p, 2003.
- [20] M. R. PATEL, « *Wind and Solar Power Systems*», U.S. Merchant Marine Academy Kings Point, New York, 351p, 1999.
- [21] A.N. Celik, « *Optimisation and Techno-economic Analysis of Autonomous Photovoltaic-Wind Hybrid Energy Systems in Comparison to Single Photovoltaic and Wind Systems* », Energy Conversion and Management, Vol. 43, pp. 2453 – 2468, 2002.
- [22] Mr Zidane Ammar : « *étude et dimensionnement d'une installation photovoltaïque* » Université Abderrahmane Mira-Bjaia. 75 p 2019.

[23] RANDRIANARISOA Jean Romule « Etude conception dimensionnement et réalisation d'un mini-éolien a alternateur synchrone » Mémoire de Master d'Ingénierie en Energies Renouvelables Université d'Antananarivo 49 p 2019

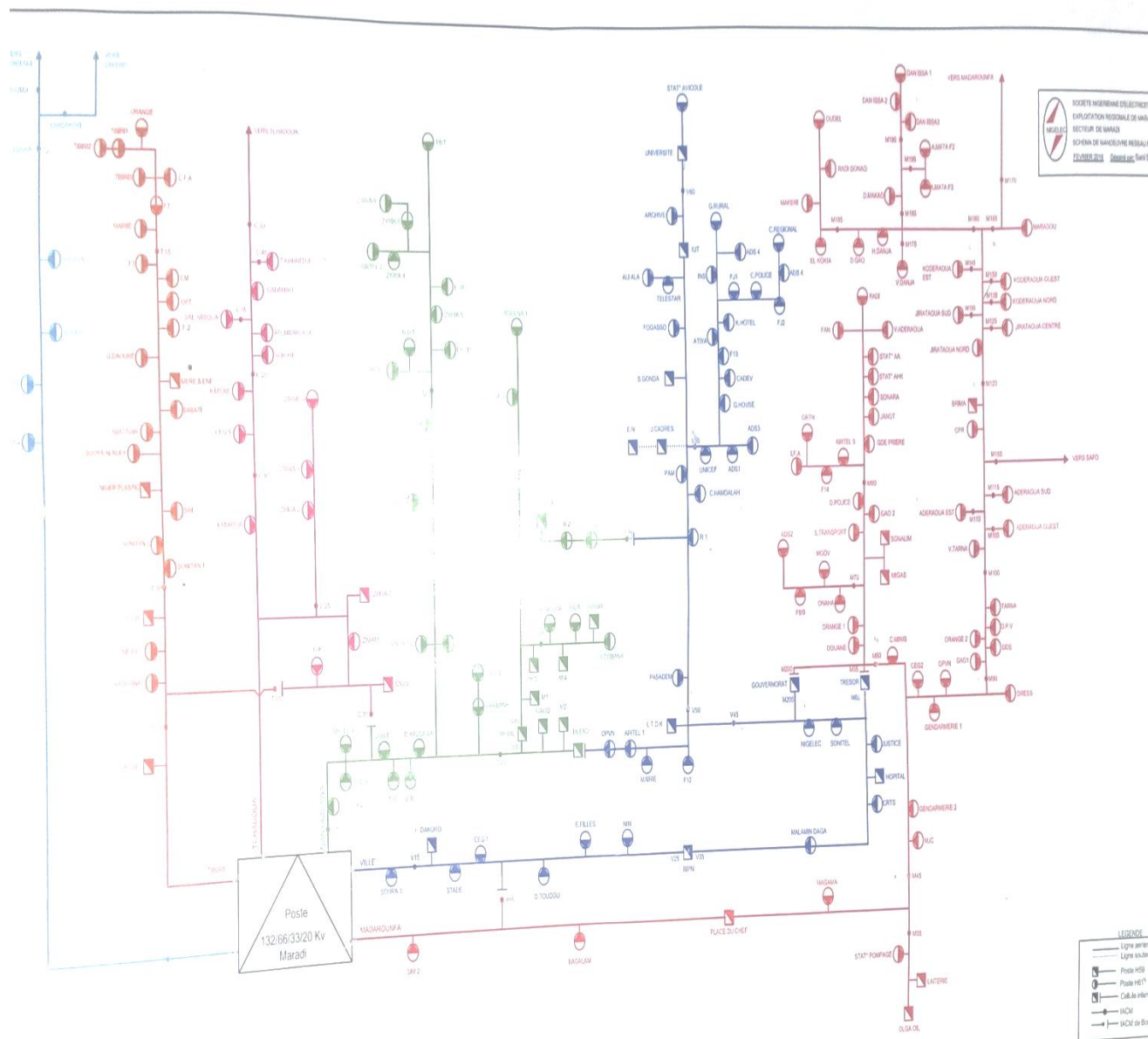
[24] www.eolienne.ooreka.fr « hauteur d'une éolienne : le mat et les pales » consulté le 15/01/21

[25] Site www.Alibaba.com

[26] **internet** « GuidEnR PHOTOVOLTAIQUE-Etape2-calculer le nombre de modules photovoltaïques en série » consulté le 23 janvier 2021

ANNEXES

Annexe 1 : LE SCHEMA ELECTRIQUE DE LA REGION DE MARADI



2016 17:23:27, DWG To PDF.pc3

Annexe 2 : COMPTEUR NUMERIQUE DE LA NIGELEC CENTRALE DE MARADI