



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



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE: Technologie
DEPARTEMENT : Electrotechnique

Support de Cours

**(Destiné aux étudiants de première année master filière
électrotechnique)**

Energies Renouvelables

Dr. BOUCHIBA Oum el kheir

2021-2022

AVANT-PROPOS

Ce polycopié est destiné à être utilisé comme un manuel par les étudiants en première année master en Electrotechnique dans le domaine des énergies renouvelables. Il a été rédigé dans le but de permettre d'avoir un outil de travail et de référence recouvrant les connaissances qui leur sont demandés. Le manuscrit est constitué de cours, il est conforme aux programmes agréés par le ministère. Sa présentation didactique est le fruit de plusieurs années d'expérience pédagogique par l'auteur. Son contenu résulte de la lecture de nombreux ouvrages et documents dont les plus importants sont cités dans les références bibliographiques.

La vie humaine demande beaucoup d'utilisation d'énergie pour se préserver dans le temps. En premier lieu a été l'utilisation des sources fossiles (Charbon, pétrole, gaz), qui sont des sources épuisables. Puis, vu les besoins intensifs de l'énergie ; l'évolution des sciences physiques sur les matériaux, le nucléaire fut comme source d'énergie fissile très forte face devant les fossiles, après quoi il est avéré que les sources fissiles sont dangereuses pour tous les êtres vivants du fait des fuites des radiations nucléaires.

Le remède remplaçant des sources fossiles et fissiles, c'est bien les sources des énergies renouvelables ou énergies vertes pour protéger et préserver la vie humaine. Les énergies sont considérées comme renouvelables lorsqu'elles prennent pour source des éléments naturellement et continuellement régénérés. Elles sont gratuites et inépuisables. C'est le cas du soleil, du vent ou encore de l'eau.

Après un bref bilan des ressources énergétiques exploitables, nous nous intéresserons dans ce cours aux systèmes de production existants, en particulier relatifs aux sources solaires et éoliennes.

Objectif :

Permettre aux étudiants d'acquérir des connaissances théoriques sur les énergies renouvelables : gisement des sources des énergies renouvelables, types des systèmes de conversion des énergies renouvelables, et la conversion d'énergie pour chaque système de conversion à énergies renouvelables.

Organisation :

Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables.

Ce chapitre aborde les sources et les types des énergies renouvelables qui se classent en six catégories différentes : l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la biomasse, l'énergie géothermique, et les énergies marines.

Chapitre II : Systèmes de conversion de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne prend sa force du vent. Les éoliennes sont placées à des endroits stratégiques où le vent est constant et atteint des vitesses importantes. Ainsi, le vent est accumulé et converti en énergie électrique grâce à des générateurs électriques. Le chapitre présentera une introduction au gisement éolien, l'architecture des systèmes de conversion éolienne, et une étude sur le potentiel éolien et la conversion d'énergie éolienne.

Chapitre III : Systèmes de conversion d'énergie solaire photovoltaïque.

Parmi les différentes énergies renouvelables, on retrouve en tête, l'énergie solaire. L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant de photons, compris dans le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en énergie électrique. Le chapitre 3 sera consacré au gisement solaire, au principe de la conversion photovoltaïque (effet photovoltaïque) et aux différentes architectures des systèmes photovoltaïques.

Chapitre IV : Systèmes de conversion d'énergie solaire thermique

L'énergie solaire thermique est l'énergie thermique du rayonnement solaire. Elle est captée dans le but d'échauffer un fluide (liquide ou gaz). L'énergie reçue par le fluide peut être ensuite utilisée directement (eau chaude sanitaire, chauffage, etc.). Ce chapitre se concentre sur les différents types des capteurs solaires thermiques puis il explique le principe de la conversion d'énergie solaire thermique et enfin il donne un aperçu sur les centrales thermiques de production électrique.

Avant-propos	i
Table de la matière	ii

Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables

I.1.	Introduction	01
I.2.	Énergies renouvelables, définition, et ressources	01
I.2.1.	Énergie solaire	01
I.2.2.	Énergie éolienne	01
I.2.3.	Énergie hydraulique	01
I.2.4.	La biomasse	02
I.2.5.	La géothermique	02
I.2.6.	Les énergies marines	02
I.3.	Exploitation des énergies renouvelables	03
I.3.1	Energie de la biomasse	03
I.3.2	Energies géothermiques	05
I.3.2.1	Exploitation des ressources de faible profondeur	06
I.3.2.2	Exploitation de la géothermie profonde	07
I.3.3	Exploitation de l'énergie marinée	08
I.3.3.1	Energie des marées	08
I.3.3.2	Energie des courants marins	08
I.3.3.3	Autres sources d'énergies marines	09
I.3.4	Exploitation de l'énergie hydraulique	09
I.3.5	Exploitation de l'énergie solaire	10
I.3.5.1	L'énergie solaire passive	10
I.3.5.2	L'énergie solaire photovoltaïque	11
I.3.5.3	L'énergie solaire thermique	11
I.3.6	Exploitation de l'énergie éolienne	12
I.4	Sources des énergies renouvelables en Algérie	13
I.5	Exploitations des énergies renouvelables en Algérie	13

Chapitre II : Système de conversion de l'énergie éolienne

II.1	Introduction	14
II.2	Contexte actuel	14
II.2.1	Capacité éolienne mondiale	14
II.2.2	Potentiel énergétique du gisement éolien en Algérie	15
II.3	Le vent, son origine et ces caractéristiques	17
II.3.1	Type de vent	17
II.3.2	Caractérisation du vent	18
II.3.4	Mesure des paramètres du vent	21
II.3.5	La rose du vent	23
II.4	Système de conversion éolien	24
II.4.1	Les éoliennes à axe vertical	24
II.4.2	Les éoliennes à axe horizontal	25
II.4.3	Conversion éolienne	25
II.4.4	Composantes d'un aérogénérateur	27
II.4.5	Classifications des éoliennes selon la puissance	28
II.5	Modélisation du potentiel éolien	28
II.5.1	Modélisation du vent	28
II.5.1.1	Variabilité temporelle du vent	28
II.5.1.2	Variabilité spatiale du vent	30
II.5.2	Modélisation du potentiel énergétique éolien	31
II.5.2.1	Densité de puissance disponible	32
II.5.2.3	Puissance éolienne récupérable	33
II.5.2.4	Puissance éolienne moyenne utilisable	34
II.5.2.5	Puissance éolienne moyenne utile	36

Chapitre III : Système de conversion solaire photovoltaïque

III.1	Introduction	37
-------	--------------	----

III.2	Gisement solaire	37
III.3	Rayonnement solaire	38
III.4	Effet photovoltaïque	40
III.5	Cellule photovoltaïque	41
III.5.1	Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque	42
III.5.2	Circuit équivalent d'une cellule solaire	42
III.5.3	Modèle mathématique d'une cellule solaire	42
III.6.	Association des cellules photovoltaïques	43
III.6.1.	Association en série	43
III.6.2.	Association en parallèle	44
III.7.	Type de cellules photovoltaïques	44
III.7.1	Les cellules monocristallines	44
III.7.2	Les cellules poly-cristallines	44
III.7.3	Les cellules amorphes	44
III.8	Générateur photovoltaïque	46
III.8.1	Circuit équivalent et modèle mathématique d'un GPV	46
III.8.2	Influence de l'irradiation et de la température	47
III.9	Type des systèmes photovoltaïques	49
III.9.1	Systèmes autonomes	49
III.9.2	Système hybride	49
III.9.3.	Système photovoltaïque connecté au réseau électrique	49

Chapitre IV : Système de conversion solaire thermique

IV.1	Introduction	50
IV.2	Définition et catégories	50
IV.2.1	Technologie solaire thermique à basse température	50
IV.2.2	Technologie solaire thermique à haute température	51
IV.3	Différents capteurs solaires thermiques	51

IV.3.1 Capteur plan, non vitré	51
IV.3.2 Capteur plan, vitré	51
IV.3.3 Capteur à tubes sous vide	52
IV.4 Technologie solaire thermique basse température active	52
IV.4.1 Chauffe-eau solaire	52
IV.4.2 Plancher solaire	53
IV.4.3 Rafraîchissement solaire	53
IV.5 Technologie solaire thermique haute température	54
IV.5.1 Réflecteurs cylindro-paraboliques	54
IV.5.2 Systèmes à réflecteur parabolique	55
IV.5.3 Concentrateur à tour	56
IV.6 Etude énergétique d'un capteur solaire plan	57

Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables

I.1. Introduction

Dans un souci d'économie des énergies fossiles limitées, et dans une démarche résolument éco-responsable, le développement des énergies renouvelables est en plein essor. Mais où trouve-t-on ces énergies renouvelables ?

I.2. Énergies renouvelables, définition, et ressources

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil, la Terre (l'énergie géothermique) et l'eau. Les énergies renouvelables se classent en six catégories différentes :

I.2.1. Énergie solaire

Parmi les différentes énergies renouvelables, on retrouve en tête, l'énergie solaire. Le soleil est notre principale source d'énergie renouvelable. Captée par des panneaux photovoltaïques et des centrales solaires thermiques, l'énergie solaire permet de produire de l'électricité. Il s'agit de la technologie active. Il existe aussi la technologie passive qui consiste à orienter les bâtiments selon la position du soleil afin de profiter pleinement de ses rayons grâce notamment à des matériaux spécifiques placés dans les murs et les fenêtres.

I.2.2. Énergie éolienne

L'énergie éolienne prend sa force du vent. Les éoliennes sont placées à des endroits stratégiques où le vent est constant et atteint des vitesses importantes. Ainsi, le vent est accumulé et converti en énergie électrique grâce à des générateurs électriques. L'énergie éolienne ne se limite pas à l'électricité puisqu'elle permet de produire de l'énergie dite mécanique, c'est-à-dire qu'elle sert à pomper de l'eau et faire marcher certaines installations comme les voiliers ou les moulins à meule par exemple.

I.2.3. Énergie hydraulique

L'énergie hydraulique est également considérée comme une énergie renouvelable puisqu'elle utilise l'eau, ressource renouvelable grâce aux phénomènes naturels d'évaporation et de précipitations. Les barrages et les centrales hydroélectriques canalisent la force de l'eau pour la transformer en électricité. Aujourd'hui, l'énergie hydraulique représente 19 % de la production totale d'électricité dans le monde.

I.2.4. La biomasse

La biomasse est la toute première énergie renouvelable exploitée par l'Homme depuis la découverte du feu. Le principe de la biomasse est d'utiliser l'énergie solaire contenue dans les

Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables

végétaux et les déchets organiques, et de créer de l'électricité grâce à la combustion de ces éléments. Un autre procédé, la biomasse par méthanisation, permet de convertir cette énergie en biogaz ou en biocarburant, grâce à la fermentation.

I.2.5. La géothermie

Dans la liste des énergies renouvelables, on retrouve l'énergie géothermique. Cette énergie provient de la terre elle-même. Le magma présent au centre de la terre, réchauffe naturellement la croûte terrestre. Le but de la géothermie est d'extraire cette chaleur stockée dans des réservoirs souterrains et de la transformer en électricité et en chauffage. Les pompes à chaleur utilisent ce procédé de chaleur naturelle, à petite échelle pour chauffer ou refroidir un espace donné.

I.2.6. Les énergies marines

Les mers et les océans couvrent 70 % de la planète et pourtant les énergies marines sont très peu exploitées. Il existe différentes énergies marines :

- L'énergie thermique consiste à exploiter les variations de températures présentes à différentes profondeurs.
- L'énergie des courants marins se concentre sur la force des courants grâce à des hydroliennes avec un système de pâles comme les éoliennes.
- Les marées, en descendant ou en montant, créent de l'énergie par l'intervention de turbines et de générateurs électriques. [1]

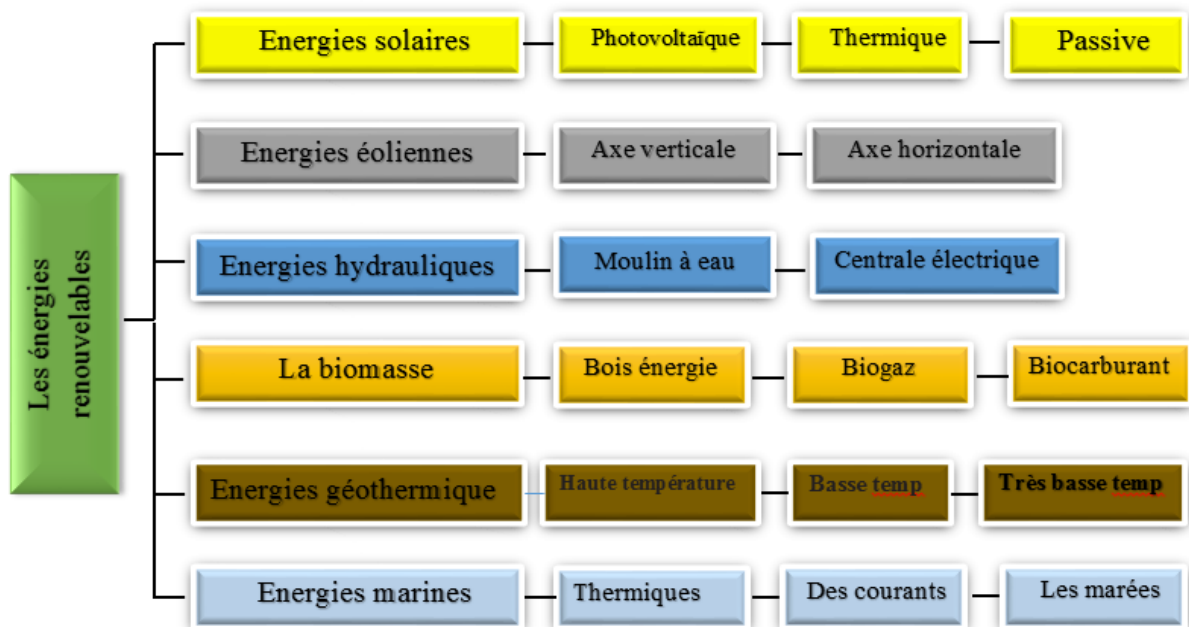


Figure I.1 : Structures opérant dans le domaine des énergies renouvelables

I.3. Exploitation des énergies renouvelables

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20-30 ans, tout système énergétique durable sera basé

Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables

sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Naturellement décentralisées, il est intéressant de les exploiter sur le lieu de consommation, en les transformant directement soit en chaleur, soit en électricité selon les besoins.

➤ **Production de chaleur par les sources renouvelables**

La chaleur renouvelable peut être produite à partir du bois, de la biomasse, des pompes à chaleur, de la géothermie, du solaire thermique et de la récupération d'énergie [2].

➤ **Production de l'électricité par les sources renouvelables**

L'électricité renouvelable peut être produite à partir de l'éolien, du solaire photovoltaïque, du bois, de la biomasse, de la géothermie, des énergies marines, de l'hydroélectricité et de la solaire thermodynamique.

Ce type d'énergie ne couvre encore que 20% de la consommation mondiale d'électricité. Nous notons que l'hydroélectricité existe depuis près d'un siècle et constitue environ 16 % de la production mondiale d'électricité et représente 92,5% de l'électricité issue des énergies renouvelables (biomasse 5,5%, géothermie 1,5%, éolien 0,5 % et le solaire 0,05 %) [3].

I.3.1 Energie de la biomasse

Chauffage, électricité, biocarburants, industrie chimique... la biomasse est une source d'énergie dont les usages peuvent être très variés !

L'utilisation de la biomasse pour chauffer des usines, des bâtiments, voire des quartiers entiers... Il peut s'agir de bois sous différentes formes (bûches, plaquettes forestières, écorces, bois de récupération), mais également d'autres éléments de la biomasse (résidus de récolte, déchets ménagers, déchets d'usine papetière...). Ces installations peuvent même **produire de l'électricité**. Le principe s'appelle la **cogénération**... un mot complexe pour un concept simplissime : une partie de la chaleur produite est utilisée pour chauffer un circuit d'eau, entraîner une turbine grâce à la vapeur, et ainsi produire de l'électricité [4].

Principe :

- **Les chaufferies bois :** Ce sont des usines qui brûlent le bois pour produire de la chaleur et/ou de l'électricité. Ces chaufferies comportent une chaudière et un silo de stockage du combustible (il s'agit le plus souvent de bois sous la forme de plaquettes ou de petits granulés, car sous ces formes particulières, le bois peut être transporté jusqu'au foyer de la chaudière de façon automatique). Les fumées produites lors de la combustion sont évacuées par un conduit qui filtre les particules et enfin, un réseau de canalisations enterrées et isolées distribue la chaleur vers les différents bâtiments et/ou la turbine pour produire de l'électricité.

Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables

- **Les usines d'incinération de déchets :** Il est possible de produire de la chaleur à partir de nos déchets en les brûlant. Cette technique s'appelle l'incinération. Si l'incinérateur est à cogénération, on peut également produire de l'électricité. Cette technique est intéressante d'un point de vue environnemental sous plusieurs angles :

- elle permet de tirer le meilleur parti du contenu énergétique des déchets en produisant de la chaleur susceptible d'alimenter un réseau de chaleur urbain et/ou d'être transformée en électricité ;
- elle permet de diminuer fortement le volume des déchets (90 % de réduction environ) et leur masse (70 % environ) ;
- elle émet moins de gaz à effet de serre que le stockage, qui a inévitablement des fuites de méthane (CH_4), un puissant gaz à effet de serre, issu de la dégradation des déchets organiques sans oxygène.

- **Production de biogaz par méthanisation :** La méthanisation est le processus de fermentation de la matière organique végétale ou animale dans un milieu dépourvu d'oxygène (anaérobie). Cette réaction produit du biogaz, composé de 50 % à 70 % de méthane (CH_4) et de dioxyde de carbone (CO_2). Ces deux gaz étant inflammables, il suffit donc de brûler le biogaz pour produire de la chaleur et/ou de l'électricité. La méthanisation et l'utilisation du biogaz permettent à la fois de :

- réduire le volume de déchets ;
- récupérer l'énergie dégagée par la décomposition des déchets organiques pour produire de la chaleur et/ou de l'électricité (valorisation énergétique) ;
- augmenter la part de production d'énergie renouvelable ;
- réduire les émissions de gaz à effet de serre en valorisant le méthane dégagé lors de la décomposition des déchets et en équilibrant le bilan du CO_2 (le CO_2 dégagé par la combustion du biogaz est compensé par le CO_2 absorbé par les végétaux lors de leur croissance).

Selon les cas, les déchets mis dans des unités de méthanisation peuvent avoir des origines très variées : déchets verts et agricoles (comme le lisier, la paille, la tonte de gazons, les déjections animales, les boues et les graisses des stations d'épuration...) mais également les déchets industriels (provenant des industries papetières, agroalimentaires et pharmaceutiques).

- **Les biocarburants :** la biomasse pour se déplacer : Les céréales, les betteraves, les huiles de colza, de tournesol, de soja ou de palme... tout cela, c'est encore de la biomasse ! Ce

Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables

sont aussi des matières premières de base pour fabriquer des carburants, appelés biocarburants. Deux techniques existent pour transformer les végétaux en carburants :

- les huiles de colza, de tournesol, de soja ou de palme peuvent être extraites et modifiées grâce à des réactions chimiques pour donner naissance à un produit, appelé **biodiesel**, que l'on incorpore au gazole ;
 - le sucre des betteraves, de la canne ou des céréales, permet de fabriquer un alcool appelé **éthanol**, que l'on incorpore à l'essence.
- **Faire de la chimie** : Il y a quelques années, le pétrole était le roi de l'industrie chimique ! Il permet de fabriquer des plastiques, des solvants pour les peintures, des matériaux de toutes sortes, etc. Mais la biomasse, renouvelable et beaucoup moins polluante, s'impose de plus en plus car les chimistes ont trouvé des méthodes pour fabriquer foule de produits à partir de cette matière première.

I.3.2 Energies géothermiques

La géothermie est la chaleur de la terre. Elle se traduit par l'augmentation de la température du sous-sol avec la profondeur. C'est une énergie naturelle, disponible partout, 24 h sur 24h. Elle peut être exploitée pour de nombreuses applications. Ainsi, avec la géothermie, il est possible de produire de l'électricité, de la chaleur mais aussi du froid [2].

La géothermie s'intéresse à l'exploitation des sources d'eau chaude en profondeur. Elle constitue l'une des principales ressources d'énergie renouvelable dans le monde. Il existe à travers le monde deux types principaux de géothermie illustrée dans la figure (I.2) :

- **la géothermie moyenne et haute énergie (ou profonde)** : elle concerne les gisements des zones continentales actives qui se caractérisent par des températures supérieures à 150 °C. Elle est destinée principalement à la production d'électricité ;
- **la géothermie basse énergie (ou de surface)** : elle concerne les gisements des zones des plates formes continentales stables, recouvertes de terrains sédimentaires caractérisées par une température comprise entre 30 °C et 150 °C. Elle est destinée principalement au chauffage urbain et au chauffage de serres [5].

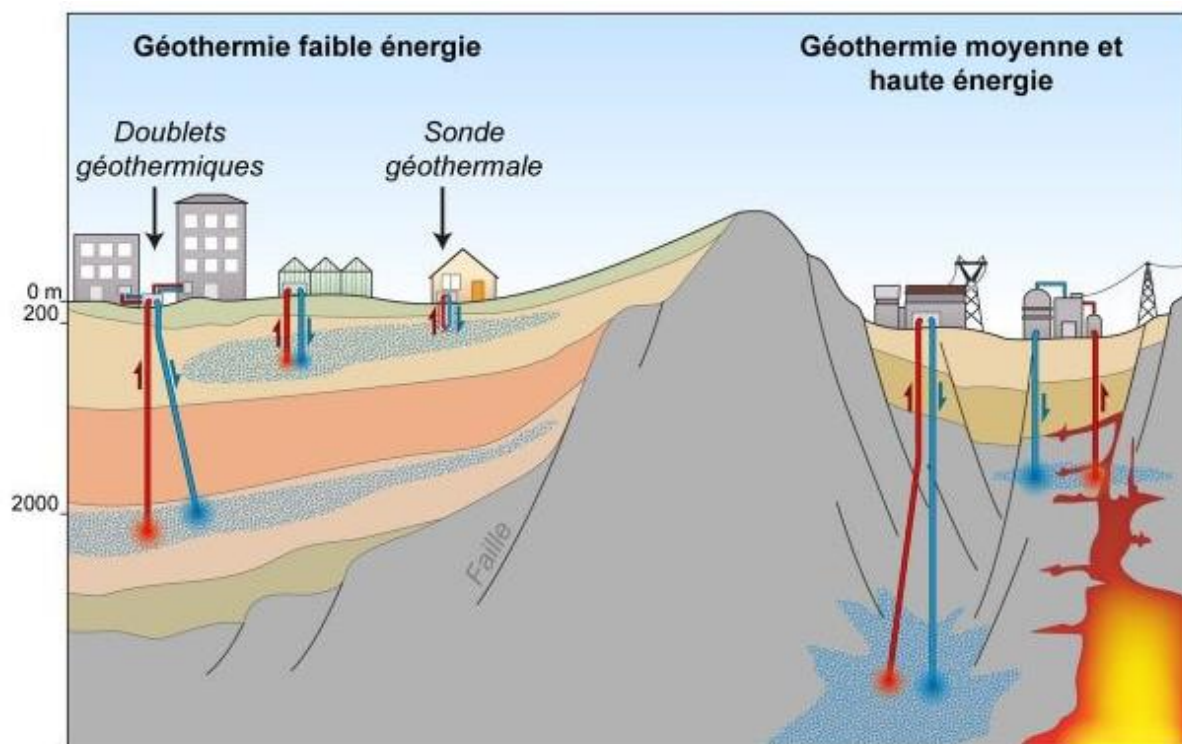


Figure I.2 : Types de géothermie [5]

La profondeur de ces exploitations varie en fonction de la géologie du sous-sol. En effet, sur Terre, la température augmente en moyenne de 30°C tous les kilomètres (c'est ce qu'on appelle le «**gradient géothermique**»), mais ce gradient n'est pas identique en tout point du globe et peut varier localement très fortement, atteignant parfois les 100°C par kilomètre. Plus le gradient sera élevé, moins il faudra creuser pour trouver des températures élevées.

I.3.2.1 Exploitation des ressources de faible profondeur

Les ressources de faible profondeur sont valorisées grâce à des pompes à chaleur pour couvrir des besoins de chauffage, de froid et/ou d'eau chaude sanitaire (ECS). La température de ces ressources peu profondes varie peu, garantissant aux pompes à chaleur associées des performances annuelles stables. Pour exploiter des ressources superficielles, il est nécessaire de distinguer les techniques fonctionnant par échange avec le sol de celles utilisant l'eau des aquifères, figure (I.3).

Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables

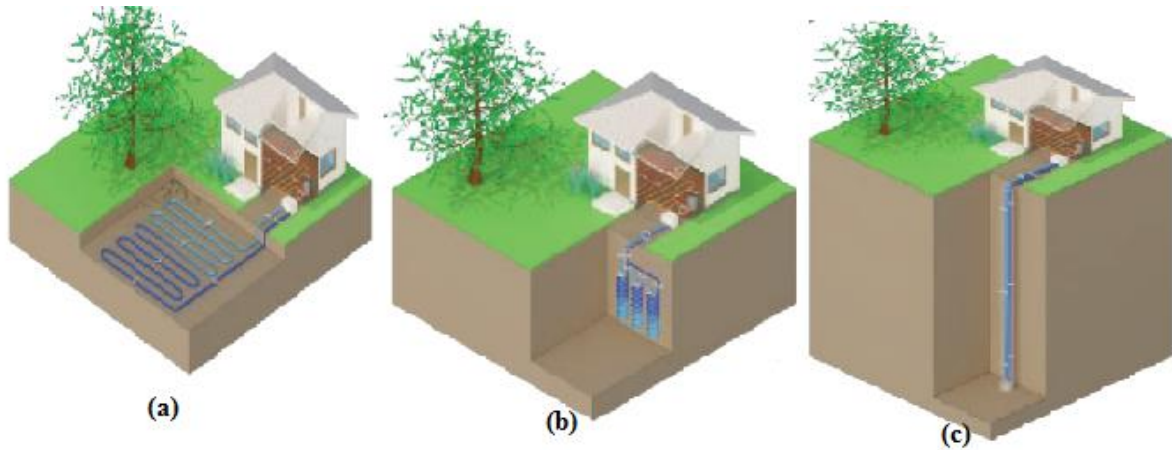


Figure I.3 : Echange de la chaleur avec le sol [6]

I.2.3.2 Exploitation de la géothermie profonde

La géothermie profonde consiste en la valorisation de ressources géothermales présentes dans des aquifères, c'est-à-dire des formations rocheuses perméables dans lesquels circule de l'eau, situés entre 400 et 2 500 m de profondeur. Dans le cas de la production de chaleur, son exploitation repose sur un doublet de forages constitué d'un puits de production et d'un puits de réinjection. L'eau géothermale pompée jusqu'à la surface cède sa chaleur dans un échangeur thermique à l'eau d'un réseau de chaleur, à la sortie de l'échangeur l'eau géothermale refroidie est réinjectée dans l'aquifère d'origine, Figure(I.4).

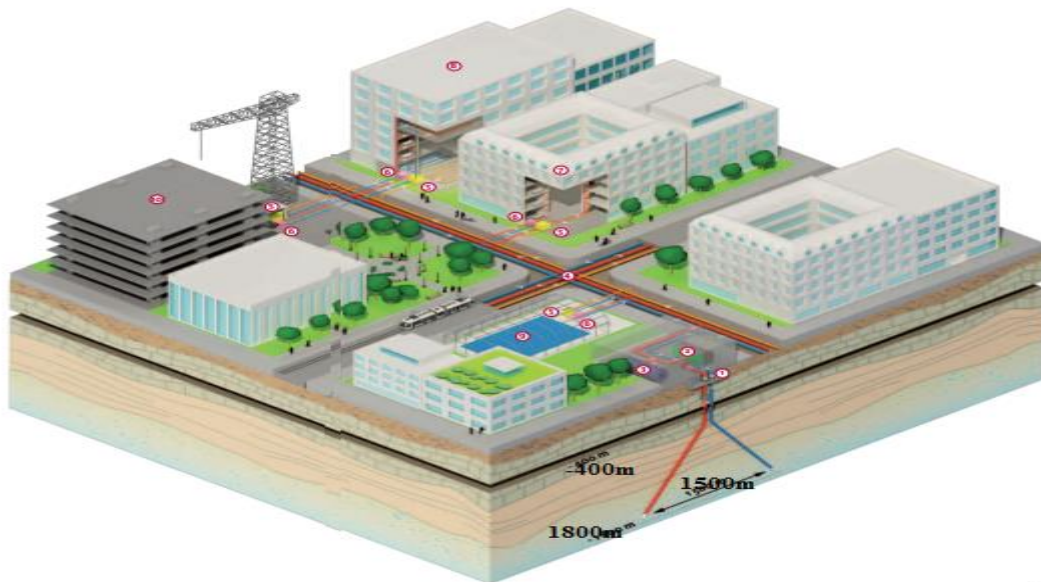


Figure I.4 : Réseau de chaleur géothermique [6]

Dans le cas de la production d'électricité, l'eau géothermale captée par forage arrive en surface sous la forme d'un mélange d'eau et de vapeur d'eau. Les deux phases sont alors séparées et la vapeur est introduite dans une turbine pour produire de l'électricité Figure (I.5).



Figure I.5 : Production de l'électricité géothermique [7]

I.3.3 Exploitation de l'énergie marinée

Les énergies marines renouvelables comprennent **l'ensemble des technologies permettant de produire de l'électricité à partir de différentes forces ou ressources du milieu marin** : la houle, les courants, les marées, le gradient de température entre les eaux de surface chaudes et les eaux froides en profondeur. L'eau recouvre en grande partie notre planète, principalement à travers les mers et les océans. Elle constitue donc une source d'énergie importante, aujourd'hui encore peu exploitée. Les énergies marines n'émettent aucun gaz à effet de serre et leur matière première est disponible dans de nombreux pays du monde.

I.3.3.1 Energie des marées

Dans une usine marémotrice, la force du flux et du reflux de la marée est utilisée pour produire de l'électricité en temps réel. Le fonctionnement d'une usine marémotrice est un peu identique à celui d'une centrale hydroélectrique de basse chute [8] :

- 1- En montant et en descendant, la marée fait tourner des turbines.
- 2- Les turbines font à leur tour fonctionner un alternateur qui produit un courant électrique alternatif.
- 3- Un transformateur élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à très haute et haute tension.

I.3.3.2 Energie des courants marins

L'énergie des courants marins est captée pour produire de l'électricité grâce à des hydroliennes, comme les éoliennes le font avec la force des vents.

Leur fonctionnement est aussi simple que celui d'une éolienne :

- 1- La force des courants marins actionne les pales d'une ou plusieurs hélices.
- 2- L'énergie mécanique produite par la rotation des pales est transmise à un alternateur.

Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables

- 3- L'alternateur produit de l'énergie électrique, acheminée par des câbles sous-marins jusqu'au rivage.

Ce mode de production d'énergie possède de nombreux atouts :

- ✓ il est **prévisible** : les marées, donc le mouvement des courants, peuvent être calculées à l'avance ;
- ✓ il occupe **peu d'espace** : du fait de la densité de l'eau, les machines peuvent donc être plus compactes ;
- ✓ il possède un **gros potentiel** du fait des courants qui baignent les côtes de nombreux pays dans le monde.

I.3.3 Autres sources d'énergies marines

D'autres modes de production d'électricité, actuellement en recherche ou expérimentation à des stades plus ou moins avancés, utilisent les richesses de la mer telles que :

- **L'énergie thermique des mers** qui exploite la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans ;
- **L'énergie des vagues** et de la houle ;
- **L'énergie osmotique**, qui exploite le phénomène d'osmose entre l'eau douce et l'eau salée, par exemple au voisinage des estuaires, où ces deux eaux se mélangent ;
- **La biomasse marine**, qui exploite les algues et le phytoplancton par gazéification, fermentation ou combustion.

I.3.4 Energie hydraulique

L'eau en coulant ou en chutant dégage une énergie impressionnante. On l'oublie souvent, mais cette énergie renouvelable est l'une des plus répandues au monde, loin devant l'éolien ou le solaire. Elle a sur eux un énorme avantage : elle peut se stocker, Figure (I.6). L'eau sert de source d'énergie depuis plus de 2 000 ans. L'intérêt, c'est qu'elle est illimitée car de l'eau, il y en a partout autour de nous : dans les rivières, les fleuves, les océans... Cette source d'énergie est d'autant plus fantastique qu'elle se renouvelle sans qu'on n'ait rien à faire : c'est la nature qui fait tout le travail.

L'énergie hydraulique permet de fabriquer de l'électricité, dans les centrales hydroélectriques, grâce à la force de l'eau. Cette force dépend soit de la hauteur de la chute d'eau (centrales de haute ou moyenne chute), soit du débit des fleuves et des rivières (centrales au fil de l'eau) [9].

Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables



Figure I.6 : Barrage d'eau, source et moyen de stockage [9]

Principe

Une centrale hydraulique ou hydroélectrique transforme l'énergie mécanique de l'eau en énergie électrique : en s'écoulant ou en chutant d'une grande hauteur, l'eau entraîne une machine tournante, la turbine, qui transmet cette énergie à un générateur capable de produire de l'électricité. Techniquement, c'est le même fonctionnement que les moulins à eau. La différence, c'est que ces centrales sont beaucoup plus puissantes et génèrent beaucoup plus d'énergie. Grâce au cycle naturel de l'eau, pas besoin de machines qui feraient remonter l'eau en altitude : les centrales hydrauliques sont naturellement réapprovisionnées en eau. Sans compter que l'eau rejetée par la centrale est restituée à la rivière tout aussi propre, sans avoir subi de modification.

I.3.5 Exploitation de l'énergie solaire

Un principe très simple : la transformation des rayons du soleil en énergie pour chauffer son habitation, l'eau sanitaire, d'une piscine, etc. ou produire de l'électricité. Les techniques pour capter directement une partie de cette énergie sont disponibles et sont constamment améliorées. On peut distinguer le solaire passif, le solaire photovoltaïque et le solaire thermique.

I.3.5.1 L'énergie solaire passive

L'énergie solaire passive est une énergie abondante et non polluante qui suppose la conception des bâtiments et la mise en place des composants de construction appropriés afin d'utiliser l'énergie solaire pour l'éclairage naturel, le chauffage et la climatisation des locaux Figure (I.7).

Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables

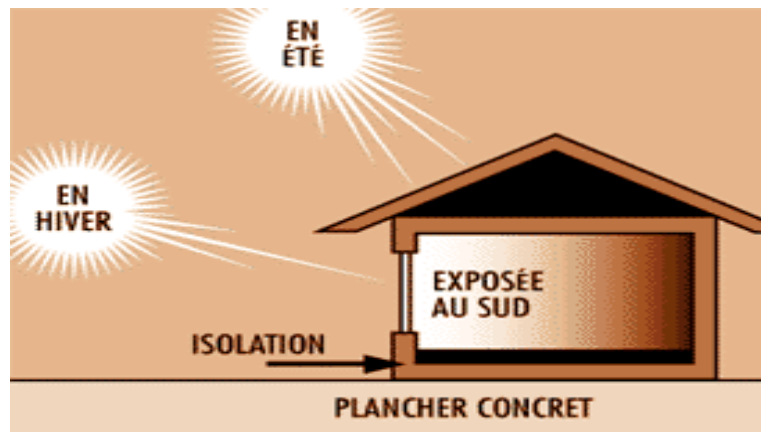


Figure I.7 : Conception solaire passive [10]

I.3.5.2 L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique renouvelable produite à partir du rayonnement solaire. La cellule photovoltaïque est un composant électronique qui est la base des installations produisant cette énergie, Figure (I.8).

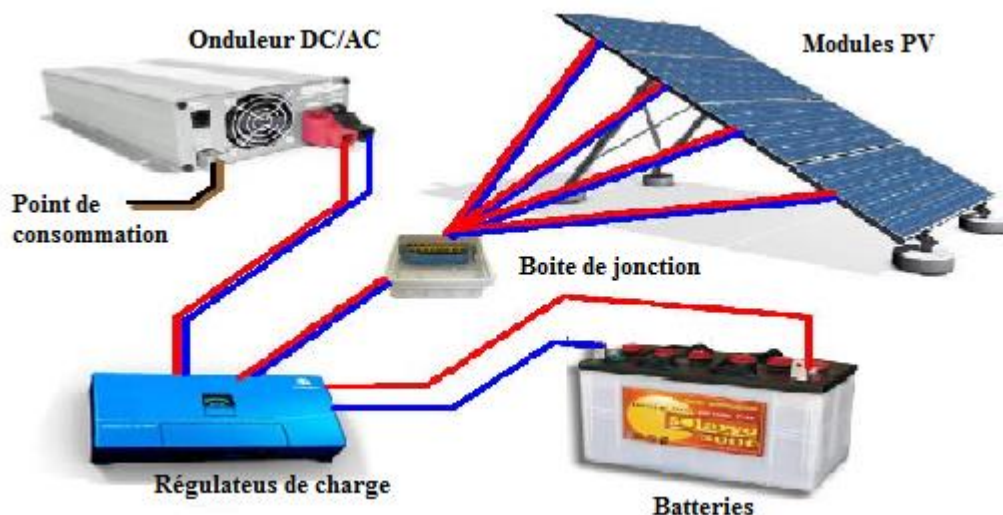


Figure 1.8 : Schéma d'un system photovoltaïque [11]

I.3.5.3 L'énergie solaire thermique

L'énergie solaire thermique est la transformation instantanée de l'énergie des rayons solaires en énergie thermique. Cette transformation peut être utilisée directement, comme par exemple le chauffage de l'eau sanitaire à l'aide des capteurs solaire, ou indirectement dans le cas de la production de l'électricité dans une centrale thermodynamique solaire.

Remarque

Quelle que soit la technologie utilisée, la puissance de l'énergie produite dépend directement de l'ensoleillement. Le positionnement (toit, terrasse...), l'orientation des panneaux (Sud) et la taille de l'installation sont donc primordiaux.

I.3.6 Exploitation de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne (l'énergie de vent) est une forme indirecte de l'énergie solaire. L'absorption du rayonnement solaire dans l'atmosphère engendre des différences de température et de pression qui mettent les masses d'air en mouvement, et créent le vent.

Une éolienne ou « aérogénérateur » est un système complet permettant de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique qui peut être utilisée pour produire de l'électricité, pomper de l'eau,...ect Figure (I.9).

Les aérogénérateurs peuvent avoir des dimensions importantes et être regroupés en parcs (ou en « champs ») afin de produire de l'électricité de masse.

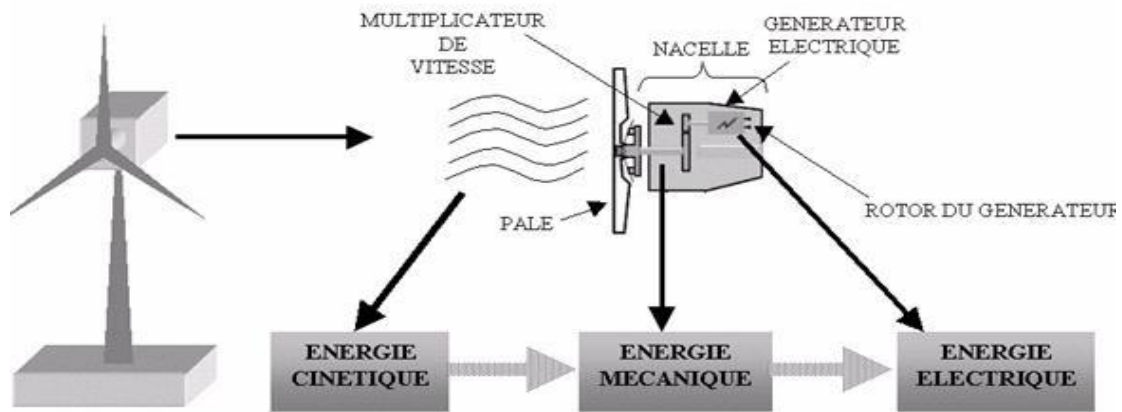


Figure I.9 : Système de conversion d'énergie éolienne [12]

I.4 Sources des énergies renouvelables en Algérie

Des experts en transition énergétique, ont estimés que l'Algérie a un « potentiel de production des EnR atteignant les 400500 térawatts-heure (TWH)/an ». Il précise que « le potentiel solaire photovoltaïque est estimé à plus de 235700 TWH/an et celui de l'éolien dépassera 12940 TWH/an ».

Ce potentiel de 400500 TWH/an « est tout simplement faramineux, puisque ce chiffre correspondrait à 15 fois la demande actuelle de l'électricité mondial et constituerait l'équivalent de 39 fois notre réserve de gaz ». Les chiffres sont évalués et estimés d'une façon scientifique et objective et faits par des groupes de recherches algérien [13].

I.5 Exploitations des énergies renouvelables en Algérie

L'Algérie s'est engagée sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile à travers le lancement d'un programme ambitieux

Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables

pour le développement des énergies renouvelables qui a été adopté par le Gouvernement en février 2011, révisée en mai 2015 et placée au rang de priorité nationale en février 2016.

L'Algérie s'engage dans une nouvelle ère énergétique durable. Le programme des énergies renouvelables dans sa version actualisée, consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22000 MW à l'horizon 2030 pour le marché national, avec le maintien de l'option de l'exportation comme objectif stratégique, si les conditions du marché le permettent.

A travers son programme d'énergies renouvelables, l'Algérie compte se positionner comme un acteur déterminé dans la production de l'électricité à partir des filières solaires et éolienne en intégrant la biomasse, la cogénération et la géothermie. Ces filières énergétiques seront les moteurs d'un développement économique durable à même d'impulser un nouveau modèle de croissance économique.

Au mois de mars 2020, le programme de développement des énergies renouvelables d'une capacité de 16000 MW à l'horizon 2035 a été adopté par le gouvernement, dont 15000 MW raccordés au réseau électrique national et 1000 MW en hors réseau (autoconsommation) [14].

L'Algérie connaît la réalisation d'un certain nombre d'installations en énergies renouvelables Figure (I.10) comme : les chauffe-eau solaires, le pompage à l'aide de l'énergie solaire ou éolienne, une vingtaine de villages solaires (Tamanrasset, Illizi, Tindouf et Adrar),... Près de 2000 kits solaires photovoltaïques pour l'éclairage et 200 pompes fonctionnant avec l'énergie solaire photovoltaïque pour le pompage d'eau potable et d'irrigation ont pu être installés à ce jour dans les zones les plus reculées du pays (Illizi, Tamanrasset, Adrar) [7].

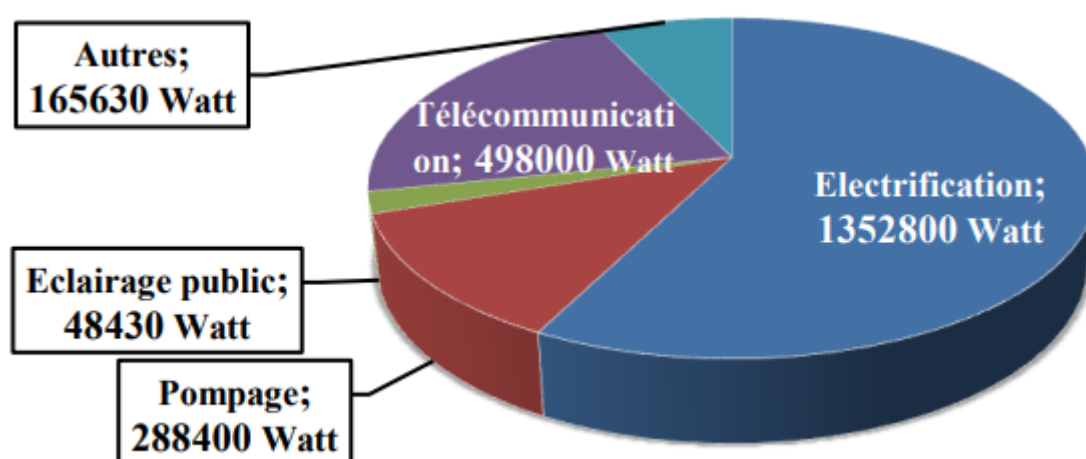


Figure I.10 : Répartition de la puissance installée par application [7]

II.1 Introduction

L'intérêt actuel pour l'énergie éolienne provient du besoin d'élaborer des systèmes d'énergie propres durables auxquels on peut se fier à long terme. L'aérodynamique et l'ingénierie moderne ont permis d'améliorer les éoliennes. Maintenant, elles offrent une énergie fiable, rentable, non polluante pour les applications des particuliers, des communautés et pour les applications de grande puissance [15].

L'objectif principal des systèmes éoliens est la transformation d'une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Dans ce chapitre, nous essayons d'aborder le contexte actuel du potentiel éolien. Ensuite nous allons toucher les différents types des systèmes éoliens et leurs principes de fonctionnement, ainsi que la modélisation de la chaîne de conversion.

II.2 Contexte actuel

II.2.1 Capacité éolienne mondiale

Le marché mondial des nouvelles turbines a atteint un volume total de 93 gigawatts, dans l'année 2020 environ 50 % de plus que l'année 2019 et plus que jamais installé en un an. La capacité totale de tous les parcs éoliens dans le monde atteint désormais 744 gigawatts, ce qui est suffisant pour générer 7 % de la demande mondiale d'électricité. La Figure (II.1) illustre les statistiques préliminaires de l'énergie éolienne publiées par l'association mondiale de l'énergie éolienne [12].

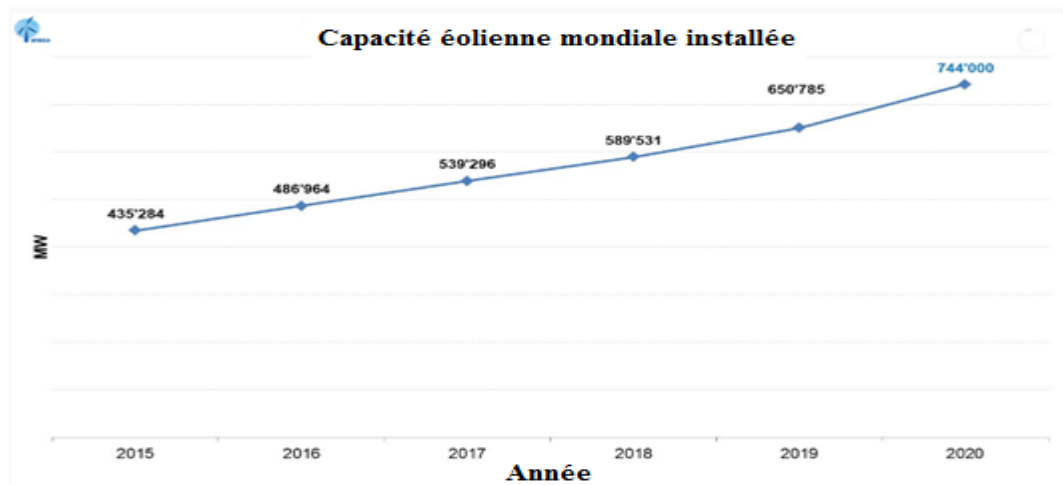


Figure II.1 : Statistique de la capacité totale de tous les parcs éoliens dans le monde [12]

Certains pays ont établi de nouveaux records d'installation, notamment en Chine, aux États-Unis et en Russie, alors que la plupart des marchés européens n'ont connu qu'une croissance modeste. La forte croissance surprend certains observateurs, car de nombreux pays ont signalé des retards au cours de l'année écoulée 2019 en raison de la perturbation des chaînes d'approvisionnement internationales et du manque de main-d'œuvre, la figure (II.2) montre la capacité éolien installée de ces pays.

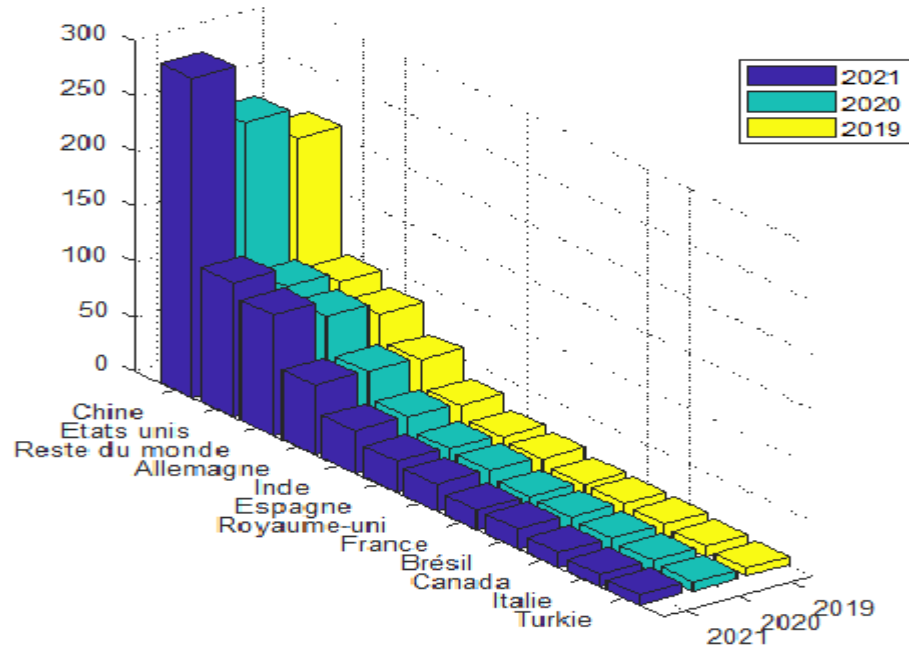


Figure II.2 : Capacité éolienne mondiale installée en [GW] [12].

Ce fort développement a été réalisé malgré la pandémie. Alors que COVID-19 semble ralentir les développements dans certains pays, il n'a généralement pas eu d'impact négatif mais a plutôt semblé accélérer le passage à l'éolien et à d'autres énergies renouvelables.

II.2.2 Potentiel énergétique du gisement éolien en Algérie

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 qui est caractérisé, par un littoral de 1200 km et un relief montagneux, représenté par les deux

chaines 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.

La figure (II.3) illustre la carte du vent, montre que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement dans le Sud-Est, avec des vitesses supérieures à 7 m/s et qui dépassent la valeur de 8 m/s dans la région de Tamanrasset (In Amguel). 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 Tébessa, Biskra, M'sila et El bayadh (6 à 7 m/s), et le Grand Sud (>8m/s). [16]

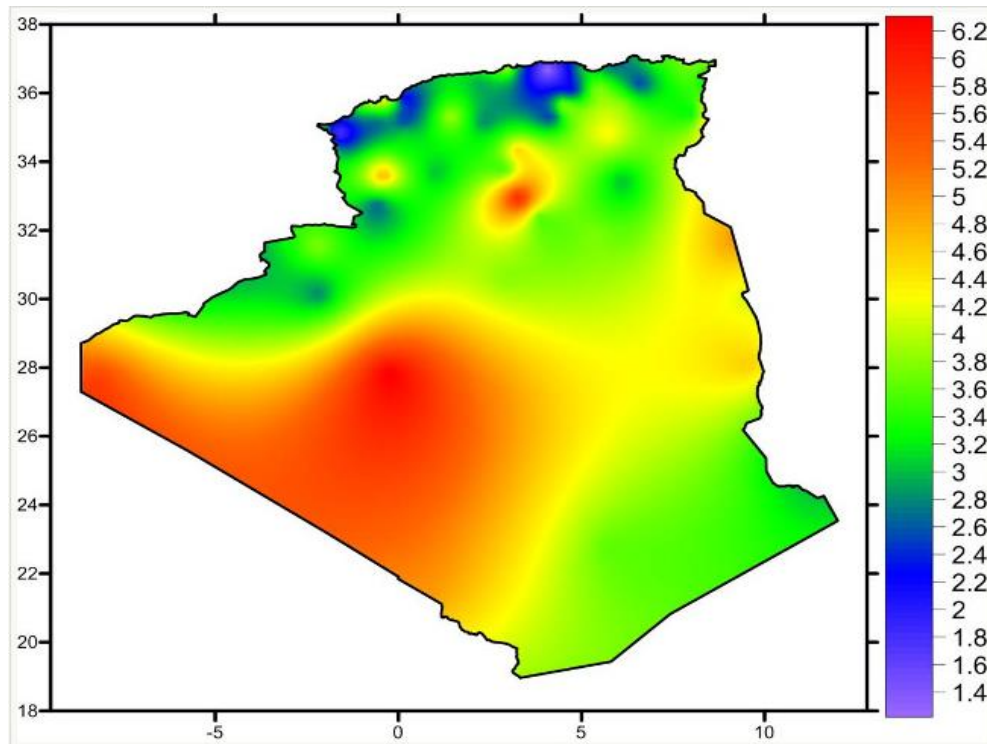


Figure II.3 : Atlas éolien annuel en Algérie à 10m en [m/s] [16]

Mais récemment, dans le nouvel Atlas éolien l'existence de sites ventés dans d'autres régions du Sud a été mise en évidence les résultats donnent la ville d'Adrar comme celle ayant la plus grande vitesse moyenne annuelle avec 6.37 m/s à 10 m alors que le site de Hassi-R'Mel dispose de la plus importante densité énergétique moyenne annuelle à 50 m, égale à 4.3 MWh/m²/an. Quant à l'étude temporelle, elle donne le Printemps comme la

période la mieux ventée, l'Eté où le vent est le plus constant et l'Hiver avec la densité énergétique la plus importante [16]. Outre Adrar, les régions de Tamanrasset, Djanet et In Salah disposeraient d'un potentiel éolien exploitable.

II.3 Le vent, son origine et ces caractéristiques

L'air qui constitue l'atmosphère est un mélange de gaz et de particules de forme solides ou liquides. Sa composition est relativement constante jusqu'à une altitude inférieure à 100 km et est majoritairement composée d'azote et d'oxygène. La quasi-totalité de sa masse est située à une altitude de moins de 16 km, dans les basses couches atmosphériques [12]. Au sein de ces couches, le déplacement des masses d'air, appelé vent n'est autre que le résultat de la mise à l'équilibre d'un ensemble de forces qui sont :

- Les forces de pression ;
- La force de Coriolis ;
- Les forces de frottement.

Le vent est le résultat de la différence de pression résultant du chauffage inégal de la surface de la terre en raison de sa forme sphérique. L'angle d'incidence du rayonnement du soleil sur la surface de la terre dépend de la position géographique : il est proche de zéro à l'équateur (faisceau du soleil normal à la surface de la terre) et prend une valeur plus importante aux pôles. Cela conduit à une énergie inégale reçue par la terre et donc à un chauffage inégal de l'air atmosphérique.

Comme la force motrice d'origine de ce mouvement est tirée du soleil, l'énergie éolienne est fondamentalement une forme indirecte de l'énergie solaire. Un à deux pourcent du rayonnement solaire total atteignant la surface de la terre est convertie en énergie éolienne de cette façon [12].

II.3.1 Type de vent

Le vent est un phénomène atmosphérique complexe qu'on peut étudier de multiples façons à différentes échelles.

- **Vents Globaux**

Les vents causés par la différence de température due au réchauffement inhomogène de l'air de l'atmosphère sont connus par les vents géostrophiques ou bien les vents globaux (Figure II.4). Ces vents sont observés sur les hautes altitudes et ne sont pas affectés par la surface de la terre. La Figure (II.4.a) montre le mouvement général (global) de l'air en atmosphère. En réalité, l'air est déjà refroidi à 30° de latitude, alors il redescend au sol. De là, un autre cycle de 30° est formé et ainsi de suite Figure (II.4.b).

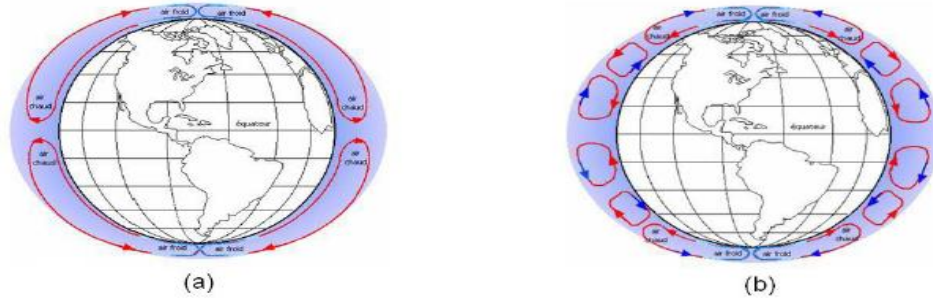


Figure II.4 : Mouvement général de l'air en atmosphère [12]

(a) Mouvement théorique, (b) Mouvement réel (actuelle).

➤ Vents locaux

Le changement de la vitesse et de la direction du vent pour des altitudes d'environ 100 m est très important pour les applications de la conversion d'énergie éolienne. Les vents locaux sont très influencés par des facteurs tels que **la mer, la terre et les montagnes**. En cours de la journée, la terre se réchauffe plus rapidement que la mer, ce qui provoque un soulèvement de l'air chaud qui s'étend ensuite vers la mer. L'air froid provenant de la mer est tout de suite attiré par la dépression créée au niveau de la terre à cause de son réchauffement : c'est **la brise de la mer**. La nuit, la direction de cette brise prend le chemin inverse (**brise de terre**). Les reliefs, notamment les montagnes, favorisent beaucoup de phénomènes climatologiques intéressants. L'air commence à s'élever vers le sommet de la montagne, produisant ce que l'on appelle une **brise montante**. La nuit, le phénomène s'inverse et une **brise descendante** se produit (Figure II.5.a). La Figure II.5.b représente un autre phénomène causé par les montagnes et les collines, il est connu par **l'effet tunnel** ; la vitesse du vent augmente d'une façon importante à l'intérieur du tunnel. Ce phénomène est souvent exploité dans l'installation des aérogénérateurs.

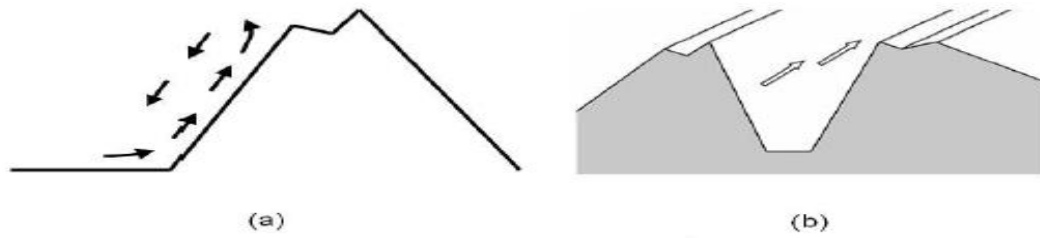


Figure II.5 : Vents locaux. (a) Brise montante, (b) Effet tunnel [12].

➤ Vent de surfaces

La variation verticale du vent est très différente d'un endroit à un autre car la surface du sol influe sur le vent par la résistance de frottement. Cette résistance peut être causée par la rugosité du sol lui-même ou en raison de végétations, bâtiments et autres obstacles présents sur le sol. Théoriquement, la vitesse du vent juste au-dessus de la surface du sol doit être nulle. Cette vitesse augmente avec l'altitude jusqu'à une certaine hauteur au-dessus de laquelle l'influence de la surface de la terre est plutôt faible.

II.3.2 Caractérisations du vent

La puissance du vent est sensiblement constante à chaque instant pour l'ensemble du globe, en un lieu donné et sur une période solaire. Par contre, la vitesse du vent est très variable suivant les jours et les lieux [16]. Le Tableau II-1 donne la classification des vents avec l'échelle de Beaufort qui décrit les différentes natures du vent en fonction de leurs vitesses.

Tableau II.1: Echelle Beaufort.

Nombre de Beaufort (degré)	Terme générique (descriptif)	Vitesse du vent à 10 m de hauteur (km/h)
0	Calme	Inférieure à 1
1	Très légère brise	1 à 5
2	Légère brise	6 à 11
3	Petite brise	12 à 19
4	Jolie brise	20 à 28
5	Bonne brise	29 à 38
6	Vent frais	39 à 49
7	Grand frais	50 à 61
8	Coup de vent	62 à 74

9	Fort coup de vent	75 à 88
10	Tempête	89 à 102
11	Violente tempête	103 à 117
12	Ouragan	Supérieure à 118

Le vent avec sa nature aléatoire, on peut le classer en deux groupes : la variabilité temporelle et la variabilité spatiale.

➤ Variabilité temporelle

Le vent étant une source intermittente, sa direction et sa vitesse changent rapidement avec le temps. En accord avec ces changements, la puissance et l'énergie éolienne disponible dans un site donné varient. Ces variations peuvent être à **haute fréquence** comme illustré dans la Figure (II.6)-a où la vitesse enregistrée durant 30 secondes fluctue de 5.1 à 7.2 m/s. La variabilité peut-être à **moyenne fréquence** comme pour les vitesses journalières ou horaires, représentées dans la Figure (II.6)-b avec une vitesse de vent diurne plus importante que les vitesses nocturnes. Pour les variabilités à **basse fréquence**, elles concernent les variations saisonnières, mensuelles et annuelles, comme illustré respectivement sur la Figure (II.6)-c et la Figure (II.6)-d [12].

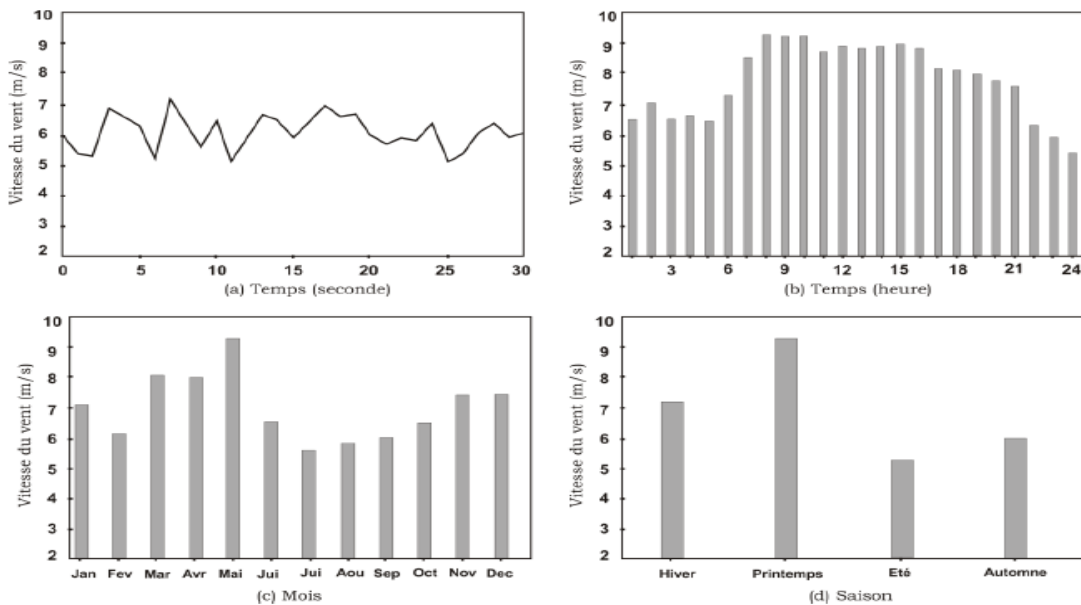


Figure II.6 : Variabilité temporelle de la vitesse du vent [12].

➤ **Variabilité spatiale**

Le vent est aussi caractérisé par sa variabilité spatiale, comprenant ainsi deux catégories. D'un côté **la variabilité spatiale régionale** qui est en fonction de la latitude, de son ensoleillement et des reliefs (géographies et physiques). Et d'un autre côté, **la variabilité spatiale locale** qui prend en compte la topographie, les obstacles ainsi que la rugosité du sol.

La variation verticale (spatiale) amène une dimension tout à fait différente au problème d'étude du vent. Il est donc nécessaire de déterminer une relation liant les vitesses de vent pour différentes hauteurs.

Le dimensionnement de tout système éolien passe nécessairement par la connaissance de la vitesse du vent et ses variations au niveau de l'hélice des aérogénérateurs. Pour obtenir des données relatives à la hauteur désirée, il existe deux méthodes possibles, à savoir :

- Effectuer une campagne de mesure sur une période suffisamment longue (au moins huit années), à la hauteur d'installation des hélices d'éoliennes, ce qui n'est pas concevable pour de petites applications ;
- Procéder par une extrapolation verticale de données relevées à 10 mètres du sol à partir de modèles empiriques déjà établis.

Pour l'extrapolation verticale des paramètres de la vitesse du vent, on distingue généralement deux cas :

- L'extrapolation verticale à court terme : Ce type d'extrapolation passe par l'extrapolation de la mesure de la vitesse du vent quasi instantanée, moyennée sur une minute ou une heure.
- L'extrapolation verticale à long terme : Ce type d'extrapolation est lié aux résultats de l'étude statistique en occurrence par l'extrapolation des paramètres de Weibull [24].

II.3.4 Mesure des paramètres du vent

La mesure des paramètres du vent se fait soit par la mesure directe du vent ou à l'aide des indicateurs écologiques.

La mesure directe du vent se fait dans des stations météorologiques, où deux éléments servent à la caractériser : sa vitesse et sa direction. Le mot «direction» en parlant du vent sous-entend celle d'où vient le vent. Un vent d'ouest est un vent qui souffle de l'ouest, un vent de nord est un vent qui souffle du nord. Son indication est donnée en utilisant des

girouettes. La composante horizontale du déplacement de l'air en un point et à un instant donnés se dispose selon une certaine direction ; elle atteint en outre une vitesse déterminée appelée «vitesse du vent». Elle est mesurée généralement en mètres par seconde (m/s), en kilomètres par heure (km/h), mais aussi en nœuds ou milles par heure, dont il existe entre ces diverses unités la relation suivante : $1 \text{ m/s} = 3,6 \text{ km/h} = 1,94 \text{ nœud}$. Les instruments utilisés pour mesurer la vitesse du vent sont les anémomètres Figure (II.7)



Figure II.7 : Ensemble d'un anémomètre et girouette.

Les indicateurs écologiques peuvent être utilisés afin de déterminer l'intensité du vent dominant dans une région. Les dunes de sable présentent un exemple pour la formation éolienne. Les particules de sable soulevées et transportées par l'écoulement du vent, sont déposées lorsque la vitesse du vent est plus faible. Les tailles des particules transportées et déposées ainsi que la distance peuvent nous donner des indications sur l'intensité moyenne du vent dans cette région. Encore, les formes des dunes peuvent nous indiquer la direction du vent (figure II.8). Des dunes sous forme de croissant se forment sous un régime du vent unidirectionnel "les Barkhanes". Les dunes (longitudinales) linéaires "les Sifs" sont formées par des vents bidirectionnels. Lorsque le régime du vent est multidirectionnel, des dunes en forme d'étoiles sont souvent observées.

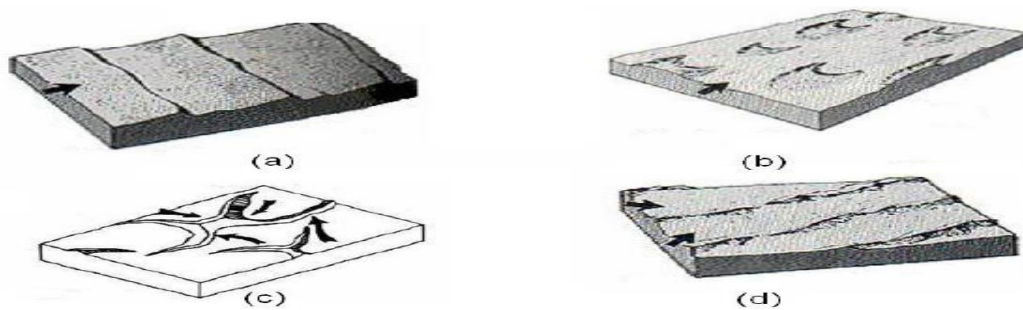


Figure II.8 : Schémas des différents types de dunes [10]
(a) Dune traverse, (b) Dune Barkhane, (c) Dune étoile, (d) Dune longitudinale.

Dans les sites côtiers et montagneux, les arbres peuvent aussi être utilisés en tant qu'indicateurs biologiques. Putnam [15] a classé les déformations des arbres et leurs branches en fonction de la puissance du vent (figure II.9). La figure II.9-a montre des arbres dans les régions de Djelfa et de Chiffa respectivement. L'inclinaison des arbres du "barrage vert" indique que ce site est exposé à un couloir du vent d'une façon permanente. A partir de l'inclinaison des arbres, on peut en déduire que les directions privilégiées de ce couloir sont la direction Ouest et la direction Sud-Ouest. Concernant la photo II.9.b, on note que les arbres situés dans la région de Chiffa endurent une inclinaison plus une déformation due à l'effet tunnel.



Figure II.9 : Indicateurs écologiques.

II.3.5 La rose du vent

La rose des vents est construite pour avoir une idée de la distribution des vitesses et des directions du vent, elle est construite à partir des observations météorologiques faites dans une région sur une ou plusieurs années. Les roses des vents que nous voyons dans la figure II.10 sont composées de huit secteurs, N, NE, E, SE, S, SO, O, NO, de 45° degrés chacun mais elle aurait pu être construite avec seize ou dix-huit secteurs. Chaque secteur est conique et son rayon indique la fréquence relative de chaque direction du vent.

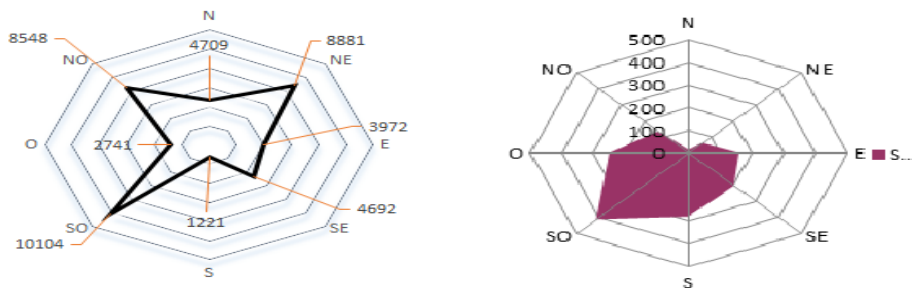


Figure II.10 : Roses des vents [10].

II.4 Système de conversion éolien

Une éolienne est une machine qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie électrique ou mécanique. Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. Elles exploitent donc la différence de pression qui crée une force de portance pour mettre en rotation la turbine et ainsi extraire une partie de l'énergie cinétique du vent. Il existe différentes façons de classer les turbines éoliennes mais celles-ci appartiennent principalement à deux groupes selon l'orientation de leur axe de rotation : les éoliennes à axe vertical et celles à axe horizontal.

II.4.1 Les éoliennes à axe vertical

Cette technologie des éoliennes est bien adaptée aux zones de vents perturbées par des habitations et le relief de la végétation. Elles peuvent aisément s'intégrer à l'architecture des bâtiments et sont d'une conception très simple (roue montée sur un axe qui entraîne directement une génératrice) Figure (II.11).

Avantages

- ✓ Le principe aérodynamique permet de bons rendements pour des vitesses de vent faible,
- ✓ Auto régulation en vitesse pour les vents forts
- ✓ Niveau sonore très faible voir inaudible.

Inconvénients

- ✓ Elles ne conviennent pas pour la conversion de grandes puissances. Suite aux recommandations récentes en matière de production de l'énergie électrique par des sources renouvelables, ces structures connaissent un fort regain d'intérêt depuis une dizaine d'années pour des applications, à petite et moyenne puissances, en milieu urbain.

Il existe deux principales technologies VAWT (Vertical Axis Wind Turbine) :

- ✓ Les turbines Darrieus classiques, à pales droites (H-type)
- ✓ La turbine de type Savonius. Dans tous les cas, les voilures sont à deux ou plusieurs pales [10].

II.4.2 Les éoliennes à axe horizontal

Les turbines à axe horizontal sont de loin les plus utilisées. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent des voilures à deux, trois ou plusieurs pales Figure (II.11).

Toutefois, les structures les plus courantes sont à trois pales. Une éolienne à axe horizontal est constituée donc d'une hélice perpendiculaire au vent montée sur un mat dont les pales sont profilées aérodynamiquement à la manière d'une aile d'avion. Par conséquent, ce type de turbines doit toujours être orienté face au vent. Par comparaison à la turbine à axe vertical, pour la même vitesse de vent, les éoliennes à axe horizontal sont capables de produire plus d'énergie grâce à un meilleur coefficient de puissance. Par ailleurs, elles ont une efficacité accrue due à leur position à plusieurs dizaines de mètres du sol [10].

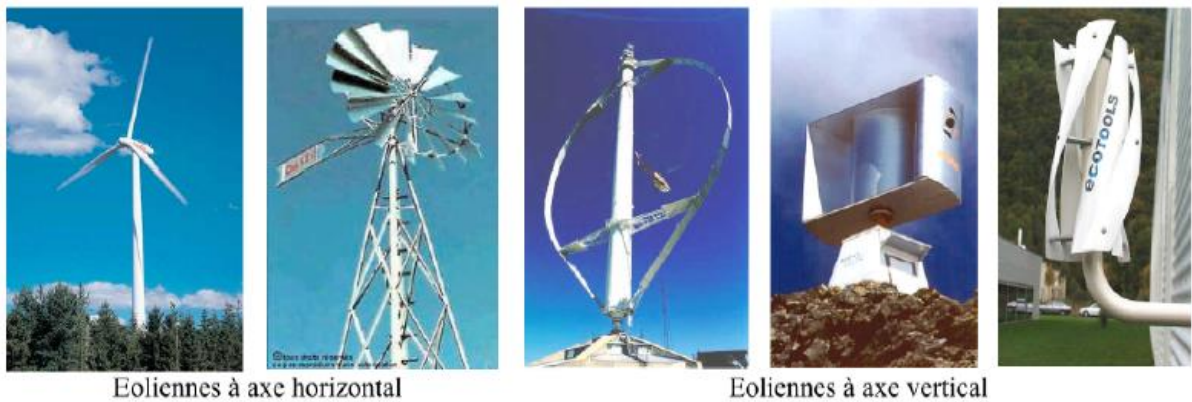


Figure II.11 : Turbines éoliennes à axe horizontal et à axe vertical [25].

II.4.3 Conversion éolienne

Une éolienne transforme l'énergie du vent en énergie électrique. Cette transformation se fait en plusieurs étapes [10].

➤ La transformation de l'énergie par les pales

Les pales fonctionnent sur le principe d'une aile d'avion : la différence de pression entre les deux faces de la pale crée une force aérodynamique, mettant en mouvement le rotor par la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

➤ L'accélération du mouvement de rotation grâce au multiplicateur

Les pales tournent à une vitesse relativement lente, de l'ordre de 5 à 15 tours par minute, d'autant plus lente que l'éolienne est grande. La plupart des générateurs ont besoin de tourner à très grande vitesse (de 1000 à 2000 tours par minute) pour produire de l'électricité. C'est pourquoi le mouvement lent du rotor est accéléré par un multiplicateur. Certains types d'éoliennes n'en sont pas équipés, leurs générateurs sont alors plus gros et beaucoup plus lourds.

➤ **La production d'électricité par le générateur**

L'énergie mécanique transmise par le multiplicateur est transformée en énergie électrique par le générateur. Le rotor du générateur tourne à grande vitesse et produit de l'électricité à une tension d'environ 690 volts.

➤ **Le traitement de l'électricité par le convertisseur et le transformateur**

Cette électricité ne peut pas être utilisée directement ; elle est traitée grâce à un convertisseur, puis sa tension est augmentée à 20000 Volts par un transformateur. L'électricité est alors acheminée à travers un câble enterré jusqu'à un poste de transformation, pour être injectée sur le réseau électrique, puis distribuée aux consommateurs les plus proches (Figure II.12).

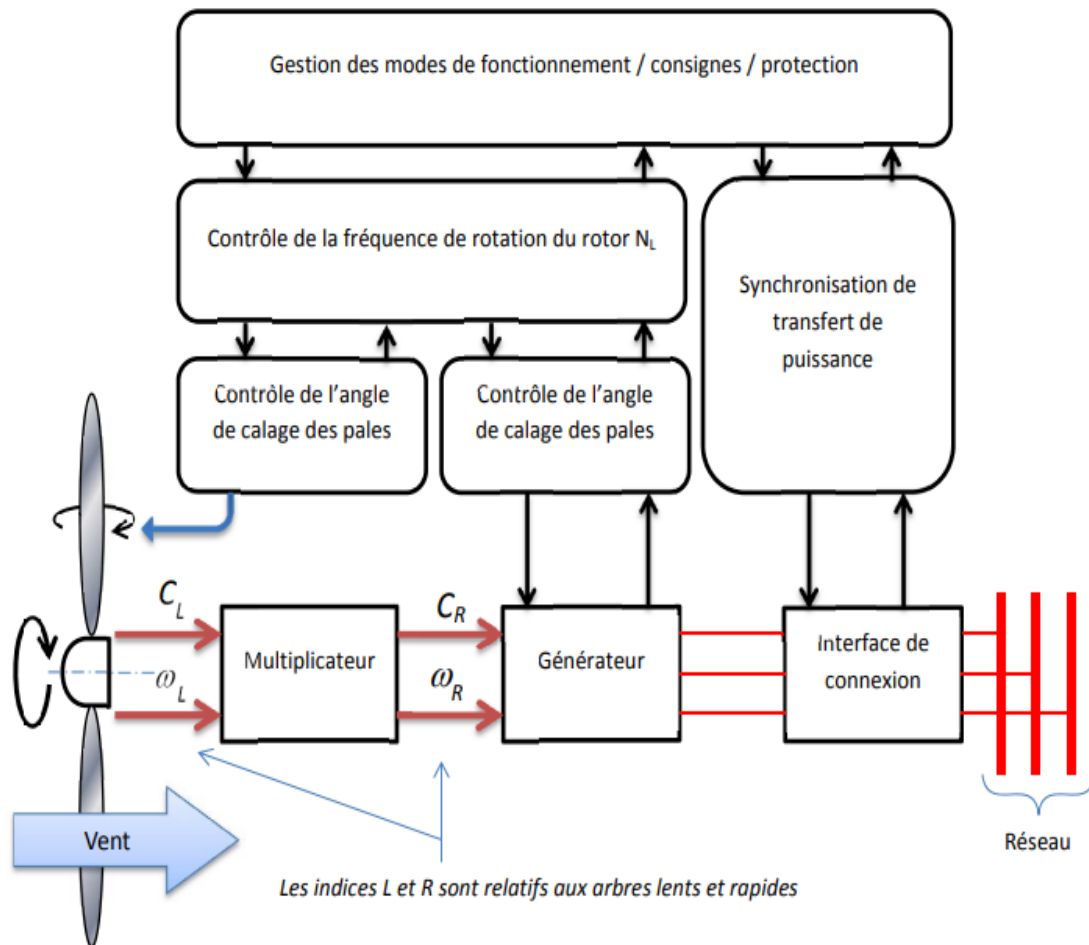


Figure II.12 : Conversion de l'énergie éolienne [16].

II.4.4 Composantes d'un aérogénérateur

La figure (II.3) illustre les différents composants d'un aérogénérateur :

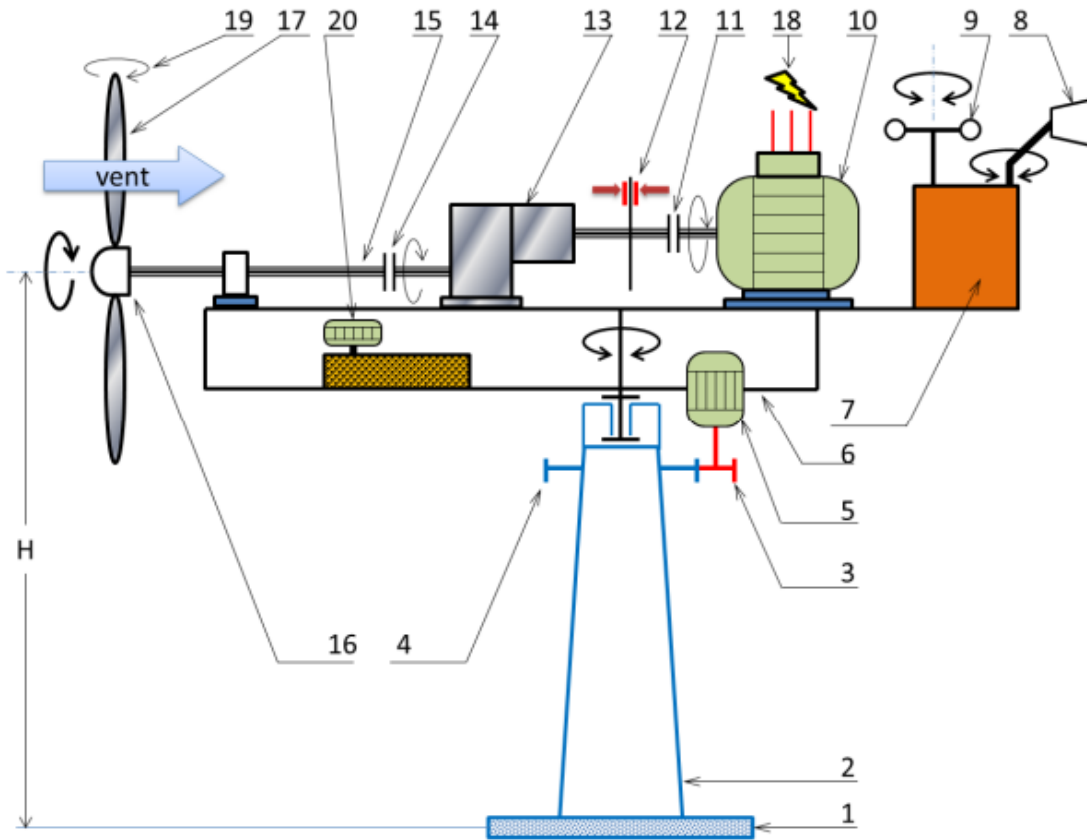


Figure II.13 : Composition d'un aérogénérateur [16].

Repère	Désignation	Repère	Désignation
1	Fondation	11	Accouplement à haute fréquence de rotation
2	Tour	12	Frein à disque
3	Pignon d'entraînement de la nacelle	13	Multiplicateur de vitesse
4	Roue dentée liée à la tour	14	Accouplement à basse fréquence de rotation
5	Moteur d'orientation de la nacelle	15	Arbre lent
6	Nacelle orientable	16	Moyeu du rotor à 3 pales
7	Unité centrale	17	Pale à pas variable
8	Girouette	18	Réseau électrique
9	Anémomètre	19	Système de régulation du pas des pales
10	Générateur	20	Groupe hydraulique

II.4.5 Classifications des éoliennes selon la puissance

On peut classer les éoliennes selon leurs puissances en trois catégories (tableau II.2)

Tableau (II.2) : Classification des éoliennes [10].

Classification des éoliennes	Diamètre (m)	Puissance (W)
Petite éolienne	Entre 0.5 m et 20 m	Inférieur à 100 kW
Moyenne éolienne	20 m et 50 m	100 kW à 1 MW
Grande éolienne	50 m à 100 m	Plus de 1 MW

II.5 Modélisation du potentiel éolien

II.5.1 Modélisation du vent

L'analyse fréquentielle de la vitesse du vent met en évidence les classes de vitesse prédominantes. Par conséquent, elle facilite la tâche du choix des aérogénérateurs qui fournissent le meilleur rendement.

II.5.1.1 Variabilité temporelle du vent

La variabilité temporelle des vitesses du vent sera analysée à l'aide des paramètres de la loi de Weibull et hybride Weibull

Distribution de Weibul :

La distribution du vent se fait en fonction de la loi de Weibull utilisée sur des séries de mesure du vent (d'au moins une année) [12]. La loi de distribution de vitesses de Weibull s'exprime par la relation suivante :

$$f(V) = \left(\frac{k}{C}\right) \times \left(\frac{V}{C}\right)^{k-1} \times \exp\left(-\left(\frac{V}{C}\right)^k\right) \quad (\text{II.1})$$

Où :

$f(v)$ est la fréquence d'occurrence de la vitesse du vent ; k et C : sont les paramètres de Weibull.

Le paramètre k est sans dimension et caractérise la forme de la distribution de fréquence, alors que C , est le facteur d'échelle mesuré en m/s qui détermine la qualité du vent, il est lié à la vitesse moyenne du vent par l'équation (II.3).

Distribution hybride Weibull :

La loi de Weibull modifiée est utilisée pour caractériser les stations pour lesquelles la proportion de vents nuls est très importante. En effet, la loi de Weibull classique ne permet pas de considérer les vents nuls la loi modifiée [12] est défini par l'équation (II.3) :

$$f(V) = \begin{cases} ff_0, & \text{pour } V = 0 \\ (1 - ff_0) \times \left(\frac{k}{c}\right) \times \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \times \exp\left(-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right) & \text{pour } V \neq 0 \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

Où :

ff_0 : est le pourcentage des vitesses de vent nulles.

Les deux distributions sont employées pour déterminer les vitesses caractéristiques du site [17].

Toutefois la distribution de Weibull classique (fonction de deux paramètres) est la plus indiquée. L'utilisation de ces deux paramètres permet l'évaluation d'un nombre important de propriétés de la distribution, d'où une meilleure caractérisation des sites.

Lois utilisées pour la détermination des facteurs éoliens caractérisant un site, à savoir :

- ✓ La vitesse moyenne du vent ;
- ✓ La vitesse la plus fréquente ;
- ✓ La vitesse du vent transportant le maximum d'énergie ;
- ✓ La vitesse cubique moyenne du vent ;
- ✓ La variance et l'écart type de la distribution des vitesses ;
- ✓ La vitesse max du vent ;
- ✓ Le facteur de puissance;
- ✓ L'indice de variation.

➤ Vitesse moyenne

Partant des mesures vent (vitesse et direction), la vitesse moyenne pondérée s'écrit [12] :

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

Si le calme ff_0 est inférieur ou égale à 15% ;

$$\langle V \rangle = C \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (\text{II.4})$$

Si le calme ff_0 est supérieur à 15% ;

$$\langle V \rangle = (1 - ff_0) \cdot C \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (\text{II.5})$$

➤ **La vitesse du vent transportant le maximum d'énergie**

$$V_{Em} = C. \left(\frac{k+2}{k} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (\text{II.6})$$

➤ **La vitesse la plus fréquente**

$$V_F = C. \left(\frac{k-1}{k} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (\text{II.7})$$

➤ **Vitesse cubique moyenne**

Alors que la vitesse cubique moyenne se détermine par :

$$\langle V^3 \rangle = \int_0^\infty V^3 f(V) dV \quad (\text{II.8})$$

Les expressions relatives aux différents modèles sont portées dans le Tableau II.3

Γ étant la fonction gamma donnée par:

$$\Gamma(x) = \int_0^\infty \exp(-t) t^{x-1} dt \quad (\text{II.9})$$

➤ **La variance et l'écart type**

La variance est donnée par :

$$\sigma^2 = \int_0^\infty (V - \langle V \rangle)^2 f(V) dV \quad (\text{II.10})$$

➤ **Facteur de puissance et indice de variation**

Par ailleurs, d'autres paramètres utiles à la caractérisation d'un site, du point de vue éolien, doivent être calculés, à savoir :

Le facteur de puissance du vent, donné par (selon la distribution de Weibull) :

$$R_p = \frac{\langle V^3 \rangle}{\langle V \rangle^3} = \frac{\Gamma\left(1+\frac{3}{k}\right)}{\Gamma^3\left(1+\frac{1}{k}\right)} \quad (\text{II.11})$$

L'indice de variation (selon la distribution de Weibull)

$$I_V = \frac{\sigma}{\langle V \rangle} = \left[\frac{\Gamma\left(1+\frac{2}{k}\right)}{\Gamma^2\left(1+\frac{1}{k}\right)} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II.12})$$

Le tableau II.3 représente les expressions des vitesses moyennes, cubiques moyennes et la variance selon le modèle utilisé.

Tableau (II. 3) : Expressions des vitesses moyennes, cubiques moyennes et la variance [12].

Distributions	$\langle V \rangle$	$\langle V^3 \rangle$	σ^2
Weibull	$C \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$	$C^3 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)$	$C^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right]$
Hybrid Weibull	$(1 - ff_0) \cdot C \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$	$(1 - ff_0) C^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)$	$(1 - ff_0) C^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right]$
Rayleigh	$0.866 C$	$1.32 C^3$	$0.214 C^2$

II.5.1.2 Variabilité spatiale du vent

En utilisant les lois de cisaillement du vent, permettant de calculer à partir d'une donnée de vitesse du vent connue, la vitesse du vent à une altitude différente.

Il existe plusieurs lois de cisaillement possédant chacune des paramètres caractéristiques reliés au site étudié.

Loi de cisaillement du vent

Cette loi est utilisée dans certaines études [17] et a pour principale avantage la prise en compte d'un paramètre physique z_0 , définissant la rugosité du terrain. Elle est définie par :

$$\frac{V(Z_2)}{V(Z_1)} = \frac{\ln\left(\frac{Z_2}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{Z_1}{Z_0}\right)} \quad (\text{II.13})$$

Extrapolation verticale des paramètres de Weibull

L'estimation des paramètres de Weibull k_2 et C_2 au niveau de l'éolienne permet l'estimation du potentiel éolien au niveau de l'hélice. [12] :

$$k_2 = \frac{k_1 \left[1 - 0.881 \ln\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right) \right]}{1 - 0.881 \ln\left(\frac{Z_1}{Z_0}\right)} \quad (\text{II.14})$$

$$C_2 = C_1 \left(\frac{Z_2}{Z_1} \right)^n \quad (\text{II.15})$$

$$n = \left[\frac{0.37 - 0.881 \ln(C_2)}{1 - 0.881 \ln\left(\frac{Z_1}{Z_0}\right)} \right] \quad (\text{II.16})$$

Où :

Z_2 : est l'altitude en m à laquelle on désire calculer la vitesse du vent ;

$V(Z_2)$: est la vitesse en m/s à calculer ;

Z_1 : est l'altitude de référence en m ;

$V(Z_1)$: est la vitesse connue à l'altitude de référence en m/s ;

Z_0 : est la rugosité en m.

II.5.2 Modélisation du potentiel énergétique éolien

L'énergie disponible (potentiel du vent) subit une suite de pertes en cascades, jusqu'à la sortie machine, (limite de Betz, seuils machine et pertes de conversion). Cette dégradation de l'énergie est représentée par la Figure II.14 :

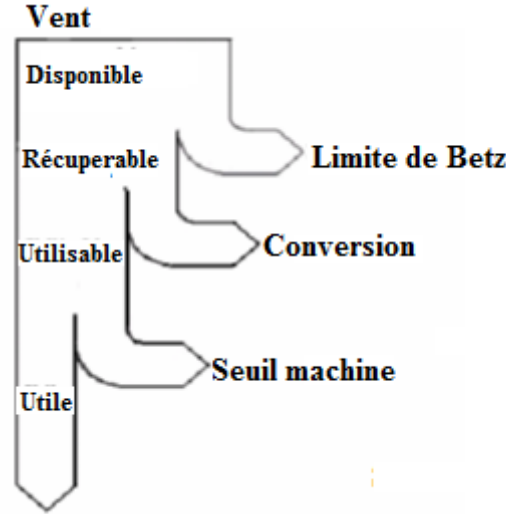


Figure II.14 : Représentation schématique des dégradations successives de l'énergie éolienne.

II.5.2.1 Densité de puissance disponible

La densité de puissance éolienne disponible WPD [12] est un moyen utile d'évaluer le potentiel éolien dans un site sans tenir compte d'une éolienne particulière. La densité d'énergie éolienne, mesurée en watts par mètre carré, indique la quantité de puissance éolienne disponible pour la conversion éolienne dans un site est exprimée par l'équation (II.17).

$$\frac{P_{dis}}{A} = \frac{1}{2} \rho \langle V \rangle^3 = \frac{1}{2} \rho \cdot C^3 \cdot \Gamma \left(1 + \frac{3}{k} \right) \quad (II.17)$$

Où :

A : est la surface en $[m^2]$;

ρ : est la masse volumique de l'air;

$\langle V \rangle^3$: est la vitesse cubique moyenne ;

C : est le facteur d'échelle.

II.5.2.2 Densité d'énergie annuelle récupérable maximale

La densité d'énergie maximale récupérable dans un site par un système de conversion éolienne en kWh/m²/an est exprimé par l'équation (II.18) [12].

$$\frac{E_m}{A} = 3.25 C^3 \cdot \Gamma \left(1 + \frac{3}{k} \right) \quad (II.18)$$

II.5.2.3 Puissance éolienne récupérable

Seule une partie de l'énergie disponible peut être captée par l'éolienne. La puissance captée par la turbine peut s'exprimer en fonction de cette puissance disponible en introduisant un facteur dépendant des conditions aérodynamiques des pales, donc de la vitesse du vent V , de la vitesse de rotation Ω_{tur} et de l'angle de calage β qui pourrait être calculé en partant d'une étude complète sur l'action du vent sur les pales. L'angle de calage (β) est l'angle formé par la pale et le plan de rotation de la pale Figure II.15.

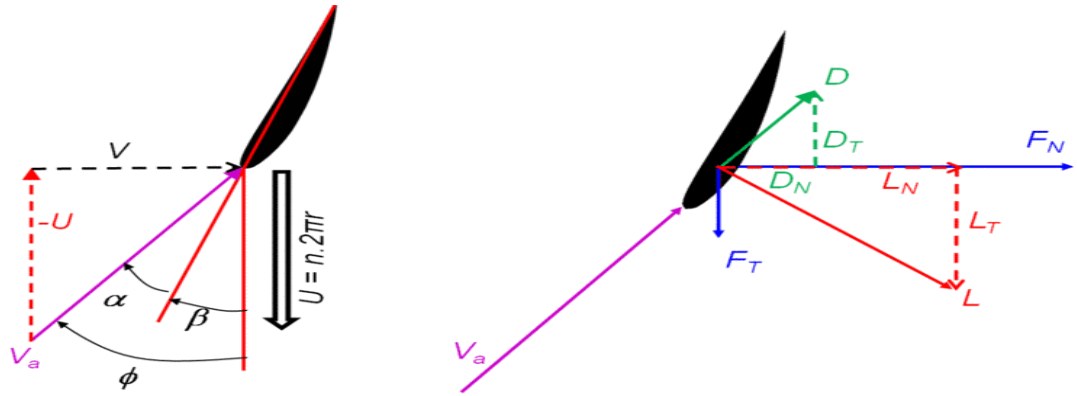


Figure II.15 : Vitesses et forces exercées sur un profil d'une éolienne

On introduit l'angle d'incidence (α), de calage (β) ainsi que la vitesse relative V_a (V_r) dans la figure de gauche. La résultante des forces engendrée par la vitesse du vent et la rotation de l'éolienne est illustrée dans la figure de droite.

La puissance récupérable ou aérodynamique d'une éolienne est exprimée par la relation suivante :

$$P_{rec} = P_{aer} = C_p(\lambda, \beta) P_{dis}$$

$$P_{rec} = P_{aer} = C_p(\lambda, \beta) \frac{1}{2} \rho A < V >^3 \quad (II.19)$$

C_p : est le coefficient de puissance (sans unité).

En réalité, jusqu'à présent, seulement 60 à 70% de la puissance maximale théorique $P_{éolmax}$ peut être exploitée par les turbines les plus perfectionnées. Ce rendement, appelé coefficient de puissance C_p de l'éolienne, est propre à chaque voilure. Ce coefficient lie la puissance éolienne (récupérable) à la vitesse du vent.

$$C_p (max) = 0.59 \quad (II.20)$$

Cette limite (environ 0.59) est appelée 'limite de Betz.

On définit la vitesse spécifique (normalisée) λ comme étant le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine $\Omega_t.R_t$ sur la vitesse instantanée de vent et donné par l'expression :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{V} \quad (II.21)$$

Où :

V est la vitesse de vent (m/s).

Ω_t est la vitesse de rotation avant multiplicateur (rad/s)

R_t est le rayon de la surface balayée (m).

La figure II.16 donne une vue sur les coefficients de puissance C_p habituels en fonction de la vitesse réduite λ pour différents types d'éoliennes.

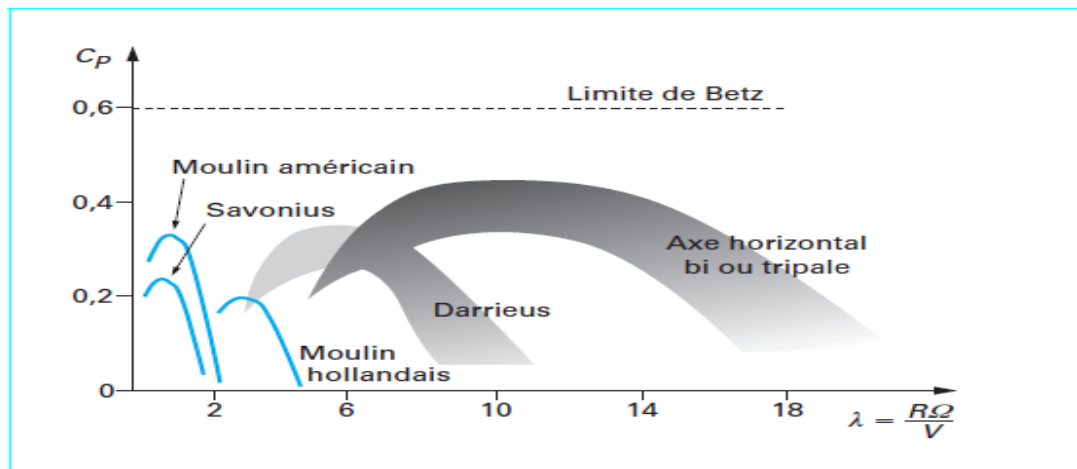


Figure II.16 : C_p habituels en fonction de la vitesse réduite λ pour différents types d'éoliennes [12].

II.5.2.4 Puissance éolienne moyenne utilisable

Etant donné que :

- la vitesse du vent est variable
- et que chaque machine éolienne est caractérisée par la vitesse de démarrage V_i , une vitesse nominale V_n et une vitesse d'arrêt V_s spécifiques, la puissance éolienne utilisable est donnée par [19] :

$$\langle P_u \rangle = \frac{1}{2} \rho A \langle V_u^3 \rangle \quad (\text{II.22})$$

La vitesse V_u est déduite de la courbe représentative de la distribution de Weibull Figure II.17, entre les limites de la machine. La limite inférieure est représentée par la vitesse de démarrage. En effet, seules les vitesses du vent supérieures à la vitesse de démarrage V_i sont considérées dans le calcul.

En second lieu, lorsque la vitesse nominale V_n est atteinte, l'augmentation de la vitesse de vent n'a aucun effet sur le régime de la roue. Enfin, lorsque la vitesse d'arrêt V_s est atteinte, le système est stoppé et les vitesses qui lui sont supérieures n'interviennent pas pour le calcul de V_u .

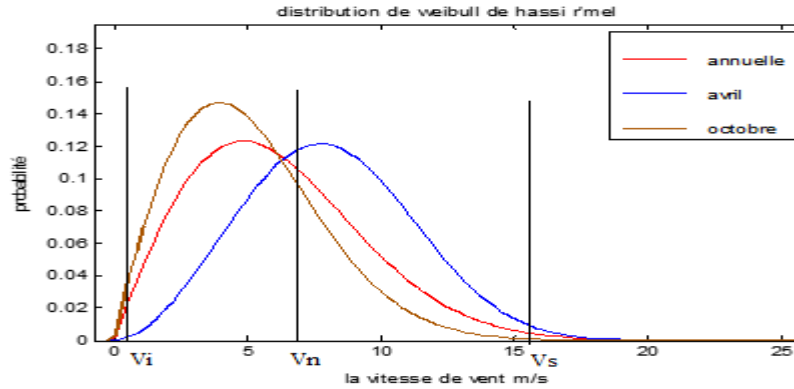


Figure II.17 : Représentation des vitesses de démarrage, nominale et d'arrêt sur la courbe de distribution des vitesses [20]

La densité de puissance utilisable est donnée par [19] :

$$\langle P_u \rangle = \begin{cases} 0 & \text{pour } V < V_i \\ \frac{1}{2} \rho \langle V^3 \rangle & \text{pour } V_i < V < V_n \\ \frac{1}{2} \rho V_n^3 & \text{pour } V_n \leq V \leq V_s \\ 0 & \text{pour } V \geq V_s \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

La vitesse cubique utilisable moyenne est donnée par intégration de la vitesse cubique pondérée par la fonction de probabilité en considérant comme bornes d'intégration les limites imposées par la machine, à savoir :

$$\langle V_u \rangle = \int_{v_i}^{v_n} f(V) V^3 dV + V_n^3 \int_{v_n}^{v_s} f(V) dV \quad (\text{II.24})$$

II.5.2.5 Puissance éolienne moyenne utile

La puissance éolienne moyenne réellement utile s'écrit :

$$\langle P_e \rangle = \eta \langle P_u \rangle \quad (\text{II.25})$$

Où η représente le rendement de la machine.

Ce dernier représente le rapport entre la puissance nominale donnée par le constructeur et la puissance électrique théorique calculée pour une vitesse du vent constante égale à la vitesse nominale soit [20] :

$$\eta = \frac{\langle P_n \rangle}{\langle P_{théorique} \rangle} \quad (\text{II.25})$$

Avec

$$P_{théorique} = \frac{1}{2} \rho A \langle V_n^3 \rangle \quad (\text{II.26})$$

La puissance utile (pratique) (P_e) d'une éolienne est inférieure à P_u . Ceci est dû au fait que, du vent à la distribution sur le réseau, il y a plusieurs étapes de conversion d'énergie, chacune avec un rendement propre : hélice (85%), multiplicateur (95%), générateur (98%), transformateur (98%) - redresseur (98%), stockage, distribution. Bref, le rendement optimal est de 70 à 60%.

Cependant, en pratique, tous les organes ne sont pas à leur rendement maximum en même temps, ce qui réduit encore le rendement global.

Les systèmes de conversion de l'énergie éolienne sont utilisés au maximum de leurs performances si leur choix est effectué correctement en fonction des paramètres du site d'implantation

III.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant de photons, compris dans le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en énergie électrique. Pour ce faire elle utilise des modules photovoltaïques composés de cellules ou de photopiles fabriquées avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible qui réalisent cette transformation d'énergie. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique statique courant-tension $I(V)$ non linéaire et présentant un point de puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble [12].

III.2 Gisement solaire

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour déterminer l'énergie reçue par un système énergétique solaire et aide au dimensionnement le plus exact possible compte tenu des demandes à satisfaire.

La connaissance du gisement solaire d'une région est plus ou moins précise :

- ✓ Selon la densité des stations pour lesquelles on a des données.
- ✓ Selon le nombre d'années de mesures disponibles.
- ✓ Selon le pas de temps des données (mois, jour, heure).
- ✓ Selon la nature des données : durée d'ensoleillement, composante directe et diffuse et globale du rayonnement solaire, albédo du sol etc.....

Les différentes irradiations solaires utilisées par les concepteurs de systèmes solaires, sont:

- ✓ L'irradiation directe à incidence normale.
- ✓ Les irradiations de base, la composante diffuse et la composante globale mesurées sur plan horizontal.
- ✓ L'irradiation solaire globale reçue sur des plans verticaux orientés Est, Ouest et Sud.
- ✓ L'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu et orienté Sud.

La distribution de l'énergie reçue en Algérie, en moyenne annuelle, est donnée par la figure (III.1) ci-dessous. Elle présente les différents niveaux énergétiques qui donnent ainsi un découpage du pays en régions iso énergétiques [21].

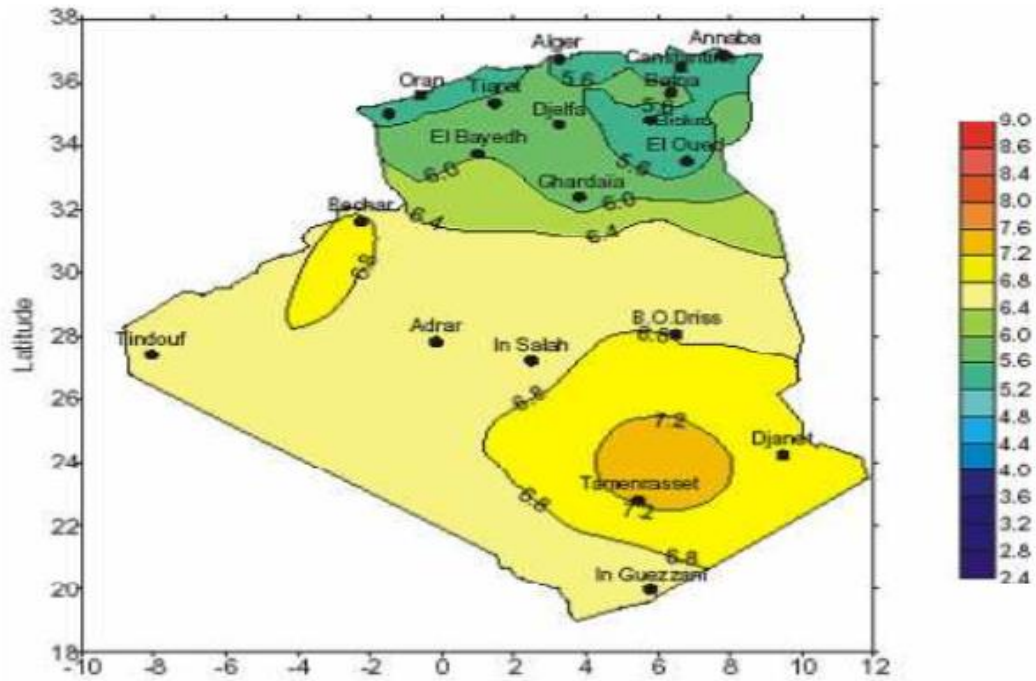


Figure III.1 : Carte préliminaire des irradiances solaire de l'Algérie [12].

III.3 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet ($0.2 \mu\text{m}$) à l'infrarouge lointain ($2.5 \mu\text{m}$). On utilise la notion AM pour Air Mass afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise. L'énergie totale transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre de 1350 W/m^2 (AM0) dans l'espace hors atmosphère terrestre (voir figure III.2). Lorsque le rayonnement solaire traverse l'atmosphère, il subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite de phénomènes d'absorption et de diffusion dans les gaz, l'eau et les poussières. Ainsi, la couche d'ozone absorbe une partie du spectre lumineux provenant du soleil, et en particulier une partie des ultraviolets dangereux pour la santé. Le rayonnement solaire direct reçu au niveau du sol (à 90° d'inclinaison) atteint 1000 W/m^2 du fait de l'absorption dans l'atmosphère (AM1). Cette valeur change en fonction de l'inclinaison des rayons lumineux par rapport au sol. Plus l'angle de pénétration θ est faible, plus l'épaisseur atmosphérique que les rayons auront à traverser

sera grande, d'où une perte d'énergie conséquente. Par exemple, l'énergie directe transportée par le rayonnement solaire atteignant le sol avec un angle de 48° avoisine les 833 W/m^2 (AM1.5) [12].

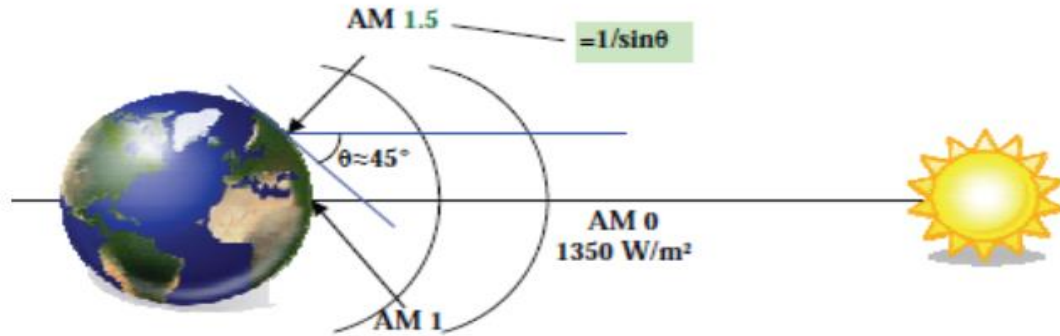


Figure III.2. Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM [12].

Pour connaître le rayonnement global reçu au sol, il faut ajouter à ce dernier le rayonnement diffus. **Le rayonnement diffus** concerne tout le rayonnement dont la trajectoire entre le soleil et le point d'observation n'est pas géométriquement rectiligne et qui est dispersé ou réfléchi par l'atmosphère ou bien le sol. En considérant ceci, on obtient une référence du spectre global notée AM1.5 avec une puissance de 1000 W/m^2 (Figure III.3) [12].

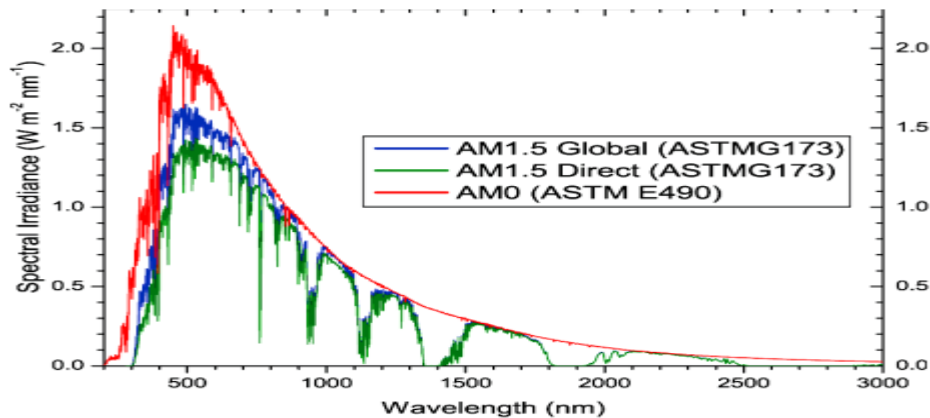


Figure III.3 : Spectres solaires relevés dans plusieurs conditions selon la convention AM [12].

Suite à l'atténuation du rayonnement solaire par les différents phénomènes atmosphériques, le rayonnement solaire sur une surface au sol est composé comme suit :

Le rayonnement direct : la conversion du rayonnement direct est une question trigonométrique. Le rayonnement direct, sur le plan horizontal, est la différence entre le rayonnement global et le rayonnement diffus.

Le rayonnement diffus : il est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire global par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages et les aérosols.

Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol : C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc....).

Le rayonnement global : le rayonnement global est subdivisé en rayonnements directs, diffus et reflété par le sol.

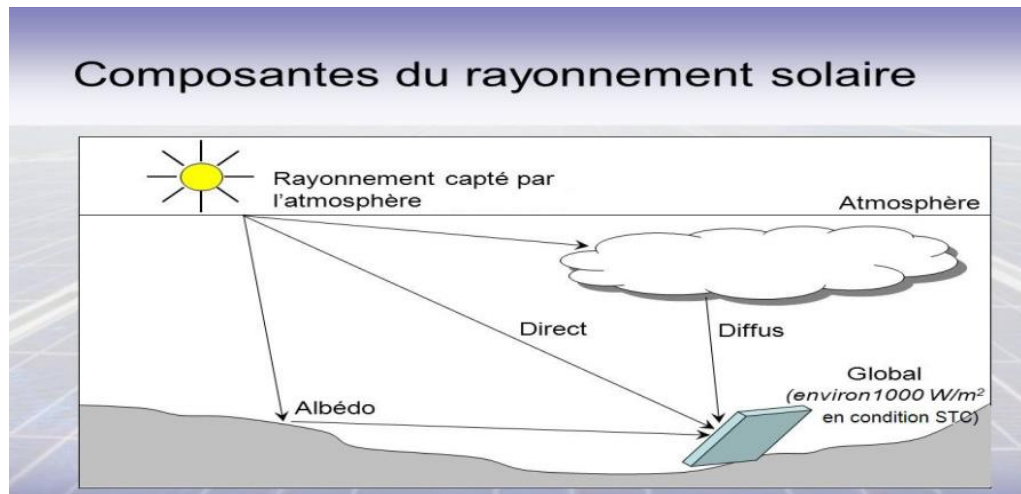


Figure III.4. Types de rayonnement solaire reçus au sol. [12]

L'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan quelconque à un moment donné est appelée irradiation ou éclairement (noté généralement par la lettre G), il s'exprime en watts par mètre carré (W/m^2). La valeur du rayonnement reçu par la surface du module photovoltaïque varie selon la position de ce dernier. Le rayonnement solaire atteint son intensité maximale lorsque le plan du module photovoltaïque est perpendiculaire aux rayons

III.4 Effet photovoltaïque

Il s'agit de transformer l'énergie contenue dans la lumière du soleil en énergie électrique à travers un capteur constitué de matériaux sensibles à l'énergie contenue dans les photons délivrant une tension de l'ordre de 0,4 à 0,7 V. Ce capteur est présenté à l'échelle élémentaire sous forme d'une cellule PV [12].

III.5 Cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photosensible, son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs, il est constituée de deux couches minces d'un semi-conducteurs. Ces deux couches sont dopées différemment. Pour la couche N, c'est un apport d'électrons périphériques et pour la couche P c'est un déficit d'électrons. Les de couches présentent ainsi une différence de potentiel. L'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche N), leur permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu.

Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches de semi-conducteur (figure III.5). L'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons lumineux. Une couche antireflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbée.

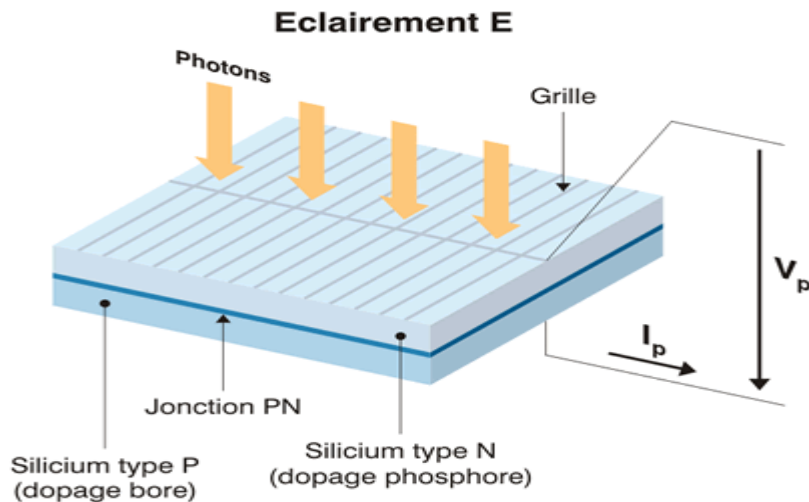


Figure III.5. Schéma d'une cellule élémentaire.

Industriellement les matériaux les plus utilisés sont à base de silicium. Le rendement énergétique atteint industriellement est de 13 à 14 % pour les cellules à base de silicium monocristallin, 11 à 12 % avec du silicium poly-cristallin et enfin 7 à 8% pour le silicium amorphe en films minces [12].

III.5.1 Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

La cellule étant chargée par une résistance, lorsque l'on éclaire la jonction PN, on observe l'apparition d'un courant inverse I sous une tension en sens direct V . La jonction fonctionne en photopile, c'est l'effet photovoltaïque. La caractéristique d'une jonction PN non éclairée est celle d'une diode, en présence d'un éclairage, elle joue le rôle d'un générateur de courant DC, dont la caractéristique est montrée à la figure (III.6) [20].

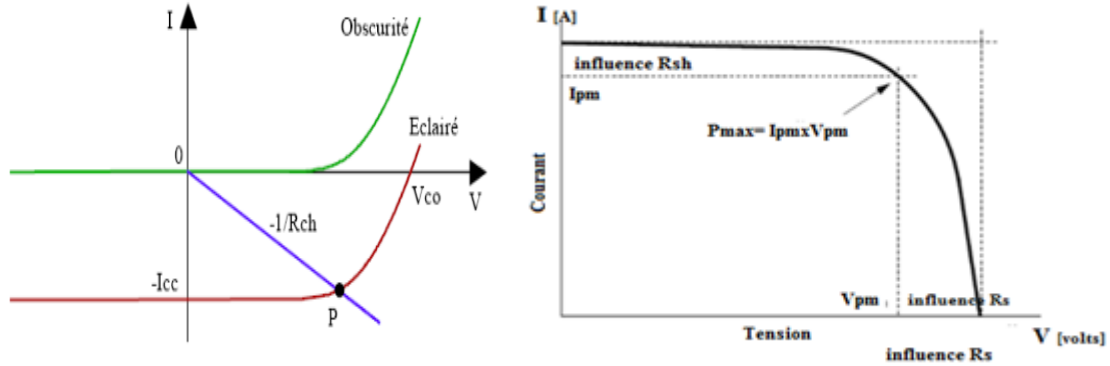


Figure III.6 : Caractéristiques d'une cellule solaire. [20]

III.5.2 Circuit équivalent d'une cellule solaire

Chaque cellule peut être modélisée par le schéma électrique équivalent Figure III.7 :

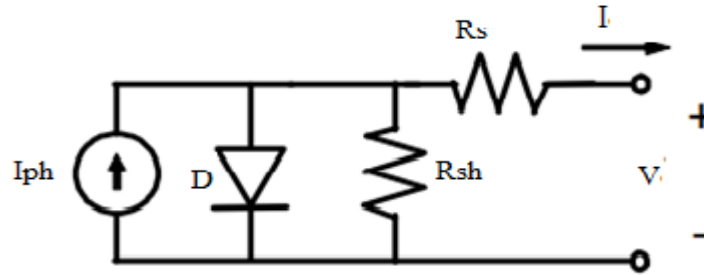


Figure III.7 : Schéma équivalent électrique d'une cellule PV

Les résistances R_s et R_{sh} permettent de tenir en compte des pertes liées aux défauts de fabrication. R_s représente les diverses résistances de contact et de connexion tandis que R_{sh} caractérise les courants de fuite dus à diode et aux effets de bord de la jonction [21].

III.5.3 Modèle mathématique d'une cellule solaire

En se basant sur le circuit, la loi des nœuds nous permet d'écrire la relation suivante :

$$I_{ph} = I_d + I_p + I \quad (III.1)$$

Le courant de jonction I_d est donné par :

$$I_d = I_{sat} \left(\exp \left(\frac{q(V+I+R_s)}{\eta.k.T_c} \right) - 1 \right) \quad (\text{III.2})$$

Le courant dans la résistance R_{sh} est donné par :

$$I_p = \frac{V+I.R_s}{R_p} \quad (\text{III.3})$$

A partir de l'équation (III.1), on obtient l'expression de la caractéristique I-V de la cellule

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left(\exp \left(\frac{q(V+I+R_s)}{\eta.k.T_c} \right) - 1 \right) - \frac{V+I.R_s}{R_p} \quad (\text{III.4})$$

Avec :

I : le courant de la cellule [A]

V : la tension de la cellule [V]

q : Charge d'électron $e = 1.6 * 10^{-19}$ [C]

k : Constante de Boltzmann ($1,38 * 10^{-23}$ J.K⁻¹).

η : Coefficient d'idéalité de la cellule photovoltaïque

T_c : Température absolue de la cellule (K).

I_{sat} : courant de saturation.

III.6. Association des cellules photovoltaïques

III.6.1. Association en série

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série. La figure (III.8) montre l'intérêt de l'association des cellules ou modules photovoltaïques identiques en série [22].

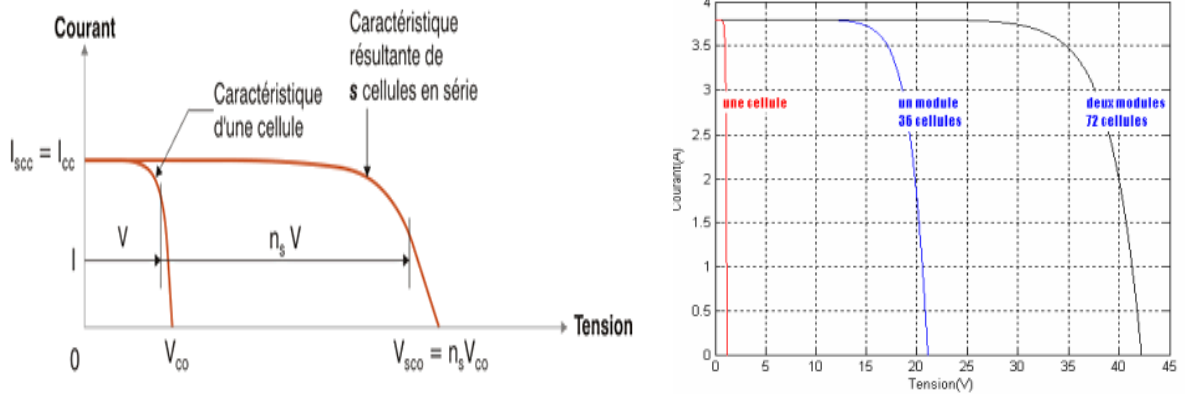


Figure III.8 : Cellules ou modules photovoltaïques en série.

III.6.2. Association en parallèle

En additionnant les modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche. La figure (III.9) montre l'intérêt de l'association des cellules ou modules photovoltaïques identiques en parallèle [23].

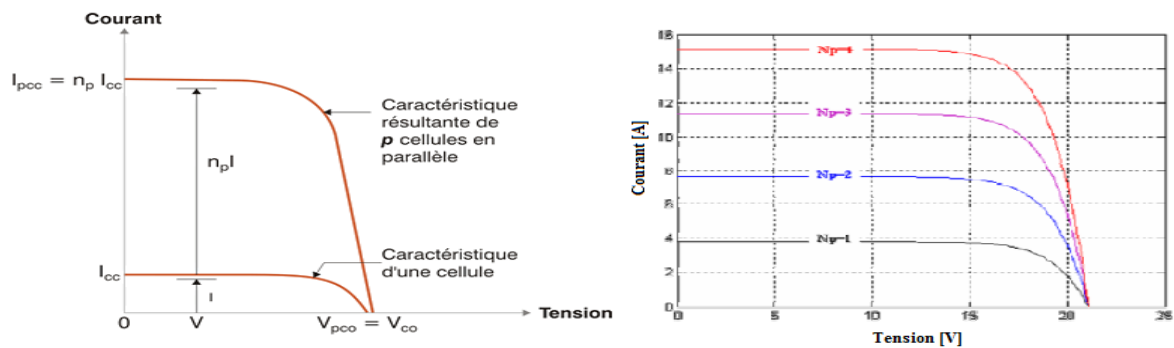


Figure III.9 : Cellules ou modules photovoltaïques en parallèle [23].

III.7. Type de cellules photovoltaïques

Il existe différents types de cellules photovoltaïques, les plus répandues sont constituées de semi-conducteur, principalement à base de Silicium [12]. On trouve trois principaux types de cellules :

III.7.1 Les cellules monocristallines

C'est la première génération de photopiles, elles ont un excellent rendement ainsi une méthode de fabrication laborieuse et difficile, donc très chère, (Figure III.10).

III.7.2 Les cellules poly-cristallines

Un rendement élevé et un coût de production moins élevé ainsi un procédé nécessitant moins d'énergie, (Figure III.11).

III.7.3 Les cellules amorphes

Un rendement faible et un coût de production bien plus bas ainsi une durée de vie plus faible, (cellules de calculatrices par exemple), (Figure III.12).



Figure III.10 : Cellule PV monocristalline Figure III.11 : Cellule PV poly-cristallines.



Figure III.12 : Cellule photovoltaïque amorphe [12]

Les différents rendements en fonction de technologie des cellules sont donnés par le tableau (III.1). De plus, les cellules mono et poly-cristallines sont les types de cellules les plus répandues sur le marché du photovoltaïque (environ 60% de la production).

Tableau I.1 : Les différents rendements en fonction de technologie des cellules [12].

Matériaux	Rendement	Longévité	Caractéristiques	Principales utilisations
Silicium monocristallin	12 à 18 % (24,7% en laboratoire)	20 à 30 ans	* Très performant * Stabilité de production. * Méthode de production coûteuse et laborieuse.	Aérospatiale, modules pour toits, façades,...
Silicium polycristallin	11 à 15% (19,8% en laboratoire)	20 à 30 ans	* Adapté à la production à grande échelle. * Stabilité de production, Plus de 50% du marché mondial.	Modules pour toits, façades, générateurs...
Amorphe	5 à 8% (13% en la boratoire)		* Peut fonctionner sous la lumière fluorescente. * Fonctionnement si faible luminosité. * Fonctionnement par temps couvert. * Fonctionnement si ombrage partiel * La puissance de sortie varie dans le temps. - En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20%	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment

III.8 Générateur photovoltaïque

Typiquement une cellule photovoltaïque produit moins de 2 watts sous approximativement 0.5Volt. Alors pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module, une association série de plusieurs cellules donne un module et une association série et/ou parallèle de plusieurs modules permet de réaliser un générateur photovoltaïque GPV (Figure III.13) [12].

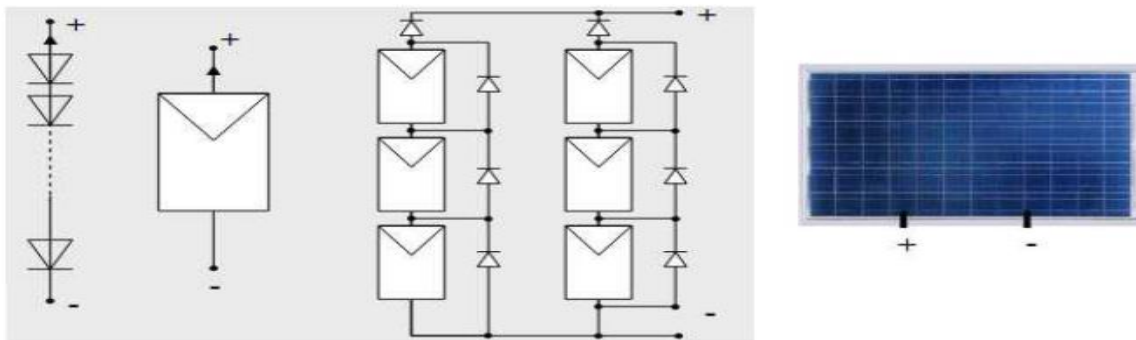


Figure III.13 : Cellules, module et générateur photovoltaïques.

Le passage d'un module à un générateur (ou panneau) se fait par l'ajout de diodes de protection, **une en série** pour éviter les courants inverses et **une en parallèle**, dite diode by-pass, qui n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de production associée.

III.8.1 Circuit équivalent et modèle mathématique d'un GPV

La puissance crête obtenue sous un éclairage maximal sera proportionnelle à la surface du module. La rigidité de la face avant (vitre) et l'étanchéité sous vide offerte par la face arrière soudée sous vide confèrent à l'ensemble sa durabilité. La courbe de la figure (III.14), montre les caractéristiques non linéaires du panneau solaire qui dépend particulièrement des conditions d'ensoleillement et de température. Cependant, plusieurs grandeurs électriques importantes décrivant le fonctionnement du module photovoltaïque sont [23]:

- ✓ Le courant maximal (I_{sc}). Il se produit lorsque les bornes du module sont court-circuitées. Il est appelé courant de court-circuit (I_{sc}) et dépend fortement du niveau d'éclairement.
- ✓ La tension à vide (V_{oc}) pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert.
- ✓ Le point de fonctionnement optimal PPM (la puissance maximale du module).

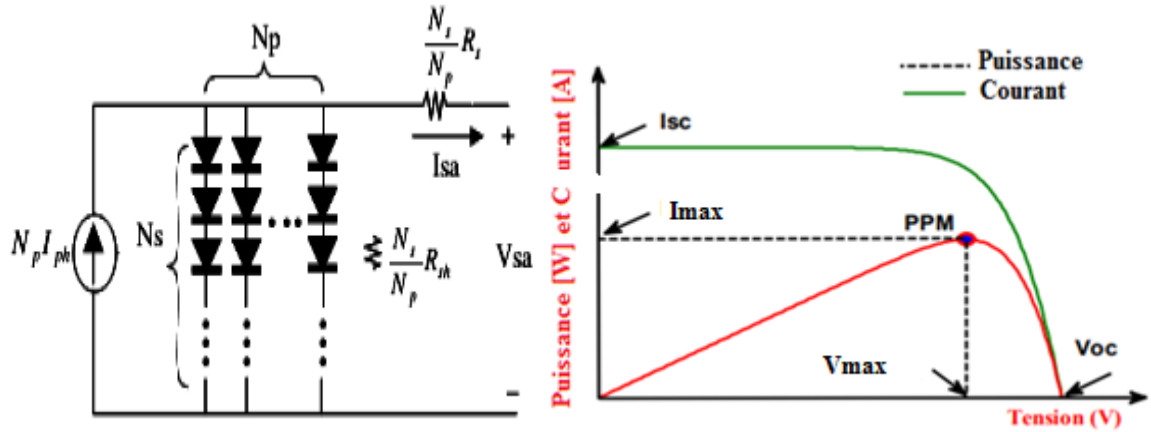


Figure III.14 : Caractéristique électrique d'un GPV [23].

Pour le générateur, la caractéristique I_{pv} - V_{pv} est obtenue par :

$$I_{PV} = N_P. I \quad (III.5)$$

$$V_{PV} = N_S. I \quad (III.6)$$

Où : N_p est le nombre de modules en parallèles et N_s le nombre de modules en séries.

La puissance disponible en sortie du générateur PV est donnée par :

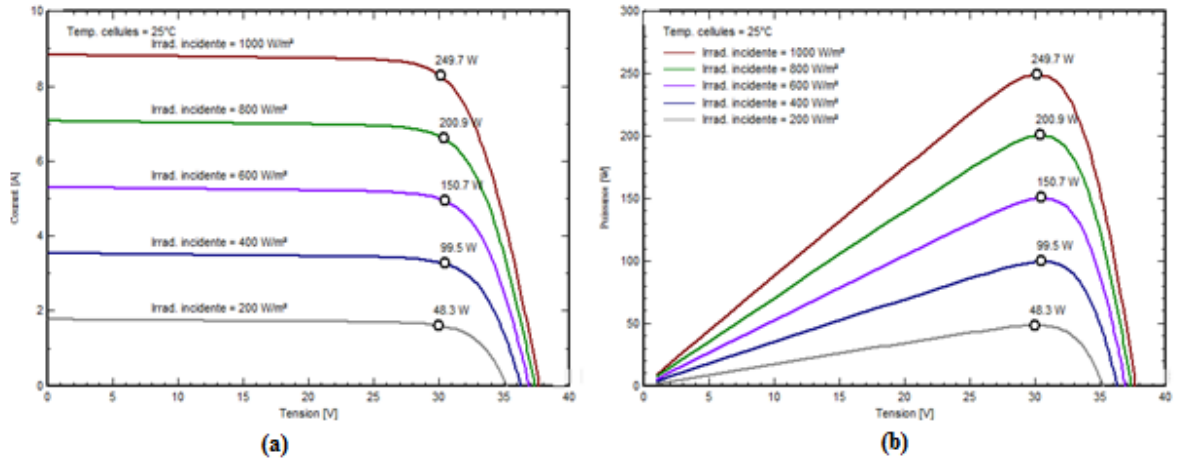
$$P_{PV} = N_s \cdot V_{PV} \cdot N_p \cdot I_{PV} \quad (III.7)$$

Pour un générateur photovoltaïque de N_s cellules en série et N_p cellules en parallèle, le modèle électrique de sa caractéristique I-V est donné comme suit.

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_{sat} \left(\exp \left(\frac{q \left(\frac{V}{N_s} + \frac{IR_s}{N_p} \right)}{\eta \cdot k \cdot T_c} \right) - 1 \right) - \frac{N_p}{R_p} \left(\frac{V}{N_s} + \frac{IR_s}{N_p} \right) \quad (III.8)$$

III.8.2 Influence de l'irradiation et de la température

Les caractéristiques tension-courant et puissance-tension varient sensiblement avec la température et sous divers éclairagements. L'augmentation d'ensoleillement à température fixe, se traduit respectivement par une augmentation de courant de court-circuit et de la puissance produite (l'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que celui de la tension à circuit ouvert), Figure (III.15) a et b. Par ailleurs, une augmentation de la température à éclairage fixe, engendre une diminution de la tension de circuit ouvert et de la puissance produite avec une légère augmentation de courant de court-circuit, Figure (III.15) c et d [10].



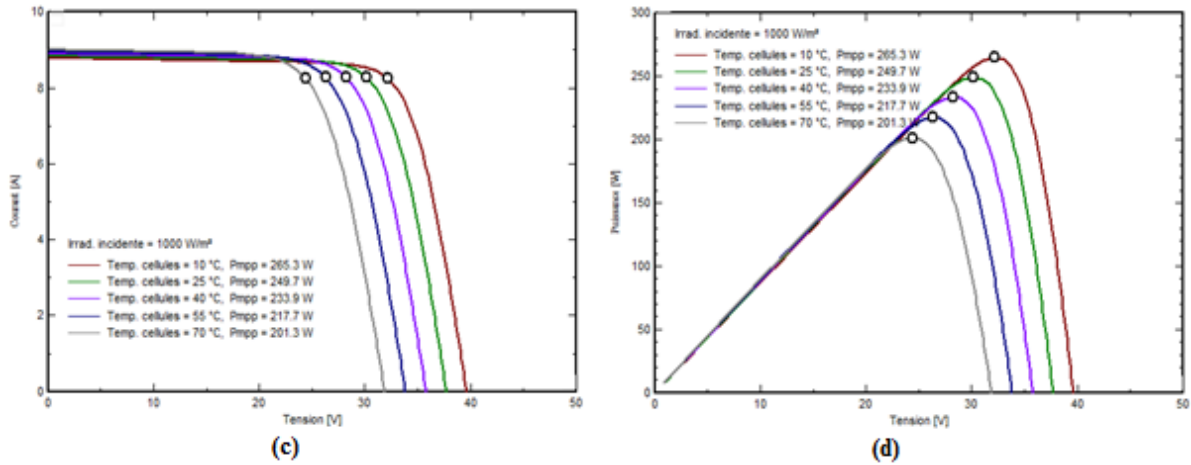


Figure III.15 : Comportement des caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ sous l'influence de l'éclairement et la température.

- La puissance optimale (P_{opt}) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement.
- Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension [4].

III.9 Type des 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 [12].

III.9.1 Système autonome

C'est un système photovoltaïque complètement indépendant d'autre source d'énergie et qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries pour le stockage d'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, sur des îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau. En règle générale, les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique [12].

III.9.2 Système hybride

Les systèmes hybrides se sont des systèmes qui combinent entre deux ou plusieurs sources d'énergies différentes, et cela afin d'assurer la continuité du service électrique et présentent un double avantage afin de minimiser les perturbations de l'environnement, grâce à une consommation sur le lieu de production de ressources naturelles renouvelables et

une sécurité d’approvisionnement, quelles que soient les conditions météorologiques. Les systèmes hybrides se composent généralement de sources d’énergie classique (groupe électrogène), de sources d’énergie renouvelable (éolienne, solaire, hydroélectrique, marémotrice, géothermique, ect), des convertisseurs statiques et dynamique, des systèmes de stockage (batterie, volant d’inertie, le stockage hydrogène..), et un système de surveillance [12].

III.9.3. Système photovoltaïque connecté au réseau électrique

Dans ce genre de système, l’électricité est produite en courant continu par les capteurs, puis transformée en courant alternatif par un onduleur. Ce dernier contrôle la puissance injectée au réseau, le courant alternatif (converti par l’onduleur) est identique à celui qui circule sur le réseau et peut, soit être consommé sur place, soit être injecté sur le réseau.

IV.1 Introduction

L'énergie solaire annuelle irradiée sur les continents est de $1,08 \times 10^{18}$ kWh. Cela correspond à environ 5 000 fois la demande mondiale d'énergie primaire. Utiliser techniquement cette énergie solaire paraît évident. L'énergie solaire thermique joue un rôle particulier dans l'utilisation de l'énergie solaire. Les applications dans ce domaine remontent à l'époque préchrétienne, lorsque des miroirs brûlants ou concaves étaient utilisés pour focaliser les rayons lumineux. Outre la production d'eau chaude sanitaire et le chauffage de l'eau par l'énergie solaire, l'utilisation de la chaleur solaire dans les processus de production d'énergie à grande échelle et dans l'ingénierie des procédés prend aujourd'hui une importance croissante [24].

L'utilisation de l'énergie solaire à travers les systèmes solaires thermiques implique à la fois des aspects pratiques et des bases théoriques étendues.

IV.2 Définition et catégories

Un système solaire thermique exploite le rayonnement du Soleil afin de le transformer directement en chaleur (énergie calorifique) [25]. Le principe consiste à capter le rayonnement solaire et à le stocker dans le cas des systèmes passifs (véranda, serre, façade vitrée) ou, s'il s'agit de système actif, à redistribuer cette énergie par le biais d'un fluide caloporteur qui peut être de l'eau, un liquide antigel ou même de l'air.

L'énergie solaire thermique trouve de nombreuses applications [26] :

- La production d'eau chaude,
- Le chauffage des maisons,
- Le chauffage de l'eau des piscines,
- Le séchage des récoltes,
- La réfrigération par absorption pour les bâtiments,
- La production de très haute température.

On distingue trois types de technologies permettant d'exploiter l'énergie solaire thermique :

IV.2.1 Technologie solaire thermique à basse température

- **La technologie solaire « active »** : traditionnellement, ce terme désigne les applications à basse et moyenne température. Des capteurs solaires thermiques sont installés sur les toits des bâtiments. Un capteur solaire thermique est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie provenant du Soleil et la transmettre à un fluide caloporteur. La chaleur est ensuite utilisée afin de produire de l'eau chaude sanitaire ou bien encore chauffer des locaux.

- **La technologie solaire « passive »** : toujours dans le domaine de la basse température, on peut également citer les installations solaires passives. Par opposition aux applications précédentes, celles-ci ne requièrent pas de composants dits actifs (les capteurs solaires). Ces applications reposent sur des concepts de génie civil et climatique impliquant une architecture adaptée et l'emploi de matériaux spéciaux. L'utilisation passive de l'énergie du Soleil permet de chauffer, d'éclairer ou de climatiser des locaux.

IV.2.2 Technologie solaire thermique à haute température

La technologie solaire concentrée ou « thermodynamique » : ce procédé fournit de la chaleur haute température (de 250 à 1 000°C) par concentration du rayonnement solaire. Ce pouvoir calorifique est utilisé pour actionner des turbines à gaz ou à vapeur afin de produire de l'électricité.

IV.3 Différents capteurs solaires thermiques

Il existe toute une gamme de capteurs solaires qui permettent de répondre à différents besoins. Il faut choisir le type de capteurs qui correspond le mieux au niveau de température auquel on désire "travailler".

IV.3.1 Capteur plan, non vitré

Par exemple les capteurs moquette, d'une structure très simple (réseau de tubes plastiques noirs, le plus souvent en EPDM) utilisés essentiellement pour le chauffage de l'eau des piscines, en été ; ou les capteurs non-vitrés à revêtement sélectif, à irrigation totale, en acier inoxydable, utilisés essentiellement pour le préchauffage d'eau chaude sanitaire, le chauffage basse température plancher chauffant et le chauffage des piscines [24].

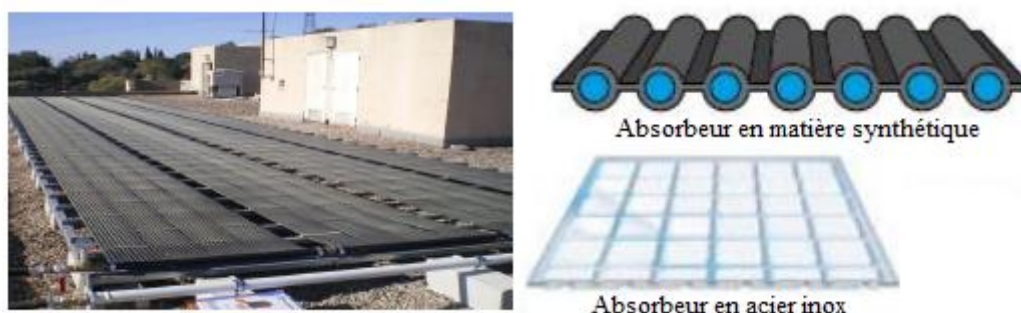


Figure IV.1 : Capteur plan non vitré [24].

IV.3.2 Capteur plan, vitré

Le fluide caloporteur, très souvent de l'eau mélangée à un anti-gel alimentaire, de type mono-propylène glycol, passe dans un serpentin plaqué en sous face d'une feuille absorbante, le tout placé derrière une vitre, dans un caisson isolé de laine minérale et/ou de mousses

composites polyuréthanes ; la vitre est transparente à la lumière du soleil mais opaque aux rayons infrarouges de l'intérieur, ce qui piège la chaleur [24] (Figure IV.2).

Si ces capteurs sont les modèles les plus choisis, c'est qu'ils sont :

- Robustes et d'une structure simple ;
- Techniquement perfectionnés (qualité de la vitre, isolation) ;
- D'un rapport prix/performances sans égal ;
- Faciles à intégrer grâce à leur surface plane ;
- Discrets en montage sur le toit.



Figure IV.2 : Capteur plan vitré [25].

IV.3.3 Capteur à tubes sous vide

Le fluide caloporteur circule à l'intérieur d'un tube sous vide simple ou double. Le vide améliore l'isolation contre les pertes en convection, par rapport au capteur précédent (Figure IV.3). Deux principes sont rencontrés : le premier principe est le même que pour les capteurs plans vitrés, le fluide caloporteur parcourt le tube en aller et retour pour recueillir la chaleur ; le second est plus poussé technologiquement, il fait appel à un caloduc, utilisant un second fluide caloporteur restant dans le tube.

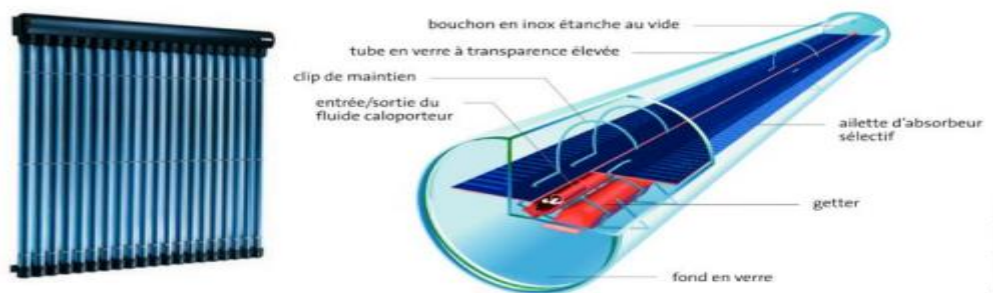


Figure IV.3 : Capteur à tube sous vide [25]

IV.4 Technologie solaire thermique basse température active

IV.4.1 Chauffe-eau solaire

Un chauffe-eau solaire fonctionne selon un principe simple : l'énergie du rayonnement solaire est absorbée par des capteurs plans fonctionnant selon le principe de l'effet de serre (Figure IV.4).

La chaleur emmagasinée est ensuite transportée au sein d'un circuit « primaire » contenant un mélange caloporteur d'eau et d'antigel. Grâce à un échangeur thermique, le liquide caloporteur contenu dans le circuit primaire transmet son énergie thermique à de l'eau sanitaire contenue dans le réservoir (un « ballon ») d'un second circuit isolé, dit « secondaire ». Le liquide caloporteur refroidi repart ensuite vers les capteurs afin d'être réchauffé.

Lorsque l'eau chauffée dans le ballon est utilisée, elle est remplacée par de l'eau froide du réseau, réchauffée selon le même principe.

IV.4.2 Plancher solaire

Le plancher solaire utilise le même principe d'extraction de l'énergie thermique que le chauffe-eau. Le fluide caloporteur chauffé à 25-30 °C est ici directement injecté dans un réseau de tubes installés dans le sol des bâtiments. Cette technique éprouvée permet d'économiser jusqu'à la moitié des besoins en énergie de chauffage d'un foyer. Pour fournir un chauffage relativement constant tout au long de la journée malgré l'intermittence du rayonnement solaire, le plancher solaire utilise l'inertie thermique (la capacité de stockage énergétique temporaire) de la dalle en béton. (Figure IV.5)

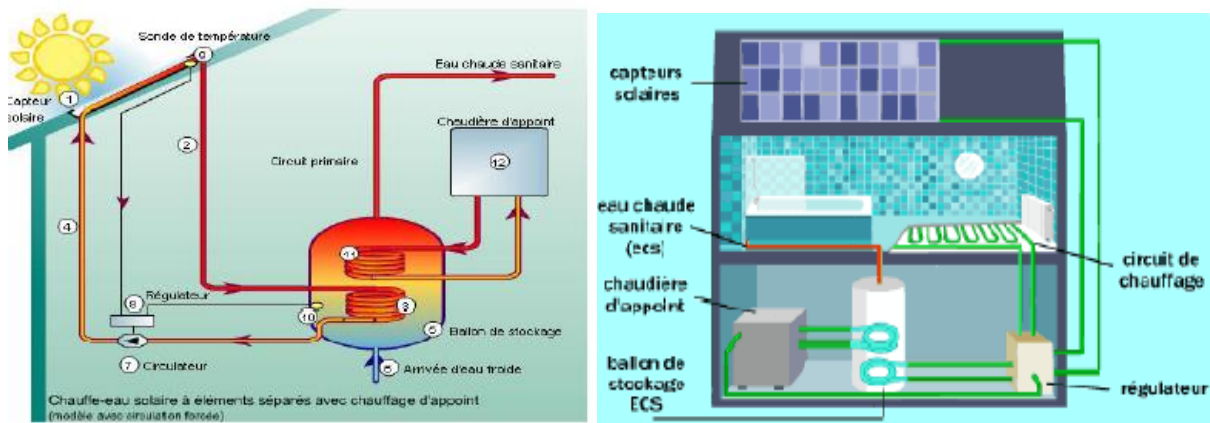


Figure IV.4 : Chauffe-eau solaire thermique [28] Figure IV.5 : Plancher solaire [28]

IV.4.3 Rafraîchissement solaire

Paradoxalement, la chaleur du rayonnement solaire peut aussi être utilisée pour rafraîchir un bâtiment. La technique la plus commune consiste à utiliser des capteurs solaires pour fournir de la chaleur qui est dirigée vers une machine à absorption. Cette machine dissocie, par ébullition, une solution d'eau et de bromure de lithium. Après refroidissement, la recombinaison des deux composants produit du froid, par absorption de chaleur. Le froid est ensuite distribué de manière identique à celle de la climatisation classique [29].

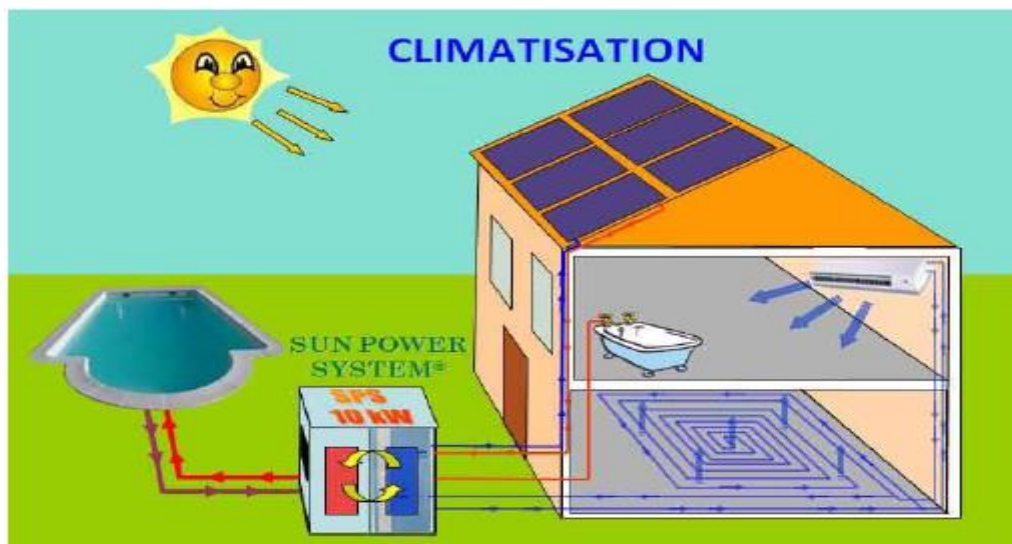


Figure IV.6 : Rafraîchissement solaire [29].

IV.5 Technologie solaire thermique haute température

La concentration du rayonnement solaire sur une surface de captage permet d'obtenir de très hautes températures généralement comprises entre 400 °C et 1 000 °C. La chaleur solaire produit de la vapeur qui alimente une turbine qui alimente elle-même un générateur qui produit de l'électricité. Trois technologies distinctes sont utilisées dans les centrales solaires à concentration (centrales héliio-thermodynamiques) :

- Les capteurs cylindro-paraboliques ;
- Les concentrateurs paraboliques ;
- Les centrales à tour.

Remarque :

Attention, les systèmes solaires à concentration collectent uniquement le rayonnement solaire direct, alors que les capteurs solaires plans non concentrateurs et les modules photovoltaïques captent également le rayonnement diffus [30].

IV.5.1 Réflecteurs cylindro-paraboliques

La technologie des capteurs cylindro-paraboliques est actuellement la plus éprouvée des techniques de concentration solaire (Figure IV.7). De nombreuses installations ont déjà été testées et commercialisées. L'installation typique est constituée de trois éléments principaux :

- le champ solaire ;
- le système de transfert de la chaleur ;
- le système de génération électrique.

L'énergie thermique reçue au collecteur est absorbée par un tuyau métallique à l'intérieur d'un tube en verre sous vide. Le fluide caloporteur qui circule à l'intérieur du tuyau, est chauffé à une température d'environ 400°C. Ce fluide est ensuite pompé à travers des échangeurs conventionnels

afin de produire de vapeur surchauffée qui fait fonctionner une turbine et un générateur électrique [28].



Figure IV.7 : Capteur cylindro-parabolique [29].

IV.5.2 Systèmes à réflecteur parabolique

Ainsi dites miroirs de Fresnel, le facteur de coût important dans la technologie des collecteurs cylindro-paraboliques (Figure IV.8-a) est la mise à forme du verre pour obtenir la forme Parabolique requise. Afin de diminuer ce coût, plusieurs groupes de recherche travaillent sur des prototypes de collecteurs de Fresnel à focalisation linéaire. L'idée est d'approximer la forme parabolique du collecteur par une succession de miroirs plans.

Un premier étage de réflecteurs est installé sur le sol. Le rayonnement est réfléchi au foyer de la parabole approximée par le jeu de miroirs. Un deuxième étage de réflecteurs redirige le rayonnement vers le tube récepteur. Ce second étage de réflecteurs, en plus de réfléchir le rayonnement, joue aussi le rôle d'isolant pour le tube récepteur. Il est en effet recouvert d'une importante couche d'isolation en sa partie supérieure. La partie inférieure est quant à elle isolée par une vitre (Figure IV.8-b).

Les principaux avantages de cette technologie par rapport aux concentrateurs traditionnels sont :

- Coût inférieur des miroirs
- Pas de vide à l'intérieur du tube récepteur, ce qui facilite sa conception et sa durabilité.
- Les contraintes mécaniques dus à la poussée du vent sont réduites par la disposition plane des miroirs.

Il existe aussi les réflecteurs paraboliques raccordés directement à un moteur ou, le récepteur absorbe l'énergie réfléchie par le concentrateur et la transfère au fluide de travail du cycle de

puissance. La température de la source chaude peut être adaptée en plaçant le récepteur plus ou moins loin du foyer du collecteur [30].

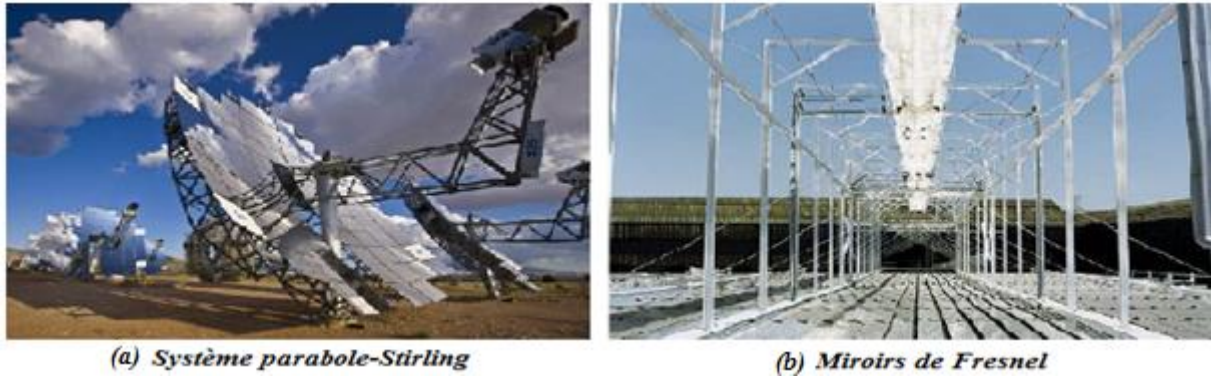


Figure IV.8 : Capteur parabolique [31]

IV.5.3 Concentrateur à tour

Ici, on ambitionne d'emblée de déployer des surfaces de miroir très importantes. On renonce donc à utiliser une vraie parabole (qui devrait être mobile ce qui est unimaginable en grande taille) et on la remplace par une pseudo-parabole, à foyer fixe, d'une taille pouvant atteindre plusieurs centaines de milliers de mètres carrés, et constituée de centaines ou de milliers de miroirs plans orientables (Figure IV.9). On appelle ces miroirs « héliostats ».

Leur ensemble constitue le « champ d'héliostats ». On utilise ici l'image de la pseudo-parabole parce que, à chaque instant, les rayons solaires atteignant le centre de chaque héliostat sont réfléchis par le dispositif en direction d'un point unique, fixe dans le temps, et qui joue donc le rôle du foyer de la parabole. La surface réfléchissante de cette « parabole » étant fatalement déployée au sol, son « foyer » se trouve en altitude. Pour y disposer le récepteur, on est amené à construire une tour de grande hauteur qui donne son nom à la filière.

Pour faire fonctionner ce dispositif, il faut réaliser un « tir croisé » des héliostats et pour cela animer chaque miroir d'un mouvement de suivi du soleil particulier. Comme dans le cas précédent, ce mouvement peut être obtenu par la combinaison de deux rotations [30].



Figure IV.9 : Capteur à tour [31].

IV.6 Etude énergétique d'un capteur solaire plan

IV.6.1 Performance d'un capteur solaire thermique

La puissance utile Q_u que l'on peut récupérer d'un capteur solaire dépend de nombreux paramètres (Figure IV.10),

À savoir :

Les paramètres extérieurs :

- G : La puissance solaire incidente sur le plan du capteur (W/m^2).
- T_m : La température moyenne du capteur (approximée à la moyenne entre les températures d'entrée et de sortie de capteur) (en $^{\circ}\text{C}$).
- T_{ext} : La température extérieure (en $^{\circ}\text{C}$).

Les paramètres définissant le capteur :

- β : Le facteur optique du capteur, qui est le rapport entre l'ensoleillement absorbé par l'absorbeur et l'ensoleillement incident sur le vitrage. Ce facteur optique est le produit du facteur de transmission du vitrage τ par le coefficient d'absorption de l'absorbeur α .
- U_L : Le coefficient de déperditions thermiques du capteur en $[\text{W/m}^2\text{K}]$.
- A_c : La surface du capteur en $[\text{m}^2]$.

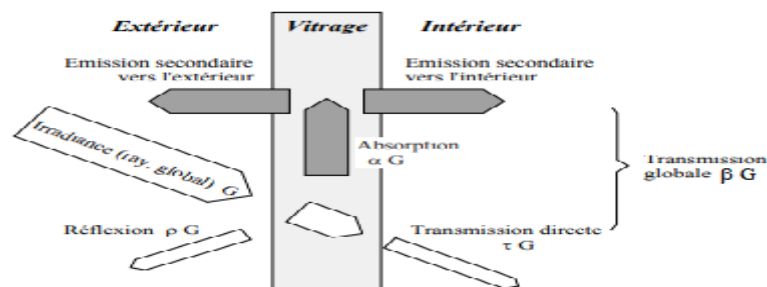


Figure IV.10 : Rayonnement à travers un vitrage[31].

L'énergie utile est donc égale à la partie de l'énergie incidente traversant le vitrage moins les déperditions thermiques (proportionnelle à l'écart de température entre le capteur et l'ambiance).

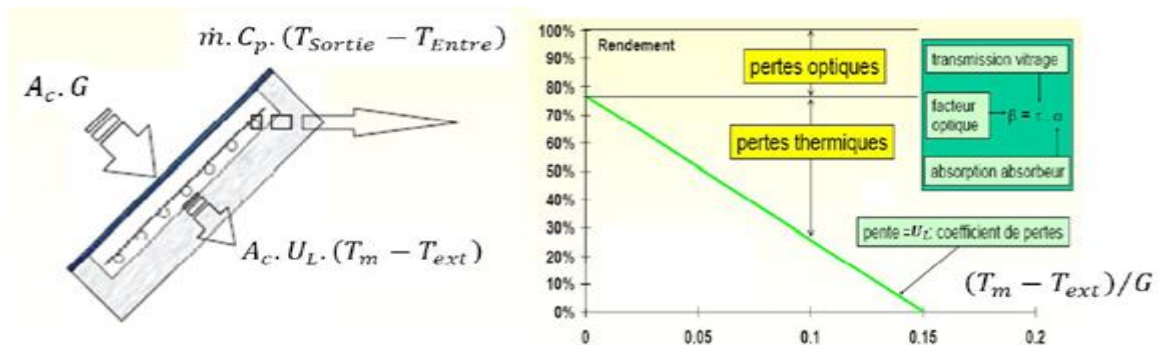


Figure IV.11 : Bilan thermique d'un capteur plan [31].

A partir du bilan énergétique indiqué dans la figure (IV.11), on a :

$$\alpha \cdot \tau \cdot A_c \cdot G = A_c \cdot U_L \cdot (T_m - T_{ext}) + \dot{m} \cdot C_f \cdot (T_{sortie} - T_{entrée}) \quad (IV.1)$$

Le rendement du capteur η est égale à :

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c \cdot G} = \frac{\dot{m} \cdot C_f \cdot (T_{sortie} - T_{entrée})}{A_c \cdot G} = \frac{\alpha \cdot \tau \cdot G - U_L \cdot (T_m - T_{ext})}{G} \quad (IV.2)$$

D'où

$$\eta = \alpha \cdot \tau - \frac{U_L \cdot (T_m - T_{ext})}{G} \quad (IV.3)$$

Ou bien

$$\eta = \beta - U_L \frac{(T_m - T_{ext})}{G} \quad (IV.4)$$

D'autres méthodes peuvent être utilisées : Cooper et Dunkle (1981) proposent une dépendance linéaire entre la température et le coefficient de perte totale [31] :

$$U_L = a - b \cdot \frac{(T_m - T_{ext})}{G} \quad (IV.5)$$

Et l'efficacité instantanée du collecteur comme ajustement de second ordre en fonction de la température :

$$\eta = \beta - a \frac{(T_m - T_{ext})}{G} - b \left(\frac{T_m - T_{ext}}{G} \right)^2 \quad (IV.6)$$

La figure (IV.12) illustre les différents rendements des capteurs plans.

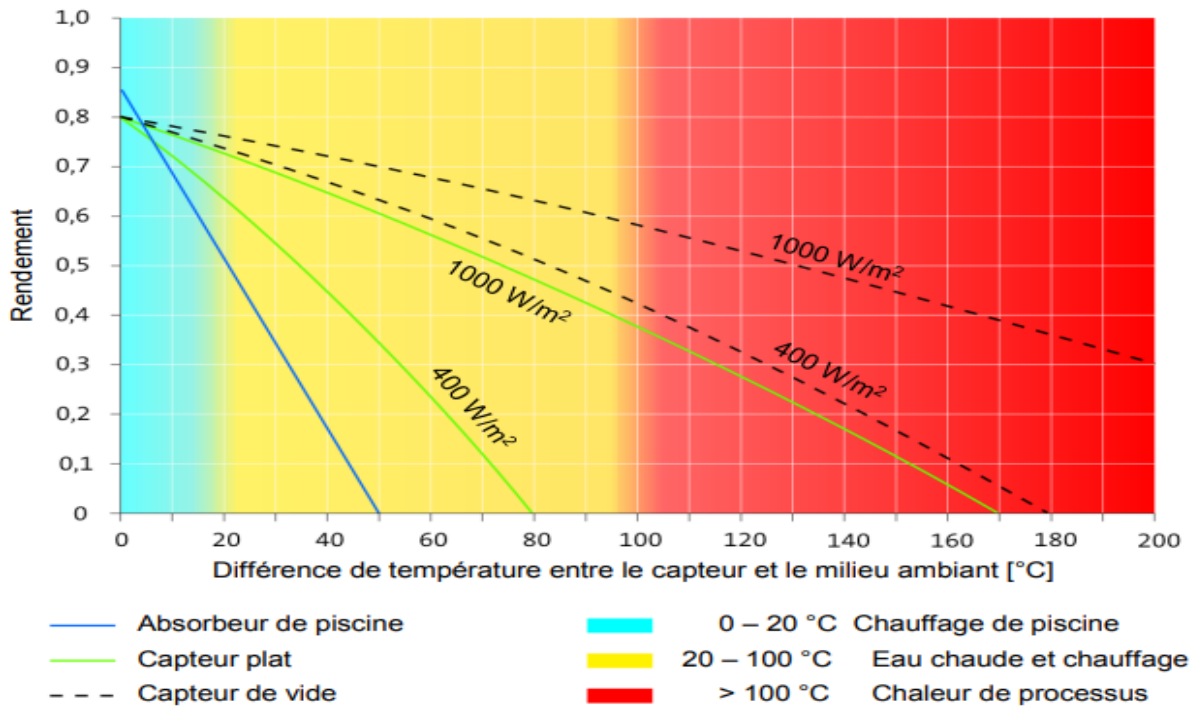


Figure IV.12 : Rendements énergétiques des capteurs plans [32]

- [1] <https://youmatter.world/fr/12-05-2022>
- [2] <https://expertises.ademe.fr/12-05-2022>
- [3] Freris Leon, Infield David, « *Les énergies renouvelable pour la production de l'électricité* », édition Dunod, Paris 2009.
- [4] <https://www.mtaterre.fr/dossiers/comment-ca-marche-la-biomasse/> 17-05-2022.
- [5] C. Anjou « *L'énergie géothermique : Représentation, contextes et enseignements aux Antilles et dans la zone Caraïbe* » École doctorale Milieu insulaire tropical, caraïbes Amérique, thèse doctorat 2018.
- [6] <https://www.geothermies.fr/17-05-2022>
- [7] <https://www.sorbonne-universite.fr/17-05-2022>
- [8] Roger Gincchio, Pierre-Louis Viollet « *L'énergie hydraulique* » Collection EDF R&D 2^{ème} édition.
- [9] <https://www.missionenergie.goodplanet.org/20-05-2022>
- [10] <https://fr.slideshare.net/Saamysaami/systeme-solaire-passif> 21/05/2022
- [11] <https://sites.google.com/site/powerosolaire/our-company> 21/05/2022
- [12] O. Bouchiba « *Conception simulation et modélisation d'une station hybride PV/éolien* » Thèse doctorat, université de Laghouat 2021.
- [13] C. Benaouag &all « *Les barrières au développement des énergies renouvelables en Algérie Barriers to the development of renewable energies in Algeria* » Revue Stratégie et développement, Vol 09 / N°: 03 (2019), p 261-273.
- [14] N. Boubou-Bouziani « *Les énergies renouvelables et l'eau en Algérie*» Communication Science & technology vol 17. July 2016.
- [15] M. Hacil « *Amélioration des Performances des Energies Eoliennes* » Thèse de doctorat, universite mentouri, constantine, 2012.
- [16] S. Boudia, « *Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie* » Thèse de doctorat, université de Tlemcen, 2013.
- [17] F. Chellali, « *Etude du comportement stochastique et cyclique du vent en Algerie* » thèse de doctorat. Ecole National polytechnique Alger, 2011.
- [18] <https://eduscol.education.fr/15/03/2022>.
- [19] N. K. Merzouk, «Wind energy potential of Algeria. Renewable Energy», 21(3-4), 553-562. (2000).

- [20] O. Bouchiba, « *Contribution à l'étude du gisement éolien a la région de Laghouat* » Mémoire de Magister. Université de Laghouat, 2012.
- [21] M. L. Louazene « Contribution à l'optimisation des systèmes photovoltaïques utilisés pour l'irrigation dans les zones sahariennes – Application zone de Ouargla » Thèse de doctorat de l'université El Hadj Lakhdar, Batna, 22 Octobre 2015
- [22] B. Multon « Généralités sur l'énergie, conversions en électricité » Master. Bruz, France. 2017, 163.
- [23] M. Birane « Systèmes de conversion de l'énergie Photovoltaïque » polycopie de cours, université de Laghouat, 2019.
- [24] https://gunt.de/images/download/Lnergie-solaire-thermique-brochure_french.pdf 16/06/2022
- [25] <https://www.totalenergies.fr/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/energie-renouvelable/l-energie-solaire-thermique16/06/2022>
- [26] <https://www.landes.fr/files/cg40/environnement/Guide-ST.pdf> 20/06/2022
- [27] <http://panneausol.fr/type-panneau-solaire.php> 20/06/2022
- [28] <https://www.chauffage-info.be/chaudieres/chauffe-eau-solaire> 20/06/2022
- [29] http://sunpowersystem.pagesperso-orange.fr/P_sps.html 24/06/2022
- [30] **A. Belhadje** « *L'énergie solaire concentrée : Etat de l'art et technologies* » Communiqué scientifique : Energie et Environnement.
- [31] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-thermodynamique-concentration> 24/06/2022
- [32] S. Saadi « *Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan* », mémoire de magister, université Mentouré – Constantine, 2010.
- [33] https://environnement.brussels/sites/default/files/user_files/pres_20151208_ser_1_4solt_fr.pdf 24/06/2022.