

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de Technologie
Département de Génie Mécanique



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de Master en : Energétique
Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Energétique
Thème

**modélisation d'un système d'alimentation autonome
éolien –photovoltaïque.**

Présenté Par :

1) Mr.Bouhadjela Abderrahim

Devant le jury composé de :

Dr. Amirat Mohamed	Pr	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
Dr. Bounif Abdelhamid	Pr	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examineur
Dr. Nehari Driss	Pr	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant
Dr. Remlaoui Ahmed	M A B	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Co-Encadrant

Année Universitaire 2021/2022

Dédicace

A mes chères parents - sœurs et frères pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral.

A toute ma famille et mes amis pour leur soutien tout aulong de mon parcours universitaire,
Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible.

Merci d'être toujours là pour moi.

Remerciement

Avant toute chose, je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donnée courage, Patience et force durant toutes ces années d'étude.

Je voudrais dans un premier temps remercier, mon directeur de mémoire mr driss nhari, professeur à l'université d'ain temouchent , pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je me ferais un agréable devoir de remercier mon encadreur dr REMLAOUI Ahmed., pour m'avoir dirigé ce travail de recherche et m'avoir fait bénéficier de son expérience et de ses précieux conseils.

Je remercie tous mes amis et toutes les personnes qui m'ont soutenu durant ces années de recherche. Sans eux, le travail accompli n'aurait pas la même saveur.

Mes sincères gratitude s'adresse à ma famille sans leurs encouragements permanents et leur soutien moral je ne serais parvenue là où je suis.

الملخص :

يسير العالم في الوقت الحالي الي التخلي عن الطاقات الملوثة كالطاقة النووية و الطاقات الاستخراجية من بترول و غاز و ذلك من خلال استغلال الطاقات المتجددة ، من بين هاته الطاقات الشائعة . طاقة الرياح . التي تعتمد بشكل أساسي على سرعة الرياح التي تحول وفق نظام تحويل الي استطاعة كهربائية قابلة للاستغلال هذا التحويل يتم بواسطة ما يسمى بالمولد المتزامن بالمغناطيس الدائم الذي يقوم باستقبال استطاعة ميكانيكية و تحويلها لاستطاعة كهربائية .هاته الأخيرة هي ناتجة عن تحويل الاستطاعة الحركية بواسطة العنفة الهوائية النظام مزود ببطاريات لغرض تخزين الطاقة الكهربائية. و كذلك الطاقة الشمسية الكهروضوئية و التي هي شكل من أشكال الطاقة المتجددة التي تجعل من الممكن إنتاج الكهرباء عن طريق تحويل جزء من الإشعاع الشمسي عبر الوحدات الكهروضوئية. يمكن بعد ذلك حقن هذه الكهرباء في الشبكات الكهربائية أو استهلاكها محليًا.

Résumé :

Le monde s'oriente à l'heure actuelle vers l'abandon des énergies polluantes comme l'énergie nucléaire et des énergies extractives comme le pétrole et le gaz, à travers l'exploitation des énergies renouvelables, parmi ces énergies communes. L'énergie éolienne. Qui dépend principalement de la vitesse du vent, qui est convertie selon un système de conversion en un potentiel électrique exploitable. Cette conversion est effectuée par la génératrice synchrone dite à aimants permanents, qui reçoit de l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique. Cette dernière est le résultat de la conversion de la puissance cinétique par l'éolienne. Le système est équipé de batteries dans le but de stocker l'énergie électrique.

Ainsi que l'énergie solaire photovoltaïque, qui est une forme d'énergie renouvelable qui permet de produire de l'électricité en convertissant une partie du rayonnement solaire par des unités photovoltaïques. Cette électricité peut ensuite être injectée dans les réseaux électriques ou consommée localement

Abstract :

The world is moving at the present time to abandon polluting energies such as nuclear energy and extractive energies such as oil and gas, through the exploitation of renewable energies, among these common energies. Wind energy . Which depends mainly on the wind speed, which is converted according to a conversion system into an exploitable electric potential.

This conversion is done by the so-called permanent magnet synchronous generator, which receives mechanical power and converts it to electrical power. The latter is the result of converting the kinetic power by the wind turbine. The system is equipped with batteries for the purpose of storing electrical energy. As well as solar photovoltaic energy, which is a form of renewable energy that makes it possible to produce electricity by converting part of the solar radiation through photovoltaic units. This electricity can then be injected into electrical networks or consumed locally.

LISTE DES FIGURES :

Figure I.1: Mouvement de la terre.

Figure I.2: Le rayonnement solaire.

Figure I.3: Système solaire photovoltaïque.

Figure I.4 : Structure d'un module photovoltaïque.

Figure I.5: Module PV.

Figure I.6 : Cellule photovoltaïque.

Figure I.7: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Figure I.8: Types de cellules photovoltaïques.

Figure I.9: représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque.

Figure II.10 : Caractéristiques de groupement de cellules photovoltaïque.

Figure I.11 : De la cellule au champ photovoltaïque.

Figure 1.12 : (a) moulin perse ; (b) moulin du moyen âge .

Figure 1.13: éolienne à axe horizontal.

Figure 1.14: éolienne a axe verticale.

Figure 1.15 : Constitution d'une éolienne horizontale.

Figure 1.16 : La distribution de la vitesse moyenne saisonnière du vent en Algérie à 10 m de hauteur.

Figure II.1 : système autonome

Figure II.2 : système photovoltaïque éolienne hybride

Figure II.3 : Systèmes photovoltaïque connectés au réseau

Figure II.4 : schéma explicatif du fonctionnement

Figure II.5: Evolution de la tension et du courant avec le temps durant la charge d'un élément plomb acide.

Figure II.6 : Influence de la température sur la capacité.

FigureIII.1 : l'installation réalisée par Trnsys18.

FigureIII.2 : profile de puissance.

Figure IV.1 : la variation de température, vitesse de vent , radiation

Figure IV.2 : L'état de la batterie

Figure IV.3 : L'état du panneau solaire.

Figure IV.4 : L'état du l'onduleur

Figure IV.5 : profile de puissance

Figure IV.6 : la variation de température, vitesse de vent , radiation.

Figure IV.7 : L'état de la batterie

Figure IV.8 : L'état du panneau solaire.

Figure IV.9 : L'état du l'onduleur

Figure IV.10 : puissance de la turbine

Figure IV.11 : profile de puissance

Liste des Tableaux :

Tableau II.1 : Consommation journalière d'une famille (DC)

Tableau II.2 : Consommation journalière d'une famille (AC)

Tableau II.3 : Tension de la batterie conseillée en fonction de la puissance du système PV .

Tableau II.4 : Panneau solaire AE Solar 500W monocristallin.

Tableau II.5 : Caractéristiques techniques de notre batterie .

Tableau II.6 : Caractéristiques techniques de la turbine.

Tableau III.7 : Données de puissance de sortie de l'éolienne 2kw.

Tableau III.1 : les données de WECS(type90)

Tableau III.2 : les données de PV(type103b)

Tableau III.3 : les données de régulateur(type48b).

Tableau III.4 : les données de batterie(type47a).

Sommaire

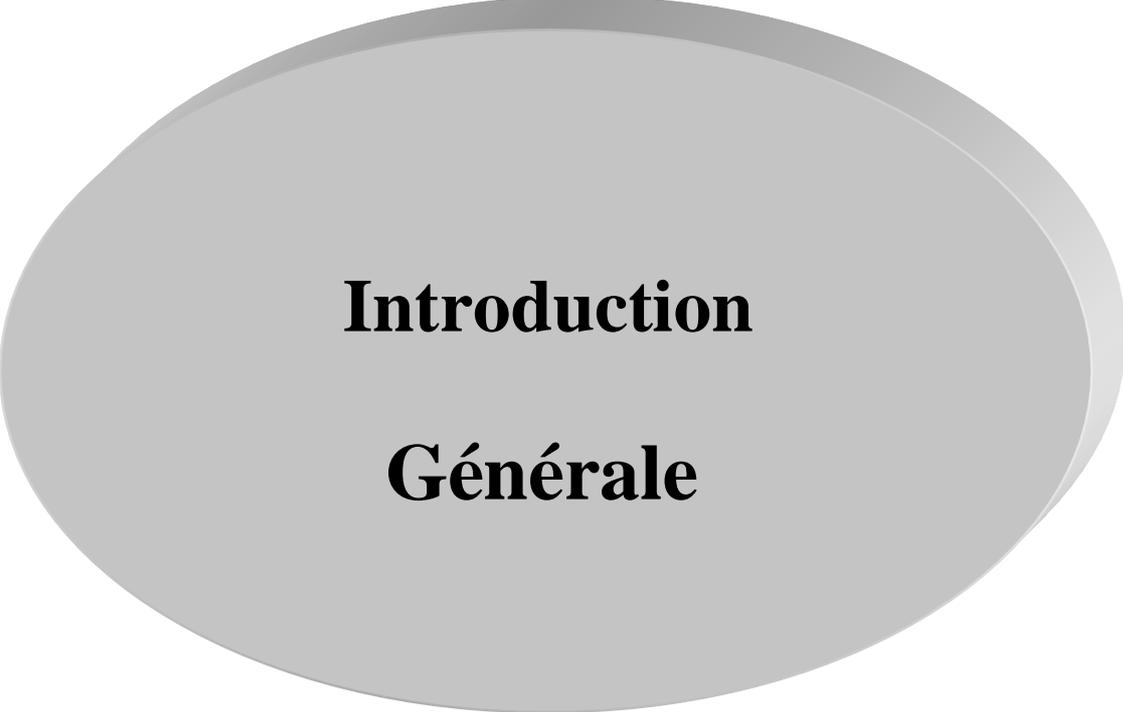
Résumé Dédicace Remerciement

Liste des figures Liste des tableaux

Introduction.....	1
Chapitre I : généralité photovoltaïque- éolienne	
Introduction.....	3
Système photovoltaïque.....	3
L'énergie solaire.....	3
Rayonnement solaire.....	3
Le rayonnement direct.....	4
Le rayonnement diffus.....	4
Le rayonnement réfléchi.....	4
Energie solaire photovoltaïque.....	4
L'effet photovoltaïque.....	5
Historique : Découverte de l'effet photovoltaïque.....	6
Quelques notions relatives à un système photovoltaïque.....	6
Les éléments d'un système photovoltaïque.....	7
Les modules photovoltaïques.....	7
Stockage.....	8
Batterie.....	8
Influence des différents paramètres.....	9
Paramètres externes.....	9
Régulateur.....	9
Principe de son fonctionnement.....	10
La cellule photovoltaïque.....	10
Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	11
Fabrication des cellules photovoltaïques.....	11
Les différents types de cellules.....	11
Les cellules à silicium monocristallin.....	12
Les cellules à silicium poly-cristallin.....	12
Les cellules amorphes.....	12
Les cellules multi-jonctions.....	12
Les cellules organiques.....	12
Principe de fonctionnement d'une cellule.....	13
La jonction PN.....	13
Comportement de la jonction PN utilisée comme capteur PV.....	14
Les différents types de pertes dans une cellule solaire.....	14
Les pertes extrinsèques.....	15
Les pertes intrinsèques.....	15
Le rendement des cellules solaires.....	15
Pourquoi le rendement est-il limité?.....	15
Les principales raisons pour lesquelles une cellule solaire ne donne pas des.....	15
performances idéales sont.....	16
Comment augmenter le rendement des cellules solaires.....	16
De la cellule au champ photovoltaïque.....	16

Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	17
Avantages du photovoltaïque.....	17
Inconvénients du photovoltaïque	18
Système éolienne.....	19
introduction	19
évolution historique de l'énergie eolienne.....	19
definition de l'énergie eolienne.....	21
les differents types d'eoliennes	21
Les éoliennes à axe vertical	22
Les éoliennes à axe horizontal	23
Principe de l'éolienne verticale	23
principe de fonctionnement	23
composition d'une éolienne	24
Fondation	25
La tour.....	25
Rotor	25
La nacelle	25
l'énergie eolienne en algerie	26
Potentiel éolien en Algérie.....	27
Les avantages et les inconvénients d'énergie éolienne	30
Avantages de l'éolien	30
Inconvénients de l'éolien	30
Conclusion	31
ChapitreII : Dimensionnement photovoltaïque- éolienne	
Introduction photovoltaïque.....	32
Différents types de systèmes photovoltaïques	32
Principe de fonctionnement d'une installation photovoltaïque	34
Dimensionnement de système photovoltaïques – éolienne	35
Les diffirents types d'installations photovoltaïque.....	39
Exemple d'une Consomation journaliere d'une famille.....	41
Calcul de la puissance des modules photovoltaïques	42
Calcul du stockage d'énergie d'une installation autonome	44
Dimensionnement du régulateur	45
Dimensionnement de l'onduleur.....	45
Les caractéristiques de materiel de notre installation.....	45
Données de puissance de sortie de l'éolienne 2kw.....	50
Conclusion	51
Chapitre III : simulation d'un système photovoltaïque –éolienne	
Introduction.....	52
Présentation de logiciel TRNSYS18	52
utilisation de logiciel TRNSYS18.....	53
III.3Meteonorm	53
III.4 Avantages Et Inconvénients	53
III5. La Description De L'installation	54
Les Composants principaux de notre installation.....	55
Les Composants secondaire de notre installation.....	56
Chapitre VI :Résultats de l'étude Numérique Réalisé par TRNSYS	
Introduction.....	60
Résultats et discussions.....	60

Simulation pour le 21 janvier	60
Simulation pour le 21 juin.....	65
Conclusion	70
Conclusion générale	71
recherche bibliographique	



**Introduction
Générale**

INTRODUCTION GENERALE :

Le regain actuel d'intérêt pour les énergies renouvelables est dû sans aucun doute à la prise de conscience mondiale qui débouche sur la nécessité de revoir les politiques énergétiques, à la fois pour lutter contre les émissions de CO₂ et pour prévenir une pénuriemajeure d'énergie classique.

Alors de nombreuses énergies non polluantes, ou renouvelables, ou abondantes partout à la surface du globe pourraient être utilisées par l'homme tel que l'énergie éolienne, l'énergie nucléaire, l'énergie hydroélectrique et l'énergie solaire qui sont des énergies à ressource illimitée qui regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergievalorisée et l'énergie utile obtenue. La filière étudiée dans ce mémoire est l'énergie solaire et l'énergie éolien qui est donc une possibilité de développement efficace et durable tant que le soleil brille encore et le vent existe presque toutes les jours , c'est pour cela que les recherches scientifiques se développent dans le sens de généraliser, améliorer et optimiser l'exploitation des systèmes solaires et des systèmes éolien.

L'optimisation des systèmes solaires est basée sur des critères de dimensionnement et de maximisation de la puissance générée pour avoir un bon rendement.

L'exploitation directe de l'énergie solaire relève une technologie bien distincte c'est de produire de l'électricité a partir de l'énergie solaire photovoltaïque.

Elle provient de la transformation directe d'une partie de rayonnement solaire en énergie électrique, cette conversion d'énergie s'exécute par le biais d'une cellule dite cellule photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée au soleil. La tension générée par une cellule (PV) peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule.

L'association de plusieurs cellules (PV) en séries/parallèles donne lieu a un générateur photovoltaïque (GPV), qui a une caractéristique courant-tension non linéaire présentant un point de puissance maximale, dépendant de niveau d'éclairement et de la température, ainsi que de vieillissement de l'ensemble de composants. Bien que la cellule photovoltaïque soit connue depuis de nombreuses années comme source pouvant produire de l'énergie électrique allant de quelque milliwatts au mégawatt, cette technologie reste encore sous le débat notamment à cause de rendement de la conversion

de l'énergie solaire en énergie électrique qui est encore faible.et pour L'énergie éolienne qui prend de plus en plus d'importance dans le monde entier. Ce développement rapide de la technologie de l'énergie éolienne et du marché a des implications importantes pour un certain nombre de personnes et d'institutions par exemple, pour les scientifiques qui recherchent et enseignent les vents futurs les ingénieurs électriciens et électriciens dans les universités ; pour les professionnels des services publics d'électricité qui vraiment besoin de comprendre la complexité des effets positifs et négatifs que le vent l'énergie peut avoir sur le système d'alimentation; pour les fabricants d'éoliennes ; et pour les développeurs de projets éoliens, qui ont également besoin de cette compréhension pour pouvoir développer des projets éoliens réalisables, modernes et rentables.

Actuellement, cinq pays - Allemagne, USA, Danemark, Inde et Espagne – concentrent plus de 83 % de la capacité éolienne mondiale dans leur pays. Ici, on trouve aussi l'essentiel de l'expertise liée à la production d'énergie éolienne et son intégration dans le système électrique de ces pays. Cependant, l'utilisation de cette source renouvelable de le pouvoir se répand rapidement dans d'autres régions du monde. Cela nécessite les connaissances théoriques et l'expérience pratique accumulées dans les principaux marchés actuels de l'énergie éolienne. A transférer aux acteurs de nouveaux marchés. L'un des principaux objectifs de cette recherche est de connaissances disponibles pour toute personne intéressée et/ou professionnellement impliquée dans ce domaine.

INTRODUCTION GENERALE

L'utilisation de l'énergie éolienne a une tradition d'environ 3000 ans, et la technologie est devenu très complexe. Elle implique des disciplines techniques telles que l'aérodynamique, dynamique des structures et génie mécanique et électrique. Au cours des dernières années un nombre de livres sur l'aérodynamique et la conception mécanique de l'énergie éolienne ont été publiés. Il n'existe cependant aucune publication générale qui traite de l'intégration de l'énergie éolienne dans les systèmes électriques.

L'énergie éolienne offre de nombreux avantages, ce qui explique qu'elle soit l'une des sources d'énergie à la croissance la plus rapide au monde. Les efforts de recherche visent à relever les défis d'une plus grande utilisation de l'énergie éolienne.

L'objet de ce travail est donc l'étude et la modélisation permettant de dimensionner un système photovoltaïque-éolien autonome pour l'électrification d'un habitat individuel.

Chapitre I :

Généralité sur le système

photovoltaïque- éolienne

I) Généralité sur le système photovoltaïque:

Introduction :

L'augmentation du coût des énergies classiques d'une part, et la limitation de leurs ressources d'autre part, font que l'énergie photovoltaïque devient de plus en plus une solution parmi les options énergétiques prometteuses avec des avantages comme l'abondance, l'absence de toute pollution et la disponibilité en plus ou moins grandes quantités en tout point du globe terrestre.

Actuellement, on assiste à un regain d'intérêt pour les installations utilisant l'énergie solaire, surtout pour les applications sur des sites isolés.

La conversion photovoltaïque est l'un des modes les plus intéressants d'utilisation de l'énergie solaire. Elle permet d'obtenir de l'électricité de façon directe et autonome à l'aide d'un matériel fiable et de durée de vie relativement élevée, permettant une maintenance réduite.

Le but d'un système photovoltaïque (PV) est d'utiliser la conversion directe de l'énergie solaire par effet photovoltaïque pour subvenir aux besoins en énergie électrique de l'utilisation. [1]

I. L'énergie solaire :

Le soleil est une étoile, située à environ 150 millions Km de la terre. Le soleil a un diamètre de 1 39 000 Km, soit plus de 100 fois notre planète. Il est composé d'hydrogène et d'hélium.

La terre décrit autour du soleil dans un plan dit "plan de l'écliptique", la terre tourne sur elle-même, selon un axe incliné de 23°27' sur le plan de l'écliptique. [1]

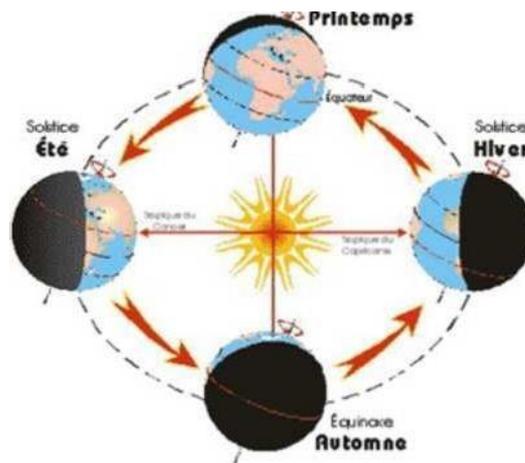


Figure I.1: Mouvement de la terre.

1. Rayonnement solaire :

Le soleil tire son énergie de réactions thermonucléaires se produisant dans son noyau.

L'énergie émise par le soleil est sous forme d'ondes électromagnétiques dont l'ensemble forme

Chapitre I : Généralité sur le système photovoltaïque- éolienne

le rayonnement solaire.

En traversant l'atmosphère, le rayonnement va subir des transformations par absorption et par diffusion, on distingue pour cela. [2]

Le rayonnement direct :

Les rayons du soleil atteignent le sol sans subir de la modification (sans diffusion par l'atmosphère).

Les rayons restent parallèles entre eux. [2]

Le rayonnement diffus :

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire rencontre des obstacles tels que les nuages, la poussière, etc. Ces obstacles ont pour effet de repartir un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux dans toutes les directions. [2]

Le rayonnement réfléchi :

C'est le résultat de la réflexion des rayons lumineux sur une surface réfléchissante par exemple : la neige ; cette réflexion dépend de l'albédo (pouvoir réfléchissant) de la surface concernée.

Le rayonnement global est tout simplement la somme de ces diverses contributions comme le montre la figure suivante : [2]

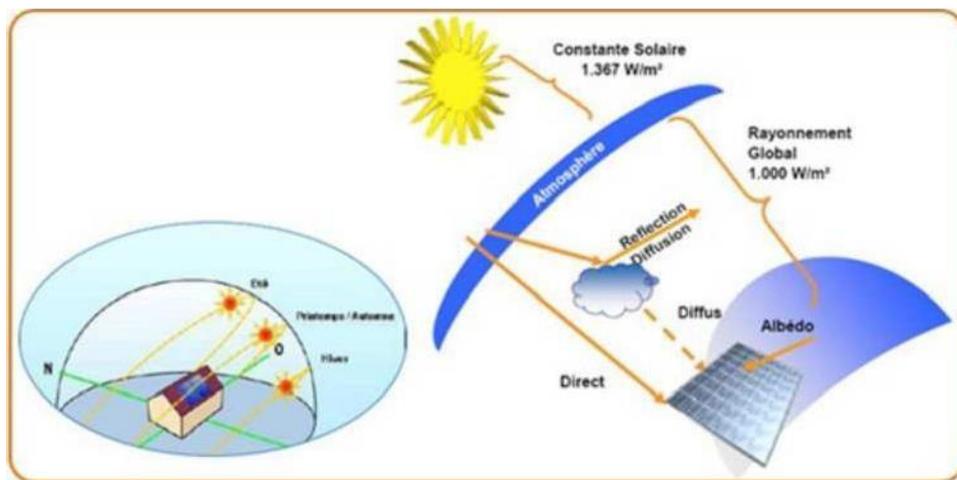


Figure I.2: Le rayonnement solaire.

2. Energie solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque fait l'objet d'un grand intérêt ces dernières années.

Elle est basée sur l'effet photoélectrique. Celui-ci permet de créer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique (Figure I.2). Cette ressource a donc l'avantage d'être inépuisable et utilisable en tout point d'un territoire.

Les modules photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons. La conversion photovoltaïque se produit dans des matériaux semi-conducteurs. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable.

Chapitre I : Généralité sur le système photovoltaïque- éolienne

Dans un **isolant électrique** : les électrons de la matière sont liés aux atomes et ne peuvent pas se déplacer.

Dans un **conducteur électrique** (un fil de cuivre par exemple) les électrons sont totalement libres de circuler et permettent le passage d'un courant.

Dans un **semi-conducteur** : la situation est intermédiaire, les électrons contenus dans la matière ne peuvent circuler que si on leur apporte une énergie pour les libérer de leurs atomes. Quand la lumière pénètre dans un semi-conducteur, ces photons apportent une énergie permettant aux électrons de se déplacer, il y a donc courant électrique sous l'exposition à la lumière. [3]

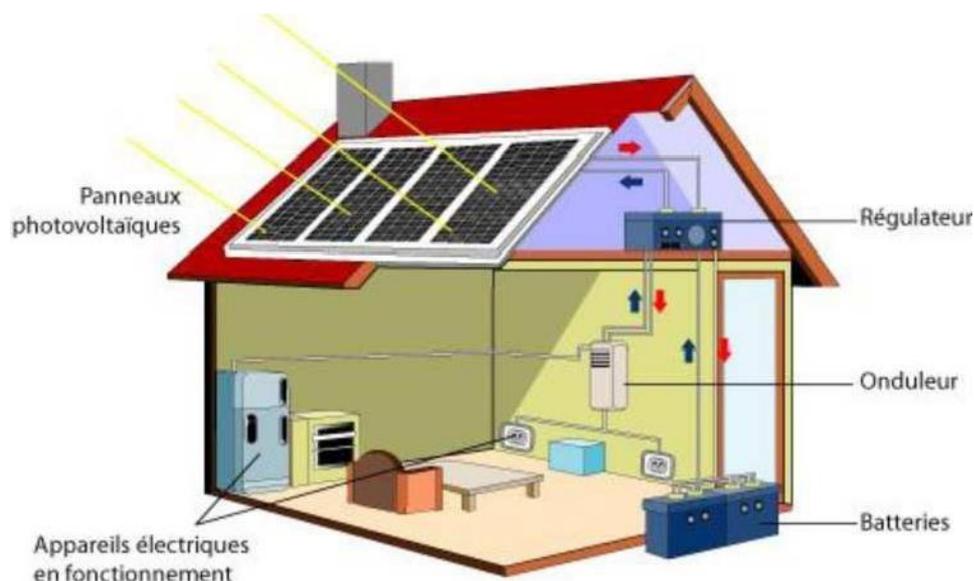


Figure I.3: Système solaire photovoltaïque

L'effet photovoltaïque :

Le terme « photovoltaïque » souvent abrégé par le sigle « PV », a été formé à partir des mots « photo » un mot grec signifiant lumière et « Volta » le nom du physicien italien Alessandro Volta qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité.

L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de semi conducteurs dopés p (positif) et n (négatif), dénommé comme jonction p-n (ou n- p). Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente (comme un aimant possède un champ magnétique permanent). Quand un photon incident (grain de lumière) interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque. Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse.

Des électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons et de leur faire réaliser un travail électrique pour rejoindre le trou de la face antérieure. [5]

Historique : Découverte de l'effet photovoltaïque :

Le mot photovoltaïque vient de mot grec "photo" qui signifie la lumière et voltaïque du physicien italien "Alessandro volta".

L'effet photovoltaïque a été découvert pour la première fois en 1839 par le savant Antoine Becquerel. Il a constaté que certains matériaux pouvaient produire de petites quantités d'électricité quand ils étaient exposés à la lumière.

En 1839, l'ingénieur américain "Willoughby Smith" découvre les propriétés photosensibles du sélénium.

En 1877, "W.G.Adam" et "R.E.Day" expliquent l'effet photovoltaïque du sélénium.

En 1883, "Charles Frits" construit la première cellule en sélénium et or. Elle atteint un rendement d'environ 1%.

En 1905, "Albert Einstein" publie sur un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière. Cet article lui vaudra le prix Nobel de physique en 1922.

En 1954, Les chercheurs américains "Gerald Pearson", "Darry Chapin" et "Calvin Fuller" travaillent pour les laboratoires Bell mettent au point une cellule PV en silicium.

Les premières applications ont eu lieu dans les années 60 aux équipements de satellites spatiaux (les américains lancent en 1954 le satellite Vanguard qui est alimenté par des piles photovoltaïque ayant un rendement 9%).

Puis à partir de 1970, l'utilisation terrestre est pratiquée sur des sites isolés.

Dans les années 1980, on assiste à la mise en place des premières centrales photovoltaïques. [5]

Quelques notions relatives à un système photovoltaïque:

Cellule PV : Dispositif PV fondamental pouvant générer de l'électricité lorsqu'il est soumis un rayonnement solaire.

Module PV : Le plus petit ensemble de cellules solaires interconnectées complètement protégées de l'environnement.

Chaîne PV : Circuit dans lequel les modules PV sont connectés en série afin de former des ensembles de façon à générer la tension de sortie spécifiée. Dans le langage courant, les chaînes sont plus communément appelées « *string* ».

Groupe PV : Ensemble de chaînes constituant l'unité de production d'énergie électrique en courant continu.

Boîte de jonction : Boîte dans laquelle tous les groupes PV sont reliés électriquement et où peuvent être placés d'éventuels dispositifs de protection.

Onduleur : Dispositif transformant la tension et le courant continus en tension et en courant alternatifs.

Chapitre I : Généralité sur le système photovoltaïque- éolienne

Partie courant continu : C'est la partie d'une installation PV située entre les modules PV et les bornes de courant continu de l'onduleur.

Partie courant alternatif : C'est la partie de l'installation PV située en aval des bornes courant alternatif de l'onduleur.

Monitoring : Le monitoring (anglicisme) consiste à surveiller et à effectuer les mesures relatives au suivi d'une installation PV.

Irradiation : C'est l'énergie du rayonnement solaire. Elle correspond {la quantité d'énergie reçue pendant une durée définie exprimée en kWh-2. [1]

Les éléments d'un système photovoltaïque :

Afin de bien comprendre le fonctionnement d'un système photovoltaïque, il est utile d'analyser les principaux composants. Les éléments d'un système photovoltaïque dépendent de l'application considérée.

Il existe plusieurs composants d'un système photovoltaïque :

- Modules.
- Batteries.
- Régulateurs de charge.
- Convertisseurs.
- Générateurs.
- Stockage. [1]

Les modules photovoltaïques :

Un module photovoltaïque est un générateur électrique de courant continu lorsqu'il est exposé à la lumière. Le module photovoltaïque est constitué d'un cadre rigide le plus souvent en aluminium permettant la fixation et d'une vitre transparente en verre trempé sur le dessus.

A l'intérieur se trouve un ensemble de cellules photovoltaïques reliées électriquement entre elles. En effet ceux sont elles qui génèrent le courant. Elles sont assemblées en série ou en parallèle à l'intérieur du module afin de cumuler leur puissance et de les rendre plus résistantes à l'environnement externe. [5]

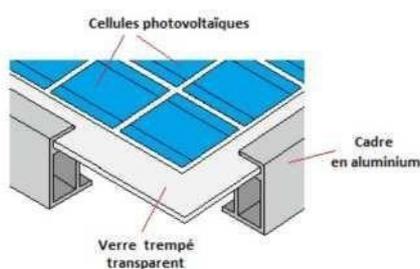


Figure I.4 : Structure d'un module photovoltaïque.



Figure I.5: Module PV.

Chapitre I : Généralité sur le système photovoltaïque- éolienne

Stockage :

Le stockage assure deux fonctions principales :

Il permet de satisfaire les besoins en énergie électrique malgré le caractère aléatoire et discontinu de l'énergie solaire (rythme jour/nuit, variation en fonction des heures du jour et des saisons).

Outre sa fonction de stockage d'énergie, il assure un rôle de tampon, entre la production et l'utilisation en fixant la tension du système. Celle-ci reste dans la zone de fonctionnement optimal (fonction d'adaptation d'impédance).

Les deux principaux types d'accumulateurs utilisables actuellement sont :

-Les accumulateurs au plomb.

-Les accumulateurs au cadmium-nickel (accumulateurs à électrolyte alcalin).

-Les accumulateurs au cadmium-nickel peuvent être utilisés pour des applications de puissance relativement faible.

Le coût élevé de ce type d'accumulateurs (par rapport aux accumulateurs au plomb) en limite l'utilisation pour les mini et micro-puissances. Le stockage est représenté par des batteries, disposées en série dont le nombre définirait la tension de fonctionnement et la capacité de stockage désirées.

La durée de vie des accumulateurs dépend en général de leur condition d'utilisation, pour ces deux types des batteries la durée de vie est de 10 à 15 ans, mais à une condition essentielle, c'est de maintenir leur état de charge supérieur à 50 %.

Batterie :

Il existe trois grandes utilisations pour les accumulateurs :

-La batterie de démarrage.

-La batterie de traction.

-La batterie stationnaire.

Une batterie n'est pas seulement caractérisée par ses dimensions, son nombre d'éléments et sa capacité, mais doit répondre à différents critères :

-Durée de la décharge.

-Régime de décharge.

-Aptitude à la recharge.

Chapitre I : Généralité sur le système photovoltaïque- éolienne

- Température d'utilisation.
- Résistance mécanique.
- Fréquence des adjonctions d'eau distillée.
- Entretien.

Durée de vie envisagée.

Il y a parfois contradiction dans les exigences, nécessitant alors un compromis ; c'est le cas de la batterie solaire à laquelle on demande des performances de batterie de traction et de batterie stationnaire :

- Batterie de traction, parce qu'on lui demande un cycle journalier de décharge (pas toujours suivi d'une recharge).
- Batterie stationnaire, parce qu'on lui demande de stocker une énergie et de la restituer en cas de coupure secteur, qui sera le non-enseulement. [5]

Influence des différents paramètres :

Les paramètres les plus importants agissant sur la vitesse des réactions chimiques et électrochimiques sont :

- Paramètres externes** : température, pression, temps.
- Paramètres électriques** : potentiel, intensité.
- Paramètres de l'électrode** : nature de matériau, surface, géométrie, état de surface.
- Paramètres de la solution** : concentration des espèces électro actives, nature du solvant, concentration de l'électrolyte.
- Paramètre du transfert de masse** : mode (diffusion), concentration à la surface de l'électrode.

Régulateur :

- Le régulateur assure deux fonctions principales :
- La protection des batteries contre les surcharges et les décharges profondes.
- L'optimisation du transfert d'énergie du générateur PV à l'utilisation.

Principe de son fonctionnement :

La densité de l'électrolyte de la batterie est théoriquement un excellent indicateur d'état de charge, mais souvent cet indicateur ne prend sa valeur caractéristique que plusieurs jours après sa charge.

Chapitre I : Généralité sur le système photovoltaïque- éolienne

De plus, il faudrait agiter l'électrolyte pour faire une bonne mesure. Enfin, cette mesure est difficile à automatiser. Finalement l'indicateur utilisé est la tension aux bornes de la batterie. Cette grandeur est la seule facilement mesurable capable de donner une estimation de l'état de charge. [6]

3. La cellule photovoltaïque :

Pour passer de l'effet photovoltaïque à l'application pratique, il est nécessaire de trouver des matériaux qui permettent d'optimiser les deux phases essentielles de ce principe:

1. Absorption de la lumière incidente.
2. Collection des électrons en surface.

Les cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs qui sont capables de conduire l'électricité ou de la transporter. Ils sont composés d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique (effet photovoltaïque).

Nous nous sommes donc intéressés au fonctionnement de ces cellules ainsi qu'à leur rendement afin de découvrir l'efficacité de ce système.

Le Silicium est l'un des matériaux le plus courant sur terre, c'est le sable, mais un haut degré de pureté est requis pour en faire une cellule photovoltaïque et le procédé est coûteux. Selon les technologies employées, on retrouve le Silicium monocristallin avec un rendement de 16 à 18%, le Silicium Poly cristallin de rendement de 13 à 15%, le silicium amorphe présente une efficacité entre 5 et 10%. D'autres matériaux tels que l'Arséniure de Galium et le Tellure de Cadmium qui sont en court de test dans les laboratoires est présentent un rendement de (38%). [7]

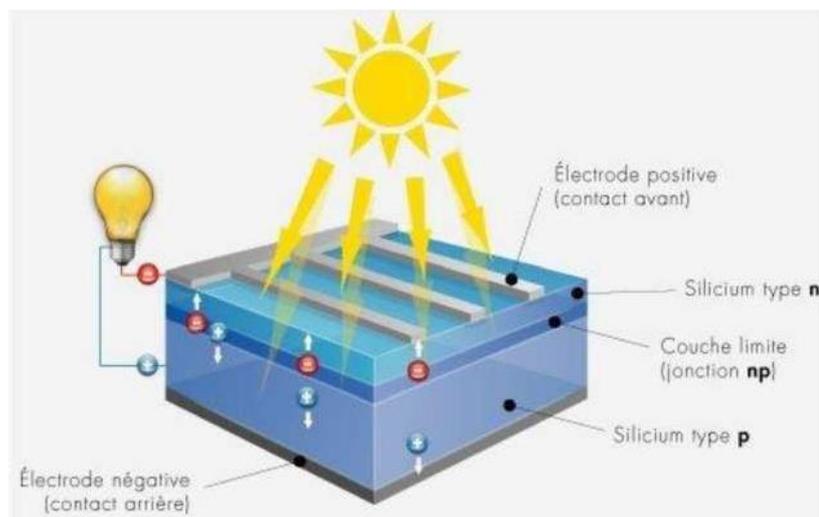


Figure I.6 : Cellule photovoltaïque.

Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque :

L'analogie entre le fonctionnement de la cellule photovoltaïque sous éclairage et celui d'un générateur de courant produisant un courant I_{ph} auquel se soustrait le courant de la

Chapitre I : Généralité sur le système photovoltaïque- éolienne

polarisation de la diode en polarisation directe, n'est qu'une représentation simplifiée du fonctionnement de la cellule.

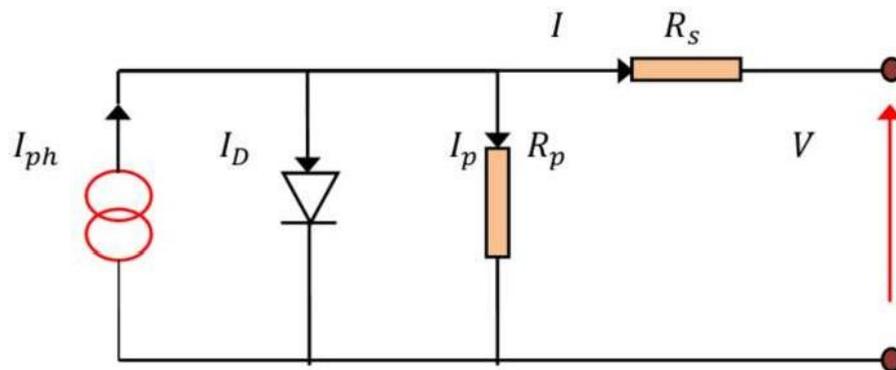


Figure I.7: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Les différents paramètres de ce modèle sont :

- Le générateur de courant : il délivre le courant I_{ph} correspondant au courant photo généré.
- La résistance série R_s : elle prend en compte la résistivité propre aux contacts entre les différentes régions constitutives de la cellule. Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule.
- La résistance R_p : également connue sous le nom de court circuit, elle peut être due à un court circuit sur les bords de la cellule. On l'appelle aussi résistance de fuite.
- La diode : modélise la diffusion des porteurs dans la base de l'émetteur. [7]

Fabrication des cellules photovoltaïques :

Le silicium est actuellement le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques. On l'obtient par réduction à partir de silice, composé le plus abondant dans la croûte terrestre et notamment dans le sable ou le quartz.

La première étape est la production de silicium dit métallurgique, pur à 98 % seulement, obtenu à partir de morceaux de quartz provenant de galets. Le silicium de qualité photovoltaïque doit être purifié jusqu'à plus de 99,999 %, ce qui s'obtient en transformant le silicium en un composé chimique qui sera distillé puis retransformé en silicium. Il est produit sous forme de barres nommées « lingots » de section ronde ou carrée. Ces lingots sont ensuite sciés en fines plaques de 200 micromètres d'épaisseur qui sont appelées wafers. Après un traitement pour enrichir en éléments dopants et ainsi obtenir du silicium semi-conducteur de type P ou N, les wafers sont métallisés : des rubans de métal sont incrustés en surface et reliés à des contacts électriques. Une fois métallisés les wafers sont devenus des cellules photovoltaïques. [1]

Les différents types de cellules :

Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs principalement à base de silicium (Si) et plus rarement d'autres semi-conducteurs: de sulfure de cadmium (CDs), de tellure de cadmium (CdTe), de Germanium (Ge), de sélénium (Se) ou d'arséniure de gallium (GaAs). Le silicium est actuellement le semi-conducteur le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques, car il est très abondant dans la nature. En effet, il existe plusieurs types de cellules photovoltaïques dont les plus importants sont les suivantes :

Chapitre I : Généralité sur le système photovoltaïque- éolienne

Les cellules à silicium monocristallin :

Les cellules photovoltaïques en silicium monocristallin sont formées d'un seul cristal. Elles sont en général d'un bleu uniforme.

Avantage :

Elles permettent d'obtenir des rendements élevés (rendement entre 13 à 17%).

Inconvénients :

- Leur coût est très élevé.
- Rendement faible sous un faible éclairage.

Les cellules à silicium poly-cristallin :

Elles sont constituées de plusieurs cristaux. La cellule a un aspect bleuté mosaïque (pas uniforme). Leur rendement est de 11 à 15%.

Avantage :

Un bon rendement, mais cependant moins bon que pour les cellules monocristallines. Elles offrent actuellement un bon rapport qualité/prix.

Inconvénients :

Rendement faible sous un faible éclairage.

Les cellules amorphes :

Le silicium est utilisé en couche mince, il n'est pas cristallisé. Il est déposé sur une plaque de verre. Ce type de cellule on le trouve le plus souvent dans les petits produits de consommation (montre, calculatrice).

Avantage :

Moins cher que les autres.
Fonctionnement avec un éclairage faible.

Inconvénients :

Rendement faible.
Performances qui diminuent avec le temps, durée de vie courte.

Les cellules multi-jonctions :

Les cellules multi-jonctions sont constituées de différentes couches qui permettent d'absorber la majorité de spectre solaire. Mais ces cellules ne sont pas commercialisées.

Les cellules organiques :

Encore au stade de la recherche, cette nouvelle technologie permet à présent la production de cellules solaires organiques légères, flexibles sur une grande surface et moins chères à produire. Les cellules PV organiques sont de trois types ; moléculaire, polymère et hybride. [8]

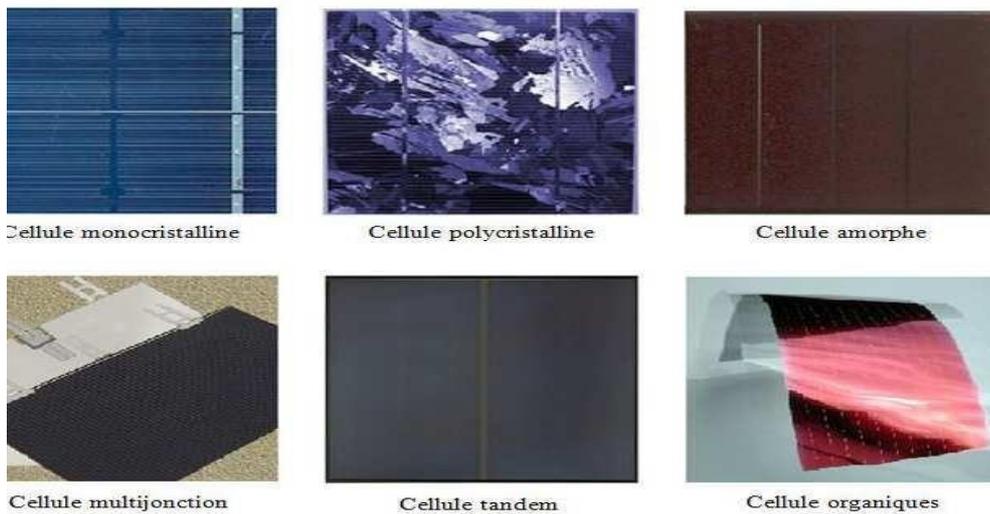


Figure I.8: Types de cellules photovoltaïques.

Principe de fonctionnement d'une cellule :

La cellule photovoltaïque est un composant électronique capable de fournir de l'énergie si elle est éclairée convenablement, elle est composée de deux semi-conducteurs, une des faces est dopée N (par exemple du phosphore), l'autre dopée de type P (par exemple du bore). Des électrodes métalliques sont placées sur les 2 faces pour permettre de récolter les électrons et de réaliser un circuit électrique. [8]

.1 Dopage de type P :

On introduit des atomes trivalents, ses trois électrons vont assurer les liaisons covalentes avec trois atomes voisins mais laisser un trou au quatrième. Ce trou se déplace de proche en proche dans le cristal pour créer un courant. Ici le nombre de trous est très supérieur au nombre d'électrons libres du cristal intrinsèque, on obtient donc un cristal dopé P (positif), les impuretés utilisées sont souvent du Bore.

La jonction PN :

Une jonction PN est l'accolement d'une région dopé P et d'une région dopée N. Lors de cet assemblage les porteurs de charges libres s'attirent et se recombinent dans la zone de jonction où les porteurs libres disparaissent : c'est la zone de transition.

Il ne reste donc plus que les ions dans cette zone qui vont créer un champ électrique interne au niveau de la jonction et qui empêche les charges libres restantes dans chaque zone de traverser la jonction pour se recombiner.

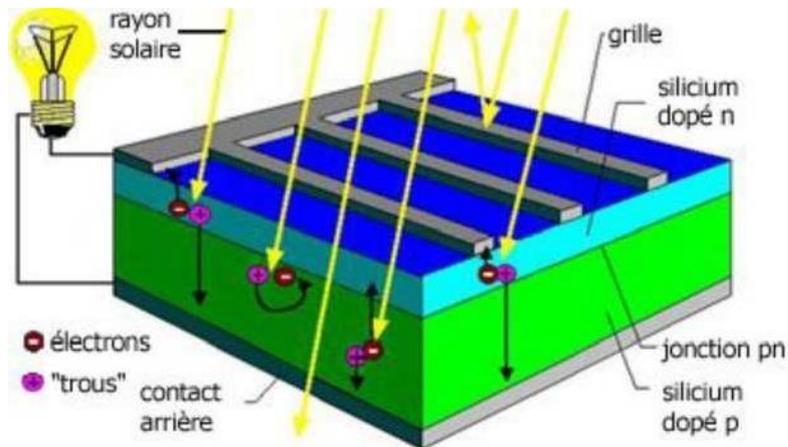


Figure I.9: représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque.

Comportement de la jonction PN utilisée comme capteur PV :

En polarisant électriquement une jonction PN et en la soumettant à un éclairage solaire, on obtient les caractéristiques semblables à celle représentées par la figure :

Sans éclairage le comportement d'une cellule PV est semblable à celui d'une mauvaise diode.

Ainsi sous polarisation directe, la barrière de potentiel est abaissée et le courant de porteurs peut se développer.

Sous polarisation inverse seul un courant de porteurs minoritaires (courant de saturation) circule.

Ce dernier varie peu avec la tension appliquée tant que cette tension est inférieure à la tension de claquage. Ces courants directs ou inverses comme pour des jonctions classiques sont sensibles à la température de jonction.

Si cette jonction PN est soumise au rayonnement solaire, alors des paires électrons-trous supplémentaires sont créées dans le matériau en fonction du flux lumineux.

Ce phénomène aussi appelé effet photovoltaïque ne se produit que si l'énergie des photons est supérieure égale à l'énergie de la bande interdite du matériau. La différence de potentiel qui en résulte aux bornes de la structure caractérise l'effet photovoltaïque et se situe selon les matériaux de la structure de la jonction.

Les différents types de pertes dans une cellule solaire :

Le rendement d'une cellule solaire est limité par différents types de pertes. Ces pertes peuvent être classées selon les pertes intrinsèques et extrinsèques ou selon les pertes optiques et électriques.

Et il y a plusieurs sources de pertes:

Chapitre I : Généralité sur le système photovoltaïque- éolienne

- Perte par réflexion.
- Perte thermodynamique.
- Perte par recombinaison.
- Perte par résistance électrique.

Les pertes extrinsèques :

Ce sont les pertes qu'on peut éliminer. Il s'agit notamment des pertes due a la réflexion, l'ombrage du au contact, la résistance série, la collecte incomplète des porteurs photo générés, l'absorption dans la couche fenêtre et la recombinaison non radiative.

Les pertes intrinsèques :

Ce type de pertes est du au deux raisons suivantes :

1/ l'incapacité de la cellule solaire mono jonction à répondre efficacement a toute les longueurs d'onde du spectre solaire. la cellule solaire devient transparente pour les photons dont leurs énergie est inferieure à l'énergie de la bande interdite du semi conducteur.

D'autre part, si les photons ont une énergie supérieure à la bande interdite le supplément d'énergie est dissipé sous forme de chaleur.

2/ Le deuxième type est du a la recombinaison radiative dans la cellule. [8]

Le rendement des cellules solaires :

Le rendement de conversion énergétique, est le pourcentage d'énergie convertie (photons en courant) et collectée, quand une cellule est connectée à un circuit électrique. [8]

Pourquoi le rendement est-il limité?

La plus efficace cellule solaire est faite d'un matériau convertisseur parfait:

Cela suppose une absorption parfaite, pas de réflexion de telle sorte que tous les photons d'énergie $E > E_g$ sont absorbés et créent un électron dans la bande supérieure. Si l'on suppose en plus que l'on a une parfaite séparation de charge de telle sorte que tous les électrons qui ne se recombinent pas sont transmis dans le circuit connecté, on obtient le courant maximum possible pour cette bande interdite. [8]

Les principales raisons pour lesquelles une cellule solaire ne donne pas des performances idéales sont:

- Absorption incomplète de la lumière incidente.
- Une plus faible efficacité des photons de haute énergie et pas d'absorption des photons de très basse énergie $< E_g$.
- Recombinaison non-radiative des porteurs de charges générés (présence de défauts).
 - Chute de tension due à la résistance électrique entre le point de génération des électrons et le circuit extérieur. [8]

Comment augmenter le rendement des cellules solaires?

Pour augmenter le rendement des cellules solaires on peut: Améliorer l'interaction avec la lumière.

Augmenter l'absorption. Réduire la réflexion.

Concentrer la lumière.

Transformer et mieux adapter le spectre solaire:

Par up-conversion pour les photons proches infrarouges. Par down-conversion pour les photons ultra-violet. [8]

De la cellule au champ photovoltaïque :

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module. Les connections en série de n_s cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle de n_p cellules accroît le courant en conservant la tension (figure II.3). Si toutes les cellules sont identiques et fonctionnent dans les mêmes conditions, nous obtenons le module photovoltaïque qui fournit un courant I_{pv} sous une tension V_{pv} . [8]

(a) : Groupement parallèle. :

(b) Groupement série.

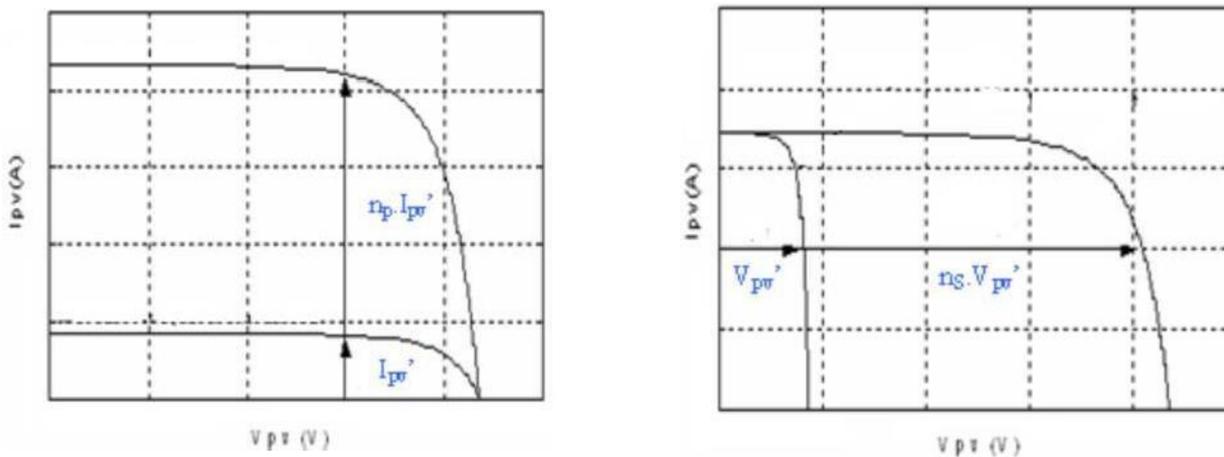


Figure II.10 : Caractéristiques de groupement de cellules photovoltaïque.

Le panneau photovoltaïque se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec une orientation et un angle d'inclinaison spécifique.

Le champ photovoltaïque est l'ensemble des panneaux montés en série et en parallèle pour atteindre une tension et un courant plus grands.

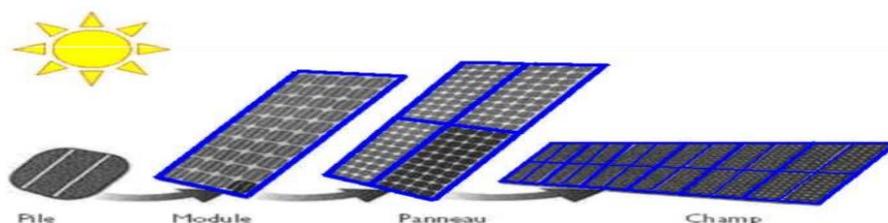


Figure I.11 : De la cellule au champ photovoltaïque.

4. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

Avantages du photovoltaïque :

Les systèmes photovoltaïques ont plusieurs avantages:

- Ils sont non polluants sans émissions ou odeurs discernables.
- Ils peuvent être des systèmes autonomes qui fonctionnent sûrement, sans surveillance pendant de longues périodes.
- Ils n'ont besoin d'aucun raccordement à une autre source d'énergie ou à un approvisionnement en carburant.
- Ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système.
- Ils peuvent résister à des conditions atmosphériques pénibles comme la neige et la glace.
- Ils ne consomment aucun combustible fossile et leur carburant est abondant et libre.
- Une haute fiabilité car l'installation ne comporte pas de pièces mobiles, ce qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées, d'où son utilisation sur les engins spatiaux.
- Le système modulaire de panneaux photovoltaïques permet un montage adaptable à des besoins énergétiques variés ; les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications allant du milliwatt au mégawatt.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologiques car le produit est non polluant, silencieux, et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- Ils ont une longue durée de vie.
- Les frais et les risques de transport des énergies fossiles sont éliminés.

Inconvénients du photovoltaïque :

Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles.

Dans le cas d'une installation photovoltaïque autonome, il faut inclure des batteries dont le coût est très élevé.

Le niveau de production d'électricité n'est pas stable et pas prévisible mais dépend du niveau d'ensoleillement. [8]

II) Généralité sur le système éolienne :

INTRODUCTION :

Tout au long de l'histoire de l'humanité, l'énergie éolienne a été exploitée pour des applications à petite échelle telles que le pompage de l'eau de puits ou l'exploitation d'usines de céréales et de textiles. Aujourd'hui, l'énergie éolienne peut être convertie en électricité et les coûts de production de l'énergie éolienne ont diminué de 80 % depuis le siècle dernier. Aujourd'hui, l'énergie éolienne est considérée comme le type d'énergie renouvelable disponible le moins cher [1].

Le reste de ce chapitre est divisé en des sections principales l'historique et la situation de l'énergie éolienne dans le monde et en Algérie, puis l'évolution technologique et les différents types et configurations d'éoliennes et finalement, l'évolution du prix de revient de l'énergie sera discutée.

ÉVOLUTION HISTORIQUE DE L'ENERGIE EOLIENNE

Voir des exemples sur l'évolution de la forme d'éolienne (figure 1.1).

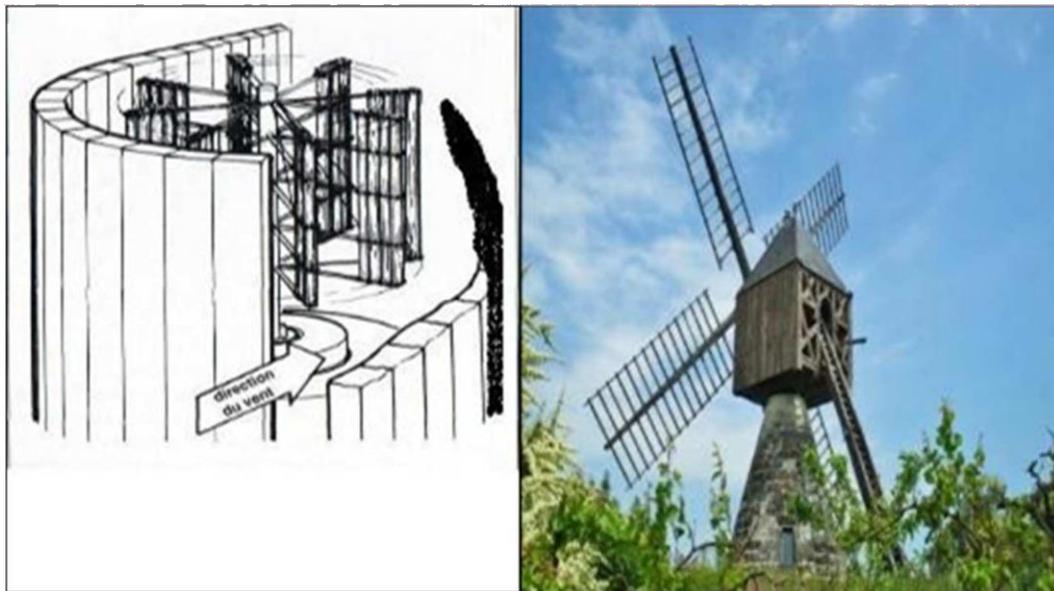


Figure 1.12 : (a) moulin perse ;

(b) moulin du moyen âge [1]

L'origine de l'éolienne est obscure. La spéculation impliquait la présence de rotors éoliens dans la Grèce classique, la Babylonie, le début de la Gaule et l'Angleterre saxonne, mais aucune référence aux machines éoliennes n'existe dans les archives fiables des périodes

Chapitre I : Généralité sur le système photovoltaïque- éolienne

antiques et médiévales. Les moulins à vent et les pompes à vent étaient probablement inconnus des Grecs et des Romains. Cependant, Héron d'Alexandrie fait référence dans le *Pneumatica* à un anémurion (c'est-à-dire une girouette).[2] Selon les interprétations traditionnelles depuis le XVIIe siècle, un appareil constitué d'un rotor à vent à axe horizontal entraînant un piston ou une pompe à air attaché à un orgue musical a été décrit. Mais Schmidt, après avoir traduit un manuscrit ancien, contenant le schéma original de l'appareil, avec les lettres de référence grecques habituelles, n'enregistre que l'orgue musical. Vitruve, moins de deux cents ans après la mort de Heron, a passé en revue de manière approfondie les dispositifs mécaniques connus à cette époque. Il a mentionné les moulins à eau, les roues élévatrices d'eau, les organes hydrauliques et les machines de levage. Il a également discuté des vents, décrit spécifiquement le comportement des girouettes et fait référence à la production de sons d'orgue par l'utilisation d'air forcé sous pression. Mais aucune mention n'a été faite de pompes à vent, de moulins à vent ou d'autres mécanismes actionnés par des voiles ou des palettes [2]. Il n'est donc pas surprenant que ni Vitruve ni, apparemment, tout autre ingénieur classique de la période hellénistique, se référant aux éoliennes, il y a eu une tendance à douter de l'existence de la roue à vent de Heron. Cependant, il n'y a aucune raison de l'écarter complètement, mais il est probable que le rotor de Heron n'était rien de plus qu'un jouet à main qui n'a pas évolué davantage à cette époque [2]. Il existe deux autres incertitudes concernant l'origine de l'éolienne. La première mentionnée par Clarke, tout en discutant d'un ancien livre hindou, impliquait que les moulins à vent étaient monnayés courants vers 400 Be. Mais Law, en traduisant l'*Artha.was Ira* de Kautilya, n'a fait référence qu'une seule fois à l'eau produite par des artifices actionnés par le vent. Deuxièmement, Flettner" a suggéré que le souverain babylonien Hammurabi (vers 1700 Be) prévoyait d'utiliser l'énergie éolienne dans ses projets d'aménagements d'irrigation ambitieux. Cependant, il ne semble pas y avoir de documents corroborants indiquant si la construction de ce système a même commencé [2]. Il n'y a pas non plus d'autres références au développement de l'éolienne à ces époques.

I.2.1 DEFINITION DE L'ENERGIE EOLIENNE :

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences[3].

LES DIFFERENTS TYPES D'EOLIENNES :

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

Les éoliennes à axe vertical :

Les éoliennes verticales (représenté dans la figure 1.2) comprennent un arbre de rotor principal sur un axe vertical avec les autres pièces clés à la base de la turbine. Les pales de ce type d'éolienne ressemblent davantage à des poteaux sur un carrousel qu'à des rayons sur une roue. Il est idéal pour la production d'énergie résidentielle urbaine. Elles ont un rendement élevé[4].

Les éoliennes à axe vertical ont traditionnellement été reléguées à une catégorie de niche sur le marché global des éoliennes. Historiquement, leur avantage a été qu'ils peuvent produire de l'électricité à partir du vent provenant de n'importe quelle direction, contrairement à une éolienne à axe horizontal qui doit lacet pour tenir compte des changements de direction du vent. Cet avantage vient avec un désavantage associé par rapport aux une éolienne à axe horizontal traditionnels en termes de rendement global et puissance de sortie. De nombreuses start-ups axées sur une éolienne à axe vertical ont été lancées en grande pompe pour échouer quelque temps plus tard, car leurs conceptions ne sont tout simplement pas assez efficaces pour rivaliser avec les une éolienne à axe horizontal, à la fois sur une base de coefficient de puissance et sur une base économique (mesurée en dollars par kilowatt)[5].



Figure 1.13: éolienne a axe verticale [7]

Les éoliennes à axe horizontal :

Ce sont les machines les plus répandues actuellement du fait de : -Leur rendement est supérieur à celui de toutes les autres machines. Elles sont appelées éoliennes à axe horizontal car l'axe de rotation du rotor est horizontal, parallèle à la direction de vent. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales, ou des hélices multipales pour le pompage de l'eau[6].

-Elles ont un rendement élevé.

-Les éoliennes à axe horizontal (ou à hélice) sont de conception simple.

Sur base la du nombre de pales que compte l'hélice, on peut distinguer deux groupes:

-les éoliennes à rotation lente "multi-pales" Elles sont, depuis longtemps, relativement répandues dans les campagnes, et servent quasi exclusivement au pompage de l'eau.

Aérogénérateurs :

Les éoliennes à rotation rapide, bi- ou tripales en général, constituent actuellement la catégorie des éoliennes en vogue, et sont essentiellement affectées à la production d'électricité, d'où leur nom le plus courant "d'aérogénérateurs". Parmi les machines à axe horizontal parallèle à la direction du vent, il faut encore différencier l'aérogénérateur dont l'hélice est en amont de machine par rapport au vent « hélice au vent » et celle dont l'hélice est en aval de la machine par rapport au vent « hélice sous le vent »[6].



Figure 1.14: éolienne à axe horizontal. [8]

1.2.2.3. Principe de l'éolienne verticale :

Les éoliennes à axe vertical ont été testées et utilisées plus largement dans les années 1980 et 1990 car elles étaient plus silencieuses et pouvaient fonctionner sans nécessiter de contrôle de lacet, quelle que soit la direction du vent.

L'éolienne à axe vertical (VAWT) est une éolienne dont l'axe de rotation principal est orienté dans le sens vertical[9].

Les VAWT étaient des conceptions innovantes qui ne se sont pas avérées aussi efficaces en général que les HAWT, mais elles présentent quelques bonnes caractéristiques, notamment un fonctionnement silencieux.

Parce qu'ils ne sont pas aussi efficaces que les HAWT, ils sont rarement utilisés dans les grandes unités. La plupart des VAWT sont des unités plus petites qui peuvent être situées dans des emplacements résidentiels et commerciaux car elles sont beaucoup plus silencieuses que les turbines à axe horizontal[9].

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT :

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

Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite[6].

Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique[6].

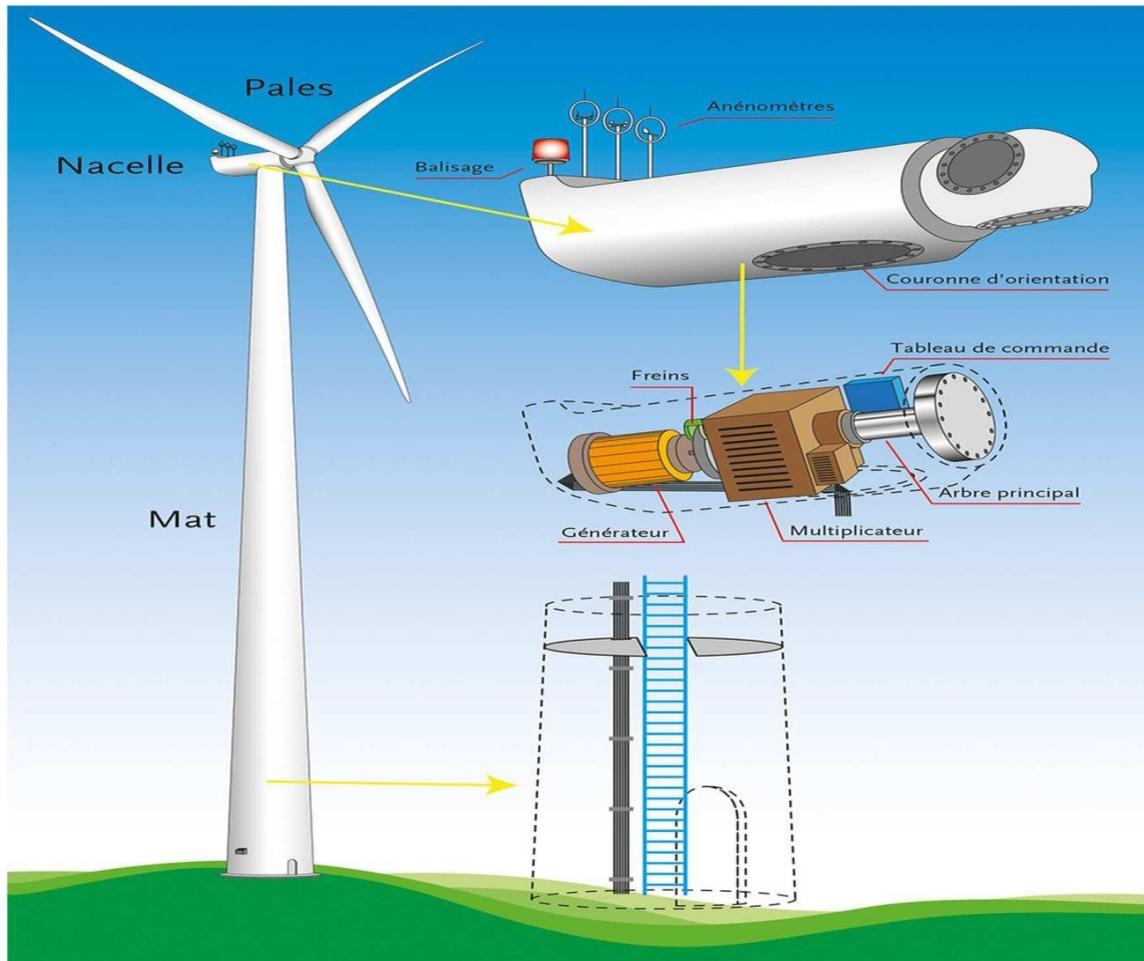


Figure 1.15 : Constitution d'une éolienne horizontale [10].

COMPOSITION D'UNE ÉOLIENNE :

Une éolienne se compose de cinq parties principales et de nombreuses parties auxiliaires. Les pièces principales sont la tour, le rotor, la nacelle, le générateur et la fondation ou la base. Sans tout cela, une éolienne ne peut pas fonctionner [11].

Chapitre I : Généralité sur le système photovoltaïque- éolienne

Fondation :

La fondation est sous terre pour les turbines on shore ; on ne le voit pas parce qu'il est recouvert de terre. C'est un gros et lourd bloc de béton structuré qui doit contenir toute la turbine et les forces qui l'affectent. Pour les turbines offshores, la base est sous l'eau et n'est pas visible. Dans les turbines offshores qui sont bien dans la mer, la base flotte, mais sa masse est suffisante pour supporter le poids de la turbine et toutes les forces qui s'exercent sur elle et la maintenir droite[11].

La tour :

Dans la plupart des turbines modernes est en acier tubulaire rond d'un diamètre de 3 à 4 m (10 à 13 pi), avec une hauteur de 75 à 110 m (250 à 370 pi), selon la taille de la turbine et son emplacement. La règle de base pour une tour de turbine est qu'elle a la même hauteur que le diamètre du cercle que font ses pales lorsqu'elles tournent. Normalement, plus une turbine est haute, plus elle est soumise au vent avec une vitesse plus élevée. En effet, plus on est loin du sol, plus le vent est rapide (le vent n'a pas la même vitesse à différentes distances du sol)[11].

Rotor :

Le rotor est la partie tournante d'une turbine ; il se compose (principalement) de trois pales et de la partie centrale à laquelle les pales sont attachées, le moyeu. Une turbine ne doit pas nécessairement avoir trois pales ; il peut avoir deux, quatre ou un autre nombre de lames. Mais le rotor à trois pales a la meilleure efficacité et d'autres avantages.

Les lames ne sont pas solides ; ils sont creux et sont en matériau composite pour être légers et résistants. La tendance est de les rendre plus grandes (pour plus de puissance), plus légères et plus solides. Les pales ont la forme d'un profil aérodynamique (identique aux ailes d'un avion) pour être aérodynamiques. De plus, ils ne sont pas plats et présentent une torsion entre leur racine et leur extrémité. Les lames peuvent tourner jusqu'à 90° autour de leurs axes. Ce mouvement est appelé pas de pale[11].

La nacelle :

Est un logement au sommet de la tour qui accueille tous les composants qui doivent être au sommet d'une turbine. Il existe un certain nombre de composants pour le fonctionnement correct et sain d'un système électromécanique compliqué qu'est une turbine. Une partie majeure de la turbine parmi ces composants est le générateur et l'arbre de la turbine qui transfère la puissance récoltée du vent au générateur via une boîte de vitesses[11].

La boîte de vitesses est un composant essentiel des éoliennes ; il réside dans la nacelle. Une boîte de vitesses augmente la vitesse de l'arbre principal d'environ 12 à 25 tr/min* (pour la plupart des turbines actuelles) à une vitesse adaptée à son générateur. Pour cette raison, l'arbre côté générateur est appelé « arbre à grande vitesse »[11].

Parce qu'une éolienne doit suivre le vent et ajuster son orientation à la direction du vent, son rotor doit tourner par rapport à la tour. Cette rotation est appelée mouvement de lacet dans lequel la nacelle et le rotor tournent autour de l'axe de la tour [11].

L'ENERGIE EOLIENNE EN ALGERIE

En Algérie, la première expérience avec l'éolienne remonte à l'année 1957 avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site des Grands Vents (Alger) qui fut racheté de l'Angleterre par la société « Electricité et Gaz d'Algérie » puis démontée et installée en Algérie. Par la suite, de nombreux autres aérogénérateurs, de plus petites puissances, ont été installés en différentes locations, notamment pour l'alimentation de localités isolées ou d'accès difficiles telles que les installations de relais de télécommunications. Cependant, la technologie des éoliennes n'étant pas encore mature, ces expériences n'étaient pas toujours concluantes. Il est à noter que ce constat était également valable même à l'échelle internationale. Mais après le premier choc pétrolier, d'importants investissements ont été consacrés à la recherche/développement des éoliennes. L'exploitation de l'énergie éolienne pour la production d'électricité a alors pris un essor considérable, notamment depuis la fin des années 80. Les éoliennes actuelles sont de plus en plus fiables, plus performantes et de plus en plus grandes. Ainsi, la taille du plus grand aérogénérateur qui était de 50 kW avec un diamètre de 15 m en 1989 a atteint, en 2014, une puissance de 8 MW, avec un diamètre de 164 m (VESTAS Offshore). La hauteur du mât a augmenté en conséquence pour atteindre dans certaines installations, plus de 150 mètres. Par ailleurs, les grandes éoliennes sont généralement développées et installées dans des zones assez ventées. Cependant, du fait de la saturation des sites terrestres potentiellement exploitables, on assiste, ces dernières années, au développement de machines Low Wind. Pour cette catégorie d'éoliennes dont la hauteur du mât est plus élevée, les pales sont plus grandes et les générateurs électriques plus petits. La puissance éolienne totale installée dans le monde qui était de l'ordre de 6 GW en 1996 est passée à 336 GW en juin 2014. En Algérie, une première ferme éolienne de 10 MW de puissance a été implantée à Adrar et mise en service en juin 2014. La plus grande éolienne de pompage a été installée en 1953 à Adrar par les services de la colonisation et de l'hydraulique. Montée sur un mat de 25 mètres de hauteur, cette machine à trois pales de 15 m de diamètre a fonctionné pendant près de 10 ans[12].

Potentiel éolien en Algérie :

La part des sources d'énergie renouvelables dans l'approvisionnement en énergie primaire de l'Algérie est relativement faible par rapport aux pays européens, bien que les tendances de développement soient positives. L'une des principales priorités stratégiques de New Energy Algeria (NEAL) qui est l'Algérie l'agence de l'énergie (gouvernement, Sonelgaz et Sonatrach), s'efforce d'atteindre une part des sources d'énergie renouvelables dans l'approvisionnement en énergie primaire de 10–12 % d'ici 2010. L'IEA prévoit que les sources d'énergie à la croissance la plus rapide seront fournies par les énergies renouvelables. Une grande partie de cette capacité sera installée dans pays en développement où l'énergie électrique solaire et éolienne est déjà compétitive. De toute évidence, la nation qui peut s'emparer d'une position de leader a potentiel de rendements économiques substantiels. L'article présente une revue de la situation actuelle de l'énergie éolienne et évalue le potentiel de l'énergie éolienne sources en Algérie en particulier la région sud-ouest de l'Algérie (Adrar, Timimoun et Tindouf)[13].

L'Algérie présente un potentiel éolien considérable qui peut être exploité pour la production d'énergie électrique, surtout dans le sud où les vitesses de vents sont élevées et peuvent dépasser 4m/s (6m/s dans la région de Tindouf), et jusqu'à 7m /s dans la région d'Adrar. Les ressources énergétiques de l'Algérie ont déjà été estimées par le CDER depuis les années 90 à travers la production des atlas de la vitesse du vent et du potentiel énergétique éolien disponible en Algérie[14].

La ressource éolienne en Algérie varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et un climat très diversifiés. 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 les deux chaînes de l'Atlas tellien et l'Atlas saharien. Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le Sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien[15].

Les cartes de vents établis par plusieurs chercheurs montrent que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement dans le Sud-Est.

Concernant le Nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaïa et Annaba, sur les hauts plateaux de Tebessa, Biskra, M'sila et El-Bayadh (6 à 7 m/s),

Chapitre I : Généralité sur le système photovoltaïque- éolienne

Selon le premier atlas vent de l'Algérie établi en 19902, les vitesses les plus élevées sont de l'ordre de 6 m/s et sont localisées dans la région d'Adrar. Ces résultats faits sur 10 ans de mesures, sont la base des cartes éoliennes établies par les chercheurs du CDER[15].

Les travaux effectués récemment, ont mis en évidence l'existence de sites ventés dans d'autres régions du Sud. Les régions de Tamanrasset, Djanet et In Salah disposeraient d'un potentiel éolien exploitable. Le gisement éolien en Algérie est donc toujours en cours d'évaluation.

Après avoir fait des tests sur 63 sites étudiés à l'intérieur du pays et 24 dans les pays voisins, les résultats des chercheurs du centre du Développement sont comme suit[15]:

-On constate que le printemps est la saison la plus active suivie par l'été au sud et l'hiver au nord, avec un vent stable 3.

La vitesse annuelle des vents varie du 1.2 à 6.3 m/s à 10 m de hauteur. Les sites situés au sud de l'Algérie sont plus ventés, avec un maximum enregistré à Adrar à 6.3 m/s, suivi par Hassi R'mel avec 6.1 m/s 1,

-La densité annuelle (mean power density) varie selon la région, la valeur maximale est enregistrée à Hassi R'mel avec 295 w/m².

La production annuelle de l'énergie varie entre 273.59 MWh à Adrar jusqu'à 5467.07 MWh à Hassi R'mel utilisant divers modèles de turbines éoliennes.

Parlant toujours du potentiel éolien, il faut savoir que le rendement électrique des éoliennes varie en fonction de la vitesse du vent, par exemple en passant d'une vitesse de 5m/s à 10 m/s, la quantité d'électricité produite se multiplie par 8 en non pas par deux, et pour les installations de grandes puissances, les vitesses du vent doivent être supérieures à 6 m/s, la hauteur de référence état 10 mètres. Aussi, la disponibilité (heures/an) joue un rôle important dans l'importance du gisement éolien.

En conclusion, on peut classer la carte des vents en Algérie selon les zones suivantes (Classement « Pacific Northwest Laboratory » PNL)[15]:

Adrar et Hassi-R'Mel avec respectivement des vitesses moyennes annuelles égales à 6.37 et 6.11m/s sont comprises dans la classe 5 considérée avec un bon potentiel éolien.

Chapitre I : Généralité sur le système photovoltaïque- éolienne

Tindouf avec une vitesse moyenne annuelle égale à 5.67m/s est répertoriée dans la classe 4, appropriée à des applications éoliennes.

In-Salah avec une vitesse moyenne annuelle égale à 5.13m/s est comprise dans la classe 3, qui peut être utilisée pour des utilisations éoliennes mais avec des mâts très hauts.

Mechria, Bordj-Badji-Mokhtar, Timimoun, Djelfa, In-Amenas, Biskra, le Port d'Oran et Arzew quant à eux, sont compris dans la classe 2, considérée comme étant marginalisée pour une utilisation éolienne.

Le reste des sites est compris dans la classe 1

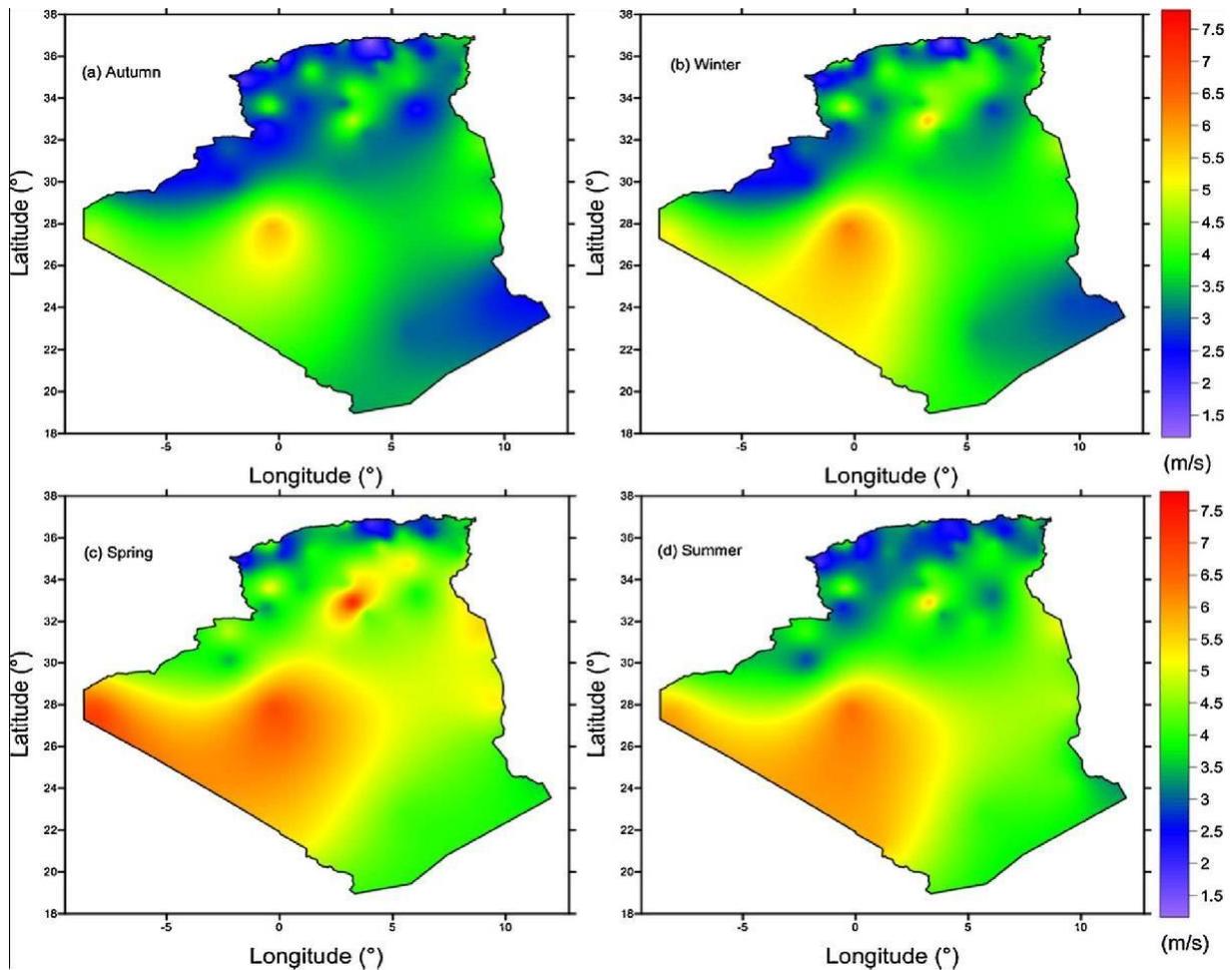


Figure I.9 distribution de la vitesse moyenne saisonnière du vent en Algérie à 10 m de hauteur (m/s).[16]

Les avantages et les inconvénients d'énergie éolienne 1.5.1. Avantages de l'éolien

Les avantages de l'énergie éolienne sont plus évidents que les inconvénients. Les principaux avantages comprennent une ressource renouvelable illimitée, gratuite (le vent lui-même), une valeur économique, des coûts de maintenance et l'installation d'installations de récolte de vent. Le vent est avant tout une ressource illimitée, gratuite et renouvelable. Le vent est un phénomène naturel et la récolte de l'énergie cinétique du vent n'affecte en aucune façon les courants ou les cycles du vent. Ensuite, la récolte d'énergie éolienne est un moyen propre et non polluant de produire de l'électricité. Contrairement à d'autres types de centrales électriques, elle n'émet aucun polluant atmosphérique ni gaz à effet de serre. Les éoliennes produisent de l'électricité sans danger à partir du vent qui passe. L'énergie éolienne est beaucoup plus écologique que la combustion de combustibles fossiles pour l'électricité. Actuellement, les États-Unis, ainsi que d'autres pays, restent dépendants des combustibles fossiles importés de pays instables et peu fiables [14]. Les tensions sur l'approvisionnement (en combustibles fossiles) sont susceptibles d'augmenter les prix des ressources en combustibles fossiles et de laisser l'économie américaine exposée à la volatilité des marchés internationaux. L'énergie éolienne a la capacité de libérer les États-Unis de l'esclavage économique figuratif des combustibles fossiles. Une fois les turbines et les centres énergétiques installés, le coût d'entretien des turbines et de production d'énergie éolienne est presque nul. Un autre avantage de l'énergie éolienne est la possibilité de placer des turbines là où cela est nécessaire. Après avoir effectué des recherches et trouvé des zones qui ont suffisamment de vent, les experts peuvent placer les éoliennes dans les zones souhaitées. Ces zones sont généralement inhabitées (éoliennes offshore par exemple). [14] En fait, les vents offshore ont tendance à souffler plus fort et plus uniformément que sur terre, offrant un potentiel de production d'électricité accrue et un fonctionnement plus fluide et plus stable que les systèmes éoliens terrestres.

Inconvénients de l'éolien

- L'impact visuel: les éoliennes installées sur terre ont tendance à défigurer le paysage, mais après l'apparition des fermes offshore on commence à oublier cette idée reçue [17].

- Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique quia pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor. Celle-ci doit donc être limitée[17].-
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergieclassiques : bien qu'en terme de coût, l'éolien puissant implanté sur des sites très favorables (c'est à dire là où il y a le plus de vent) est entrain de concurrencer la plupart des sources d'énergie classiques. Son coût reste encore néanmoins plus élevé que celui des autres sources classiques sur les sites moins ventés[17].

1.6 CONCLUSION

L'énergie éolienne se présente comme une énergie renouvelable, moyennement rentable et pas électivement coûteuse. C'est pourquoi les éoliennes sont encore en grande évolution de nos jours. En effet, les éoliennes à faible rendement on peu à peu été améliorées ets'améliorent encore.

De plus, les éoliennes qui se cantonnaient autrefois aux continents à des zones restreintes par de nombreuses contraintes, ont pu s'étendre à la mer, bien que plus coûteuses elles permettent une production plus forte et plus régulière d'électricité, et de nos jours, les chercheurs travaillent sur de nouveaux modèles qui s'étendraient au cieljusqu'à 500 mètres du sol pour récupérer la puissance des jets Stream.

L'énergie éolienne semble avoir un avenir très prometteur, permettant d'éviter toute production d'énergie « sale » qui posera de nouveaux problèmes dans quelques années.

Chapitre II :

Dimensionnement photovoltaïque- éolien

Chapitre II : Dimensionnement photovoltaïque- éolienne

Introduction photovoltaïque:

Par estimation près de deux milliards de personnes n'ont toujours pas accès à l'électricité. En effet, si dans la plupart des pays en voie de développement que les réseaux électriques existent, ils concernent souvent les grands centres urbains. Les zones rurales sont donc souvent exclues, entravant ainsi leur développement, l'expansion industrielle, ainsi que l'augmentation de la population ont entraîné un développement important de la demande de l'énergie. Pour la satisfaire, à long terme, l'utilisation des sources d'énergie d'origine fossile conduira d'une part à une surexploitation de ces ressources et à une dégradation de l'environnement d'autre part. L'utilisation de source d'énergie non nuisible à l'environnement, comme les énergies renouvelables est nécessaire afin d'assurer une relève énergétique. L'électrification par voie photovoltaïque nécessite un raccordement de dispositifs capables de convertir l'énergie solaire en énergie électrique exploitable à des fins d'alimentation. Et pour la réalisation d'une installation photovoltaïque, le dimensionnement reste une étape indispensable. Dimensionner un système PV c'est déterminer en fonction de sollicitations telles que l'ensoleillement et le profil de charge, l'ensemble des éléments de la chaîne PV, à savoir, la taille du générateur, la capacité de stockage, le cas échéant la puissance d'un convertisseur, voire l'inclinaison des modules et la tension d'utilisation. Une installation surdimensionnée veut dire des surcoûts, tandis qu'une installation sous dimensionnée veut dire manque de fiabilité. Quelque soit la méthodologie utilisée et la précision avec laquelle sont pris en compte les différents composants de la chaîne, on reste confronter à deux types d'estimations : - La première sur la demande qui dans la plupart des cas est assez grossièrement définie car souvent malconnue et qui subit des fluctuations journalières, hebdomadaires ou saisonnières. - La seconde sur le gisement solaire au sujet duquel on se heurte à un manque crucial de données représentatives. Ce problème nous amène à calculer l'irradiation selon des données relatives au site de l'installation. Ceci démontre que la fiabilité d'une installation PV est étroitement liée au dimensionnement qui est lié à son tour à la disponibilité de données fiables. Le mérite d'une installation PV est souvent mesuré par sa capacité à fournir de l'énergie en toute circonstance.

Différents types de systèmes photovoltaïques :

On rencontre généralement trois types de systèmes photovoltaïques, les systèmes autonomes, les systèmes hybrides et les systèmes connectés à un réseau. Les deux premiers sont indépendants du système de distribution d'électricité, en les retrouvant souvent dans les régions éloignées

Les systèmes autonomes :

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau. Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes ont les possibilités de couplage direct à une charge adaptée ou couplage avec adaptateur d'impédance MPPT (Maximum Power Point Tracking), fonctionnement au fil du soleil ou avec stockage d'énergie électrique. Le couplage direct implique un fonctionnement au fil du soleil, donc à puissance essentiellement variable au cours de la journée. Les charges typiques à courant continu qui peuvent satisfaire le critère (tension constante à puissance variable) sont les accumulateurs électrochimiques. Les charges alternatives sont les pompes à eau, c'est le pompage au fil du soleil, le stockage est néanmoins présent sous la forme d'eau emmagasinée (dans un réservoir). Dans la plus part des cas une adaptation d'impédance doit être réalisée en insérant entre le générateur et sa charge électrique un dispositif électronique qui permet de forcer le système à fonctionner à sa puissance maximale.

Chapitre II : Dimensionnement photovoltaïque- éolienne

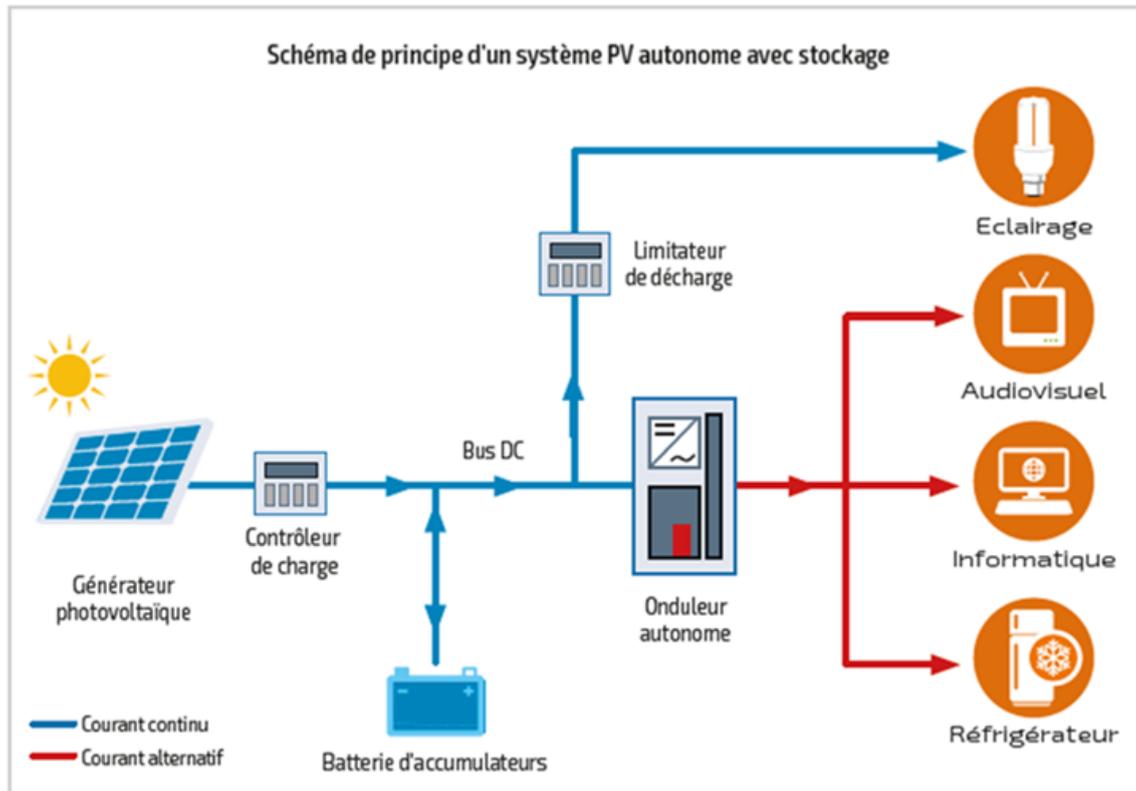


Figure II.1 : système autonome

Les systèmes hybrides :

Les systèmes d'énergie hybride associent au moins deux sources d'énergie renouvelable aussi une ou plusieurs sources d'énergie classiques. Les sources d'énergie renouvelable, comme le photovoltaïque et l'éolienne ne délivrent pas une puissance constante, mais vu leurs complémentarités, leur association permet d'obtenir une production électrique continue. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées. Les différentes sources dans un système hybride peuvent être connectées en deux configurations, architecture à bus continu et architecture à bus alternatif. Dans la première configuration, la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus continu. Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à courant alternatif (CA) fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie ensuite en courant continu (CC). Les générateurs sont connectés en série avec l'onduleur pour alimenter les charges alternatives. L'onduleur doit alimenter les charges alternatives à partir du bus continu et doit suivre la consigne fixée pour l'amplitude et la fréquence. La fonction spécifique du système de supervision est la commande de mise en marche et arrêt des générateurs et du système de stockage. L'avantage de cette topologie est la simplicité de commande. Dans la seconde configuration tous les composants du système hybride sont reliés à la charge alternative.



Figure II2 : système photovoltaïque éolienne hybride

Systeme connecté au réseau :

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque connectée à un réseau sont une résultante de la tendance à la décentralisation du réseau électrique. L'énergie est produite plus près des lieux de consommation. Les systèmes connectés à un réseau réduisent la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution. Il produit sa propre électricité et achemine son excédent d'énergie vers le réseau, auprès duquel il s'approvisionne au besoin, ces transferts éliminent le besoin d'acheter et d'entretenir une batterie. Il est toujours possible d'utiliser ceux systèmes pour servir d'alimentation d'appoint lorsque survient une panne de réseau.

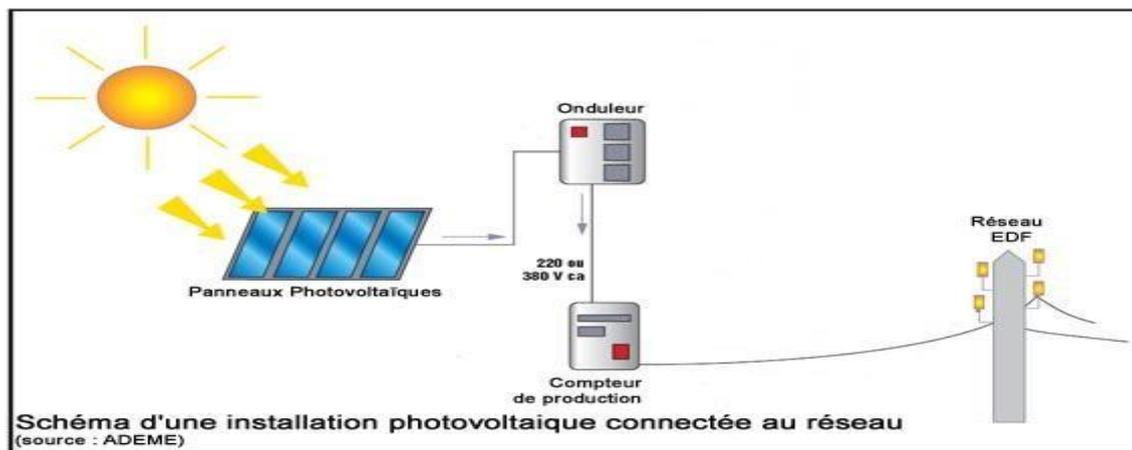


Schéma d'une installation photovoltaïque connectée au réseau
(source : ADEME)

Figure II.3 : Systèmes photovoltaïque connectés au réseau

Principe de fonctionnement d'une installation photovoltaïque :

Les générateurs transforment directement l'énergie solaire en électricité (courant continu). La puissance est exprimée en Watt- crête (Wc), unité qui définit la puissance

Chapitre II : Dimensionnement photovoltaïque- éolienne

électrique disponible aux bornes du générateur dans les conditions d'ensoleillement optimales. Un ou plusieurs onduleurs convertissent le courant continu produit en courant alternatif à 50Hz et 220 V. Selon le choix retenu, toute ou une partie de la production est injectée sur le réseau public, et le reste est consommé par le producteur. Lorsque la production photovoltaïque est insuffisante, le réseau fournit l'électricité nécessaire.

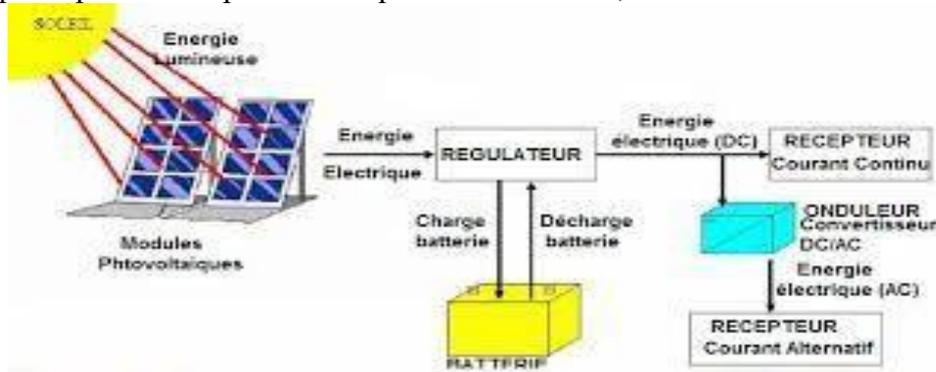


Figure II.4 : schéma explicatif du fonctionnement

Dimensionnement de système photovoltaïques – éolienne :

Critère de dimensionnement :

Les deux critères importants du dimensionnement optimal sont : – La satisfaction d'une condition sur le comportement énergétique du système en termes d'autonomie ou de déficit autorisé, en effet l'utilisateur a la possibilité de définir au départ l'autonomie du système ou la satisfaction d'un certain taux de couverture pour la période la plus défavorable. – L'équilibre du couple générateur/stockage.

Ces deux critères cités précédemment ont le principal avantage de traduire ce que les utilisateurs pensent des systèmes photovoltaïques.

Principe de dimensionnement d'une installation photovoltaïque

L'efficacité de toute installation électrique dépend fondamentalement de la rigueur de son dimensionnement et de son utilisation car il influe directement sur le coût et les performances d'une installation. Le dimensionnement a pour but de déterminer la puissance du générateur photovoltaïque et la capacité de la batterie, à partir des données d'ensoleillement du site d'une part et des besoins électriques de l'utilisateur d'autre part.

Les étapes du dimensionnement :

Les étapes suivantes permettent de dimensionner un système photovoltaïque : -Estimation des besoins journaliers en électricité E_j (en Wh/j). -Estimation de l'irradiation journalière. -Choix d'une inclinaison optimale en fonction du gisement local. --Estimation de la capacité de stockage requise en fonction de l'autonomie désirée.

Chapitre II : Dimensionnement photovoltaïque- éolienne

Présentation des paramètres d'entrée intervenants dans le dimensionnement :

D'une manière générale, les paramètres à prendre en compte pour concevoir et dimensionner un système photovoltaïque sont assez nombreux et concernent :

- Le lieu où sera placé le générateur PV.
- Le système PV (modules, régulateur, convertisseur et batteries).
- La charge.

Paramètres relatifs au système Photovoltaïque :

Les paramètres concernant le système donnent à titre indicatif un ordre de grandeur du rendement de l'installation, sont relatifs aux modules photovoltaïques, éléments de batterie, régulateur et convertisseur existants dans le marché. Ces paramètres basés sur un critère liant d'un côté la satisfaction des besoins et le fonctionnement optimal du système et de l'autre la disponibilité.

Paramètres relatifs au site d'installation :

Le dimensionnement du générateur PV est dicté par les conditions relatives au site. Pour adopter les capacités générateur PV / batterie, aux conditions de charge, il est indispensable de connaître les caractéristiques de l'irradiation solaire par jour ou par mois, soit l'énergie moyenne reçue sur un plan donné, à l'endroit même où sera situé le générateur PV. Les données doivent être connues pour chaque mois de l'année. Elles peuvent être obtenues par des organismes nationaux de météorologie ou par des calculs (outil informatique), qui exigent les paramètres d'entrées suivants :

- Latitude.
- Altitude.
- Réflectivité du sol ou albédo.
- Irradiation moyenne journalière la plus défavorable dans l'année, soit mesurée ou calculée.

Paramètres concernant le module PV :

Les paramètres concernant le module PV sont :

- Tension maximale.
- Courant maximal.
- Puissance maximale.

Les paramètres aux conditions standards (1000 W, 25 °C) sont donnés par le constructeur. - L'inclinaison des modules, est un paramètre qui est relatif à la latitude du lieu. Pour notre cas on précisera l'inclinaison minimale et maximale comme données d'entrée, afin d'optimiser cette inclinaison.

Paramètres concernant les batteries de stockage :

Les paramètres relatifs au système de stockage sont donnés selon la disponibilité des batteries à capacité normalisée :

- Profondeur de décharge selon le constructeur.
- Rendement énergétique de la batterie.
- Le dimensionnement du stockage est basé sur les paramètres d'un accumulateur au plomb-acide.

Paramètres concernant le régulateur de charge :

Les paramètres sont, la tension selon la puissance de la charge et le rendement donné par le constructeur.

Paramètres concernant le convertisseur :

Pour le convertisseur continu/alternatif on précisera le rendement seulement, qui est aussi donné par le constructeur.

Paramètres concernant la charge :

Notre utilisation est l'électrification d'un village par l'énergie solaire photovoltaïque, les paramètres concernant la charge sont :

- Type d'alimentation continue ou alternative.
- Puissance de la charge.
- Durée de fonctionnement moyenne par jour.

Chapitre II : Dimensionnement photovoltaïque- éolienne

Le stockage de l'énergie électrique :

Le stockage de l'énergie est l'action qui consiste à placer une quantité d'énergie en un lieu donné pour permettre son utilisation ultérieure. Il y a nécessité de stockage chaque fois que la demande énergétique est décalée dans le temps vis-à-vis de l'apport énergétique solaire. En effet : • La demande énergétique est fonction de la charge à alimenter, les appareils utilisés fonctionnent soit en continu, soit à la demande. • L'apport énergétique solaire est périodique (alternance jour/nuit, été/hiver) et aléatoire (conditions météorologiques). Ce décalage entre la demande et l'apport énergétique nécessite un stockage d'énergie. Les différents moyens actuellement utilisables sont : les batteries, les piles à combustibles, les super-condensateurs, les volants d'inertie... Le système de stockage le plus couramment utilisé dans les systèmes photovoltaïques est la batterie d'accumulateurs électrochimiques.

Les batteries dans les systèmes photovoltaïques :

Les systèmes photovoltaïques exigent habituellement des batteries qui peuvent être chargées pendant le jour et déchargées durant la nuit. Ces batteries doivent fonctionner ainsi pendant des années sans marquer plus qu'une détérioration minimale de leurs rendements, tout en satisfaisant la demande, les jours où il n'y a que peu ou pas de soleil. Dans un système photovoltaïque, la batterie remplit trois fonctions importantes:

-Autonomie : nombre de jours pendant lesquels la batterie doit fournir la puissance requise sans être rechargée ni subir de dommage.

-Courant de surcharge : une batterie permet de fournir un courant de surcharge pendant quelque instant, c'est à dire un courant plus élevé que celui que peut fournir le champ PV.

-Stabilisation de la tension : une batterie permet de fournir une tension constante, en éliminant les écarts de tension du champ PV et en permettant aux appareils un fonctionnement à une tension optimisée. Les propriétés électriques suivantes sont généralement employées pour caractériser :

Une batterie.

Sa capacité. Sa tension.

La charge et le courant maximum qu'elle peut supporter.

La conservation de la charge (donc sans autodécharge). Sa durée de vie, en nombre de cycles ou en années.

a. Capacité de batterie :

La capacité d'une batterie représente la quantité de courant qui peut être extraite d'une électrode via l'électrolyte et matériaux actifs des électrodes sur une charge. Elle est exprimée en Ampère heure (1Ah=3600 Coulomb) ou en Wattheure Wh (1Wh = 3600 J).

La capacité de batterie dépend de plusieurs facteurs. Elle est déterminée sous des conditions de décharge fixées, habituellement à courant constant ($C=I.t$) avec t : le temps de décharge au bout de laquelle la tension atteint une certaine valeur prédéfinie. En pratique, cette capacité dépend du courant, du temps de décharge ainsi que de la température. Par exemple, la capacité qui est extraite en 5 heures jusqu'à atteindre la tension minimale acceptée est appelée capacité 5 heures ou C5 en abrégé. Le courant de décharge correspondant est appelé courant I5.

b. Tension de batterie : La figure (III.4) reprend l'évolution de la tension durant la charge d'une cellule de batterie plomb acide. La charge théorique d'une batterie au plomb s'effectue donc en trois phases.

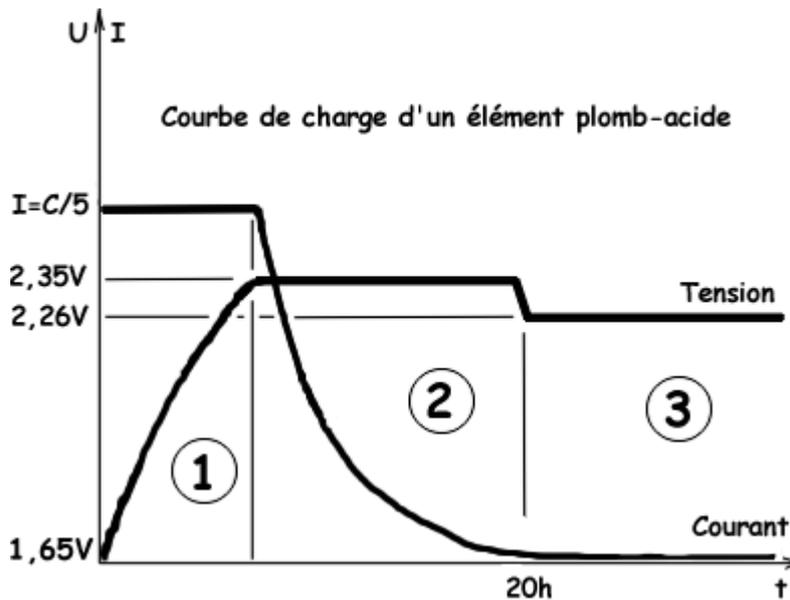


Figure II.5: Evolution de la tension et du courant avec le temps durant la charge d'un élément plomb acide.

a. La recharge de batterie:

La recharge appropriée d'une batterie (dans le cas de batterie plomb acide) devient prépondérante pour obtenir une durée de vie et des performances optimales quelque en soit les conditions d'utilisation de cette batterie. De plus, il existe des exigences techniques telles que la fiabilité et la longévité. Plusieurs méthodes de charge existent, nous pouvons citer : charge à courant constant, charge à tension constante, et charge rapide.

a. L'auto décharge :

Même lorsque la batterie ne débite pas, sa capacité a tendance à diminuer lentement. Cet effet est connu sous le nom d'auto décharge. Celle-ci peut résulter de plusieurs causes [Del 98]. En premier lieu, la densité d'acide diminue au cours du temps pour des batteries non hermétiques. Elle est principalement due à la présence de petites impuretés métalliques sur les électrodes, conduisant à la formation de micro piles et la génération d'un faible courant interne.

b. La durée de vie de la batterie :

La durée de vie d'une batterie solaire s'évalue en nombre de cycles de charge/décharge qu'elle est capable de supporter. La durée de vie moyenne des batteries de tous types a considérablement augmentée lors des deux dernières décennies grâce à l'utilisation de nouvelles technologies de fabrication et à l'emploi de nouveaux matériaux : utilisation du polypropylène pour les enveloppes externes, meilleure étanchéité de l'enceinte, alliages plus résistants à la corrosion, meilleure gestion de la batterie et bien d'autres encore.

Parmi les technologies des batteries on trouve les batteries : Plomb-acide, nickel cadmium (Ni-Cd), Lithium-ion, Nickel-hydrure métallique ou Ni-MH, Nickel-Zinc... La batterie au plomb acide se distingue des autres types de batteries et cela pour les avantages suivant : Un bon rendement.

Un Meilleur compromis en terme de coût / performance / entretien.

Sa durée de vie. Caractéristique électrochimique favorable. Une large disponibilité. Entretien faible ou nul.

Bonne tenue aux températures extrêmes. Un faible cout.

Chapitre II : Dimensionnement photovoltaïque- éolienne

c. Modèle électrique de la batterie :

Comme la batterie joue un rôle important en termes de stockage dans les installations photovoltaïques, elle devrait avoir un bon modèle, représentant son comportement réel. Il existe plusieurs modèles de batterie au plomb et leur mise en œuvre n'est pas aisée du fait de la prise en compte de plusieurs paramètres. Suivant les applications et les contraintes auxquelles elles sont soumises, les batteries réagissent différemment.

Modèle idéal de la batterie :

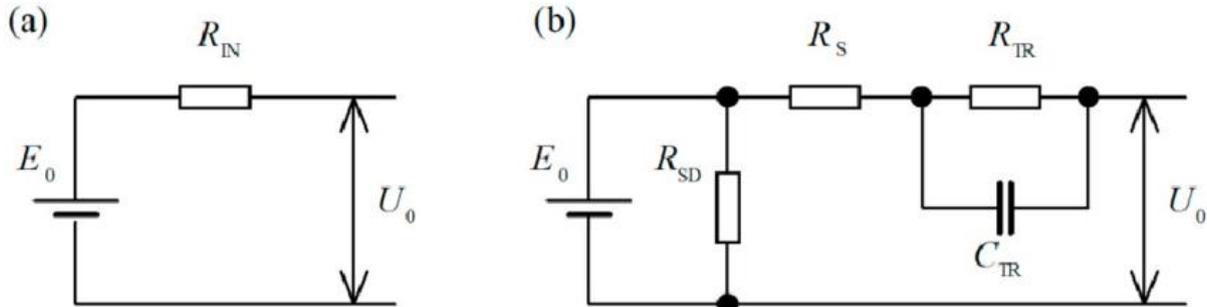


Figure II.6 : (a) Modèle de batterie idéal ; (b) Modèle basé sur Thevenin Dans ce modèle la batterie est représentée par une simple source de tension comme un circuit équivalent et les paramètres internes sont ignorés.

Influence de la température sur la capacité de batterie :

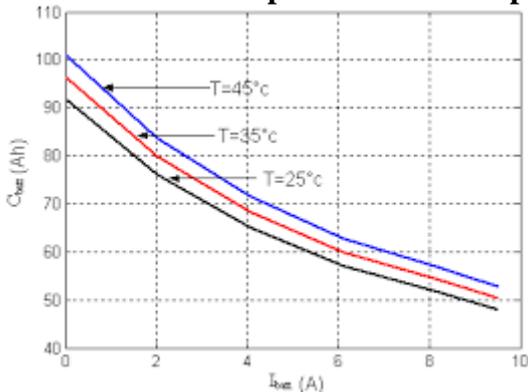


Figure II.6 : Influence de la température sur la capacité.

La capacité augmente avec la température de l'élément. Ce fait s'explique d'une part, par l'augmentation du coefficient de diffusion des solutions d'acide sulfurique, d'autre part par la baisse de la résistivité de l'électrolyte pour les concentrations généralement employées.

Inversement, en basse température, la capacité disponible est nettement moins importante.

2) Les différents types d'installations photovoltaïque:

Il existe différents types d'installations photovoltaïques, en termes de quantité d'énergie produite et d'intégration aux bâtiments et infrastructures. Les installations photovoltaïques répondent à trois segments de marché :

- la maison individuelle (jusqu'à 9 kWc) ;
le bâtiment collectif (quelques dizaines de kWc), les toitures industrielles (quelques centaines de kWc) ;
- les centrales au sol ou fermes solaires (quelques MWc).

Les installations raccordées au réseau :

En majorité, les installations photovoltaïques sont raccordées au réseau public de distribution afin d'y injecter la totalité de l'électricité produite, en temps réel. Il est toutefois possible d'être raccordé selon un principe de vente du surplus. Dans ce cas, la production est prioritairement consommée sur place. Enfin, pour les sites de production / consommation

Chapitre II : Dimensionnement photovoltaïque- éolienne

isolés (par exemple en haute montagne), dans le cas d'installations photovoltaïques domestiques de petite puissance (500 Wc), ou encore pour des sites industriels avec charge électrique fixe, la production peut être intégralement consommée par les équipements locaux, sans aucun lien avec le réseau de distribution. Cette dernière tendance se développe de plus en plus à mesure que le coût de rachat de l'électricité photovoltaïque baisse, de même que le coût des équipements.

Calcul de la puissance des modules photovoltaïques :

Le calcul de la puissance des modules photovoltaïques nécessite la maîtrise des principaux paramètres suivants :

- Nombre d'heures équivalentes ;
- Période d'ensoleillement ;
- Pertes électriques ;
- Technologie des modules.

Pour une installation autonome, la puissance du générateur photovoltaïque est définie et ensuite comparée aux besoins énergétiques afin de vérifier leur adéquation.

a) Notion de nombre d'heures équivalentes :

Le module photovoltaïque est caractérisé par sa puissance crête P_c dans les conditions STC spécifique correspondant à un ensoleillement de 1000 W/m², à la température de 25 °C sous un spectre AM 1,5. Le module ainsi exposé à un ensoleillement maximal produit une énergie (Wh) égale à la puissance crête durant un certain temps. Or, dans les conditions réelles de fonctionnement, cet ensoleillement maximal ne se produit que durant quelques heures de la journée, en raison de la fluctuation journalière de rayonnement solaire. Ces heures optimales sont appelées heures équivalentes

$$N_e = \frac{E_{sol}}{1000}$$

E_{sol} : illumination solaire reçue (Wh/m²/j)

N_E : Heures équivalentes h/

Un rayonnement solaire de 3500 Wh/m²/j équivaut à (3500/1000) = 3,5 heures par jour d'ensoleillement.

Il est donc possible de connaître la production électrique d'un panneau (EM) pendant une journée en multipliant le nombre d'heures équivalentes par sa puissance crête P_c

$$E_m = N_E \cdot P_c$$

En prenant compte des pertes électriques qui se produisent tout au long de la production d'électricité, du générateur au récepteur ou au réseau de distribution, l'équation devient

$$E_m = N_E \cdot P_c \cdot K \quad E_m = \frac{E_{sol}}{1000} P_c \cdot k$$

Où

K : Coefficient de perte ou facteur de correction (variant entre 0,65 et 0,9) [23]. Pour trouver le nombre de watt-crête à installer, on remplace la production EM par la

Chapitre II : Dimensionnement photovoltaïque- éolienne

consommation E_{total} dans l'équation , ce qui donne

$$P_C = 1000. \frac{1000E_{total}}{E_{SOL} \cdot K}$$

b) **Exemple d'une Consommation journaliere d'une famille :**

1) Equipements en alternatif (AC)

description des equipements	puissance (W)	nombre	dure /jour	consommation(wh/j)
Machine à laver	380	1	0.5	190
Xbox/playstation	30	1	5	150
Télévision	100	1	2	200
téléphone	5	1	2	10
Frigidaire	90	1	3	270
congélateur	110	1	4	440
Ordinateur	80	1	3	240

Tableau II.2 : Consommation journaliere d'une famille (AC)

$$E_{ac} = 1500 \text{ Wh/jour}$$

D'après l'exemple :

Consommation totale 1500

- $E_{DC} = 1500 \text{ Wh/j}$
- $E_{ac} = 1500 \text{ Wh/j}$ On prend :
- $E_{SOL} = 1500 \text{ Wh/m}^2 / \text{j}$
- $\eta_{bat} = 0.95$
- $\eta_{ond} = 0.90$
- $K = 0.75$
- $V_{mod} = 500 \text{ W}$ (Puissance crête du module)
- $P = 17,4 \text{ V}$ (Tension max du module)
- $AUT = 5 \text{ j}$ (Nombre de jours d'autonomie)
- $P_d = 0,70$ (Profondeur de décharge de la batterie)

Energie totale consommée :

$$E_{total} = (1500 / 0,95) + (1500 / (0,95 * 0,90)) = 3333 \text{ Wh /j}$$

$$P_C = (1000 * 3333) / (1500 * 0,75) = 2963 \text{ W}$$

La puissance crête de l'installation PV est de 2963 W.

Chapitre II : Dimensionnement photovoltaïque- éolienne

Nombre total de modules PV :

Le nombre total des modules utilisés est donné par

$$N_t = \frac{P_c}{P_{mod}}$$

Où

N_t = Nombre total des modules utilisés ;

P_c = Puissance crête à installer ,

P_{mod} = Puissance crête d'un seul module utilisé.

Application numérique

$N_t = 2963 / 500 = \ll 6 \text{ modules} \gg$.

c) Choix de la tension de l'installation autonome :

Le choix de la tension d'un générateur PV doit tenir compte de la puissance PV de l'installation. En règle générale, plus la puissance est élevée, plus la tension est élevée afin de réduire les déperditions d'énergie dans les câbles .

Le tableau 3.1 suivant indique des valeurs pour la tension de la batterie selon la valeur de la puissance crête à installer.

Puissance crête (kw)	Tension de la batterie recommandée (Vbat)
0-0.5	12
0.5-2	24
2-10	48
Sup à 10	Sup à 48

Tableau II.3 : Tension de la batterie conseillée en fonction de la puissance du système PV .

Dans notre exemple, on prend la tension de la batterie égale à 12 V. Nombre de modules PV en série par

branche

$$N_{ms} = \frac{V_{bat}}{V_{max}}$$

où

V_{bat} = Tension nominale de la batterie (V)

V_{max} = Tension maximale d'un seul module (V) Application numérique:

$N_{ms} = 4$ modules en série.

Nombre de modules PV en parallèle:

$$N_{mp} = N_t / N_{ms}$$

où

N_t = Nombre total des modules utilisés Application numérique :

$N_{mp} = 2$ modules en parallèle.

Chapitre II : Dimensionnement photovoltaïque- éolienne

Calcul du stockage d'énergie d'une installation autonome

Dimensionnement des batteries Le rôle des batteries est de stocker une quantité d'énergie suffisante pour subvenir à l'absence d'ensoleillement temporaire pendant quelques heures ou quelques jours. La capacité des batteries dépend des besoins énergétiques et de l'autonomie sans apport solaire (jours d'autonomie).

a) Durée d'autonomie

La durée d'autonomie de stockage à déterminer correspond à la période au cours de laquelle les batteries doivent alimenter seules l'installation. Elle varie en fonction des conditions météorologiques du site. Généralement, la valeur retenue en pays tempérés est comprise entre 5 à 8 jours et 15 jours pour les installations plus sensibles .

b) Capacité des batteries

Le calcul de la capacité nominale des batteries tiens compte des besoins énergétiques et des jours d'autonomie d'une part et de la profondeur de décharge, d'autre part .

$$Q(\text{ah}) = \frac{\text{AUT} \cdot E_{\text{total}}}{V_{\text{bat}} \cdot P_d}$$

Où

Q = Capacité de la batterie AUT = Nombre de jours d'autonomie

P_d = Profondeur de décharge de la batterie

Application numérique :

$Q = (5 \cdot 3333) / (48 \cdot 0,70) = 495,98 \text{ Ah} \ll 500 \text{ Ah}$. Donc le nombre de batteries autotal est de batteries de 12 V et de 100 Ah connectées comme suit :

- 2 batteries en série (pour avoir les 48 V)

Dimensionnement du régulateur :

Le dimensionnement du régulateur est défini une fois que le type de régulateur est retenu Il existe deux types de régulateurs :

- Régulateur de charge (simple) Il ne contrôle que la charge des batteries et évite ainsi la surcharge de ces dernières, il est utilisé pour des installations pour lesquelles le risque de décharge est quasiment nul .

- Régulateur charge-décharge Il permet en outre, d'éviter des décharges profondes en coupant l'alimentation de tous ou une partie des appareils électriques .

Le régulateur sera dimensionné d'après les paramètres suivants : tension, courant d'entrée et courant de sortie :

> Tension nominale :

Elle doit être celle du champ photovoltaïque.

> Tension d'entrée :

C'est le courant de charge maximal que les modules sont susceptibles de débiter. Il doit être supporté sans problème par le régulateur. Pour estimer ce courant, le plus sûr est de prendre 1,5 fois le courant maximal .

Chapitre II : Dimensionnement photovoltaïque- éolienne

> Courant de sortie (Is) :

L'intensité du courant de sortie du régulateur doit être supérieure à la valeur maximale que peuvent tirer les récepteurs simultanément. Elle peut être déterminée par la formule .

, b Dimensionnement de l'onduleur :

Lorsque l'application contient d'appareils fonctionnant en alternatif (AC), il faut convertir l'électricité continue que produisent les capteurs photovoltaïques en électricité alternative utilisable par ses appareils.

Le dimensionnement d'un onduleur se base sur la somme des puissances maximales de chaque équipement à connecter au courant alternatif, et se fait en fonction de plusieurs critères

:

> Tension d'entrée :

elle est égale à celle de la batterie ou du régulateur .

> Tension de sortie :

En Algérie nous utilisons du 230 V AC, 50 Hz .

> Tension nominale :

Puissance nominale de l'onduleur (VA), définie d'après les besoins exprimés. Elle tient compte du nombre d'équipements, et de leurs puissances.

Les caractéristiques de matériel de notre installation :

1) Panneau solaire AE Solar 500W monocristallin

Puissance Du Panneau (En Wc)	500
Longueur (En Mm)	2094
Largeur (En Mm)	1033
Profondeur (En Mm)	35
Garantie	12 ans
Garantie De Production	30 ans A 80 %
Poids (En Kg)	26
Technologie	Monocristallin

Tableau II.4 : Panneau solaire AE Solar 500W monocristallin.

Chapitre II : Dimensionnement photovoltaïque- éolienne

2) Micro-onduleur APSystems DS3L :

Données d'entrée (DC)

Puissance module recommandée (STC) : 255Wc-550Wc Plage de tension MPPT : 30V-55V

Plage de tension de fonctionnement : 16V-60V Tension d'entrée DC maximum : 60V

Courant d'entrée DC maximum : 18Ax 2 Données de sortie (AC)

Puissance de sortie maximale : 730VA Tension de sortie nominale : 230V/184V-253V Courant de sortie nominale : 3.2A

Fréquence nominale : 50Hz/48Hz-51Hz

Facteur de puissance (Adjustable) : 0.8 avance 0.8 retard

Nombre maximum d'unités par branche de 20 A : 6 Rendement

Rendement maximum : 97% Rendement CEC : 96,5% Rendement MPPT Nominal : 99.5%

Consommation électrique de nuit : 20mW Données mécaniques

Plage de température de fonctionnement interne : -40 °C to +85 °C Dimensions : 281mm X 231mm X 41.3mm

Poids : 2.6kg

Section du câble de sortie AC : 2.5mm² Type de connecteur : MC4

Indice de protection : IP67

Système de refroidissement : Convection – Pas de ventilateur Tableau III.5 : caractéristiques de Micro-onduleur APSystems DS3L

3) Batterie :

Code de l'article	BAT412112081
Tension nominale	12v
Capacité	125ah
Dimensions(mm)	330 x 171 x 214

Tableau II.5 : Caractéristiques techniques de notre batterie .

4) Caractéristiques techniques du régulateur de charge MPPT 30A Victron Energy

Tension nominale batteries : 12V ou 24V – détection automatique Courant de charge : 30A

Puissance PV max : 700W en 12V, 1400W en 24V Auto-Consommation : 10mA

Rendement max : 98%

Phase d' « absorption » (V) : 14,4 / 28,8V Phase de « floating » (V) : 13,8 / 27,6V

Algorithme de charge : Plusieurs étapes adaptatives Compensation en température : -16mV/°C/Cellule batterie

Température de fonctionnement : -30°C à 60°C avec ajustement de la puissance max au-delà 40°C

Refroidissement : convection naturelle Humidité : Max 95%

Taille des terminaux/connecteurs : 13mm² / AWG6 Indice de protection IP : IP43, IP22

Poids : 1,3 kg

Dimensions : 130 x 186 x 70 mm

Chapitre II : Dimensionnement photovoltaïque- éolienne

Et pour la turbine éolienne on a choisi :

Modèle	2K
Puissance nominale	2000W
Puissance Max	3000W
Lames Diamètre Du Rotor	3.2m(10.50ft)
Quantité de lame & Matériel	3 Pièces/FRP
Vitesse de Rotation nominale	350(r/min)
Couple de démarrage	0.8(N.M)
Type De générateur	PMG à Entraînement Direct AC
Matériel de générateur	Corps en Aluminium + fil de cuivre + nd-fe-b
Normal Tension De Sortie	24v 48V 96v 120v 240v 360v 500v
Tension de sortie optionnelle (DC)	24-500V
Vitesse Du Vent de démarrage	2 m/s
Vitesse nominale Du Vent	9 m/s
Travail Vitesse Du Vent	3-25 m/s (6.72-56 mph)
Vitesse maximale du vent	40 m/s (89.6mph)
Hauteur de la tour	6m(19.68ft) plus haut disponible
Haut Poids	68kg
Méthode de Protection	Yawing, contrôleur de vitesse limitée

Tableau II.6 :Caractéristiques techniques de la turbine.

Couple de démarrage: 1.2 N.m

Vitesse de rotation nominale: 350 tr/min Puissance de sortie évaluée: 2kw Puissance de sortie maximale: 3kw

Tension de fonctionnement: 12V-500v. Ou demande spéciale. Taille extérieure: 370*185*185mm

Poids Net: 20kgs

4 paires de poteaux Coque en aluminium Connexion en étoile

Chapitre II : Dimensionnement photovoltaïque- éolienne

Données de puissance de sortie de l'éolienne 2kw:

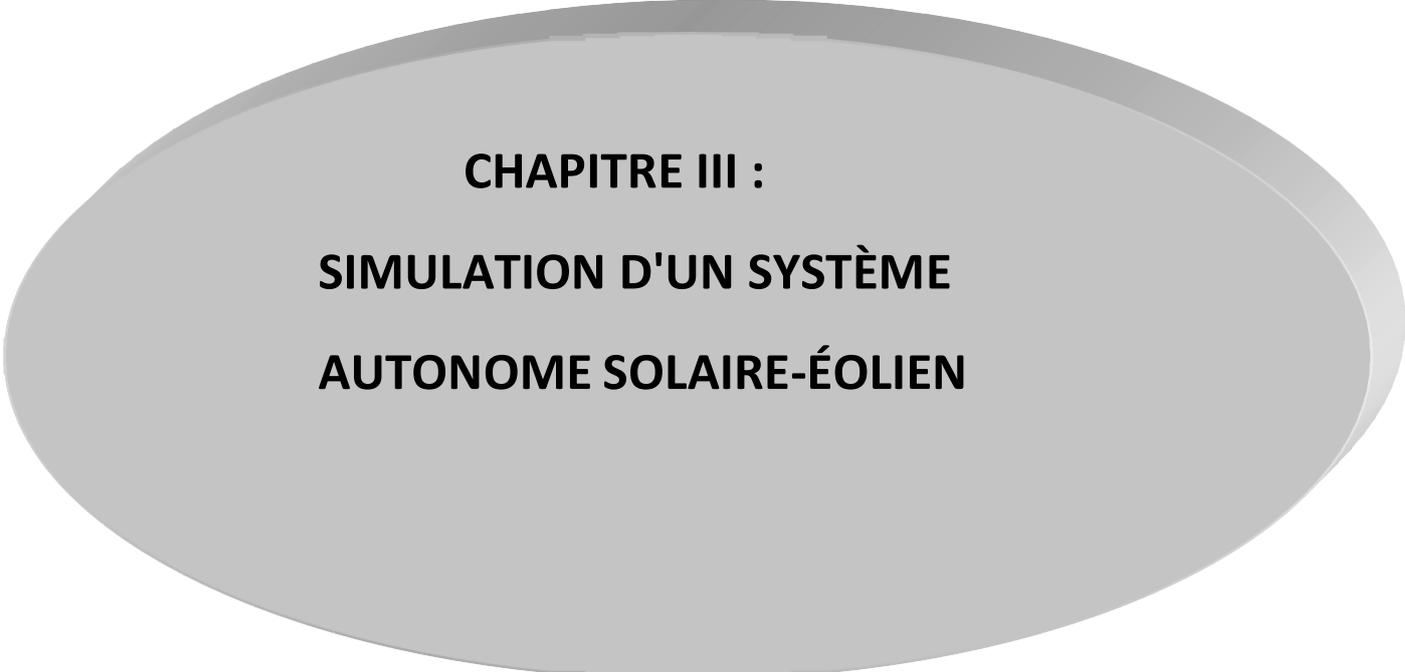
Puissance (w)	Vitesse du vent(m/s)	Vitesse de Rotation(r/min)	Tension de fonctionnement(V)	Fréquence(W)
2000	3	115	98	115
	4	144	138	251
	5	202	156	672
	6	264	175	1004
	7	328	196	1506
	8	374	235	1973
	9	421	263	2128
	10	445	282	2319
	11	469	300	2504
	12	483	323	2692
	13	502	338	2791
	14	520	347	2857
	15	536	360	2907
	16	549	360	2974
	17	564	360	3035
	18	582	360	3081
	19	592	360	3109
	20	613	360	3187

Tableau III.7 : Données de puissance de sortie de l'éolienne 2kw.

1. Conclusion :

Les systèmes photovoltaïques permettent d'exploiter l'énergie du soleil, ils sont très fiables et constituent une source non polluante d'électricité qui peut convenir à toute une gamme d'applications. Les systèmes PV autonomes jouent un rôle très important en apportant une solution réellement économique pour couvrir les besoins de base en électricité. Les systèmes autonomes sont capables de fournir du courant aux consommateurs pendant la période de l'année de moindre irradiation lumineuse. Si on a besoin du courant toute l'année, la période de moindre irradiation est l'hiver. Pendant cette période, il faudra plus de panneaux pour couvrir les mêmes besoins qu'en été. Les batteries donnent une autonomie aux systèmes pour des applications nocturnes ou quand les panneaux ne fournissent pas assez de courant.

Et même si l'éolien est une énergie en forte augmentation, mais elle ne pourra pas fournir à elle seule la totalité de la production, le vent étant une ressource trop aléatoire. A moins de parvenir à stocker l'énergie de manière efficace en grande quantité, l'utilisation des éoliennes ne peut s'envisager seule.



CHAPITRE III :
SIMULATION D'UN SYSTÈME
AUTONOME SOLAIRE-ÉOLIEN

Introduction

Un système d'alimentation hybride est composé de divers composants. Lors de la conception d'un système électrique hybride, des facteurs tels que la taille des composants, les configurations du système, l'adéquation des diverses ressources d'énergie renouvelable dans cette région, les aspects économiques du projet avec l'évolution des charges et des coûts des composants, le cycle de vie du système, le coût actuel net du système, le coût de l'énergie pour l'utilisateur final, les coûts de maintenance et les coûts de fonctionnement annuels du système hybride aideront le décideur à déterminer les solutions les plus rentables du système hybride pour répondre aux charges électriques pour lesquelles il est en cours de conception. Ce chapitre présente une étude de cas conçue où l'Algérie est choisie.

Présentation de logiciel TRNSYS18 :

Le logiciel de simulation TRNSYS est un environnement complet et extensible, dédié à la simulation dynamique des systèmes. Développé par le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) dans le cadre de collaborations internationales, TRNSYS est aujourd'hui la référence au niveau mondial de la simulation dynamique de bâtiments et de systèmes. Plusieurs centaines de composants TRNSYS sont disponibles, couvrant un large spectre d'applications. (Energie solaire, Eoliennes, Hydraulique, Microcontrôleurs, Photovoltaïque, Piles à combustibles, Piscines, Chaudière bois, Cogénération, comportement des usagés, analyse et optimisation tarifaire, Plafond et Plancher rayonnant, Pompes à chaleur, Régulation, Stockage d'énergie intersaison, Systèmes de climatisation, Thermique du bâtiment, Tours de refroidissements, Turbines à gaz, Matériaux à changement de phase, piles à combustible, analyse économique...). Ces bibliothèques peuvent être connectées pour effectuer des études pluridisciplinaires techniques et économiques. Studio assure l'interface entre le schéma de principe du projet à modéliser et TRNSYS d'une manière intuitive. La conception modulaire et ouverte de TRNSYS permet, aux utilisateurs, un contrôle sur les organigrammes, une adaptation plus réaliste des composants au projet étudié et la possibilité de créer aisément le composant spécifique pour un problème posé.

Le TRNSYS se caractérise par les trois principales fonctions :

- Les entrées (Inputs)
- Le traitement
- Les sorties (Outputs)

CHAPITRE 03 : simulation d'un système photovoltaïque -éolienne

utilisation de logiciel TRNSYS18 :

Le logiciel permet d'intégrer toutes les caractéristiques d'un bâtiment et de son équipement (les systèmes de chauffage et la climatisation), pour l'étude détaillée du comportement thermique de ce bâtiment, en fonction de son emplacement, des matériaux de construction utilisés, de l'architecture globale, du concept énergétique choisi, etc.

Meteonorm :

Métronome permet de disposer à l'interface TRNSYS, des données climatiques fiables et reconnues internationales pour plus de 100 localisations, au pas horaire et sur une année moyenne ou extrême. Si on ne dispose pas d'une station météorologique, METENORM peut calculer par interpolation entre différentes stations les conditions climatiques d'une région proposée.

Avantages Et Inconvénients

Avantages

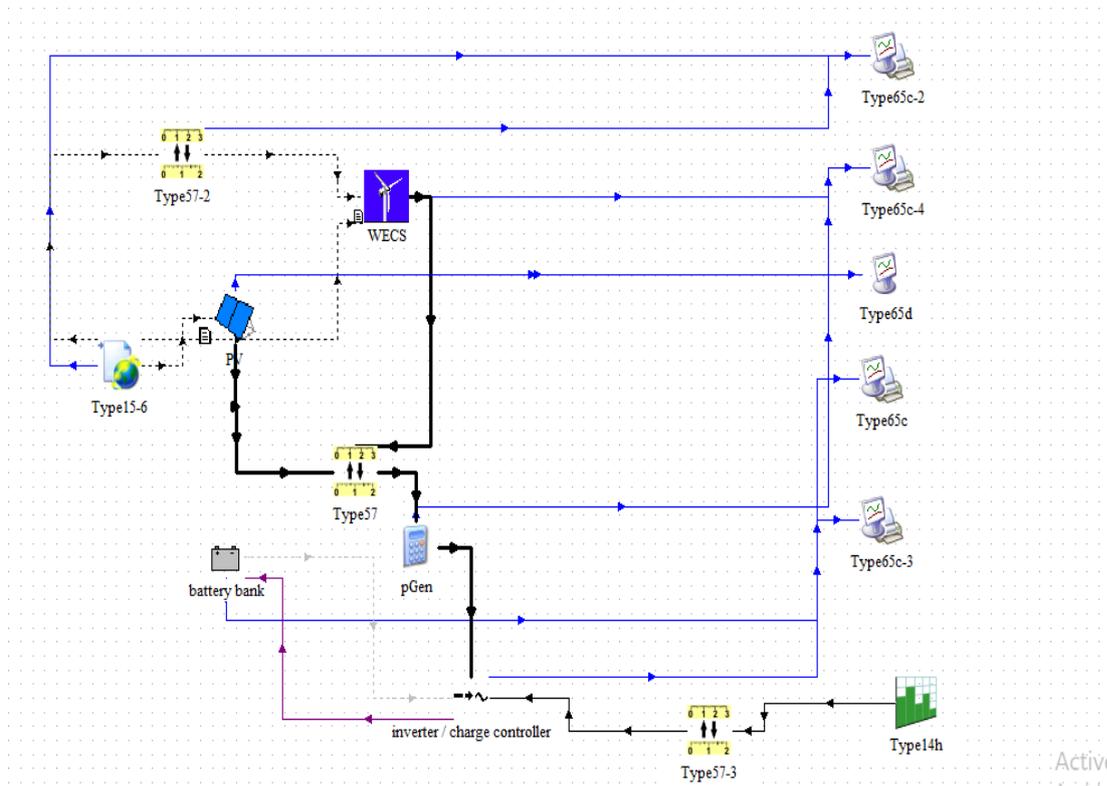
- Grâce à son approche modulaire, TRNSYS est extrêmement flexible pour modéliser un ensemble de systèmes thermiques à différents niveaux de complexité (modules avec procédures de calcul plus ou moins élaborées).
- L'accès au code source permet aux utilisateurs de modifier ou d'ajouter des composants qui ne figurent pas dans la librairie d'origine.
- Documentation vaste sur les sous-programmes y compris explications usages usuels équations de base.
- définition très souple de la période de simulation : choix du pas de temps, du début et de la fin de la simulation.

Inconvénients

- Pas de valeur ou de système par défaut, l'utilisateur doit donc posséder et introduire l'ensemble exhaustif des données définissant le bâtiment et le système.
- La bibliothèque est limitée.

III5. La Description De L'installation :

Présentation du modèle de l'installation réalisée par Trnsys18 :



FigureIII.1 : l'installation réalisée par Trnsys18

- Dans notre installation on a combiné de deux système , photovoltaïque (PV type103b) et le système éolienne WECS(type90) ces deux système lié avec l'onduleur (type48b).
 - L'énergie générée alimente les appareils de notre maison et charge aussi notre 2 batterie(type47a)
- Les Composants de notre installation : WECS(type90)

PV(type103b) régulateur(type48b) batterie(type47a) météonorme (type15.b)convertir (type57)

CHAPITRE 03 : simulation d'un système photovoltaïque -éolienne

Les Composants principaux de notre installation :

WECS(type90) :

Le type 90 est un modèle mathématique pour un système de conversion de l'énergie éolienne(WECS). Le modèle calcule la puissance produite par un WECS en fonction d'une caractéristique de puissance par rapport à la vitesse du vent (fournie sous forme de tableau dans un fichier externe). L'impact des changements de densité de l'air et de la vitesse du vent augmente avec la hauteur est également modélisé. Les principales équations utilisées dans ce modèle sont basées sur les travaux de (Quinlan, 2000; Quinlan et coll., 1996).

nom	valeur	unité
élévation du site	296	m
hauteur de collecte de données	10	m
Hauteur du moyeu	24	m
perte de puissance de la turbine	0	
nombre d'éoliennes	1	/
unité logique du fichier contenant les données de la courbe de puissance	34	/

Tableau III.1 : les données de WECS(type90)

: PV(type103b) :

Ce composant est approprié pour modéliser la performance électrique des panneaux photovoltaïques mono et polycristallins. Elle ne convient pas à la modélisation des performances électriques des réseaux photovoltaïques à couche mince. Il peut être utilisé dans l'un des deux modes en fonction de la façon dont le premier paramètre est défini. Lorsque le paramètre de mode MPPT est réglé sur 0, l'antenne PV est supposée être directement connectée à une tension de charge et/ou à une batterie. La tension de fonctionnement du PV/charge est une entrée du modèle PV. Lorsque le paramètre de mode MPPT est réglé sur 1, la matrice est supposée être connectée à sa charge via un pointeur de puissance maximum.

CHAPITRE 03 : simulation d'un système photovoltaïque -éolienne

Dans ce cas, la tension de charge n'est pas nécessaire comme entrée.

3.4.2.6. Puissance

nom	valeur	unité
Mppt mode	1	/
Courant de court-circuit dumodule aux conditions de référence	7	Amperes
Tension en circuit ouvert dumodule aux conditions de référence	22	V
Température de référence	25	C
Ensoleillement de référence	3000	W/m ²
Tension du module au pointde puissance max et conditions de référence	20	V
Courant du module au pointde puissance max et conditions de référence	6.5	Amperes
Temperature coefficient ofIsc (ref. cond)	0.022	A/K
Coefficient de températurede Voc (ref. cond.)	-0.08	V/K
Nombre de cellules câbléesen série	40	/
Température du module à NOCT	42	C
Zone de modules	1	m ²
Number of modules in series	5	/
Nombre de modules en parallèle	3	/

Tableau III.2 : les données de PV(type103b)

: régulateur(type48b) :

Dans les systèmes photovoltaïques, deux dispositifs de conditionnement d'énergie sont nécessaires. Le premier est un régulateur, qui distribue l'énergie CC du réseau de cellules solaires vers et depuis une batterie (dans les systèmes avec stockage d'énergie) et vers le deuxième composant, l'onduleur. Si la batterie est complètement chargée ou n'a besoin que d'une charge conique, la puissance excédentaire est soit déchargée, soit non récupérée en éteignant certaines parties du réseau. L'onduleur convertit l'alimentation CC en courant alternatif et l'envoie à la charge et/ou le renvoie à l'utilitaire. TYPE 48

CHAPITRE 03 : simulation d'un système photovoltaïque -éolienne

modèle à la fois le régulateur et l'onduleur, et peut fonctionner dans l'un des quatre modes. Les modes 0 et 3 sont basés respectivement sur "pas de batterie/système de rétroaction" et "système de charge directe". Les modes 1 et 2 sont des modifications du "système de suivi de puissance maximale parallèle" dans la même référence. Ce proforma correspond au Mode 3 : Tension du collecteur égale à la tension de la batterie, courant au lieu de la distribution de puissance, surveillance de l'état de charge de la batterie et de la tension.

Nom	Valeur	Unité
mode	1	/
Efficacité du régulateur	0.80	/
Efficacité de l'onduleur	0.95	/
High limit on fractional state of charge (FSOC)	0.95	/
Limite haute de l'état de charge fractionnaire (FSOC)	0.1	/
charge à la limite de décharge sur FSOC	0	/
Capacité de puissance de sortie de l'onduleur	3	Kw

Tableau III.3 : les données de régulateur(type48b).

: batterie(type47a) :

Ce modèle de batterie de stockage au plomb-acide fonctionne en conjonction avec le réseau de cellules solaires et les composants de conditionnement d'énergie. Il précise comment l'état de charge de la batterie varie dans le temps, compte tenu du taux de charge ou de décharge.

Ce proforma correspond au Mode 1, basé sur un simple bilan énergétique de la batterie. La puissance est simplement prise en entrée. Ce modèle ne calcule ni ne produit de valeurs de courant ou de tension.

Nom	Valeur	unité
mode	1	/
Capacité énergétique de la cellule	200	Ah
Cellules en parallèle	0	/
Cellules en série	2	/
Charging efficiency	0.93	/

Tableau III.4 : les données de batterie(type47a).

Les Composants secondaire de notre installation :

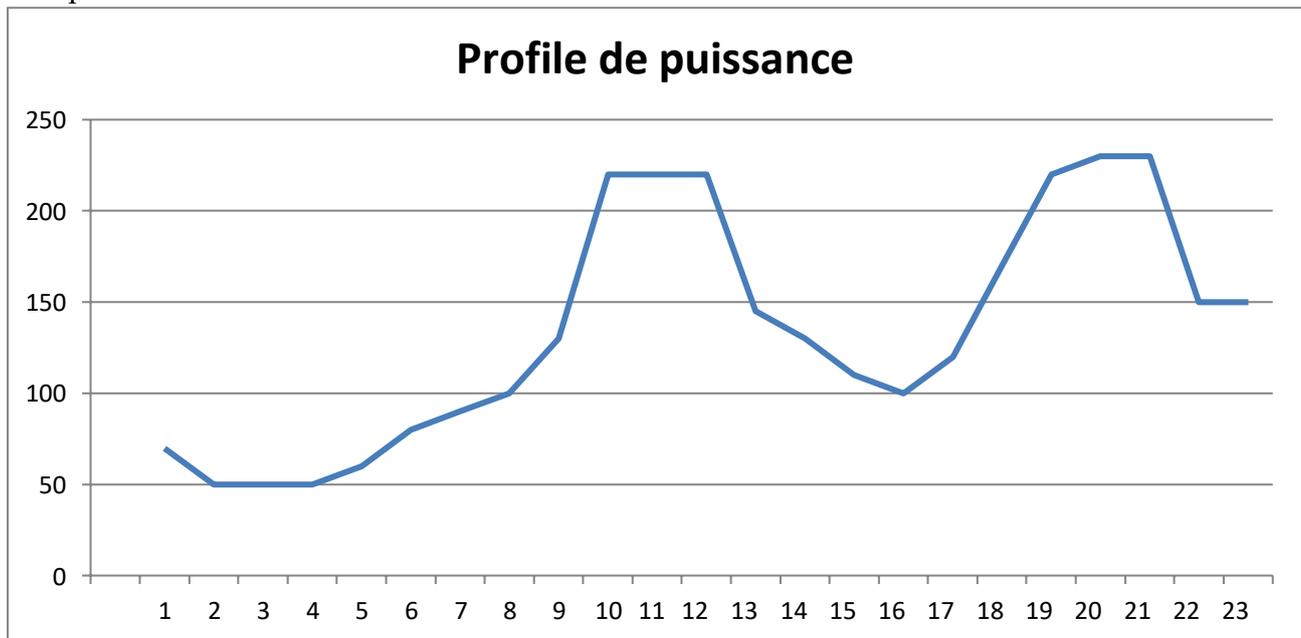
III.7 .1 méteonorme (type15.b) :

Cette composante sert à lire des données à intervalles réguliers à partir d'un fichier de données météorologiques externe, à interpoler les données (y compris le rayonnement solaire pour les surfaces inclinées) à des intervalles de temps de moins d'une heure et à les mettre à la disposition d'autres composantes de TRNSYS. Le modèle calcule également plusieurs termes utiles, y compris la température de l'eau du réseau, la température du ciel effective, et les fonctions de forçage de la saison de chauffage et de refroidissement.

Cette version de Type15 lit les données au format de fichier météo Energy Plus (EPW). Pour notre simulation on a choisi la météo d' Ain Temouchent

III.7 .2 profile du puissance (type14.b) :

Ce composant modélise un climatiseur pour des applications résidentielles ou commerciales. Le modèle nécessite un fichier externe de données de performance qui contient la capacité totale, la capacité raisonnable et la puissance en fonction de la la température extérieure du thermomètre sec, la température intérieure du thermomètre sec, la température intérieure du thermomètre mouillé et le débit de l'évaporateur.



FigureIII.2 : profile de puissance

watts
↑
h
o
u
r
s

on remarque que le profile de puissance est presque stable alors la consommation est stable pour 5h (00h/6h) de valeur entre 50 Wh et 70 Wh , la consommation maximal de puissance est entre 10h /12h et 18h /21h de valeur entre 220 wh/250Wh.

III.7 .3 convertir (type57) :

Pour accommoder les utilisateurs habitués à travailler avec des unités anglaises, la routine de conversion des unités TYPE 57 est fournie. Les utilisateurs doivent décrire le type et les unités de variables entrantes (température et C par exemple) et les unités de variables de sortie

CHAPITRE 03 : simulation d'un système photovoltaïque -éolienne

souhaitées (F par exemple) à l'aide des tableaux fournis à la fin de la documentation technique de ce composant. La routine de conversion vérifie l'entrée pour s'assurer qu'elle est du bon type de variable et d'unités, effectue la conversion de l'unité, fournissant le nouveau type de sortie et les unités à toutes les unités en fonction de cette sortie.

III.7 .4 plotter avec fichier (type65.c) :

La composante graphique en ligne est utilisée pour afficher certaines variables du système pendant que la simulation progresse. Ce composant est fortement recommandé et largement utilisé car il fournit des informations variables précieuses et permet aux utilisateurs de voir immédiatement si le système ne fonctionne pas comme souhaité. Les variables sélectionnées seront affichées dans une fenêtre de tracé distincte à l'écran. Dans ce cas du traceur en ligne Type65, les données envoyées au traceur en ligne sont automatiquement imprimées, une fois par pas de temps, dans un fichier externe défini par l'utilisateur. Les descripteurs d'unité fournis par TRNSYS (kJ/h, kg/s, degC, etc.), s'ils sont disponibles, seront imprimés avec chaque colonne de données dans le fichier de sortie.

Chapitre IV :

Résultats de l'étude

Numérique Réalisé par

TRNSYS

Chapitre IV :Résultats de l'étude Numérique Réalisé par TRNSYS

Introduction :

Dans ce chapitre, on va exposer et présentés les résultats Obtenus par la simulation numérique d'une installation d'un système d'alimentation autonome éolien - photovoltaïque pour la production de l'électricité, utilisant le code numérique Trnsys

18. Ces résultats concernent particulièrement la variation des températures au cours du temps, l'irradiation global, la température ambiante, la vitesse du vent , batterie, onduleur, panneau photovoltaïque , la turbine.

○ Résultats et discussions :

Dans cette simulation j'ai choisi 2 différent jour

- 21 juin (été) .
- 21 janvier (l'hiver).

I) Simulation pour le 21 janvier :

la variation de température, vitesse de vent , radiation durant le jour 21 janvier :

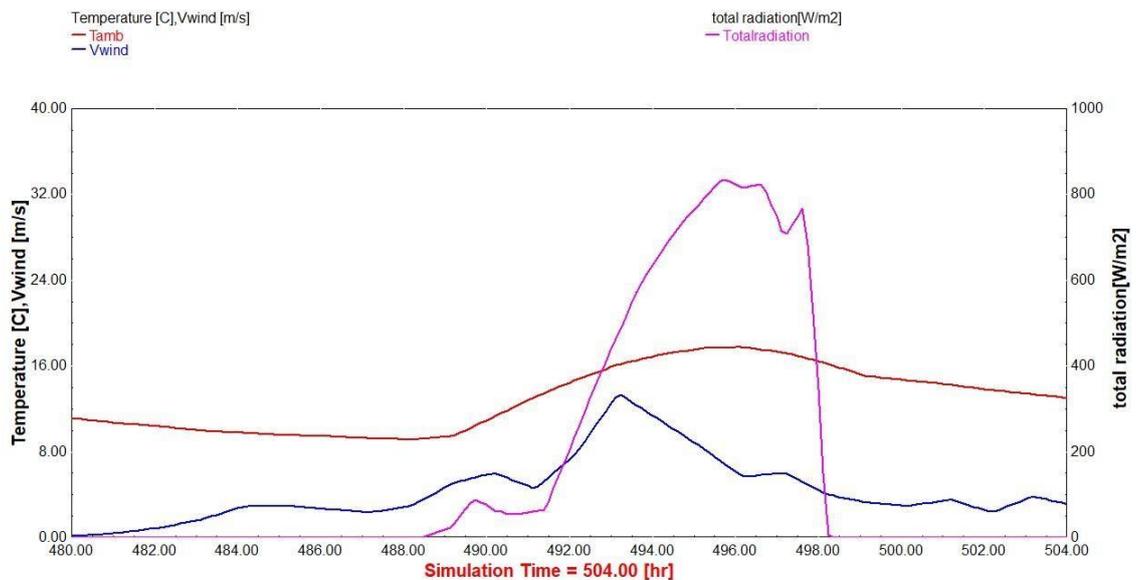


Figure IV.1 : la variation de température, vitesse de vent , radiation.

Commentaire

:

La **Figure IV.1** Représente la variation de la vitesse du vent et de la température de l'air et radiation durant le jour 21 janvier dans la ville de Ain temouchent.

Chapitre IV : Résultats de l'étude Numérique Réalisé par TRNSYS

On remarque que la température maximale et minimale enregistrées est respectivement égale 17.56° C et 8.90C.

- La vitesse du vent varie entre 1 m/s et atteindre sa valeur maximal de 12.10 m/s a 14h :05
- La courbe rose représente les valeurs du rayonnement solaire pour le jour. Sa valeur est nul pendant la nuit, sa commence d'augmenter graduellement avec le lever du soleil. Sa valeur maximal est 820 w/m².

la batterie :

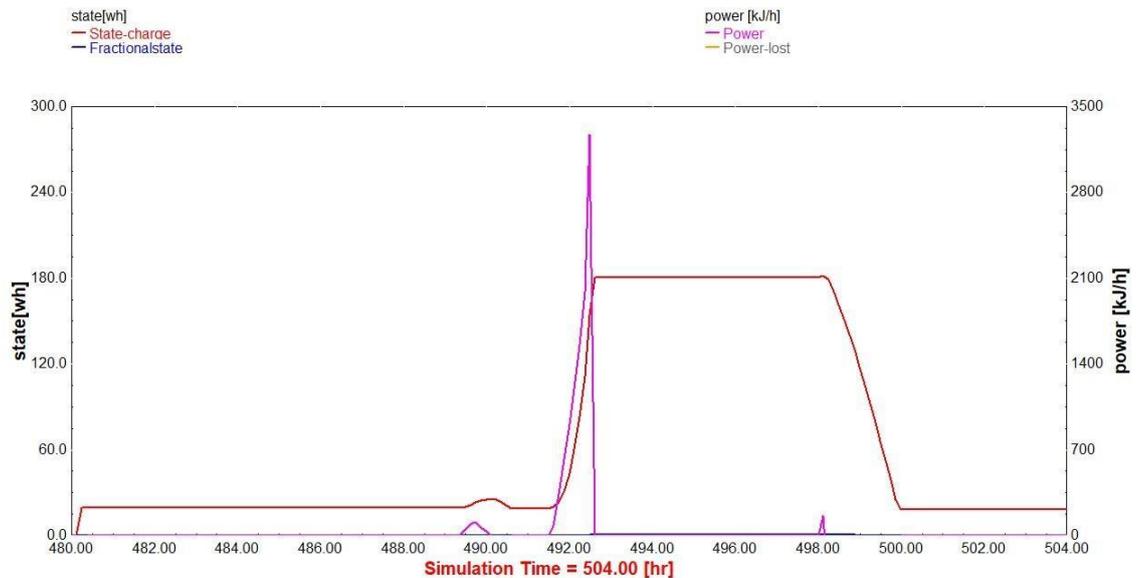


Figure IV.2 : L'état de la batterie

Commentair:

On remarque que l'état de charge de la batterie est nul durant la nuit .
La batterie commence le chargement à 8h10 et en commence de l'utiliser cette énergie durant la nuit .
La consommation de la batterie durant la charge atteindre 8100 Kj/h

panneau solaire :

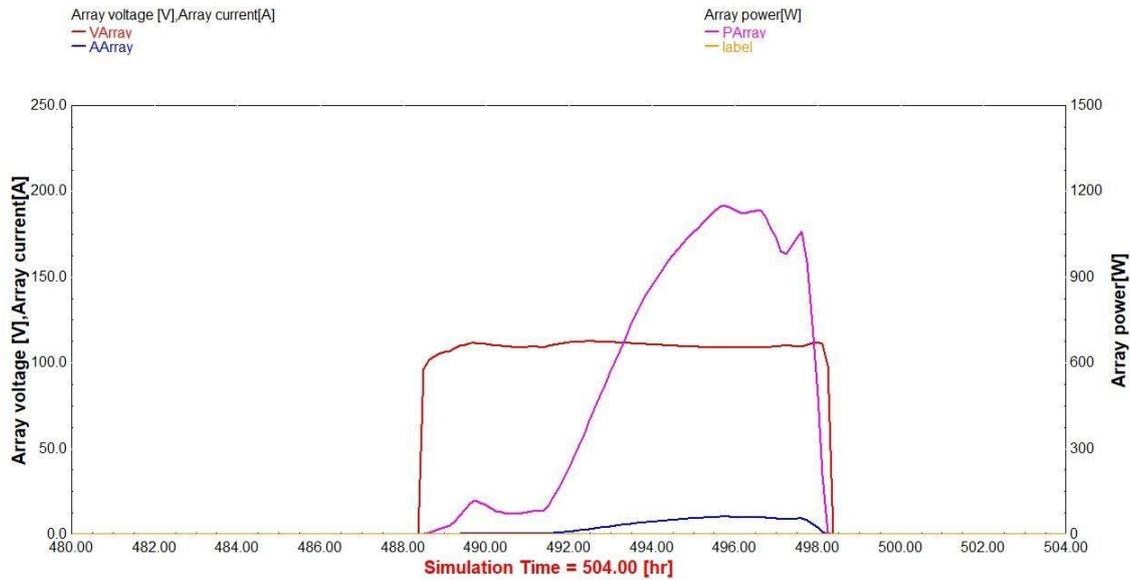


Figure IV.3 : L'état du panneau solaire.

Commentair:

- le voltage est presque stable durant le fonctionnement du panneau solaire de valeur est égal 145 v
- le courant varie entre 5A et 19.86 A
- la puissance elle commence d'augmenter avec le lever du soleil
- .Sa valeur maximale est de 1190 w et elle fait une chute libre avec le coucher du soleil.

l'onduleur :

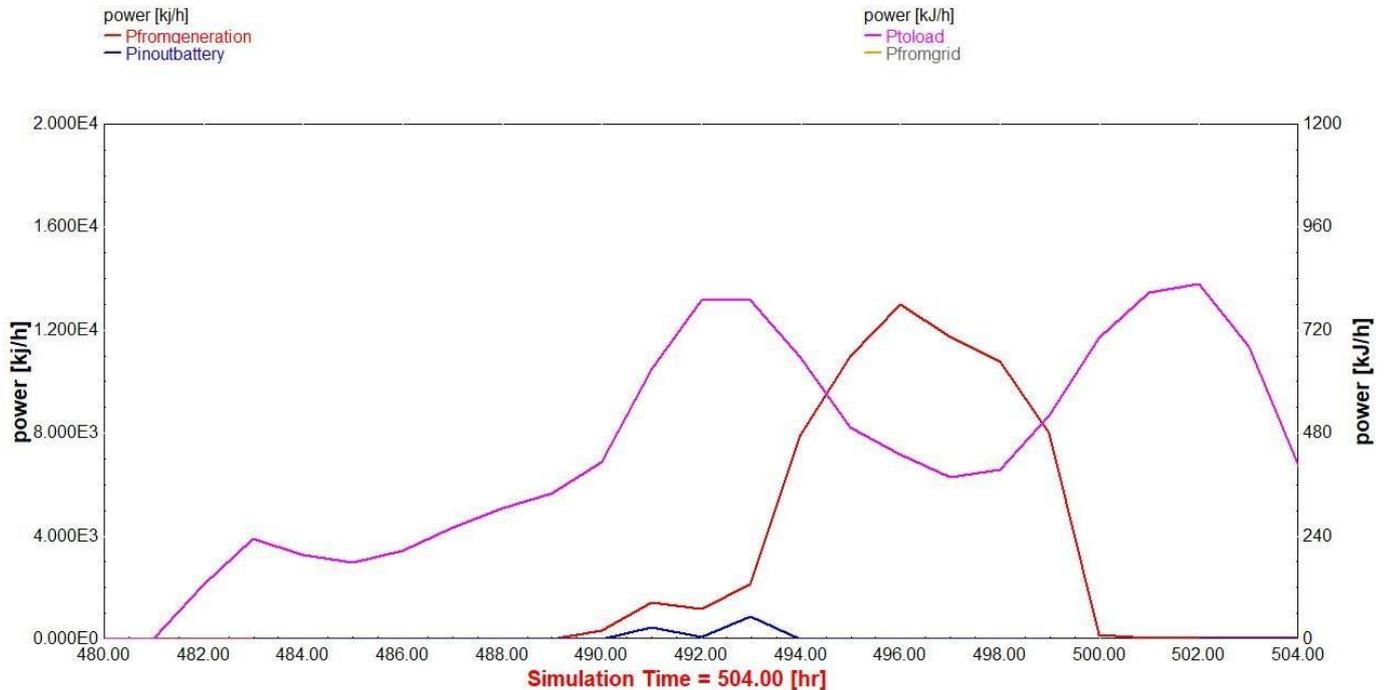


Figure IV.4 : L'état du l'onduleur

Commentaire :

- Le système photovoltaïque à aération alimente l'onduleur durant la journée à 8 h 05 jusqu'au coucher du soleil.
- la puissance qui sort de la batterie est presque zéro pendant toute la journée, cette puissance excite à 8h/11h de valeurs maximales 900 kJ/h.
- la courbe rose (puissance de l'utilisation du système) est bancale suivant l'utilisation des appareils au courant de la journée

profile de puissance :

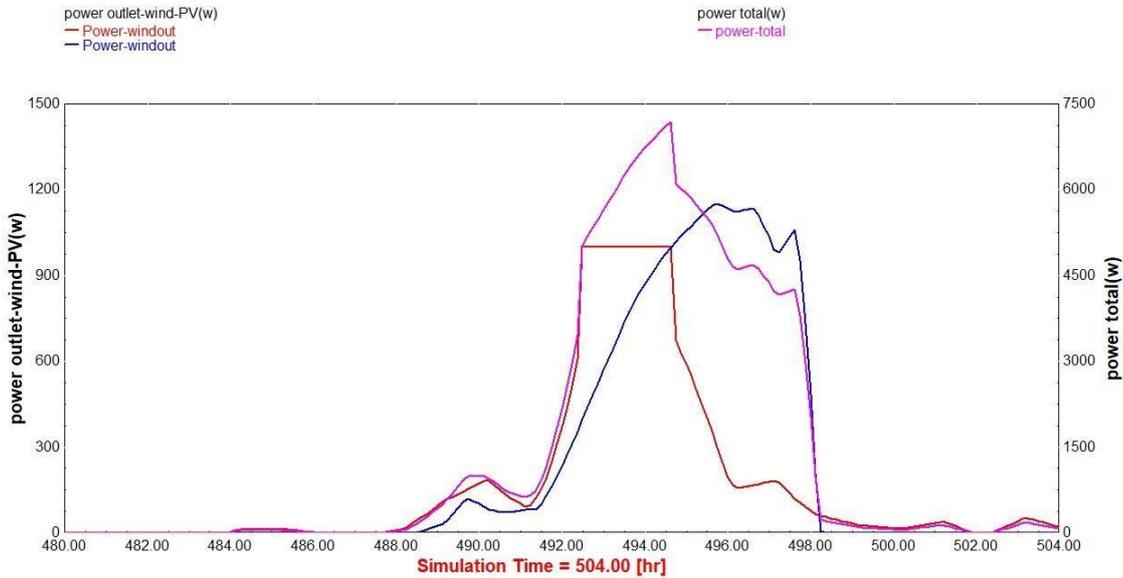


Figure IV.5 : profile de puissance

Commentaire :

- on remarque que la puissance de la turbine varie en fonction de vitesse du ventcette valeur est minimal a la nuit et maximal entre 12h et 15h
- on remarque aussi que la puissance des panneaux photovoltaïques varie en fonction de la radiation ;cette valeur est nul durant la nuit car la radiation est nul . et dans la journée se commence d'augmenter jusqu'à le coucher du soleil

-la valeur de puissance total est faible durant la nuit car le système photovoltaïque ne fonctionne pas
Cette valeur est maximale durant la journée car les deux systèmes fonctionnent au même temps .

II) Simulation pour le 21 juin :

la variation de température, vitesse de vent , radiation durant le jour 21 janvier :

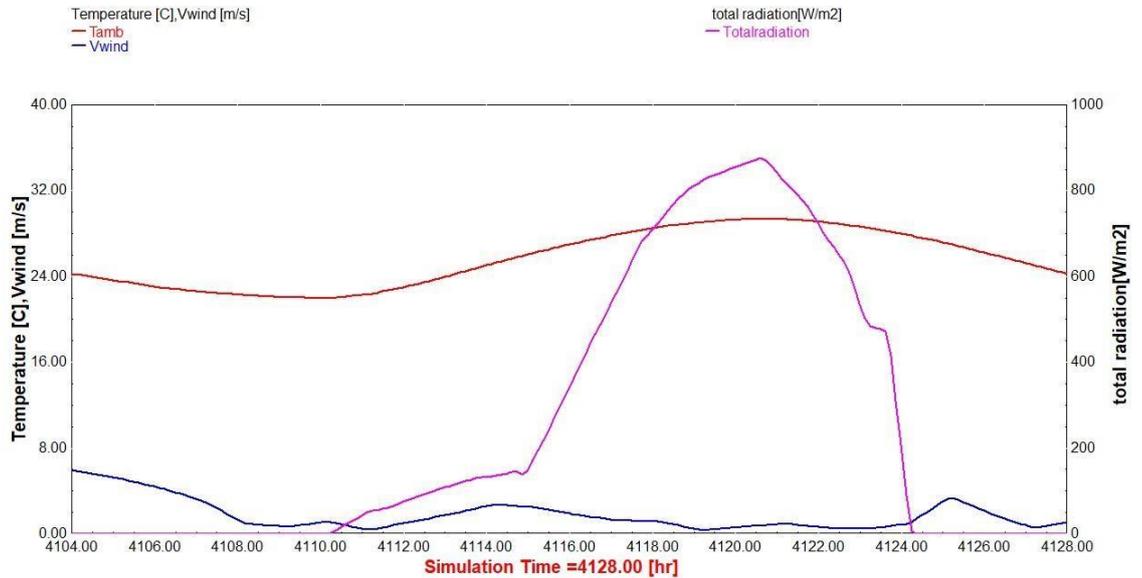


Figure IV.6 : la variation de température, vitesse de vent , radiation.

Commentaire :

La figure IVe.6 Représente la variation de la vitesse du vent et de la température de l'air et tradition durant le jour 21 juin dans la ville de Ain temouchent.

- On remarque que la température maximale et minimale enregistrée est égale 29°C et 23 C.
- La vitesse du vent est minimale durant toute la journée sa valeur maximal est de 7m/S
- La courbe rose représente les valeurs de la radiation solaire durant la journée.

sa valeur est nul pendant la nuit, ça commence d'augmenter graduellement avec le lever du soleil. Sa valeur maximale est 910 w/m2.

la batterie :

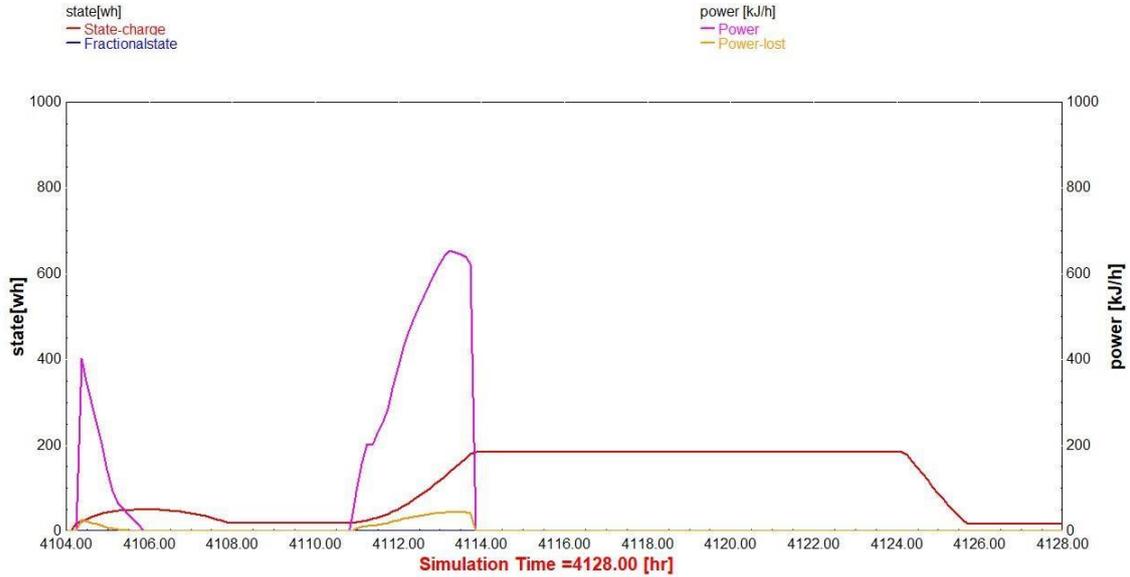


Figure IV.7 : L'état de la batterie

Commentaire :

On remarque que l'état de charge de la batterie est minimal durant la nuit .
La consommation de la batterie durant le jour est nul La puissance maximale est égal de 700 KJ /h.

panneau solaire :

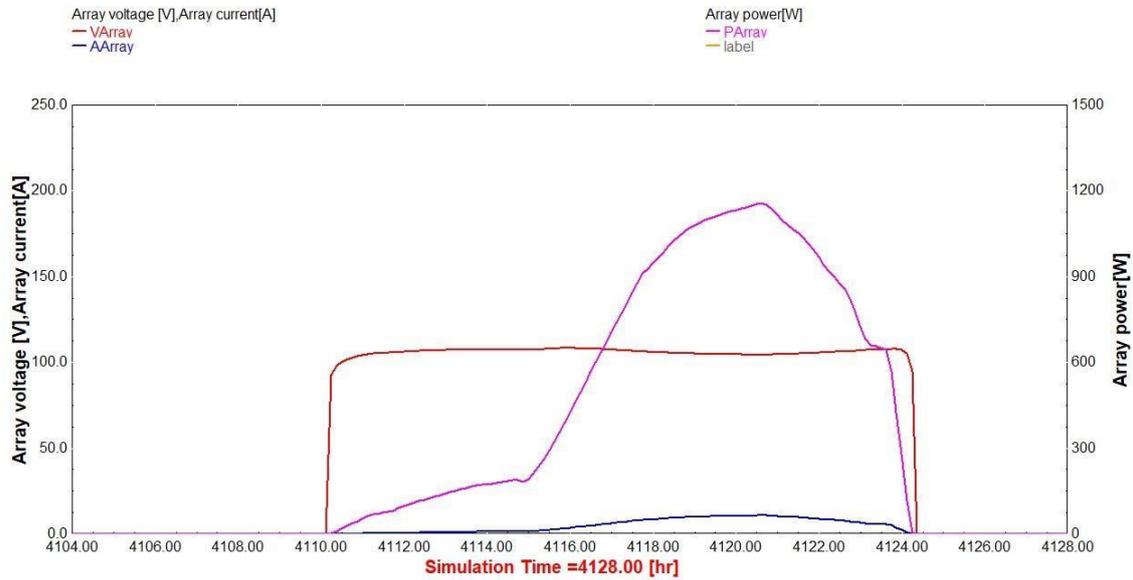


Figure IV.8 : L'état du panneau solaire.

Commentaire :

- le voltage est presque stable durant le fonctionnement du panneau solaire de valeur est égal 120 v
- le courant varie entre 2A et 19.86 A
- la puissance elle commence d'augmenter avec le lever du soleil
- .Sa valeur maximale est de 1200 w et elle fait une chute libre avec le coucher du soleil.

l'onduleur :

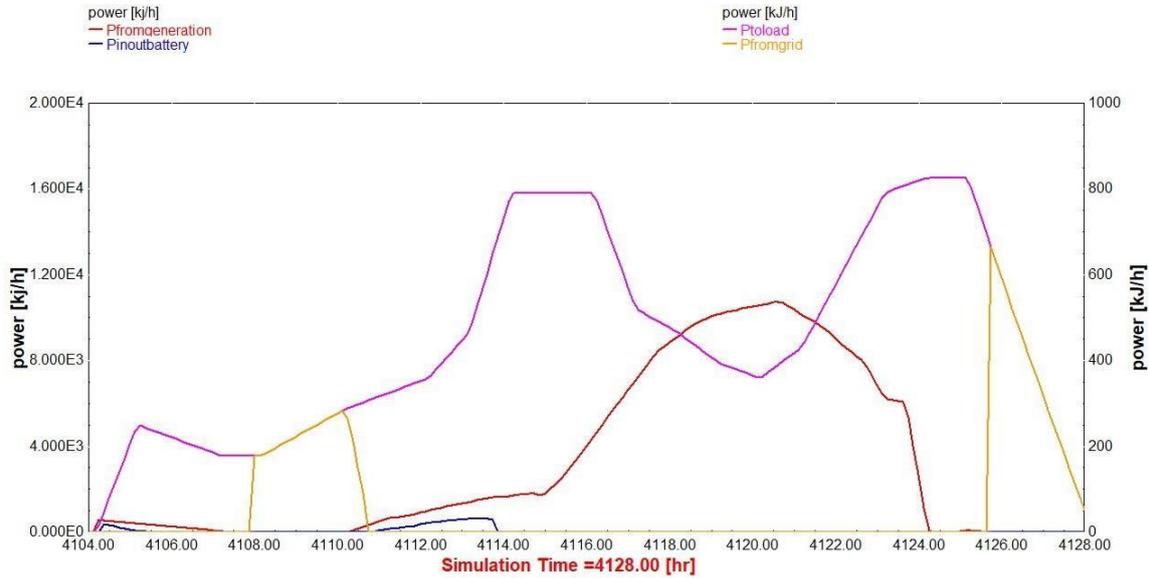


Figure IV.9 : L'état de l'onduleur

Commentaire :

- Le système d'énergie solaire alimente l'onduleur durant la journée à 6h05 jusqu'au coucher du soleil.
- la puissance sortant de la batterie est de zéro tout au long de la journée, cette puissance se détachant à 14h/18h valeur maximale de 500Kj/h.
- la courbe rose (la puissance de l'utilisation du système) est chancelante, tout comme l'utilisation des paires pendant la journée.

I.5) puissance de turbine :

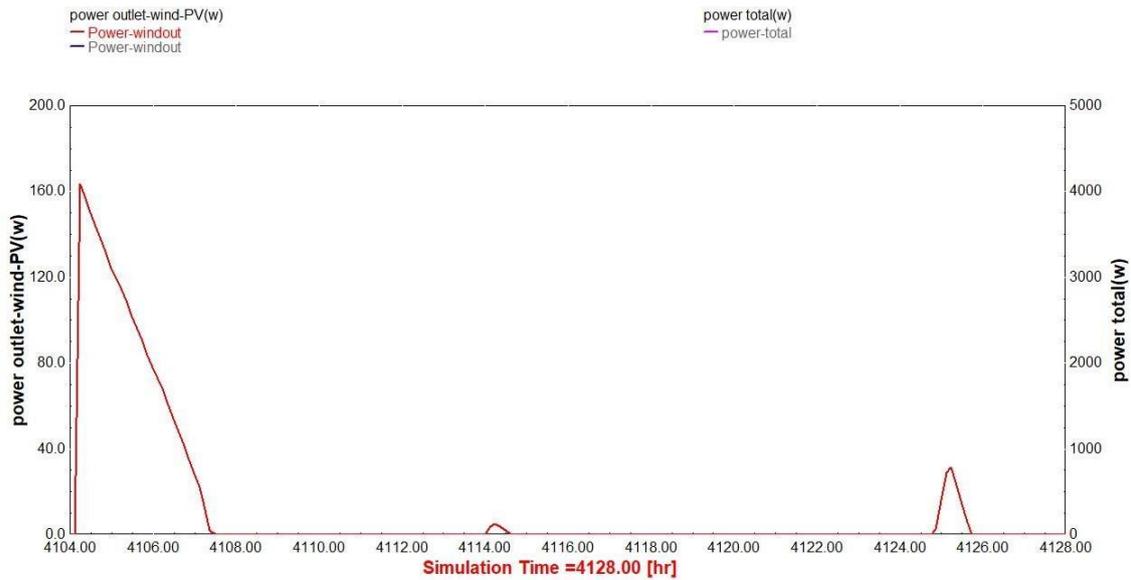


Figure IV.10 : puissance de la turbine

Commentaire :

La puissance de la notre turbine est très faible durant toute la journée car la vitesse du vent est minimale . La valeur maximale de puissance est égale à 165 w.

II.6) profile de puissance :

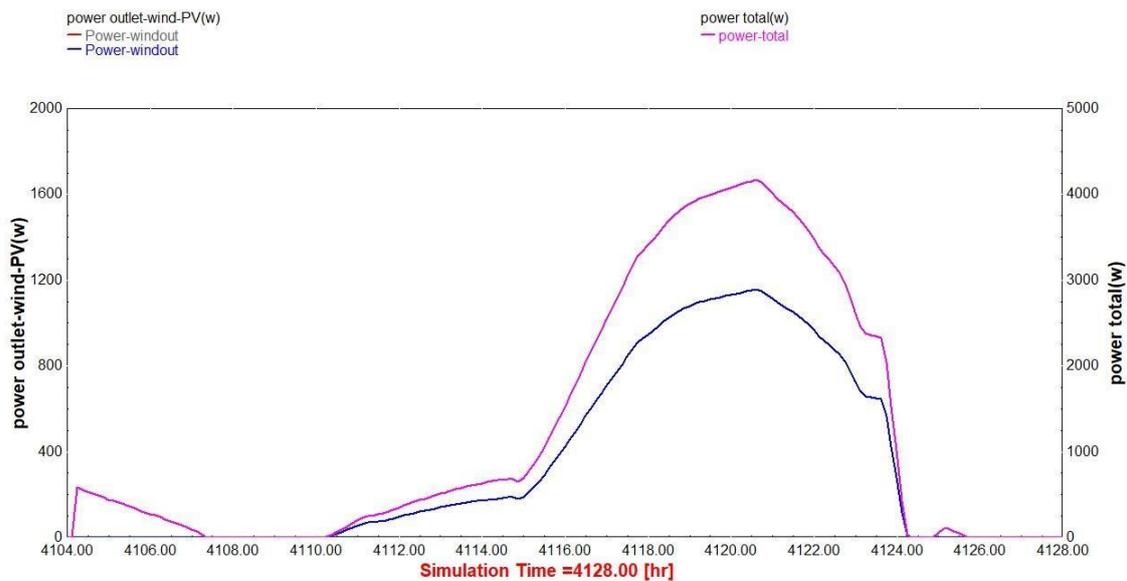


Figure IV.11 : profile de puissance

Commentaire :

-on remarque la puissance totale est générée de notre système photovoltaïque. La valeur maximale de cette puissance est de 4100W à 17h. Durant la nuit, la puissance fait un chute libre car il n'y a pas de radiation, même si dans cette journée la vitesse du vent était très faible.

Conclusion :

Les résultats de simulation ont montré un bon comportement face aux variations climatiques. Ces variations ont permis de mettre en évidence une bonne efficacité des systèmes de poursuite de puissance maximale du générateur PV.

Notre système est fiable grâce à l'hybridation de deux systèmes photovoltaïque et éolien. Ce système est faible durant la nuit, alors l'utilisation de la batterie est très nécessaire pour garantir la marche de nos appareils électriques.

La vitesse du vent à Ain temouchent est généralement faible, alors le système éolien ne donne pas de grande puissance.

Conclusion Générale

L'objectif de cette mémoire était de proposer un système hybride combinant deux sources d'énergies renouvelables, à savoir un générateur photovoltaïque pour convertir l'énergie du soleil et un générateur éolien pour convertir celle du vent. En Cette thèse étudie un système hybride éolien- photovoltaïque totalement autonome.

L'objectif de ce système est de produire l'électricité pour satisfaire à tout instant la demande d'un consommateur dans un site isolé à Ain Temouchent .

le premier chapitre de cette mémoire concernant les généralité sur le système photovoltaïque-éolienne

le deuxième concernant le dimensionnement photovoltaïque- éolienne

le troisième chapitre qui parle de la simulation d'un système photovoltaïque –éolienne le dernier chapitre

c'est Résultats de l'étude Numérique Réalisé par TRNSYS.



recherche

bibliographique

- [1] **Jean jacques, Beziane** (18 Nov.2012) – L'énergie solaire.
- [2] **Alain Cheron** – Le rayonnement solaire dans l'environnement terrestre, 2014
- [3] **Anne LABOURET et Michel Villosz** – Energie solaire photovoltaïque, 4^e édition, 2012.
- [4] **Revue Systèmes Solaires**, Journal des Énergies Renouvelables –http://www.energies-renouvelables.org/accueil_systemes_solaires.
- [5] **Serge Poignant** – L'énergie photovoltaïque, Rapport D'information, 2009, Assemblée Nationale Constitution du 4 Octobre 1958 Treizième Législature.
- [6] **Dib Wassila** – Modélisation des structures photovoltaïque : aspects et fondamentaux et applique», Thèse de Doctorat, 2010, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen.
- [7] **Alain RICAUD** – Photopiles solaires. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (Suisse), Collection « Cahiers de Chimie » (De la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés).
- [8] **Benahmed Benabdallah Nadia** – Propriétés physique des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et simulation des cellules a base de Si, Thèse de Magister, 2006, Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen.
- [9] Guerida Siham et Otman Abdelwafi (2019), 'Modélisation et control d'un système de pompage d'eau connecté à l'éolienne,' Mémoire de master Commande électrique, Université Ahmed Draia, Adrar.
- [10] P. D. Fleming and S. D. Proben (1984), "The Evolution of Wind-Turbines: An Historical Review". Applied Energy 18, pp: 163-177, School of Mechanical Engineering, Cranfield Institute of Technology, Bedford.
- [11] F. Poitiers, «Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-Machine asynchrone à cage autonome-Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau» Thèse de Doctorat Université de Nantes, 2003.
- [12] Site internet: www.azocleantech.com
- [13] Site internet: www.sciencedirect.com/topics/engineering/vertical-axis-wind-turbine
- [14] Akrabou Omar, Aichaoui Belkhire. (2017), 'Etude des paramétrés météorologiques intervenant dans la simulation d'un parc éolien-cas de site d'Adrar', Mémoire de master Physique énérgitique, Université Ahmed Draia, Adrar.
- [15] www.consoglobe.com/wp-content/uploads/2014/09/Eolienne-axe-vertical.jpg
- [16] Site internet: <https://image.made-in-china.com/44f3j00NRiEHPrIVfoV/500W-Horizontal->

[17] Axis-Wind-Turbine-Generator-for-Sale.webp

[18] Site internet: <https://electricalacademia.com/renewable-energy/vertical-axis-wind-turbine-vawt-working-types-advantages-disadvantages>

[19] <http://www.journal-eolien.org/tout-sur-l-eolien/wp-content/uploads/2018/01/Credit-M->

[20] A-Guichard-ObservER.jpg

[21] <https://electricalacademia.com/renewable-energy/wind-turbine-parts-functions/>

[22] B. Belabes, A. Youcefi, O. Guerri, M. Djamaï, A. Kaabeche. (2015), « Evaluation of wind energy potential and estimation of cost using wind energy turbines for electricity generation in north of Algeria », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 51, Pages : 1245-1255.

[23] https://scihub.se/https://www.researchgate.net/publication/235635627_Review_and_u se_of_the_Algerian_renewable_energy_for_sustainable_development.

[24] Kateb Baha Eddine (2020), « Amélioration des performances d'un system de pompepage éolienne ».Mémoire de master Automatique et informatique industrielle, Université de Biskra.

[25] A. Harrouz, A. Benatiallah, O. Harrouz. (2021), “ Modélisation d'une Eolienne autonome couplée avec Génératrice Synchronne à Aimant Permanent”, la conférence nationale sur les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique "CNEREE'2021", Université Adrar, Algérie.

[26] Boudia, S. M., Benmansour, A., & Hellal, M. A. T. (2016). Wind resource assessment in Algeria. *Sustainable cities and society*, 22, 171-183.

A. Harrouz, Meriem Abbas, Ilhami Colak, Korhan Kayisli. (2019), “Information Systems and RenewableEnergy in Algeria”,Conférence Algérienne des Grands Réseau