

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

UNIVERSITE d'ADRAR
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA MATIERE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE en vue de l'obtention du diplôme de
MASTER en PHYSIQUE ENERGETIQUE

Thème

CARACTÉRISATION D'UN KIT HYBRIDE PHOTOVOLTAÏQUE-ÉOLIEN SUR SITE ISOLÉ D'ADRAR

Soutenu le : 19 Juin 2013

Présenté par :

Mr. Rafik MANSOURI

Membres de jury :

Président :

Dr Messaoud HAMOUDA Univ.d'ADRAR

Encadré par :

Dr. Moustapha ABDELAOUI Univ. d'ADRAR

Examineurs

Mr. Chérifi KHÉLIFI (C.R) URER ADRAR

Caractérisation D'un Kit Hybride Photovoltaïque-Éolienne Sur Site Isolé D'Adrar

Rafik MENSOURI

RÉSUMÉ

L'énergie renouvelable photovoltaïque et éolienne représente aujourd'hui une solution attractive prometteuse pour l'approvisionnement en énergie des sites isolés notamment pour l'éclairage, le balisage la télécommunication public, les relais hertziens..... Toutefois, l'utilisation de cette ressource renouvelable doit spécifier le degré de fiabilité attendu (la probabilité de perte de charge PPC). La conception optimale du système photovoltaïque satisfaisant cette contrainte exige d'envisager des prévisions précises à partir de simulations complexes nécessitant une base de données riche (supérieure à dix ans) et des moyens de calcul importants pour optimiser la fonction objective. Cependant, la procédure consiste à la combinaison de la surface du système avec la capacité batterie pour une PPC donnée (adaptation de la disponibilité énergétique au profil de la charge). En revanche, La seconde solution est une méthode de design approximative conduisant souvent à un surdimensionnement du système. Néanmoins, cette méthode est plus rapide et moins couteuse. L'objectif de notre travail consiste à décrire, comprendre et optimiser un kit hybride photovoltaïque éolien modulaire, destiné à l'éclairage public la wilaya d'Adrar.

Les logiciels SolidWorks 2013 et MotionWorks sont utilisés dans cette étude pour modéliser géométriquement un kit hybride PV-Éolien et étudier le mouvement de partie libre (éolienne à axe horizontale).

Mots clés : Énergie renouvelable, Kit hybride photovoltaïque éolien d'éclairage, Méthode de la probabilité de perte de charge PPC, Caractérisation, Simulation, Optimisation.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

- *Ma femme et mes enfants M. Iyad & W. Loay.*
- *Mon père et ma mère.*
- *F. Fateh & Sa femme.*
- *Toute ma famille.*
- *Mes collègues du travail de l'entreprise SONELGAZ
Batna.*
- *A tout ceux qui ont été à ma coté dans les moments
Difficiles.*

RAFIK MANSOURI

Remerciements

Avant tout, Je remercie notre Dieu le tout puissant de m'avoir donnée la force d'atteindre mon but et d'accomplir mon travail.

Nous tenons à remercier:

*Docteur **Messaoud HAMOUDA** de l'université Africaine d'Arar de m'avoir fait l'honneur de présider le jury.*

*Chargé de recherche **Chérifi KHÉLIFI** (C.R), de l'unité de Recherche en Énergies Renouvelables URER-MS Adrar qui ont accepté de juger ce travail.*

Au terme des années de préparation de mémoire de master 2, je tiens à remercier chaleureusement toutes les personnes qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail:

*Docteur **Moustapha ABDELAOUI**, mon directeur de mémoire, pour la confiance qu'il m'a accordée en me confiant ce sujet, pour nos discussions fructueuses tout au long des années, pour sa disponibilité et pour la relecture de ce manuscrit.*

Mes remerciements vont aussi à tous. mes parents, mes enseignants, mes amis et mes collègues.

SOMMAIRE

Dédicace.

Remerciements.

Résumé.

Introduction Générale..... 02

CHAPITRE 1 :

Etude Bibliographique sur les systèmes photovoltaïques

Introduction	05
I.1 Rayonnement solaire.....	05
I.2 La description des systèmes photovoltaïques.....	06
I.2.1 La cellule photovoltaïque.....	06
I.2.2 Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque	07
I.2.3 L'effet photovoltaïque.....	09
I.3 Technologie des cellules solaires.....	10
I.3.1 La cellule cristalline.....	11
I.3.1.1 Cellule en silicium polycristallin.....	11
I.3.1.2 Silicium monocristallin	11
I.3.2 Silicium amorphe en couche mince	12
I.4 Le module photovoltaïque.....	12
I.4.1 Caractéristiques d'un module.....	12
I.5 Le panneau photovoltaïque.....	13
I.6 Aspect géométrique énergétique du rayon solaire.....	14
I.6.1 Les coordonnées géographiques.....	14
I.6.1.1 Longitude.....	14
I.6.1.2 Latitude.....	14
I.6.2 Les coordonnées horaires.....	14
I.6.2.1 La déclinaison solaire.....	14
I.6.2.2 Angle horaire.....	14
I.6.3 Les coordonnées horizontales.....	15
I.6.3.1 Hauteur angulaire du soleil.....	15

I.6.3.2 Azimut.....	15
I.6.4 Angle horaire de coucher du soleil.....	16
I.7 Energie reçue par un capteur photovoltaïque.....	16
I.7.1 Estimation de l'énergie instantanée (ciel clair).....	16
I.7.2 Estimation de l'énergie instantanée (ciel couvert).....	17
I.7.3 Estimation de l'énergie journalière incidente.....	17
I.7.4 Estimation de l'énergie annuelle incidente.....	17
I.8 Avantages d'une installation PV.....	18

CHAPITRE 2 :

Étude Bibliographique sur les systèmes éoliens

Introduction.....	22
II.1 Définition de l'énergie éolienne.....	23
II.2 Les différents types d'éoliennes.....	23
II.2.1 Les éoliennes à axe horizontal.....	23
II.2.2 Les éoliennes à axe vertical.....	23
II.2.2.1 Le type Darrieus.....	24
II.2.2.2 Le type Savonius.....	24
II.3 Principe de fonctionnement.....	25
II.3.1. Principaux Composants.....	25
II.4 Conversion d'énergie aérodynamique en énergie électrique.....	26
II.4.1 Le coefficient de vitesse réduite.....	27
II.4.2 Le coefficient de puissance.....	28
II.4.3 Le coefficient de couple.....	29
II.5 Gisement éolien en Algérie.....	29
II.6 Distribution de la vitesse du vent.....	30
II.7 Avantages de l'énergie éolienne.....	31

CHAPITRE 3 :

Modélisation géométrique de kit hybride sous SolidWorks 2013

Introduction.....	35
III.1 Présentation du logiciel SolidWorks.....	36
III.2 Application.....	37
III.2.1 Modélisation géométrique de partie éolienne.....	37
III.2.2 Modélisation géométrique de partie photovoltaïque.....	38
III.2.3 Modélisation géométrique de la structure.....	39
Conclusion.....	40

CHAPITRE 4 :

Modèle d'un kit d'éclairage hybride photovoltaïque éolien avec stockage électrochimique

Introduction.....	44
IV.1 Modèle du système hybride PV / Eolien avec stockage batteries.....	45
IV.2 Modèle du Générateur Photovoltaïque.....	46
IV.3 Modèle du Générateur Eolien.....	48
IV.4 Modèle de la disponibilité énergétique éolienne.....	50
IV.5 Modèle de la Batterie de Stockage.....	52
IV.6 Pré-dimensionnement d'un Kit solaire.....	53
IV.6.1 Détermination de la surface du champ photovoltaïque.....	53
IV.6.2 Estimation de la surface du rotor éolien pour satisfaire les besoins de la charge exprimée.....	55
Conclusion.....	58
Conclusion Générale.....	62

LISTE DES FIGURES

Figure I.1. Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil.....	05
Figure I.2. Système photovoltaïque.....	05
Figure I.3. Schéma électrique équivalent d'une cellule en silicium cristallin.....	07
Figure I.4. Caractéristique courant-tension d'une cellule en silicium multi-cristallin. (a) Courbe réelle mesurée par le constructeur, (b) Courbe simulée.....	08
Figure I.5. Notion de facteur de forme FF pour une cellule photoélectrique.....	08
Figure I.6. Digrammes de bandes d'énergie au voisinage de la jonction.....	09
Figure I.7. Exemple de chaîne de production de cellules photovoltaïques en silicium....	11
Figure I.8. Les coordonnées géographiques.....	14
Figure I.9. Les coordonnées horaires.....	15
Figure I.10. Les coordonnées horizontales.....	15
Figure II.1. Développement de l'énergie d'éolienne dans le monde.....	22
Figure II.2. Principe de conversion de l'énergie dans une éolienne.....	23
Figure II.3. Les éoliennes à axe horizontal.....	24
Figure II.4. Éoliennes à axe horizontal.....	24
Figure II.5. Principaux composants de l'éolienne moderne.....	25
Figure II.6. Conversion aérodynamique en énergie électrique.....	27
Figure II.7. Vitesse du vent V_v et vitesse tangentielle (ΩR_v)	27
Figure II.8. Coefficients de puissance en fonction de la vitesse normalisée λ pour différents types de turbine.....	28
Figure II.9. Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol....	30
Figure III.1. Éolienne à axe horizontale WHISPER (MODELE Whisper 100).....	36
Figure III.2. Forme éclaté de l'éolienne.....	37
Figure III.3. Partie photovoltaïque.....	38
Figure III.4. Structure du kit hybride.....	39
Figure III.5. Modélisation géométrique du kit hybride sous SolidWorks –Vue Isométrique –.....	40
Figure III.6. Modélisation géométrique du kit hybride sous SolidWorks –Vue Face & Droite –.....	40

Figure III.7. Kit hybride Éolien/Photovoltaïque.....	41
Figure IV.1. Irradiation solaire globale moyenne annuelle journalier sur plan incliné à la latitude en Algérie.....	44
Figure IV.2. Puissance éolienne moyenne annuelle récupérable à en Algérie 10 m du sol.....	45
Figure IV.3. Kits solaires hybrides.....	45
Figure IV.4. Système hybride photovoltaïque éolien avec stockage batteries.....	46
Figure IV.5. Composantes du rayonnement solaire sur plan incliné.....	47
Figure IV.6. Puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent.....	48
Figure IV.7. Influence de l'exposant (<i>Cte</i>) sur la vitesse de design de l'éolienne.....	49
Figure IV.8. Répartition statistique de Weibull de la vitesse du vent.....	51
Figure IV.9. Disponibilité énergétique de l'aérogénérateur.....	51
Figure IV.10. Influence de l'irradiation solaire moyenne journalière sur la surface de captation.....	54
Figure IV.11. Estimation du nombre de modules en fonction de la surface du champ PV...54	
Figure IV.12. Influence de l'autonomie sur la capacité de stockage batterie.....	55
Figure IV.13. Variation de la surface de la roue éolienne selon l'énergie éolienne disponible sur site.....	56
Figure IV.14. Différentes configurations énergétiques du Kit d'éclairage sur site d'Adrar...56	

NOMENCLATURE

I_{CELL} : Courant fourni par la cellule.

V_T : Potentiel thermodynamique.

I_{sat} : Courant de saturation de la jonction.

K : Constante de Boltzmann ($1.381 \cdot 10^{23}$ Joules/Kelvin).

T : Température de la cellule.

V_{CELL} : Tension aux bornes de la cellule.

I_{CC} : Courant produit par la cellule.

\emptyset : Latitude d'un lieu.

δ : Déclinaison solaire.

w : Angle horaire.

Δ : Hauteur angulaire du soleil.

ω_s : Angle horaire du coucher soleil.

E_G : Rayonnement solaire globale.

E_S : Rayonnement solaire directe.

E_D : Rayonnement solaire diffuse.

dE : Energie cinétique.

V_v : Vitesse du vent.

λ : Coefficient de vitesse réduite.

C_p : Coefficient de puissance.

C_T : Coefficient de couple.

A_{pv} : Surface de captation.

P_{ch} : Facteur d'autodécharge.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Face à l'épuisement des ressources énergétiques fossiles et aux problèmes environnementaux causés par l'émission des gaz à effet de serre lors de l'exploitation de ces ressources, d'autres ressources énergétiques alternatives ont été et doivent continuer à être développées.

L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas nouvelle. Celles-ci sont exploitées par l'homme depuis la nuit des temps. Autrefois, moulins à eau, à vent, bois de feu, traction animale, bateau à voile ont largement contribué au développement de l'humanité. Elles constituaient une activité économique à part entière, notamment en milieu rural où elles étaient aussi importantes et aussi diversifiées que la production alimentaire.

L'électrification par l'énergie solaire photovoltaïque et éolienne sont des solutions alternatives pour un habitat en site isolé, éloigné du réseau électrique. Elles permettent de couvrir les besoins domestiques d'une résidence principale en utilisant des appareils standards (petit électroménager, téléviseur, chaîne haute-fidélité, micro-informatique, etc.) et des équipements spécifiques économes en énergie (éclairage et froid). Pour favoriser le développement de l'électrification par énergies renouvelables en site isolé.

Pour cela, l'objectif principal de notre étude porte sur la caractérisation et la modélisation géométrique d'un kit d'éclairage hybride Photovoltaïque-Éolienne sur site isolé saharien en particulier d'Adrar pour satisfaire un besoin exprimé d'éclairage.

Notre travail comporte les chapitres suivants :

- Le premier chapitre est consacré à l'état de l'art et la recherche bibliographique sur les systèmes photovoltaïques (descriptions, technologies, avantages....)
- Le deuxième chapitre porte sur une étude bibliographique sur la technologie et la conversion éolienne.
- Le troisième chapitre porte sur le choix du modèle du kit à dessiner et à concevoir, l'esquisse de tous les composants, l'assemblage, la vérification et la simulation d'animation de la partie active en mouvement (éolien à axe horizontal) sous le code industriel SolidWorks 2013.

- Le quatrième chapitre présente les modèles mathématiques et l'analyse du comportement énergétique du système hybride Photovoltaïque-Éolien avec stockage batteries.

On clôture l'ensemble de notre travail, par une conclusion générale et des recommandations.

CHAPITRE I : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES

Introduction :

L'énergie photovoltaïque convertit directement l'énergie lumineuse en énergie électrique par le biais de modules photovoltaïques composés de cellules solaires (photopiles). Par contre l'énergie photo-thermique convertit directement le rayonnement solaire en chaleur. Selon les besoins, l'électricité produite peut être utilisée pour l'alimentation d'un site isolé ou revendue totalement ou partiellement au réseau de distribution. Le photovoltaïque (PV) représente une alternative prometteuse intéressante et bien adaptée à des besoins limités. Seulement, malgré sa facilité de mise en œuvre, son faible impact environnemental et le peu d'entretien qu'il nécessite, le PV n'est plus concurrentiel lorsque la demande augmente. Les performances énergétiques d'un système PV dépendent fortement des conditions climatologiques et météorologiques, telles que le rayonnement solaire, la température ambiante, la vitesse du vent... Pour fournir l'énergie continuellement durant toute l'année, un système PV doit donc être correctement dimensionné. Ce qui exige une étude assez rigoureuse dans le but de faire le meilleur choix, le plus performant et au moindre coût. Mais les informations fournies par les constructeurs d'équipements photovoltaïques ne permettent pas toujours de réaliser cet objectif ce qui rend souvent le dimensionnement approximatif.

I.1 Rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet 0.2 μm à l'infrarouge lointain 2.5 μm . On utilise la notion AM pour la masse d'air ou la trajectoire optique afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise [1]. L'énergie totale transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre de 1350 W/m² (AM0) dans l'espace hors atmosphère terrestre (Figure I.1). 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. Le rayonnement solaire direct reçu au niveau du sol (à 90° d'inclinaison) atteint 1000 W/m² du fait de l'absorption dans l'atmosphère (AM1). Cette valeur change en fonction de l'inclinaison des rayons lumineux par rapport au sol. Plus l'angle de pénétration θ est faible, plus l'épaisseur atmosphérique que les rayons auront à traverser sera grande, d'où une perte d'énergie conséquente. Par exemple, l'énergie directe transportée par le rayonnement solaire atteignant le sol avec un angle de 48° avoisine les 833 W/m² (AM1.5).

Pour connaître le rayonnement global reçu au sol, il faut ajouter à ce dernier le rayonnement diffus. Le rayonnement diffus concerne tout le rayonnement dont la trajectoire entre le soleil et le point d'observation n'est pas géométriquement rectiligne et qui est dispersé ou réfléchi par l'atmosphère ou bien le sol. En considérant ceci, on obtient une référence du spectre global notée AM1.5 avec une puissance de 1000W/m².

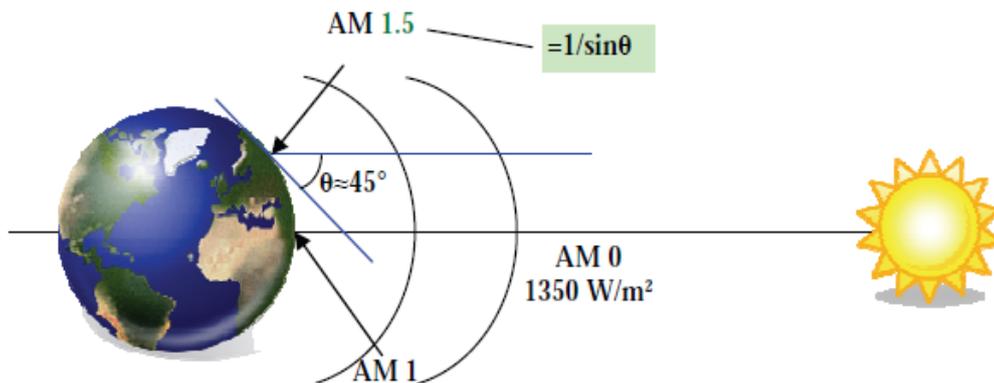


Figure I.1 : Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil [1].

I.2 Description des systèmes photovoltaïques :

I.2.1 La cellule photovoltaïque :

Dans une cellule photovoltaïque, la lumière du jour est directement transformée en électricité. Une cellule photovoltaïque est constituée d'une fine tranche de matériau semi-conducteur, le plus souvent du silicium. Selon le type de silicium utilisé, la part de lumière transformée en électricité est plus ou moins importante.

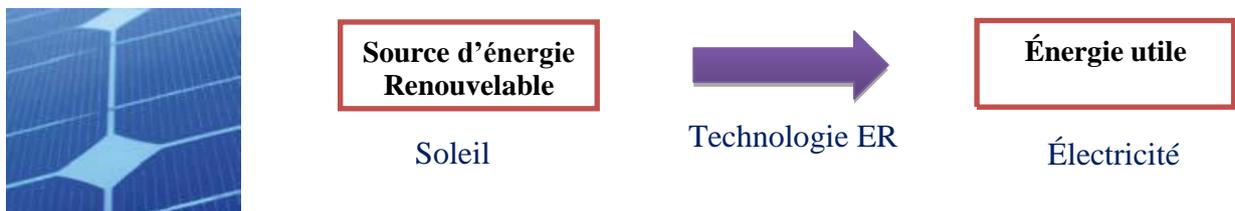


Figure I.2 : Système photovoltaïque [1].

I.2.2 Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque

Lorsqu'une jonction PN réalisée à partir de matériaux sensibles à la lumière est éclairée, elle présente la particularité de pouvoir fonctionner en générateur d'énergie. Ce comportement en statique peut être décrit par l'équation électrique définissant le comportement d'une diode

classique. Ainsi, le régime électrique statique d'une cellule photovoltaïque constituée d'une jonction PN en silicium peut être décrit via l'équation suivante :

$$I_{CELL} = I_{CC} - I_{Sat} \left[\exp \left(\frac{V_{CELL} + (I_{CELL} R_{serie})}{nV_T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{CELL} + (I_{CELL} R_{serie})}{R_{shunt}} \quad (I.1)$$

Où $V_T = \frac{KT}{e}$ représente le potentiel thermodynamique, I_{sat} , le courant de saturation de la jonction, K , la constante de Boltzmann ($1.381 \cdot 10^{-23}$ Joules/Kelvin), T , la température de la cellule en Kelvin, e , la charge d'un électron, n , le facteur de non idéalité de la jonction, I_{CELL} , le courant fourni par la cellule, V_{CELL} , la tension aux bornes de la cellule, I_{CC} , le courant produit par la cellule lorsqu'elle est mise en court-circuit, R_{shunt} , la résistance modélisant les courants de fuites de la jonction, et finalement, R_{serie} , la résistance série caractérisant les diverses résistances de contacts et de connexions. La Figure I-3 représente avec des composants électriques, le comportement électrique équivalent déduit de l'équation (I-1).

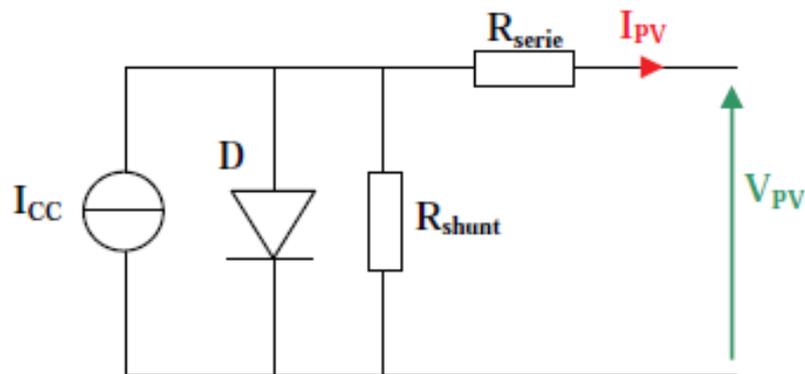


Figure I.3 : Schéma électrique équivalent d'une cellule PV en silicium cristallin [1].

La courbe présentée en Figure I-4 (a) représente la caractéristique courant-tension normalisée notée $I(V)$ d'une cellule solaire en silicium multi-cristallin ayant un rendement de 19.8%. La densité de courant délivrée par la cellule, ici notée J , est exprimée en ampère par unité de surface. La tension aux bornes de la cellule est exprimée en volt et ne dépend pas de la surface de la cellule. Le courant de court-circuit de la cellule est de 38.1 mA/cm^2 (noté dans les notices des constructeurs I_{CC} ou alors I_{SC} pour la terminologie anglaise signifiant Short-Circuit Current) et la tension de circuit ouvert s'élève à 654 mV (V_{oc} , pour Open Circuit Voltage).

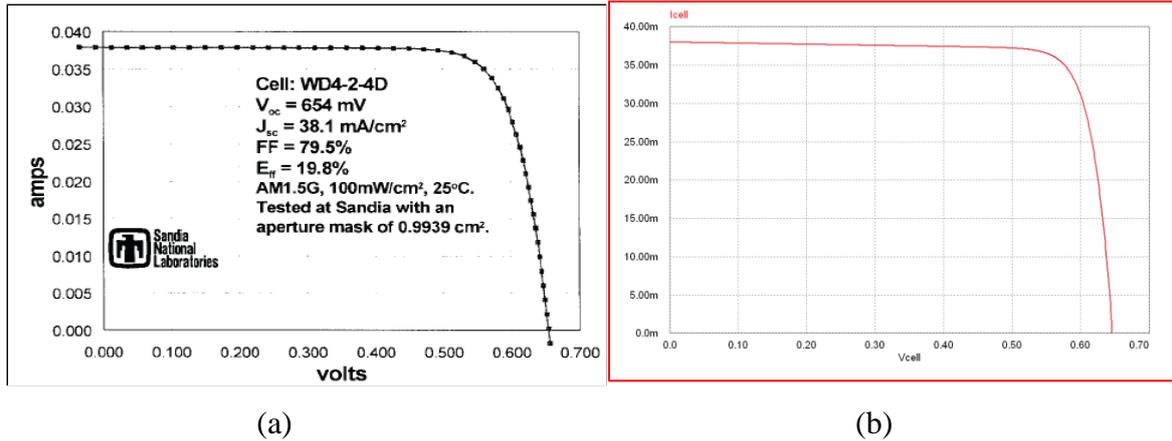


Figure I.4 : Caractéristique courant-tension d’une cellule en silicium multi-cristallin.

(a) Courbe réelle mesurée par le constructeur, (b) Courbe simulée [1].

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique $I(V)$ pour qualifier la qualité d’une cellule ou d’un générateur PV : c’est le facteur de remplissage ou fill factor (FF). Il est illustré sur la Figure I-5. Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle $I_{cc}V_{oc}$. Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l’objet de compromis technologiques pour s’approcher des caractéristiques idéales.

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc}V_{co}} \tag{I.2}$$

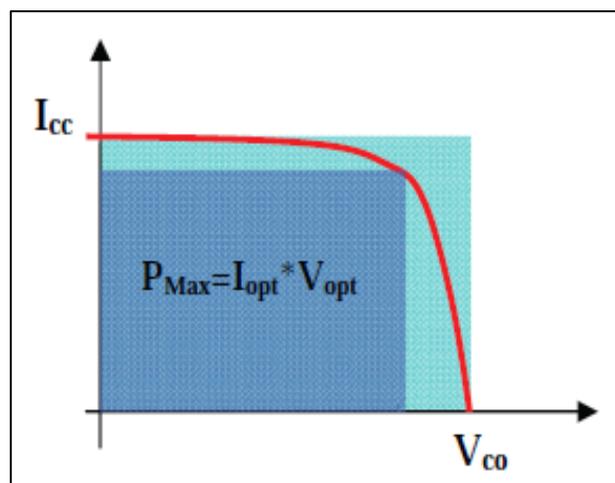


Figure I.5 : Facteur de forme d’une cellule photoélectrique (FF) [1].

I.2.3 L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p . Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p . La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p . Une jonction dite ($p - n$) est formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p , une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi

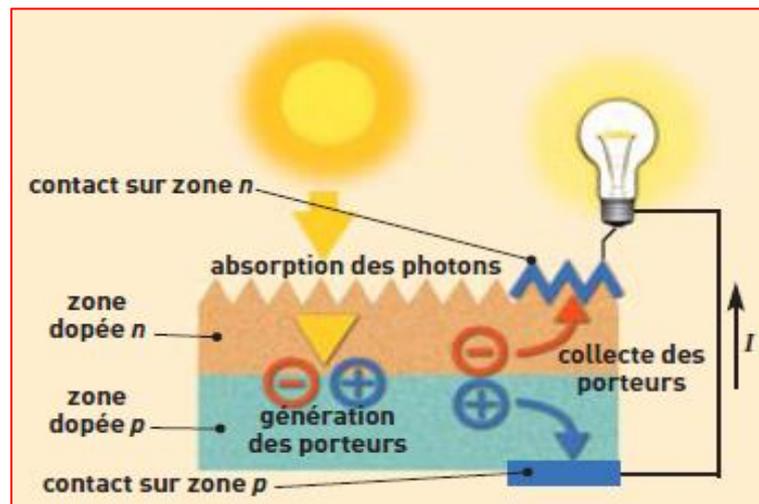


Figure I.6 : Diagrammes de bandes d'énergie au voisinage de la jonction.

Un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron-trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel: le courant électrique circule (figure I.6). L'effet repose donc à la base sur les propriétés semi-conductrices du matériau et son dopage afin d'en améliorer la conductivité. Le silicium employé aujourd'hui dans la plupart des cellules a été choisi pour la présence de quatre électrons de valence sur sa couche périphérique (colonne IV du tableau de Mendeleïev). Dans le silicium solide, chaque

atome – dit tétravalent – est lié à quatre voisins, et tous les électrons de la couche périphérique participent aux liaisons. Si un atome de silicium est remplacé par un atome de la colonne V (phosphore par exemple), un de ses cinq électrons de valence ne participe pas aux liaisons; par agitation thermique, il va très vite passer dans la bande de conduction et ainsi devenir libre de se déplacer dans le cristal, laissant derrière lui un trou fixe lié à l'atome de dopant. Il y a conduction par un électron, et le semi-conducteur dit dopé de type n. Si au contraire un atome de silicium est remplacé par un atome de la colonne III (bore par exemple) à trois électrons de valence, il en manque un pour réaliser toutes les liaisons, et un électron peut rapidement venir combler ce manque et occuper l'orbitale vacante par agitation thermique. Il en résulte un trou dans la bande de valence, qui va contribuer à la conduction, et le semi-conducteur est dit dopé de type p. Les atomes tels que le bore ou le phosphore sont donc des dopants du silicium. Les cellules photovoltaïques sont assemblées pour former des modules.

I.3 Technologie des cellules solaires

Plusieurs technologies sont actuellement développées pour réaliser des cellules photovoltaïques dont les degrés de maturité, les performances et les durées de vie sont très différents. Les principales technologies industrialisées en série à ce jour sont le silicium mono- ou polycristallin et le silicium en couche mince. Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques. Pour le rendre opérationnel, il doit subir au préalable une série de traitements:

- ✓ un procédé métallurgique de raffinage du silicium pour le rendre pur à 99 %
- ✓ suivi d'une seconde purification chimique pour lui donner toutes les qualités électroniques nécessaires.

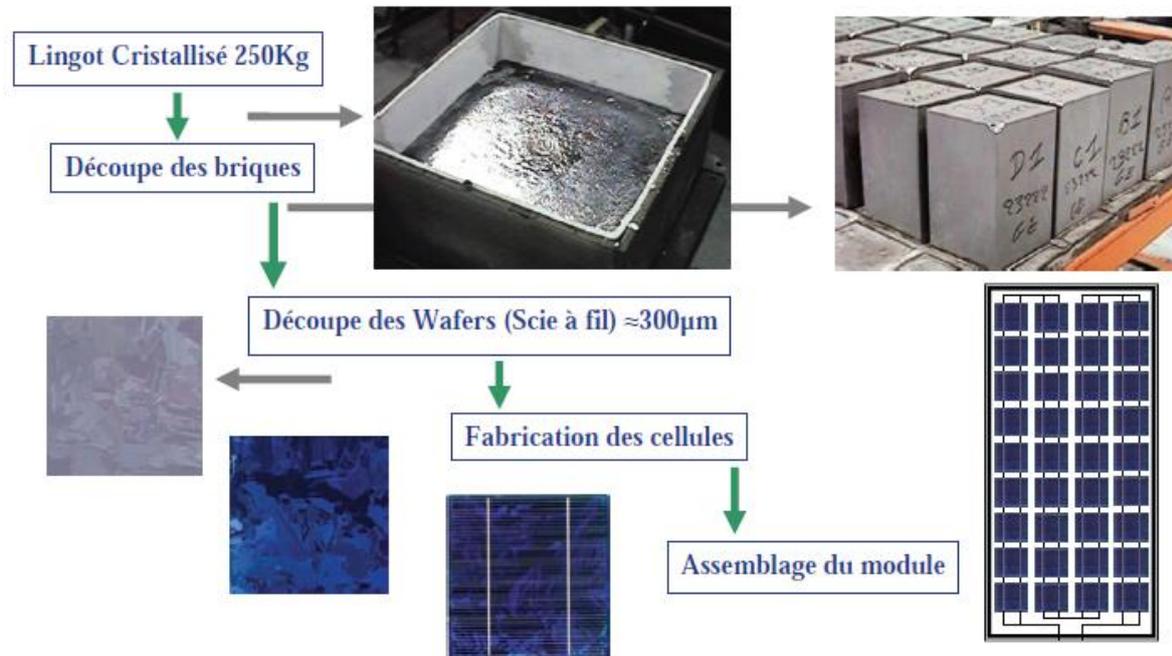


Figure I.7 : Exemple de chaîne de production de cellules photovoltaïques en silicium [1].

I.3.1 La cellule cristalline

Est une technologie éprouvée et robuste (espérance de vie : 30 ans), dont le rendement est de l'ordre de 13 %. Ces cellules sont adaptées à des puissances de quelques centaines de watts à quelques dizaines de kilowatts. Elles représentent près de 80 % de la production mondiale en 2000.

I.3.1.1 Cellules en Silicium polycristallin

Il est constitué de plusieurs monocristaux juxtaposés dans différentes orientations donnant à la cellule un aspect mosaïque. Le silicium polycristallin est la technologie la plus répandue sur le marché mondial en raison de son bon rendement (13%) pour des coûts de fabrication maîtrisés. Il offre actuellement un bon rapport qualité/prix.

I.3.1.2 Silicium monocristallin

Il est constitué d'un seul cristal offrant à la cellule un arrangement parfait des atomes. Il présente un rendement légèrement supérieur au silicium polycristallin (15 %) ; néanmoins, il reste assez onéreux en raison de son exigence de grande pureté et de l'importante quantité d'énergie nécessaire à sa fabrication.

I.3.2 Silicium amorphe en couche mince

Le silicium est déposé en couche mince (spray) sur une plaque de verre ou un autre support ; ce support peut être souple. L'organisation irrégulière de ses atomes lui confère, en partie, une mauvaise semi-conduction. Les cellules amorphes sont utilisées partout où une solution économique est recherchée ou lorsque très peu d'électricité est nécessaire, par exemple pour l'alimentation des montres, calculatrices, luminaires de secours. Elles se caractérisent par un fort coefficient d'absorption, ce qui autorise de très faibles épaisseurs, de l'ordre du micron ; a contrario, son rendement de conversion est faible (de 5 à 10 %) et les cellules ont tendance à se dégrader plus rapidement sous l'effet de la lumière. L'avantage de cette technique est la possibilité d'empiler différents types de couches de divers matériaux pour former des structures multi-jonctions de type Cellule tandem (couche mince de silicium amorphe sur silicium cristallin). Ces dernières augmentent davantage la tension de la cellule et diminuent les effets de la stabilisation. D'autres techniques semblent gagner du terrain aujourd'hui, ce sont les technologies en ruban et les couches minces.

I.4 Le module photovoltaïque [2]

Pour constituer un panneau (le terme technique est module), les cellules sont assemblées, reliées électriquement et encapsulées, afin d'obtenir une tension suffisante et de les protéger des chocs, de l'humidité...etc. La couche inférieure peut aussi être remplacée par une plaque de verre ; dans ce cas, les cellules sont légèrement écartées pour laisser passer de la lumière et cela constitue des panneaux semi-transparents. Les panneaux les plus courants sont des panneaux rectangulaires de quelques centimètres d'épaisseur, d'une surface comprise entre 0,5 et 3 m² et pesant environ 15 kg/m². Mais des produits plus élaborés arrivent maintenant sur le marché, tels que des tuiles, des ardoises ou des éléments de façade qui rendent l'intégration du photovoltaïque dans la couverture extérieure du bâtiment plus esthétique. Le système photovoltaïque connecté au réseau comprend : les panneaux photovoltaïques en nombre suffisant pour assurer une production d'électricité déterminée, un ou plusieurs onduleurs, et des câbles spécifiques pour relier les panneaux aux onduleurs.

I.4.1 Caractéristiques d'un module :

Voici la description des paramètres d'un module :

La puissance crête PC : puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000W/m²).

La caractéristique I (V) : courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.

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

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

Point de fonctionnement optimum (U_m, I_m) : lorsque la puissance de crête est maximum en « plein soleil » $P_m = U_m \cdot I_m$.

Rendement maximal : rapport de la puissance électrique optimale sur la puissance de radiation solaire incidente.

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

I.5 Le panneau photovoltaïque [2]

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW à quelques MW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en série (augmenté la tension) et en parallèle (augmenté le courant) pour former un panneau (ou champ PV). La quantité d'électricité produite par un champ PV dépend :

- Des besoins en électricité.
- De la taille du panneau.
- La technologie du module PV utilisé
- De l'ensoleillement du lieu d'utilisateur.
- De la période de l'année.
- Du système de conditionnement de la puissance

I.6 Aspect géométrique énergétique du rayon solaire

I.6.1 Les coordonnées géographiques

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre.

I.6.1.1 Longitude

La longitude d'un lieu λ correspond à l'angle que fait le plan méridien passant par ce lieu avec un plan méridien retenu comme origine. On a choisi pour méridien (origine 0°) le plan passant

par l'observatoire de Greenwich. Par convention on affecte du signe (+) les méridiens situés à l'est de ce méridien, et du signe (-) les méridiens situés à l'ouest [3].

I.6.1.2 Latitude

La latitude d'un lieu ϕ correspond à l'angle avec le plan équatorial, que fait le rayon joignant le centre de la terre à ce lieu. L'équateur terrestre est donc caractérisé par une latitude égale à 0° , le pôle nord par la latitude $+90^\circ$ et le pôle sud par la latitude -90° . Cette convention de signe affecte le signe (+) à tous les lieux de l'hémisphère nord et le signe (-) à tous les lieux de l'hémisphère sud [3,4].

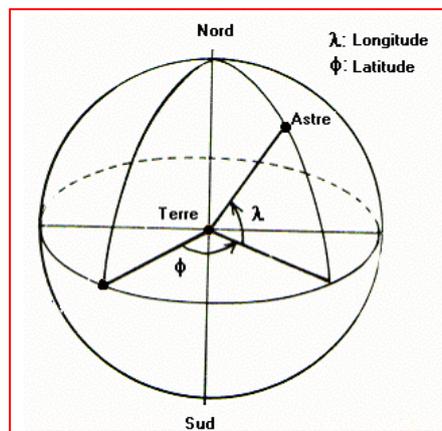


Figure I.8 : Les coordonnées géographiques d'un site sur la terre [5].

I.6.2 Les coordonnées horaires (équatoriales)

I.6.2.1 La déclinaison solaire

C'est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre. Elle varie tout au long de l'année, entre deux valeurs extrêmes : $(-23^\circ 27'$ et $+23^\circ 27'$ environ) et elle s'annule aux équinoxes de printemps et d'automne, sa valeur peut être estimée par la formule [3]:

$$\delta = 23.45 \sin((284 + n)360/365) \quad (\text{I.3})$$

n : Numéro du jour dans l'année.

I.6.2.2 Angle horaire (w) :

L'angle horaire du soleil est l'angle formé par le plan méridien du lieu et celui qui passe par la direction du soleil si l'on prend comme origine le méridien de Greenwich, l'angle horaire est compris entre 0° et 360° La valeur de l'angle horaire est nulle à midi solaire, négative le matin, positive dans l'après-midi et augmente de 15° par heure [3,4].

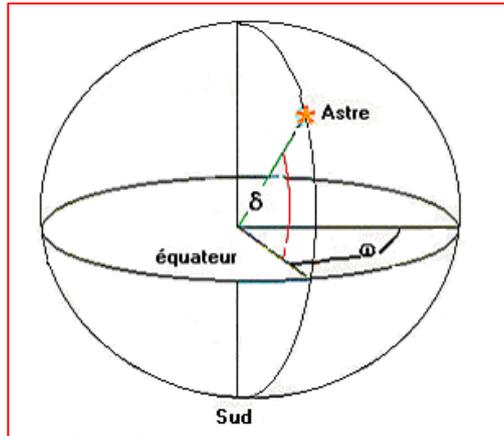


Figure I.9 : Les coordonnées horaires [5].

I.6.3 Les coordonnées horizontales

Le repérage du soleil se fait par l'intermédiaire de deux angles :

I.6.3.1 Hauteur angulaire du soleil (Δ)

C'est l'angle formé par le plan horizontal au lieu d'observation et la direction du soleil.

Cette hauteur durant le jour peut varier de 0 (soleil à l'horizon) à 90 (soleil au zénith) [3,4].

I.6.3.2 Azimut du soleil

C'est l'angle compris entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil. La connaissance de l'azimut du soleil est indispensable pour le calcul de l'angle d'incidence des rayons sur une surface non horizontale [3].

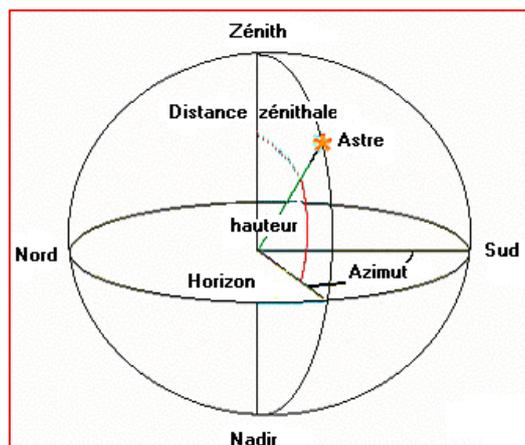


Figure I.10 : Les coordonnées horizontales [5].

I.6.4 Angle horaire du coucher de soleil

L'angle horaire du soleil est le déplacement angulaire du soleil autour de l'axe polaire.

Dans sa course d'est en ouest, par rapport au méridien local. L'angle horaire du coucher de soleil est donné par l'équation suivante [4]:

$$\omega_s = \arccos(-\tan(\phi) \tan(\delta)) \quad (\text{I.4})$$

I.7 Energie reçue par un capteur photovoltaïque

Le rayonnement solaire globale (E_G) reçue par un capteur incliné d'un angle β par rapport à un plan horizontal est constitué de deux composantes, directe (E_S) et diffuse (E_D). Ses rayonnements varient aléatoirement en fonction de la hauteur du soleil, l'angle d'incidence, des intempéries de l'état de visibilité de l'atmosphère. Le calcul de ce rayonnement est très compliqué. Dans la pratique on utilise des méthodes d'estimation approchées. Pour l'Algérie la méthode empirique de Perrin de Brichambaut donne de bons résultats pour l'estimation de l'énergie reçue par un capteur [6].

I.7.1 Estimation de l'énergie de puissance (ciel clair)

Les puissances du rayonnement direct E_S , diffus E_D et global E_G reçues par un capteur (α, γ) incliné de β par rapport au plan horizontal sont données par les relations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} E_S = A \cos(i) e^{\frac{-1}{B \sin(h+2)}} \\ E_D = \left(\frac{1+\cos(\beta)}{2}\right) D_H + \left(\frac{1-\cos(\beta)}{2}\right) a^* G_H \text{ Avec } \begin{cases} D_S = A'(\sin(h))^{0.4} \\ G_H = A''(\sin(h))^{B''} \end{cases} \\ E_G = E_S + E_D \end{array} \right. \quad (\text{I.5})$$

$$[E_S] = [E_D] = [E_G] = W/m^2$$

D_H : Éclairement diffus reçu par une surface horizontale.

G_H : Éclairement global reçu par une surface horizontale.

a^* : L'albédo du sol (coefficient de réflexion du sol).

$$a^* = \begin{cases} 0.9 \text{ à } 0.8 \text{ neige} \\ 0.8 \text{ à } 0.4 \text{ sol clair} \\ 0.4 \text{ à } 0.2 \text{ verdure} \end{cases}$$

I.7.2 Estimation de l'énergie instantanée (ciel couvert)

Le ciel couvert est un ciel gris totalement rempli de couches nuageuses, plus ou moins denses optiquement, mais au travers desquelles il n'est pas possible de distinguer le disque solaire, dans ces conditions le rayonnement direct est inexistant et le rayonnement global ne se compose uniquement de rayonnement diffus. Si la couverture nuageuse est homogène on peut considérer que le rayonnement diffus du ciel est isotrope de même que le rayonnement diffus du sol. Ainsi le rayonnement global par le ciel couvert est :

$$E'_G = E'_D = KE_G(1 + 0.3 \sin h) \quad (I.6)$$

Avec :

$K = 0.6$: Pour le ciel bleu foncée.

$K = 0.3$: Pour le ciel bleu clair.

$K = 0.15$: Pour le ciel bleu laiteux.

I.7.3 Estimation de l'énergie journalière incidente

L'énergie journalière reçue par un capteur plan quelconque dépend en générale de la latitude des couches atmosphériques et des conditions météorologique est donnée par :

$$\begin{cases} E_{jS} = \frac{1}{k} \Delta T \sum_k E_S \\ E_{jD} = \frac{1}{k} \Delta T \sum_k E_D \\ E_{jG} = \frac{1}{k} \Delta T \sum_k E_G \end{cases} \quad (I.7)$$

E : L'énergie instantanée (directe, diffus, globale) incidente sur le capteur.

K : Le nombre d'intervalles entre le lever et le coucher sur le capteur.

ΔT : La différence entre le temps du lever et du coucher sur le capteur.

E_j : L'énergie journalière (directe, diffuse ou globale) incidente sur le capteur.

I.7.4 Estimation de l'énergie annuelle incidente [7]

L'énergie annuelle reçue par un capteur d'orientation quelconque est déterminée par un programme de simulation en faisant la somme des énergies journalières :

$$\begin{cases} E_{as} = \sum_1^N E_{JS} \\ E_{aD} = \sum_1^N E_{JD} \\ E_{aG} = \sum_1^N E_{JG} \end{cases} \quad (I.8)$$

E_a : L'énergie annuelle (directe, diffuse ou globale) incidente sur le capteur

I.8 Avantages et Inconvénients d'une installation PV [2-7]

a) Avantages :

- **Son carburant est gratuit :**

Le soleil est la seule ressource dont a besoin un panneau solaire. Et le soleil brillera jusqu'à la fin des temps. De plus, la plupart des cellules photovoltaïques sont fabriquées à base de silicium, un matériau abondant et non toxique (second matériau le plus abondant sur Terre).

- **L'énergie solaire photovoltaïque ne génère ni bruit, ni émissions nocives, ni gaz polluants :**

L'électricité solaire utilise seulement l'énergie du soleil comme carburant. Elle ne crée aucun coproduit nocif et contribue activement à réduire le réchauffement climatique.

- **Les systèmes photovoltaïques sont très sûrs et d'une grande fiabilité :**

L'espérance de vie d'un module solaire est d'environ 30 ans. La performance des cellules photovoltaïques est généralement garantie par les fabricants pour une durée de 20 à 25 ans. Le photovoltaïque est donc une technologie fiable sur le long terme. De plus, la fiabilité des produits est garantie aux consommateurs.

- **Les modules photovoltaïques sont recyclables et les matériaux utilisés pour leur production (silicium, verre, aluminium, etc.) peuvent être réutilisés.**

Le recyclage n'est pas seulement bénéfique pour l'environnement, il contribue également à réduire l'énergie nécessaire pour produire ces matériaux et ainsi à réduire leur coût de fabrication.

- **L'énergie solaire photovoltaïque exige peu de maintenance :**

Les modules solaires ne nécessitent pratiquement aucune maintenance et sont faciles à installer.

- **L'énergie solaire photovoltaïque fournit de l'électricité aux zones rurales arides et isolées :**

Les systèmes photovoltaïques apportent une valeur ajoutée aux zones rurales (en particulier dans les pays en développement où il n'y a pas de réseau électrique disponible).

- **L'énergie solaire photovoltaïque peut être intégrée de manière esthétique dans les bâtiments :**

Les modules solaires peuvent couvrir les toits et les façades et contribuer ainsi à l'autonomie énergétique des bâtiments. Ils sont silencieux et peuvent être intégrés de manière très esthétique.

- **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.

b) Inconvénients :

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.
- 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
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Beaucoup d'appareils vendus dans le marché fonctionnent au 220 à 230 V alternatif. Or, l'énergie issue du générateur PV est unidirectionnelle et de faible voltage (<30V), elle doit donc être transformée par l'intermédiaire d'un onduleur.

Bibliographie Chapitre I

[1] M. PETIBON Stéphane. « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », thèse de doctorat de l'université de Toulouse, Le 20 Janvier 2009.

[2] H. BELGHITRI. « Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride Éolien-Photovoltaïque ». Magister de l'université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen, 2010.

[3] R. Bernard, G. Menguy, M. Schwartz, « Le rayonnement solaire, conversion thermique et application ». Technique et Documentation, Paris, 1979

[4] J. M. chassériaux, « Conversion thermique du rayonnement solaire », bordas Paris.1984

[5] I.ZEGHIB. « Etude et réalisation d'un concentrateur solaire parabolique » thèse de Magister 2005, université de Constantine.

[6] S MEJDOUB « simulation et optimisation des paramètres photo solaire » thèse de Magister 2001, université de Tlemcen

[6] P. De Brichambaut. « Évaluation énergétique d'un gisement solaire », Tec et Doc ,1984

[7] www.inti.be.

**CHAPITRE II : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES
SYSTÈMES ÉOLIENS**

Introduction

L'énergie éolienne est une source d'énergie utilisée depuis des siècles. En plus de son exploitation en mer pour faire avancer les bateaux, ce type d'énergie a été exploité sur terre durant au moins les 3000 dernières années [1]. En effet, des moulins à vent à axe vertical étaient déjà utilisés dans les hautes terres afghanes 7 siècles A.C. pour moudre du grain. Ainsi, dans un premier temps, l'énergie cinétique du vent était uniquement transformée en énergie mécanique. C'est en 1891 que le Danois Poul Lacour construisit pour la première fois une turbine à vent générant de l'électricité [2].

Depuis, la technologie des aérogénérateurs a évidemment évoluée. Ceci a permis, à l'énergie éolienne, de devenir ces dernières années une alternative aux sources d'énergie traditionnelles. Bien que les aérogénérateurs aient atteint une certaine maturité technique, il leur reste encore une grande marge de progrès technologique. Il n'y a pas de doute que les aérogénérateurs évoluent encore, et la recherche à un rôle important à jouer dans ce sens.

Les éoliennes de dernière génération fonctionnent à vitesse variable. Ce type de fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique, de baisser les charges mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe. Ce sont les algorithmes de commande qui permettent de contrôler la vitesse de rotation des éoliennes à chaque instant.

L'énergie éolienne est la source d'énergie renouvelable la plus fiable : une éolienne a un taux de disponibilité matérielle de plus de 98%.

La Figure I.1 illustre l'évolution durant les dernières années de la puissance éolienne installée dans les principaux pays.

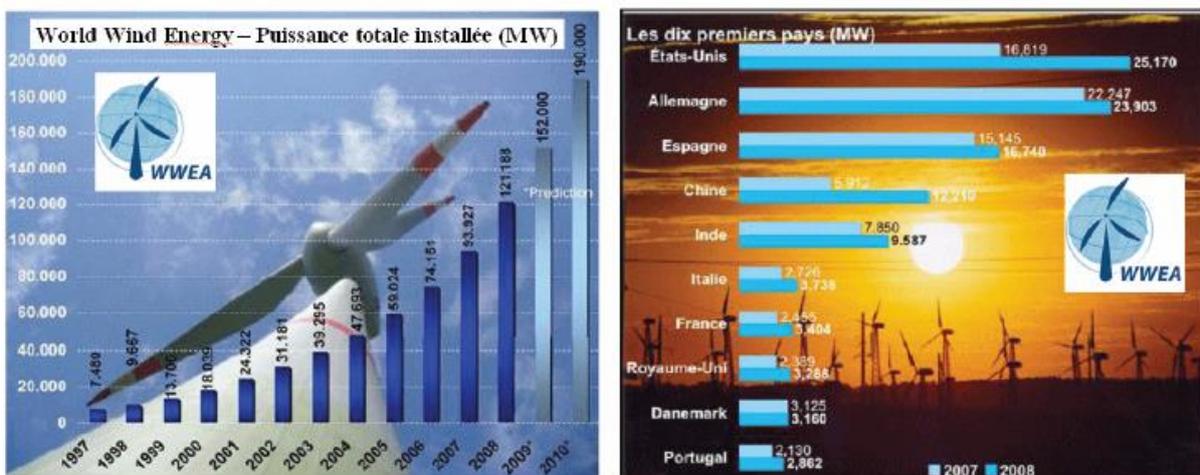


Figure II.1 : Développement de l'énergie d'éolienne dans le monde [3].

II.1 Définition de l'énergie éolienne

L'éolienne est un dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, les éoliennes elles sont généralement utilisés pour produire de l'électricité et entre dans la catégorie des systèmes d'énergies renouvelables.

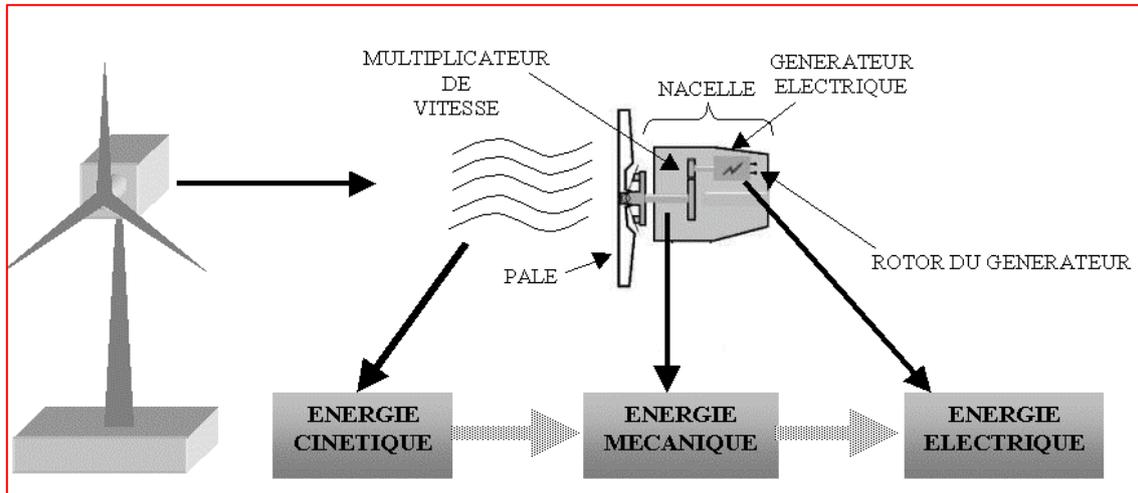


Figure II.2: Principe de conversion de l'énergie dans une éolienne [4].

II.2 Les différents types d'éoliennes :

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

II.2.1 Les éoliennes à axe horizontal [6]

Les éoliennes à axe horizontal ont une efficacité prouvée, elles sont globalement plus performantes que ceux à axe vertical, du moins pour les vents laminaires de grandes vitesses. Cependant, elles fonctionnent mal dans des vents instables ou de directions incertaines. Elles sont généralement plus bruyantes que les éoliennes à axe vertical. Enfin leurs pales peuvent se briser, elles posent donc un problème sécuritaire plus important que les éoliennes à axe vertical. Les éoliennes à axe horizontal classiques utilisent des profils aérodynamiques et fonctionnent grâce à la force de portance.

II.2.2 Les éoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical sont plus adaptées à une utilisation dans le milieu urbain, étant donné que leur fonctionnement est indépendant de la direction du vent, imprévisible dans cet environnement, et qu'ils sont généralement plus robustes que les éoliennes à axe horizontal et moins bruyants.



Figure II.3: Les éoliennes à axe horizontal [3].

La forme privilégiée pour les éoliennes à axe vertical, du moins pour le milieu urbain, n'est pas encore bien identifiée puisque aucun modèle ne s'est encore imposé comme étant le plus performant. On peut toutefois classer les éoliennes à axe vertical en deux familles des éoliennes, le type Darrieus et le type Savonius.

II.2.2.1 Le type Darrieus

Les éoliennes de type Darrieus sont constitués de deux ou trois pales à profils aérodynamiques, et fonctionnent sur la force de portance. Les pales peuvent être droites, tropskein ou hélicoïdales (Figure II.4).

II.2.2.2 Le type Savonius

Les éoliennes de type Savonius sont constitués de deux ou trois aubes, généralement en forme de demi-cylindre et fonctionnent sur la force de trainée. Elles peuvent être à pales droites, ou torsadées (Figure II.4).



(a) Éoliennes de type Darrieus

(b) Éoliennes de type Savonius.

Figure II.4: Éoliennes à axe horizontal [5].

II.3 Principe de fonctionnement des éoliennes (aérogénérateurs) :

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

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

II.3.1 Principaux Composants d'un aérogénérateur

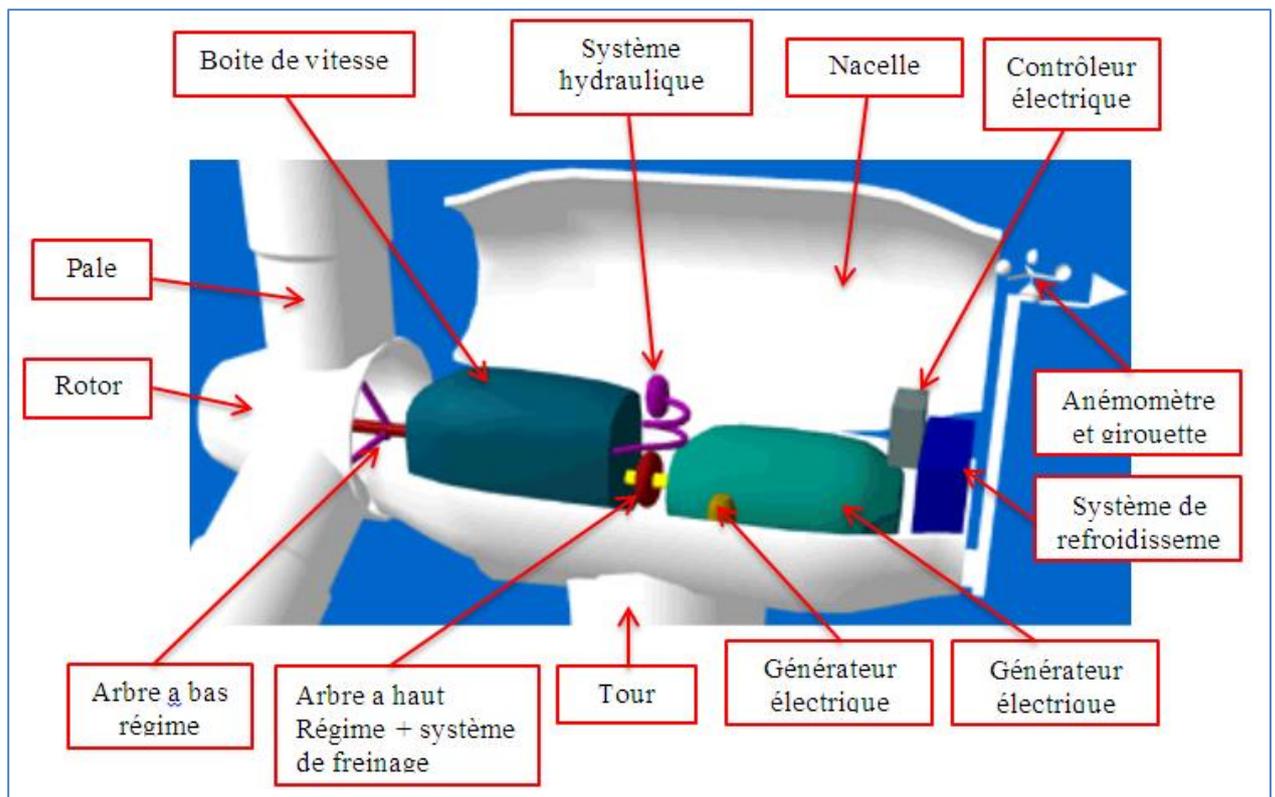


Figure II.5: Principaux composants de l'éolienne moderne [4].

- **Les pales** : sont les capteurs de l'énergie cinétique qui transmettent l'énergie au rotor
- **Le moyeu** : il est pourvu d'un système qui permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation.
- **L'arbre primaire (ou arbre lent)** : relie les pales au multiplicateur.

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

II.4 Conversion d'énergie aérodynamique en énergie électrique

Les systèmes de conversion d'énergie éolienne transforment l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique sur la turbine éolienne puis en énergie électrique via un générateur. L'énergie cinétique dE d'une colonne d'air de longueur dl , de section S , de masse volumique ρ animée d'une vitesse V_v (voir Figure I. 5) peut s'écrire sous la forme [7] :

$$dE = \frac{1}{2} \rho S dl V_v^2 \quad (\text{II.1})$$

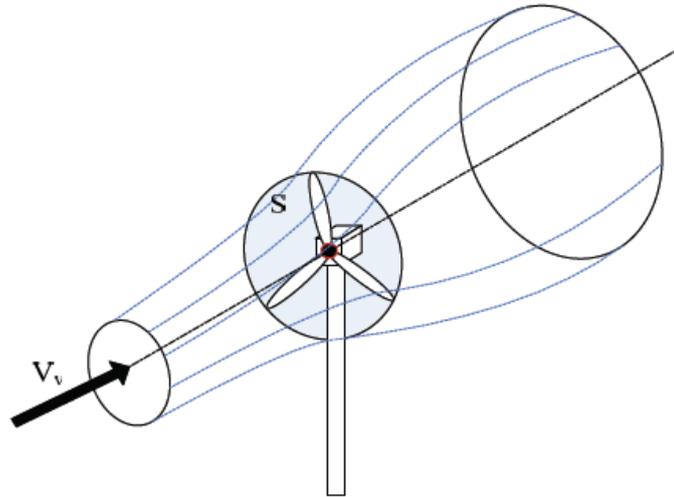


Figure II.6 : Conversion aérodynamique [3].

En supposant que $dl = V_v dt$, on tire l'expression de la puissance P de la masse d'air traversant la section S et se déplaçant à la vitesse V_v :

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

En réalité, la puissance récupérée par une voilure éolienne est seulement un pourcentage de cette puissance. Pour cela, nous allons présenter des notions fondamentales sur la conversion aérodynamique dans les parties suivantes.

II.4.1 Le coefficient de vitesse réduite

Le coefficient de vitesse réduite λ est un facteur spécifique des aérogénérateurs, il est défini comme le rapport de la vitesse tangentielle en bout de pales ΩR_v sur la vitesse instantanée du vent V_v (voir Figure II.6). Alors :

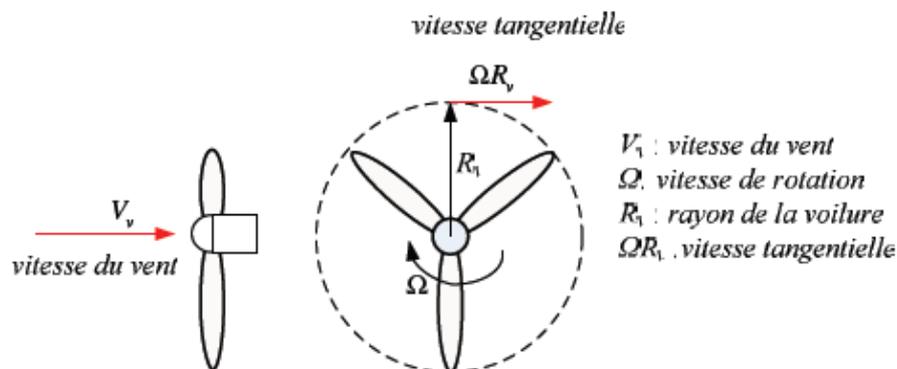


Figure II.7 : Vitesse du vent V_v et vitesse tangentielle (ΩR_v) [3].

II.4.2 Le coefficient de puissance

Comme nous l'avons souligné précédemment, on ne peut pas capter en totalité la puissance P fournie par la masse d'air incidente sur le rotor, cela supposerait une vitesse de vent nulle après l'organe capteur. On définit alors le coefficient de puissance comme suit :

$$C_p = \frac{P_{\text{éol}}}{P} = \frac{P_{\text{éol}}}{\frac{1}{2}\rho S V_v^3} \quad (\text{II.3})$$

$P_{\text{éol}}$: Puissance captée par la turbine éolienne (W)

S : Surface balayée par la turbine éolienne (m^2)

ρ : Masse volumique de l'air (kg/m^3), dont la valeur dépend de la hauteur de la turbine.

Ainsi, la puissance éolienne est déterminée analytiquement par la formule suivante :

$$P_{\text{éol}} = \frac{1}{2}\rho C_p S V_v^3 \quad (\text{II.4})$$

Le coefficient C_p est une grandeur variable en fonction de λ , la valeur maximale théorique possible de ce coefficient est appelée limite de Betz qui vaut $\frac{16}{27} \approx 0.5926$ [8]. Le coefficient de puissance pour chaque type de turbine est représenté sur la Figure II.7.

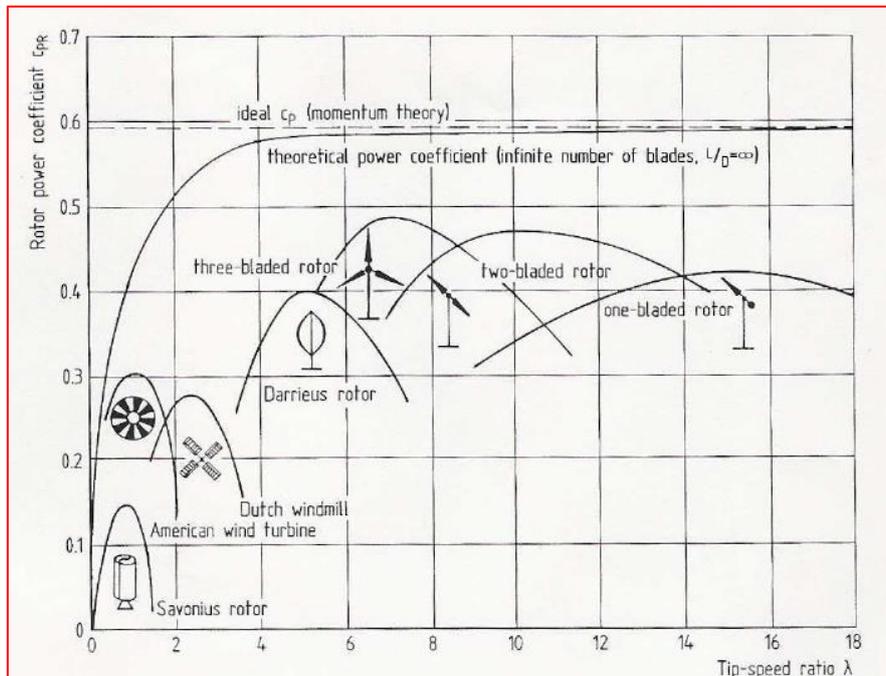


Figure II.8 : Coefficients de puissance en fonction de la vitesse normalisée λ pour différents types de turbine [9].

II.4.3 Le coefficient de couple

Le coefficient de couple est étroitement lié au facteur de puissance pour calculer la valeur du couple produit pour différents points de fonctionnement notamment à vitesse de rotation Ω nulle. En effet, au démarrage, il y a bien un couple sur l'arbre dû à la force du vent sur les pales tandis que la puissance produite est nulle, ce qui correspond à une valeur de C_p nulle. L'expression du couple est la suivante :

$$C_{\acute{e}ol} = \frac{P_{\acute{e}ol}}{\Omega} = \frac{R_v P_{\acute{e}ol}}{\lambda} = \frac{C_p}{\lambda} \frac{1}{2} \rho \pi R_v^3 V_v^2 \quad (\text{II.5})$$

Le coefficient de couple C_T est déterminé par l'expression suivante :

$$C_T = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{C_{\acute{e}ol}}{\frac{1}{2} \rho \pi R_v^3 V_v^2} \quad (\text{II.6})$$

Le coefficient C_T s'exprime, comme le coefficient C_p , en fonction de la vitesse du vent V_v et de la vitesse de rotation de la turbine, donc en fonction du ratio de vitesse λ .

II.5 Gisement éolien en Algérie :

En ce qui concerne l'Algérie, la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et climat très diversifié. En effet, notre vaste pays se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes. Le nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200 km et un relief montagneux, représenté par deux chaînes de l'atlas telien et l'atlas saharien. Entre elles, s'intercalent des plaines et des hauts plateaux caractérisés par des climats continentaux. Le sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien. Le sud algérien est caractérisé par des vitesses plus élevées que le nord, plus particulièrement le sud-ouest avec des vitesses supérieures à 4m/s et qui dépassent la valeur de 6m/s dans la région d'Adrar. Concernant le nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est relativement faibles. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El kheiter ainsi que dans la région délimitée par Bejaia au nord et Biskra au sud [10].

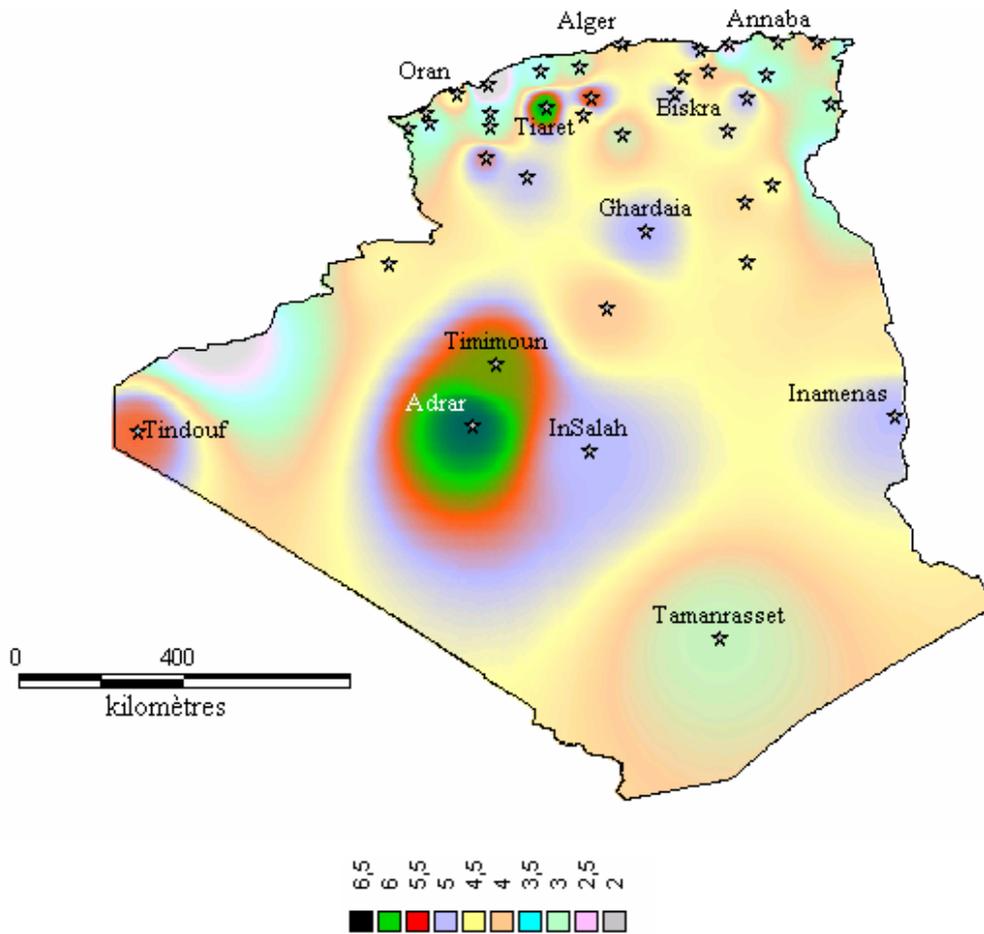


Figure II.9 : Atlas de la vitesse moyenne du vent de l’Algérie estimée à 10 m du sol [6].

II.6 Distribution de la vitesse du vent

La connaissance de la loi de distribution de la vitesse du vent est importante pour de nombreuses applications de l’énergie éolienne. Divers modèles de distribution statistique, notamment le modèle log-normal, la distribution gaussienne bivariante ont été appliqués pour caractériser la distribution de probabilité de la vitesse moyenne du vent. Toutefois, le modèle le plus utilisé est celui de la distribution de Weibull qui semble le plus approprié pour la représentation des propriétés statistiques du vent [5]. La distribution de Weibull est un cas particulier de la loi de distribution Gamma généralisée. La fonction de la densité de probabilité de Weibull représente la probabilité $p(x)$ d’avoir une vitesse du vent x pendant une période, comme le montre l’expression suivante :

$$p(x) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{x}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{c}\right)^k\right] \tag{II.7}$$

Où :

c : Facteur d'échelle et k : Facteur de forme

Cette expression est valable pour $k > 1$, $x \geq 0$ et $c > 0$. Le facteur de forme k est spécifié par l'utilisateur. D'une façon générale le facteur de forme est compris entre 1 et 3. Pour une vitesse moyenne du vent donnée, un faible facteur de forme indique que la distribution des vitesses du vent est relativement large de part et d'autre de la moyenne, alors qu'un facteur de forme élevé indique que la distribution des vitesses du vent est relativement étroite de part et d'autre de la moyenne. Pour une vitesse moyenne du vent donnée, un faible facteur de forme conduira normalement à une production d'énergie plus élevée.

II.7 Avantages et Inconvénients de l'énergie éolienne

b) Avantages :

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie :

- L'énergie éolienne n'est non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire est ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie.
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires.
- Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en ligne dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut en plus stimuler et impulser l'économie locale, notamment dans les zones rurales, désertiques et arides.
- C'est l'énergie la moins chère à grande échelle entre les énergies renouvelables [10].
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unités d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle.
- Les frais de fonctionnement sont assez limités étant donné le haut niveau de fiabilité et la simplicité relative des technologies mises en œuvre.

- Techniquement au point, les éoliennes sont rentables dans les régions bien ventées.
- La période de haute productivité, située souvent en hiver où les vents sont plus forts, correspond à la période de l'année où la demande d'énergie est la plus importante.
- L'énergie éolienne ne nuit pas aux pratiques agricoles et favorise la restauration des terres agricoles.

b) Inconvénients

- L'électricité éolienne est une énergie intermittente. C'est une des raisons qui, historiquement, a fondé le remplacement des moulins par des machines à vapeur pour la meunerie, le pompage, etc.
- Étant donné que le stockage de l'électricité en grandes quantités (de l'ordre du MWh) est encore très difficile et coûteux à mettre en place.
- l'énergie éolienne ne peut être utilisée que comme énergie d'appoint et ne pourra jamais subvenir à elle seule aux besoins en électricité (existants même en l'absence de vent).

Bibliographie de chapitre II

- [1] T. Ackermann., L. Söder., Overview of Wind Energy-Status 2002, Renewable and Sustainably Energy Reviews, 2002, Vol. 6, pp. 67-128.
- [2] H. CAMBLONG., Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable, Thèse du doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Centre de bordeaux, France, 2003.
- [3] D-H. TRAN. Conception Optimale Intégrée d'une chaîne éolienne « passive » : Analyse de robustesse, validation expérimentale. Doctorat de l'université de Toulouse, le 27 septembre 2010.
- [4] M. LEFRANC. H. MIKKELSEN. Conception d'éoliennes. Projet de fin d'études d'INSA de Strasbourg. Juin 2008.
- [5] A. ABDELLI « Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive » thèse de doctorat à l'institut national polytechnique de Toulouse ,2007.
- [6] H. BELGHITRI. Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride Éolien-Photovoltaïque. Magister de l'université Abu-Bakr Belkaid de Tlemcen 2010.
- [7] Martine O. L. Hansen, "Aerodynamics of Wind Turbines", Second edition published by Earthscan in the UK and USA, 2008.
- [8] G. L. Johnson, "Wind energy systems", Electronic Edition, December, 2001.
- [9] M. LOPEZ. «Contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée» Thèse de Doctorat de l'université Paris-Sud 11, France.
- [10] L. AICHE-HAMAE.A.KHELLAF. « Evolution mensuelle de la ressource éolienne à travers l'Algérie » congrès sur le photovoltaïque et l'énergie éolienne (IPCWE) Tlemcen, Algérie (Novembre2003).
- [11] C. BOURILLON, Wind Energy-Clean Power for Generations, Renewable Energy 1999, vol. 16, pp. 948 – 953.

**CHAPITRE III : MODÉLISATION GÉOMÉTRIQUE
DU KIT HYBRIDE SOUS SOLIDWORKS 2013**

Introduction

Le suivi du fil de l'évolution des logiciels de conception et des dessins assistés par ordinateur CAO et DAO constitue une véritable aide à la conception. La conception d'un objet physique est vue dans cette chapitre d'abord comme un processus d'élaboration de contraintes, sachant que toute propriété peut se traduire par des contraintes. La conception devient alors un processus de satisfaction de contraintes géométriques. Cependant, l'objectif de ce chapitre est de montrer que le concept de contraintes est indispensable pour obtenir ce véritable outil de conception des pièces de kit hybride, basé sur un modèle géométrique de connaissances qui devient de plus en plus performant.

III.1 Présentation du logiciel SolidWorks

SolidWorks (SW) est un logiciel 3D mécanique Conception Assistée par Ordinateur (MCAO) développé par (SW) Corporation des États-Unis. C'est un logiciel commercial largement utilisé dans la modélisation et de la conception des systèmes mécaniques assistée par ordinateur. Il est basé sur la définition paramétrique des composants et fonctionnalités et peut être utilisé d'une manière très intuitive. Contrairement à d'autres outils de modélisation 3D, (SW) n'est pas entièrement en trois dimensions, qui est, on dessine dans un plan et ensuite extrude solides par rapport au plan qui est utilisé pour obtenir la position dans l'espace 3D. (SW) est une fonction très innovante qui permet la conception facile des pièces complexes. Il accepte les formats IGES, DXF, STEP, DWG, ASC et les autres normes de données et peuvent facilement intégrer presque tous les logiciels mécanique de CAO dans l'environnement de conception. Actuellement, (SW) est devenu le logiciel principal de conception 3D de la plate-forme PC. Par rapport à CAO traditionnelle, (SW) peut modifier et compléter les pièces physiques dans l'environnement des assemblages, où la fonction montage intelligent permet de modifier et d'ajuste automatiquement une pièce à l'emplacement approprié pour améliorer l'efficacité de conception. Ainsi, (SW) semble le plus puissant que les autres logiciels commerciaux lors de la conception d'assemblages à grande échelle portant sur plus de dix mille éléments. En outre, (SW) a beaucoup d'autres outils qui rendent la vie des ingénieurs et des chercheurs concepteurs très simple. Par conséquent, la simulation visuelle dynamique peut être réalisée facilement avec (SW). Tous ces avantages ont contribué et motivé le choix de ce logiciel pour modéliser géométriquement le kit hybride Photovoltaïque-Éolien.

III.2 Application

On se propose de faire la conception d'un kit hybride en esquisse de tous les composants, après faire l'assemblage jusqu'au modèle final et vérification et simulation d'animation de la partie active en mouvement. Les figures suivantes illustrent cette idée.

III.2.1 Modélisation géométrique de partie éolienne

L'éolienne (Figure III.1), récupère une partie de l'énergie cinétique de la masse d'air en mouvement, la transforme en énergie mécanique par l'intermédiaire des demi-cylindres, accouplés à un rotor, puis en énergie électrique grâce à une génératrice de 500W. L'éolienne est composée en trois parties, une partie fixe constituant le mât circulaire de 7 m de hauteur et de diamètre de 0.1m et kit d'insertion du mât, la deuxième partie : générateur assemblé, tige caudale et aileron caudal et troisième partie tournante composée par le rotor de diamètre 1m et multiplicateur (train planétaire).



Figure III.1 : Éolienne à axe horizontale WHISPER (MODELE Whisper 100)

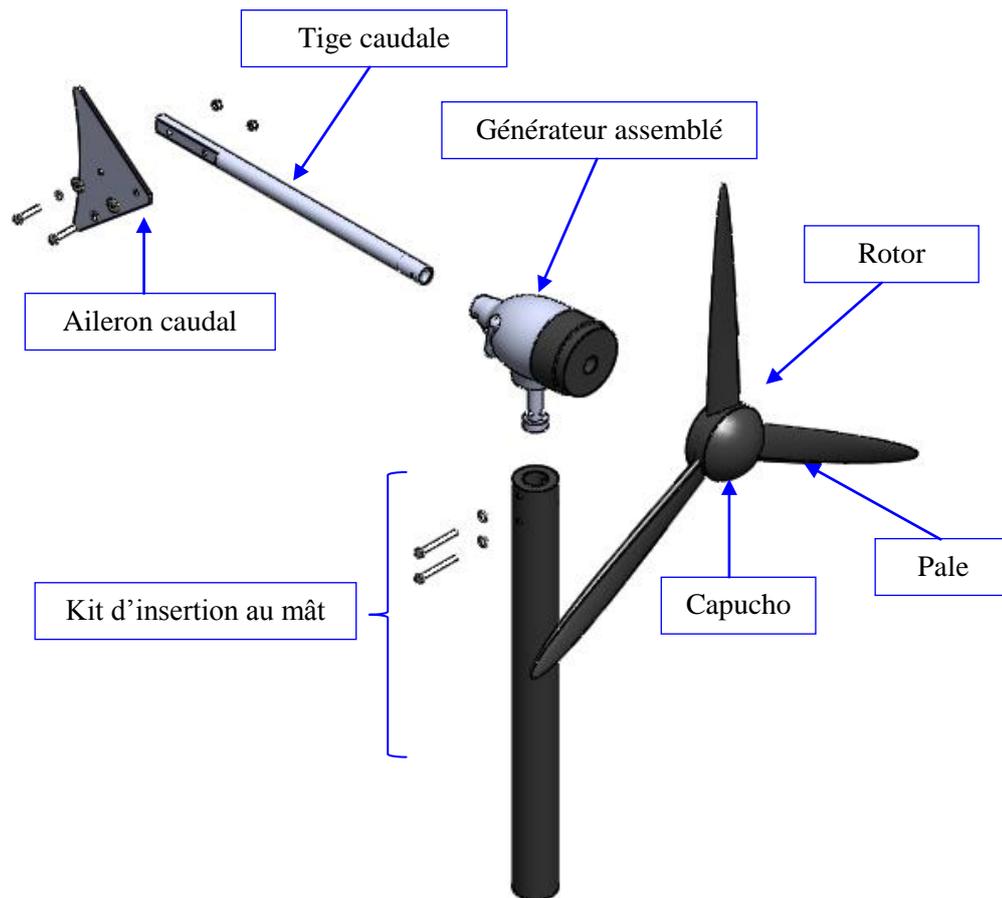


Figure III.2 : Forme éclaté de l'éolienne.

Tableau III.1 : Nomenclature de l'éolienne.

Rép.N°.	Description	Qté
1	Générateur assemblé	1
2	Pales	3
3	Aileron caudal	1
4	Tige caudale	1
5	Capuchon	1
6	Kit d'insertion au mât	1
7	Sac de quincaillerie	1
8	Contrôleur Whisper (si inclus dans la commande)	1
9	Fusible de 100 A	1

III.2.2 Modélisation géométrique de partie photovoltaïque

Pendant les périodes non ventées, La partie photovoltaïque (Figure IV.2) peuvent couvrir votre consommation d'énergie renouvelable. Les panneaux solaires PV (photovoltaïques) fournissent de l'électricité directement à partir de la lumière solaire. La partie photovoltaïque comporte deux panneaux photovoltaïques (STP080S-12/12Bb) de dimensions Ep30x54x1195mm et armoire électrique.

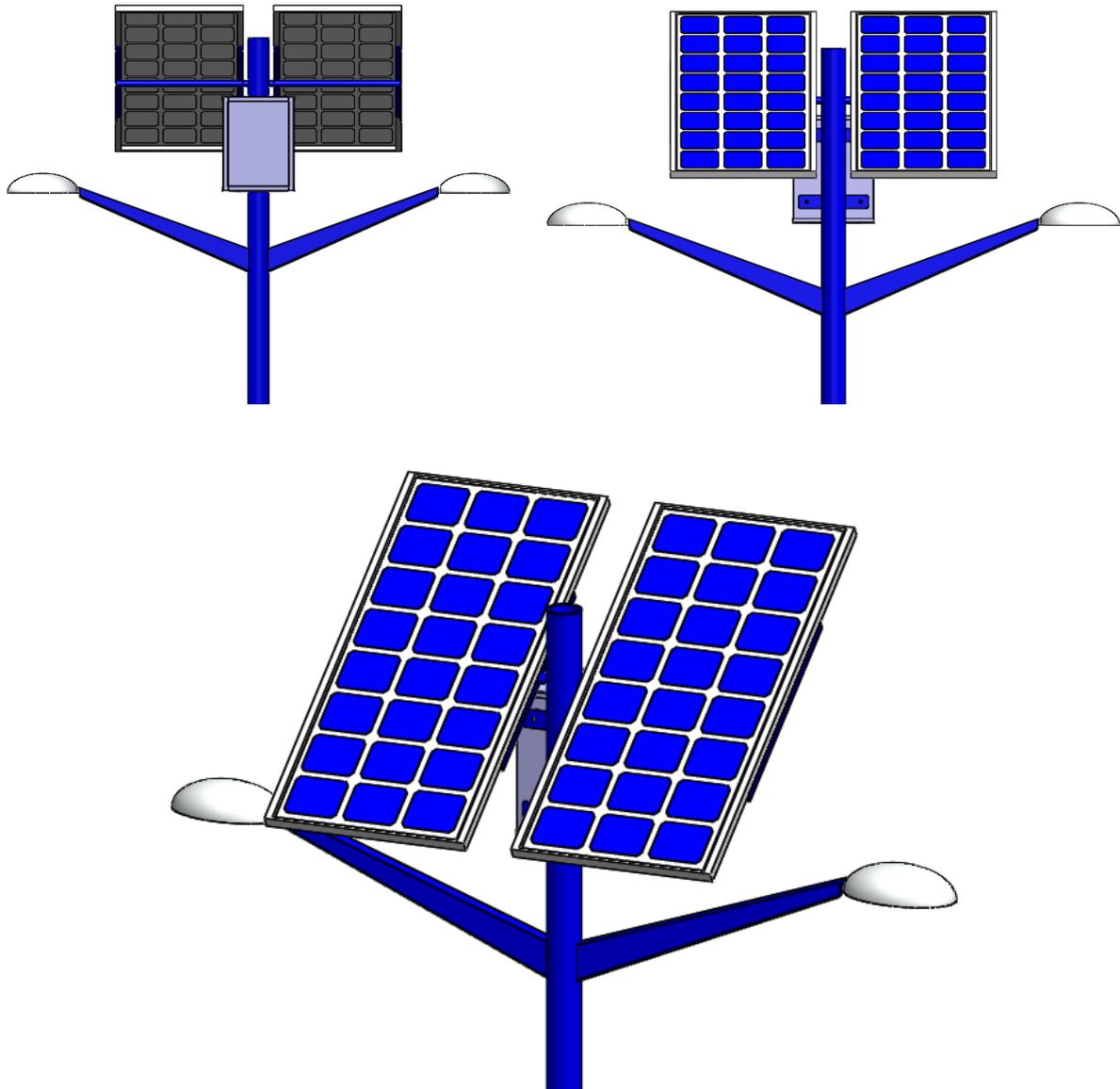


Figure III.3 : Partie photovoltaïque.

III.2.3 Modélisation géométrique de la structure

La structure de kit hybride (Figure III.1) constituant le mât circulaire de 7 m de hauteur et de diamètre de 0.1m, support de fixation les panneaux photovoltaïques, deux lampes solaire et fondation.

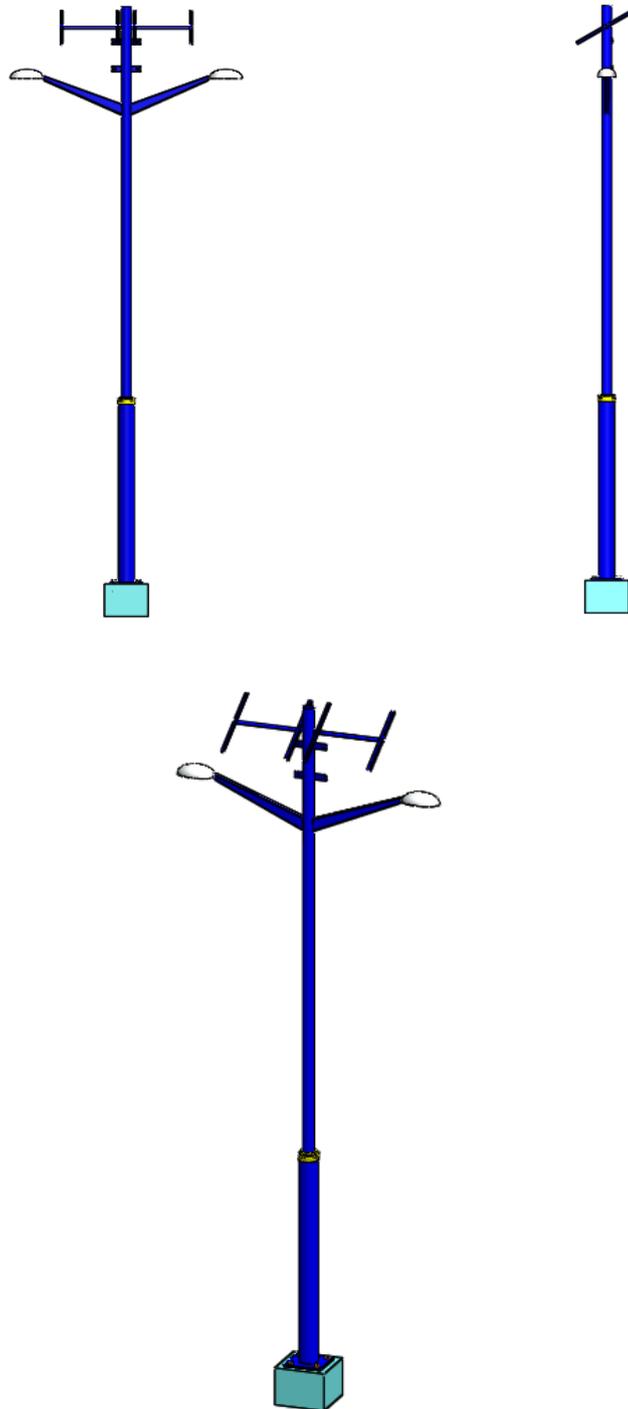


Figure III.4 : Structure du kit hybride.

Enfin on arrive à construire un kit hybride PV/Éolien

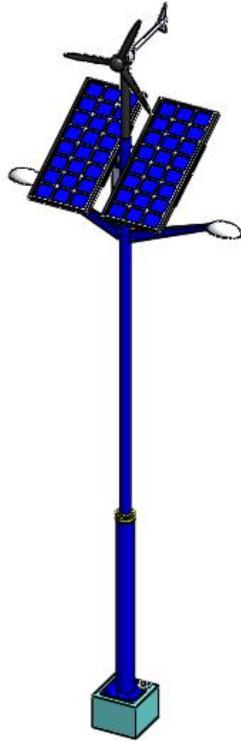


Figure III.5 : Modélisation géométrique du kit hybride sous SolidWorks –Vue Isométrique –

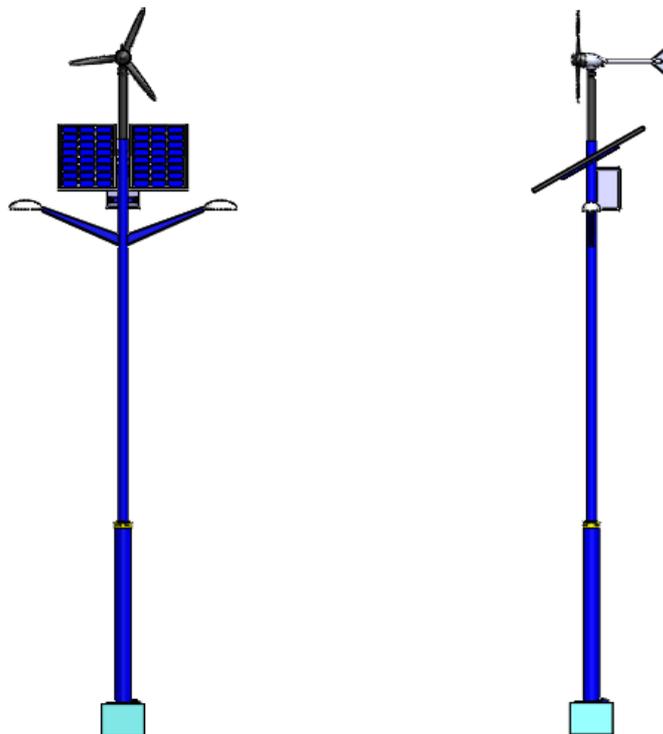


Figure III.6:Modélisation géométrique du kit hybride sous SolidWorks–Vue Face & Droite –

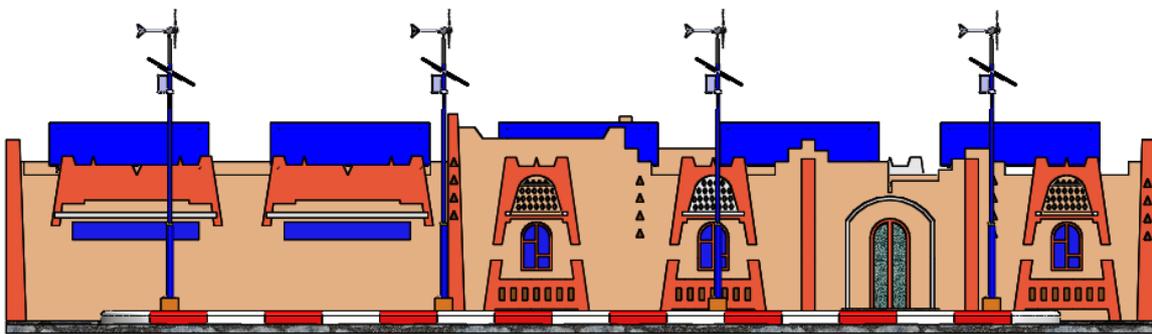
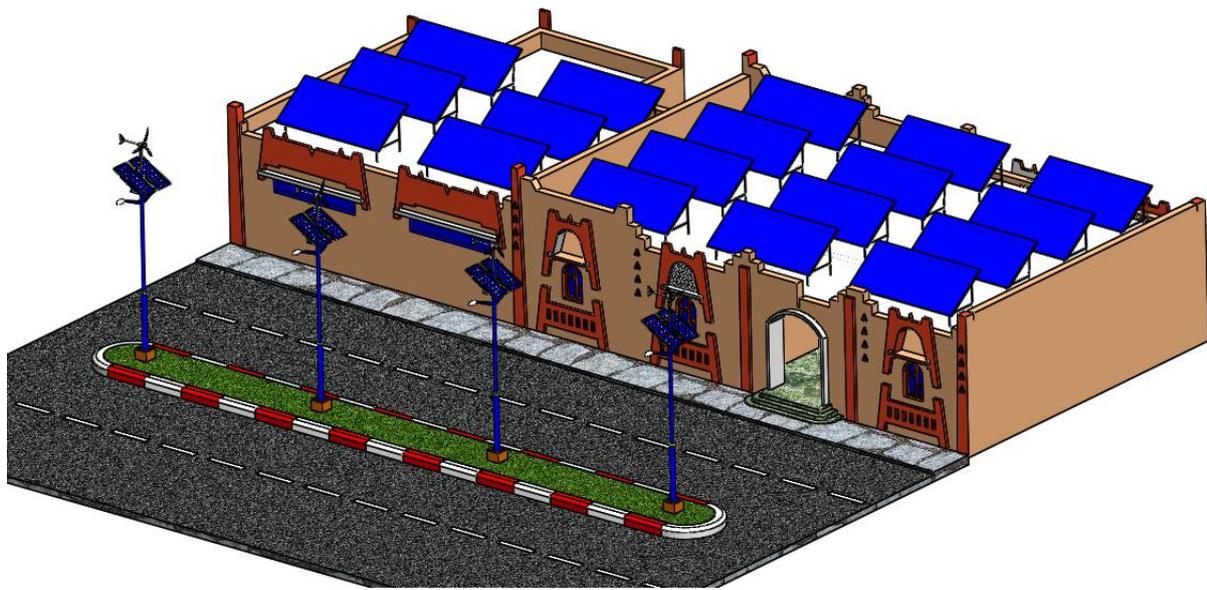


Figure III.7: Kit hybride Éolien/Photovoltaïque

Conclusion

Le présent chapitre a permis de donner les formes géométriques réelles des pièces, des assemblages ou des parties de pièces libres constituant le kit hybride Photovoltaïque-Éolien. Il est ainsi mis en exergue l'importance de la modélisation géométrique et les capacités du logiciel.

Bibliographie Chapitre III

- [1] F. FERROUDJI. & C. KHÉLIFI. « Modélisation Statique 3D d'un Aérogénérateur Savonius par SolidWorks et COSMOSWorks» 2ème International Conference on Energy and Sustainable Development ICESD'13. Université Africaine d'Adrar. 19-20 February 2013.
- [2] F. FERROUDJI. « Étude des vibrations forcées dans une scie mécanique à bande », thèse de magister de l'université de Batna, Juin 2008.
- [3] Manuel de l'utilisateur. « Éoliennes Whisper- Modèle Whisper 100 ». SOUTHWEST WINDPOWER.20 Février 2006.
- [4] R. Alex. « SolidWorks 2010: No experience required ».Wiley Publishing, Inc. Canada 2010.
- [5] <http://www.solidworks.com>.
- [6] http://www.solidworks.com/swworld_2010_motion_manager

**CHAPITRE IV : MODÉLISATION D'UN KIT
D'ÉCLAIRAGE HYBRIDE PHOTOVOLTAÏQUE
ÉOLIEN AVEC STOCKAGE ÉLECTROCHIMIQUE**

Introduction

Les régions sahariennes de l'Algérie de 428000 km² de surface, recèlent d'importants gisements solaires et éoliens, caractérisés par des énergies qui dépassent les 6.5 kWh/m²/j sur plan incliné, et un potentiel éolien qui dépasse les 3.7 kWh/m²/j sur site d'Adrar Figure IV.1

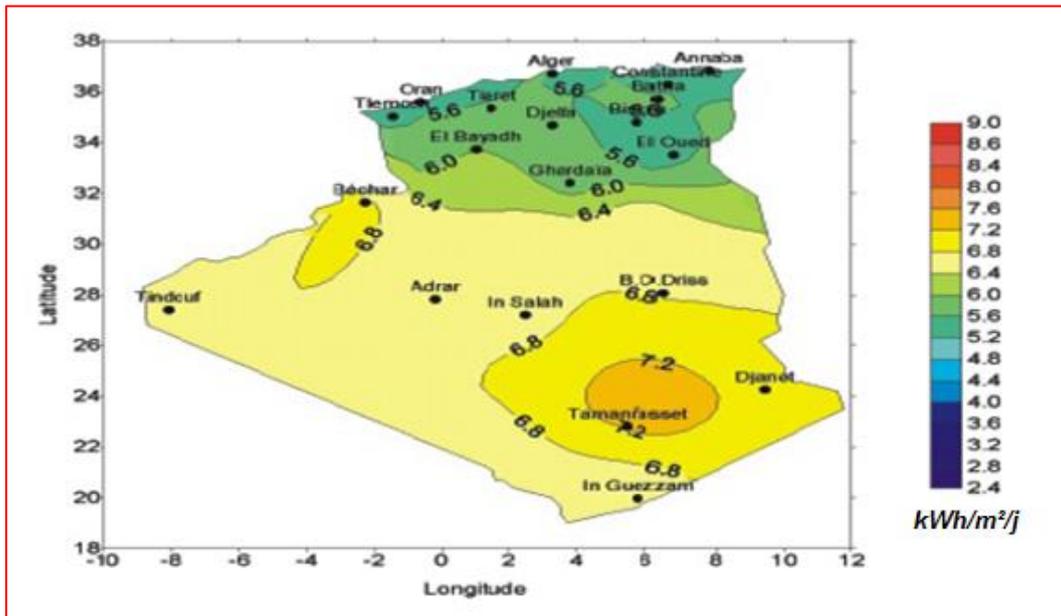


Figure IV.1 : Irradiation solaire globale moyenne annuelle journalier sur plan incliné à la latitude en Algérie.

Ces caprices de la nature encouragent fortement le développement et l'installation des systèmes solaires à grande échelle l'éclairage pour désenclaver les régions sahariennes isolés et contribuer à la réduction de la pollution de l'environnement en conciliation avec le développement durable. Ainsi, l'éclairage des espaces de plaisance représente non seulement une exigence de lumière et de sécurité mais aussi une satisfaction émotionnelle des traditions dans ces régions durant les périodes de chaleur. Des kits solaires hybrides photovoltaïques éoliens avec un stockage batterie bien dimensionnés selon un facteur de satisfaction acceptable permettent d'assumer le service souhaité des citoyens en éclairage, en balisage, en signalisation routière, télécommunication publique, ...etc. avec des coûts compétitifs.

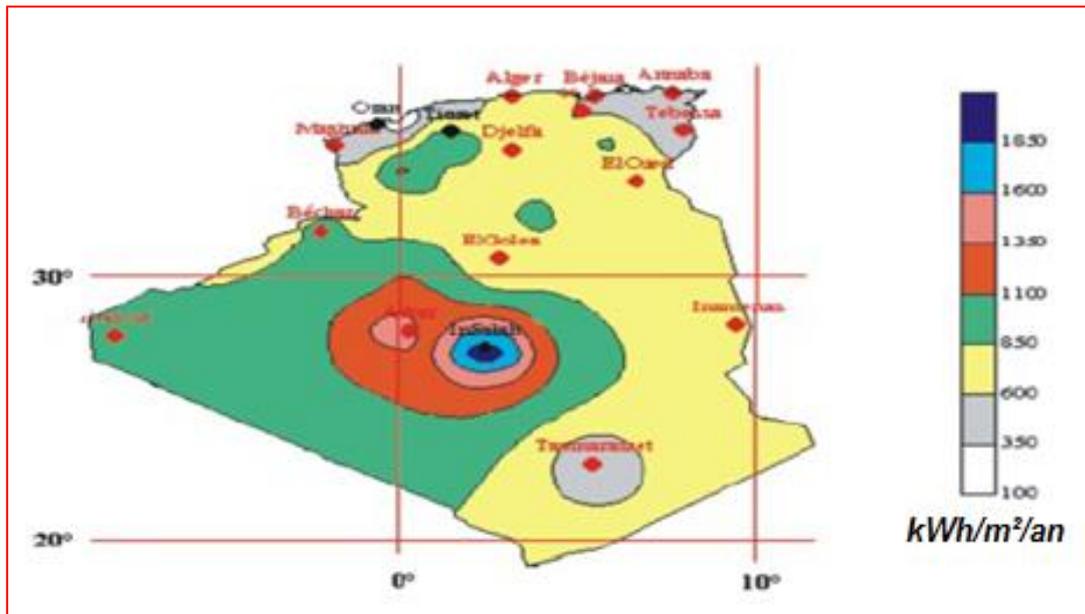


Figure IV.2 : Puissance éolienne moyenne annuelle récupérable à en Algérie 10 m du sol.

IV.1 Modèle du système hybride PV / Eolien avec stockage batteries

Les kits solaires Figure IV.3 sont des dispositifs de puissance de capacité variable selon les besoins énergétiques (mis en site isolé caravane...etc.). Cependant la modélisation d'un système hybride photovoltaïque éolien avec batteries de stockage est cruciale pour décrire comprendre et optimiser les performances énergétiques du système.

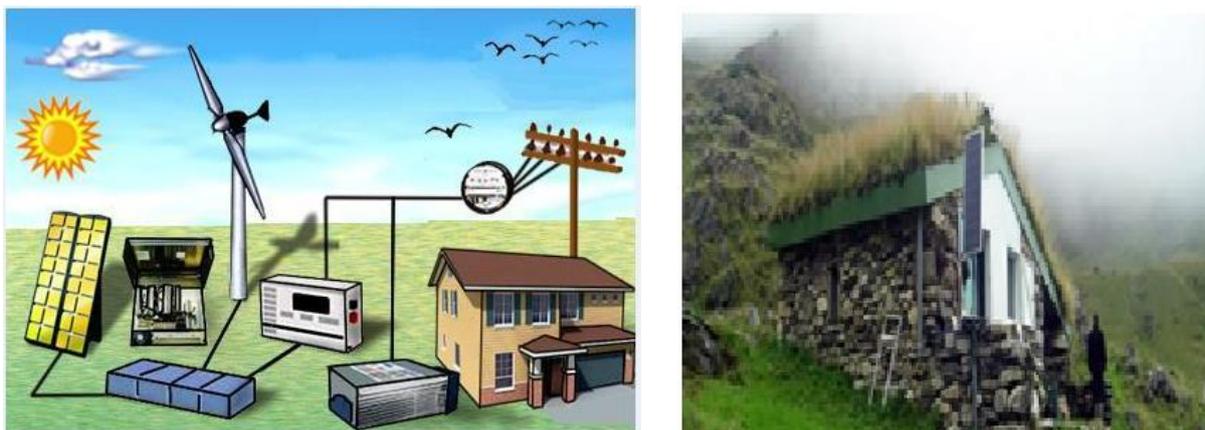


Figure IV.3: Kits solaires hybrides.

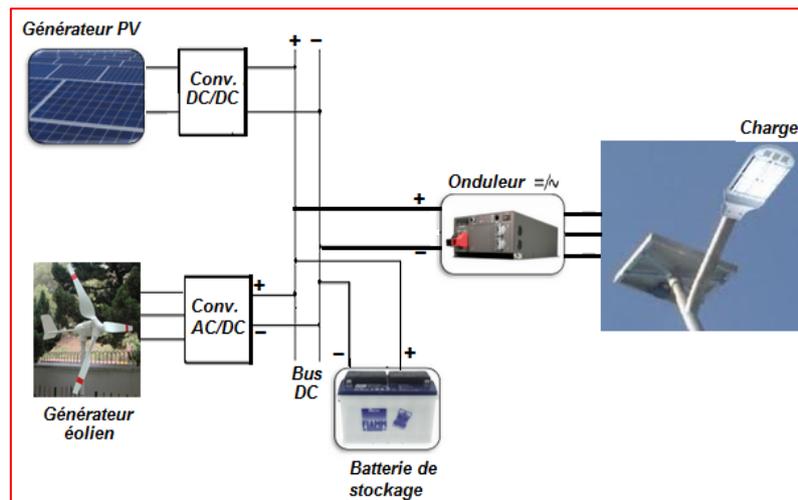


Figure IV.4: Système hybride photovoltaïque éolien avec stockage batteries.

IV.2 Modèle du Générateur Photovoltaïque

La prédiction des performances d'un générateur photovoltaïque GPV nécessite l'élaboration d'un modèle mathématique permettant l'étude de son fonctionnement pour les différentes conditions météorologiques (éclairage, température, etc.). ainsi, de nombreux travaux portent sur le développement des modèles mathématiques pour la simulation de la caractéristique courant-tension (I, V) du générateur PV [1]-[2], d'autres sont orientés vers la modélisation des performances des modules PV en terme de puissance électrique produite via la recherche du point de puissance maximale MPPT (Maximum Power Point Tracking). Toutefois la puissance maximale du générateur PV devient un objectif important dans la modélisation et l'estimation des performances des systèmes PV. La puissance produite par un générateur est exprimée en fonction du rendement de conversion η_{pv} [..], de la surface de captation A_{pv} [m^2] et de l'éclairement solaire incident sur le plan d'ouverture I_{β} [W/m^2] en [3]-[4].

$$P_{pv} = \eta_{ph} A_{ph} I_{\beta} = \eta_{dc/dc} \eta_m F_p A_{pv} I_{\beta} \quad (IV.1)$$

rendement de conversion η_c rendement de conversion DC/DC et F_p facteur des pertes $\eta_{dc/dc}$.

Le rendement de conversion du module PV est donné en fonction du rendement de conversion sous des conditions standards $\eta_{stc}(25^{\circ}C, 1000W/m^2)$, de la température T_c cellule et du coefficient de variation du rendement α , admis constant pour les cellules fabriquées en silicium [3] par l'expression

$$\eta_c = \eta_{stc} [1 - \alpha(T_c - 25)] \quad (IV.2)$$

La température cellule peut être modélisée par l'expression :

$$T_c = T_{amb} + \frac{I_\beta}{800} (NOCT - 20) \quad (IV.3)$$

(Normal Operating Cell Temperature) est la température de fonctionnement du module en *NOCT* circuit ouvert sous un éclairement de 800 W/m² et une température ambiante de 20°C sous une vitesse du vent de 1m/s. la température cellule peut poser parfois plusieurs problèmes liés au choix de la position des modules PV , des dispositions et des manières d'effectuer ces mesures. Le rayonnement solaire pose des problèmes moindres. La température ambiante et la vitesse du vent influe fortement sur la caractéristique du module. L'éclairement solaire sur la surface du module sous ciel claire peut être estimé par le modèle bien connu de Liu et Jordan (1963). Ce modèle est basé sur l'hypothèse de la répartition isotropique du rayonnement diffus provenant du ciel (luminance du ciel constante en tout point) [5]-[6]. Le rayonnement solaire global incident sur un plan incliné d'un angle β par rapport à l'horizontal I_β représente la somme de trois composantes : directe $I_{b\beta}$, diffuse $I_{d\beta}$ et réfléchi par le sol $I_{r\beta}$:

$$I_\beta = I_{b\beta} + I_{d\beta} + I_{r\beta} \quad (IV.4)$$

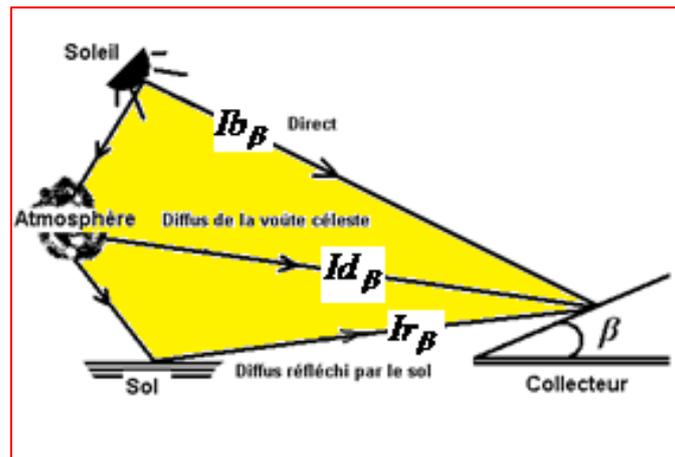


Figure IV.5: Composantes du rayonnement solaire sur plan incliné.

IV.3 Modèle du Générateur Eolien

La puissance de sortie d'un aérogénérateur est donnée en général par l'expression :

$$P_{GE} = \frac{1}{2} \eta \rho A_{eol} V^3 = \frac{1}{2} (C_p \eta_m \eta_G) \rho A_{eol} V^3 \quad (IV.5)$$

$C_p \eta_m \eta_G$: sont respectivement le rendement aérodynamique, le rendement du multiplicateur de vitesse et le rendement du générateur électrique.

V, ρ, A_{eol} : sont respectivement la vitesse du vent, la densité de l'air (0.225 kg/m^3) et la surface balayée par le rotor.

Des efforts considérables ont été déployés de part le monde pour modéliser la puissance produite par un aérogénérateur en fonction de la vitesse de vent pour l'estimation des performances avant l'achat du système ou l'établissement des méthodes de tests pour la validation des modèles numériques [7-10].

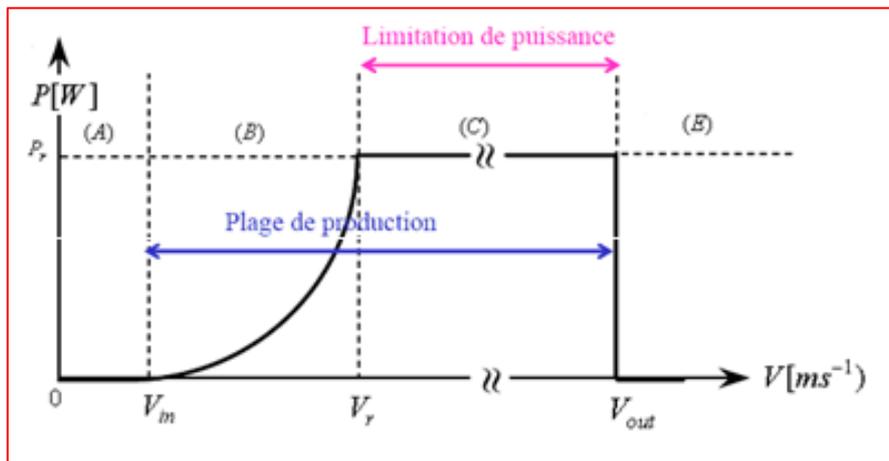


Figure IV.6: Puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent [11].

Ces modèles peuvent être linéaires, quadratiques ou cubiques qui sont inspirés essentiellement du modèle polynomial général de Powell.

$$P_{GE} = P_{nom} \frac{V^{Cte} - V_{in}^{Cte}}{V_{nom}^{Cte} - V_{in}^{Cte}} \quad (IV.6)$$

V_{in} est la vitesse de démarrage de production nette de puissance de l'éolienne et V_{nom} est la vitesse nominale. P_{nom} est la puissance nominale.

La dérivation du rendement global de l'éolienne par rapport à la vitesse du vent permet de déterminer la vitesse de conception optimale de l'aérogénérateur :

$$\left. \frac{d\eta}{dV} \right|_{V_d} = 0 \Rightarrow V_d = \left(\frac{3}{3-Cte} \right)^{\frac{1}{Cte}} V_{in} \quad (IV.7)$$

Sur la figure 3 pour $Cte = 1$, on retrouve le modèle linéaire ; pour $Cte \geq 3$, l'équation n'a pas de solutions réelles et par conséquent il n'est y'à pas de valeur de V_d , ceci est du au fait que la courbe correspondante est plus raide que la courbe idéale.

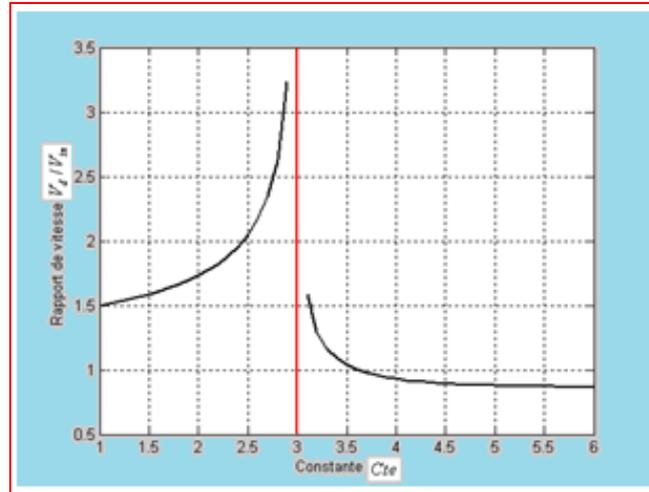


Figure IV.7: Influence de l'exposant (Cte) sur la vitesse de design de l'éolienne.

La puissance nominale produite par la machine est déduite sous la forme :

$$P_{nom} = \frac{3}{cte} \left(1 - \frac{cte}{3}\right)^{1 - \frac{3}{cte}} \eta \frac{1}{2} \rho A V_{in}^3 \left(\frac{V_{nom}^{cte}}{V_{in}^{cte}} - 1\right) \quad (IV.8)$$

IV.4 Modèle de la disponibilité énergétique éolienne

La caractéristique du vent la plus importante et adéquate à employer dans l'éolien est la distribution statistique de Weibull [12]. Elle modélise avec succès la probabilité de l'occurrence des vitesses du vent. Cette répartition est définie par la fonction de distribution cumulée $F(V)$ et la densité de probabilité $f(V)$ sous la forme :

$$f(V) = \frac{dF}{dV} = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp - \left(\frac{V}{c}\right)^k \quad (IV.9)$$

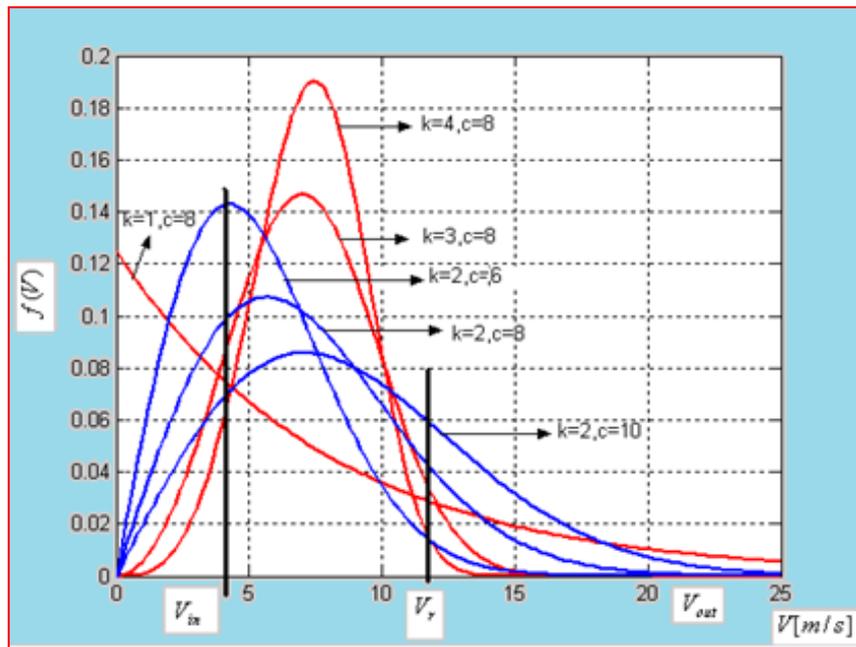


Figure IV.8: Répartition statistique de Weibull de la vitesse du vent.

Avec k facteur de forme sans dimension mesurant la symétrie de la distribution du vent et c [m/s] facteur d'échelle caractérisant la vitesse moyenne du vent. La distribution de Rayleigh est une forme simplifiée de la distribution de Weibull pour $k = 2$, suffisamment précise pour un modèle de régime du vent typique. La vitesse moyenne du vent sur site \bar{V} est définie comme étant l'espérance mathématique de la distribution des vitesses.

$$\bar{V} = \int_0^{\infty} V f(V) dV \quad (IV.10)$$

Cette vitesse peut s'exprimer facilement après deux changements de variable en utilisant la fonction Gamma sous la forme :

$$\bar{V} = c \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) = cG \quad (IV.11)$$

En effectuant le changement de variable $X = \frac{V}{c}$ et en substituant l'éq. (18) dans (16) on écrit :

$$f(X) = \frac{k}{v} X^{k-1} G \exp(-GX^k) \quad (IV.12)$$

L'énergie produite sur une période T par une éolienne de courbe de puissance $P_{GE}(V)$ s'écrit:

$$E_{GE} = T \int_0^{\infty} P_{GE}(V) f(V) dV = T \int_{0V_{in}}^{V_{nom}} P_{GE}(V) f(V) dV + TP_{nom} \int_{V_{nom}}^{V_{out}} f(V) dV \quad (IV.13)$$

$$P_{GE}(V) = \eta_{max} \frac{1}{2} \rho A V^3 = \eta_{max} \frac{1}{2} \rho A \bar{V}^3 X^3 = P_{max} X^3 \quad (IV.14)$$

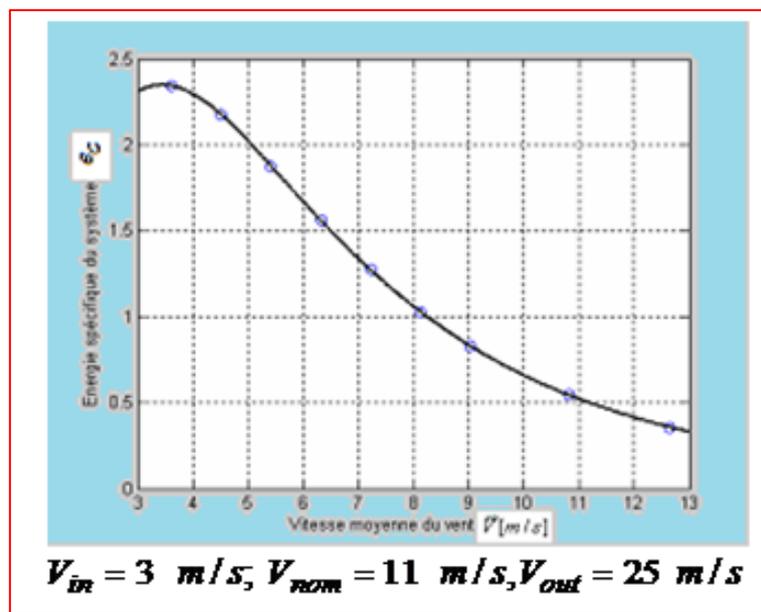


Figure IV.9: Disponibilité énergétique de l'aérogénérateur.

La définition d'un nombre adimensionnel mesurant l'énergie spécifique du système e_{sys} extractible réellement du vent donne :

$$e_{sys} = \frac{E_{GE}}{P_{nom}T} = Gk \int_{X_{in}}^{X_{nom}} X^{k+2} \exp(-GX^k) dX + X_{nom}^3 [\exp(-GX_{nom}^k) - \exp(-GX_{out}^k)] \quad (IV.15)$$

La méthode numérique de Gauss permet de calculer cette intégrale normalisée.

Le facteur spécifique de puissance de l'éolienne montre que la production éolienne est inversement proportionnelle à la disponibilité énergétique cependant, la conception optimale du système exige la réalisation d'un compromis entre la production et la disponibilité.

IV.5 Modèle de la Batterie de Stockage

En régime quasi permanent, la capacité de batterie à chaque instant $(t+1)$, est exprimée en fonction de sa capacité à l'état précédent à l'instant t , selon l'énergie produite et l'énergie consommée pendant cette période marquant la charge et la décharge de la batterie. Pendant la charge, quand la consommation devient supérieure à l'énergie produite par les deux générateurs PV et éolien, la batterie commence à se décharger. Sinon la batterie est en processus de charge. Ainsi la capacité et le courant de décharge de la batterie à l'instant $(t+1)$ peuvent être décrits par les équations suivantes [12]-[13]:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{bat}(t+1) = (1 - \tau)C_{bat}(t) \pm \left[P_{pv}(t+1) + P_{GE}(t+1)\eta_{red}(t+1) - \frac{P_{ch}(t+1)}{\eta_{ond}(t+1)} \right] \eta_{bat}\Delta t \\ C_{bat}^{min} \leq C_{bat}(t+1) \leq C_{bat}^{max} \\ I_{ch}^{max} \leq \frac{1}{5}I_{bat} \end{array} \right. \quad (IV.16)$$

Le facteur d'autodécharge, $P_{ch}(t+1)$ la puissance de la charge de la batterie à l'instant actuel $\tau(t+1)$. Rendement du redresseur et $\eta_{ond}(t+1)$ rendement de l'onduleur et Δt le pas d'incrément. La protection de la batterie contre la dégradation est assurée par les conditions (Eq IV.16).

La fiabilité du système est assurée par son optimisation technique à travers la méthode des probabilités des pertes de charge (ou la méthode du taux de satisfaction du client).

$$PPC = 1 - S = \frac{\sum_{t=0}^T DE(t+1)}{\sum_{t=0}^T P_{ch}(t+1)\Delta t} \quad (IV.17)$$

DE : Déficit énergétique sur une période T .

Ce modèle permet de déterminer les différentes combinaisons (photovoltaïque, éolien et stockage) permettant de satisfaire la demande énergétique pour une PPC donnée.

IV.6 Pré-dimensionnement d'un Kit solaire

Une charge résistive constituée de quatre (04) lampes de 18 Watts (24 volts) chacune, fonctionnant avec un taux d'utilisation de 100% pendant 10 heures par nuit.

IV.6.1 Détermination de la surface du champ photovoltaïque

$$A_{pv} = \frac{E_{ch}}{E_{\beta} F_{rem} \eta_m \eta_{scp}} \quad (IV.18)$$

- Facteur de remplissage F_{rem} .
- $\eta_{scp} = \eta_{reg} \eta_{conv} \eta_{mppt} = 0.85$ Système de conditionnement de puissance.
- Rendement du régulateur η_{reg} .
- Rendement du convertisseur $\eta_{conv} = 0.9$
- Rendement du point maximum de puissance (Maximum Power Point Tracking) η_{mppt} .
- La surface de la cellule $A_{cel} = 0.00785 \text{ m}^2$.
- La surface du module $A_m = 0.2826 \text{ m}^2$.
- $\eta_m = 0.12$.

$$F_{rem} = \frac{A_{cel}}{A_m} = 0.663 \quad (IV.19)$$

La charge à satisfaire est constitué de quatre lampes à ballaste de 18 watts fonctionnant au moins dix heures par nuit :

$$E_{ch} = 4 * 18 * 10 = 720Wh$$

L'estimation de la surface du champ photovoltaïque est basée sur l'irradiation solaire moyenne annuelle incidente sur plan incliné plein sud à la latitude du lieu du site d'Adrar 27.88°Nord

$$I_{\beta} = 6500Wh/m^2/jour$$

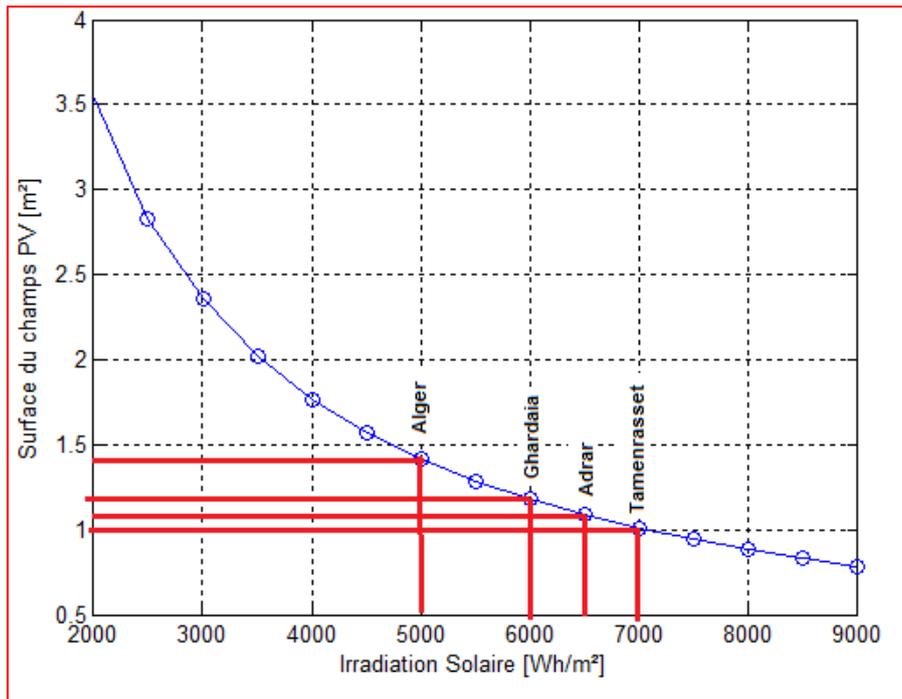


Figure IV.10: Influence de l'irradiation solaire moyenne journalière sur la surface de captation

Le nombre de modules $N_m = \frac{A_{pv}}{A_m}$

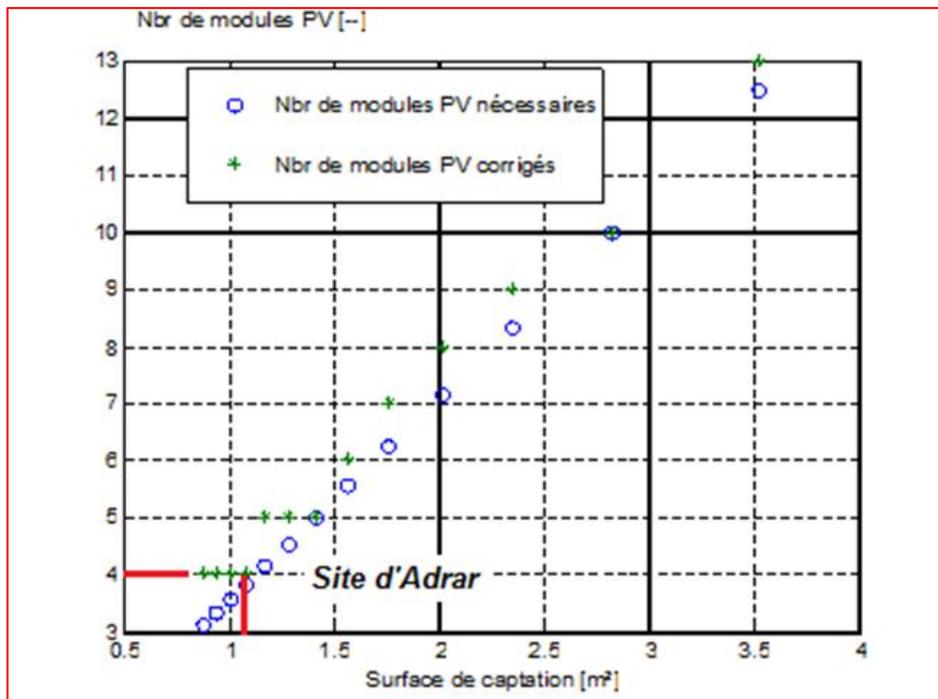


Figure IV.11: Estimation du nombre de modules en fonction de la surface du champ PV.

Estimation de la capacité de la batterie de stockage

$$C_{bat} = \frac{NE_{ch}}{U_{bat}\eta_{bat}\eta_{scpf}} \quad (IV.20)$$

$N, U_{bat}, \eta_{bat}, f$: sont le nombre de jours d'autonomie, la tension maximale.

La capacité de la batterie standardisée sur le marché est donnée par la relation :

$$C_s = \frac{C_{bat}}{F_{cb}} \quad (IV.21)$$

F_{cb} : Facture de correction de la capacité batterie.

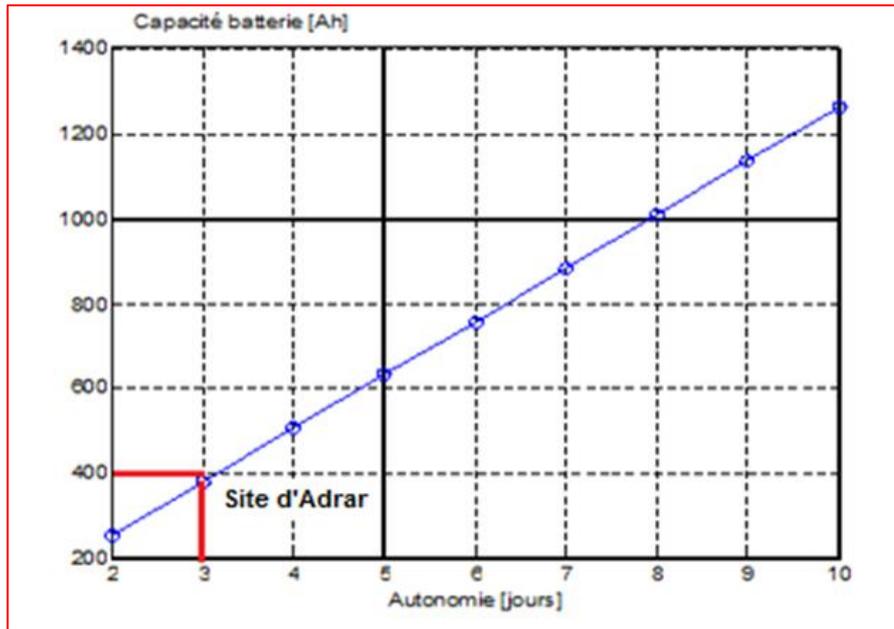


Figure IV.12: Influence de l'autonomie sur la capacité de stockage batterie.

IV.6.2 Estimation de la surface du rotor éolien pour satisfaire les besoins de la charge exprimée

$$A_{eol} = \frac{E_{ch}}{E_{eol}C_p\eta_m\eta_g} \quad (IV.22)$$

$E_{eol}[Wh/m^2]$: Énergie éolienne récupérable par jour sur site.

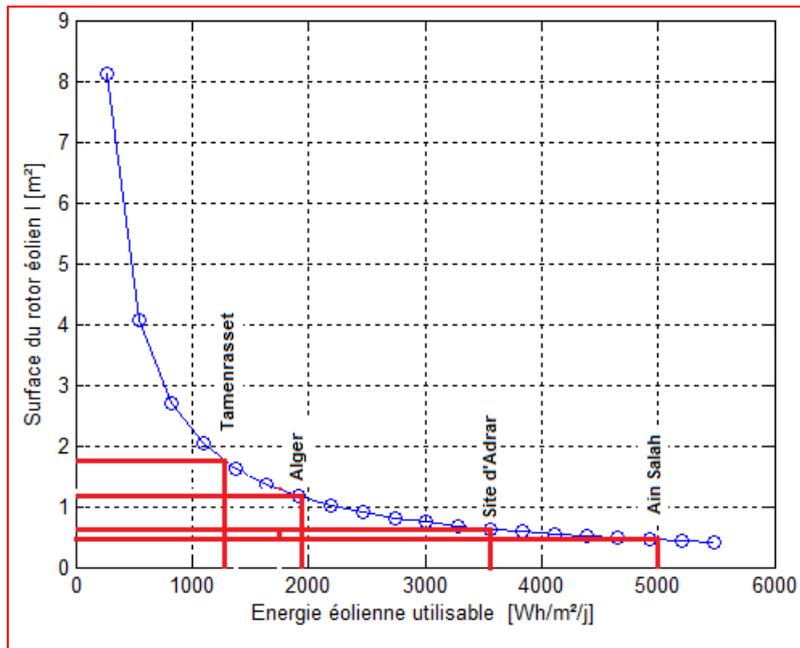


Figure IV.13: Variation de la surface de la roue éolienne selon l'énergie éolienne disponible sur site

La surface du rotor nécessaire est de 0.6 m² correspondant à un rotor de 0.8745m de diamètre

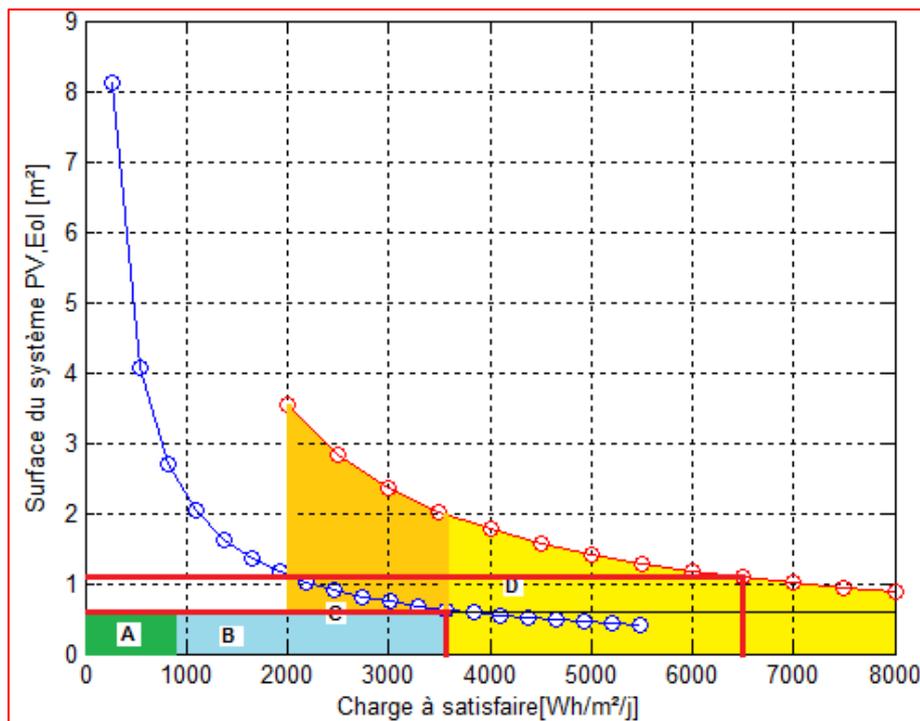


Figure IV.14: Différentes configurations énergétiques du Kit d'éclairage sur site d'Adrar.

Table 1 : Paramètre de dimensionnement du kit solaire pour satisfaire la charge de 720 Wh/nuit à Adrar.

Système photovoltaïque			Système éolien		Système de stockage		
E_{β}	A_{pv}	N_m	E_{eol}	A_{eol}	N	C_b	N_{bat} 200Ah
2000	3.5294	12.4891	0.2740	8.1111	2	252,1	2
2500	2.8235	9.9913	0.6575	3.3796	3	378,2	2
3000	2.3529	8.3260	1.0411	2.1345	4	504,2	3
3500	2.0168	7.1366	1.4247	1.5598	5	630,3	4
4000	1.7647	6.2445	1.8082	1.2290	6	756,3	4
4500	1.5686	5.5507	2.1918	1.0139	7	882,4	5
5000	1.4118	4.9956	2.5753	0.8629	8	1008,4	6
5500	1.2834	4.5415	2.9589	0.7510	9	1134,5	6
6000	1.1765	4.1630	3.3425	0.6648	10	1260,5	7
6500	1.0860	3.8428	3.7260	0.5964	11	1386,6	7
7000	1.0084	3.5683	4.1096	0.5407	12	1512,6	8
7500	0.9412	3.3304	4.4932	0.4946	13	1638,7	9
8000	0.8824	3.1223	4.8767	0.4557	14	1764,7	9
			5.2603	0.4225			

La (figure IV.14), montre que le site d'Adrar dispose d'une énergie éolienne moyenne de 3.7 kW/m²/jour, et d'une énergie solaire de 6.5 kW/m²/jour. Ainsi, le système éolien permet de satisfaire seul largement la demande énergétique des cartes lampes d'éclairage de 720 Wh/Nuit indiquée par la couleur verte.

Pour des énergies éoliennes récupérables entre 2 et 3.7 kWh/m²/j, la charge peut être satisfaite soit par le système éolien seul soit par le système photovoltaïque seul soit par la combinaison des deux systèmes et l'excès d'énergie produite est stocké dans la batterie. Ainsi, le système photovoltaïque peut jouer le rôle du système de référence et le système éolien constitue le système d'appoint. Pour des énergies récupérables supérieures à 3.7 kWh/m²/j, seul le système de référence satisfait la charge et l'excès est stocké dans la batterie.

Conclusion :

La taille du système éolien ou photovoltaïque est fortement influencée par les potentiels éoliens et solaires. Ainsi la charge d'éclairage indiquée dans cette étude est pratiquement toujours satisfaite sur sites sahariens en général et le site d'Adrar en particulier selon les bases de données antérieures. Le site d'Adrar est caractérisé par un ciel clair au cours de l'année avec un indice de clarté dépassant les 70%. Cependant une autonomie de 2 à 3 jours est largement suffisante pour couvrir la demande énergétique en réduisant la capacité batterie et par conséquent le cout global du système.

Bibliographie de chapitre IV

- [1] W. De Soto, S.A. Klein and W.A. Beckman. Improvement and validation of a model for PV array performance. *Solar Energy* 2006; 80(1): 78-88.
- [2] A. Celik, N. Acikgoz. Modelling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline PV modules using four- and five-parameter models. *Applied Energy* 2007; 84(1): 1-15.
- [3] B.D. Shakya, Lu Aye, P. Musgrave. Technical feasibility and financial analysis of hybrid wind/PV system with hydrogen storage for Cooma. *International Journal of Hydrogen Energy* 2005; 30: 9-20.
- [4] M.K. Deshmukh, S.S. Deshmukh. Modeling of hybrid renewable energy systems. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 2008; 12: 235-249.
- [5] Duffie J. and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Process*, pp73-101, Ed. Jhon Wiley & Sons USA 1991.
- [6] D.G. Erbs, S.A. Klein and J.A. Duffie, Estimation of the Diffuse Radiation Fraction for Hourly, Daily and Montly-Average Global Radiation, *Solar Energy*, Vol 28, n°4, pp. 293-302, 1982.
- [7] Powel, W. R «An Analytical Expression for the Average Output Power of a Wind Machine», *Solar Energy*, 26, pp 77-80. 1981.
- [8] Sathyajith & K.P. Pandey «Modelling the Integrated Output of Mechanical Wind Pump». *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 122 (2000).
- [9] Paul Gipe, *Le grand livre de l'éolien* : © Le moniteur, 31^e janvier 2007.
- [10] D. Le Gourrières, *Energie éolienne, théorie, conception et calcul pratique des installations*. Eyrolles 2008. Version révisée et améliorée.

- [11] Danish Wind Industry Association. <http://www.windpower.org>.
- [12] N. KASBADJI. MERZOUK « Evaluation du gisement énergétique éolien: contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent » Thèse doctorale 2006.
- [13] B.S. Borowy, Z.M. Salameh. Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and PV array in a wind/PV hybrid system. IEEE Transactions on Energy Conversion 1996; 11(2): 367-375.
- [14] Stand Alone PV System. A Hand Book of Recommended Design Practice. PV Design assistance Center Sandia National Laboratories Albuquerque, New Mexico, 1995.
- [15] O. MARTIN. L. HANSEN « Aerodynamics of Wind Turbine ». Second edition, Earthscan USA 2008.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSIONS GÉNÉRALE

Cette étude a permis de mieux connaître l'état de l'art d'un système hybride photovoltaïque éolien avec stockage batteries et mieux comprendre la méthodologie de sa conception et de son dimensionnement. D'une part : le dessin de définition et la conception assistée par ordinateur sous l'environnement du logiciel de D.A.O. & C.A.O. "SOLIDWORKS 2013" ainsi que l'étude de mouvement par le module "MOTIONWORKS" de l'ensemble du kit hybride constitué de plus 60 pièces mécaniques différentes à l'échelle réelle est réalisé. Le système est conçu, fabriqué et monté judicieusement de façon à assurer un fonctionnement optimal avec une fiabilité élevée.

De l'autre part : l'étude de dimensionnement des différents composants du kit hybride, destiné à l'éclairage public dans la wilaya d'Adrar par quatre lampes de 18 Watts chacune durant 10 heures de fonctionnement montre que la charge d'éclairage indiquée dans cette étude est pratiquement toujours satisfaite sur les sites sahariens en général et sur le site d'Adrar en particulier selon les bases de données antérieures sur les potentiels solaires et éoliens. Il est communément admis que le site d'Adrar est caractérisé par une durée d'insolation moyenne qui dépasse les dix heures par jour et d'un ciel clair marqué par un indice de clarté qui dépasse les 70% au cours de l'année. Cependant une autonomie de 2 à 3 jours semble largement suffisante pour couvrir la demande énergétique et limiter la taille du système et par conséquent son coût global.

Perspectives

Cette approche de dimensionnement, de modélisation et de simulation d'un système hybride photovoltaïque-éolien avec stockage batterie d'éclairage, semble très utile pour la maîtrise de la conversion éolienne et photovoltaïque. Elle constitue la base pour approfondir la recherche dans cette thématique en particulier sur les techniques de conditionnement de puissance, l'adaptation de la charge à la caractéristique optimale du système photovoltaïque ou faire un compromis entre la production et la disponibilité pour le système éolien, le contrôle non destructif du système, la fiabilité du système... pour le développement des régions sahariennes en matière d'éclairage, de télécommunication, balisage,...

Résumé

L'énergie renouvelable photovoltaïque et éolienne représente aujourd'hui une solution attractive prometteuse pour l'approvisionnement en énergie des sites isolés notamment pour l'éclairage, le balisage la télécommunication public, les relais hertziens... Toutefois, l'utilisation de cette ressource renouvelable doit spécifier le degré de fiabilité attendu (la probabilité de perte de charge PPC). La conception optimale d'un système photovoltaïque satisfaisant cette contrainte exige d'envisager des prévisions précises à partir de simulations complexes nécessitant une base de données riche (supérieure à dix ans) et des moyens de calcul importants pour optimiser la fonction objective choisie. Cependant, la procédure consiste à la combinaison de la surface du système avec la capacité batterie pour une PPC donnée (adaptation de la disponibilité énergétique au profil de la charge). En revanche, la seconde solution est une méthode de design approximative conduisant souvent à un surdimensionnement du système. Néanmoins, cette méthode est plus rapide et moins coûteuse. L'objectif de notre travail consiste à décrire, à comprendre et à optimiser un kit hybride photovoltaïque éolien modulaire avec stockage batteries, destiné à l'éclairage public dans la wilaya d'Adrar.

Toutefois, ce travail a permis d'une part : de mieux maîtriser la modélisation géométrique d'un kit hybride et la simulation du mouvement de l'éolienne par les logiciels (SolidWorks et MotionWorks 2013) et de l'autre part de comprendre le fonctionnement des différentes composantes du système hybride et la méthodologie à suivre pour décrire leur comportement énergétique sur les sites sahariennes en général et le site d'Adrar en particulier afin de satisfaire la demande énergétique et assurer l'autonomie nécessaire.