

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Fin d'Étude

Présenté à

L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En Réseaux électriques

Présenté par

DRIDI Messaoud et MEGURHI Tarek

Thème

**Analyse technico-économique d'une installation
hybride de conversion d'énergie renouvelable**

Soutenu le 27/05/2017. Devant le jury composé de :

Mr. GUIA Talal

Maitre de conférences Président

Mr. MIDA Dris

Maitre de conférences Rapporteur

Mr. KHECHKOUCHE Ali

Maitre de conférences Examineur

Année Universitaire 2016/2017

TITRE: ANALYSE TECHNICO-ECONOMIQUE D'UNE INSTALLATION HYBRIDE DE CONVERSION D'ENERGIES RENOUVELABLES

Résumé : -----

Les préoccupations croissantes sur l'environnement après le Protocole de Kyoto ont encouragé l'exploitation des ressources renouvelables propres et inépuisables. La production de l'énergie par des ressources renouvelables est principalement mise en œuvre pour alimenter les zones rurales éloignées. Pour ces régions, le prix d'extension du réseau électrique s'avère prohibitif et le surcoût de l'approvisionnement en combustible augmente radicalement avec l'isolement. Cependant, et pour pallier ces problèmes les travaux de recherche ont été orientés vers le concept des systèmes hybrides de génération d'énergie électrique. L'objectif principal de ce travail est l'étude et la simulation d'un système hybride éolien-PV qui répond à nos besoins énergétiques afin de réduire les émissions des gaz à effet de serre. Les résultats de simulation obtenus, par HOMER, montrent la souplesse du système proposé face aux variations de la charge tout en minimisant les émissions des gaz à effet de serre et assurant une meilleure stabilité sur la tension et la fréquence générées en présence des perturbations provoquées par la ressource aléatoire du vent.

Address: TECHNICAL-ECONOMIC ANALYSIS OF A HYBRID RENEWABLE ENERGY CONVERSION INSTALLATION

Abstract: -----

Growing concerns about the environment after the Kyoto Protocol led to the use of clean and inexhaustible renewable resources. The production of energy from renewable resources is mainly implemented to supply remote rural areas. For these regions, the grid extension prices would be prohibitive and the additional cost of the fuel supply increases dramatically with isolation. To overcome these problems the research has been directed towards the concept of hybrid systems generation of electrical energy. The main objective of this work is the study and simulation of a Wind –PV system that meets our energy needs to reduce greenhouse gas emissions. The simulation results obtained by HOMER show the proper functioning of the proposed system in the presence of network disturbances and wind generation because of cuts wind well justified by the greater stability of the voltage and frequency generated by a self-excited induction generator.

العنوان: التحليل التقني اقتصادي لنظام هجين للتحويل الطاقة المتجددة

ملخص: -----

أدت المخاوف المتزايدة حول البيئة بعد بروتوكول كيوتو إلى تشجيع استخدام الطاقات الجديدة و النظيفة. وتستعمل هذه الطاقات الجديدة لتغذية المناطق الريفية و النائية التي يبقى مشكل توصيلها بالطاقة الكهربائية متعلقا بالسعر الباهض و التكلفة الإضافية للوقود التي تزداد بشكل كبير مع عزلة هذه المناطق. للتغلب على هذه المشاكل أجرينا دراسات و بحوث متعددة قد تم توجيهها إلى فهم الأنظمة الهجينة لتوليد الطاقة الكهربائية. الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة لمحاكاة نظام هجين لمحرك الطاقة الشمسية مع توربينات الرياح الذي يلبي احتياجاتنا للطاقة الكهربائية و ذلك للحد من الانبعاثات الغازية. نتائج الدراسة المتحصل عليها من خلال برنامج HOMER تثبت مرونة النظام المقترح مع الطلب المتغير للطاقة و ذلك للتقليل من الانبعاثات الغازية و توفير استقرار أكبر في التردد مع وجود اضطرابات ناجمة عن سرعات رياح عشوائية.

Dédicace

*Nous avons le grand plaisir de dédier ce modeste travail à :
Nos chers parents, qui nous toujours soutenu dans notre études.*

Tous nos frères et sœurs chacun avec son nom.

Tous nos familles chacun son nom.

Tous nos enseignants chacun son nom.

Tous nos collègues chacun son nom.

Chaque personne qui nous aidé chacun son nom.

Promo Réseaux Électriques 2017/2018

SOMMAIRE

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I: ÉTAT DE L'ART SUR LE SYSTEME HYBRIDE DE GÉNÉRATION D'ÉNERGIE RENOUVELABLE	
I.1 INTRODUCTION	4
I.2 DÉFINITION DU SYSTEME D'ÉNERGIE HYBRID	4
I.2.1 PRESENTATION DU SYSTEME HYBRIDE	4
I.2.2 LES DIFFERENTES CONFIGURATIONS DES SYSTEMES HYBRIDES	5
I.2.2.1 ARCHITECTURE A BUS A CC	5
I.2.2.2 ARCHITECTURE MIXTE A BUS A CC/CA	5
I.3 L'ÉNERGIE SOLAIRE	6
I.3.1 GENERATRICE SYSTEME SOLAIRE	6
I.3.2 L'ENERGIE SOLAIRE EN ALGERIE	7
I.3.3 LE RAYONNEMENT SOLAIRE	7
I.3.4 SES COMPOSANTES	10
I.3.4.1 LE RAYONNEMENT DIRECT	10
I.3.4.2 LE RAYONNEMENT DIFFUS	10
I.3.4.3 LE RAYONNEMENT REFLECHI	11
I.3.4.4 LE RAYONNEMENT GLOBAL	11
I.3.4.5 RAYONNEMENT CUMULE	12
I.3.4.6 RAYONNEMENT INSTANTANE	12
I.4 LA PRODUCTION SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE	13
I.4.1 GENERALITES	13
I.4.2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	14
I.5 TYPE DES CELLULEPHOTOVOLTAÏQUE	16
I.5.1 LA CELLULE CRISTALLINE	16
I.5.2 LA CELLULE AMORPHE	16
I.5.3 CONNEXION DIRECTE SOURCE-CHARGE	17
I.5.4 CHOIX DE LA DIODE ANTI-RETOUR	18
I.5.5 LES DIFFERENTES TECHNOLOGIES DE FABRICATION DES CELLULES	18
I.6 LES DIFFÉRENT TYPES DE SYSTEME PV	20
I.6.1 CHAÎNE DE CONVERSION ELECTRIQUE	20
I.6.2 INFLUENCE DES RESISTANCES SERIE ET SHUNT	22
I.6.3 LES SEMI-CONDUCTEURS	22
I.6.4 LE PANNEAU SOLAIRE	22
I.6.5 L'ADAPTATION ENTRE LA CHARGE ET LA SOURCE	25
I.7 AVANTAGES ET INCONVENANTS DES PV	26
I.7.1 AVANTAGE	26
I.7.2 INCONVENANTS	26
I.8 L'ÉNERGIE ÉOLIEN	27
I.8.1 HISTORIQUE DE L'ÉOLIEN	27

I.8.2	CONVERSION DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE.....	28
I.8.3	TAILLE DES AÉROGÉNÉRATEURS.....	28
I.9	GENERALITES SUR LES SYSTEMES ÉOLIENS.....	29
I.9.1	CLASSEMENT D'ÉOLIENNE SELON L'ORIENTATION DE LEUR AXE DE ROTATION	29
I.9.2	TYPES DE TURBINE.....	29
I.9.3	REGULATION MECANIQUE DE LA PUISSANCE D'UNE ÉOLIENNE	30
I.9.4	INTERET DE LA VITESSE VARIABLE	32
I.10	CLASSEMENT DES ÉOLIENNES SELON LEUR VITESSE DE	
	ROTATION	32
I.11	LES PRINCIPAUX COMPOSANTS D'UN SYSTEME ÉOLIEN	33
I.11.1	LA TURBINE.....	33
I.11.2	LE SYSTEME ELECTROMECHANIQUE.....	33
I.11.3	LE SYSTEME D'INTERCONNEXION	33
I.11.4	LE SYSTEME DE CONTROLE.....	34
I.12	GENERATEURS.....	34
I.12.1	LA GENERATRICE SYNCHRONE.....	35
I.12.2	LA GENERATRICE ASYNCHRONE	35
I.12.3	LA GENERATRICE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION (MADA)	36
I.12.4	UNE COMPARAISON ENTRE LES DIFFERENTES MACHINES	37
I.13	AVANTAGES ET INCONVENANTS DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE	38
I.13.1	AVANTAGE.....	38
I.13.2	INCONVENANTS	38
I.14	CONCLUSION.....	39
CHAPITRE II : MODELISATION DU SYSTEME D'ÉNERGIE HYBRIDE (SEH)		
II.1	INTRODUCTION.....	41
II.2	MODELISATION DU PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE	41
II.2.1	MODELE SIMPLIFIE DU PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE	42
II.2.1.1	CARACTERISTIQUES DU MODULE PHOTOVOLTAÏQUE	43
II.2.1.2	PARAMETRES EXTERNES D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE.....	44
II.2.1.3	COURANT DE COURT-CIRCUIT	44
II.2.1.4	TENSION DE CIRCUIT OUVERT	45
II.4	LE RENDEMENT	45
II.5	INFLUENCE DES PARAMETRES EXTERNES SUR LA CARACTERISTIQUE I (V) ...	46
II.6	INFLUENCE DES RÉSISTANCES SÉRIE ET SHUNT	46
II.7	INFLUENCE DE L'ÉCLAIREMENT	47
II.8	INFLUENCE DE LA TEMPERATURE	48
II.9	MODELISATION DE LA CHAÎNE ÉOLIENNE.....	49
II.9.1	MODELE DU VENT	50
II.9.2	MODELISATION DE LA TURBINE	51
II.9.2.1	HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES POUR LA MODELISATION DE LA TURBINE.....	51

II.9.2.2 MODELE DE TURBINE.....	51
II.9.3 CONVERSION AERODYNAMIQUE.....	53
II.9.4 MODELE DE LA VOILURE.....	55
II.9.5 MODELE DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE	56
II.9.6 MODELE DE LA GSAP	56
II.10 HYPOTHÈSES SIMPLIFICATRICES	58
II.11 APPLICATION DE LACOMMANDE VECTORIELLE DE DE LA GSAP	60
II.12 CONCLUSION.....	61
CHAPITRE III : SIMULATION ET INTERPRÉTION DE RÉSULTATSINTRODUCTION	
GENERALE	
III.1 INTRODUCTION	63
III.2 ARCHITECTURE DES SYSTEMES HYBRIDES.....	63
III.2.1 ARCHITECTUR.....	63
III.2.2 ARCHITECTURE A BUS CC /CA	64
III.3 PRESENTATION DU LOGICIEL HOMER (OUTIL DE SIMULATION)	65
III.3.1 L'EMPLACEMENT CHOISI	65
III.3.2 PRESENTATION LES DONNES METROLOGIE PAR LE PROGRAMME HOMER.....	68
III.3.3 CONSTRUCTION DE SYSTEME HYBRIDE DE GENERATION D'ENERGIE	70
III.3.4 SIMULATION ET INTERPRETATION	71
III.3.4.1 LES CARACTERISTIQUES TECHNIQUES ET ECONOMIQUES DU SYSTEME PV/EOLIEN	72
III.3.4.2 COMPARAISON LE COUT DE KILOWATT.....	73
III.3.5 LE GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE.....	75
III.3.6 LE GENERATEUR EOLIEN	76
III.4 CONCLUSION	77
CONCLUSION GENERALE	78

LISTE DE FIGURE

FIGURE 1 - I.1: CONFIGURATION DU SEH A BUS CC	6
FIGURE 2- I.2: CONFIGURATION DU SEH A DEUX BUS A CC ET A CA.....	6
FIGURE 3-I.3 : SPECTRE DE RAYONNEMENT SOLAIRE	7
FIGURE 4-I.4: RAYONNEMENT SOLAIRE DANS LE MONDE ([KWH/M2.AN])	8
FIGURE 5-I.5: REPARTITION SPECTRALE DU RAYONNEMENT SOLAIRE	9
FIGURE 6-I.6: COMPOSANTES DU RAYONNEMENT SOLAIRE AU SOL.....	11
FIGURE 7-I.7 : STRUCTURE D'UNE CELLULE SOLAIRE EN SILICIUM.....	13
FIGURE 8-I.8: PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE CELLULE PV	14
FIGURE 9-I.9: CARTE DE L'INSOLATION SOLAIRE JOURNALIERE AU MONDE	14
FIGURE 10-I.10 : A) CELLULE PV MONOCRISTALLINE B) CELLULE PV POLY CRISTALLINE	15
FIGURE 11-I.11: CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE AMORPHE	16
FIGURE 12-I.12: A GAUCHE, CARACTERISTIQUE D'UNE PHOTODIODE, A DROITE CARACTERISTIQUE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE [17]	16
FIGURE 13-I.13: CONNEXION DIRECTE GPV-CHARGE PAR LE BIAIS D'UNE DIODE ANTI-RETOUR	17
FIGURE 14-I.14: NOUVELLES TECHNOLOGIES DE CELLULES	18
FIGURE 15-I.15: INSTALLATIONS PV AUTONOME.....	20
FIGURE 16- I.16: INSTALLATION PV COUPLEE AU RESEAU (UN AEROGENERATEUR ET SON CONVERTISSEUR POURRAIENT REMPLACER OU COMPLETER LE GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE).....	21
FIGURE 17- I.17: SCHEMA D'UNE CELLULE ELEMENTAIRE	22
FIGURE 18- I.18: LA PREMIERE IMPLANTATION D'UNE STRUCTURE PV [23].....	23
FIGURE 19-I.19: PLUSIEURS FORMES DE STRUCTURES PV [23]	24
FIGURE 20- I.20: ETAGE D'ADAPTATION ENTRE UN GPV ET UNE CHARGE [21]	25
FIGURE 21-I.21: COMPOSANTS DE LA CHAÎNE ELECTROMECHANIQUE (FICHE TECHNIQUE: NM 750/48)	28
FIGURE 22- I.22: TAILLE DES HELICES EN [M] ET PUISSANCE EN [KW]	27
FIGURE 23- I.23: TECHNOLOGIES D'EOLIENNES	29
FIGURE 24- I.24: COEFFICIENTS DE PUISSANCE ET DU COUPLE EN FONCTION DE LA VITESSE NORMALISEE A POUR DIFFERENT TYPES DE TURBINES [32].....	30
FIGURE 25- I.25: DIAGRAMME DE LA PUISSANCE UTILE SUR L'ARBRE EN FONCTION DE LA VITESSE DU VENT.....	31
FIGURE 26- I.26: PUISSANCE DE LA TURBINE EN FONCTION DE SA VITESSE DE ROTATION, PARAMETREE EN VITESSE DU VENT.....	32
FIGURE 27-I.27: UNE EOLIENNE A AXE HORIZONTAL.....	34
FIGURE 28-I.28: SYSTEME EOLIEN BASE SUR LA GS POUR UN FONCTIONNEMENT A VITESSE VARIABLE	35
FIGURE 29-I.29: SYSTEME EOLIEN BASE SUR LA GENERATRICE ASYNCHRONE A CAGE A VITESSE CONSTANTE.....	36
FIGURE 30-I.30 : SYSTEME EOLIEN BASE SUR LA GENERATRICE ASYNCHRONE GADA A VITESSE VARIABLE	37
FIGURE 31-II.1: CIRCUIT EQUIVALENT D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE	42
FIGURE 32-II.2A) CARACTERISTIQUE I(V) D'UN PV , B) CARACTERISTIQUE P(V) D'UN PV	46
FIGURE 33-II.3A) INFLUENCE DE RESISTANCE SERIE , B) INFLUENCE DE RESISTANCE SHUNT.....	47
FIGURE 34-II.4 A) I(V) EN FONCTION DE L'ECLAIREMENT , B) P(V) EN FONCTION DE L'ECLAIREMENT	48

FIGURE 35-II.5 A)I(V) EN FONCTION DE TEMPERATURE ,B) ZOOM SUR LA CARACTERISTIQUE I(V).....	48
FIGURE 36-II.6: EXEMPLE DE RESEAU DE CARACTERISTIQUE PUISSANCE/TENSION D'UN GENERATEUR PV, A GAUCHE POUR DIFFERENTS ECLAIREMENTS, A DROITE POUR DIFFERENTES TEMPERATURES DE JONCTION.	49
FIGURE 37-II.7: PROFIL DE LA VITESSE DU VENT	50
FIGURE 38-II.8 A)VEINE FLUIDE TRAVERSANT LE ROTOR EOLIEN, B) TUBE DE COURANT AUTOUR D'UNE EOLIENNE.	52
FIGURE 39-II.9.A: MODELISATION DU COUPLE EOLIEN.....	53
FIGURE 40-II.10.B: COEFFICIENT DE PUISSANCE	54
FIGURE 41-II.11: VOILURE A AXE VERTICAL DE TYPE SAVONIUS.....	55
FIGURE 42-II.12: CONSTRUCTION MECANIQUE DE LA GENERATRICE.....	57
FIGURE 43-III.1 : CONFIGURATION D'UN SH A BUS CC [23]	64
FIGURE 44-III.2 : CONFIGURATION DU SH A DEUX BUS A CC ET A CA [23]	64
FIGURE 45-III.3: LE PROFIL DE CHARGE DANS UNE ANNEE (HADHOUDI "EL-OUED")	66
FIGURE 46-III.4: LE PROFIL DE CHARGE JOURNALIERE SUIVANT LES SAISONS (HADHOUDI "EL-OUED")	66
FIGURE 47-III.5 : FIGURE 5.5 LA ROSE DES VENTS DE LA REGION DE EL-OUED	67
FIGURE 48-III.6 : LA SOLEIL ET JOURS LE PRECIPITATIONS REGION DE EL-OUED.....	67
FIGURE 49-III.7: LA VITESSE DU VENT POUR UN SITE HADHOUDI A EL-OUED	68
FIGURE 50-III.8: LE RAYONNEMENT SOLAIRE UN SITE ISOLE SITUE A EL-OUED.....	69
FIGURE 51-III.9: LE PROFIL DE LA VITESSE DU VENT.	69
FIGURE 52-III.10: VARIATION DE SOLARI DE LA JOURNALIERE SELON LES SAISONS	70
FIGURE 53-III.11: ARCHITECTURE D'UN SYSTEME HYBRIDE.....	70
FIGURE 54-III.12:RESULTAT OVERLAY DE SIMULATION DE SYSTEME HYBRIDE PAR HOMER.....	71
FIGURE 55-III.13:RESULTAT DE SIMULATION DE SYSTEME HYBRIDE PAR HOMER.....	72
FIGURE 56-III.14PUISSANCE MOYENNE PRODUITE PAR CHAQUE SOURCE	74
FIGURE 57-III.15DMAP DE PRODUCTION HORAIRE PAR LE GP.	75
FIGURE 58-III.16: DMAP DE PRODUCTION HORAIRE PAR L'EOLIEN	76

LISTE DE TABLEAU

TABLEAU 1- I.1: LES DIFFERENTES TECHNOLOGIES DE FABRICATION DES CELLULES	18
TABLEAU I.2: AVANTAGES ET INCONVENANTS DE DIFFERENTES EOLIENNES	38
Tableau III.1 : Le rayonnement solaire et la vitesse du vent pour un site isolé situé à El-Oued	68
TABLEAU III.2: CARACTERISTIQUES TECHNIQUES ET ECONOMIQUES DU SYSTEME PV / EOLIEN.....	72
TABLEAU III.3: COMPARAISON LE COUT DE KILOWATT	73
TABLEAU III.4: ENERGIE ANNUELLE PRODUITE PAR CHAQUE GENERATEUR	74
TABLEAU III.5: INFORMATION CONCERNANT LA PRODUCTION D'ENERGIE PAR LE GP	75
TABLEAU III.6: INFORMATION CONCERNANT LA PRODUCTION DE L'ENERGIE EOLIENNE	76

SYMBOLES

- C Capacité d'un condensateur [F].
- C_y La cylindrée totale du moteur.
- C_r Le couple résistant.
- C_p Coefficient aérodynamique de puissance d'une turbine éolienne.
- C_{po} La couple présente un facteur de puissance maximum
- e_g F.é.m. à vide pour la machine synchrone.
- f Fréquence du système [Hz].
- g Le glissement de la machine.
- G^* Irradiation de référence $1\text{kW}/\text{m}^2$.
- I Le courant électrique [A].
- I_{cc} Le courant de court-circuit [A].
- I_D Le courant dans la diode parallèle [A].
- I_L Le photo-courant du module [A].
- I_m Courant magnétisant de la machine [A].
- I_R Le courant dans la résistance parallèle [A].
- I_{pm} Courant pour la puissance maximale extraite [I].
- J_d L'Inertie totale pour le moteur diesel.
- k Le coefficient de Kapp.
- K Constante de Boltzmann [$1,38.10^{-23}(J/K)$].
- K_a Le gain statique.
- K_1 Facteur intégrateur pour le contrôle de vitesse du moteur.
- L_f Inductances des fuites totales [H].
- L_g Inductance synchrony [H].
- L_r Inductances cycliques rotorique [H].
- L_s Inductances cycliques statorique [H].
- M Inductances magnétiques.
- m Masse d'air.
- m_f Le débit de carburant injecté dans la chambre de combustion.
- N Nombre de conducteurs d'une phase de la machine.
- n Facteur d'idéalité de la diode.
- N_c Le nombre de cylindres pour un moteur diesel.
- η_i Le rendement pour un moteur diesel.
- P_{in} Puissance incidente lumineuse [W].
- P_m Puissance maximum extraite [W].

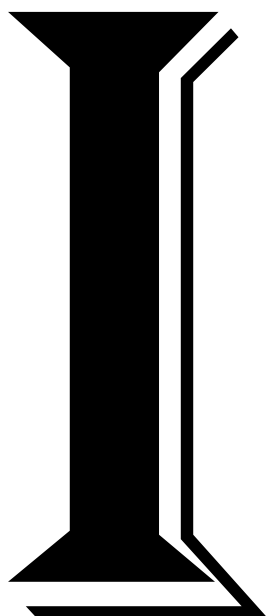
- P_n Puissance nominale générée par l'éolienne [W].
- P_{mf} La pression moyenne des pertes par frottement pour le moteur diesel.
- P_g Puissance mécanique disponible sur l'arbre de la génératrice [W].
- P_{mt} Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé [W].
- R Rayon de la voilure [m].
- R_r Résistance d'une phase rotorique [Ω].
- R_s Résistance d'une phase statorique [Ω].
- R_p Résistance parallèle [Ω].
- R_{sr} Résistance série [Ω].
- S Surface active de la voilure [$2m$].
- T Température de module [K].
- T_d Le couple mécanique sur l'arbre de moteur diesel.
- T_{em} Le couple électromagnétique.
- T^* Température ambiante égale à C^{025} .
- U Tension au borne de l'enroulement de la machine [m/s].
- V Vitesse du vent [m/s].
- V_{C0} Tension de court-circuit [V].
- V_{pm} Tension pour la puissance maximale extraite [V].
- ω_s Pulsation des grandeurs statorique [rad/s].
- Ω Vitesse de rotation [rad/s].
- Ω_1, Ω_2 Vitesse de rotation de l'éolienne avant et après le multiplicateur.
- λ Vitesse relative de l'éolienne.
- ρ Masse volumique d'air [$3kg/m$].
- δ_d Le statisme qui aide à contrôler la vitesse du moteur.
- τ Constante du temps [S].
- ϕ Le flux statorique [*weber*].
- $\alpha_1 A/C^0$ Coefficient obtenu empiriquement.
- η Le rendement de puissance.
- σ La conductivité d'un matériau [$W.m^{-1}.K^{-1}$].

ABREVIATIONS :

- GPV Générateur photovoltaïque.
- MAS Machine asynchrone
- SHSystème hybride d'énergie électrique

Mot clés :

Éolien, photovoltaïque, système hybride, énergie renouvelable



INTRODUCTION

GÉNÉRALE

Introduction générale

Depuis la révolution industrielle, et l'augmentation de la consommation totale de la consommation d'électricité a augmenté partout dans le monde a plus que doublé en 40 ans (1973-2013). La grande partie de l'énergie électrique utilisée par l'humanité provient des énergies fossiles. Selon l'agence internationale de l'énergie, ses ressources conventionnelles représentent 80,4 % de production d'énergie globale, elles sont à l'origine de 40 % des émissions mondiales de CO₂ [1]. Dans le cadre du développement durable, face au double enjeu planétaire posé les risques de pénurie des matières fossiles et leurs effets sur le changement climatique, les gouvernements engagés dans le *Protocole de Kyoto* doivent donc multiplier leurs actions dans le secteur de la production d'énergie électrique afin de développer des sources d'EnergiesRenouvelables, propres et inépuisables, ces dernières représentent un gisement considérable au niveau mondial [2]. Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici et au future, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables, pour cela plusieurs travaux de recherches ont été lancés dans plusieurs laboratoires de recherche dans le domaine de développement durable, pour but de satisfaire la demande de consommation énergétique d'une part et d'autre part pour réduire les effets négatives des ressources d'origine fossile sur l'environnement [3]. Une autre problématique s'ajoute à celles détaillées dans les deux paragraphes précédents, celle des sites isolés, plus de deux milliards de personnes disséminées dans des régions isolées. Dans ces secteurs l'approvisionnement électrique dépend seulement des systèmes de génération diesel autonomes, outre le coût de carburants ne cesse d'augmenter, en plus l'extension du réseau électrique s'avère prohibitif et le surcoût d'approvisionnement en combustible augmente radicalement avec l'isolement, ce qui rend la production d'électricité économiquement très dispendieuse, ce qui traduit l'application d'une solution parfaite comme une production d'énergie décentralisée, à savoir les Systèmes Hybrides de génération d'énergie [4]. Un système hybride de génération d'énergie électrique provient un choix remarquable pour pallier aux problèmes d'alimentation des sites isolés, sa combinaison de plusieurs sources génère une particularité et leur fonctionnement aussi. La diversification en termes de sources d'énergie pour ce système reste un avantage majeur pour limiter le problème de fluctuation des sources renouvelables. Cependant leur installation nécessite une étude de dimensionnement des organes représentant le système pour définir un fonctionnement idéal [5]. Un système de commande est indispensable si on choisit de combiner entre plusieurs générateurs d'énergie. Dans ce contexte général, le travail présenté dans ce mémoire est la contribution à l'étude

d'un système hybride de génération d'énergie basé sur les énergies renouvelables destiné aux sites isolés. Dans la première partie de ce chapitre nous avons donné une étude complète d'un système hybride (éolien-solaire), En se fondant à l'étude sur les deux systèmes (système photovoltaïque et système éolien), et commente se connecter parmi les deux systèmes, Ainsi, afin d'obtenir énergie électrique hybride compte tenu considéré à la coute technique et économique.Ce travail nous a permis d'étudier la modélisation de système d'énergie hybride, cette la modélisation est sur l'énergie éolienne et l'énergie de photovoltaïque (PV). Les résultats obtenus par simulation montrent que le rendement du système est très encourageant. Troisièmes nous aborderons plus spécifiquement la question des configurations et les différentes simulations sur le logiciel HOMER pour évaluer les performement autonome avec l'exposition dès l'ensemble ces de l'installation choisie, dans les conditions de fonctiondes résultats obtenus et leur interprétation.

Chapitre 1

État de l'art sur le système hybride de génération d'énergie renouvelable

I.1 Introduction

L'épuisement des ressources fossiles, à plus ou moins long terme, la flambée des cours du brut et la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre rendent urgentes la maîtrise des consommations et la diversification des sources d'énergie, un fait qui interpelle plus fort que jamais le développement des énergies renouvelables. Et afin d'atténuer le caractère aléatoire d'un gisement d'énergie renouvelable donné, on peut multiplier les sources de natures différentes. On obtient alors un système dit multi-sources. Il présente en somme le double avantage de minimiser les perturbations de l'environnement grâce à une consommation sur le lieu de production de ressources naturelles renouvelables. Actuellement, la plus grande part de la consommation énergétique mondiale est dédiée à la production d'électricité. L'abondance des réserves de charbon et leur faible coût d'exploitation expliquent que le charbon soit économiquement avantageux et arrive en tête dans les ressources exploitées pour la production d'électricité. En revanche, l'impact environnemental du charbon est remarquable même avec la présence des technologies plus récentes et moins polluantes. Ensuite vient le gaz naturel avec la turbine à gaz à cycle combiné qui est la principale technologie de la production d'électricité mise en service dans le monde [1]. En troisième place on trouve le nucléaire. Certainement le pétrole est peu utilisé pour la production d'électricité à l'échelle mondiale mais en parallèle on le trouve avec le gaz à la première place pour la production de l'électricité dans notre pays l'Algérie [6].

I.2 Définition du Système d'Energie Hybride

I.2.1 Présentation du système hybride

Le système hybride de production de l'énergie, dans sa vue la plus générale, est celui quicombine et exploite plusieurs sources disponibles facilement mobilisables. Le système qui nous intéresse regroupe trois parties, à savoir l'éolienne, le photovoltaïque, et comme appoint un groupe électrogène. Ces trois sources de production de l'énergie passent par un stockage électrochimique. L'ajout du groupe électrogène à un système de production d'énergies renouvelables peut d'une part augmenter la fiabilité du système, alimenter des charges plus énergétivores et, d'autre part, diminuer de manière importante le coût de l'électricité produite par une diminution importante de la taille des générateurs solaire et éolien. Nous allons envisager dans notre étude d'alimenter un village composé d'une dizaine de foyers isolés, situé dans une zone climatique algérienne, ou de manière plus exacte d'apporter un certain service énergétique. En fait, ce n'est pas l'énergie en soi que réclame une population mais un service énergétique, à nous de le lui apporter au moindre coût

et avec une efficacité énergétique. Cette étude fait, en premier lieu, usage de dimensionnement et d'analyse du système hybride précité, se configurant selon plusieurs combinaisons. Le choix de l'une ou de l'autre doit tenir compte du coût de fonctionnement ainsi que de la taille du système.

I.2.2 Les différentes configurations des systèmes hybrides

Deux configurations s'imposent [7]:

I.2.2.1 Architecture à bus CC, ayant les avantages et inconvénients suivants :

♦Avantage

- La connexion de toutes les sources sur un bus à CC simplifie le système de commande.
- Le générateur diesel peut être dimensionné de façon optimale, c'est-à-dire de sorte à fonctionner puissance nominale pendant le processus de chargement des batteries jusqu'à un état de charge de 75 à 85%.

♦ Inconvénient

- Le rendement de l'ensemble du système est faible, parce qu'une certaine quantité d'énergie est perdue à cause des batteries et des pertes dans les convertisseurs.
- Les générateurs diesels ne peuvent pas alimenter directement la charge, l'onduleur doit donc être dimensionné pour assurer le pic de charge.

I.2.2.2 Architecture mixte à bus CC/CA

Dont les avantages et les inconvénients sont énumérés comme suit :

♦ Avantages

- Le GPV et l'onduleur peuvent fonctionner en autonome ou en parallèle. Quand le niveau de la charge est bas, l'un ou l'autre peut générer le nécessaire d'énergie. Cependant, les deux sources peuvent fonctionner en parallèle pendant les pics de charge.
- La possibilité de réduire la puissance nominale du GPV et de l'onduleur sans affecter la capacité du système à alimenter les pics de charge.

♦ Inconvénient

- La réalisation de ce système est relativement compliquée à cause du fonctionnement parallèle de l'onduleur qui doit être capable de fonctionner en modes autonome et non-autonome en synchronisant les tensions en entrée avec les tensions en sortie du GPV.

I.3 L'ENERGIE SOLAIRE

I.3.1 Génératrice système solaire

Pour les applications hors réseau, il est possible d'avoir un système PV fonctionnant en parallèle avec une génératrice diesel, en toute complémentarité.

Ce type de système s'applique particulièrement à des sites éloignés où il est important d'avoir de l'électricité en continu, où les coûts de transport du carburant sont élevés et où il n'est pas encore rentable d'utiliser un système PV seul avec batteries. Les génératrices peuvent utiliser plusieurs types de combustibles fossiles, essence, mazout, propane ou gaz naturel.

Ce système se présente sous différentes variantes. Le champ d'application des SEH est très large et par conséquent, il est difficile de classer ces systèmes. On peut néanmoins essayer de réaliser un classement par gamme de puissance. Les seuils de puissance donnés ne sont que des ordres de grandeurs.

I.3.2 L'énergie solaire en Algérie

Dans beaucoup de pays, qui souvent ne bénéficient pas d'un ensoleillement aussi favorable qu'en Algérie, l'énergie solaire gagne en signification à une vitesse exponentielle. La croissance moyenne mondiale du marché a été de 33% au cours des dix dernières années.

Ce qui concerne notre pays, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures dans les hauts plateaux et Sahara. L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m² est de l'ordre de 5 [KWh] sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 [KWh/m²/an] au Nord et 2263 [kWh/m²/an] au Sud du pays. Si on prend une autre échelle d'exportation d'importantes quantités de pétrole et de gaz vers l'Europe, l'énergie solaire que peut l'Algérie produire peut satisfaire la totalité des besoins de l'Europe en électricité. Bien que les conditions géographiques, climatiques et météorologiques soient très favorables, l'énergie solaire en Algérie n'a pas encore percé et ce marché demeure encore presque vierge [8].

I.3.3 Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet (0.2µm) à l'infrarouge (2.5µm). L'énergie totale transportée par le rayonnement

solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre de 1350W/m^2 dans l'espace hors atmosphère terrestre. Lorsque le rayonnement solaire traverse l'atmosphère, il subit une atténuation et une modification de son spectre à la suite de phénomènes d'absorption et de diffusion dans les gaz, l'eau et les poussières. Ainsi, la couche d'ozone absorbe une partie du spectre lumineux provenant du soleil, et en particulier une partie des ultraviolets dangereux pour la santé[9].

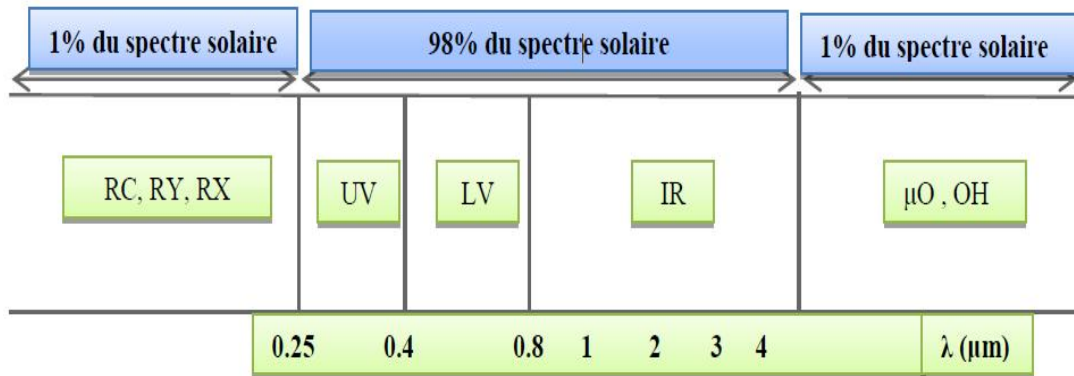


Figure I.3 : Composantes du spectre de rayonnement solaire

La conception de systèmes PV nécessite la connaissance du rayonnement solaire utile sur le site d'installation, dans le plan des panneaux solaires. C'est l'un des paramètres essentiels de l'étude préalable ; pour un besoin électrique donné, plus d'énergie reçue implique moins de panneaux à installer et inversement, d'où cette étude. Le rayonnement est de l'énergie transportée par des ondes électromagnétiques. La surface du soleil qui nous envoie le rayonnement est appelée la photosphère et se trouve à une température de 5777 [K] . L'énorme quantité d'énergie émise par le soleil trouve sa source dans les réactions nucléaires qui y ont lieu. Le rayonnement émis par le soleil se rapproche fort de celui d'un corps noir à la température de 5777 [K] . Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée et la plus abondante, sur terre. Sa répartition est donnée sur la figure (I.4)

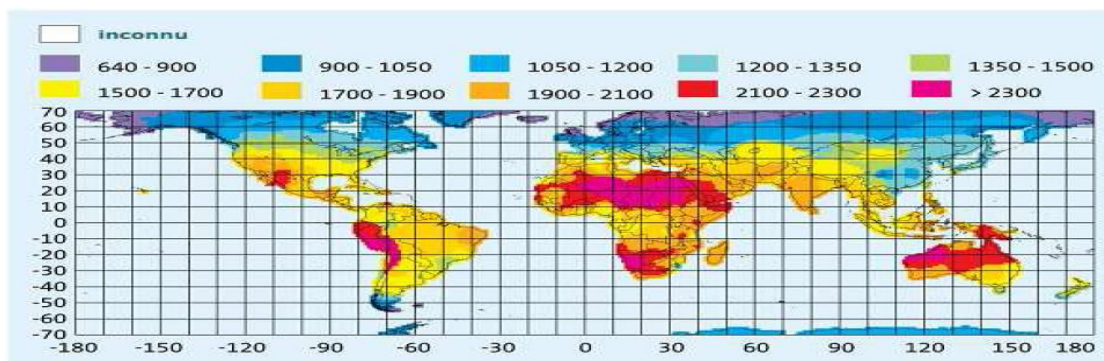


Figure I.4: Rayonnement solaire dans le monde ($\text{kWh/m}^2.\text{an}$) [9].

La quantité d'énergie libérée par le soleil (captée par la planète terre) pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an. Et pourtant, elle en capte qu'une infime partie, un dix-milliardième environ, ce qui représente néanmoins un peu plus que $1,6 \cdot 10^{18}$ [kWh/an], équivalent à une puissance continue de 180.106 [GW], 30 % sont directement réfléchis dans l'espace, 45 % sont absorbés, convertis en chaleur et rayonnés dans l'infrarouge. Les 25 % restant alimentent les cycles hydrologiques (24 %) et la photosynthèse (0,06 %) soit l'équivalent d'une moyenne de $45 \cdot 10^6$ [GW].

L'énergie rayonnée au sol vaut environ 720.1015 [kWh]. Selon les régions, l'énergie reçue à la surface de la terre varie, par mètre carré, de 1100 à 2300 [kWh/an], soit une puissance moyenne (répartie sur l'année, en tenant compte des alternances jour-nuit et des périodes nuageuses) de 120 à 260 [W/m²] et une puissance crête de plus d' 1 [kW/m²].

En effet, la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère, estimée à 1360 [W/m²] à des variations près en l'année, subit des dispersions, du fait de son absorption partielle par les gaz atmosphériques et la vapeur d'eau. Ce flux dépend de l'angle d'incidence et donc de l'épaisseur atmosphérique traversée [10]. Au sommet de l'atmosphère, le spectre solaire s'étend de 200 à 3000 [nm]. L'énergie reçue se répartit comme suit :

- _ 9 % dans la bande des UV (< 0,4 [μm]) ;
- _ 43 % dans la bande visible (0,4 à 0,8 [μm]) ;
- _ Et 48 % dans la bande des infrarouges (0,7 à 3 [μm]). 98,8 % de l'énergie du spectre est contenu dans la bande des longueurs d'onde inférieures à 2500 [nm].

Les longueurs d'ondes des rayonnements électromagnétiques du flux d'énergie sont assez différentes du corps noir dans l'espace, mais encore plus sur la terre telle qu'elle le montre la figure (I.5) :

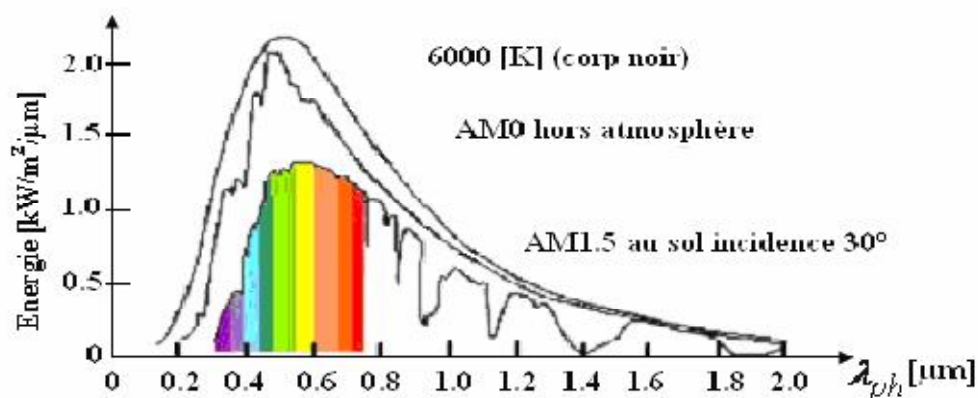


Figure I.5: Répartition spectrale du rayonnement solaire

- Dans les conditions AM0: hors atmosphère à haute altitude.
- Dans les conditions AM2 : pour atmosphère terrestre, le soleil étant à 30° sur l'horizon.

La distance moyenne de la terre au soleil qui est de 150.106 [km], la puissance radiative reçue du soleil sur une surface perpendiculaire aux rayons et située hors de l'atmosphère terrestre est une constante et vaut 1367 [W/m²]. Cette quantité est connue sous le nom de constante solaire G_{sc} . On serait tenté de penser que, l'énergie solaire hors atmosphère étant connue, ainsi que la course du soleil en tout point du globe, on peut reconstituer l'énergie solaire reçue au sol. Ce serait le grand oubli que l'atmosphère affecte largement le rayonnement solaire.

I.3.4 Ses composantes

Traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire subit des modifications quantitatives et qualitatives. Le spectre du rayonnement au niveau du sol n'est donc pas identique à celui du rayonnement extraterrestre. Abordant l'atmosphère, le rayonnement incident s'affaiblit suite à l'absorption partielle par les gaz atmosphériques, la vapeur d'eau et les aérosols ainsi qu'à la diffusion moléculaire. On distingue trois composantes.

I.3.4.1 Le rayonnement direct

Qui est le rayonnement reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres pouvant être concentrés par les miroirs .

I.3.4.2 Le rayonnement diffus

Est le rayonnement provenant de toute la voûte céleste (air, nébulosité, aérosols). La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude d'autres partants dans toutes les directions. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et sa réflexion par les nuages, molécules d'air et poussières. Le rayonnement solaire diffus reçu au sol est lui-même décomposé en :

1. Diffus provenant du ciel.
2. Diffus provenant du sol.

Les courtes longueurs d'onde (bleu) sont plus diffusées que les grandes longueurs d'onde, ce qui explique la couleur bleue du ciel. Le nuage fait qu'une partie du rayonnement diffusé est renvoyée vers l'espace, c'est la réflexion diffuse, le reste est transmis jusqu'au sol, c'est la transmission diffuse. Évidemment, en cas de couverture totale du ciel par des nuages, le

rayonnement direct est nul. Par temps couvert, on admet que le rayonnement diffus est isotrope, c'est-à-dire que l'on reçoit un rayonnement identique de toutes les directions de la voûte céleste. Par temps clair ou voilé, outre le ciel bleu relativement isotrope, on a une couronne plus brillante autour du soleil, composante appelée « Circum solaire ».

Le diffus représente plus de 50 % du rayonnement annuel disponible dans les régions tempérées contre 30 à 45 % dans les pays ensoleillés et en montagnes, 15 à 20 % est le taux de ce rayonnement lors des belles journées.

I.3.4.3 Le rayonnement réfléchi

Est ce qu'on appelle au même titre albédo, c'est la capacité d'une surface à réfléchir la lumière notamment celle du soleil. (Exprimé par un chiffre compris entre 0 et 1 ; 1 s'affecte à un corps qui réfléchit totalement la lumière reçue.

I.3.4.4 Le rayonnement global

Est tout simplement la somme de cette diverse contribution, comme le montre la figure- (I.6) ci-dessous.

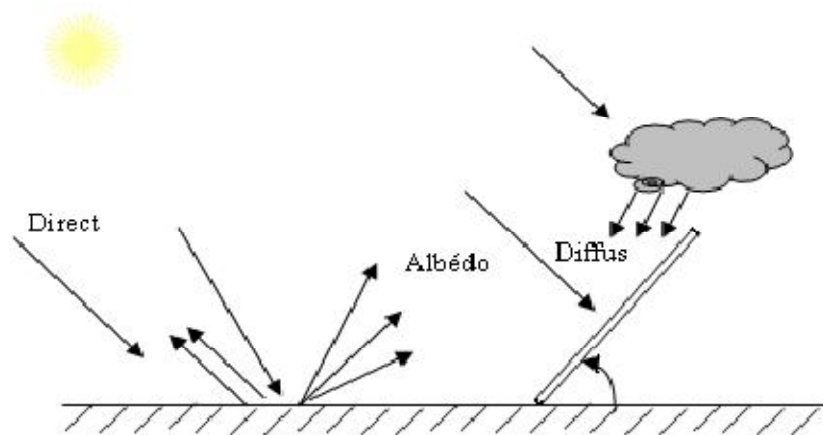


Figure I.6: Composantes du rayonnement solaire au sol

On appelle rayonnement direct normal, le rayonnement direct mesuré perpendiculairement aux rayons du soleil. Mesuré selon un plan non perpendiculaire, le même rayonnement irradie une plus grande surface, il est donc moins intense, c'est ce que l'on appelle « l'effet Cosinus ». C'est ce qui fait notamment que le rayonnement direct sur plan horizontal est toujours inférieur au rayonnement dans le plan perpendiculaire au soleil. En revanche, le rayonnement diffus peut être supérieur vu que le plan horizontal voit une plus grande part de la voûte céleste. Cela mène les concepteurs d'alimentations solaires à installer à l'horizontale des panneaux solaires performants

sous rayonnement diffus, spécialement sur les sites géographiques qui sont très souvent à ciel couvert.

Une partie du rayonnement solaire peut être exploitée pour produire directement de la chaleur (solaire thermique), ou de l'électricité, c'est l'énergie solaire photovoltaïque, et c'est précisément là que les données de l'ensoleillement doivent être distinguées en .

I.3.4.5 Rayonnement cumulé

Le dimensionnement d'un système photovoltaïque est souvent basé sur les moyennes mensuelles de l'énergie solaire journalière du site d'étude. Il suffit alors de disposer de 12 valeurs journalières cumulées (pour les 12 mois de l'an) dans le plan des capteurs. Plus exactement, ce que l'on utilise est le rayonnement solaire global intégré sur une journée, appelé simplement rayonnement global journalier : il s'agit de l'intégrale du rayonnement global (direct+diffus) sur la journée, le cumul du rayonnement en [Wh/m²/jour]. Ces valeurs sont accumulées d'année en année, reste à réaliser les moyennes pour chaque mois de l'année.

Comme il n'est possible de disposer de pyromètre dans toutes les directions, les bases de données météorologiques fournissent ces valeurs pour seulement quelques orientations et inclinaisons. Parfois, seul le rayonnement horizontal est mesuré. Il est possible de calculer, à l'aide de modèles mathématiques et une certaine dose de statistiques, le rayonnement sur une surface inclinée à partir du rayonnement horizontal, selon la latitude et la longitude du lieu ainsi que le coefficient d'albédo.

I.3.4.6 Rayonnement instantané

Il existe bien évidemment des cas où l'on a besoin de profils détaillés du rayonnement instantané pendant la journée, c'est spécialement le cas en présence d'obstacles aux voisinages des panneaux, susceptibles de provoquer des ombrages pendant plusieurs heures en certaines périodes de l'année. On a alors besoin de données horaires (courbes de l'intensité du rayonnement fonction de l'heure de la journée), dans le but de quantifier les pertes dues à ces ombrages.

Des simulateurs solaires existent et offrent la correspondance spectrale la plus proche du spectre solaire que l'on puisse obtenir à partir d'une source artificielle. La correspondance n'est pas exacte, mais meilleure que ne l'exigent de nombreuses applications. Ceux de classe A assurent en effet une uniformité extrêmement rigoureuse, garantissent une stabilité de sortie et une correspondance spectrale identiques à celles nécessaires aux fabricants de cellules PV pour tester

leurs produits. Pour éviter toute confusion de terminologie dans ce qui s'en suit, nous spécifions les unités utilisées dans ce cadre.

I.4 La production solaire photovoltaïque

L'énergie solaire fait appel à la ressource la mieux partagée : le rayonnement solaire.

L'énergie solaire peut être récupérée par deux procédés :

- Photovoltaïque pour la production d'électricité avec ou sans stockage .
- Thermique pour la production de chaleur.

Notons que l'homme consomme, aujourd'hui, une énergie correspondant à 1/8000ème de l'énergie solaire qui arrive à la surface de la terre [11].

Mais notre intérêt porte sur la première forme de conversion.

I.4.1 Généralités

L'hélio électricité, qui traite de la transformation directe de l'énergie solaire en énergie électrique, est apparue en 1930 avec les cellules à oxyde cuivreux puis au sélénium. Mais ce n'est qu'en 1954 avec la réalisation des premières cellules PV au sélénium dans les laboratoires de la compagnie Bell Téléphone, que l'on entrevoit la possibilité de fournir de l'énergie.

Très rapidement utilisées pour l'alimentation des véhicules spatiaux, leur développement et de rapides progrès ont été motivés par la conquête de l'espace. Les premiers générateurs ont été utilisés en 1958 pour les satellites Vanguard. Au cours des années 1980, la technologie PV terrestre a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales de quelques mégawatts. Les premières installations ont été conçues pour sites isolés, principalement dans les pays en voie de développement. Par la suite, la technologie est même devenue familière à travers de nombreux produits de faible puissance y faisant appel : montres, calculatrices, balises radio et météorologiques, pompes et réfrigérateurs solaires.

Des événements tels que les courses de véhicules solaires offrant une image de haute technologie futuriste et écologique y ont également contribué [12]. Le mot « photovoltaïque » vient du grec « photos » signifiant lumière et de « Volta » du nom du physicien italien qui, en 1800, découvrit la pile électrique. Mais c'est en 1839 que le français Antoine Edmond Becquerel fut le premier à mettre en évidence cette conversion particulière d'énergie.

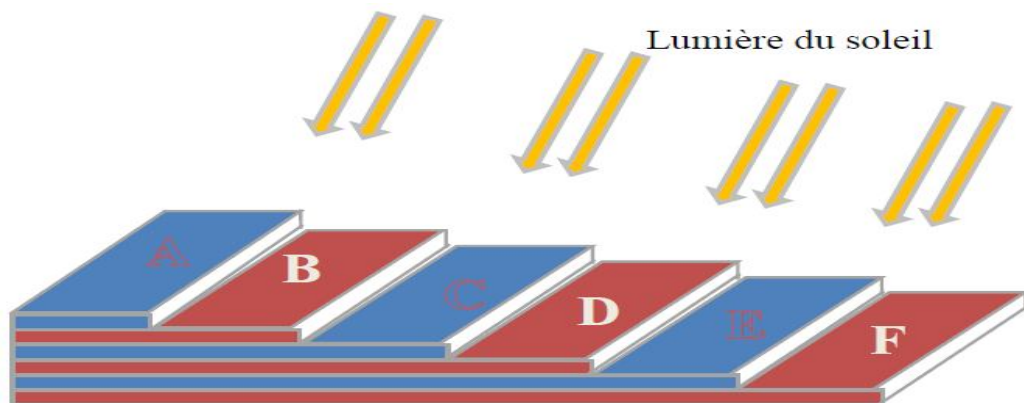
I.4.2 Principe de fonctionnement

Le phénomène de conversion photovoltaïque est dû à la variation de la conductivité d'un matériau sous l'effet de la lumière, selon le concept décrit ci-après.

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3V à 0.7V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule.

Une cellule PV 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 PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN 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. 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}). 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 [13]. La figure 4.2 suivante illustre une cellule PV.



A : Verre de protection. D : Silicium négatif.
B : Couche anti réfléchissante. E : Silicium positif.
C : Grille de contact. F : Support

Figure I.7 : Structure d'une cellule solaire en silicium

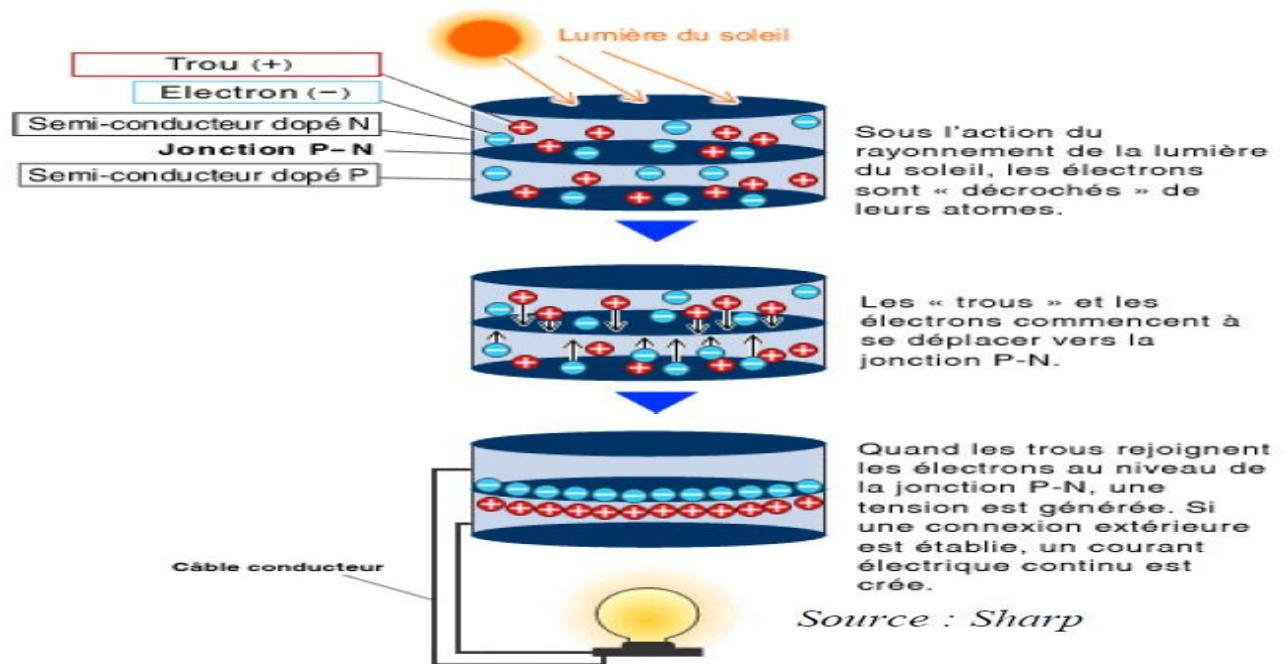


Figure I.8: Principe de fonctionnement d'une cellule PV

Le terme photovoltaïque peut désigner soit le phénomène physique - l'effet photovoltaïque – soit la technologie associée. Une cellule PV 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 PN avec une barrière de potentiel [14]. La carte de la figure (I.9) montre le montant en heures de l'énergie solaire reçue chaque jour, sur une surface optimalement inclinée pendant le plus mauvais mois de l'année.

Zones du monde prioritaires pour le développement de la cuisine solaire:

(Déforestation et désertification avec ensoleillement > 1600 kwh/m²/an)

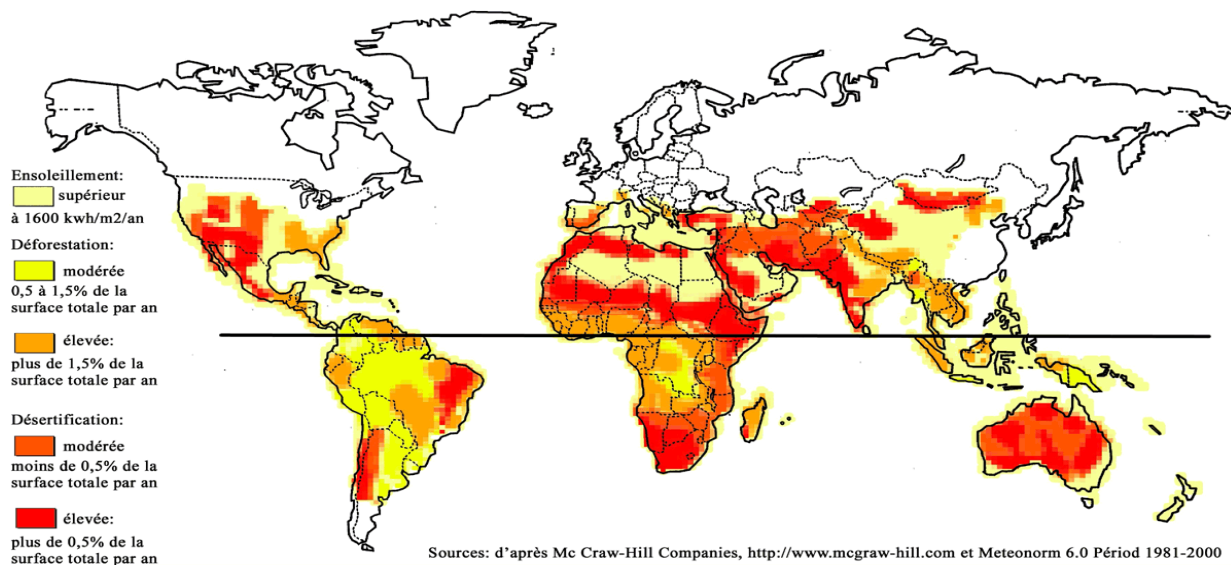


Figure I.9: Carte de l'insolation solaire journalière au monde

I.5 Type des cellules photovoltaïques

On les dévise en deux catégories

I.5.1 La cellule cristalline

C'est une technologie éprouvée et robuste dont le rendement est de l'ordre de 13%. Ces cellules sont adaptées à des puissances de quelques centaines de watts à quelques dizaines de kilowatts. Les modules en silicium cristallin sont fabriqués industriellement. Toutes les étapes du processus de fabrication ne cessent de progresser régulièrement afin de viser le plus possible les rendements théoriques calculés tout en évitant d'augmenter le prix des modules. Il reste encore aujourd'hui un large potentiel d'optimisation [15].

Les cellules à partir de plaquettes de silicium cristallisé se divisent en deux catégories distinctes, celles à partir de silicium monocristallin et celles à partir de silicium poly-cristallin figure I.10. Le silicium monocristallin est plus cher que le silicium multi-cristallin mais permet d'obtenir un rendement plus élevé, avec près de 24.7% contre 19.8% de rendement sur petite cellule en laboratoire [16].

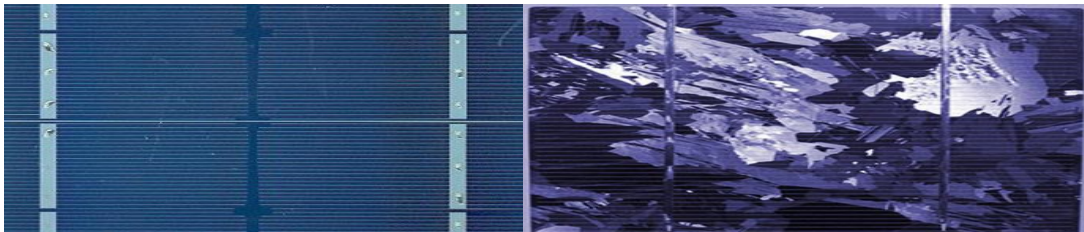


Figure I.10 : a) Cellule PV monocristalline ,b) Cellule PV poly cristalline

I.5.2 La cellule amorphe

En comparaison avec la cellule cristalline le coût est moins. Les cellules amorphes sont utilisées partout et en particulier dans une production d'énergie électrique faible, par exemple une électrification destiné à alimenter des montres, des calculatrices, luminaires de secours. Elles sont également souvent utilisées là où un fort échauffement des modules est à prévoir. Cependant, le rendement est de plus de 2 fois inférieur à celui du silicium cristallin et nécessite donc plus de surface pour la même puissance installée. Les cellules en silicium amorphe sont actuellement de moins en moins utilisées : 9,5 % de la production mondiale en 2000 alors qu'elles représentaient 12 % en 1999. Figure I.11 [17].

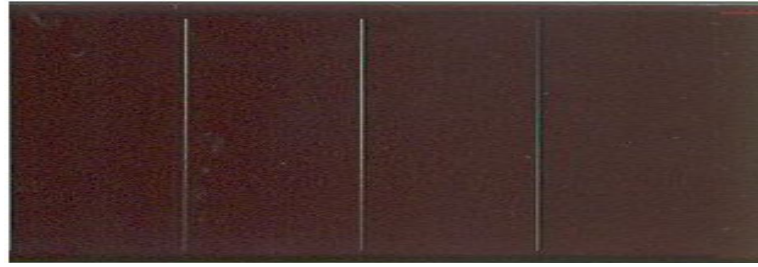


Figure I.11: Cellule photovoltaïque amorphe

Les caractéristiques de la simple cellule sont celles d'une photodiode, mais en convention générateur. Elles sont données par la figure suivante :

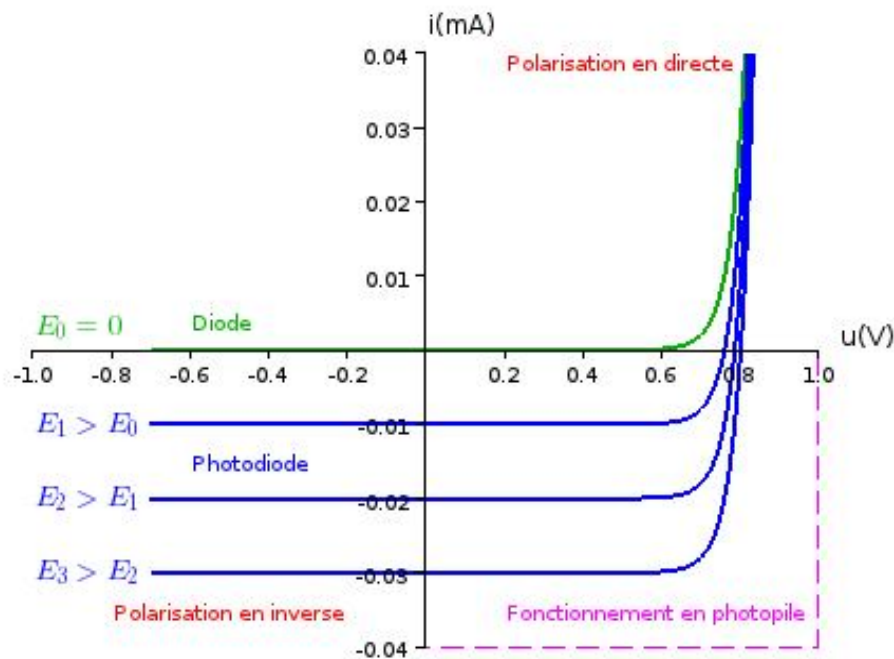


Figure I.12: A gauche, caractéristique d'une photodiode, à droite caractéristique d'une cellule photovoltaïque [17].

I.5.3 Connexion directe source-charge

Actuellement, il reste encore beaucoup d'applications où une connexion directe entre un GPV et une charge est effectuée. Ce choix est principalement lié à la simplicité de l'opération. Lorsque la batterie est en période de charge ou déjà chargée, la tension de la batterie a tendance à dépasser la tension délivrée par le photo générateur. Le courant passerait alors de la batterie vers la photo génératrice et cela pourrait l'endommager. C'est pourquoi on met une diode qui bloque le passage du courant. Cette diode empêche la décharge de la batterie lorsque l'ensoleillement est faible. La

diode est placée entre le panneau et la batterie comme on peut le voir sur la figure I.13 ci-dessous. les bandes sur la diode doivent être du côté de la batterie d'après la notice des panneaux solaires. l'inconvénient de cette configuration, est qu'elle n'offre aucun type de limitation et/ou de réglage de la tension de la batterie. Le transfert de P_{max} disponible aux bornes du GPV vers la charge n'est pas non plus garanti.

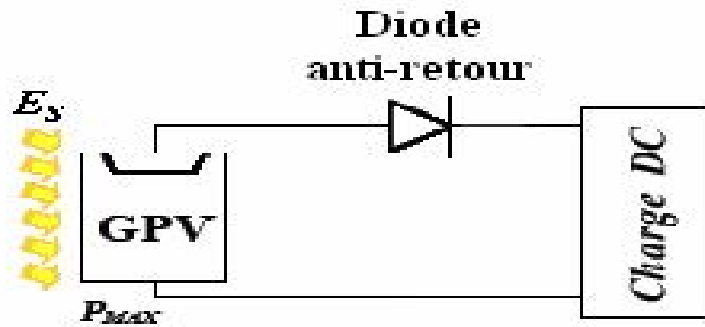


Figure I.13: Connexion directe GPV-Charge par le biais d'une diode anti-retour

I.5.4 Choix de la diode anti-retour

Cette diode introduit une chute de tension de 0,6 [V] (diode de redressement classique) ou de 0,2 [V] (diode Schottky). Une diode Schottky est une diode qui a un seuil de tension directe très bas facilitant la détection des signaux HF faibles et hyperfréquences. Une diode Schottky fonctionne exactement de la même manière qu'une diode normale. Les différences se situent.

- Au niveau de la tension de seuil, qui n'est plus de 0,7 [V], mais de 0,3 [V], à 0,4 [V]
- Au niveau de la rapidité, les diodes Schottky sont beaucoup plus rapides. La notice des panneaux solaires précise qu'il est suggéré d'utiliser une diode anti-retour pour

Chaque panneau solaire.

I.5.5 Les différentes technologies de fabrication des cellules

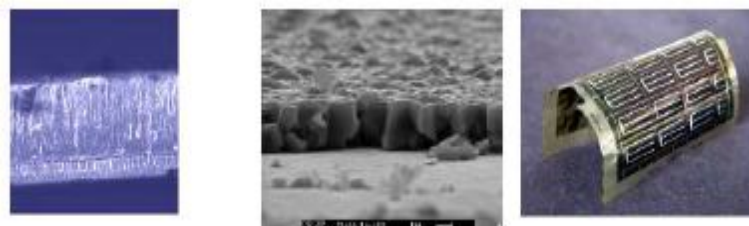
Plusieurs technologies de fabrication existent, voici un résumé comparatif de l'ensemble:

Matériau	Rendement	Longévité	Caractéristiques	Principales utilisations
Silicium mono cristallin	12 à 18 % (24,7 % en laboratoire).	20 à 30 ans.	· Très performant. · Stabilité de production d'énergie. · Méthode de production coûteuse et laborieuse.	Aérospatiale, modules pour toits, façades, ...

Silicium poly cristallin	11 à 15 % (19,8 % en laboratoire).	20 à 30 ans.	· Adapté à la production à grande échelle. · Stabilité de production d'énergie (plus de 50 % de la production mondiale).	Modules pour toits, façades, générateurs, ...
Amorphe	5 à 8 % (13 % en laboratoire).		· Peut fonctionner sous la lumière fluorescente. · Fonctionnement si faible luminosité. · Fonctionnement par temps couvert. · Fonctionnement si ombrage partiel. · La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20 % supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois.	Appareils électroniques (montres, calculatrices, ...), intégration dans le bâtiment.
Composite mono cristallin (GaAs)	18 à 20 % (27,5 % en laboratoire).		· Lourd, fissure facilement.	Systèmes de concentrateurs aérospatiaux (satellites).
Composite poly cristallin (CdS, CdTe, CuInGaSe ₂ , etc.)	8 % (16 % en laboratoire).		Nécessite peu de matériaux mais certains contiennent des substances polluantes.	Appareils électroniques (montres, calculatrices, ...), intégration dans le bâtiment.

Tableau I.1: Les différentes technologies de fabrication des cellules

CIS approches CIS où les nanomatériaux réagissent comme intermédiaires réactionnels.



Cellules à colorant où les systèmes sont auto-assemblés.

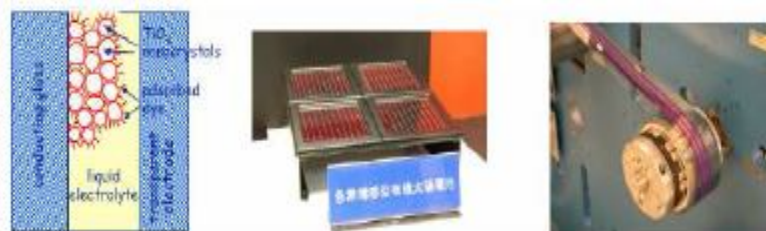


Figure I.14: Nouvelles technologies de cellules

I.6 Les différents types de systèmes PV

Un système photovoltaïque se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs. Cet ensemble, appelé aussi "Balance of System" ou BoS, comprend tous les équipements entre le champ de modules et la charge finale, à savoir la structure rigide (fixe ou mobile) pour poser ces modules, le câblage, la batterie en cas de stockage, son régulateur de charge, et l'onduleur lorsque les appareils fonctionnent en courant alternatif.

I.6.1 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. Le courant continu produit alimente directement des appareils prévus à cet effet ou est transformé en 230 Volts alternatif. C'est ce type de systèmes qui est retrouvé en sites isolés (systèmes insulaires, réseaux villageois) se faisant installer en association avec ressources conventionnelles, tels les générateurs diesel.

La chaîne de conversion d'une installation PV autonome est donnée par la figure I.15 ci-dessous :

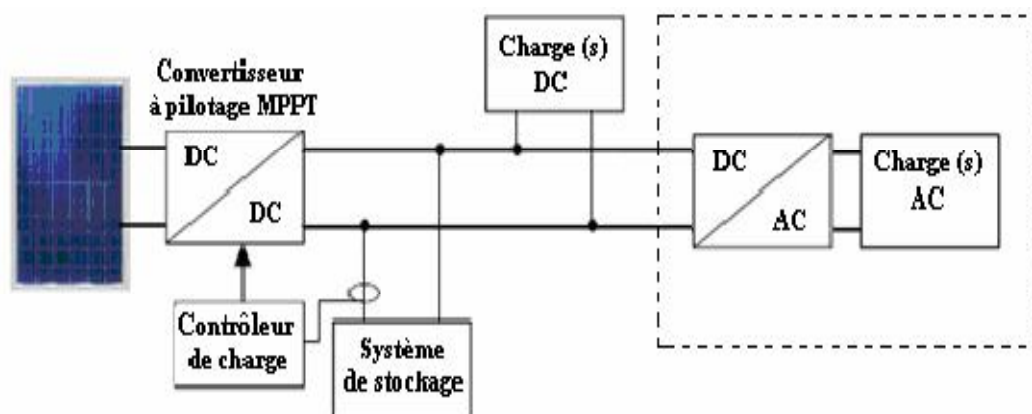


Figure I.15: Installations PV autonome

Le producteur-consommateur isolé du réseau est tributaire des conditions météorologiques. Ainsi, si l'on a plusieurs jours successifs défavorables à la production d'électricité, le producteur consommateur risque également d'être privé d'électricité lorsque son dispositif de stockage sera complètement déchargé. Au contraire, si les conditions sont favorables à la production et que toute la capacité de stockage est totalement utilisée, il doit arrêter de produire et donc délester sa

production. Mais le système peut également être connecté au réseau. L'avantage du raccordement est de se dispenser du coûteux et problématique stockage de l'électricité. Dans ses versions les plus économiques l'onduleur ne peut fonctionner qu'en présence du réseau, une éventuelle panne de ce dernier rend in opérationnel le système de production d'origine renouvelable. Un onduleur réversible est nécessaire si on a une charge à courant continu. Si la consommation locale est supérieure à la production de la centrale, l'appoint est fourni par le réseau. Dans le cas contraire, l'énergie est fournie au réseau public et sert à alimenter les consommateurs voisins.

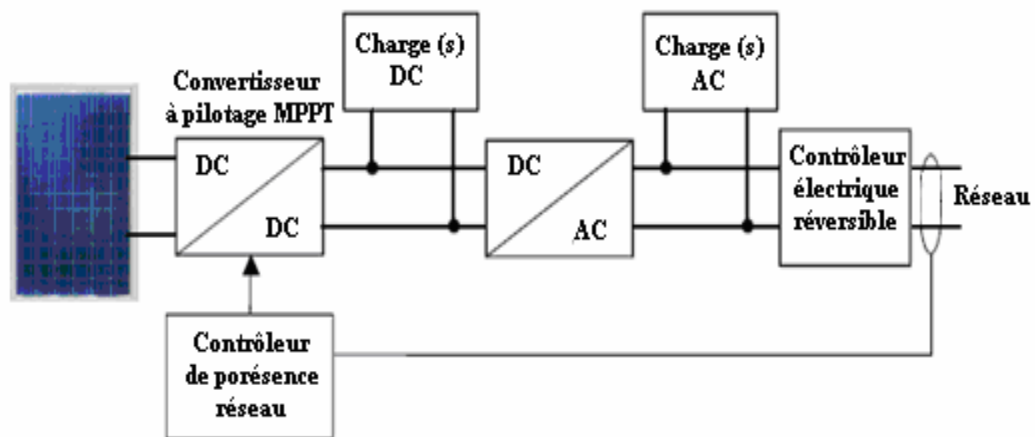


Figure I.16: Installation photovoltaïque couplée au réseau (un aérogénérateur et son convertisseur pourraient remplacer ou compléter le générateur photovoltaïque)

Le principal avantage des systèmes couplés au réseau est qu'ils permettent de revendre l'énergie produite et non consommée sur place au fournisseur du réseau. Par contre, ces systèmes ne peuvent fonctionner qu'en présence du réseau. Dans le cas d'une coupure de ce dernier, bien qu'ayant son propre système de production d'électricité, le producteur indépendant se trouve privé d'électricité. On distingue alors deux types de structures : Les systèmes à connexion directe au réseau qui est constituée d'un GPV connecté au réseau électrique à l'aide d'un onduleur. Il existe dans la littérature de nombreux exemples [18]. Les systèmes à bus continu intermédiaire, où Le générateur photovoltaïque est connecté à un bus continu par l'intermédiaire d'un convertisseur continu-continu. Un onduleur délivre une tension modulée. Celle-ci est filtrée pour réduire le taux d'harmoniques (THD). On obtient alors en sortie de ce dispositif une tension utilisable pouvant être injectée dans le réseau [19]. Il existe plusieurs architectures pour les dispositifs permettant de convertir la tension continue issue du générateur photovoltaïque en une tension sinusoïdale utilisable (230 [V]) [20].

I.6.2 Caractéristiques statiques des panneaux

De nombreux constructeurs offrent une gamme importante des panneaux PV. On prend l'exemple d'un module Axitec, AC-150P/13S, PhotonMag, dont les caractéristiques complètes sont reportées en annexe. Telle qu'elle a été représentée, une cellule photovoltaïque est un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à celui d'une source de courant shuntée par une diode.

I.6.3 Influence des résistances série et shunt

Les performances d'une cellule photovoltaïque sont d'autant plus dégradées que la résistance série est grande ou que la résistance shunt est faible. Cependant, il est possible, sous certaines hypothèses de dégager des valeurs limites acceptables R_{s1}, R_{sh1} [12].

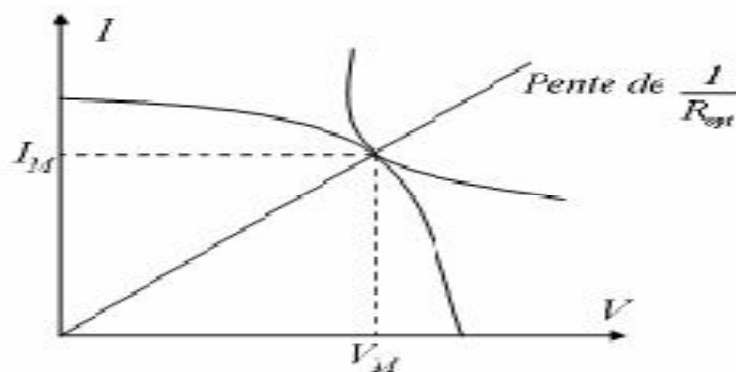


Figure I.17: Schéma d'une cellule élémentaire

I.6.4 Les semi-conducteurs

On appelle semi-conducteur un matériau électriquement intermédiaire entre isolant et conducteur. En effet, les valeurs usuelles de la conductivité (σ) des isolants sont comprises entre $1.e^{-11}$ et $1.e^{-19} S/cm$ et celles des conducteurs entre $6.e^7$ et $1.e^4 S/cm$. Il existe pourtant des corps qui ont une résistivité intermédiaire comprise entre $1.e^3$ et $1.e^{-6} S/cm$, on les appelle des semi-conducteurs [21].

I.6.5 Le panneau solaire

Le panneau solaire se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série ou bien en parallèle afin de produire la puissance souhaitable. Les premières implantations des structures étaient fondées sur l'association de plusieurs modules photovoltaïques attachés par un seul convertisseur on l'appelle un onduleur centré comme indiqué dans la figure 4.5. Le rendement de

cette structure est faible à cause de l'insertion obligatoire des diodes dans chaque branche parallèle afin d'éviter la dispersion d'énergie. Il y'a d'autre limitation tel que la perte en puissance qui touche la non-application réel d'algorithme MPPT ou chaque branche peut ne pas fonctionner en maximum de production de puissance. Ce qui concerne la protection des panneaux solaires, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas, d'ombrage. Pour cela, deux types de protections sont classiquement utilisées dans les installations actuelles.

-La protection en cas de connexion en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV (diode anti-retour).

-La protection lors de la mise en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass) et éviter les points chauds [22].

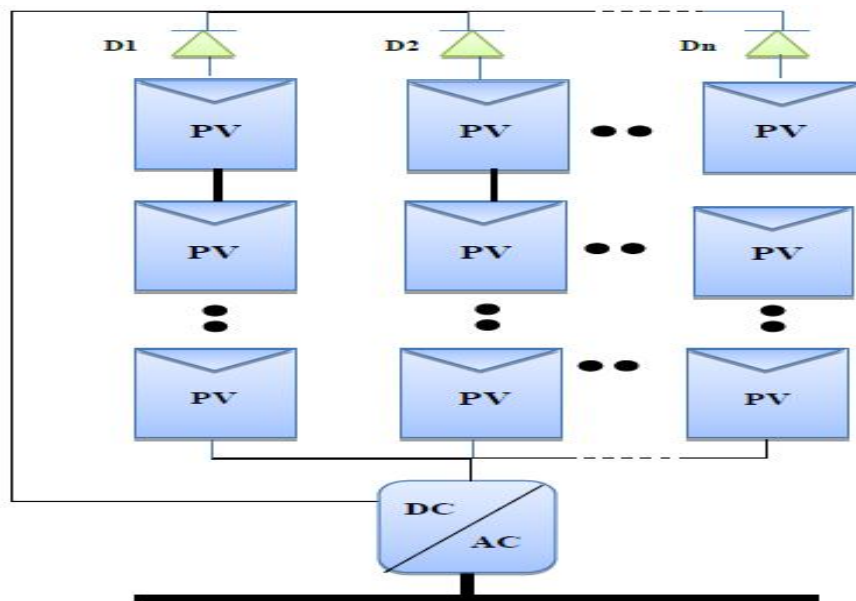


Figure I.18: La première implantation d'une structure PV [23]

Cependant le choix de la structure convenable des modules photovoltaïques reste lié au niveau de la connexion en série comme la montre la figure I.18, cette topologie permet un accroissement d'efficacité et une meilleure utilisation de panneau photovoltaïque. L'avantage principal de cette structure réside dans la suppression des pertes de puissance à cause d'absence des diodes de retour et l'application parfaite d'algorithme MPPT qui nous permet de produire une

puissance maximale. Une autre structure très intéressante applique l'utilisation du micro onduleur lié avec un seul panneau, dans ce cas chaque panneau peut fonctionner au point de puissance maximale. Cette topologie touche une production d'une faible puissance typiquement entre 200w et 300w. L'avantage principal de ses micros onduleurs réside dans l'emplacement facile en cas d'une panne, ils présentent aussi une simplicité de raccordement avec le réseau ou bien la charge.

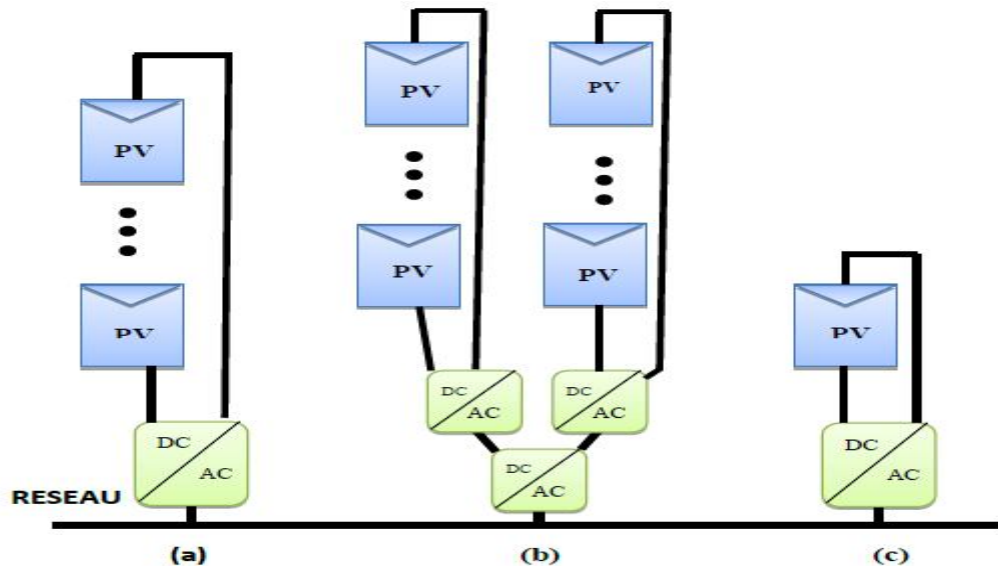


Figure I.19: Plusieurs formes de structures PV [23]

Le micro-onduleur est fixé sur le panneau, il doit supporter toutes les conditions météorologiques, cela implique que ce convertisseur est non réparable. En outre pour les systèmes qui ont une longue durée de vie, les composants du panneau comme les semi-conducteurs, les filtres et principalement les systèmes de contrôle doivent fonctionner dans une température élevée ce qui augmente la production.

Dans les revues scientifiques une simulation d'un onduleur connecté à des PVs est présentée dans l'article [24] par *J.T.Bialasiewicz et E.Muljadi*. Cependant l'optimisation du PV après le choix de sa structure est une étape très importante. Cette tâche est en relation avec le site d'installation du système photovoltaïque. Dans [25] les auteurs présentent une étude d'évaluation pour des PVs selon deux critères : celle de l'éclairement et du type de charge demandée installée dans le site. Dans le même aspect une autre approche similaire est présentée par *Ziyad M. Salameh et al* dans [26] afin de trouver une bonne configuration des PVs selon les mêmes facteurs pour un site spécifié, dans la même étude les données de force d'éclairement ont été enregistrées pour une trentaine d'années. Pas très loin de l'optimisation, une méthode déterministe et de la probabilité sont présentées par *G. Capizziet al* dans [27].

I.6.6 L'adaptation entre la charge et la source

L'écart entre la production électrique du générateur photovoltaïque et la consommation de la charge crée une indisponibilité sérieuse d'un mécanisme d'adaptation entre le PV et la charge. Cet outil permet d'extraire un maximum de puissance dans chaque instant afin de la transférer pour la charge. L'étage d'adaptation joue un rôle très important dans ce concept, il se permet d'être une interface d'interconnexion entre la source d'énergie et la charge, il peut y accéder à une production maximale de puissance à travers un système de contrôle capable de détecter les défaillances et la non-synchronisation entre l'entrée et la sortie. Un mécanisme de plus peut complexifier le système et rend compte une augmentation de prix d'exploitation et d'application.

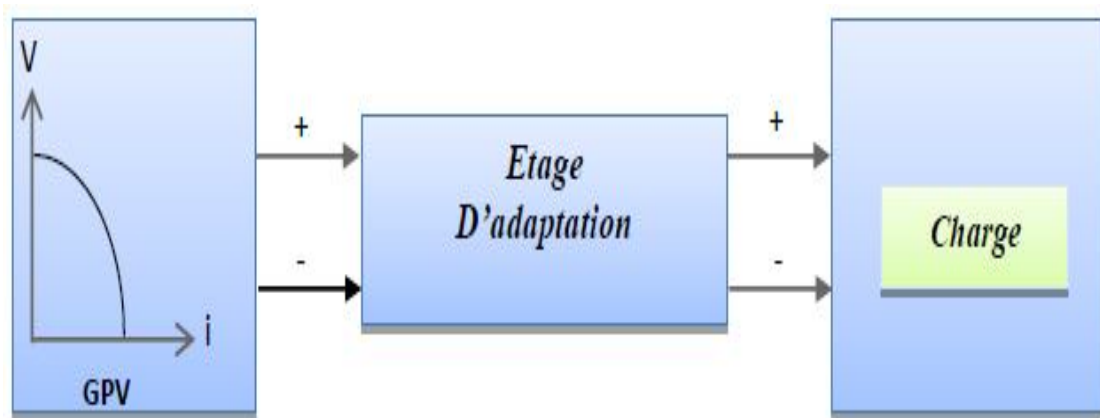


Figure I.20: Etage d'adaptation entre un GPV et une charge [21]

Concernant la technique d'adaptation du générateur PV, on trouve dans l'article présenté par *F.Z. ZerhounietB. Stambouli* une utilisation d'une méthode spécifiée à la configuration des modules photovoltaïques selon l'éclairement solaire et la variation dans la charge. Les auteurs ont trouvé que le couplage direct entre le PV et la charge persiste des pertes de puissance remarquable, implique d'un point d'opération dépendant particulièrement de la charge. Pour cela ils ont étudié une méthode de couplage par changement de configuration. Ils ont fait prendre un générateur constitué de deux modules disposés en configuration série alimentent une charge résistive. Pour le premier essai une bonne adaptation se voit avec le couplage direct, un deuxième essai qu'ils ont fait en connectant le générateur avec d'autres charges donne une mauvaise adaptation. Cela donne un principe de changement de configuration simple, suppose qu'un nombre total de charges fixent les modules photovoltaïques. Un deuxième principe touche un changement de configuration selon l'éclairement. Ils ont observé que pour un même nombre de modules, pour une même charge, la puissance d'opération pour le récepteur varie selon la variation de l'éclairement [28].

I.7 AVANTAGES ET INCONVENANTS DES PV

I.7.1 Avantage

Les avantages des générateurs photovoltaïques sont plusieurs et leur application se développe d'un moment à l'autre, parmi eux on cite :

- une haute fiabilité ou l'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent Particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- leur montage est simple et ses installations sont adaptables aux besoins de chaque projet.
- le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits. il ne nécessite ni combustible, ni un transport, ni un personnel hautement spécialisé.
- ils sont recyclables, les matériaux utilisés pour leur production peuvent être réutilisés. Le recyclage n'est pas seulement bénéfique pour l'environnement, il contribue également à réduire l'énergie nécessaire pour produire plus de matériaux.
- L'énergie solaire photovoltaïque peut être intégrée de manière esthétique dans les bâtiments, Les modules solaires peuvent être en façades, contribuant ainsi à l'autonomie énergétique des bâtiments.
- Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple des installations éoliennes.
- L'énergie solaire captée par la terre pendant une heure pourrait suffire à la consommation mondiale pendant une année. Au total, ce rayonnement représente 1.6 milliards de TWh, soit huit mille fois la consommation énergétique annuelle mondiale.

I.7.2 Inconvénients

Malgré les avantages que les générateurs photovoltaïques présentent, des points faibles peuvent se manifester au niveau de fonctionnement et de la fabrication :

- une fabrication d'un module photovoltaïque relève une haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 %, avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesels.

- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulation associés soient judicieusement choisis.
- La durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle mais de l'ordre de 20 à 30 ans. De plus, le rendement des cellules photovoltaïques diminue avec le temps.
- Le niveau de production d'électricité n'est pas stable. Il n'est pas prévisible, il dépend du niveau d'ensoleillement. Cependant la production d'électricité n'est pas constante.

I.8 l'énergie éolienne

I.8.1 Historique de l'éolien

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des voiliers et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau. Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 2 000 ans av. J.-C environ. Hammourabi, fondateur de la puissance de Babylone, avait conçu tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie utilisant la puissance du vent. La première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans av. J.-C. En Europe, les premiers moulins à vent ont fait leur apparition au début du Moyen Age. Utilisés tout d'abord pour moudre le grain, d'où leur nom de " moulins ", ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher des lacs ou des terrains inondés. Dès le XIV^e siècle, les moulins à vent sont visibles partout en Europe et deviennent la principale source d'énergie. Seulement en Hollande et au Danemark, vers le milieu du XIX^e siècle, le nombre des moulins est estimé respectivement à plus de 30000 et dans toute l'Europe à 200000. A l'arrivée de la machine à vapeur, les moulins à vent commencent leur disparition progressive. L'arrivée de l'électricité donne l'idée à Poule La Cour en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice. Ainsi, l'énergie en provenance du vent a pû être « redécouverte » et de nouveau utilisée (dans les années 1940 au Danemark 1300 éoliennes). Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux Etats-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les campagnes isolées. Dans les années 60, fonctionnait dans le monde environ 1 million d'aérogénérateurs. La crise pétrolière de 1973 a relancé de nouveau la recherche et les réalisations éoliennes dans le monde.

I.8.2 Conversion de l'énergie éolienne

Dans cette partie nous allons nous intéresser aux dispositifs de conversion permettant de transformer l'énergie éolienne en énergie électrique. Dans un premier temps nous présenterons les caractéristiques et les différents types d'aérogénérateurs existants, puis nous analyserons les chaînes de conversion électrique associées à ces turbines. Les composants de la chaîne électromécaniques de conversion sont donnés par la figure (I.21).

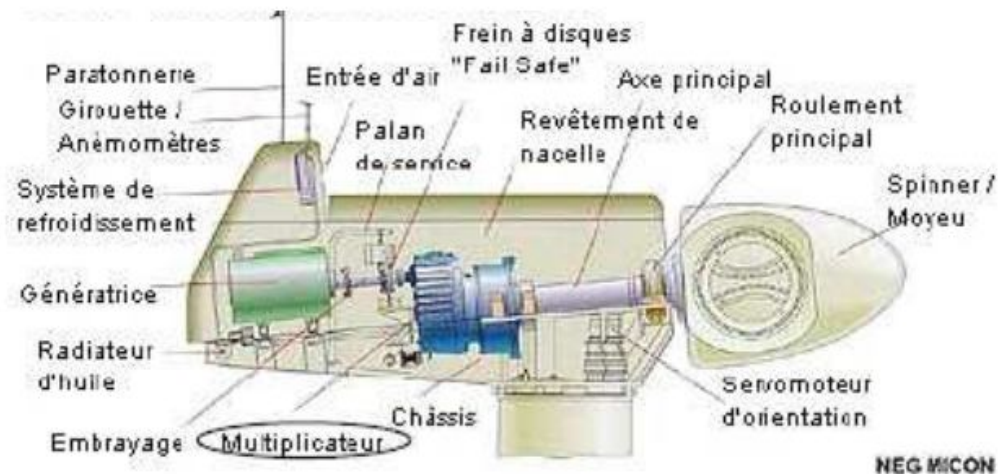


Figure I.21: Composants de la chaîne électromécanique.

I.8.3 Taille des aérogénérateurs [29]

Les constructeurs et chercheurs ne finissent pas de mettre au point des éoliennes de plus en plus puissantes donc plus grandes, ce que représente la figure- (I.22).

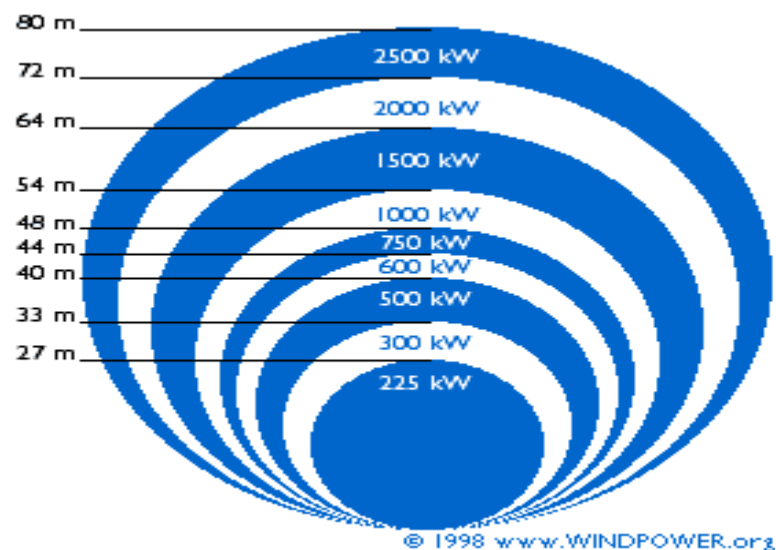


Figure I.22: Taille des hélices en [m] et puissance en [kW]

Les plus grandes éoliennes commercialisées actuellement possèdent une hélice de plus de 100 [m] de diamètre, perchée à plus de 100 [m] de hauteur pour produire jusqu'à 4,5 [MW].

I.9 GENERALITES SUR LES SYSTEMES EOLIENS

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière. De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions [30].

En général un système éolien ou bien un aérogénérateur est défini comme un système composé de plusieurs éléments aptes à transformer les variations de la densité et de la pression de l'air comme étant fluide en mouvement en énergie mécanique puis en énergie électrique [31].

I.9.1 Classement d'éolienne selon l'orientation de leur axe de rotation

Il existe deux différents types de systèmes éoliens selon l'orientation de leurs axes de rotation par rapport à la direction du vent.

I.9.2 Types de turbine

Il existe deux grandes catégories d'éoliennes selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice [32] :

- Les turbines éoliennes à axe horizontal.
- Les turbines éoliennes à axe vertical.

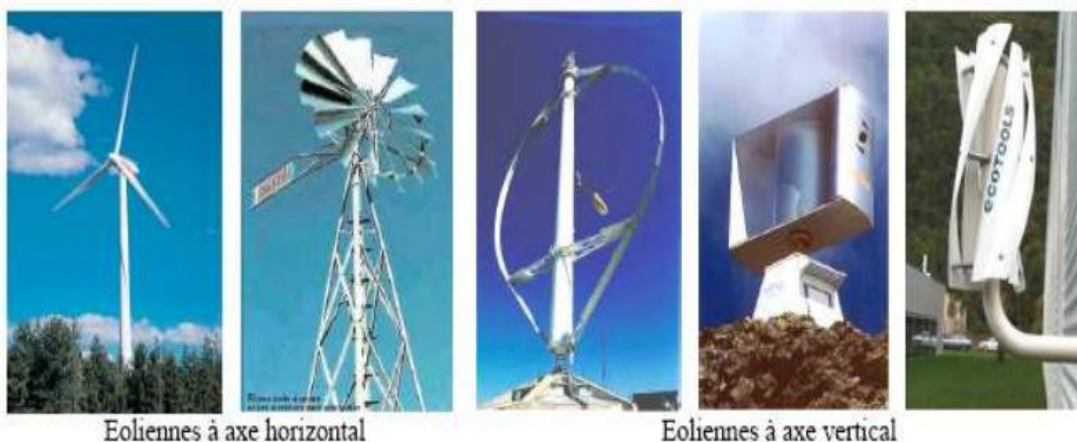


Figure I.23: Technologies d'éoliennes

Sur le plan aérodynamique, on peut comparer les différents types de turbines en comparant leurs coefficients aérodynamiques de puissance ou de couple en fonction de la vitesse normalisée λ .

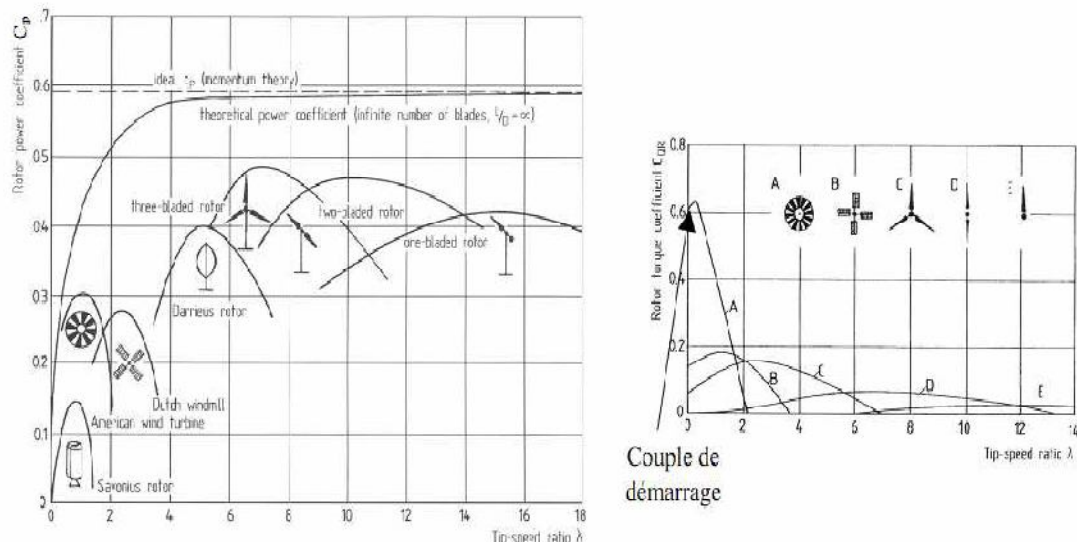


Figure I.24: Coefficients de puissance et du couple en fonction de la vitesse normalisée λ pour différents types de turbines [32]

On peut noter ainsi que :

Les courbes donnant le coefficient de couple montrent que les couples de démarrage sont favorables aux multiples (pompage,...). Il en est de même pour les systèmes à axe vertical.

Les courbes $C_p(\lambda)$ montrent l'avantage intrinsèque des turbines à axe horizontal en termes de puissance, même si ce jugement est à nuancer lorsqu'on observe l'énergie restituée, en particulier en sites peu ventés (zones urbaines,...) ;

Les courbes sont plus plates pour les « axes horizontaux $C_p(\lambda)$ » à faible nombre de pales (3, 2, 1) par rapport aux « axes verticaux » ou aux multiples. Elles sont donc moins sensibles aux variations de λ autour de λ_{opt} .

I.9.3 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer une puissance nominale P_n à partir d'une vitesse de vent nominale V_{wn} . Pour des vitesses de vents supérieures à V_{wn} , la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques (turbines, mat et structure), de sorte que la puissance récupérée par la turbine ne dépasse pas la puissance nominale pour laquelle l'éolienne a été conçue. Il y a d'autres grandeurs dimensionnantes : V_{wM} la vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie et V_{wM} la vitesse maximale de vent au-delà de laquelle l'éolienne doit être stoppée pour des raisons de sûreté de fonctionnement.

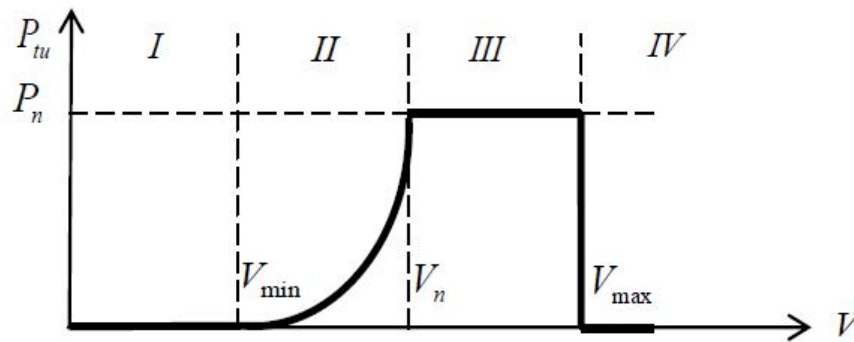


Figure I.25: Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent.

Ainsi la caractéristique de puissance en fonction de la vitesse du vent comporte quatre zones : La zone- I, où $P_{turbine} = 0$ (la turbine ne fournit pas de puissance). La zone- II, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent V_w . La zone- III, où généralement la vitesse de rotation est maintenue constante par un dispositif de régulation et où la puissance $P_{turbine}$ fournie, reste sensiblement égale à P_n ; La zone- IV, dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête la rotation et le transfert de l'énergie. La plupart des grandes turbines éoliennes utilisent deux principes de contrôle aérodynamique pour limiter la puissance extraite à la valeur de la puissance nominale de la génératrice :

- Système « pitch » ou « à pas ou calage variable » qui permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent, principalement pour maintenir une puissance sensiblement constante dans la zone III de vitesses.
- Système « stall » ou à « décrochage aérodynamique », le plus robuste car c'est la forme des pales qui conduit à une perte de portance au-delà d'une certaine vitesse de vent, mais la courbe de puissance maximale n'est pas plate et chute plus vite. Il s'agit donc d'une solution passive et robuste (pas besoin de système d'orientation des pales). Chez certains fabricants de grandes machines, un système hybride se développe, le « stall actif », dans lequel le décrochage aérodynamique est obtenu progressivement grâce à une orientation minime des pales nécessitant des moyens de réglage plus économiques et plus robustes que dans le système pitch.

D'autres systèmes de régulation, dans les petites éoliennes notamment, sont exploités :

- Basculement (relèvement) de l'axe, normalement horizontal.
- Pas variable par la pression du vent (modèle Air Wind : les pales en fibre, se déforment et provoquent un décrochage).

- Déviation par rapport à l'axe du vent. La dérive se trouve légèrement décalée par rapport à l'axe de rotation vertical (qui permet normalement à la turbine d'être face au vent) et crée une force de déviation qui régule la puissance aérodynamique (la turbine reçoit un vent de travers).

I.9.4 Intérêt de la vitesse variable

Si on considère les courbes du coefficient de puissance fonction de λ , il apparaît clairement l'importance d'un réglage de vitesse. En effet, si la génératrice électrique est de type synchrone ou asynchrone directement couplée au réseau, la vitesse est sensiblement constante et le rendement aérodynamique ne peut être maximal que pour une seule vitesse de vent λ_{opt} . Un système à deux vitesses de rotation est possible mais la vitesse variable électronique apporte beaucoup plus en termes énergétiques [33]. La figure- (I.26) montre que la position du maximum de la courbe puissance en fonction de la vitesse de rotation change avec la vitesse du vent. Typiquement, un réglage de vitesse dans une plage de 1 à 2 est nécessaire pour bien optimiser les transferts énergétiques. Nous verrons dans ce qui suit différents ensembles convertisseurs-machines utilisés ou utilisables dans la génération éolienne d'énergie [34].

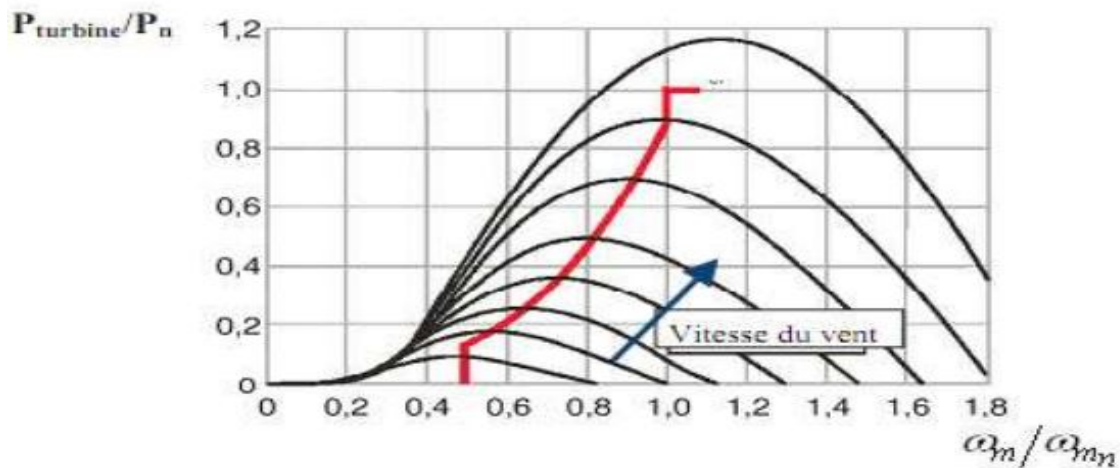


Figure I.26: Puissance de la turbine en fonction de sa vitesse de rotation, paramétrée en vitesse du vent

I.10 Classement des éoliennes selon leur vitesse de rotation

Les éoliennes peuvent être aussi classées selon leur vitesse de rotation. Celle-ci peut être fixe ou variable. Les premières éoliennes implantées sont des éoliennes à vitesse constante utilisant des génératrices asynchrones liées directement au réseau et c'est la fréquence du réseau qui impose la vitesse de rotation de la machine.

Cette technologie est moins chère et utilise un système électrique simple ne nécessitant pas un système électronique de commande. Contrairement à cette technologie et avec le développement de l'électronique de puissance, les éoliennes à vitesse variable utilisent des convertisseurs statiques pour établir une séparation complète entre la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de l'éolienne qui sera adaptée à la vitesse du vent, afin d'optimiser la puissance fournie au réseau ou bien fournie à une charge dans une installation autonome [35].

I.11 LES PRINCIPAUX COMPOSANTS D'UN SYSTEME EOLIEN

On s'intéressera dans ce qui suit qu'aux éoliennes à axe horizontal. Une éolienne

"Classique" est généralement constituée de quatre éléments principaux .

I.11.1 La turbine

Représente l'outil principal pour la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Elle est constituée de :

- *Mat* : Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur [36].
- *Nacelle* : C'est une carcasse qui regroupe plusieurs éléments (générateur, arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur, système de refroidissement, système de control.)
- *Rotor* : Il est formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Prend en charge

L'emplacement de la machine génératrice qui peut y être soit synchrone ou asynchrone.

I.11.2 Le système électromécanique

Il se trouve dans la nacelle, un outil de transformation d'énergie mécanique transmise par la turbine en énergie électrique, il regroupe une génératrice électrique avec ses détails, plus le système de commande en cas de besoin, avec les outils d'électronique de puissance.

I.11.3 Le système d'interconnexion

C'est le système qui nous permet de voir la relation entre le système producteur de l'énergie électrique et les consommateurs d'électricité. C'est un système simple il contient des câbles en cas

d'une énergie mécanique stable, ou bien il sera composé par des redresseurs et des onduleurs en cas d'énergie mécanique instable.

I.11.4 GENERATEURS

Utile pour les éoliens d'une grande puissance, il comporte un dispositif qui surveille en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôlant le dispositif d'orientation et essaye aussi de la mettre fonctionner à des puissances maximales. En cas de défaillance le système arrête automatiquement l'éolienne.

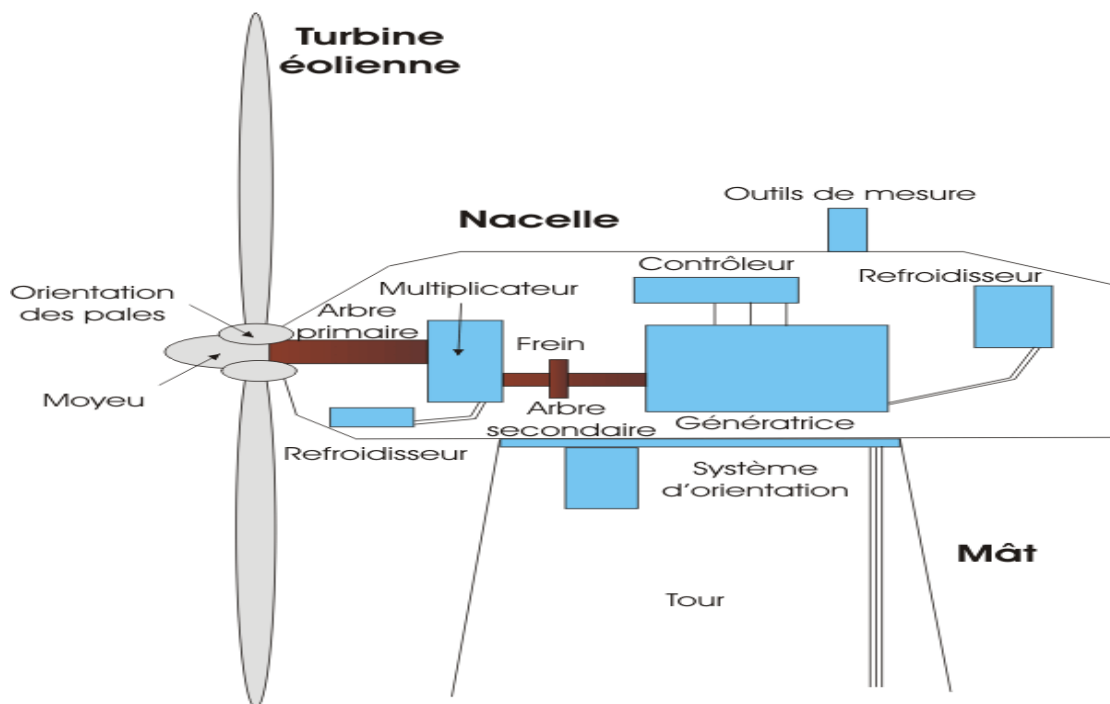


Figure I.27: Une éolienne à axe horizontal

I.12 Le système de contrôle

Actuellement la production de l'électricité est l'application la plus fréquente des turbines éoliennes. Et donc l'utilisation d'une machine électrique est indispensable. Différents types de machines électriques peuvent être utilisées pour la génération de puissance éolienne. Des facteurs techniques et économiques fixent le type de la machine pour chaque application. En général la génératrice asynchrone à cage d'écureuil occupe la grande partie des installations des éoliennes avec ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs la rend appropriée pour l'utilisation en conversion éolienne. On va entamer les différentes génératrices qui rentrent dans le mécanisme d'une conversion d'énergie par les turbines éoliennes, et par la suite on s'intéresse aux génératrices utilisées dans des petites installations orientées pour alimenter des sites isolés.

I.12.1 La génératrice synchrone

C'est une machine qui offre des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elle peut être utilisée en entraînement direct sur les voilures éoliennes. Le circuit d'excitation de son inducteur demande la présence du réseau et une fourniture d'une puissance réactive. Les sites isolés ne sont pas adaptés à ce type de génératrice qu'en présence d'une batterie de condensateurs ou d'une source de tension indépendante, c'est le cas du travail présenté en [37] par *H. Benallaet al* dans le cadre d'une étude de modélisation et de commande d'une machine synchrone à aimant permanent associée à une chaîne de conversion d'énergie éolienne de petite taille pour les sites isolés ; un autre travail en présente une modélisation d'une chaîne de conversion éolienne de petite puissance par l'utilisation aussi d'une MSAP, l'ajout des bagues et balais pour un système possédant un type de MSAP provient un entretien régulier. Par contre la possibilité de réglage de l'inducteur de cette machine offre un moyen supplémentaire d'ajustement du point de fonctionnement énergétique. L'électronique de puissance s'impose pour toutes les applications qui utilisent ce type de machine qui sont donc à vitesse variable.

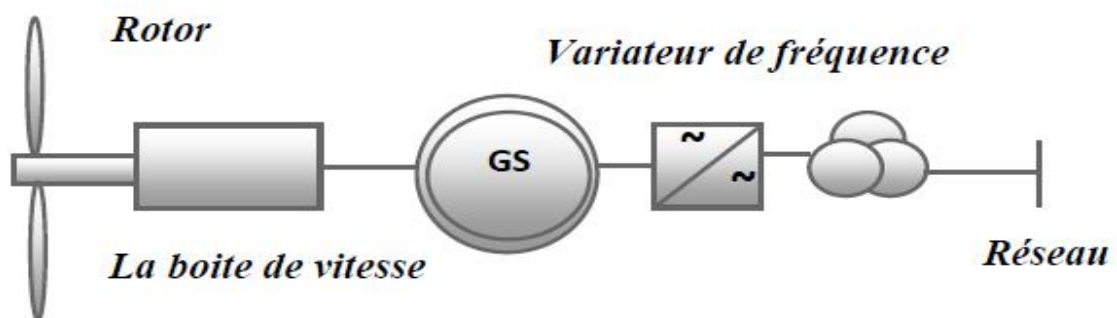


Figure I.28: Système éolien basé sur la GS pour un fonctionnement à vitesse variable

I.12.2 La génératrice asynchrone

Le faible coût et la standardisation de machine asynchrone qui nécessite pas une complexité d'installation a conduit à une très large domination de ce type de génératrices jusqu'à des puissances dépassant les mégawatts. Elle est souvent associée à une batterie de condensateurs et à un démarreur automatique progressif à gradateur ou à résistances permettant de limiter le régime transitoire d'appel de courant au moment de la connexion au réseau. Elle est moins exigeante en termes d'entretien et présente un taux de défaillance très peu élevé. Dans l'aérogénérateur de dimension conséquente, la vitesse de rotation est peu élevée. Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse. Dans la littérature plusieurs travaux de recherches ont été appliqués pour l'étude de la conversion d'énergie éolienne en

utilisant la machine asynchrone comme génératrice. Dans K. Idjdarenea étudié le contrôle de la tension à la sortie d'une génératrice asynchrone connectée à un convertisseur statique dans le cas d'alimentation d'un site isolé, aussi bien et dans l'auteur présente l'ensemble des travaux effectués pour l'utilisation des machines asynchrones pour des systèmes éoliens.

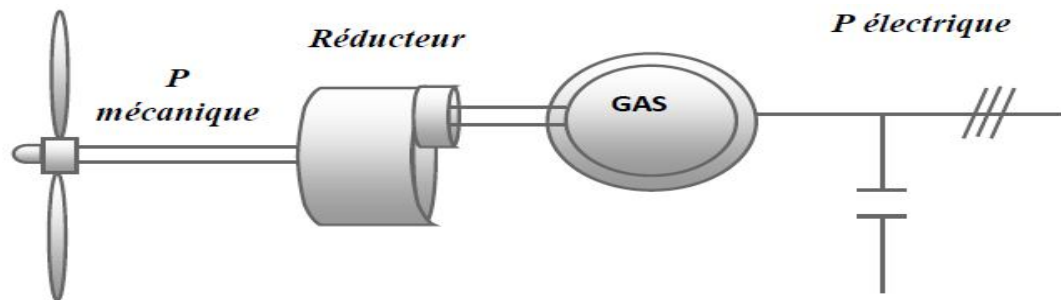


Figure I.29: Système éolien basé sur la génératrice asynchrone à cage à vitesse constante

I.12.3 La génératrice asynchrone à double alimentation (MADA) :

Pour des grandes puissances ils existent des générateurs asynchrones capable de fonctionner à vitesse réglable, les avantages qui les mise en faveur en comparaison avec des générateurs à vitesse fixe sont [38] :

- une réduction des contraintes mécaniques à cause d'inertie stockée dans la turbine, un phénomène qui crée une élasticité permet de réduire les pulsations du couple.
- une qualité d'alimentation améliorée à cause de la réduction de la pulsation du couple qui empêche à éliminer les variations de puissance.
- une efficacité du système ou la vitesse de la turbine est réglée en fonction de la vitesse du vent pour maximiser la puissance en sortie.
- une commande plus simple avec une simplicité de la construction du système, à voir que pour des vitesses du vent trop faible, l'angle d'inclinaison est généralement fixe et un contrôle de l'angle de tangage est effectué uniquement pour limiter la puissance de sortie. La machine asynchrone à double alimentation présente un atout considérable. Son principe est issu de celui de la cascade hypo synchrone, c'est une solution à vitesse variable. La machine asynchrone à double alimentation MADA à rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants, ce qui diminue légèrement leur robustesse ; mais cette machine est un peu plus complexe que l'ancienne machine car elle nécessite un multiplicateur de vitesse. Cette éolienne permet également de

contrôler la puissance réactive et de contribuer ainsi à la tenue de la tension si nécessaire. Dans l'auteur présente une modélisation et un contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation pour les fortes puissances. Les résultats de l'étude favorisent l'utilisation de cette installation pour un mode de fonctionnement avec un redresseur et une batterie de stockage pour une énergie emmagasiné.

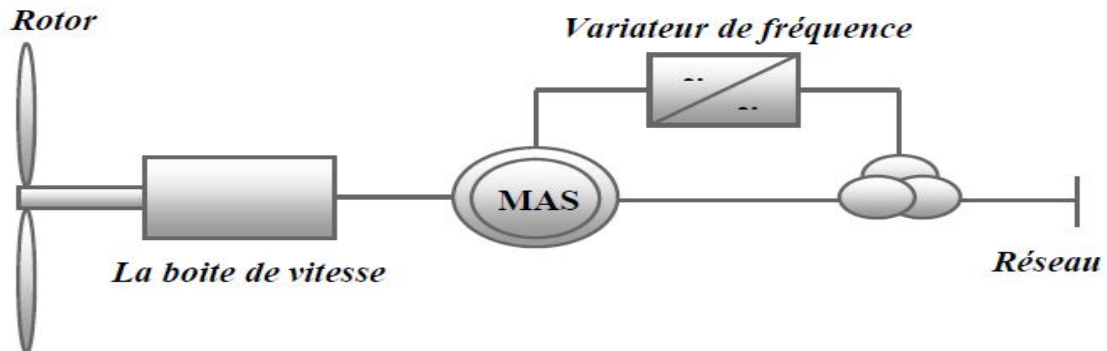


Figure I.30 : Système éolien basé sur la génératrice asynchrone GADA à vitesse variable

I.12.4 Une comparaison entre les différentes machines :

Type d'éolienne	avantages	Inconvénients
MAS à vitesse fixe	-Machine robuste. -Faible cout -Pas d'électronique de puissance	-Puissance extraite non optimisé. -Maintenance de la boîte de vitesse. -Pas de contrôle de l'énergie réactive. -Magnétisation de la machine imposée par le réseau.
MADA à vitesse variable	-Fonctionnement à vitessevariable. -Puissance extraite optimisé -Electronique de puissance dimensionnée à 30 % de lapuissance nominale. -Machine standard. -Connexion de la machine facile à gérer. -Une magnétisation de la machine gérée en cas de défaut sur le réseau.	-Maintenance de la boîte de vitesse. -Pris de l'électronique de puissance. -Contrôle et commande complexe. -Contact glissant bagues - balais

MADA à vitesse variable	-Fonctionnement a vitessevariable sur toute la plage de vitesse. -Puissance extraite optimisé pour les vents faibles. -Connexion de la machine facile à gérer.	-Pris d'électronique de puissance. -Machine spécifique. -Grand diamètre de machine. -Electronique de puissance dimensionnée pour la puissance nominale de la génératrice.
--------------------------------------	--	--

Tableau I.2: Avantages et inconvénients de différentes éoliennes

I.13 AVANTAGES ET INCONVENANTS DE L'ENERGIE EOLIENNE

I.13.1 Avantage

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs. En luttant contre le changement climatique, l'énergie éolienne participe à long terme au maintien de la biodiversité des milieux naturels.
- L'énergie éolienne produit de l'électricité éolienne : sans dégrader la qualité de l'air, sans polluer les eaux, sans polluer les sols.
- La production éolienne d'électricité suit notre consommation d'énergie: le vent souffle plus souvent en hiver, cette saison étant celle où la demande d'électricité est la plus forte.
- L'énergie éolienne offre la possibilité de réduire les factures d'électricité et peut permettre de vous mettre à l'abri des ruptures de courant.

I.13.2 Inconvénients

- Le vent peut parfois souffler à des intensités irrégulières.

La production dépend de l'intensité des vents et non de la demande en énergie.

I.14 CONCLUSION

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

Chapitre 2

Modélisation du système D'énergie hybride (SEH)

II.1 Introduction

Nous souhaitons élaborer des modèles des deux systèmes de production afin de déterminer la puissance qu'ils peuvent nous fournir pour des conditions météorologiques données ou estimées. Les modélisations obtenues doivent être à la fois précises pour rendre compte des transferts énergétiques, et suffisamment rapides pour permettre des simulations sur de longues périodes dans des temps de calcul raisonnables. L'objectif final est de disposer de modèles suffisamment fiables afin d'effectuer une étude d'optimisation du dimensionnement et de la gestion d'énergie du système complet.

II.2 MODELISATION DU PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE

L'étude du fonctionnement des systèmes photovoltaïques nécessite des modèles permettant de calculer l'énergie produite par l'installation photovoltaïque. Dans la littérature plusieurs chercheurs ont étudié ses modèles spécifiés. Parmi eux qui ont utilisé matlab comme outil informatique capable de bien projeter le fonctionnement réel du module photovoltaïque.

C'est le cas des travaux présentés dans [39]. D'autres chercheurs ont utilisé des approches numériques et des modèles réels pour la modélisation des PVs, comme en les auteurs cherchent à trouver des paramètres non linéaires pour la courbe I-V afin de maximiser la puissance et trouver les points critiques [40]. Cette méthode de modélisation facilite la tâche aux constructeurs en vision de trouver la meilleure façon pour faire développer des modèles industriels qui fonctionnent d'une façon optimale. Aussi bien et dans l'article les auteurs proposent une nouvelle approche numérique pour une modélisation des PVs en temps réel par des émulateurs [41].

Dans les auteurs utilisent un modèle physique sous la forme d'un circuit des diodes et des résistances qui vont permettre de fonctionner comme un PV, cette tâche est très utile au recherche dans plusieurs laboratoires pour un PV connecter à un réseau ou bien autonome connecter à un système de stockage ou à une charge. Un autre outil est présenté par *F. Adamo et al* dans l'article simule le même comportement d'un PV.

Cette tâche est très utile au recherche dans plusieurs laboratoires pour un PV connecter à un réseau ou bien autonome connecter à un système de stockage ou à une charge. Un autre outil est présenté par *F. Adamo et al* dans l'article simule le même comportement d'un PV [42].

II.2.1 Modèle simplifié du panneau photovoltaïque

La modélisation est l'outil de base de la simulation d'un système photovoltaïque réel, pour bien la maîtriser il est nécessaire d'analyser l'influence des différents facteurs sur les cellules photovoltaïques et de prendre en considération les caractéristiques indiquées par les producteurs. Les modèles mathématiques de cellules photovoltaïques sont basés sur des équations théoriques décrivant le fonctionnement des cellules photovoltaïques, elles sont généralement associées en série ou bien en parallèle, puis encapsulées sous verre pour obtenir un module photovoltaïque. Un générateur PV est constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel.

Les modèles empiriques que l'on dérive sur des valeurs différentes extraites de la courbe $I(V)$ des générateurs photovoltaïques qui se rapprochent de l'équation caractéristique des panneaux solaires à l'aide d'une fonction analytique [43]. La caractéristique $I(V)$ du générateur PV est basée sur celle d'une cellule élémentaire modélisée par le circuit équivalent figure II.1.

Ce circuit introduit une source de courant et une diode en parallèle, ainsi que des résistances série R_s et parallèle (shunt) R_p pour tenir compte des phénomènes dissipatifs au niveau de la cellule.

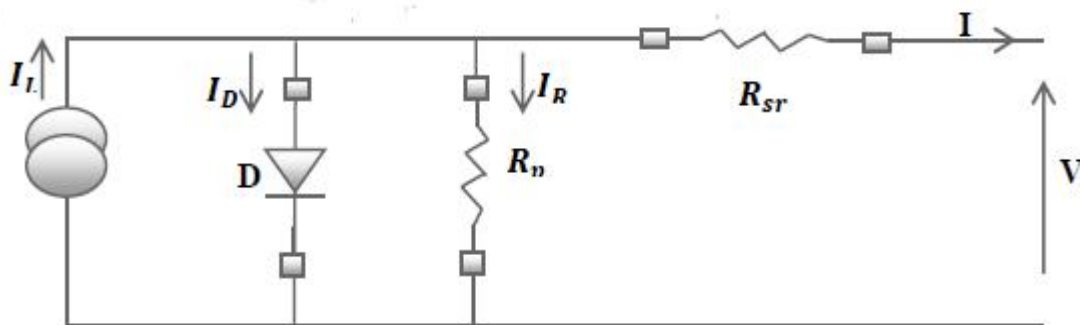


Figure II.1: Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque

La résistance série est due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière. La résistance parallèle rend compte des effets, tels que le courant de fuite par les bords de la cellule, elle est réduite du fait de la pénétration des impuretés métalliques dans la jonction (surtout si cette pénétration est profonde). Ce circuit peut être utilisé aussi bien pour une cellule élémentaire, que pour un module ou un panneau constitué de plusieurs modules [44].

A partir de la loi des nœuds nous permet d'écrire la relation suivante:

$$I_L = I_D + I_R + I \quad (\text{II.1})$$

Le courant de jonction I_D est donné par :

$$I_D = I_0 \cdot \left(e^{q \left(\frac{V + I.R_{SR}}{nKT} \right)} - 1 \right) \quad (\text{II.2})$$

Le courant dans la résistance R_p est donné par :

$$I_R = \frac{V + I.R_{SR}}{R_p} \quad (\text{II.3})$$

A partir de l'équation (4.1) on obtient l'expression de courant I :

$$I = I_L - I_D - I_R \quad (\text{II.4})$$

Remplaçons dans (4.4) les équations (4.2) et (4.3) l'équation caractéristique deviendra:

$$I = I_L - I_0 \left(e^{q \left(\frac{V + I.R_{SR}}{n.K.T} \right)} - 1 \right) - \frac{V + I.R_{SR}}{R_p} \quad (\text{II.5})$$

Où :

Si on suppose que la résistance parallèle est infinie (R_p) l'équation (4.5) devienne:

$$I = I_L - I_0 \left(e^{q \left(\frac{V + I.R_{SR}}{n.K.T} \right)} - 1 \right) \quad (\text{II.6})$$

L'équation (II.6) en termes de I et V n'est pas tellement facile à résoudre comparativement à l'équation du circuit équivalent simplifié. Par conséquent une méthode numérique (Newton-Raphson) doit être appliquée.

II.2.1.1 Caractéristiques du module photovoltaïque [45]

Chaque module photovoltaïque est caractérisé par :

- Une puissance crête P_C : c'est une puissance électrique maximale fournie par le module dans les conditions standard (25°C et un éclairement de 1000 W/m^2).
- Une caractéristique $I(V)$: représente une courbe de courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.

- Une tension à vide V_{co} aux bornes du module en absence de courant, pour un éclairage optimal.
- Un courant de court-circuit I_{CC} débité par un module court-circuité pour un éclairage optimal.
- Point de fonctionnement optimum (U_m, I_m): lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil, ou $P_m = U_m \cdot I_m$.
- Un rendement maximal se définit par un rapport d'une puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- Facteur de forme se définit par un rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut y avoir la cellule.

II.2.1.2 Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque

Dans les auteurs *F. Adam et al* appliquent un modèle pour une estimation des paramètres d'un module photovoltaïque. Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivantes :

II.2.1.3 Courant de court-circuit

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_{sr} nulle et R_p infinie), ce courant se confond avec le photon courant I_L dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (II.7), on obtient:

$$I_{CC} = I_L - I_0 \left(e^{q \left(\frac{V + R_{SR} \cdot I}{n \cdot K \cdot T} \right)} - 1 \right) - \frac{I_{CC} \cdot R_{SR}}{R_p} \quad (II.7)$$

Pour la plupart des photopiles (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme :

$$I_0 \left(e^{q \left(\frac{V + R_{SR} \cdot I}{n \cdot K \cdot T} \right)} - 1 \right)$$

Devant (I_L) L'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{CC} = \frac{I_L}{\left(1 + \frac{R_{SR}}{R_p} \right)}$$

II.2.1.4 Tension de circuit ouvert :

C'est la tension V_{C0} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$0 = I_L - I_0 \left(e^{\frac{q(V + R_{SR} \cdot I)}{n \cdot K \cdot T}} - 1 \right) - \frac{V_{C0}}{R_p} \quad (\text{II.8})$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{C0} = \frac{q}{n \cdot K \cdot T} * \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (\text{II.9})$$

II.3 Facteur de forme

On appelle facteur de forme FF , le rapport entre la valeur maximale de la puissance pouvant être extraite V_{pm} , I_{pm} de la photopile sous les conditions de mesures standardisées, et le produit $(V_{C0} \cdot I_{CC})$ Où : I_{CC} intensité de court-circuit et V_{C0} tension de circuit ouvert. Pour une cellule de fabrication industrielle, le facteur de forme est de l'ordre de 70%.

$$FF = \frac{V_{pm} * I_{pm}}{V_{C0} * I_{CC}} \quad (\text{II.10})$$

II.4 Le rendement

Le rendement (η) , des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} .

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF * V_{0C} * I_{CC}}{P_{in}} \quad (\text{II.11})$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert [46].

II.5 Influence des paramètres externes sur la caractéristique I (V)

Plusieurs articles ont été élaborés afin de connaître l'influence des paramètres externes sur le fonctionnement d'un PV. Dans *A.Ould Mohamed Yahyaa* présenté un modèle de simulation pour prédire la performance d'un système PV fonctionnant dans les conditions météorologiques d'un site d'installation, sous l'influence des différentes irradiances solaires, des différentes températures et pour des variables résistances séries et parallèles. Dans le même cadre les auteurs *S.-Rustemliet . Dincer* dans l'article ont examiné le fonctionnement d'un PV sous l'influence de température. La figure 4.9 présente, pour un éclairement et une température donnée, trois points remarquables: le courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert, et la puissance optimale qui est la puissance maximale (P_{max}) délivrée par le module PV. Donc pour extraire le maximum d'énergie des modules PV, il faut les faire fonctionner au point de P_{max} [47].

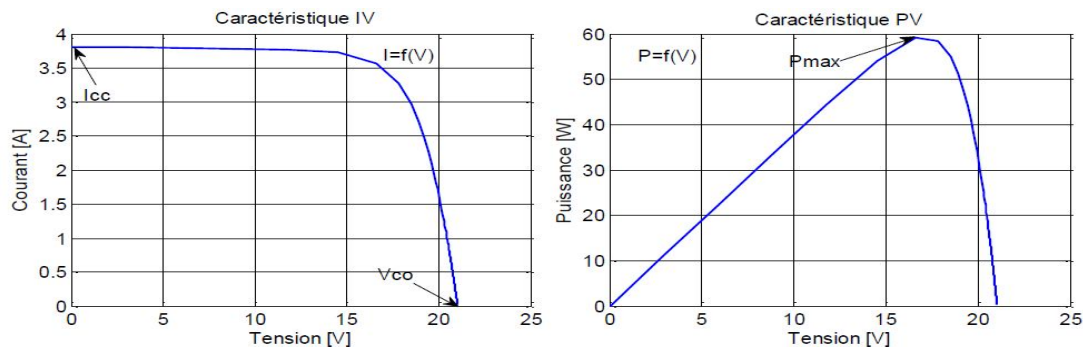


Figure II.2: a) Caractéristique I(V) d'un PV;b) Caractéristique P(V) d'un PV

II.6 Influence des résistances série et shunt

Les performances d'une cellule photovoltaïque sont d'autant plus dégradées que la résistance série est grande ou que la résistance shunt est faible.

La figure II.3.a montré l'influence de R_s sur la caractéristique $I = f(V)$. La courbe en bleu correspond à une valeur non nulle de R_s . Cette influence est traduite par une diminution de la pente de la courbe dans la zone où la cellule fonctionne comme source de tension.

La chute de tension correspondante est liée au courant généré par la cellule. Quant à la R_{sh} est liée directement au processus de fabrication, son influence pour de très faibles valeurs de courant.

La figure II.3.b montre que cette influence se traduit par une augmentation de la pente de la courbe de puissance de la cellule dans la zone correspond à un fonctionnement comme source de courant.

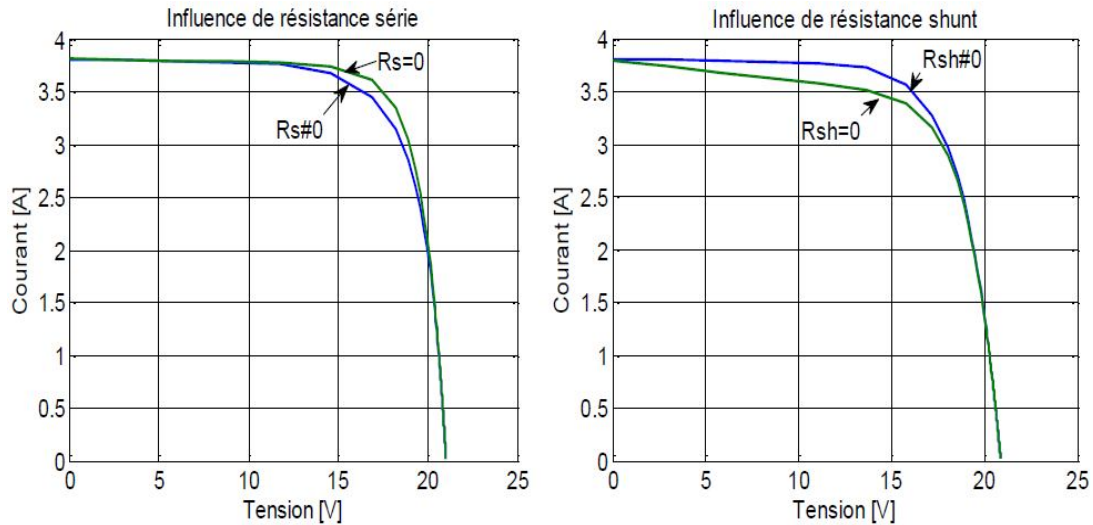


Figure II.3 : a) de résistance série ; b) Influence de résistance shunt

II.7 Influence de l'éclairement

Les figures II.4.a et II.4.b, montrent respectivement la caractéristique I(V) et P(V) d'un module PV en fonction de l'éclairement incident et à température ambiante. Nous constatons que les variations de courant de court-circuit (c'est à dire pratiquement le photo-courant crée dans le module PV est proportionnel au flux solaire incident). D'où le forte influence de l'éclairement sur le courant débité par le module PV. Cette influence se traduit par une augmentation de la puissance disponible dans les modules PV chaque fois l'éclairement augmente et à chacune des valeurs du flux lumineux correspond à une puissance électrique maximale que pourrait fournir un module PV.

$$I_{cc} = I_{cc}^* = \left(\frac{G}{G^*} \right) + \alpha(T - T^*) \quad (II.12)$$

I_{cc}^* : Représente le courant de court-circuit.

α : (A / °C) Coefficient obtenu empiriquement.

G^* : Irradiation de référence vaut $1kW/m^2$.

T^* : Température ambiante égale à 25°C.

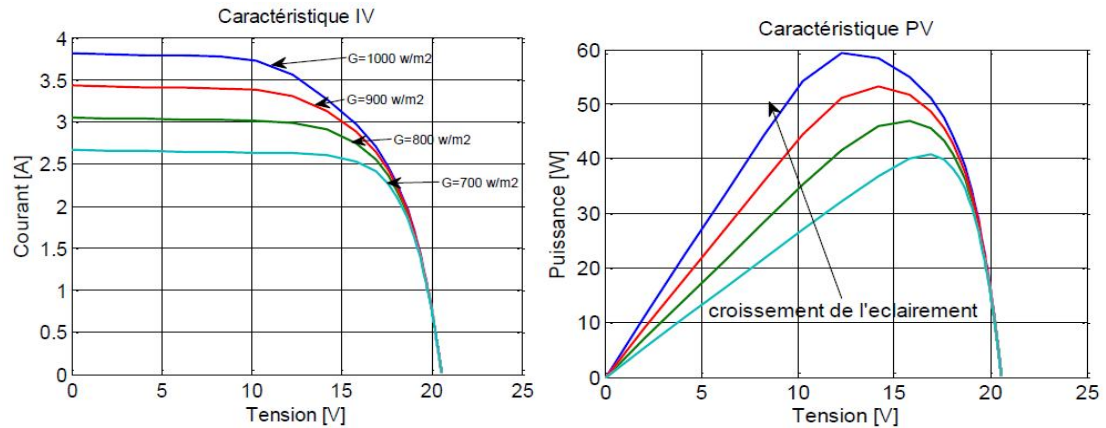


Figure II.4: a) $I(V)$ en fonction de l'éclairement b) : $P(V)$ en fonction de l'éclairement

II.8 Influence de la température

La température est un paramètre très important dans le comportement d'un module PV. Nous constatons à la figure II.5, qui représente la caractéristique $I(V)$ pour un éclairement constant et pour diverses valeurs de la température, que le courant de court-circuit I_{cc} varie peu en fonction de température. Par contre, l'augmentation de la température engendre une diminution de la tension en circuit ouvert et se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible dans les modules PV (figure II.5). D'où l'influence de la température sur le comportement du module PV. La tension à vide d'un module PV en fonction de la température et de l'éclairement est donnée par la relation suivante:

$$V_{C0} = I_{C0}^* + \alpha_2 (T - T^*) - (I_{CC} - I_{CC}^*) R_s \quad (II.13)$$

V_{C0}^* et I_{CC}^* : représentent respectivement la tension de court-circuit et le courant de court-circuit à $T = 25^\circ\text{C}$ et $G = 1\text{ kW/m}^2$.

α_2 : ($V/^\circ\text{C}$) Coefficient obtenu empiriquement.

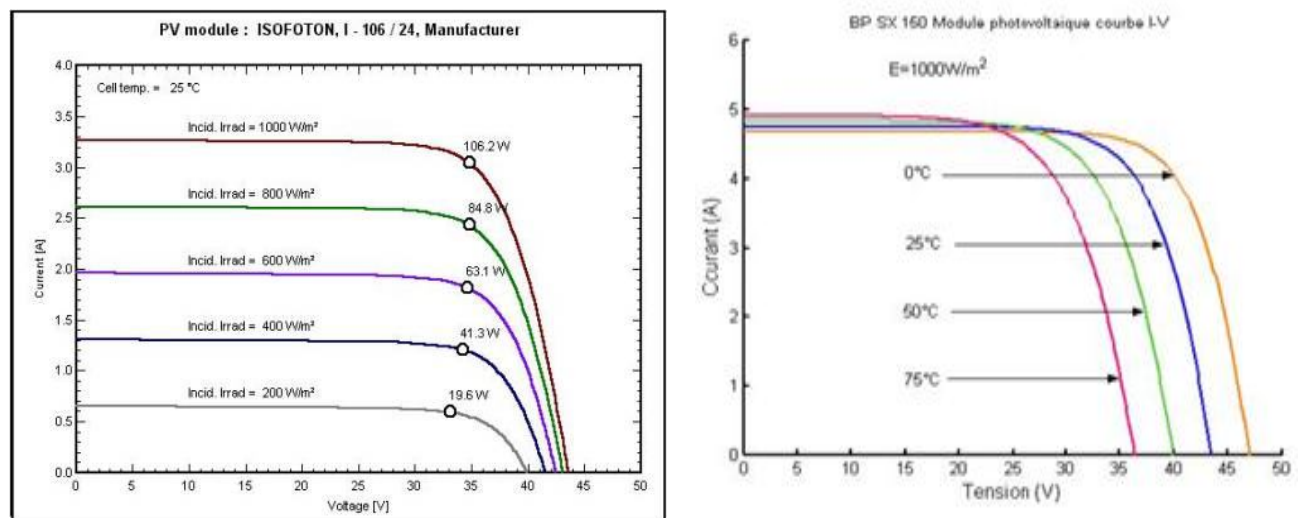


Figure II.5 a) : $I(V)$ en fonction de température b) : Zoom sur la caractéristique $I(V)$

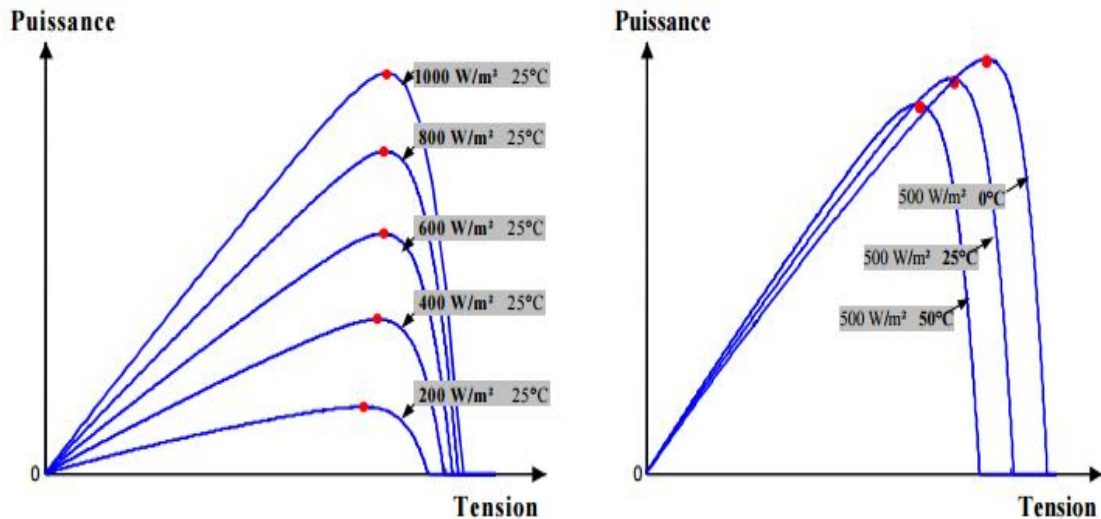


Figure II.6: Exemple de réseau de caractéristique puissance/tension d'un générateur photovoltaïque, à gauche pour différents éclaircements, à droite pour différentes températures de jonction.

II.9 MODELISATION DE LA CHAÎNE EOLIENNE

Dans la littérature, plusieurs études ont été consacrées pour la modélisation de différents composants d'un système éolien pour une prévision de qualité de puissance générée. Les chercheurs qui prennent l'axe de recherche en relation avec l'énergie électrique ont tendance à simplifier les pièces aérodynamiques et mécaniques du système et soulignent généralement la description du générateur, contrairement aux chercheurs en mécanique, ces derniers négligent souvent les détails sur les performances du générateur. Un modèle simple d'une éolienne de petite puissance a été présenté en [48], dans la même idée et pour comprendre les caractéristiques d'une éolienne non connecter à un réseau, les auteurs en [49] ont fait une analyse sur différents méthodes de modélisation, la première traite un modèle théorique y compris une deuxième basée sur les données expérimentales. Une complexité de fonctionnement de l'éolienne a mis au point une étude présentée par *M. Jelavić et al* dans l'article, pour but d'identifier un modèle linéaire capable de donner une bonne description du comportement de l'éolienne. Dans les revues scientifiques on trouve la modélisation et la simulation de plusieurs génératrices qui peuvent être entraînées par une turbine dans un système éolien, les articles présentent une étude pour but de modéliser la génératrice asynchrone avec la turbine. Cependant l'optimisation d'une machine synchrone est présentée par *R. Bharanikumaret al* dans avec une utilisation d'algorithme MPPT (*Maximum Power Point Tracking*). Dans l'article *Molina M.G et al* présentent une modélisation d'une chaîne éolienne qui contient une machine synchrone à aimant permanent et son influence sur le réseau [50]. L'impact des éoliennes sur la stabilité du réseau est également traité. Dans l'auteur décrit un modèle complet d'une éolienne connecter au réseau et simuler par matlab [51].

II.9.1 Modèle du vent

Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie, car la puissance éolienne dans les conditions optimales évolue au cube de la vitesse du vent. La vitesse du vent est un vecteur tridimensionnel. Néanmoins, la direction du vecteur de vitesse du vent considéré dans ce modèle se limite à une dimension. A noter que l'orientation du vent dans le plan horizontal n'a pas d'importance pour une voile à axe vertical [52]. Le modèle comportemental du vent peut donc être simplifié considérablement. La vitesse du vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps.

$$V = f(t) \quad (\text{II.14})$$

La vitesse du vent peut être modélisée sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques :

$$V(t) = 10 + 0.2 \cdot \sin(0.1047 \cdot t) + 2 \cdot \sin(0.2665 \cdot t) + \sin(1.2930 \cdot t) + 0.2 \cdot \sin(3.6645 \cdot t) \quad (\text{II.15})$$

La vision statistique du gisement éolien, bien qu'importante, n'est pas considérée. La vitesse du vent $V_w(t)$ simulée et montrée par la figure- (II.7) est issue d'un échantillon de mesure sur site réel [53].

Il est d'une fréquence de

$$f_v = \frac{1}{24[S]} [HZ]$$

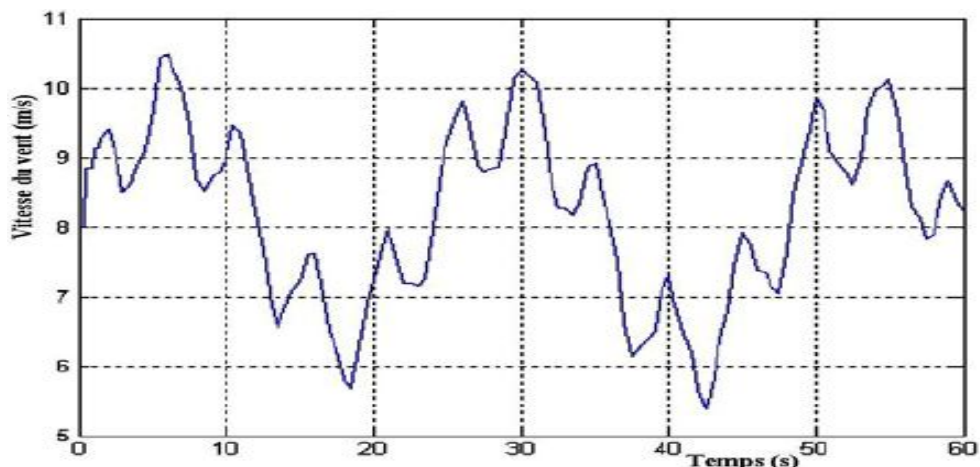


Figure II.7: profil de la vitesse du vent

II.9.2 Modélisation de la turbine

II.9.2.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation de la turbine

Le modèle que nous sommes en train de l'étudier se compose d'une turbine qui contient 3 pales orientables de longueur R .

- les trois pales sont considérées de conception identique ce qui permet de voir l'ensemble des pales comme un seul et même système mécanique.
- le coefficient de frottement des pales par rapport à l'air est très faible et peut être négligé.
- la vitesse de la turbine étant faible et donc les pertes de frottement de la turbine sont négligeables par rapport aux pertes de génératrice.

II.9.2.2 Modèle de turbine

L'éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor: la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site. Dans notre cas on va prendre le moteur éolien à axe horizontal, le principe de la conversion éolienne a été établie par Betz, il suppose que les pales sont placées dans un air animé à l'infini amont d'une vitesse V_1 et à l'infini aval d'une vitesse V_2 avec une masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales, la masse d'air est définie par [54] :

$$m = \frac{\rho \cdot S (V_1 + V_2)}{2} \quad (\text{II.16})$$

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) :

$$P_m = \frac{m \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (\text{II.17})$$

Soit en remplaçant m par son expression dans (II.18)

$$P_m = \frac{\rho \cdot m (V_1 + V_2) \cdot (V_1^2 + V_2^2)}{2} \quad (\text{II.18})$$

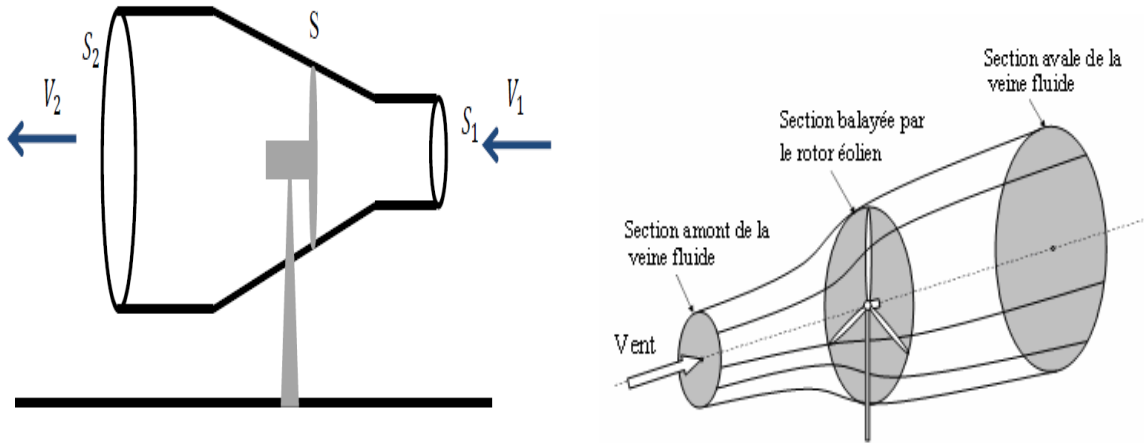


Figure II.8 a) : Veine fluide traversant le rotor éolien b) : Tube de courant autour d'une éolienne.

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 :

$$P_{mt} = \frac{\rho \cdot S \cdot V_1^3}{2} \quad (\text{II.19})$$

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

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2}\right)\right) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2} \quad (\text{II.20})$$

II.9.3 Conversion aérodynamique

Le comportement aérodynamique du rotor éolien peut être décrit par la théorie du disque actuateur [9], en considérant que l'air est incompressible, que le fluide s'écoule de manière continue et que les grandeurs étudiées ont la même valeur sur une section donnée du tube de courant d'air[22]. Pour capter l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement, les pales du rotor éolien se présentent obliquement au vent avec un angle appelé angle de calage, provoquant la rotation par un effet de vis ou de tire-bouchon. Pour l'éolienne étudiée dans le cadre de ce travail, l'angle de calage est fixe et la grandeur de sortie du rotor éolien est le couple. Ce dernier peut être calculé à partir de la puissance captée et de la vitesse de rotation du rotor éolien :

$$T_t = \frac{P_t}{\omega_m} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot A \cdot V_w^3}{\omega_m}; C_p(\lambda) = \frac{\rho \cdot H_t \cdot R_t^2 \cdot V_w^2}{\lambda}; C_p(\lambda) = \rho \cdot H_t \cdot R_t^2 \cdot V_w^2 \cdot C_t(\lambda) \quad (\text{II.21})$$

Où C_t est le coefficient de couple. Ce dernier et le coefficient de puissance sont liés par la relation:

$$C_t(\lambda) = \lambda \cdot C_p(\lambda) \quad (\text{II.22})$$

Les autres paramètres sont explicités dans la section(II.9). A est défini ci-après, tel que : $A \gg 2Rt$. H_t . Les détails du bloc modélisant le couple développé par la turbine éolienne sont présentés dans la figure(II.9);

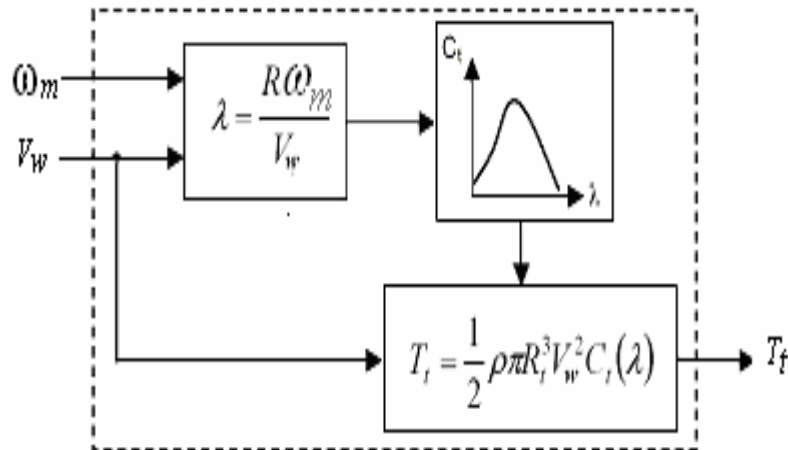


Figure II.9: Modélisation du couple éolien

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

L'évolution du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne. (Figure II.10)

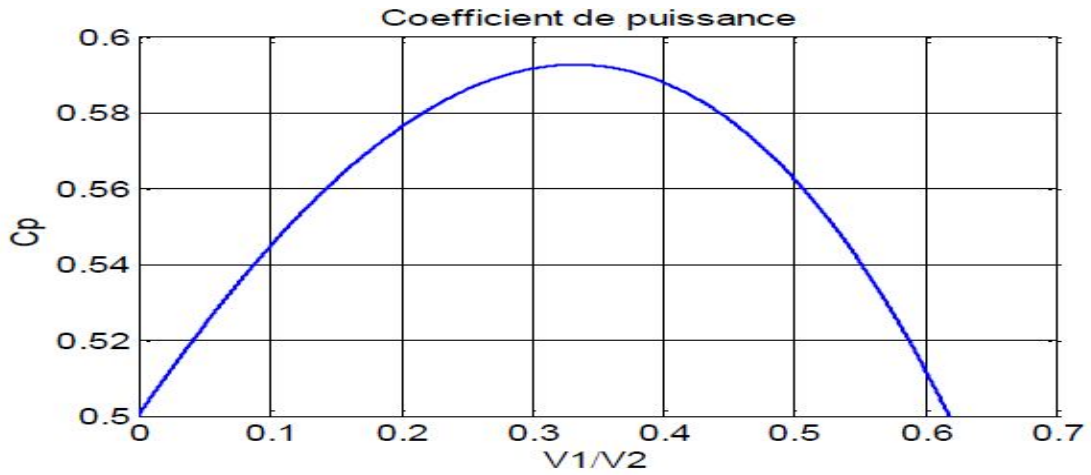


Figure II.10: Coefficient de puissance

En combinant les équations (II.3), (II.6) et (II.7), la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_m = \frac{P_m}{P_{mt}} \cdot P_{mt} = C_p \cdot P_{mt} = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda) \cdot \rho \pi R^2 \cdot V_1^3 \quad (\text{II.23})$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega_1 \cdot R}{V_1}$$

Ω_1 : Vitesse de rotation avant le multiplicateur.

R : Rayon de l'aérogénérateur.

Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse K , la puissance mécanique P_{mg} disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par :

$$P_{mg} = \frac{1}{2} C_p \cdot \left(\frac{\Omega_2 \cdot R}{K \cdot V_1} \right) \cdot \rho \pi \cdot R^2 \cdot V_1^3 \quad (\text{II.24})$$

Avec : Ω_2 Vitesse de rotation après multiplicateur.

Si on prend l'exemple d'un système de production d'énergie par éolienne fonctionnant à vitesse variable, on cherchera systématiquement le régime optimal pour un régime de fonctionnement donné (vitesse du vent fixe), on souhaite que la puissance fournie soit maximale ce

qui correspond à une valeur de λ donnée appelée λ_{OPT} [55]. La vitesse de rotation optimale Ω résultante est alors donnée par :

$$\lambda = \frac{\Omega_1 \cdot R}{V_1} V \quad (\text{II.25})$$

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer une puissance nominale P_n à partir d'une vitesse de vent nominale V_n . Pour des vitesses de vents supérieures à V_n , la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques, de sorte que la puissance récupérée par la turbine ne dépasse pas la puissance nominale pour laquelle l'éolienne a été conçue. Il y a d'autres grandeurs de dimensionnement ; V_{min} la vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie et V_{max} la vitesse maximale de vent au-delà de laquelle l'éolienne doit être arrêtée pour ne pas subir de dégâts [3].

II.9.4 Modèle de la voilure

Bien qu'ayant des performances aérodynamiques indéniables, les éoliennes rapides à axe horizontal bi- ou tripales ne sont pas nécessairement celles qui permettent d'extraire le maximum d'énergie du vent. Il a d'ailleurs été montré que l'utilisation d'un critère de choix purement mécanique conduit paradoxalement à annoncer que les éoliennes lentes, en particulier celles à axe vertical, peuvent extraire davantage d'énergie que les éoliennes rapides [56]. Parmi les éoliennes de ce type, le rotor Savonius (1931) est le plus connu. Il s'agit d'un rotor à traînée différentielle qui, malgré un rendement relativement faible, présente plusieurs avantages indéniables. La voilure utilisée dans le cadre de notre travail en est une, de type Modi et Fernando (voir Figure(II.11)). Il s'agit d'un rotor Savonius classique, constitué de deux demi-cylindres décalés l'un par rapport à l'autre et tournant autour d'un axe perpendiculaire au vent.

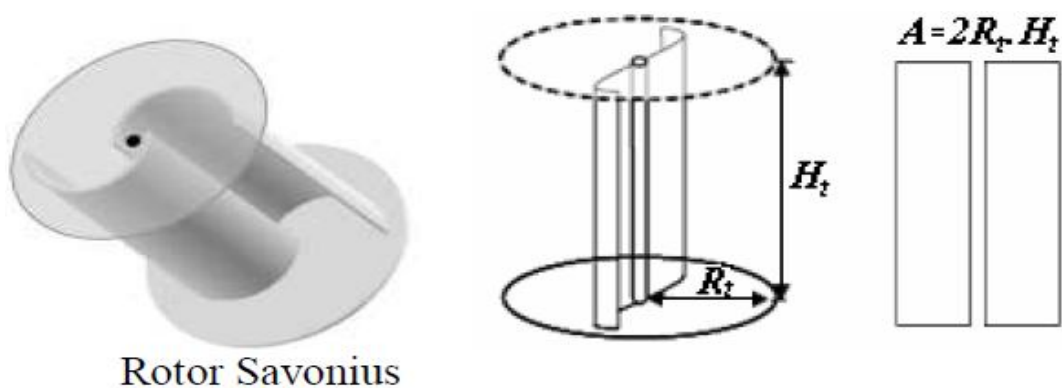


Figure II.11: Voilure à axe vertical de type Savonius

Sa surface utile est estimée à : $A \approx 2Rt \cdot Ht$

Avec :

Rt : le rayon de la voilure .

Ht : la hauteur de la voilure.

L'équation analytique de C_p en fonction de λ est issue d'une interpolation polynomiale de troisième degré de points obtenus par simulation sur Star CD. Elle est donnée par :

$$C_p(\lambda) = -0,12992\lambda - 0,11681\lambda + 0,45406\lambda$$

La courbe présente un facteur de puissance maximal

$$C_{p_{opt}} = 0,22 \text{ pour } \lambda_{opt} = 0,8.$$

L'expression de $C_p(\lambda)$ dépendant des caractéristiques géométriques et du profil des pales, pourrait être obtenue à partir de mesures en soufflerie ou par calcul numérique en utilisant la théorie de l'élément de pale [57], au même titre qu'elle peut être approchée par régression polynomiale .

II.9.5 Modèle de la génératrice asynchrone

Pour une représentation parfaite du comportement de la génératrice asynchrone, il est nécessaire de faire la modéliser d'une façon correcte par un modèle assez précis comme le modèle déphasé bien détaillée dans L'ANNEXE 1.

II.9.6 Modèle de la GSAP

L'étude bibliographique, présentée au second chapitre, montre que parmi les machines à topologies classiques, la machine synchrone à aimants permanents (MSAP) est bien appropriée. La machine synchrone à aimants permanents est un actionneur électrique très robuste et présente de faibles moments d'inerties ce qui lui confère une dynamique caractérisée par de très faibles constantes de temps et permet de concevoir des commandes de vitesse, de couple ou de position avec une précision et des performances dynamiques très intéressantes (actionneurs de robotique, servomoteurs, entraînements à vitesse variable... etc.). Mais sa commande est plus complexe que celle d'une machine à courant continu ; car il est relativement difficile d'obtenir le découplage effectif des deux paramètres de commande qui sont le flux magnétique et le couple mécanique qu'il faut réguler indépendamment l'un de l'autre. Au départ, le modèle mathématique de la machine se présente difficile à exploiter car se trouve non linéaire et fortement couplé. Afin de le linéariser,

une commande extérieure a été introduite. Parmi les techniques de commande appliquées aux machines synchrones à aimants permanents[58], on cite:

L'autopilotage, la commande scalaire, la commande vectorielle et la commande non linéaire dite : linéarisation entrées sortie par retour d'état non linéaire [26], nous avons opté pour la commande vectorielle, dans le but d'assimiler le comportement de la machine synchrone à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée, en découplant la commande du couple et du flux. Au même titre qu'il existe plusieurs techniques de découplage à savoir: le découplage utilisant un régulateur, le découplage par retour d'état et le découplage par compensation. Dans notre cas, on s'est limité à l'application du découplage par compensation. Et pour atteindre les objectifs recherchés à savoir rapidité, stabilité et précision, des régulateurs IP (Intégral-Proportionnel) intègrent le système. Plusieurs catégories d'approche sont possibles suivant l'information disponible sur le procédé, parmi lesquelles on cite la méthode de compensation de pôles et la méthode de placement de pôles. Deux régulateurs du courant dans le repère d/q de Park, ainsi qu'un troisième pour la régulation de vitesse sont appliqués. L'ensemble de ces méthodes seront données ci-après. La construction mécanique de la génératrice en cours d'étude est illustrée par la figure(II.12)ci-dessous [59]:

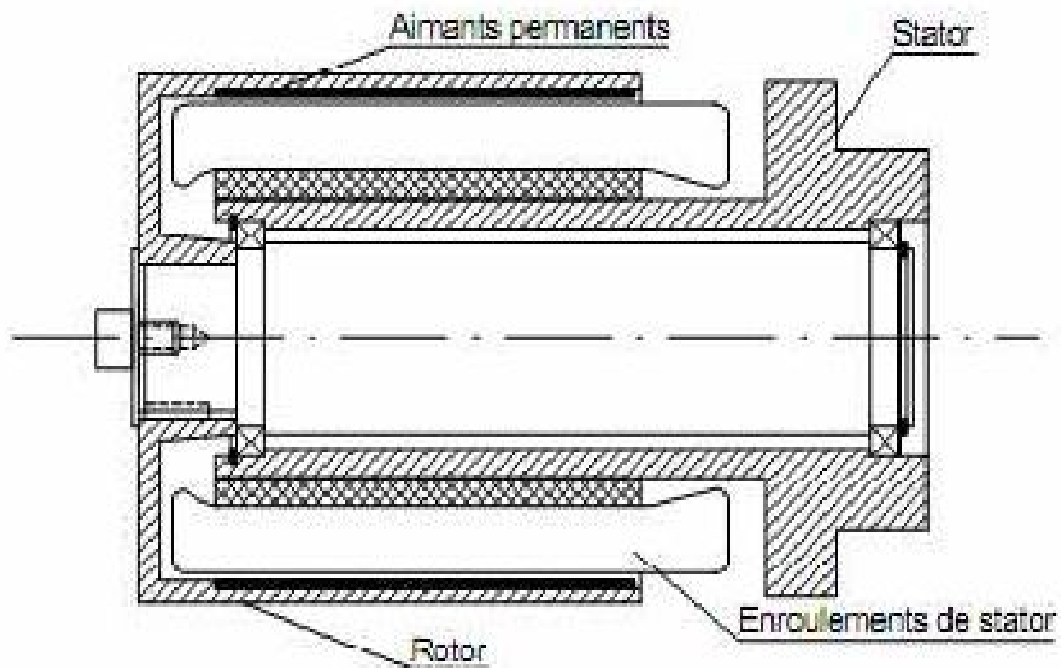


Figure II.12: Construction mécanique de la génératrice

II.10 Hypothèses simplificatrices

- Entrefer constant.
- Circuit magnétique non saturé et perméabilité relative μ_r infinie. La turbine entraîne la GSAP dont la matrice des tensions peut être décrite par l'expression (II.26) ci-dessous:

$$[V_{abc}^g] = -[R_{abc}^g][I_{abc}^g] + P[\lambda_{abc}^g] \quad (II.26)$$

En appliquant la transformation de Park, l'expression de l'équation (IV.6) s'écrit dans le référentiel lié aurotor comme suit:

$$V_q^g = -(R^g + P.L_q^g).I_q^g - \omega_r.L_d^g + \omega_r.\lambda_m \quad (II.27)$$

$$V_d^g = -(R^g + P.L_d^g).I_d^g + \omega.L_q^g.I_q^g \quad (II.28)$$

L'expression du couple électromagnétique dans le même référentiel s'écrit :

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{P}{2}\right)[(\lambda_d^g.I_q^g - \lambda_q^g.I_d^g)] \quad (II.29)$$

Sachant que :

$$\begin{aligned} \lambda_d^g &= L_d^g.I_d^g + \lambda_m \\ \lambda_q^g &= L_q^g.I_q^g \end{aligned} \quad (II.30)$$

Où:

V_{abc}^g	: Tensions de sortie du générateur;
I_{abc}^g	: Courant statorique;
V_d^g / V_q^g	: Respectivement, tension suivant les axes, direct et en quadrature;
R^g	: Résistance d'une phase statorique;
$L_{d/q}^g$	: Inductance statorique directe et en quadrature, respectivement;
ω_r	: vitesse de rotation angulaire du générateur;
λ_m	: Amplitude du flux d'aimants vu par les enroulements statoriques ;
$\lambda_d^g / \lambda_q^g$	: Composantes d/q du flux statorique;
P	: Nombre de pôles du GSAP;
P	: Opérateur de Laplace.

Et parce que la machine est à pôles lisses alors :

$$\lambda_d^g = L_d^g \cdot I_d^g + \lambda_m \quad (\text{II.31})$$

La relation entre la vitesse angulaire rotorique de la génératrice ω_r et la vitesse angulaire mécanique ω_m s'exprime par :

$$\omega_r = \frac{P}{2} \cdot \omega_m \quad (\text{II.32})$$

Supposons que les tensions statoriques de sortie du générateur s'écrivent sous la forme sinusoïdale suivante :

$$V_a^g = V_s^g \cos \theta_r \quad (\text{II.33})$$

$$V_b^g = V_s^g \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (\text{II.34})$$

$$V_c^g = V_s^g \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \quad (\text{II.35})$$

L'expression des équations (II.33), (II.34) et (II.35) dans un référentiel rotorique permet d'écrire :

$$V_q^g = V_s^g$$

$$V_d^g = 0$$

Où V_s est l'amplitude des tensions statoriques. On substitue (II.36) et (II.37) dans (II.38), l'équation des tensions dans l'axe q s'écrit :

$$V_q^g = - \left[\frac{(R^g + P.L^g)^2 + (\omega_r^2 (L^g)^2)}{R^g + P.L^g} \right] I_q^g + \omega_r \lambda_m \quad (\text{II.36})$$

Si $\omega_r (L^g)^2$ est négligeable, l'équation (II.14) sera linéaire. Pour valider cette approximation, il faut que :

$$(\omega_r, V_q^g \text{ et } T_e) \geq 0$$

L'équation (II.7) s'écrit donc :

$$V_s^g - (R^g + P.L^g) I_q^g + \omega_r \lambda_m \quad (\text{II.37})$$

II.11 Application de la commande vectorielle de la GSAP

On choisit ici d'imposer la commande du pilotage vectoriel des machines synchrones dite « à couple par ampère maximal ». On démontre que ce choix consiste à imposer par la loi de commande :

$$I_d^g = 0$$

Dans ce cas, l'équation du couple électromagnétique (II.8) devient :

$$T_e = \left(\frac{3}{2} \right) \left(\frac{P}{2} \right) [\lambda_m I_q^g] \quad (\text{II.38})$$

A flux d'excitation donné par les aimants, il est donc possible de réguler le couple électromagnétique en contrôlant le courant I_q tandis que le courant I_d est asservi à zéro. Pour commander la machine, nous appliquons une régulation IP pour la raison suivante : Une régulation PI sur un processus de premier ordre fait apparaître un zéro (zéro du régulateur) sur la fonction de transfert en boucle fermée. Pour le réglage de ce type de boucle mécanique dont les modes sont lents en raison de la forte inertie de la voilure, ce zéro est parfois responsable de comportements oscillants mal amortis. On préfère donc dans le pilotage en vitesse une structure de type IP qui permet de filtrer ce zéro en boucle fermée et d'imposer uniquement deux pôles dont on peut spécifier amortissement et pulsation naturelle. Même si en pratique, il faut le dire, les deux régulateurs (PI / IP) sont strictement équivalents en termes de complexité de structure.

II.12 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons permis d'explorer le principe de la conversion photovoltaïque ainsi que les différentes technologies utilisées pour y parvenir. Nous avons présenté le concept de modules PV avec les différents éléments qui les construisent. Deux types de cellules ont été présentées l'une cristalline et la deuxième amorphe pour un critère de comparaison. L'adaptation entre la charge et la source est aussi un critère majeur dans la conception et la réalisation de ce type de générateurs, on la trouve étudiée dans plusieurs études de recherches et de développement. Dans la deuxième partie nous avons entamé la modélisation et la simulation d'un modèle simplifié du générateur photovoltaïque. Les différentes caractéristiques qui interviennent pour un module photovoltaïque ont été présentées. Aussi bien et dans la même partie, des paramètres externes d'une cellule photovoltaïque ont été étudiées afin de comprendre leurs influences sur les différentes caractéristiques des modules PV. L'étude d'une chaîne éolienne dédiée à produire de l'énergie électrique pour des zones éloignées en utilisant une turbine et une génératrice asynchrone auto excitée fonctionnant en mode autonome. Dans ce contexte, on a décrit dans un premier lieu quelques notions nécessaires à la compréhension au sujet de la technologie éolienne, les différents types d'éoliennes ainsi que les machines électriques et leurs convertisseurs associés, adaptables à un système éolien. En ce qui concerne le fonctionnement autonome, la machine asynchrone à cage d'écureuil auto excitée par un banc de capacités apparaît comme une solution intéressante au niveau de production de l'énergie électrique pour un système éolien, grâce à leur faible coût et la maintenance facilitée grâce à l'absence de contacts glissants.

Chapitre 3

Simulation et interprétation Des résultats

III.1 INTRODUCTION

Les systèmes hybrides utilisent différentes sources d'énergies comme l'éolien, le photovoltaïque et le générateur diesel. Ce type de système peut représenter une solution pour les régions éloignées d'un grand réseau interconnecté [60]. Cependant le dimensionnement et l'architecture de système de génération d'énergie est une étape primordial dans la conception et la réalisation de même système, ce qui n'est pas bien traduisé dans la littérature. Plusieurs études prennent le paramètre variable de la plupart des énergies renouvelables pour la réalisation d'un système de contrôle complexe [61]. La modélisation étant aussi un facteur majeur pour des études élaborées afin de simuler un bon fonctionnement de système. Plusieurs sont les logiciels qui nous permettent de la faire. Dans une modélisation d'un système hybride de génération d'énergie est présentée par le logiciel HOMER. Pour but d'améliorer la qualité de l'énergie produite par un système de production d'énergie électrique, un système hybride est proposée dans ce chapitre. Une application d'un système hybride est simulé sur le logiciel HOMER afin d'alimenter un site situé à une région de la ville de El-Oued, pour une optimisation qui permet de déterminer le type du système hybride réel a installé.

III.2 ARCHITECTURE DES SYSTEMES HYBRIDES

Les différents générateurs d'énergies qui construisent le système hybride peuvent se connecter en plusieurs configurations ce qui rend la topologie du système plus variée selon notre besoin. Deux types d'architectures peuvent exister le plus souvent, une à un bus CC et une autre à un bus mixte CA/CC.

III.2.1 Architecture à bus CC

Dans cette topologie du système, la puissance fournie par chaque générateur est centralisée sur un bus CC, la connexion de toutes les sources sur un seul bus simplifie le système de commande et mène à bien maîtriser leur fonctionnement au niveau de dimensionnement optimale de générateur diesel, ce dernier est connecté à un onduleur pour alimenter les charges à CA. En outre tous les systèmes de conversion d'énergie à CA fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie en CC. Une certaine quantité d'énergie est perdue à cause des batteries et des pertes dans les convertisseurs, ce phénomène peut faiblir le rendement de système.

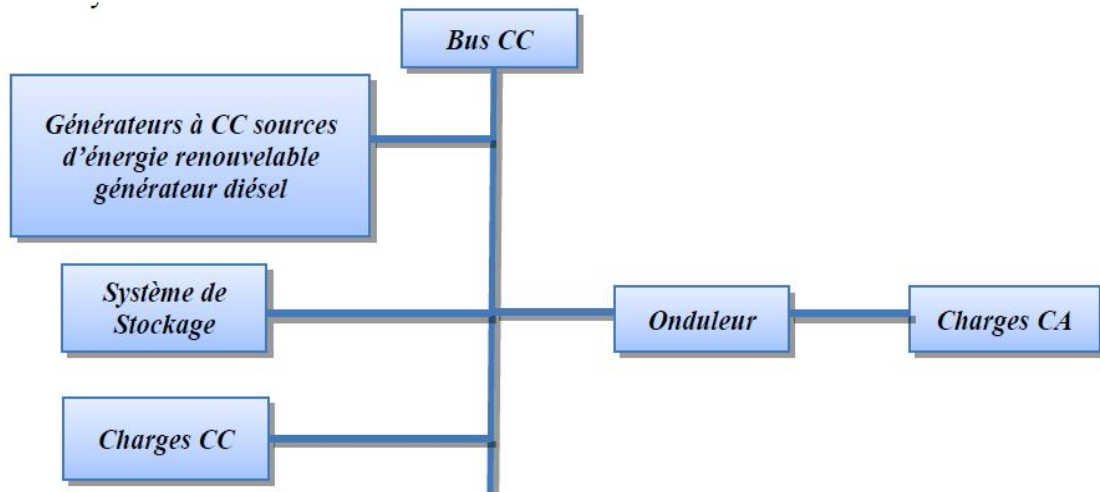


Figure III.1 : Configuration d'un SH à bus CC [23]

III.2.2 Architecture à bus CC /CA

Dans cette configuration, les générateurs d'énergie renouvelable et le générateur diesel peuvent alimenter une partie de la charge à CA directement sans passer par un convertisseur de puissance, ce qui augmente le rendement du système et minimise les pertes en puissance. Le générateur diesel et l'onduleur peuvent fonctionner en autonome ou bien en parallèle en synchronisant leurs tensions en sortie et donnant un avantage particulier pour un fonctionnement des deux sources pendant les pics des charges. La présence d'un convertisseur bidirectionnel peut remplacer le redresseur et l'onduleur situés entre les deux bus. Mais ce mixage de bus complique le système à cause de fonctionnement parallèle des composants.

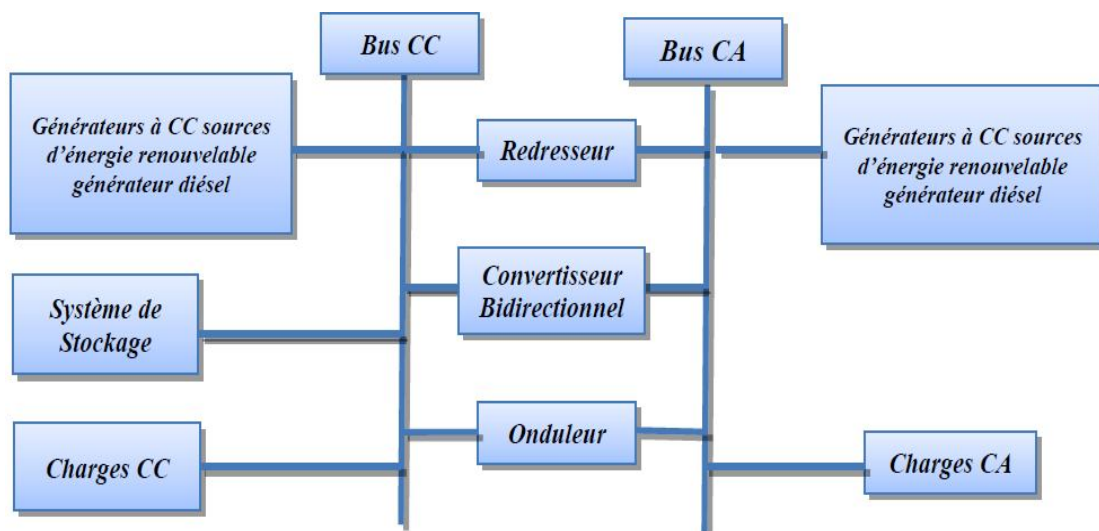


Figure III.2 : Configuration du SH à deux bus à CC et à CA [23]

III.3 PRESENTATION DU LOGICIEL HOMER (outil de simulation)

Le logiciel HOMER (hybride optimisation model for électrique renewables) développé par NREL (national renewable energy laboratory) aux Etats Unis, prend en charge l'opération d'évaluation des conceptions des différents systèmes de génération d'énergie électrique, que ce soit connecter à un réseau électrique classique ou bien éloigné de ce dernier pour une variété d'applications. Il permet d'analyser et de combiner divers sources d'énergie afin d'arriver à afficher une configuration optimale d'un système hybride capable de fournir de l'énergie au site spécifié d'une manière faisable selon certains critères techniques et économiques. Pour simuler un système hybride de génération d'énergie, il faut définir tous les éléments de ce dernier, en utilisant les composants définis dans la bibliothèque du logiciel comme les éoliennes, les panneaux photovoltaïques, les groupes électrogènes et les convertisseurs statiques etc. S'il est nécessaire d'ajouter un composant qui n'existe pas dans la liste des éléments définis par défaut, le logiciel nous permet de l'ajouter en introduisant toutes ces caractéristiques techniques ainsi que son coût. On peut aussi modifier les caractéristiques d'un composant déjà existant dans la bibliothèque. Toujours HOMER, simule le fonctionnement d'un système en faisant des calculs de bilan d'énergie à chaque heure pour chacun des 8760 heures dans une année. Il trouve la combinaison la moins coûteuse qui répond aux charges électriques et thermiques spécifiques. HOMER simule plusieurs configurations, il optimise le coût pour un cycle de vie donné et génère des résultats de sensibilité pour la plupart des situations [63]. Ainsi il permet d'effectuer des analyses et de répondre aux nombreuses questions de conception tels que:

- ✓ Quelles technologies sont les plus rentables ?
- ✓ Quelle est la taille des composants de système hybride ?
- ✓ Que deviennent-ils les aspects économiques du projet si les coûts ou les charges changent?

Es-que les sources d'énergie renouvelables peuvent fournir l'énergie nécessaire ?

III.3.1L'emplacement choisi

L'emplacement choisi pour notre étude est le village d'ELHADHOUDI situé à Nord-Ouest d'EL-Oued. La ville choisit pour l'étude était EL-Oued située dans l'SUD EST de l'Algérie dans l'altitude 33°36.9" N et longitude 7°2.8" E. Afin de construire ce système d'énergie, on doit disposer tous les informations pour l'emplacement sélectionné. Les informations typiques sont : le profil de charge qui devrait être pris en charge par le système, le rayonnement solaire pour les panneaux solaires, la vitesse du vent pour la production d'énergie éolienne, le coût initial de chaque

composant (générateurs d'énergies renouvelables, batteries, convertisseurs), la durée de vie du projet. Ensuite, on utilisant ces données, on peut effectuer la simulation pour obtenir la meilleure configuration du système d'alimentation hybride pour cet endroit précis.

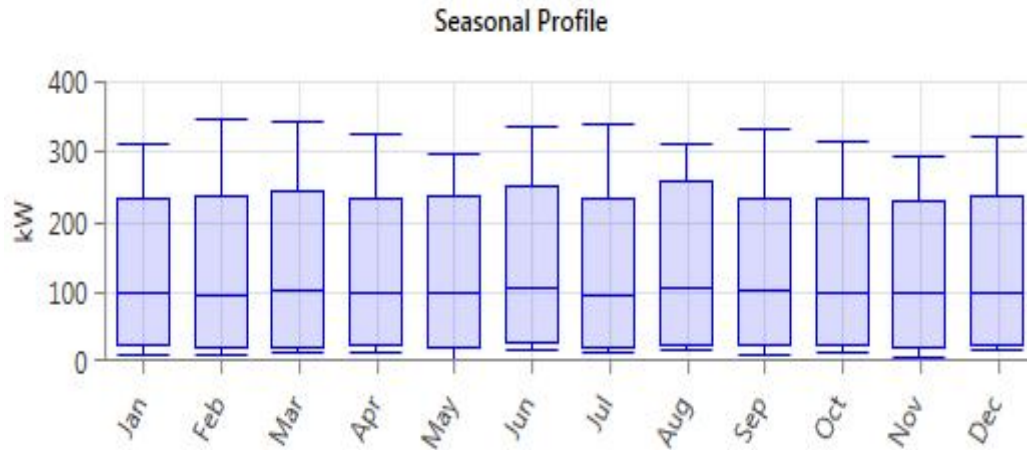


Figure III.3: Le profil de charge dans une année(HADHOUDI "EL-Oued")

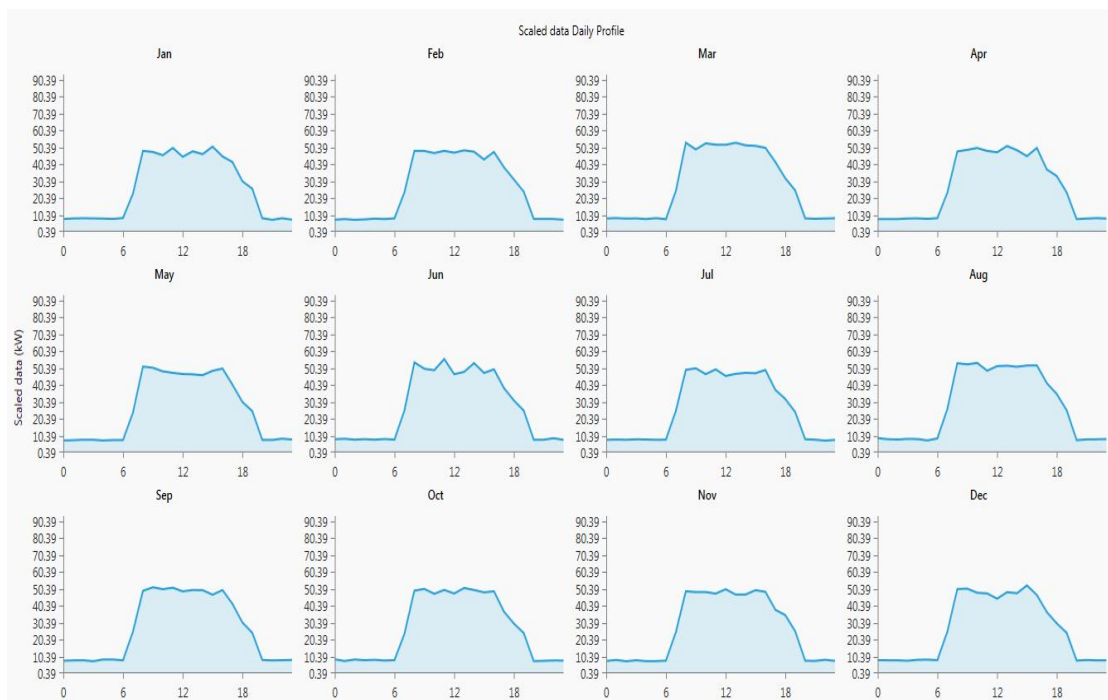


Figure III.4: Le profil de charge journalière suivant les saisons(HADHOUDI "EL-Oued")

La figure III.3 et III.4 montre le profil de charge de nombre de maisons sélectionnées. Le processus de simulation du système hybride choisi a été analysé pour voir si l'utilisation du système d'alimentation sera possible ou non. Il est important de noter que ces maisons présentées dans l'exemple d'étude sont déjà raccordées au réseau, l'objectif supplémentaire était de voir l'effet de l'utilisation du système hybride pour leur fournir de l'énergie électrique. La charge journalière est de 650 KWh par jour, la charge journalière pour le consommateur algérien moyenne est de 5 KWh à 10 KWh par jour, et donc la charge de système construit par HOMER simule l'alimentation

d'énergie pour une somme de maisons qui peut atteindre les 10 foyers. Cependant les informations concernant les sources d'énergie renouvelables comme les données solaires et éoliennes sont présentées dans le tableau I-III.1.

Ce qui concerne la vitesse du vent dans le site d'El-Oued, les informations sont obtenues par la station de météo de la ville. Par l'utilisation de ses données, la rose des vents montrée dans la figure ci-dessous montre que les vents prédominants proviennent de l'ouest/Sud ouest.

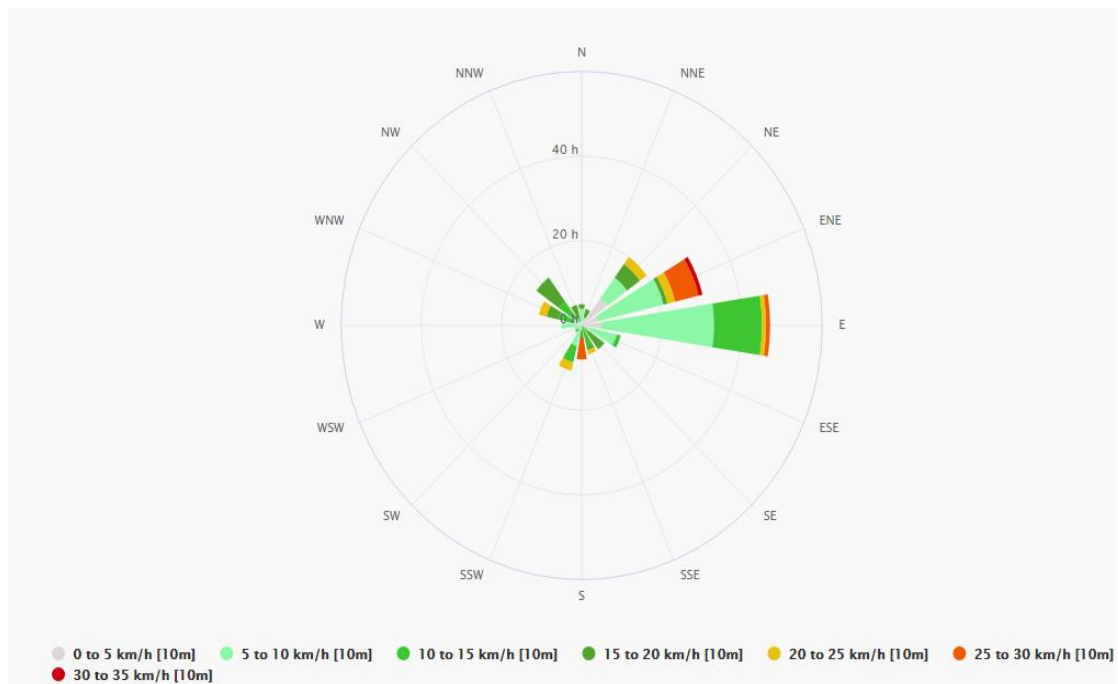


Figure III.5 : La rose des vents de la région de El-Oued

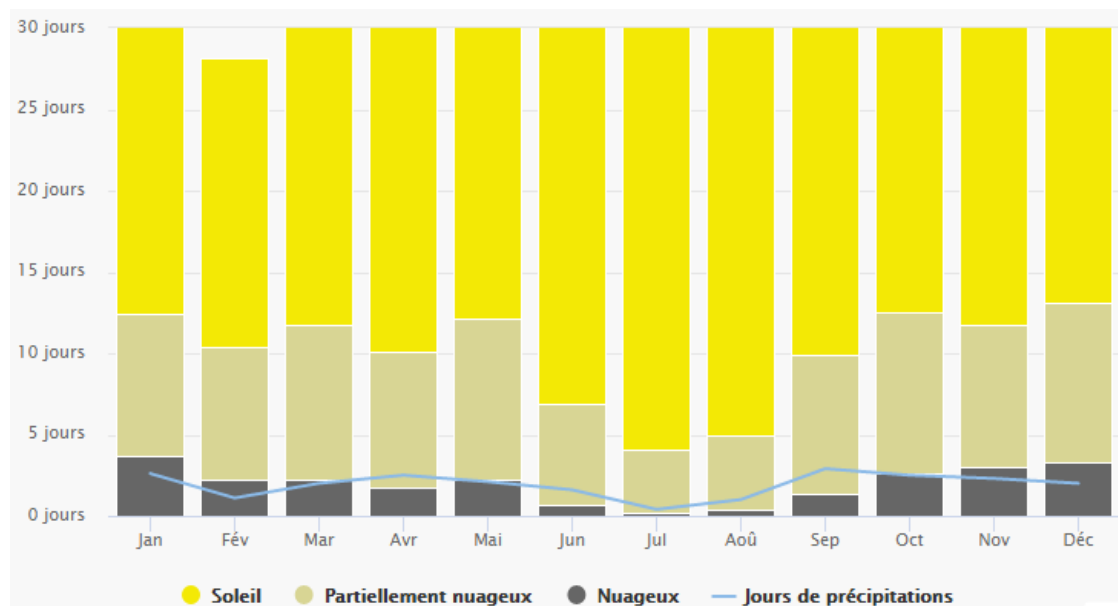


Figure III.6 : La soleil et jours le précipitations région de El-Oued

Les données de rayonnement solaire ne sont pas disponibles, ces informations moyennes mensuelles ont été prises par la NASA. HOMER introduit l'indice de clarté de latitude du site sélectionné (*El-Oued*), les valeurs de l'indice sont présentées dans le même tableau III.1.

Mois	Clarté	Le rayonnement solaire	La vitesse du vent moyenne
	index	(kWh/m ² /d)	(m/s)
Janvier	0.519	2.760	4.680
février	0.630	4.170	4.830
mars	0.647	5.420	4.930
avril	0.671	6.730	5.300
Mai	0.642	7.130	5.480
Juin	0.670	7.710	5.550
Juillet	0.675	7.620	5.320
Aout	0.689	7.170	4.920
Septembre	0.652	5.820	4.800
Octobre	0.584	4.160	4.670
Novembre	0.534	2.990	4.590
Décembre	0.489	2.400	4.550

Tableau III.1 : Le rayonnement solaire et la vitesse du vent pour un site isolé situé à El-Oued

III.3.2 PRESENTATION LES DONNEES METROLOGIE PAR LE PROGRAMME HOMER

✚ La vitesse du vent :

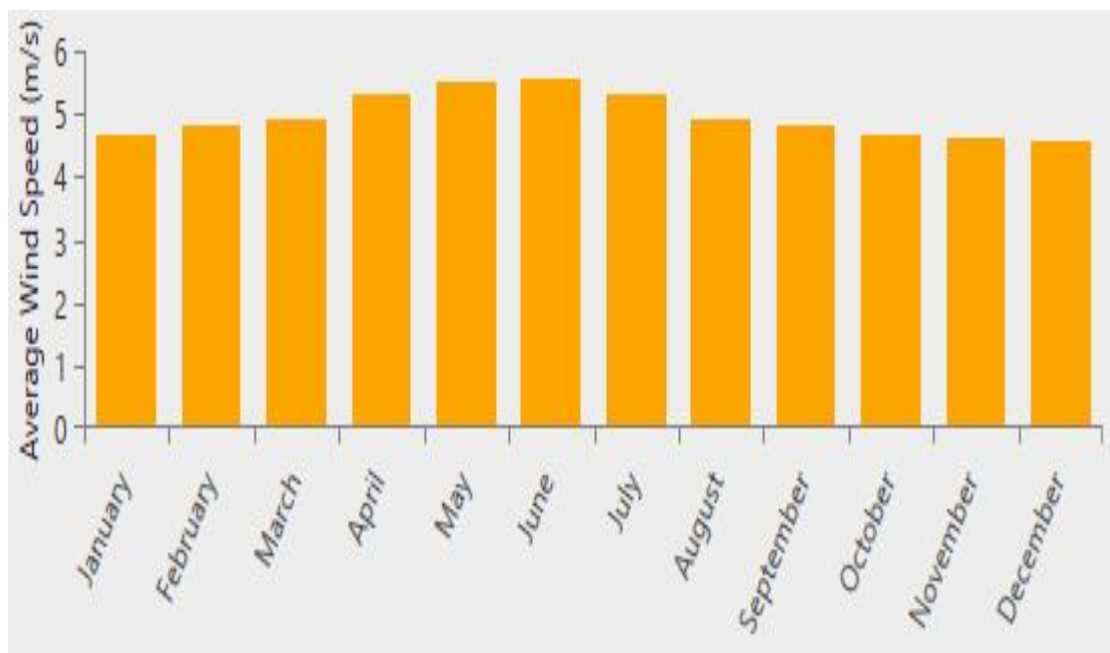


Figure III.7: la vitesse du vent pour un site HADHOUDI à El-Oued

Schéma montre la vitesse du vent horaire dans la région de la vallée, qui connaît des changements saisonniers sur l'année pour une période de 5 mois variation (de Mars à Avril) où la valeur maximale de 5,55 (m /s) au cours du mois de mai, et régler dans le reste des mois, mais d'autres valeurs faibles.

✚ Le rayonnement solaire :



Figure III.8: Le rayonnement solaire un site isolé situé à El-Oued

Ce graphique montre le rayonnement solaire à la surface des valeurs de la vallée sur l'année, telle que mesurée sur une surface horizontale, le rayonnement solaire mensuel varie entre 2.99 [kWh/m²/j] Au mois de Novembre 2,76 [kWh/m²/j] en Janvier, avec une moyenne 2,88[KWh/m²/j]. Sur la surface inclinée à 30°C, et ce rayonnement varie entre 4,17 [kWh/m²/jour] au mois de Février, à 7.71 [kWh/m²/j] au mois de Juin, une moyenne annuelle de 5,34 [kWh/m²/j].

On représente dans la figure III.9, Le profil de la vitesse du vent annuelle et dans la variation journalière de même vitesse.

✚ Le profil de la vitesse du vent :

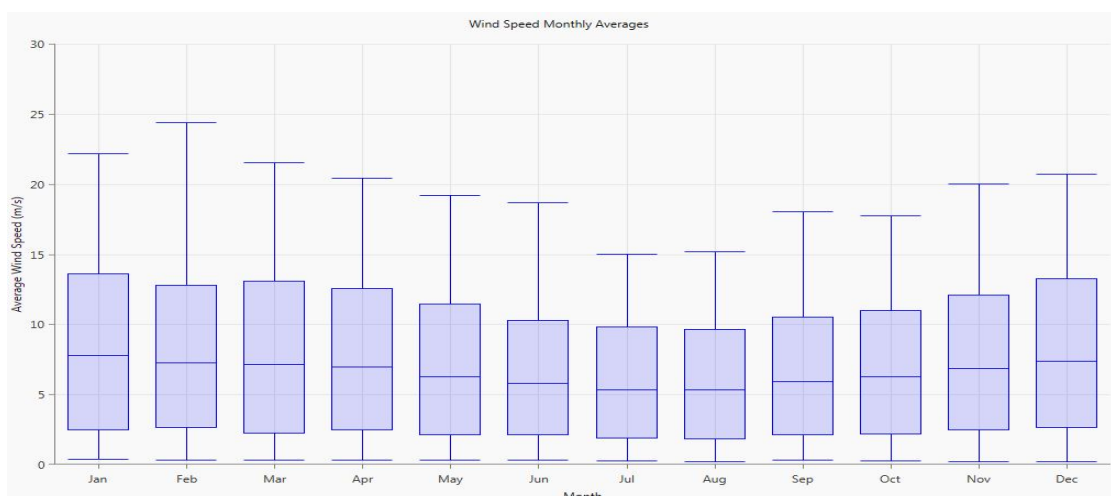


Figure III.9: Le profil de la vitesse du vent d'une année

La figure ci-dessous montre l'évolution de l'énergie solaire dans la journée au cours de la saison dans la région (El-Oued) par le biais du programme Homer.

Le Variation de Solaride la journalière selon les saisons:



Figure III.10: Variation de Solaride la journalière selon les saisons

III.3.3 Construction de système hybride de génération d'énergie

Sur l'environnement HOMER, nous avons défini chaque élément de notre installation en se basant sur toutes les caractéristiques et les données fournies dans le paragraphe précédent. Le schéma d'un système hybride de génération d'énergie qu'on va simuler par HOMER est présenté par la figure III.11.

Le cas d'étude :

Charge: valeur moyenne: 650KWh/j.

Eclairement : valeur moyenne: 4, 6 1 KWh/m2/j.

Vitesse du vent: valeur moyenne: 5, 14 m/s.

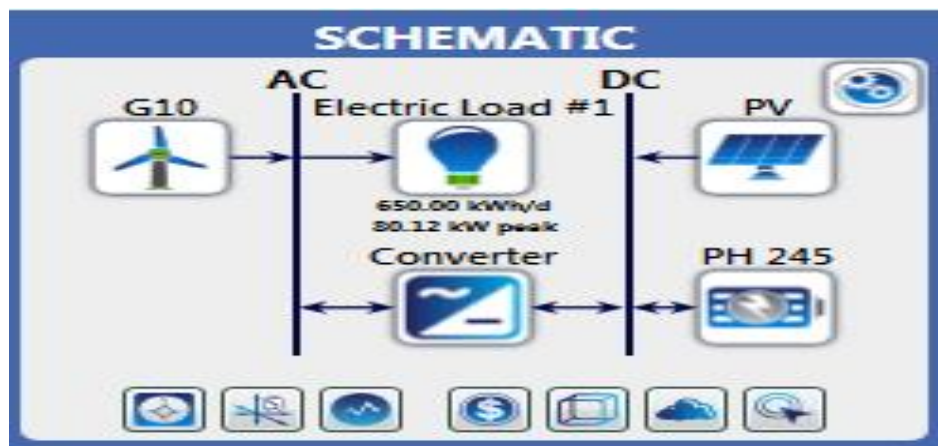


Figure III.11: Architecture d'un système hybride

Le modèle desystème hybride présenté par HOMER peut être simulé par l'introduction des nombreux facteurs telle que le coût des composants, la disponibilité des ressources. Un autre facteur majeur au niveau de cette implantation numérique est l'évaluation de long de vie du projet qui est estimé pour 25ans. Les calculs présentés par le logiciel prennent en compte de valeurs telles que le capital de l'intérêt, l'amortissement, le frais de fonctionnement, le coût du carburant... Toutes ses estimations rentrent dans le bon fonctionnement du système étudié.

III.3.4 Simulation et interprétation

La simulation du système hybride par HOMER provient la combinaison optimale des éléments construisons le système. Elle est présentée selon une valeur actuelle nette (NPC) et selon différentes contraintes qui ont participés à la définition de système. Notre cas traite une simulation d'un système hybride de génération d'énergie électrique qui contient deux systèmes à énergie renouvelable photovoltaïque et éolien, et un autre système diesel, avec la présence des batteries et des convertisseurs, le système est autonome du réseau. Dans ce cas HOMER présente le résultat de simulation comme illustré dans la figure 1-III.12.

Architecture														Cost				System	PV	
			PV (kW)	G10	PH 245	Converter (kW)	Dispatch	COE (\$)	NPC (\$)	Operating cost (\$)	Initial capital (\$)	Ren Frac (%)	Capital Cost (\$)	Production (kWh)						
			99.0	7	4	691	CC	\$0.273	\$798,131	\$12,135	\$643,000	100	296,900	169,714						
			114	5	4	689	LF	\$0.274	\$799,334	\$11,248	\$655,550	100	343,496	196,349						
			114	5	4	689	CC	\$0.274	\$799,334	\$11,248	\$655,550	100	343,496	196,349						
			108	6	4	693	LF	\$0.274	\$802,317	\$11,719	\$652,510	100	322,719	184,472						
			108	6	4	693	CC	\$0.274	\$802,317	\$11,719	\$652,510	100	322,719	184,472						
			110	6	4	695	LF	\$0.275	\$810,933	\$11,765	\$660,537	100	329,915	188,586						
			110	6	4	695	CC	\$0.275	\$810,933	\$11,765	\$660,537	100	329,915	188,586						
			95.6	8	4	695	LF	\$0.276	\$812,228	\$12,641	\$650,629	100	286,825	163,954						
			95.6	8	4	695	CC	\$0.276	\$812,228	\$12,641	\$650,629	100	286,825	163,954						
			105	7	4	686	LF	\$0.276	\$815,227	\$12,156	\$659,827	100	315,237	180,196						
			105	7	4	686	CC	\$0.276	\$815,227	\$12,156	\$659,827	100	315,237	180,196						
			106	7	4	688	LF	\$0.276	\$818,803	\$12,181	\$663,088	100	317,905	181,720						
			106	7	4	688	CC	\$0.276	\$818,803	\$12,181	\$663,088	100	317,905	181,720						
			125	5	4	687	LF	\$0.280	\$830,712	\$11,336	\$685,802	100	374,298	213,956						

Figure III.12: Résultat overlay de simulation de système hybride par HOMER

En effet HOMER simule toutes les configurations faisables des systèmes hybrides capables de fonctionner parfaitement dans le site choisi avec la fourniture de l'énergie électrique suffisante au profil de charge et présente la configuration optimale comme suit :

PV : 106KW.

Eolien (G10): 6 générateurs de 10 KW.

Batteries : 4 lames de batteries.

Convertisseur : 1 seul convertisseur de 690KW.

Architecture						Cost				System	PV	
						COE (\$)	NPC (\$)	Operating cost (\$)	Initial capital (\$)	Ren Frac (%)	Capital Cost (\$)	Production (kWh)
						\$0.273	\$797,538	\$11,686	\$648,151	100	319,148	182,431

Figure III.13: Résultat de simulation de système hybride par HOMER

III.3.4.1 Les caractéristiques techniques et économiques du système PV / Eolien

PV / Eolien		
Configuration de système		
Champ PV	106	KWc
Aérogénérateur	6*10	KWh
Batteries	4	KW
Onduleur	690	KW
Energie de sortie		
Champ PV	182430.68	KWh/an
Puissance moyenne	499.81	KWh/j
Aérogénérateur	112317.20	KWh/an
Heure de fonctionnement PV	4374	h/an
Heure de fonctionnement Eolien	7234	h/an
Fraction d'énergie renouvelable	100	%
Coût		
Investissement	648.151/7, 129.61	\$/DA
Remplacement et entretien	11686/1, 285,460	\$/DA/an
CAN total	797.538/87,729.18	\$/DA
Coût d'énergie par PV	0.143/15.73	\$/DA/KWh
Coût d'énergie par Eolien	0.10/11.00	\$/DA/KWh

Tableau III.2: Caractéristiques techniques et économiques du système PV / Eolien

III.3.4.2 COMPARAISON LE COUT DE KILOWATT

Situé de système		El-Oued (El-Hadhoudi)	Souk-Ahras	Tindouf
Configuration de système	Champ PV (KWc)	106	10	7.4
	TurbineEolien(KW)	6*10	5*10	1*3
	Batteries (KW)	4	3	24
	Onduleur (KW)	690	10	5
Investissement (\$)		648.151	35380	3029700
CAN total (\$)		797.151	2025	4446989
Coûtd'énergie par système (\$)		0.143	0.149	0.209

TableauIII.3:Comparaison le coût de kilowatt

✓ El-Oued:

- CAN Total= 767.538 \$ / 87,729.18 DA

La valeur actuelle de tous les coûts encourus par le système au cours de sa durée de vie, moins la valeur actuelle de tout ce qui revient à la vie durant

- Coût de kilowatt = 0.143 \$

Le coût moyen par kilowatt d'énergie électrique utile produit par le système

Chaque générateur produit de l'énergie individuellement. L'énergie produite du système optimal est montrée dans la figure 2-III.13ci-dessous.

- La puissance moyenne produite par chaque source du système PV / Eolien:

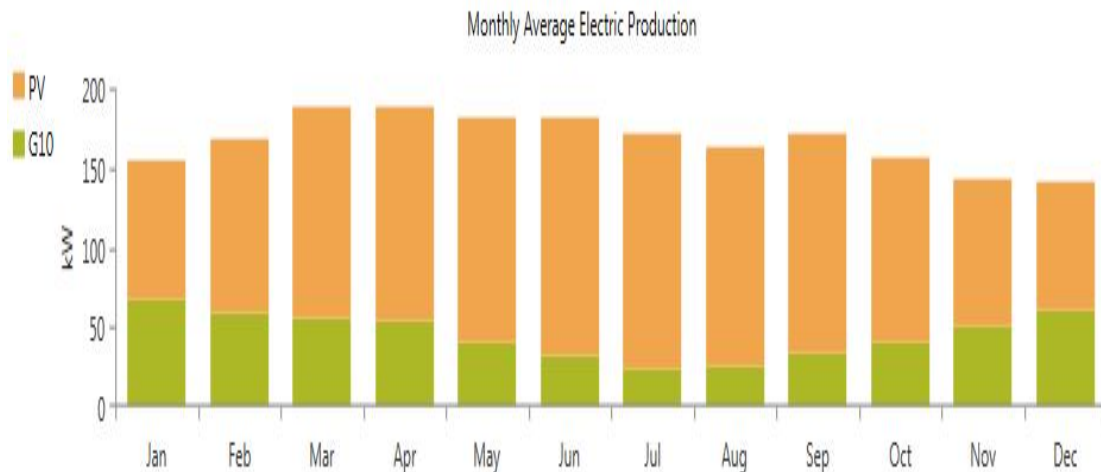


Figure III.14: Puissance moyenne produite par chaque source

Nous notons que l'énergie produite pour alimenter situé EL-Hadhoudi d' El-Oued un système hybride est principalement basée en grande partie sur des générateurs photovoltaïques, par rapport aux générateurs de vent, de vérifier les conditions météorologiques et l'environnement désertique de cette région. Dans les tableaux suivants, on présente des résultats approfondis pour le même système.

- Le tableau III.4 présente le taux de production d'énergie électrique pour chaque générateur tout au long de l'année:

Production	kWh/yr	%
Generic flat plate PV	182,431	61.89
Generic 10 kW	112,317	38.11
Total	294,748	100.00

Tableau III.4 : Energie annuelle produite par chaque générateur

De la figure III.13 et le tableau III.4, on constate que la production de l'énergie par le système hybride optimal durant une année complète de fonctionnement présente une continuité de production d'énergie. On remarque que plus de 70% de l'énergie est produite par les générateurs à énergies renouvelables (38.11% pour l'éolien et 61.89% pour les panneaux photovoltaïques), une chose qui participe à la diminution de l'effet de serre pour notre planète. Une autre remarque constatée est la variation de la production d'énergie pour chaque générateur durant l'année, il apparaît que le générateur éolien participe avec une grande puissance produite dans la saison d'automne et hiver, cette puissance se diminue avec la diminution de vitesse du vent dans le printemps et l'été.

Cependant la production de générateur photovoltaïque augmente par la présence d'éclairement important.

L'étude de production d'énergie pour chaque générateur est illustrée comme suit.

III.3.5 Le générateur photovoltaïque

✚ Les paramètres de fonctionnement de panneau photovoltaïque sont montrés dans le tableau suivant :

Quantity	Value	Units	Quantity	Value	Units
Rated Capacity	106.38	kW	Minimum Output	0.00	kW
Mean Output	20.83	kW	Maximum Output	110	kW
Mean Output	499.81	kWh/d	PV Penetration	76.9	%
Capacity Factor	19.58	%	Hours of Operation	4,374	hrs/yr
Total Production	182,430.68	kWh/yr	Levelized Cost	0.143	\$/kWh

Tableau III.5: Information concernant la production d'énergie par le GP

La figure III.15 présente une présentation **DMAP** de production d'énergie par le GP, ce type de graphe met en évidence un an de données horaires, chaque heure de l'année est présentée par une couleur qui simule une information précise d'une valeur de donnés. Cette présentation permet de voir plus clairement les informations utiles pour une interprétation facile et concrète.

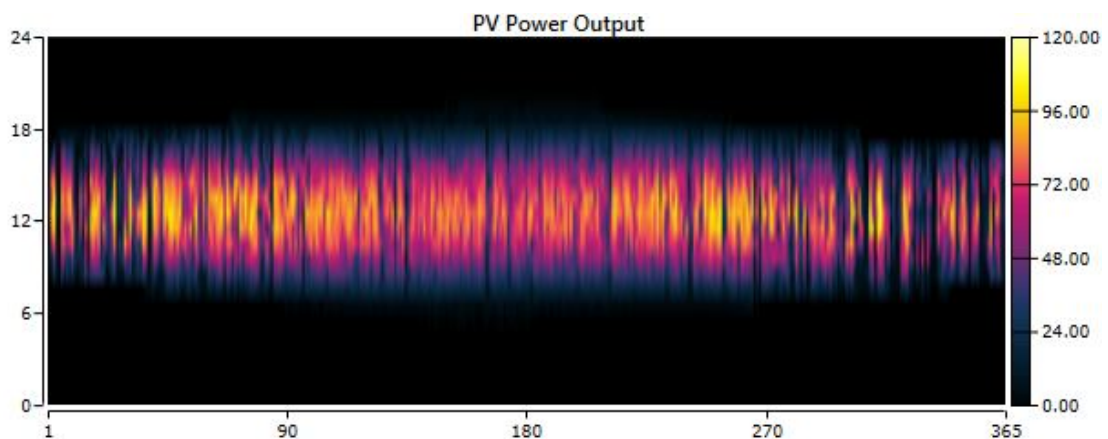


Figure III.15 : DMAP de production horaire par le GP

On peut remarquer que la période de fonctionnement de GP est bornée dans les mois d'hiver entre 7h du matin au 17h, et inversement dans la saison d'été cette limite se stabilise entre 6 du matin jusqu'au 18h. La production des GP est nulle dans l'heure pointe selon le profil de charge

journalière à 20h, ce qui introduit en parallèle le fonctionnement d'autres générateurs ou bien le recours d'énergie stockée dans les batteries pour répondre au demande de charge.

III.3.6 Le générateur éolien

✚ Les paramètres de fonctionnement de générateur éolien sont montrés dans le tableau suivant:

Quantity	Value	Units	Quantity	Value	Units
Total Rated Capacity	60.00	kW	Minimum Output	0.00	kW
Mean Output	12.82	kW	Maximum Output	60.00	kW
Capacity Factor	21.37	%	Wind Penetration	47.34	%
Total Production	112,317.20	kWh/yr	Hours of Operation	7,234.00	hrs/yr
			Levelized Cost	0.10	\$/kWh

Tableau III.6: Information concernant la production de l'énergie éolienne

- La totale production de l'énergie éolienne est 112,317.2[kWh/an], aussi la puissance maximal comme 60 [kW] et les heures des fonctionnements des générateurs éolien par année égale 7,234.00 [heur/an].
 - La production de l'énergie éolien faible par rapport la production photovoltaïque
- ✚ La figure suivante passer la production d'énergie éolienne de nuit tout au long de l'automne et en hiver:

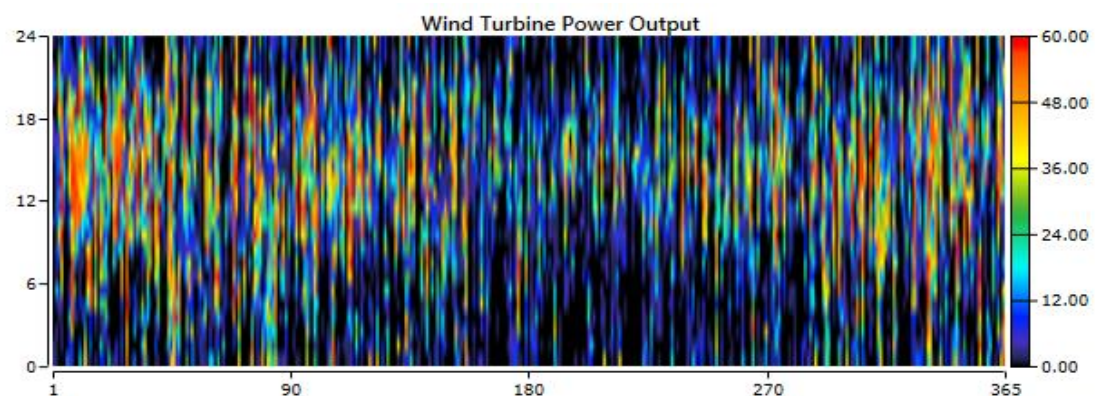


Figure III.16: DMAP de production horaire par l'éolien

Comme illustré dans la figure III.16, le générateur éolien fonctionne toute la journée, ce qui est bien montré dans le graphe **DMAP**. La production de l'énergie éolienne se bénéficie des grandes valeurs tout le long des mois d'automne et d'hiver, ce qui est bien traduit avec des couleurs bien claires, contrairement au mois du printemps et d'été où la vitesse de vent se diminue, la production éolienne se diminue en parallèle.

III.4 CONCLUSION

Dans ce chapitre une brève description d'un système hybride de génération de l'énergie électrique est réalisée, les principales notions liées au type d'architecture de système ont été aussi présentées. Les applications d'un système hybride ont été élaborées, sur l'environnement HOMER pour une optimisation d'un système hybride au site de la ville d'El-Oued, ou les données métrologiques comme le rayonnement solaire et la vitesse du vent sont disponibles. D'après les résultats, on remarque que la combinaison des sources d'énergie renouvelables dans la présence d'une source classique d'origine fossile à un avantage remarquable dans la diminution de l'utilisation de cette dernière, afin de diminuer l'émission de gaz à effet de serre, en plus la diversité des ressources énergétiques que présente un système hybride, la continuité et la disponibilité de la production d'énergie électrique est assurée.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le but du travail présenté dans ce mémoire, est l'étude des systèmes hybrides de génération de l'énergie électrique pour l'alimentation des sites isolés, avec comme objectif de maintenir un niveau de fiabilité élevé avec un coût minimal grâce à un dimensionnement optimal de systèmes hybrides afin de réduire les émissions des gaz à effets serre. Dans le premier chapitre on a dressé un rappel sur les différents types des énergies renouvelables suivi par un état de l'art sur les systèmes hybrides de génération d'énergie électrique ainsi que les différents éléments qui les construisent. Dans le deuxième chapitre on a présenté la modélisation la génératrice synchrone à aimant permanent. Par la suite on a consacré à l'étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne, avec une description des différents types des générateurs électriques utilisés dans un système de conversion éolien, pour notre chaîne de conversion on a choisi la génératrice asynchrone à cage d'écureuil grâce à ces avantages par rapport aux autres types de machines. Le modèle de la chaîne de conversion éolienne a été implanté, afin d'étaler le bon fonctionnement du système aux variations des contraintes météorologiques. L'étude de générateur photovoltaïque a été présentée dans le quatrième chapitre. Dans la première partie, nous avons présenté les différentes architectures des cellules photovoltaïques et leur implantation dans la construction des panneaux. Dans la deuxième partie nous avons approché à une modélisation et des simulations numériques des panneaux photovoltaïques dans le cadre d'étude de l'influence de l'éclairement, la température et les paramètres internes sur le fonctionnement des cellules. Dans le dernier chapitre nous avons présenté une étude de simulation pour un système hybride éolien diesel photovoltaïque avec la présence des batteries et des convertisseurs, pour l'alimentation d'une charge donnée dans un concept autonome. La simulation est faite par le logiciel HOMER, qui nous permet de traiter des résultats réels basés sur des contraintes de coût et de variations d'entrées météorologiques d'un site situé dans la ville de El-Oued. Les résultats obtenues favorisent la production éolienne dans ce site isolé, et permet de nous donner l'avantage d'étudier profondément le fonctionnement d'un système photovoltaïque-éolien qui satisfait nos besoins de l'énergie dans les régions éloignées de ville El-Oued par le logiciel HOMER. D'une manière générale le travail présenté dans ce mémoire nous a permis de montrer l'intérêt que suscitent les énergies renouvelables dans notre pays l'Algérie. Néanmoins, tous ces résultats n'excluent pas des améliorations qui peuvent être apportées dans le futur de notre travail. Il s'agit en fait des points suivants :

- ✓ L'étude des commandes avancées pour l'implantation des systèmes hybrides afin d'améliorer la qualité d'énergie.
- ✓ Développement et mise en œuvre d'un banc d'essai d'un système hybride photovoltaïque-éolien.

- ✓ Une intégration d'un système hybride photovoltaïque-éolien dans notre ville de El-Oued avec le suivi du point de puissance maximale (MPPT : Maximum Power Point Tracking).

BIBLIOGRAPHIE

-
- [1] M. Lopez, “ Contribution à l'Optimisation d'un Système de Conversion Eolien Pour une Unité de Production Isolée ”, Thèse de Doctorat, Université de Paris-Sud, 2008.
- [2] R.Chedid and S.Rahman, “ Unit Sizing and Control of Hybrid Wind-Solar Power Systems’’, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 12, No. 1, March 1997.
- [3] M. Muralikrishnan and V. Lakshminarayana, “ Hybrid (Solar and Wind) Energy System for Rural Electrification ’’, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 3, No. 5, October 2008.
- [4] I. Vechiu, “ Modelisation et Analyse de l’Intégration de des Energies Renouvelables Dans un Réseau Autonome ’’, Thèse de Doctorat, Université de Havre, Année 2005.
- [5] F. Baghdadi, “ Modélisation et Simulation des Performances d’une Installation Hybride de conversion d’Energies Renouvelables ’’, Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de TiziOuzou, 2011.
- [6] S. Benreguia, “Techniques de production de l’électricité en Algérie : Dominance des combustibles fossiles’’, Portail Algérien des Energies Renouvelables, août 2012.
- [7] B. Wichert; «PV-diesel hybrid energy systems for remote area power generation review of current practice and future developments », Renewable and Sustainable Energy Reviews, 1997, vol. 1, No. 3, pp. 209—228, Elsevier Science 1997.
- [8] M. Ashari, C. V. Nayar; «An optimum dispatch strategy using set points for a photovoltaic (PV) diesel-battery hybrid power system », Renewable Energy, vol. 66, No. 1, pp. 1—9, Elsevier Science 1999.
- [9] O. Gergaud, B. Multonv and H. Benahmed, “ Modélisation d’une Chaîne de Conversion Eolienne de Petite Puissance ’’, Electrotechnique du Futur, Nancy, France 2001.
- [10] A. Mirecki, “ Etude comparative de Chaînes de Conversion d’Energie dédiées à une Eolienne de petite puissance’’, Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, Avril 2005.
- [11] K. Idjdarene, “ Contrôle d’une Génératrice Asynchrone à Cage dédiée à la Conversion de l’Energie Eolienne ’’, JCGE'08 LYON, 16 et 17, Décembre 2008.

-
- [12] S. Torigo, Y. Kawagoe, K. Nakamura, K. Kiyokawa and S. OHTA, “ *Cogeneration Systems using a Diesel Engine Generator for Telecommunications Power Plants* ”, DC Generators, Tokyou Japon.
 - [13] M. Angel, “ *Conception et Réalisation de Modules Photovoltaïques Electroniques* ”, Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Septembre 2006.
 - [14] H. Wei, R. Min and T. Yingqi, “ *A Fuzzy Control System of Diesel Generator Speed* ”, University Zhuhai.
 - [15] J. Zhao, A. Wang, P. Campbell and M. A. Green, “ *A 19.8% Efficient Honeycomb Multicrystalline Silicon Solar Cell with Improved Light Trapping* ”, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 46, No. 10, October 1999.
 - [16] M. J. Ryan and R. D. Lorenz, “ *A Power-Mapping” Variable-Speed Control Technique for a Constant-Frequency Conversion System powered by a IC Engine and PM Generator* ”, Conference Record of the 2000 IEEE, pp. 2376-2382 vol.4, Rome October 2000.
 - [17] J. H. Lee, S. H. Lee and S. Sul, “ *Variable Speed Engine Generator with Super Capacitor; Isolated Power Generation System and Fuel Efficiency* ”, Industry Applications, IEEE Transactions on Vol. 45, pp. 2130-2135, September 2009.
 - [18] Y. Hu and M. McCormick, “ *A FPGA Based Fast DC Link Voltage Controller for Stand-Alone Diesel Engine Driven Generator Systems* ”, IEEE 28th Annual Conference, vol.3, pp. 1966-1971, 2002.
 - [19] C. Zhe, “ *Advanced Wind Energy Convertors using Electronic Power Conversion* ”, These from Durham University, 1997.
 - [20] Site Internet de l’institut allemand DEWI, <http://www.dewi.de>
 - [21] J. Chen and D. Jiang, “ *Study on Modeling and Simulation of Non grid connected Wind Turbine* ”, World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference, September 2009.
 - [22] World Wind Energy Association, “ *2013 Small Wind World Report Update* ”, April 2013

- [23] N. Khezami, “ *Commande Multi Modèle Optimale des Eoliennes : Application à la participation des Eoliennes au Réglage de la Fréquence* ”, Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lille, Octobre 2011.
- [24] L. Hamane, “ *Bulletin des Energies Renouvelables* ”, Centre de Développement des Energies Renouvelables CDER, Juin 2003, Algérie.
- [25] F. Poitiers, “ *Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'Utilisation de l'Energie Eolienne* ”, Thèse de Doctorat, Université de Nantes, Décembre 2003.
- [26] A. Abdulrazek, “ *Design and Power Characterization of a Small Wind Turbine Model in Partial Load Region* ”, Master of Science in Engineering Renewable, University of Kassel and Cairo University, February 2012.
- [27] K. Idjdarene, “ *Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones a Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes* ”, Thèse de Doctorat, Université Abderrahmane Mira Béchaa, Mai 2010.
- [28] Le ministère de l'Energie et des Mines “ *Programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique* ”, Algérie, Mars 2011.
- [29] A. Boyette ; « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », thèse de Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy I, Décembre 2006.
- [30] F. Poitiers, “ *Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'Utilisation de l'Energie Eolienne* ”, Thèse de Doctorat, Université de Nantes, Décembre 2003.
- [31] A. Abdulrazek, “ *Design and Power Characterization of a Small Wind Turbine Model in Partial Load Region* ”, Master of Science in Engineering Renewable, University of Kassel and Cairo University, February 2012.
- [32] E. Hau; « Wind-turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics », Editions Springer 2000.
- [33] B. Multon, O. Gergaud, H. Ben Ahmed, X. Roboam, S. Astier, B. Dakyo et C. Nikita ; « Etat de l'art dans les aérogénérateurs », L'électronique de puissance vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables, Ed. NOVELECT - ECRIN, Mai 2002, pp.97-154.

- [34] S. Müller, M. deike, R.W. DE Doncker; « Adjustable speed generators for wind turbines based on doubly-fed induction machines and 4-quadrant IGBT converters linked to the rotor », IEEE IAS Conf., Oct. 2000.
- [35] S. Elaimani, “ *Modélisation de Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrales Dans un Réseau de Moyenne Tension* ”, Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lille, Décembre 2004.
- [36] B. Multon, O. Gergaud, H. Ben Ahmed, X. Roboam, S. Astier, B. Dakyo et C. Nikita ; « Etat de l'art dans les aérogénérateurs », L'électronique de puissance vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables, Ed. NOVELECT - ECRIN, Mai 2002, pp.97-154.
- [37] S. Müller, M. deike, R.W. DE Doncker; « Adjustable speed generators for wind turbines based on doubly-fed induction machines and 4-quadrant IGBT converters linked to the rotor », IEEE IAS Conf., Oct. 2000.
- [38] X. Zhang, X. Zhang, P. Zhou, J. Cheng, S. Jiale and Y. Liu, “ Fuzzy Control Used in Variable Speed Wind Turbine ”, Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics , China August 2009.
- [39] S. Nath and R. Somnath, “ The Modeling and Simulation of Wind Energy Based Power System using MATLAB ”, International Journal of Power System Operation and Energy Management, Issue-2, Vol. 1, pp. 2231-4407, 2011.
- [40] S. J. Chiang, K. T. Chang and C. Y. Yen, “ Residential Photovoltaic Energy Storage System ”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 45, No. 3, June 1998.
- [41] A. Abdelli, “ Optimisation Multicritère d'une Chaîne Eolienne Passive ”, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2007.
- [42] L. Louze, “ Production Décentralisée de l'Energie Electrique : Modélisation et Contrôle d'une Génératrice Asynchrone Auto Excitée ”, Thèse de Doctorat,
- [43] H. Zhang and Z. Wang, “ Study on Modeling and Simulation of Double-Fed Induction Wind Power Generator Control System ”, Sustainable Power Generation and Supply International Conference, pp. 1-5, April 2009.

-
- [44] A. G. Moacyr, P. Leonardo, G. Luigi and A. Carlos, “ Research on Photovoltaic: Review, Trends and Perspectives ”, Power Electronics Conference (COBEP), Brazil 2011.
- [45] A. G. Moacyr, P. Leonardo, G. Luigi and A. Carlos, “ Research on Photovoltaic: Review, Trends and Perspectives ”, Power Electronics Conference (COBEP), Brazil 2011.
- [46] R. Bharanikumar, A.C. Yazhini and A. N. Kumar, “ Modeling and Simulation of Wind Turbine Driven Permanent Magnet Generator with New MPPT Algorithm ”, Asian Power Electronics Journal, Vol. 4 No.2, August 2010.
- [47] Y. Hu, M. McCormick, L. Haydock, M. Cirstea and G. A. Putrus, “Advanced Hybrid Variable Speed Controller For Stand-Alone Diesel Engine Driven Generator Systems ”, Power System Technology Conference, vol.2, pp.711-715, 2002.
- [48] F. M. González-Longatt, “ Model of Photovoltaïque Module in Matlab ”, 2nd Congreso Iberoamericano de Estudiantes de Ingeniería Eléctrica, 2005.
- [49] S. Petibon, “ Nouvelles Architectures Distribuées de Gestion et de Conversion de l’Energie pour les Applications Photovoltaïques ”, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Janvier 2009.
- [50] S. Rehman, Md. Mahbub Alam, J.P. Meyer and L. M. Al-Hadhrami, “ Feasibility study of a Wind-PV-Diesel Hybrid Power System for a village ”, Renewable Energy 38, pp. 258-268, 2012
- [51] F. L. Luo, “ Design of Wind-Turbine Energy System ”, IPEC Conference Proceedings, pp. 110-115, October 2010.
- [52] W. Dingguo and W. Zhixin, “ Modeling and Design of Control System for Variable Speed Wind Turbine in All Operating Region ”, International Journal of Systems Applications, Engineering and Development Issue 3, Vol. 1, 2007.
- [53] E. S. Abdin and W. Xu, “ Control Design and Dynamic Performance Analysis of a Wind Turbine-Induction Generator Unit ”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 15, No. 1, MARCH 2000.
-

-
- [54] M. Narayana and G. Putrus, “ Optimal Control of Wind Turbine Using Neural Networks ”, UPEC2010 31st Aug - 3rd, September 2010.
 - [55] X. Zhang, X. Zhang, P. Zhou, J. Cheng, S. Jiale and Y. Liu, “ Fuzzy Control Used in Variable Speed Wind Turbine ”, Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics , China August 2009.
 - [56] S. Muller, M. Deicke and W. Rik, “ Adjustable Speed Generators for Wind Turbines based on Doubly-fed Induction Machines and 4-Quadrant IGBT Converters Linked to the Rotor ”, Industry Applications Conference Record of the IEEE, vol.4, pp. 2249-2254, October 2010.
 - [57] A. Davigny, “ Participation Aux Services Système de Fermes d’Eoliennes a Vitesse Variable Intégrant du Stockage Inertiel d’Energie ”, Thèse de Doctorat, Université de Lille, 2008.
 - [58] M. Jelavić, N. Perić and I. Petrović, “ Identification of Wind Turbine Model for Controller Design ”, Power Electronics and Motion Control Conference 12th International, pp. 1608–1613, September 2006.
 - [59] S. Elaimani, “ Modélisation de Différentes Technologies d’Eoliennes Intégrales Dans un Réseau de Moyenne Tension ”, Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lille, Décembre 2004.
 - [60] M. Rezkallah, “ *Amélioration de la Qualité d’Energie fournie au Réseau Autonome Hybride Eolien- Diesel* ”, Mémoire présenté à l’École de Technologie Supérieure, Montréal 2010.
 - [61] P.A. Stott and M.A. Mueller, “ *Modeling Fully Variable Speed Hybrid Wind Diesel Systems* ”, Universities Power Engineering Conference, pp. 212-216, september 2006.
 - [62] J. Kasera, A. Chaplot and J. K. Maherchandani, “ *Modeling and Simulation of Wind-PV Hybrid Power System using MATLAB/Simulink* ”, IEEE Students’ Conference on Electrical, Electronics and Computer Science, 2012.
 - [63] National Renewable Energy Laboratory (NREL), “ *HOMER the Mircropower Optimization Model Fact Sheet* ”, pp. 1-2, 2005.