

الجمهورية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة ابي بكر بلقايد- تلمسان-

Université Abou-Bakr Belkaid Tlemcen  
Faculté de Technologie  
Département de Génie Électrique et Électronique



**MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Génie Mécanique

**Spécialité** : Génie Energétique

Par : BENBACHIR YOUNES

**Sujet**

**Modélisation, simulation et optimisation des gisements solaires et éoliens  
des sites isolés de l'Algérie cas d'Adrar et de Naama**

Soutenue publiquement le **22 /10 / 2015** Devant la commission d'examen

Président	Mr. SAIM Rachid	professeur	Université de Tlemcen
Examineurs	Mr. KORTI Nabil	Maitre de conférence A	Université de Tlemcen
	Mr. SELADJI Chakib	Maitre de conférence A	Université de Tlemcen
Directeur	Mr. AZZI Ahmed	Maitre de conférence A	Université de Tlemcen
Co-directeur	Mr. BENMANSSOUR Abdelhalim	professeur	Université de Tlemcen

Année Universitaire 2014 – 2015

## Résumé

Réalisation d'un programme de calcul des potentiels énergétiques photovoltaïques et éoliens pour chaque heure de la journée et pour des localités bien définies (caractéristique géographique et météorologique) dans notre cas nous avons choisis Adrar et Naama.

Une fois le programme validé, nous pourrions le généraliser à toute l'Algérie.

Ceci pour pouvoir installer des suivis stations de production électrique P.V, éolienne ou hybrides. Pour cela nous avons utilisé les données journalières et mensuelles (temps, vitesse du vent, etc) simulée par la Nasa.

Le présent travail est d'élaborer une méthode basée à la fois sur la simulation et sur les données des stations radiométriques et météorologiques (**National Climatic Data Center, NASA Surface Meteorology and Solar Energy**). Il permet d'évaluer d'une façon continue et très représentative les potentiels énergétiques éoliens et solaires sur des sites isolés de l'Algérie. Nous avons pris deux exemples, Naama qui représente le haut plateau et Adrar qui représente le sud de l'Algérie.

## Abstract

Performing a calculation program for photovoltaic and wind energy potential for every hour of the day and for defined areas (geographical and meteorological characteristics) in our case we have chosen Adrar and Naama.

Once validated program, we could generalize it to the whole of Algeria.

This followed in order to install power generation stations wind or hybrid P.V. For this we used the daily and monthly data (time, wind speed, etc.) simulated by NASA.

The present work is to develop a method based on both simulation and data radiometric and meteorological stations (**National Climatic Data Center, NASA Surface Meteorology and Solar Energy**). It measures a continuous and very representative wind and solar energy potential on isolated from Algeria sites. We took two examples Naama representing plateau and Adrar representing southern Algeria.

## ملخص

أداء برنامج حساب لإمكانات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح في كل ساعة من ساعات النهار وفي مناطق محددة جيدا (الخصائص الجغرافية والمناخية) في حالتنا اخترنا أدرار ونعامة، مجرد التحقق من صحة البرنامج يمكننا أن نعمم على كل الجزائر. وهذا من أجل تثبيت محطات الطاقة لتوليد كهرباء هجينة شمسية هوائية ولهذا كنا نستعمل البيانات اليومية والشهرية (الوقت، وسرعة الرياح، الخ) المحاكاة من قبل وكالة ناسا.

(**National Climatic Data Center, NASA Surface Meteorology and Solar Energy**) العمل الحالي هو تطوير طريقة تقوم على كلا المحاكاة و بيانات محطات قياس الإشعاع و الأرصاد الجوية .

أنه يسمح بقياس إمكانات الطاقة الشمسية والهوائية بطريقة مستمرة وتمثيلية جدا في مواقع معزولة من الجزائر. أخذنا مثالين نعامة تمثل هضبة عليا وأدرار تمثل جنوب الجزائر.

## **REMERCIEMENTS**

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma profonde gratitude ainsi que mes sincères remerciements à :

Je tiens tout d'abord à remercier Allah le tout puissant qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce travail.

- A notre maître et président de jury Monsieur le professeur SAIM RACHID Professeur à l'université de Tlemcen.
- A notre encadreur et co-encadreur de mémoire Monsieur AZZI AHMED et Monsieur BENMANSOUR ABDELHALIM

Vous nous avez toujours réservé le meilleur accueil,

Malgré vos obligations, vos encouragements inlassables, votre gentillesse méritent toute admiration.

Je profite cette occasion pour vous exprimer ma profonde gratitude tout en vous témoignant mon respect

- A nos maîtres et jurys de mémoire

Mr NABIL KORTI, Mr SELADJI CHAKIB

Vous nous faites l'honneur d'accepter avec ma très Grande amabilité de siéger parmi notre jury de mémoire.

Mes remerciements vont également à Mr : MAMMAR HICHEM pour son aide et sa disponibilité sans limite.

Enfin, je tiens à remercier tous ceux qui, de près ou du loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

## **DEDICACES**

A mes très chers parents, ma mère et mon père, aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que vous méritez pour tous les sacrifices que vous n'avez cessé de me faire depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte.

A mon très cher ami MAMMAR HICHEM

Sans ton aide, tes conseils, tes encouragements et ton soutien, Ce travail n'aurait vu le jour.

A mes amis M.BENBACHIR et N.CHIKH

Votre soutien moral et matériel, votre gentillesse sans égal m'ont permis de réussir mes études

A ma sœur et son mari, Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.

A tous mes chers collègues de master Génie Energétique.

Je dédie ce travail

## **TABLE DES MATIERES**

### **I. Introduction générale**

.....10

### **II. Chapitre 1 : Etude bibliographique sur l'énergie photovoltaïque .....12**

II-1. Introduction :	12
II-2. Soleil source d'énergie :	12
II-2-1 Spectre solaire	12
II-3. L'énergie photovoltaïque :	14
II-3-1 Photovoltaïque :	15
II-3-2 Principe de conversion photovoltaïque :	15
II-3-3 la cellule photovoltaïque :	16
II-3-4 Les filières technologiques :	17
A. cellules en silicium cristallin	19
A-1 Cellule photovoltaïque en silicium monocristallin :	19
A-2 Cellule photovoltaïque en silicium multi cristallin	19
B. Cellules solaires en films minces [14]:	20
B-1 Le silicium amorphe :	20
B-2 Les cellules à base de tellure de cadmium (CdTe):	22
B-3 Cellule CIS (Cuivre Indium Sélénium) –CIGS :	23
B-4 Les cellules à base CZTS :	24
C. Cellules organiques et hybrides :	24
C-1 Cellules organiques	25
C-2 Cellule hybride	26
II-4. L'irradiation solaire mondiale et en Algérie :	27
II-4-1 L'irradiation solaire mondiale :	27
II-4-2 L'irradiation solaire en Algérie.....	28
II-4-3 les caractéristiques des deux sites étudiés :	28
II-5. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire :	29

- A. Avantages :..... 29
- B. Inconvénients : 30

II-6. Conclusion 31

### ***III. Chapitre 2 : Etude bibliographique sur l'énergie éolienne 32***

III-1. Introduction : 32

III-2. Potentiel éolien dans le monde 32

III-3. Potentiel éolien en Algérie 33

III-4. les différents types d'éoliennes : 34

III-4-1 Les éoliennes à Axes Horizontales : 35

A. L'éolienne offshore : [23] 35

B. Les éoliennes on shore [23] 37

C. l'éolien zeppelin 38

III-4-2 les éoliennes à axes vertical 39

A. Les éoliennes verticales Darrieus 40

B. Eolienne à axe vertical de type savonius 41

III-4-3 Utilisation domestique dans le cadre du « petit éolien » [23] 42

III-5. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne [23] 43

III-6. Conclusion : 44

### ***IV. Chapitre 2 : Méthodes de calcul des potentiels énergétiques photovoltaïques et éoliens dans un site donné 45***

IV-1. Introduction 45

IV-2. Modélisation numérique du gisement solaire et optimisation de l'inclinaison de capteur solaire : 45

IV-2-1 Notion de base : 46

IV-2-2 Calcul de l'ensoleillement sur un plan incliné : 47

IV-2-2-1. Calcul de l'ensoleillement horaire global et diffus : 48

IV-2-2-2. Calcul de l'ensoleillement horaire dans le plan du champ PV : 49

IV-2-2-3. Sommation : 50

#### IV-3. Modélisation numérique du gisement éolien 50

##### IV-3-1 Introduction : 50

##### IV-3-1-1. Evaluation du potentiel énergétique éolienne 51

###### A. Distribution de Weibull 51

###### B. Détermination des paramètres de Weibull 51

###### C. Présentation de la plateforme NCDC [24] 52

###### C-1 Procédure de simulation 53

#### IV-4. Conclusion : 54

### ***V. Chapitre 3 : Résultats et interprétation 55***

#### V-1. Introduction : 55

#### V-2. Résultats et interprétation de l'Energie solaire disponible 55

##### V-2-1 Caractéristiques des stations radiométriques choisis : 56

##### V-2-2 L'ensoleillement : 56

###### V-2-2-1. Durée de jour : 56

###### V-2-2-2. Indice de clarté : 57

###### V-2-2-3. Irradiation globale, diffuse et directe sur un plant horizontale : 58

###### V-2-2-4. Irradiation globale sur un plan incliné : 59

###### V-2-2-5. Optimisation de l'irradiation mensuelle par suiveur de soleil 60

###### V-2-2-6. les différents angles d'orientation de capteur solaire 61

#### V-3. Résultats et interprétation de l'Energie éolien disponible 62

##### V-3-1 Caractéristique des stations métrologiques choisis 62

##### V-3-2 Histogramme distribution de Weibul des vitesses du vent à Adrar et Naama 62

##### V-3-3 Paramètres de Weibull des sites Adrar et Naama : 65

### ***VI. Conclusion Générale Et Perspectives 67***



## *Liste des figures*

Figure 1 : l'irradiante solaire en fonction de la longueur d'onde .....	13
Figure 2 : Les différents rayonnements solaires.....	14
Figure 3 : les rayonnements solaires au niveau d'une surface inclinée de 37 °.....	14
Figure 4 : Schéma descriptif d'une jonction PN .....	16
Figure 5 : Passage d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction sous l'effet de la lumière. [8].....	16
Figure 6 : structure typique d'une cellule solaire [9].....	17
Figure 7 : production mondiale du module photovoltaïque par technologie en 2012 [11] .....	18
Figure 8 : conception d'une cellule au silicium cristallin [12] .....	19
Figure 9 : Perspectives d'évolution de la production.....	20
Figure 10 : cellule au silicium amorphe [16] .....	21
Figure 11 : structure d'une cellule solaire à base de CdTe [17] .....	22
Figure 12 : structure d'une cellule solaire à base de CIGS[18] .....	24
Figure 13 : Structure d'une cellule de type bicouche [17] .....	25
Figure 14 : l'irradiation solaire moyenne dans le monde en KWh/m <sup>2</sup> /an [21] .....	27
Figure 15 : l'irradiation solaire moyenne en Algérie [21] .....	28
Figure 16 : Puissance éolienne cumulée dans le MONDE [21] .....	32
Figure 17 : le gisement éolien dans le monde .....	33
Figure 18 : Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol [22].....	34
Figure 19 : Parc éolien offshore Allemagne.....	36
Figure 20 : L'éolienne on shore .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 21 : Le vent entraîne la rotation du ballon autour de l'axe horizontal .....	39
Figure 22 : Différentes déclinaisons des éoliennes à axe vertical de type Darrieus .....	40
Figure 23 : Le rotor Savonius est composé de deux demi-cylindres désaxés [24] .....	41
Figure 24 : Éolienne domestique de 150 W .....	42
Figure 25 : schéma fonctionnel du calcul de l'ensoleillement sur un plan incliné .....	48

Figure 26 : fenêtre principale de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 27 : variation journalière de l'insolation maximale durant une année à Adrar et Naama .....	56
Figure 28 :Variation mensuelle de l'indice de clarté .....	57
Figure 29 L'évolution mensuelle de l'irradiation directe, diffuse et globale sur un plan horizontale à Adrar.....	58
Figure 30 : L'évolution mensuelle de l'irradiation directe, diffuse et globale sur un plan horizontale à Naama.....	58
Figure 31 : l'évolution mensuelle de l'irradiation globale sur un plan incliné à Naama .....	59
Figure 32 :l'évolution mensuelle de l'irradiation globale sur un plan incliné à Adrar .....	59
Figure 33 : d'optimisation de l'angle sur l'irradiation mensuelle à Naama.....	60
Figure 34 : d'optimisation de l'angle sur l'irradiation mensuelle à Adrar.....	60
Figure 35 : les différents angles d'orientation de capteur solaire (Naama).....	61
Figure 36 : les différents angles d'orientation de capteur solaire (Adrar).....	61
Figure 37 Histogramme distribution de Weibul des vitesses du vent à Adrar (Janvier) .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 38 Histogramme et distribution de Weibul des vitesses du vent à Naama (Janvier) .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 39 :Histogramme et distribution de Weibul des vitesses du vent à Adrar (Avril) .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 40 histogramme et distribution de Weibul des vitesses du vent à Naama (Avril) .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 41: Histogramme et distribution de Weibul des vitesses du vent à Adrar (Aout) .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 42 histogramme et distribution de Weibul des vitesses du vent à Naama (Aout) .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>

### *Liste des tableaux*

Tableau 1 :Comparatif des rendements des différents types de cellules .....	26
Tableau 2 : caractéristiques des sites étudié (solaire) .....	56

Tableau 3: caractéristique des sites étudié (éolien) ..... 62

Tableau 4 comparaison des vitesses (max et fréquente) pour Naama et Adrar **Erreur ! Signet non défini.**

## I. Introduction générale

L'Algérie prévoit d'atteindre à l'horizon 2030 près de 40% de la production nationale d'électricité de sources renouvelables tel que l'énergie solaire et l'énergie éolienne. La rentabilité de l'exploitation de ces formes d'énergie dépend principalement des potentiels énergétiques photovoltaïques et éoliens existantes.

Plusieurs études ont été développées pour évaluer les potentiels énergétiques éoliens et photovoltaïques en Algérie, parmi lesquels on cite :

H.Zeraia et al ont pu, à travers le logiciel HOMER, prédire les données de l'irradiation solaire des différents sites isolés algériens [1]. A.MOUMMI et al ont étudié, à travers le logiciel RETSCREEN l'effet de l'inclinaison du capteur solaire sur les composants diffus, globaux et directs du rayonnement photovoltaïque [2]. Sidi Mohammed Boudia a permis de réactualiser la carte des vents à 10m, en utilisant des données météorologiques plus récentes et un plus grand nombre de points de mesure par rapport aux précédents travaux. Farouk Chellali, a permis d'étudier le phénomène cyclique du vent et a contribué à l'actualisation de la carte des vents en Algérie en introduisant le site de Hassi-Rmel qui avait été sous-estimé dans les précédents travaux.

La simulation permet d'évaluer ces données d'une façon continue dans l'espace et dans le temps tandis que les stations radiométriques et météorologiques offrent des données plus représentatives et réels mais possèdent aussi des lacunes et discontinuités et elles sont très coûteuses.

### ***Travail personnel :***

Réalisation d'un programme de calcul des potentiels énergétiques photovoltaïques et éoliens pour chaque heure de la journée et pour des localités bien définies (caractéristique géographique et météorologique) dans notre cas nous avons choisis Adrar et Naama.

Une fois le programme validé, nous pourrions le généraliser à toute l'Algérie.

Ceci pour pouvoir installer des suivis stations de production électrique P.V éolienne ou hybrides. Pour cela nous avons utilisé les données journalières et mensuelles (temps, vitesse du vent, etc) simulée par la Nasa.

Le présent travail est d'élaborer une méthode basée à la fois sur la simulation et sur les données des stations radiométriques et météorologiques (**National Climatic Data Center, NASA Surface Meteorology and Solar Energy**). Il permet d'évaluer d'une façon continue et très représentative les potentiels énergétiques éoliens et solaires sur des sites isolés de l'Algérie. Nous avons pris deux exemples, Naama qui représente haut plateau et Adrar qui représente le sud de l'Algérie.

Pour atteindre cet objectif nous avons scindé notre mémoire en quatre chapitres :

Le premier chapitre, étude bibliographique d'énergie photovoltaïque, est consacré à la description générale de l'exploitation des énergies photovoltaïques, et les différentes technologies associées.

Le premier chapitre, étude bibliographique d'énergie éolienne, est consacré à la description générale de l'exploitation des énergies éoliennes, et les différentes technologies associées.

Le troisième chapitre est dédié à la modélisation et au calcul des potentiels énergétiques éoliens et photovoltaïques. Les méthodes développées dans cette partie permet d'optimiser l'exploitation de ces formes d'énergies en étudiant l'effet de plusieurs paramètres tel que le système de suivi de soleil, l'albédo, les statistiques du vent... etc.

Finalement, le dernier chapitre est dédié à la présentation et la discussion des résultats obtenus par un programme informatique écrit en Matlab, qui prend en compte plusieurs paramètres : température, géographie du site, les statistiques du vent, indice de clarté du ciel.

## **II. Chapitre 1 : Etude bibliographique sur l'énergie photovoltaïque**

### **II-1. Introduction :**

Ce chapitre comporte deux grandes parties :

La première permet de citer les notions de base sur l'énergie solaire photovoltaïque, les différentes technologies existantes : cristallines, couches minces, organiques et hybrides.

La deuxième donne un aperçu général sur le taux d'irradiation solaire dans le monde, dans l'Algérie et dans les sites choisis.

### **II-2. Soleil source d'énergie :**

L'énergie solaire est la ressource énergétique la plus abondante sur terre. C'est l'énergie que dispense le soleil par son rayonnement. Elle est à l'origine de la majorité des autres énergies renouvelables.

Le rayonnement solaire peut être utilisé pour produire soit directement de l'électricité à l'aide de semi-conducteurs photovoltaïque, soit de la chaleur solaire thermique pour le chauffage ou la production électrique.

L'Algérie dispose d'un gisement solaire important dans le monde. Plus de 2.000.000 km<sup>2</sup> du pays reçoivent un ensoleillement de l'ordre de 2.500 KWh/m<sup>2</sup>/an. Et du fait que cette source présente un intérêt particulier en tant qu'énergie renouvelable, la connaissance de ce gisement solaire est d'une importance capitale pour concevoir, dimensionner et optimiser les systèmes énergétiques solaires.

#### **■ Spectre solaire**

Le spectre du rayonnement électromagnétique solaire comporte une très grande étendue, depuis les rayonnements radio jusqu'aux rayons X. La figure 1 présente le rayonnement

solaire hors de l'atmosphère AM0 et le rayonnement solaire au niveau de la mer AM1 en fonction de la longueur d'onde. Ces courbes montrent que 9,2% de l'énergie de ce spectre AM0 se trouve dans l'ultraviolet, 42,4% dans le visible et 48,4% dans l'infrarouge.

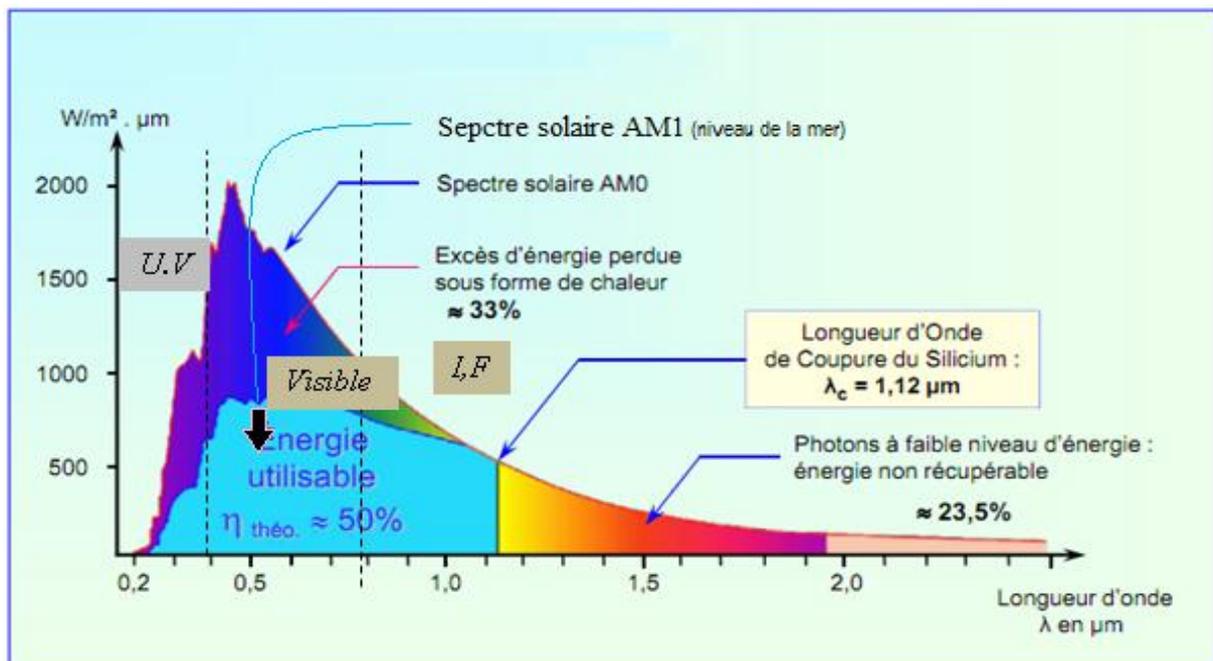
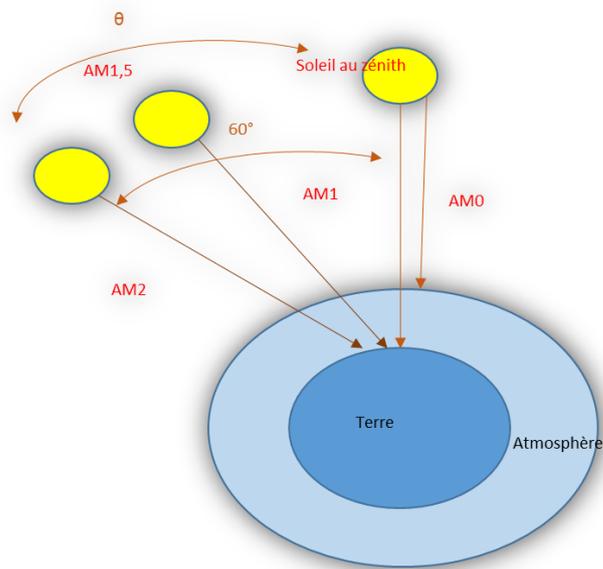


Figure 1 : l'irradiante solaire en fonction de la longueur d'onde [2]

Cette figure montre aussi qu'à la surface de la terre, le spectre solaire n'est pas le même que dans l'espace, car il est pondéré par l'absorption des molécules présentes dans l'atmosphère (O<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O,.....). Les conditions climatiques ainsi que la présence de particules influencent également la valeur réelle du spectre. Pour tenir compte de ces différences, comparer les performances des cellules solaires et qualifier les différents spectres solaires utilisés, on introduit un coefficient appelé masse d'air (AM<sub>x</sub>) dont l'expression est:

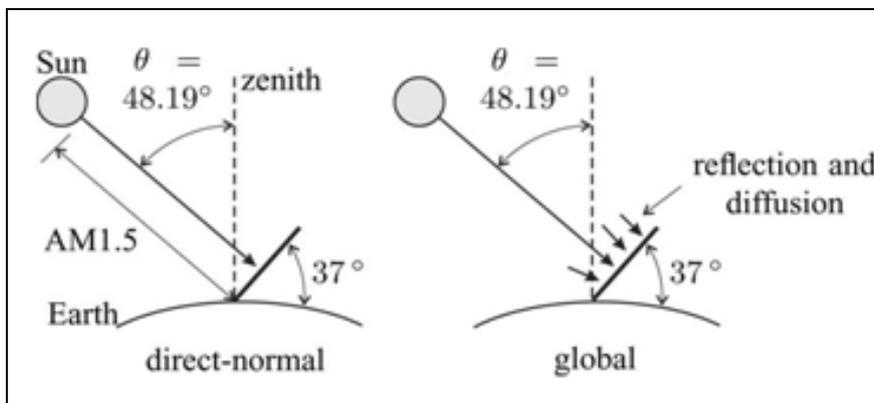
$$x = \frac{1}{\sin \theta}$$

Où  $\theta$  est l'angle que fait le soleil avec son zénith. Par définition, AM0 correspond aux conditions hors atmosphère. Quand le soleil fait un angle de 48.19° par rapport au zénith, la lumière incidente est dite AM1.5 (figure 2). Le nombre de masse d'air caractérise la puissance transportée par le rayonnement solaire et quantifie les performances de façon standard des dispositifs photovoltaïques. [2]



**Figure 2 : Les différents rayonnements solaires [3]**

L'intensité **AM0**, Hors atmosphère, est estimée dans les applications spatiales à 136mW/cm<sup>2</sup>. Cependant les conditions standards de caractérisation sont définis par les normes IEC-60904 de l'International Electrotechnique Commission (IEC) selon une distribution spectrale AM1.5 global (somme des rayonnements directs et diffus), d'intensité 100mW/cm<sup>2</sup> et pour une température de cellule de 25°C. La Figure 3 caractérise d'une part le rayonnement solaire AM1.5 normalisé à 100 mW/cm<sup>2</sup> et représente d'une autre part les rayonnements solaires au niveau d'une surface inclinée de 37°. Elle montre qu'au sol, le rayonnement solaire a au moins deux composantes : une composante directe et une composant diffuse (rayonnement incident diffusé ou réfléchi par un obstacle : nuages, sol) formant le rayonnement global.[3]



**Figure 3 :les rayonnements solaires au niveau d'une surface incliné de 37 ° [3]**

### **II-3. L'énergie photovoltaïque :**

L'énergie photovoltaïque se base sur l'effet photoélectrique pour créer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique.

Cette source de lumière peut être naturelle (soleil) ou-bien artificielle (une ampoule). L'énergie photovoltaïque est captée par des cellules photovoltaïques, un composant électronique qui produit de l'électricité lorsqu'il est exposé à la lumière.

Plusieurs cellules peuvent être reliées pour former un module solaire photovoltaïque ou un panneau photovoltaïque.

Une installation photovoltaïque connectée à un réseau d'électricité se compose généralement de plusieurs panneaux photovoltaïques, leur nombre pouvant varier d'une dizaine à plusieurs milliers. Il existe plusieurs technologies de modules solaires photovoltaïques :

- les modules solaires monocristallins possèdent le meilleur rendement au m<sup>2</sup> et sont essentiellement utilisés lorsque les espaces sont restreints et pour optimiser la production d'une centrale photovoltaïque.
- les modules solaires poly cristallins représentent une technologie proposant des rendements plus faibles que la technologie monocristalline.
- les modules solaires amorphes sont des panneaux solaires proposant un rendement largement inférieur aux modules solaires cristallins.

Cette solution nécessite donc une plus grande surface pour la même puissance installée [4]

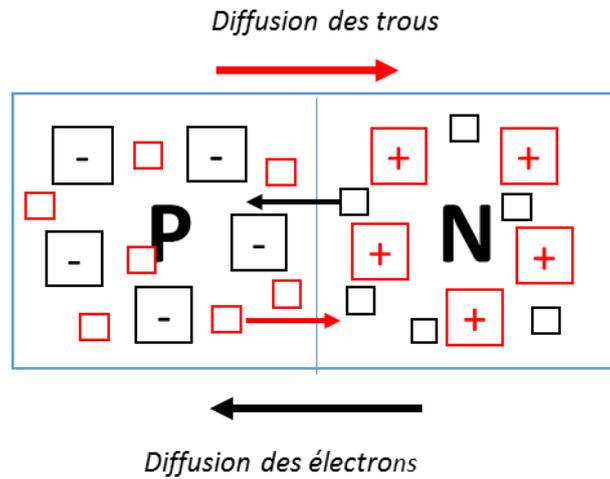
### ***Photovoltaïque :***

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui, exposé à la lumière (photons), génère de l'électricité. C'est l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène. Le courant obtenu est fonction de la lumière incidente. L'électricité produite est fonction de l'éclairement, la cellule photovoltaïque produit un courant continu"[5]

### ***Principe de conversion photovoltaïque :***

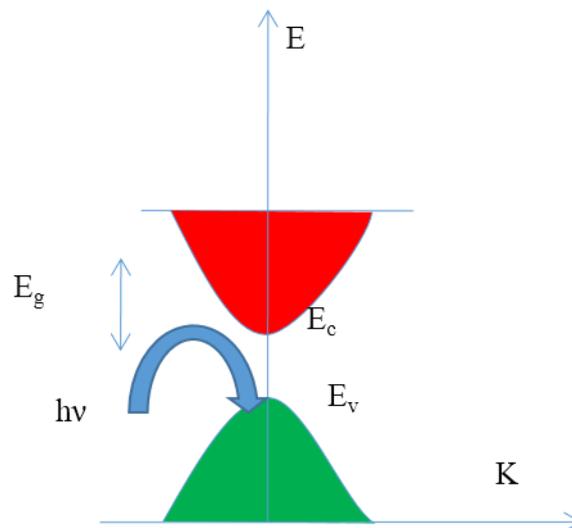
L'effet photovoltaïque a été découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839. L'effet photovoltaïque est obtenu par absorption des photons dans un matériau semi-conducteur qui génère alors une tension électrique. Les cellules photovoltaïques produisent du courant continu à partir du rayonnement solaire, qui peut être utilisé pour alimenter un appareil ou recharger une batterie.

La structure actuelle tient à optimiser les performances de la structure classique. Elle est constituée de plusieurs couches, l'élément de base de ces structures est la jonction P-N. [6] La figure 4 montre que La jonction comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p.



**Figure 4 : Schéma descriptif d'une jonction PN [7]**

Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie supérieure ou égale à l'énergie de gap du matériau semi-conducteur ( $E_g$ ) peuvent faire passer un électron de la bande de valence vers la bande de conduction et laisse aussi un trou engendrant ainsi une paire électron-trou comme le montre la figure 5. [7]



**Figure 5 : Passage d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction sous l'effet de la lumière. [8]**

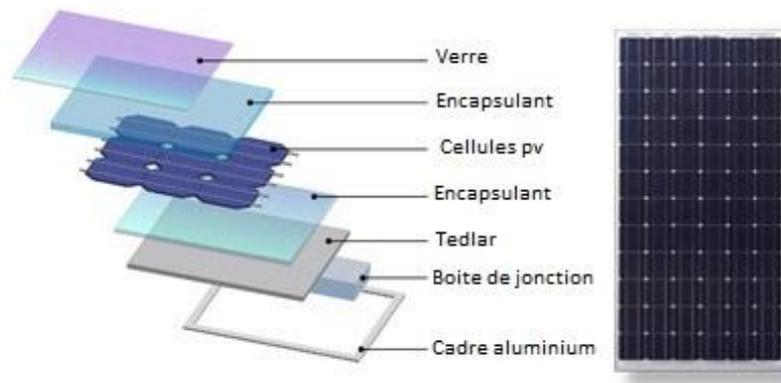
### ***la cellule photovoltaïque :***

La cellule PV, aussi appelée cellule solaire est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Pour que la pile solaire soit utile, et pour que l'électricité qu'elle Produise passe convenablement dans la charge, la grille doit avoir une forme spéciale afin que la surface active de la cellule ne soit pas occultée.

Les cellules photovoltaïques sont constituées de :

- Une fine couche semi-conductrice.
- Une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires,
- une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.

Quand la lumière du soleil traverse le verre et l'adhésif, elle rencontre une couche antireflet (ARC). Cette couche est également transparente, elle réduit la quantité de lumière du soleil réfléctée par la cellule. Sans ARC, la pile solaire agit comme un miroir et reflète jusqu'à 30% de la lumière frappant la cellule. L'ARC réduit au minimum cette réflexion, en ramenant les pertes de réflexion à moins de 5% de sorte que la lumière du soleil va atteindre la surface de la cellule et diminuer les pertes optiques. La couche extérieure de la cellule est en verre pour protéger la structure contre l'environnement. Elle est attachée au reste de la cellule avec un adhésif transparent. Les deux régions principales de la jonction sont appelées respectivement émetteur et base. La structure simple d'une cellule solaire est représentée dans la figure 6[9].



*Figure 6 : structure typique d'une cellule solaire [9]*

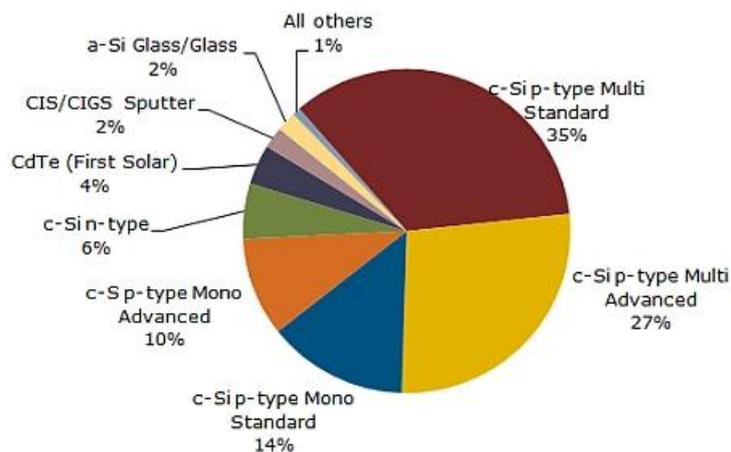
### ***Les filières technologiques :***

Il existe aujourd'hui trois principales filières technologiques : les technologies cristallines, les couches minces et les cellules Organiques. La figure 7 représente la répartition de la production mondiale des modules par technologie. Elle montre que les technologies cristallines (multicristallin et monocristallin) sont les plus utilisées aujourd'hui avec un pourcentage de l'ordre de 66%. Cependant les technologies "couches minces", en particulier le silicium amorphe, CIGS (CIS y compris) et CdTe se développent de plus en plus sur le

marché et atteignent respectivement 12% et 6%. D'autres filières basées sur l'utilisation de colorants ou de matériaux organiques, encore à leur balbutiements, promettent un bel avenir à l'énergie photovoltaïque. Toutes les filières continuent de progresser de façon remarquablement continue depuis trente ans. Il n'y a pas eu de grandes ruptures dans cette progression et les nouvelles filières suivent sensiblement la même pente que les anciennes. [10]

Dans sa dernière étude trimestrielle, NPD Solarbuzz estime que les prévisions actuelles d'extension des capacités de production de 25% amèneraient le secteur à un volume total de 49,7 GW l'an prochain, après 39,7 GW cette année, en phase avec les besoins sur le marché mondial que les analystes situent désormais entre 45 et 55 GW pour 2014. Les panneaux photovoltaïques en silicium multicristallin représenteraient 62% de la production totale de panneaux PV ...

Les panneaux PV standard en silicium multicristallin de type P restent en tête du classement technologique, avec 35% de la production totale de panneaux PV en 2014. Les panneaux PV en silicium multicristallin de type P faisant appel à des procédés spécifiques comme la sérigraphie à double écran ou l'implantation d'ions, à des émetteurs sélectifs ou encore à des contacts en face arrière gagneraient toutefois du terrain, de 23,8% en 2013 à 27,2% en 2014. Le volume de production de panneaux PV en monocristallin type P et type N de haut rendement atteindrait 2,8 GW en 2014, tiré par les besoins de performance sur certains marchés (Japon notamment) et par des fabricants tels que Sun Power et Panasonic. Le secteur des couches minces devrait continuer à perdre des parts de marché, de 9,4% en 2013 à 8,9% en 2014. Les investissements dans ce domaine ont encore baissé courant 2013 pour atteindre le plus bas niveau depuis huit ans, mais devraient remonter à partir de 2015, pense NPD Solarbuzz.[11]



**Figure 7 : production mondiale du module photovoltaïque par technologie en 2012 [11]**

## A. cellules en silicium cristallin

Elles sont réalisées à partir de la réduction de la silice provenant du quartz. Le silicium doit être pur à plus de 99%, ce qui nécessite des transformations lourdes : fusion, équarrissage. Il est obtenu sous forme de lingot après transformation puis est scié de manière à obtenir des plaques d'une épaisseur de 200  $\mu\text{m}$  environ. L'injection de dopants (phosphore, arsenic, antimoine, bore) le rend semi-conducteur. Une couche anti-reflet est ensuite déposée, Cette filière comporte deux technologies : le silicium monocristallin et le silicium multicristallin [12]

La figure 8 présente la configuration standard des cellules solaires au silicium cristallin.

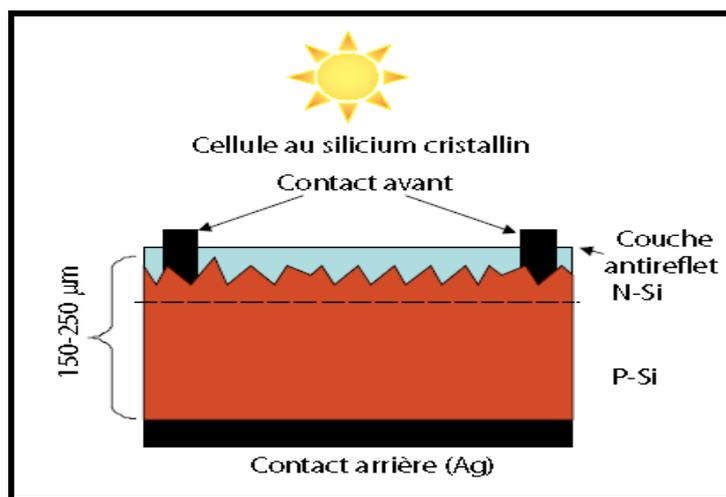


Figure 8 : conception d'une cellule au silicium cristallin [12]

### A-1 Cellule photovoltaïque en silicium monocristallin :

Ces cellules sont fabriquées à partir de silicium monocristallin, un matériau dont les atomes sont structurés de façon ordonnée. [12]

- **Avantage** : Bon rendement, de 14 % à 16 % Bon ratio  $\text{wc}/\text{m}^2$  ( $\sim 150 \text{wc}/\text{m}^2$ ) ce qui permet un gain de place si nécessaire. Nombre de fabricants élevé.
- **Inconvénient**: Coût élevé.

### A-2 Cellule photovoltaïque en silicium multi cristallin

Les cellules polycristallines supportent mieux la présence d'impuretés que les cellules monocristallines. On utilise donc généralement du silicium de moindre pureté, moins onéreux mais aussi nécessitant moins d'énergie. Le silicium multicristallin est souvent produit en jetant du silicium fondu dans un creuset. En contrôlant la vitesse de

refroidissement on peut facilement contrôler la taille des cristaux formés lors de la solidification. Le contrôle de la taille de ces cristaux est primordial puisque les joints de grain ont un effet néfaste sur les performances photovoltaïques. [13]

- **Avantage** : Cellule carrée (à coins arrondis dans le cas du Si monocristallin) permettant un meilleur foisonnement dans un module. Bon rendement de conversion, environ 100 Wc/m<sup>2</sup>, mais cependant un peu moins bon que pour le monocristallin.
- **Inconvénient** : Rendement faible sous un faible éclairciment ou soleil diffus.

## B. Cellules solaires en films minces [14]:

Les technologies à couches minces dont les plus mûres sont : le silicium amorphe (Sia), CdTe, CIS et CIGS qui représentaient en 2012 plus que 30% de la production mondiale des cellules. Cette technologie fait appel à des procédés de fabrication, dépôt sur ruban, visant la diminution de l'épaisseur des cellules. La figure ci-dessous représente l'évolution des différentes technologies de couches minces entre 2007 et 2010. Elle montre que toutes ces technologies dont le silicium amorphe fait une grande partie, se développent de façon importante durant les dernières années, leur rendement est faible sous un faible éclairciment ou rayonnement diffus.



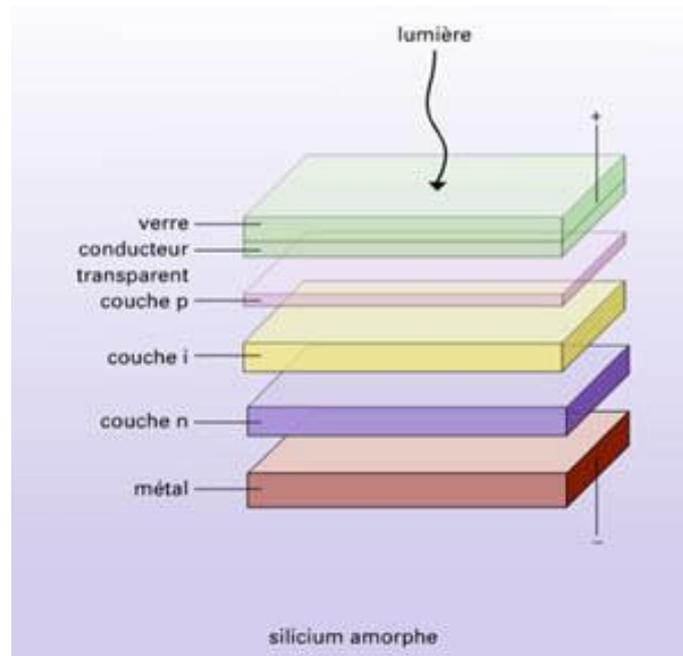
Figure 9 : Perspectives d'évolution de la production [14]

### B-1 Le silicium amorphe :

Le silicium amorphe, un ensemble d'atomes désordonnés, est produit par la déposition de silicium sur un substrat. Le substrat peut être rigide ou flexible ce qui rend possible la

réalisation de cellules sur des surfaces courbes et des modules « pliables ». Les cellules en silicium amorphe peuvent aussi être plus fines car une épaisseur de couche de l'ordre de quelques micromètres est suffisante. C'est pour cette raison que le silicium amorphe est aussi connu sous le nom de « film mince ». Le rendement des cellules amorphes est plus faible que celui des cellules cristallines, mais ces cellules demandent bien moins de silicium et leur prix les rend très attractives pour beaucoup d'applications. [16]

La figure 10 représente la conception d'une cellule photovoltaïque à base de silicium amorphe.



*Figure 10 : cellule au silicium amorphe [16]*

**Avantage :**

- Fonctionne avec un éclairage faible ou diffus (même par temps couvert, y compris sous éclairage artificiel de 20 à 3000 lux).
- un peu moins chère que les autres techniques.
- Intégration sur supports souples ou rigides. [16]

**Inconvénients :**

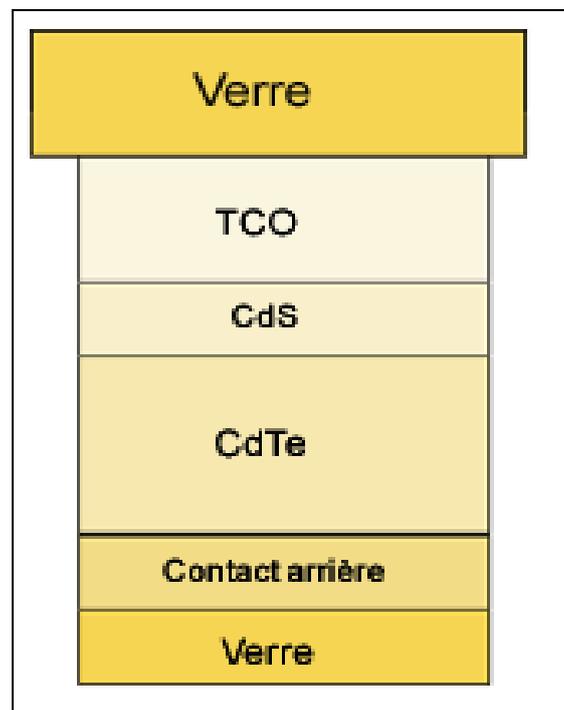
- rendement faible en plein soleil, de 5% à 7%.
- nécessité de couvrir des surfaces plus importantes que lors de l'utilisation de silicium cristallin (ratio  $Wc/m^2$  plus faible, environ  $60Wc/m^2$ )

- performances qui diminuent avec le temps dans les premiers temps d'exposition à la lumière naturelle (3-6 mois), pour se stabiliser ensuite (-10 à 20% selon la structure de la jonction). [16]

### **B-2 Les cellules à base de tellure de cadmium (CdTe):**

Le faible rendement des cellules à base de silicium amorphe ont motivé les scientifiques à chercher des alternatives. Le matériau le plus prometteur est le tellure de cadmium (CdTe) qui offre la possibilité de produire des modules à des coûts plus faibles avec un rendement de 10%, et un avantage qui réside dans la forte absorption du tellure de cadmium. Cependant la toxicité du matériau freine le développement de cette technologie.

La figure 11 montre la structure de la cellule solaire la plus courante. Elle est constituée d'une hétérojonction n-CdS/p-CdTe. Le CdS du type N est déposé sur le verre couvert d'une couche d'OTC (oxyde transparent conducteur). [17]



*Figure 11 : structure d'une cellule solaire a base de CdTe [17]*

- **Avantage :** Le coefficient d'absorption est élevé ( $> 10^5 \text{cm}^{-1}$  dans le visible) et la couche absorbante ne nécessite pas plus de quelques Micromètres pour absorber 90% du spectre solaire, autorisant par conséquent l'utilisation de matériaux relativement impurs dont la longueur de diffusion des porteurs minoritaires ne dépasse pas quelques micromètres. La valeur du gap  $E_g=1,45\text{eV}$  est idéale pour la conversion photovoltaïque du spectre solaire. De nombreuses méthodes existent

pour déposer CdTe avec une vitesse de dépôt très élevée tout en gardant une qualité raisonnable.

- **Inconvénients** : Un Matériel très toxique.

### **B-3 Cellule CIS (Cuivre Indium Sélénium) –CIGS :**

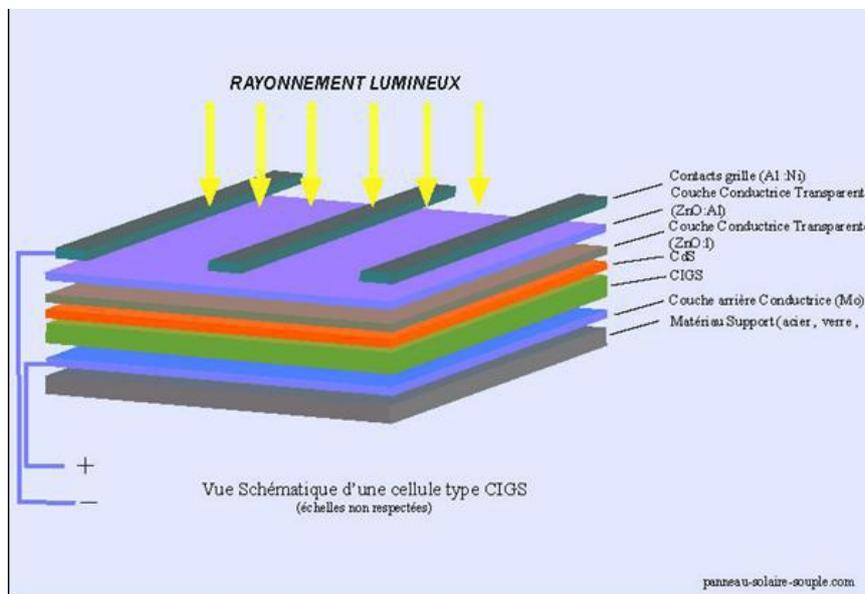
#### ➤ *Les cellules à base de CIS :*

Les cellules CIS représentent la nouvelle génération de cellules solaires sous forme de films minces, de type cuivre-indium-sélénium(CIS). Les matières premières nécessaires à la fabrication des cellules CIS sont plus faciles à se procurer que le silicium utilisé dans les cellules photovoltaïques classiques.

- **Avantage** : Permet d'obtenir les meilleurs rendements par rapport aux autres cellules photovoltaïques en couche mince permet de s'affranchir du silicium Les matériaux utilisés ne causent pas de problème de toxicité La cellule peut être construite sur un substrat flexible.
- **Inconvénients** : Les cellules en couches minces nécessitent une surface plus importante pour atteindre les mêmes rendements que les cellules épaisses.

#### ➤ *Les cellules à base de CIGS :*

La technologie CIGS présente actuellement le meilleur rendement de production pour une cellule et pour des modules par rapport à toutes les technologies à couches minces inorganiques. Elle fait intervenir en plus de la configuration précédente de CIS, le gallium. La durée de vie estimée de ces cellules est de l'ordre de 20 ans et le rendement moyen peut atteindre 20.5% dans les laboratoires de recherche et 12% pour le cas des cellules commercialisées. [17]



**Figure 12 : structure d'une cellule solaire à base de CIGS[18]**

✓ **Avantage :**

- Permet la production de modules flexibles
- Bons rendements
- Bonne stabilité
- Bon potentiel de réduction des coûts [17]

✓ **Inconvénient :**

- Utilise des matériaux rares et chers (Indium et Gallium)
- Procédés de fabrication sous vide
- Sensibilité à l'humidité [17]

#### **B-4 Les cellules à base CZTS :**

De nouvelles cellules sont déjà en cours de développement en prévision de la pénurie probable d'indium. Cependant, remplacer les cellules au CIGS représente un véritable défi tant cet absorbant est efficace. Une alternative exploitant le principe de la jonction p-n se démarque néanmoins depuis la fin des années 2000 : la cellule CZTS.

Elle possède des propriétés optiques et électroniques similaires à celle au CIGS, tout en ayant l'avantage d'être composée d'éléments abondants (à l'inverse du tellure ou de l'indium) et non toxiques pour la santé ou l'environnement (le cadmium peut être banni). Par ailleurs, ses constituants de base seraient cinq fois moins coûteux que ceux de la filière CIGS. [19]

### **C. Cellules organiques et hybrides :**

### C-1 Cellules organiques

Observé depuis 30 ans dans les matériaux semi-conducteurs organiques, l'effet photovoltaïque a connu cette dernière décennie un grand essor. Initialement donnant des valeurs très faibles de rendement de conversion, cette application particulière des semi-conducteurs organiques commence à attirer l'attention en 1986 lorsque l'équipe de Tang montre que les rendements proches du pourcent sont atteignables, conformément aux prédictions de Merritt en 1978.

La cellule, composée alors d'une bicouche de molécules évaporées sous vide figure 13, atteint 0,95% de rendement de conversion. Ces cellules comprennent deux voies : la voie des cellules « humides » ou « organiques » et la voie des cellules polymères dites aussi cellules « plastiques ». Les progrès de ces technologies sont très rapides, des records de rendement sont très fréquemment battus (actuellement près de 6%). Le principal frein à ces technologies est actuellement la stabilité de leurs performances ainsi que leur durée de vie (actuellement environ 1000 heures). [17]

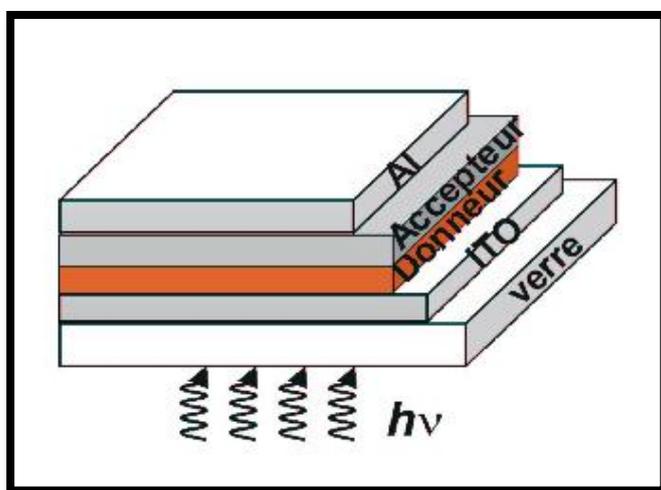


Figure 13 : Structure d'une cellule de type bicouche [17]

**Avantage :** L'intérêt de ces cellules vient aussi du fait que, contrairement aux cellules à base de matériaux inorganiques, elles offrent beaucoup d'avantages :

- La possibilité d'être déposée en grande surface.
- La facilité de fabrication et de manipulation.
- La possibilité de réaliser ces cellules sur des substrats flexibles.
- Des coûts de fabrication et de matériaux plus faibles, ces cellules devraient dans l'ensemble revenir beaucoup moins chères que leurs concurrentes. [17]

## C-2 Cellule hybride

□ Les cellules hybrides sensibilisées par colorant : C'est un système de conversion de l'énergie solaire inspiré de la photosynthèse, on utilise une couche d'oxyde de titane (TiO<sub>2</sub>), qui est un semi-conducteur à large gap ( $E_g=3,2$  eV), sur laquelle on va appliquer une fine couche d'un matériau photosensible que l'on immerge dans une solution contenant un couple redox. Les électrons excités de la couche photosensible vont entrer dans la bande de conduction de l'oxyde de titane et sont collectés. La solution redox sert à régénérer la couche photosensible qui a été oxydée. Le rendement en laboratoire de cette technologie dépasse 10%. [17]

- Avantage :

La procédure de fabrication d'une cellule solaire à colorant est très simple, et les matériaux constituant cette dernière sont disponibles. Ces cellules sont cinq fois moins chères que les cellules solaires classiques, et leur efficacité est indépendante de la température. La cellule peut être utilisée des deux côtés : les rayons lumineux arrivant sur les deux faces de la cellule sont convertis en électricité. Les cellules peuvent également mesurer que 0,4mm d'épaisseur. [17]

- Inconvénient :

Les meilleures de ces cellules ne parviennent à convertir que 12% de l'énergie solaire, contre 25% des cellules solaires silicium. Le TiO<sub>2</sub> dégrade le colorant de la cellule, elle ne dure donc pas très longtemps. [17] Le tableau ci-dessous donne le comparatif des rendements des différents types de cellules

*Tableau 1 : Comparatif des rendements des différents types de cellules*

Type	Cellule (labo)	Module (labo)	Module (commerciale)	Niveau développement
<b>Silicium cristallin</b>				
Silicium monocristalin	24.70%	22.70%	12-20%	Production industrielle
Silicium Polycristalin	20.30%	16.20%	11-15%	Production industrielle
<b>Couche Mince</b>				
Silicium amorphe	13.40%	10.40%	5-9%	Production industrielle
CdTe	16.70%	/	6.9%	Production industrielle
CIS/CGS	19.30%	13.50%	9-11%	Production industrielle

CZTS	11.1%	/	/	Production industrielle
Micro cristallin $\mu$ -si	10%	/	/	Production industrielle
Cellules organique et Hybrides				
Cellule organique	5.70%	/	/	Au stade de la recherche
Cellule de gratzel	11%	8.40%	/	Au stade de la recherche

## II-4. L'irradiation solaire mondiale et en Algérie :

### ■ L'irradiation solaire mondiale :

Sachant que la Terre reçoit chaque année 1 070 000 Pétawatts-heures (PWh = 10 puissance 15 Wh) soit plus de 8000 fois la consommation énergétique mondiale annuelle et que si l'on parvenait à exploiter seulement 0.01% de cette énergie, on pourrait assurer les besoins énergétiques de la planète. Considéré comme inépuisable car le soleil disparaîtra bien après l'extinction de l'humanité, cette ressource possède donc un immense potentiel. [21]

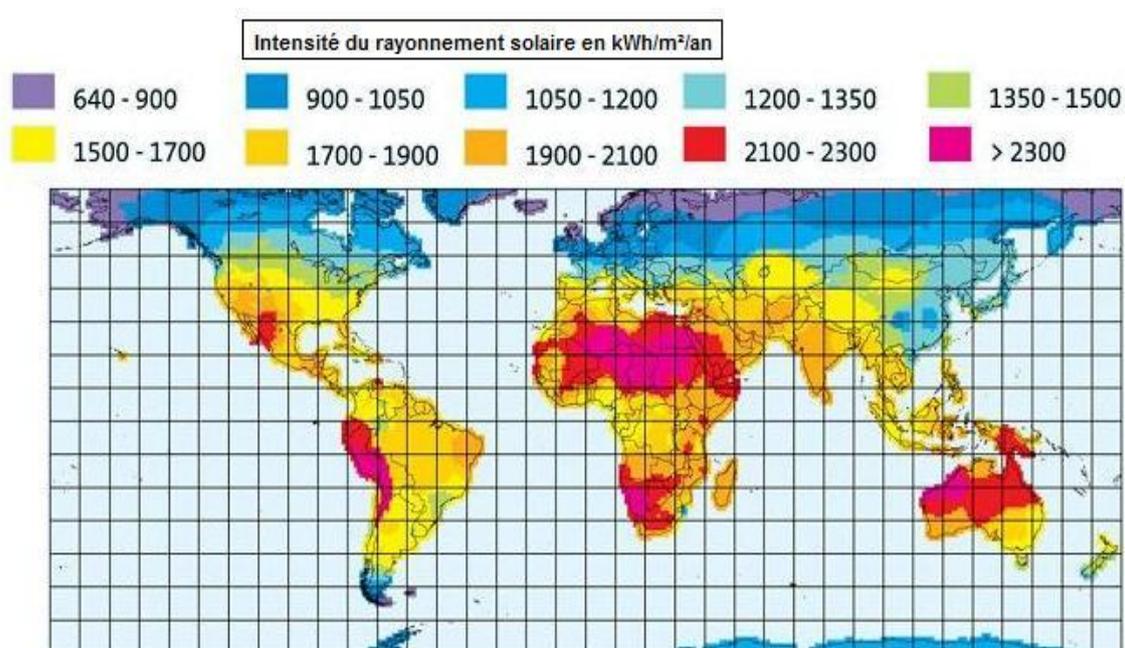


Figure 14 : l'irradiation solaire moyenne dans le monde en kWh/m<sup>2</sup>/an [21]

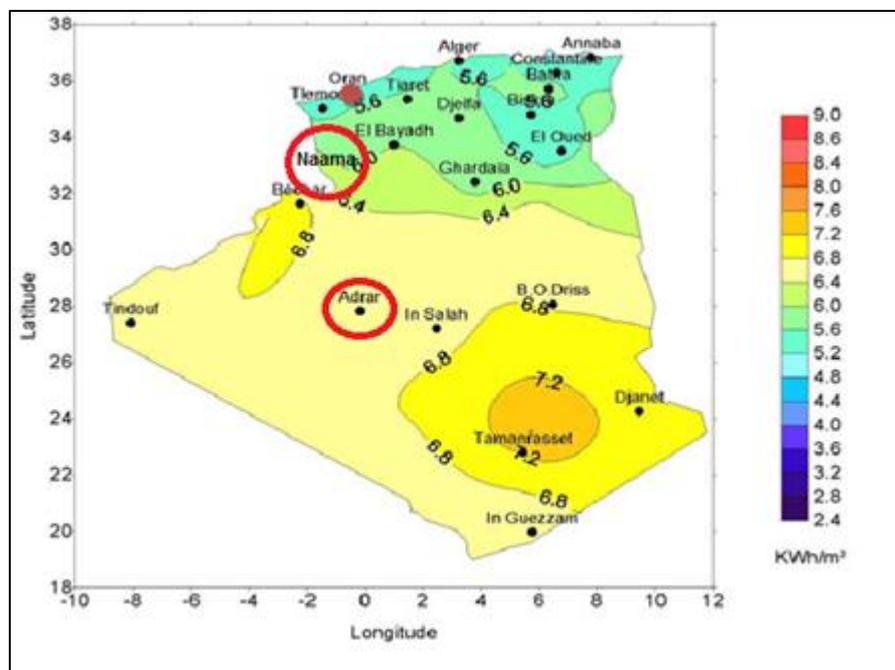
La majeure partie de l'Afrique, par exemple, compte environ 325 jours de fort ensoleillement par an, recevant en moyenne, plus de 6kWh d'énergie par mètre carré par jour, La figure ci-

dessus représente la répartition de l'irradiation solaire dans le monde .elle montre que plus on se rapproche de l'équateur, plus l'intensité du rayonnement solaire reçu durant une année est importante... Le maximum d'ensoleillement se situe dans les zones tropicales, les zones désertiques telles que le désert d'Atacama au Chili, désert du Sahara en Afrique sont des zones à forte irradiation solaire. Cela s'explique par le fait que le rayonnement direct reçu par ces zones n'est pas perturbé par la présence de nuages, et que le rayonnement réfléchi est très important. Dans les zones désertiques proches de l'équateur, les valeurs d'irradiation annuelle peuvent atteindre les 2 200 kWh/m<sup>2</sup>/an.

L'Algérie est l'un des pays riches en potentiel énergétique renouvelable au monde.

### ■ *L'irradiation solaire en Algérie*

La distribution de l'énergie reçue en Algérie, en moyenne annuelle, est donnée par la figure (15). Elle présente les différents niveaux énergétiques qui donnent ainsi un découpage du pays en régions iso-énergétiques.



*Figure 15 l'irradiation solaire moyenne en Algérie [21]*

L'Algérie dispose d'environ 3200 heures d'ensoleillement par an, bénéficiant d'une situation climatique favorable à l'application des techniques solaires. La durée moyenne d'ensoleillement atteint près de 3500 heures d'ensoleillement dans le désert du Sahara qui représente 86% du territoire algérien. Le total d'énergie reçue est estimé à 169.400TWh/an, soit 5000 fois la consommation d'électricité annuelle du pays [21].

### ■ *les caractéristiques des deux sites étudiés :*

- **Adrar**

La Wilaya d'Adrar s'étend sur une superficie de 427.968 km<sup>2</sup>, soit près d'un cinquième (1/5) du territoire national. La majorité des sites situés au niveau d'Adrar pourraient être considérés comme des sites isolés vue la superficie immense et leur éloignement par rapport à la ville.

Adrar a un climat désertique chaud typique de la zone saharienne hyper-aride, c'est-à-dire du cœur du Sahara, avec des étés très longs et extrêmement chauds et des hivers courts et modérément chauds

Elle est bien riche en matière d'énergie solaire, particulièrement en été, la quantité moyenne annuelle est de l'ordre de 6.4 KWh/m<sup>2</sup>/an, donc elle est suffisante pour répondre aux différents besoins énergétiques d'un site isolé.

Les coordonnées géographiques de notre station étudier "Touat cheikh sidi Mohamed" sont ou 27,38 et -0.186 (en degrés décimaux), située à plus de 279 mètres d'altitude sur la grande Sahara africain.

- **Naama**

La wilaya de Naama, est une wilaya algérienne située à l'ouest de l'Algérie, à la frontière avec le Maroc. Elle est voisine au nord avec les wilayas de Tlemcen et Sidi-Bel-Abbès, à l'est celle d'El-Bayad et au sud celle de Béchar. Les coordonnées géographiques de notre station étudier sont ou 33.67 et -0.30 (en degrés décimaux)

La wilaya de Naama s'étend sur une superficie de 29 514,14 km<sup>2</sup>, Diversité géographique extraordinaire, située à plus de 1 000 mètres d'altitude sur les hauts plateaux, la wilaya de Naama est traversée par la chaîne de l'Atlas saharien avec des sommets qui dépassent les 2 000 mètres "Djebel mekfer" 2 200 mètres. Avec cette hauteur on peut considérer quelque endroit comme des sites isolés, la quantité moyenne annuelle est de l'ordre de 6 KWh/m<sup>2</sup>/an..., donc elle est suffisante pour répondre aux différents besoins énergétiques d'un site. Avantage et inconvénient des systèmes Photovoltaïques [16,17] :

## **II-5. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire :**

### **A. Avantages :**

- Son carburant est gratuit :

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

- L'énergie solaire photovoltaïque ne génère ni bruit, ni émissions nocives, ni gaz polluants:  
L'électricité solaire utilise seulement l'énergie du soleil comme carburant. Elle ne crée aucun coproduit nocif et contribue activement à réduire le réchauffement climatique.
- Les systèmes photovoltaïques sont très sûrs et d'une grande fiabilité :
- L'espérance de vie d'un module solaire est d'environ 30 ans. La performance des cellules photovoltaïques est généralement garantie par les fabricants pour une durée de 20 à 25 ans. Le photovoltaïque est donc une technologie fiable sur le long terme. De plus, la fiabilité des produits est garantie aux consommateurs.
- Les modules photovoltaïques sont recyclables et les matériaux utilisés pour leur production (silicium, verre, aluminium, etc.) peuvent être réutilisés. Le recyclage n'est pas seulement bénéfique pour l'environnement, il contribue également à réduire l'énergie nécessaire pour produire ces matériaux et ainsi à réduire leur coût de fabrication.
- L'énergie solaire photovoltaïque exige peu de maintenance :  
Les modules solaires ne nécessitent pratiquement aucune maintenance et sont faciles à installer.
- L'énergie solaire photovoltaïque fournit de l'électricité aux zones rurales les plus isolées: Les systèmes photovoltaïques apportent une valeur ajoutée aux zones rurales (en particulier dans les pays en voie de développement où il n'y a pas de réseau électrique disponible).
- L'énergie solaire photovoltaïque peut être intégrée de manière esthétique dans les bâtiments :  
Les modules solaires peuvent couvrir toits et façades, contribuant ainsi à l'autonomie énergétique des bâtiments. Ils sont silencieux et peuvent être intégrés de manière très esthétique.
- L'énergie solaire captée par la terre pendant une heure pourrait suffire à la consommation mondiale pendant une année : Au total, ce rayonnement représente 1.6 milliards de TWh, soit huit mille fois la consommation énergétique annuelle mondiale

#### **B. Inconvénients :**

- Le développement du photovoltaïque est rapide, mais représente encore peu de chose dans le bilan énergétique mondial.

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%)
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulation associés soient judicieusement choisis.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Beaucoup d'appareils vendus dans le marché fonctionnent au 220 à 230V alternatif. Or, l'énergie issue du générateur PV est unidirectionnelle et de faible voltage (<30V), elle doit donc être transformée par l'intermédiaire d'un onduleur.

## **II-6. Conclusion**

Nous avons dans le premier chapitre fait une étude bibliographique sur :

- l'énergie photovoltaïque et toutes les technologies existantes.
- Un aperçu général sur le taux d'irradiations solaire dans le monde, en Algérie et dans les sites choisis.
- Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

## III. Chapitre 2 : Etude bibliographique sur l'énergie éolienne

### III-1. Introduction :

Ce chapitre comporte deux grandes parties :

La première permet de citer les notions de base sur l'énergie éolienne, les différentes technologies existantes: les éoliennes à axes verticales et horizontales.

La deuxième donne un aperçu général sur les potentiels éoliens dans le monde, dans l'Algérie et dans les sites choisis.

### III-2. Potentiel éolien dans le monde

La figure 16 représente l'évolution de la Puissance éolienne cumulée dans le monde entre 1996 et 2013

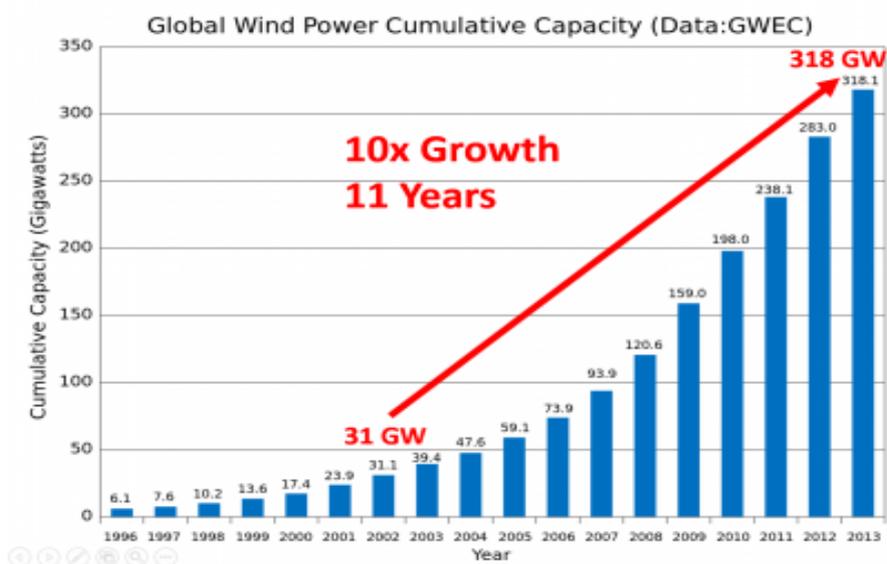
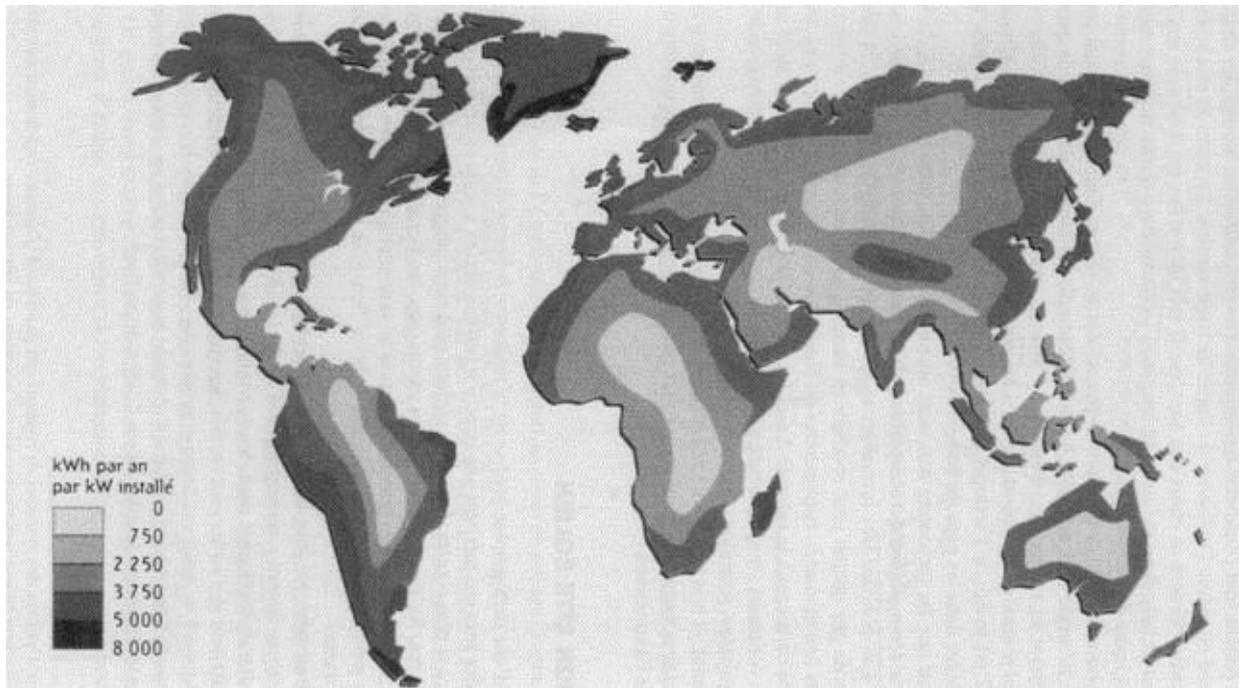


Figure 16 : Puissance éolienne cumulée dans le MONDE [21]

Avec plus de 35 GW de nouvelles capacités installées, l'éolien mondial a enregistré une croissance de 12 % en 2013, pour atteindre une capacité installée mondiale de 318 GW en fin d'année. La production éolienne couvre aujourd'hui 2,5 % de la consommation totale d'électricité dans le monde. Selon le Global Wind Energy Council (GWEC), cette croissance soutenue devrait se poursuivre, conduisant à un parc installé de près de 540 GW en 2017.. [21]



*Figure 17 : le gisement éolien dans le monde [21]*

L'Europe est le moteur de l'énergie éolienne. Avec 18 428 MW de puissance nominale (soit le double des Etats-Unis), l'Allemagne est la championne du monde, suivie de l'Espagne (10027 MW). Les autres grands producteurs européens sont le Danemark (3122 MW), l'Italie (1717 MW), la Grande-Bretagne (1353 MW), les Pays-Bas (1219 MW) et le Portugal (1022 MW). Hors d'Europe, les leaders sont les Etats-Unis (9149 MW), l'Inde (4430 MW) et la Chine (1260 MW).

### **III-3. Potentiel éolien en Algérie**

En ce qui concerne l'Algérie, la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et climat très diversifié. En effet, notre vaste pays se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes. Le nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200Km et un relief montagneux, représenté par deux chaînes l'atlas Télien 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. Le sud algérien est caractérisé par des vitesses du vent plus élevées que le nord, plus particulièrement le sud-ouest avec des vitesses supérieures à 4m/s et qui dépassent la valeur de 6m/s dans la région d'Adrar. Concernant le nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les hauts plateaux de Naama et Tiaret et sur les sites côtiers d'Oran, Bejaia et Annaba.

Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qu'on ne doit pas négliger, en particulier, lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne.

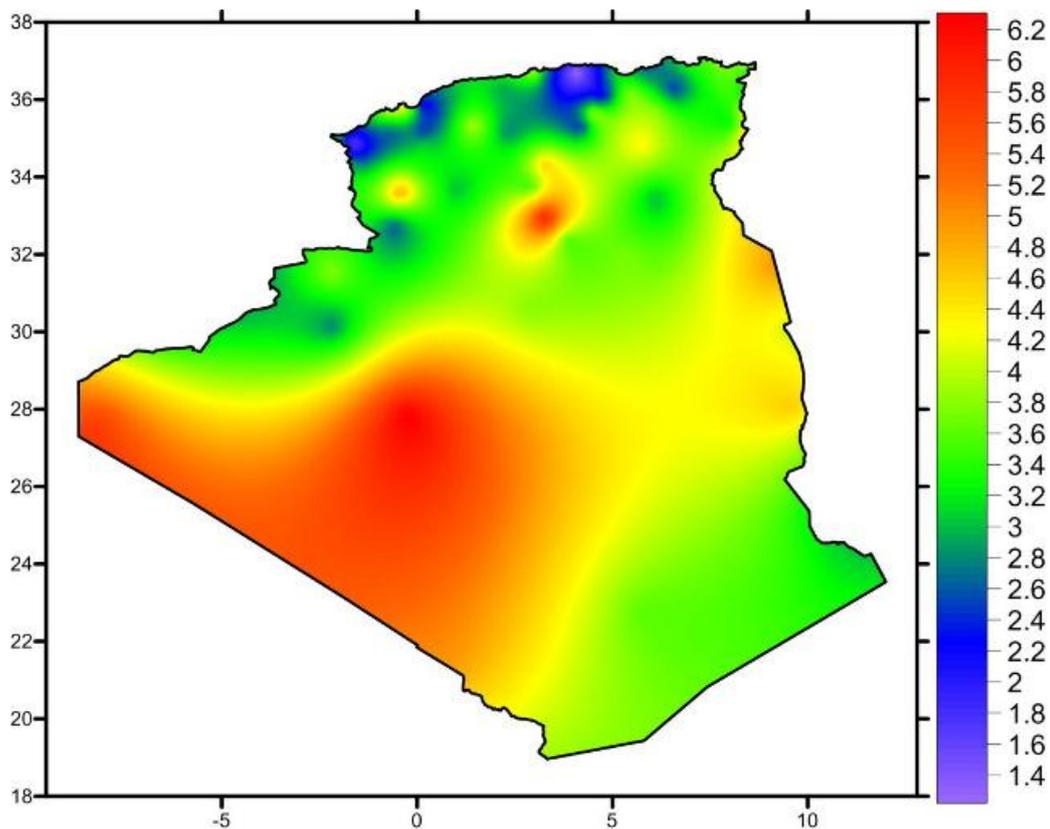


Figure 18 : Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol [22]

#### III-4. les différents types d'éoliennes :

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui se développera sans doute dans le futur. Les éoliennes sont des machines qui transforment l'énergie du vent en une énergie utilisable par l'homme. Citons les éoliennes qui produisent de l'électricité ou encore celles qui permettent de pomper de l'eau. Il existe de nombreux modèles d'éoliennes, le plus souvent inconnus du grand public.

Il existe deux grands types d'éoliennes, Les éoliennes à axe vertical et Les éoliennes à axe horizontal, On distingue de nos jours plusieurs sortes d'éoliennes parmi ces deux grandes catégories.

### ■ ***Les éoliennes à Axes Horizontales :***

On distingue les éoliennes classiques tri pales : conception qui s'est imposée sur le marché mondial pour des raisons de stabilité de la structure.

Parmi celles-ci il existe deux catégories d'éoliennes : Les éoliennes on shore (terme américain signifiant sur le sol c'est-à-dire sur les continents), et les éoliennes offshore (littéralement pas sur le sol, donc sur la mer), elles présentent des avantages au niveau des nuisances sonores (moins gênantes car elles sont éloignées des habitations), et des vents marins (plus nombreux et plus forts que les vents continentaux) ; en revanche elles sont beaucoup plus difficiles à installer et donc beaucoup plus coûteuses.

#### **A. L'éolienne offshore : [23]**

Une éolienne offshore, c'est à dire installée en mer, permet de convertir la force du vent en électricité. Le terme anglais « offshore » signifie littéralement « hors côtes », par opposition aux éoliennes terrestres ou « onshore ». Les éoliennes offshore fonctionnent selon le même principe que les modèles terrestres traditionnels : elles utilisent l'énergie cinétique du vent pour la transformer en électricité. Lorsqu'une éolienne produit de l'électricité, on peut également la qualifier d'aérogénérateur.

Le vent fait tourner des pales, généralement trois. Celles-ci entraînent un générateur qui transforme l'énergie mécanique créée en énergie électrique, suivant le principe d'une dynamo. La différence principale entre un modèle marin et terrestre d'éolienne tient à la nature des fondations, qui lui permettent d'être fixée dans le sol ou ancrée au fond de la mer. Les éoliennes offshore doivent également être très robustes afin de résister aux conditions marines difficiles.

Les éoliennes offshore sont le plus souvent rassemblées dans un « parc éolien » ou « ferme éolienne » comportant généralement entre 20 et 50 éoliennes de 2 à 5 MW. Les parcs offshore traditionnels ne sont généralement pas installés dans des zones où la profondeur dépasse 40 mètres.

D'ici à 2015, les parcs pourraient rassembler de 50 à 100 éoliennes pour une puissance unitaire de 5 à 10 MW et une puissance installée totale de 500 MW. Certaines installations

« farshore » c'est-à-dire au large (plus de 30 kilomètres des côtes), dotées de bases flottantes, sont aujourd'hui en phase de conception.



*Figure 19 : Parc éolien offshore Allemagne [23]*

- Avantages et inconvénients de la technologie éolienne offshore :

#### **Avantage :**

- La technologie de l'éolien offshore a bénéficié d'une grande partie des avancées technologiques récentes de l'éolien terrestre, une des énergies renouvelables les plus matures.
- La mer étant plane, les vents rencontrent moins d'obstacles et sont par conséquent plus soutenus, plus réguliers et moins turbulents que sur terre. A puissance égale, une éolienne offshore peut produire jusqu'à 2 fois plus d'électricité qu'une éolienne terrestre.
- La mer offre de grands espaces libres d'obstacles, où l'implantation des machines est possible, sous réserve de concertation avec les autres usagers de la mer

#### **Inconvénients :**

- Pour le moment, une éolienne offshore coûte environ ou 30 à 50% plus cher qu'une éolienne terrestre.
- Bien que les vents soient plus constants en mer que sur terre, l'énergie éolienne offshore est également intermittente.
- L'éolienne est soumise mécaniquement non seulement aux efforts du vent sur les pales et la structure, mais aussi aux efforts créés par les courants.
- L'installation des éoliennes en mer est plus compliquée que sur terre. Des bateaux adaptés doivent être employés. La maintenance des éoliennes est également plus

compliquée et plus coûteuse qu'à terre. Si une panne survient, il peut se passer plusieurs jours avant la réparation, ce qui entraîne une perte de production.

- Le raccordement électrique nécessite l'installation de câbles sous-marins jusqu'à la côte qui peut être distante de plusieurs kilomètres. Pour les grandes distances, il faut recourir à un acheminement en courant continu et associer des convertisseurs électroniques de puissance afin d'atténuer les pertes d'électricité.

## **B. Les éoliennes on shore [23]**

- Définition et fonctionnement :

Une éolienne terrestre, ou onshore, est par définition installée sur la terre ferme. Elle permet de convertir dans un premier temps l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

Le procédé de conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est proche de celui d'une dynamo, convertissant le mouvement d'une roue en électricité alimentant les feux d'un vélo.

L'énergie mécanique accumulée peut ensuite être directement utilisée afin de pomper de l'eau ou moulin du grain, comme le font les moulins. Aujourd'hui, dans la grande majorité des cas, l'énergie mécanique est transformée dans un second temps en énergie électrique. Le procédé de conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est proche de celui d'une dynamo, convertissant le mouvement d'une roue en électricité alimentant les feux d'un vélo. Lorsqu'une éolienne produit de l'électricité, on peut la qualifier d'aérogénérateur.

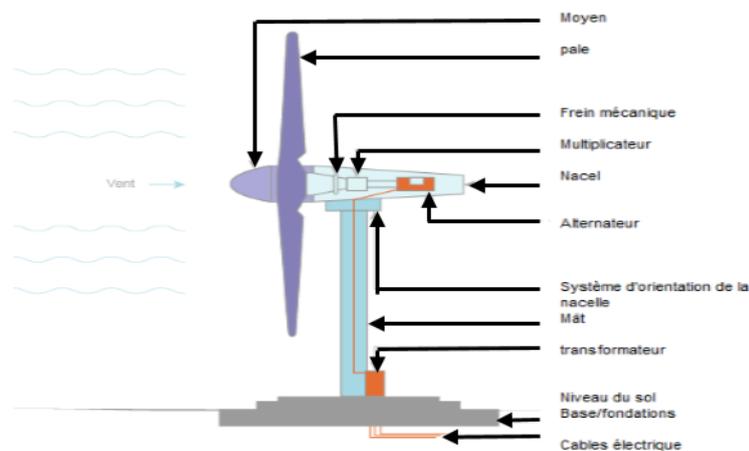
Les éoliennes à axe horizontal sont aujourd'hui la forme la plus courante d'éolienne terrestre. La. Le tout est installé au sommet d'un mât haut de plusieurs dizaines de mètres. Une éolienne de 2 MW mesure en moyenne de 80 à 125 mètres de haut en moyenne et peut peser jusqu'à 300 tonnes [23]

Un moteur permet d'orienter l'ensemble rotor-nacelle de l'éolienne afin de le placer face au vent. Le vent fait tourner les pales (entre 5 et 25 tours par minute) qui actionnent le rotor puis le générateur qui leur est solidaire.

- Les constituants d'une éolienne :
- **le rotor**, partie rotative de l'éolienne placée en hauteur afin de capter des vents forts et réguliers. Il est composé de pales (en général 3) en matériau composite qui sont mises en mouvement par l'énergie cinétique du vent. Reliées par un moyeu, ces dernières peuvent en moyenne mesurer chacune 25 à 60 m de long et tourner à une vitesse de 5 à 25 tours par minute.

- **la nacelle**, structure soutenue par le mât abritant les différents éléments mécaniques. On distingue les éoliennes à entraînement direct de celles équipées de train d'engrenages (multiplicateur/réducteur) selon le type d'alternateur utilisé. Les alternateurs classiques requièrent une adaptation de la vitesse de rotation par rapport au mouvement initial du rotor.
- **la tour**, composée du mât, du système de commande électrique et du transformateur. Généralement de forme conique, le mât supporte la nacelle. Il mesure entre 50 et 130 m de haut et a un diamètre à son pied compris entre 4 et 7 m. Une ouverture en bas du mât permet d'accéder aux différents équipements de l'éolienne parmi lesquels le transformateur qui permet d'augmenter la tension de l'électricité produite afin de l'injecter sur le réseau ;
- **la base**, souvent circulaire et en béton armé dans le cas des éoliennes terrestres, qui permet de maintenir la structure globale.

On qualifie de turbine l'ensemble constitué du rotor et du train d'engrenages. Par extension, ce terme est souvent employé pour désigner l'éolienne dans sa globalité, comme en anglais (*Wind turbine*).



*Figure 20 L'éolienne on shore [23]*

### C. l'éolien zeppelin

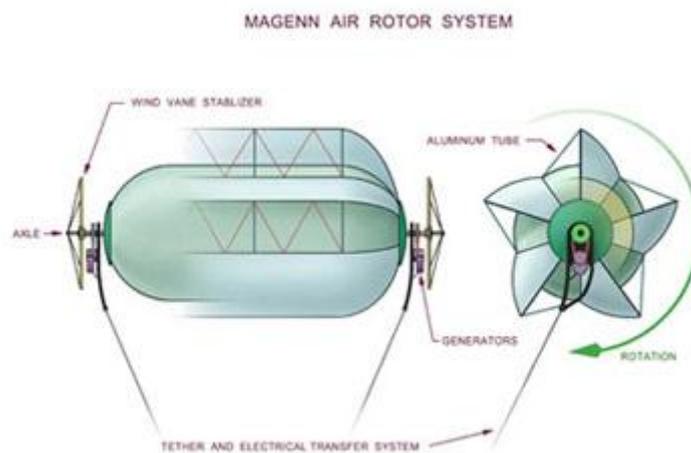
Remédier à l'éternel défaut des éoliennes terrestres, tel est l'objet du projet que s'est lancé l'entreprise canadienne Magenn Power, basée dans l'Ontario. Placée à 300m d'altitude, l'éolienne profite ainsi des vents que les "conventionnelles" éoliennes terrestres, hautes d'un maximum de 160m, ne captent pas. C'est en effet à partir de telles hauteurs que les vents les plus puissants et les plus réguliers soufflent.

## Principe de fonctionnement :

Traversé par un axe horizontal, un ballon gonflé à l'hélium muni de grosses pales est entraîné par le vent.

La rotation du ballon entraîne deux génératrices fixées aux extrémités de l'axe. De plus, la rotation du ballon induit une force de sustentation supplémentaire - l'effet Magnus.

D'après ses concepteurs, cette éolienne commencerait à fonctionner à partir d'un vent de seulement 1 mètre par seconde (3,6 km/h). Un câble relie l'éolienne au sol afin d'acheminer l'électricité produite.



*Figure 21 : Le vent entraîne la rotation du ballon autour de l'axe horizontal [23]*

- Avantages
  - Pas de travaux à l'installation
  - L'éolien ballon est mobile
  - Les vents captés sont plus stables et plus puissants
  - Technologie simple et rentable
- Inconvénients :

L'éolien ballon ne profite pas entièrement du couple généré par le vent

## ■ les éoliennes à axes vertical

Le principal avantage des éoliennes verticales est leur capacité à capter des vents faibles. Ainsi Elle n'a pas besoin de s'orienter par rapport au vent. De plus, elle demande moins d'espace qu'une éolienne horizontale. Cependant, l'éolienne verticale produit moins

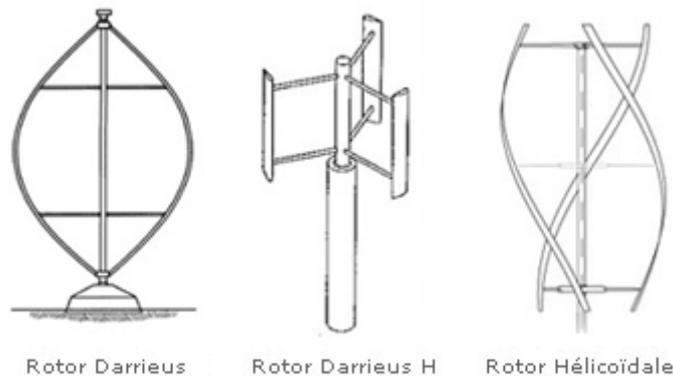
d'électricité que l'éolienne horizontale, Son rendement est moins élevé et démarre moins vite à cause du grand poids du rotor qui provoque des frottements.

### A. Les éoliennes verticales Darrieus

Les éoliennes à axe vertical de type Darrieus possèdent généralement un rendement plus faible que les éoliennes "classiques" à pôle.

#### • Principe de fonctionnement d'une éolienne de type Darrieus

- Le principe est celui d'un rotor d'axe vertical qui tourne au centre d'un stator à ailettes.
- Ce type de solution réduit considérablement le bruit tout en autorisant le fonctionnement avec des vents supérieurs à 220 km/h et quelle que soit leur direction.
- Le principal défaut de ce type d'éolienne est leur démarrage difficile, en effet le poids du rotor pèse sur son socle, générant des frottements.
- On distingue plusieurs déclinaisons autour de ce principe, depuis le simple rotor cylindrique - deux profils disposés de part et d'autre de l'axe - jusqu'au rotor parabolique où les profils sont recourbés en troposkine et fixés au sommet et à la base de l'axe vertical.



- Avantage :
  - Génératrice pouvant placée au sol (selon les modèles)
  - Moins d'encombrement qu'une éolienne "conventionnelle"
  - Intégrable au bâtiment
- Inconvénients :

- Démarrage difficile par rapport à l' éolienne de type Savonius
- Faible rendement

### **B. Eolienne à axe vertical de type savonius**

Bien que possédant un faible rendement par rapport aux éoliennes "classiques" à pôle, l'éolienne Savonius a l'avantage de fonctionner avec toutes les directions de vent.

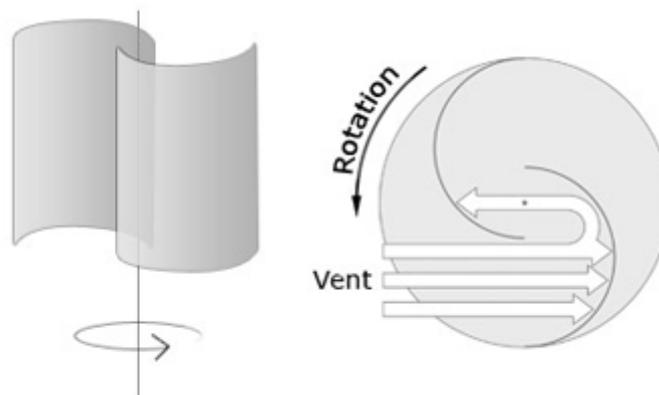
Ce type d'éolienne peut s'avérer utile pour capter des vents puissants (haute montagne, front de mer...).

L'implantation d'éolienne verticale sur un bâtiment n'est pas une opération anodine car les vibrations peuvent endommager le bâti

- **Principe de fonctionnement d'une éolienne de type Savonius**

Cette machine a été inventée par l'ingénieur finlandais Sigurd Savonius en 1924 et a été brevetée en 1929.

Elle est constituée schématiquement d'un minimum de deux demi-cylindres légèrement désaxés.



*Figure 23 : Le rotor Savonius est composé de deux demi-cylindres désaxés [23]*

- **Avantage:**
  - Pas de contraintes sur la direction du vent
  - Compact
- **Inconvénients :**
  - Faible rendement par rapport à une éolienne à pôle

## ■ *Utilisation domestique dans le cadre du « petit éolien » [23]*

Le petit éolien désigne les éoliennes de petite et moyenne puissance, de 100 Watts à environ 20 Kilowatts, montées sur des mâts de 5 à 35 mètres, raccordées au réseau électrique ou bien à un parc de batteries dans le cas d'un site isolé.

- L'énergie éolienne dépend de la puissance et de la régularité du vent.
- C'est une source d'énergie intermittente.
- Les zones de développement sont limitées.
- Les éoliennes peuvent susciter des conflits d'usage d'ordre environnemental comme les nuisances visuelles et sonores.
- Il peut exister des conflits d'utilisation de l'espace terrestre ou marin avec les autres usagers (exemple : pêcheurs, plaisanciers).

Le petit éolien se développe principalement en milieu rural. C'est là que l'on trouve les espaces les plus ventés et une faible densité de population (cela facilite l'acceptation du projet par le voisinage).

En milieu urbain, les turbulences générées par les nombreux obstacles empêchent d'obtenir des rendements intéressants. Il devient alors très difficile voire impossible d'amortir le coût d'installation de la machine et sa maintenance.

Le facteur essentiel pour qu'une petite éolienne soit économiquement rentable est la ressource en vent, ce dernier doit être à la fois puissant et fréquent. Avant d'investir dans une installation éolienne, une étude préalable (2 mois minimum) de la ressource locale en vent est fortement recommandée.



*Figure 24 : Éolienne domestique de 150 W [23]*

- Principe de fonctionnement du petit éolien

Une hélice à pâle est entraînée en rotation par le vent. L'hélice entraîne une génératrice qui produit du courant électrique. Ce courant est acheminé vers un régulateur puis injecté sur le réseau électrique ou stocké dans des batteries.

- Avantage :
  - La production d'électricité n'émet pas de pollution
  - Le vent est une ressource inépuisable
- Inconvénient :
  - Fonctionnement par intermittence
  - Maintenance obligatoire (lubrification des roulements, vérification des serrages...)
  - Le petit éolien ne peut pas convenir à tous les sites, une étude préalable de la ressource locale en vent est fortement recommandée.

### **III-5. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne [23]**

#### ***Avantage :***

- L'énergie éolienne est renouvelable et propre.
- En phase d'exploitation, cette énergie est presque totalement indépendante des ressources fossiles.
- Le terrain où les éoliennes sont installées reste toujours exploitable pour les activités industrielle et agricole. L'installation peut être démantelée relativement facilement.
- Leur développement offshore présente un potentiel non négligeable.
- Implantées localement, les éoliennes peuvent permettre de répondre à des besoins électriques de masse tout comme à des besoins domestiques limités, selon la taille de l'éolienne.

#### ***Inconvénients :***

- L'énergie éolienne dépend de la puissance et de la régularité du vent.
- C'est une source d'énergie intermittente.
- Les zones de développement sont limitées.
- Les éoliennes peuvent susciter des conflits d'usage d'ordre environnemental comme les nuisances visuelles et sonores.
- Il peut exister des conflits d'utilisation de l'espace terrestre ou marin avec les autres usagers (exemple : pêcheurs, plaisanciers).

### **III-6. Conclusion :**

Nous avons dans le deuxième chapitre fait une étude bibliographique portant sur :

- L'énergie éolienne ainsi que les aérogénérateurs les plus fréquemment utilisés.
- Un aperçu général sur la carte des vents dans l'Algérie et dans les sites choisis.
- Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne.

## **IV. Chapitre 2 : Méthodes de calcul des potentiels énergétiques photovoltaïques et éoliens dans un site donné**

### **IV-1. Introduction**

La simulation permet d'évaluer ces données d'une façon continue dans l'espace et dans le temps tandis que les stations radiométriques et météorologiques offrent des données plus représentatives et réels mais possèdent aussi des lacunes et discontinuités et elles sont très coûteuses.

Le présent travail est d'élaborer une méthode basée à la fois sur la simulation et sur les données des stations radiométriques et météorologiques (**National Climatic Data Center, NASA Surface Meteorology and Solar Energy**). Il permet d'évaluer d'une façon continue et très représentative les potentiels énergétiques éoliens et solaires sur des sites isolés de l'Algérie.

### **IV-2. Modélisation numérique du gisement solaire et optimisation de l'inclinaison de capteur solaire :**

Plusieurs stations radiométriques possèdent des lacunes et des discontinuités dans les différentes composantes du rayonnement solaire. La modélisation numérique et la simulation du gisement solaire est capable de prédire d'une façon complète et précise les données horaires des composants diffus, globales et directes du rayonnement solaire. Ces données sont nécessaires pour un bon dimensionnement d'un système photovoltaïque.

H.Zeraia et al ont pu, à travers le logiciel HOMER, prédire les données de l'irradiation solaire des différents sites isolés algériens [1]. A.MOUMMI et al ont étudié l'effet de l'inclinaison du capteur solaire sur les composants diffus, globaux et directs du rayonnement photovoltaïque [2].

Nous développons dans ce travail un modèle mathématique similaire à celle du logiciel RETSCREEN mais il a subi des améliorations en tenant compte l'effet des données de températures et l'ajustement de la constante solaire  $G_{sc}$ . Ce modèle permet d'estimer les

composantes horaires globales, diffuses et directes du rayonnement solaire et d'optimiser l'inclinaison du capteur solaire dans des sites isolés tels qu'ADRAR et NAAMA.

### ■ **Notion de base :**

Avant d'entrer dans les détails du modèle PV, certains principes de base méritent d'être rappelés, notamment la définition de plusieurs variables qui seront utilisées à plusieurs reprises par la suite.

**La latitude ( $\varphi$ ) :** est l'angle formé par le plan équatorial et la direction reliant le lieu considéré, au centre de la terre. Les latitudes de l'hémisphère Nord sont affectées d'un signe positif et celles de l'hémisphère Sud d'un signe négatif.

**La longitude ( $\lambda$ ) :** représente l'angle formé par le plan méridien de lieu considéré et le plan méridien origine. Ce dernier passe par l'observatoire de Greenwich et a pour longitude  $0^0$ .

**Déclinaison ( $\delta$ ):** La déclinaison est l'angle que fait le soleil au maximum de sa course (midi solaire) par rapport au plan équatorial. Sa valeur en degrés, est donnée par l'équation de Cooper :

$$\delta = 23.45 \sin \left( 2\pi \frac{284+n}{365} \right) \dots \dots \dots (III-1)$$

Où n est le jour de l'année (c.-à-d. n = 1 pour le 1er janvier, n = 32 pour le 1er février, etc.).

La déclinaison varie entre  $-23,45^\circ$  le 21 décembre et  $+23,45^\circ$  le 21 juin.

- ✓ **L'angle horaire du soleil ( $\omega$ ) :** repère la position du soleil dans sa rotation journalière sur le cône d'ouverture  $\omega$ . C'est l'angle entre le plan méridien passant par l'observateur et le plan méridien contenant le soleil. En principe, un jour solaire (variant de  $-180^0$  à  $+180^0$ ) correspond à 24h:

$$\omega = 15 \left( \text{heures UTC} - 12 + \frac{\lambda}{15} \right) \dots \dots \dots (III-2)$$

- ✓ **Angle horaire du soleil et angle horaire du soleil à son coucher :**

L'angle horaire du soleil à son coucher  $\omega_s$  est l'angle horaire du soleil à l'heure de son coucher. Il est donné par l'équation suivante :

$$\cos \omega_s = - \tan \psi . \tan \delta (III-3)$$

Où  $\delta$  est la déclinaison calculée d'après l'équation (1) et  $\psi$  la latitude du lieu du projet, précisée par l'utilisateur.

✓ **Rayonnement extraterrestre et indice de clarté :**

Le rayonnement extraterrestre est le rayonnement solaire avant qu'il n'atteigne la couche atmosphérique. Le rayonnement hors atmosphère sur une surface horizontale  $H_0$ , pour le jour  $n$ , est obtenu à l'aide de l'équation suivante :

$$H_0 = \frac{86400 \cdot G_{sc}}{\pi} \left( 1 + 0.033 \cos \left( 2 \cdot \pi \frac{n}{365} \right) \right) (\cos \psi \cdot \cos \delta \cdot \sin w_s + w_s \cdot \sin \psi \cdot \sin \delta) \text{(III-4)}$$

Où  $G_{sc}$  est la constante solaire égale à 1 367 W/m<sup>2</sup> et où les autres variables ont été définies plus haut.

Avant d'atteindre le sol, le rayonnement solaire est atténué par l'atmosphère et les nuages. Le rapport entre le rayonnement au sol et le rayonnement extraterrestre est appelé indice de clarté (traduction littérale de l'américain clearness index). La moyenne mensuelle de l'indice de clarté,  $K_T$ , est définie par :

$$K_T = \frac{\bar{H}}{H_0} \dots \dots \dots \text{(III-5)}$$

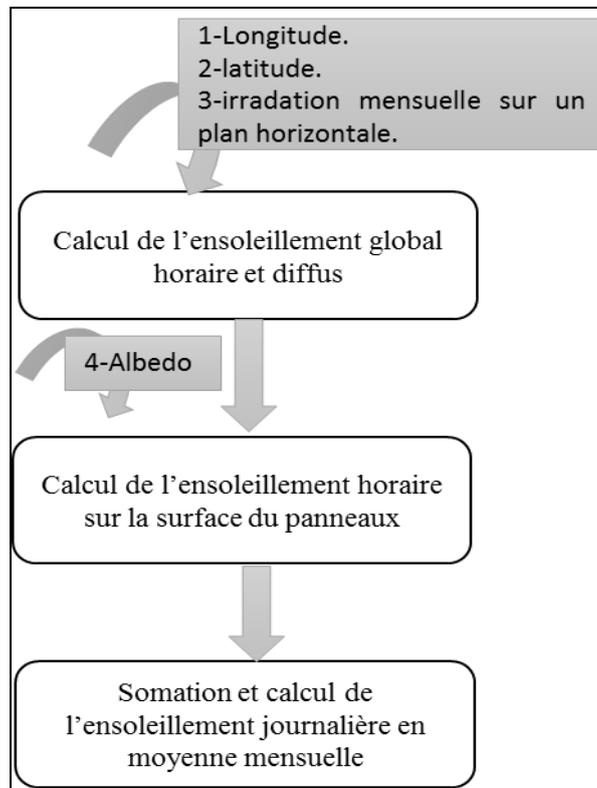
Où  $H$  est la moyenne mensuelle de rayonnement solaire quotidien sur un plan horizontal, et  $H_0$  est la moyenne mensuelle du rayonnement extraterrestre sur la même surface horizontale. Les valeurs de  $K_T$  varient selon les endroits et les saisons et varient généralement entre 0,3 et 0,8 en fonction des saisons et des climats des régions.

■ ***Calcul de l'ensoleillement sur un plan incliné :***

Le calcul de l'ensoleillement sur la surface d'un champ PV se fait en utilisant une méthode similaire à celle de l'algorithme de Klein et Theil Acker dont l'algorithme a été étendu au cas des systèmes avec suivi du soleil.

L'algorithme peut être décrit comme une succession de trois étapes (voir Figure 25) :

- Calcul des ensoleillements horaires global et diffus sur une surface horizontale pour toutes les heures d'une « journée moyenne » ayant le même ensoleillement Global quotidien que la moyenne mensuelle.
- Calcul des valeurs horaires de l'ensoleillement global sur la surface inclinée (ou suiveuse) pour toutes les heures de la journée.
- Sommation de ces valeurs horaires sur la surface inclinée pour obtenir l'ensoleillement quotidien moyen sur la surface du champ PV.



*Figure25 : schéma fonctionnel du calcul de l'ensoleillement sur un plan incliné*

#### **IV-2-2-1. Calcul de l'ensoleillement horaire global et diffus :**

Le rayonnement solaire peut être séparé en deux composantes : l'ensoleillement direct, émis par le disque solaire et l'ensoleillement diffus émis par le reste de la voûte céleste.

L'algorithme de calcul sur une surface inclinée utilisé nécessite la connaissance des ensoleillements direct et diffus pour chaque heure d'une « journée moyenne »

En premier lieu, il convient donc de calculer la moyenne mensuelle de l'ensoleillement diffus quotidien  $H_d$  à partir de la moyenne mensuelle de l'ensoleillement global quotidien  $H$  et en utilisant la corrélation suivante :

Quand l'angle horaire du soleil à son coucher est supérieur à  $81,4^\circ$ , la moyenne mensuelle de l'indice de clarté  $K_T$ , est calculée à partir de l'équation III-5.

$$\frac{\overline{H_d}}{\overline{H}} = 1.391 - 3.560\overline{K_T} + 4.189\overline{K_T}^2 - 2.137\overline{K_T}^3 \quad \dots\dots\dots(\text{III-6})$$

Quand l'angle horaire du soleil à son coucher pour le jour moyen du mois est inférieur à  $81,4^\circ$ :

$$\frac{\overline{H_d}}{\overline{H}} = 1.331 - 3.022\overline{K_T} + 3.427\overline{K_T}^2 - 1.82\overline{K_T}^3 \dots \dots \dots \text{(III-7)}$$

Notons que les deux équations sont valables seulement si  $0,3 \leq K_T \leq 0,8$ . Une approximation particulière doit être faite lorsque  $K_T$  est en dehors de cet intervalle, par exemple pour les situations proches de la nuit polaire.

Ensuite, l'ensoleillement quotidien moyen est réparti en valeurs horaires. Cela est réalisé grâce aux formules suivantes :

$$r_t = \frac{\pi}{24} (a + b \cdot \cos w) \frac{\cos w - \cos w_s}{\sin w_s - w_s \sin w_s} \dots \dots \dots \text{(III-8)}$$

$$a = 0.409 + 0.5016 \sin \left( w_s - \frac{\pi}{3} \right) \dots \dots \dots \text{(III-9)}$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \sin \left( w_s - \frac{\pi}{3} \right) \dots \dots \dots \text{(III-10)}$$

Où  $r_t$  est le rapport de la valeur horaire sur le total quotidien de l'ensoleillement global,  $\omega_s$  est l'angle horaire du soleil à son coucher exprimé en radians (voir III-3) et  $\omega$  est l'angle horaire du soleil pour le milieu de l'heure pour laquelle le calcul est fait (voir III-2);

$$r_d = \frac{\pi}{24} \frac{\cos w - \cos w_s}{\sin w_s - w_s \sin w_s} \text{( III-11 )}$$

Où  $r_d$  est le rapport de la valeur horaire sur le total quotidien de l'ensoleillement diffus. Pour chaque heure de la « journée moyenne »,  $I_{Gl}$  (ensoleillement global horizontal),  $I_{df}$  et  $I_{dr}$  (ses composantes diffuse et directe) sont donnés par les trois formules suivantes :

$$I_{Gl} = r_t \overline{H} \text{(III-12)}$$

$$I_{df} = r_d \overline{H}_d \text{(III-13)}$$

$$I_{dr} = H \overline{H}_d \text{(III-14)}$$

**IV-2-2-2. Calcul de l'ensoleillement horaire dans le plan du champ PV :**

L'ensoleillement horaire dans le plan du champ PV,  $I_{inc}$ , est obtenu en utilisant un modèle isotrope simple. Ce n'est pas le modèle disponible le plus précis mais il est suffisant pour une étude de préfaisabilité :

$$I_{inc} = I_{dr} R_b + I_{df} \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I_{Gl} \cdot \rho \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \dots \dots \dots \text{(III-15)}$$

Où  $\rho$  représente le coefficient de réflexion de lumière diffuse du sol (aussi appelé albédo du sol) et  $\beta$  l'inclinaison du champ PV. L'albédo du sol a été fixé à 0,2 si la température moyenne mensuelle est supérieure à 0°C, et une valeur de 0,7 si elle est inférieure à -5°C (une interpolation linéaire est faite pour les températures comprises entre ces deux valeurs).  $R_b$  est l'ensoleillement direct sur le champ PV divisé par l'ensoleillement direct sur l'horizontale :

$$R_b = \frac{\cos(\psi-\beta) \cos \delta \cos w + \sin(\psi-\beta) \sin \delta}{\cos \psi \cos \delta \cos w + \sin \psi \sin \delta} \dots \dots \dots \text{(III-16)}$$

**IV-2-2-3. Sommation :**

L'ensoleillement sur le plan incliné est calculé pour toutes les heures de la journée. Le total quotidien  $H_t$  est alors obtenu par la sommation de ces valeurs horaires.

**IV-3. Modélisation numérique du gisement éolien**

**■ Introduction :**

Il faut savoir que plusieurs chercheurs du CDER ont axé, depuis quelques années, leurs recherches sur l'élaboration de cartes éoliennes de l'Algérie. Et c'est ainsi que cet organisme vient également de publier une nouvelle carte du gisement éolien national.

. D'autre part, le Centre de développement des énergies renouvelables tient à souligner, à ce propos, l'existence de deux études récentes, la première, réalisée par le chercheur Sidi Mohammed Boudia, qui a permis de réactualiser la carte des vents à 10m, en utilisant des données météorologiques plus récentes et un plus grand nombre de points de mesure par rapport aux précédents travaux.

La deuxième étude, établie par le chercheur Farouk Chellali en 2011, a permis d'étudier le phénomène cyclique du vent et a contribué à l'actualisation de la carte des vents en Algérie en introduisant le site de Hassi-Rmel "qui avait été sous-estimé dans les précédents travaux".

Le but de cette partie est d'évaluer d'une façon continue dans l'espace et dans le temps le potentiel énergétique éolien des gisements d'Adrar et Naama à travers deux méthodes :

La première nécessite la maîtrise de l'utilisation de la base des données NCDC (National Climatic Data Center) durant les dix dernières années (2004 au 2014)

La deuxième utilise la distribution de Weibul pour modéliser le gisement éolien disponible sur les deux sites ainsi les paramètres de Weibul ont été recalculés en basant sur les données météorologiques du National Climatic Data Center.



Le facteur d'échelle est très proche de la vitesse moyenne de la vitesse du vent.

$$k = \left( \frac{\sigma_v}{V_m} \right)^{-1.090} \dots\dots\dots(\text{III-21})$$

$$A = \frac{2V_m}{\sqrt{\pi}} \dots\dots\dots(\text{III-22})$$

$V_m$  : vitesse moyenne (m/s)                       $\sigma$  : écart type (m/s)

### C. Présentation de la plateforme NCDC [24]

Le National Climatic Data Center (NCDC) des États-Unis, fondé en 1951, situé à Asheville en Caroline du Nord est le plus important centre mondial de collecte des données météorologiques. Le centre possède plus de 150 années de données archivées et reçoit chaque jour plus de 224 gigabytes de nouvelles informations. Le NCDC archive 99 pourcent des données de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), y compris plus de 320 millions d'archives sur papier; 2,5 millions de microfiches; et environ 1,2 petabytes de données numériques. Le NCDC possède des images prise par les satellites météorologiques depuis 1960.

les données proviennent de très nombreuses sources : observations de stations météorologiques terrestres par des observateurs du National Weather Service et automatiques; télédétection par profileurs de vents, enregistreurs de radiations solaires, radiosondes, satellites et Radars météorologiques ; observations de navires et d'avions ; ainsi que les modèles et prévisions venant services de prévisions météorologiques.

Le Centre fournit des perspectives historiques concernant le climat qui sont essentielles à l'étude du Changement climatique. Il conserve des données essentielles pour l'industrie, l'agriculture, l'hydrologie, les transports, les loisirs.



Figure 26 fenêtre principale de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) [24]

### C-1 Procédure de simulation

**Data Access :** NCEI est le fournisseur de données météorologiques et climatiques de larges du monde, surface climatique, de la marine, le modèle, le radar, ballon météo, satellite et paléo climatique sont quelques-uns des types d'ensembles de données disponibles.

**Quick links :** ces liens permettent d'accéder rapidement à de nombreuses climatologiques, les produits données et les diverses page web et ressources.

#### **Données de surface intégrée, horaire, mondial ISD/CDO :**

Ensemble des données numérique de données climatiques d'observation horaire détaillés pour des milliers sites dans le monde.

#### **Continue avec options avancées :**

Ce système permet la sélection de données d'une station ou plusieurs stations, pour la période sélectionnée par l'utilisateur, à la différence du système simplifié, l'utilisateur sélectionne les éléments d'intérêt (par exemple, l'épaisseur de neige, humidité relative). La sortie et de la documentation sont générées dynamiquement en fonction des éléments sélectionnés.

**Les données de surface horaire globale :** récupérer les données pour la région géographique Afrique et le pays l'Algérie.

Sélectionner l'observation du vent de les deux stations Adrar et Naama, sélectionner restrictions de date [de 00 heures 01/01/2014 à 31/12/2014].Les données obtenues sont ci-dessous dans l'annexe.

#### **IV-4. Conclusion :**

La deuxième partie de notre étude a été consacré à la modélisation, aux méthodes d'optimisations et à la simulation des potentiels énergétiques disponibles sur les sites d'Adrar et de Naama.

Pour cela nous avons collecté les données météorologiques (vitesse du vent par heure et à 25m de hauteur, ensoleillement mensuel et température par heure et par jour) pour une période de dix années (2004 à 2014).

La vitesse du vent a été mise sous forme de classes, puis recalculée par la distribution de Weibull afin de modéliser la vitesse du vent dans la région d'Adrar.

Les données mensuelles de l'ensoleillement sur plan horizontale, de la même région ont été modélisées pour pouvoir extraire l'ensoleillement par heure pour une journée type du mois sur un plan incliné.

## V. Chapitre 3 : Résultats et interprétation

### V-1. Introduction :

Nous allons dans ce chapitre appliqué la méthode choisie pour le dimensionnement sur un site réel à l'aide un programme informatique écrit en Matlab.

Nous avons choisi les sites d'Adrar et Naama pour évaluer les potentiels énergétiques éoliens et solaires. Le programme informatique prend en charge un maximum de paramètre : température, donné du lieu, vitesse du vent, irradiation sur plan horizontale et fournie aussi un maximum de résultat.

### V-2. Résultats et interpretation de l'Energie solaire disponible

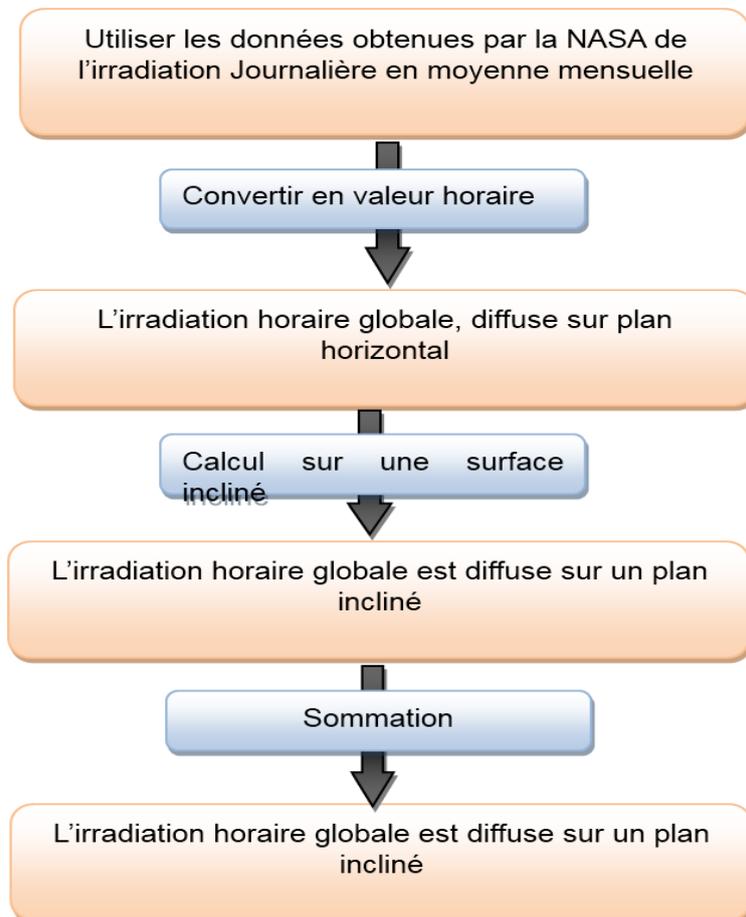


Figure 27 schéma fonctionnel du calcul de l'irradiation horaire sur un plan incliné

Nous avons quatre grandes parties :

- Utiliser les données obtenues par la NASA de l'irradiation journalière en moyenne mensuelle : Pour obtenir les données de l'irradiation mensuelle sur un plan horizontal nous avons utilisé les données météorologiques fournies par NASA Solar Energy.
- on convertit les données en valeurs horaires : Pour passer de valeur mensuelle à valeur horaire on a utilisé l'ensemble des équations.
- Ensuite nous avons calculé l'irradiation horaire globale, diffuse sur un plan incliné.
- A la fin nous avons fait la sommation pour obtenir l'irradiation journalière en moyenne mensuelle sur un plan incliné.

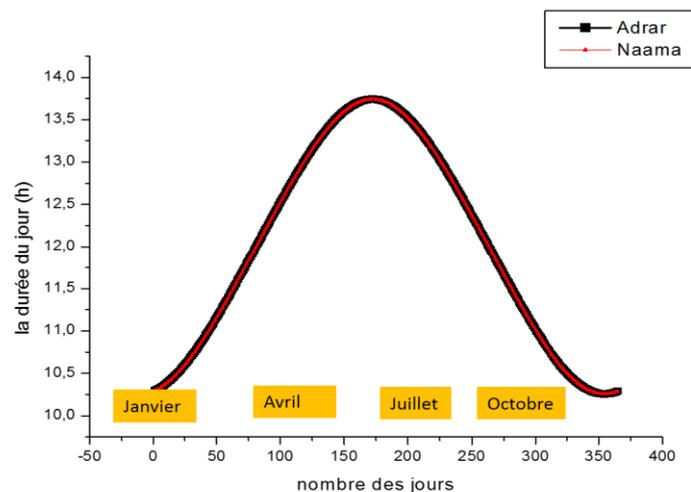
### ■ **Caractéristiques des stations radiométriques choisies :**

*Tableau 2 : caractéristiques des sites étudiés (solaire)*

Wilaya	Adrar	Naama
Nom de station	Touat Cheikh Sidi Mohamed	Naama
Longitude	-0.17	-0.18
Latitude	+27.52	+33.15

### ■ **L'ensoleillement :**

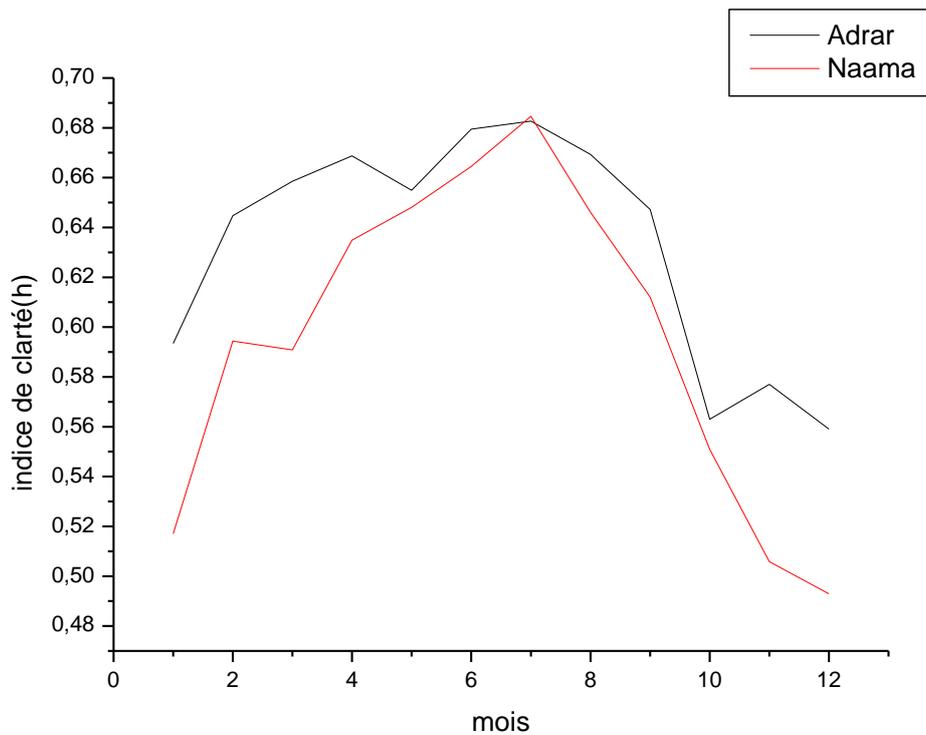
#### **V-2-2-1. Durée de jour :**



*Figure 28 : variation journalière de l'insolation maximale durant une année à Adrar et Naama*

La figure (28) représente la variation journalière de l'insolation maximale durant une année dans les sites d'Adrar et Naama. Elle montre que dans les deux sites, la durée d'un jour solaire varie entre 10 heures et 15 minutes pour hiver (21 décembre) et 13 heure et 45 minute pour l'été (21 juin).

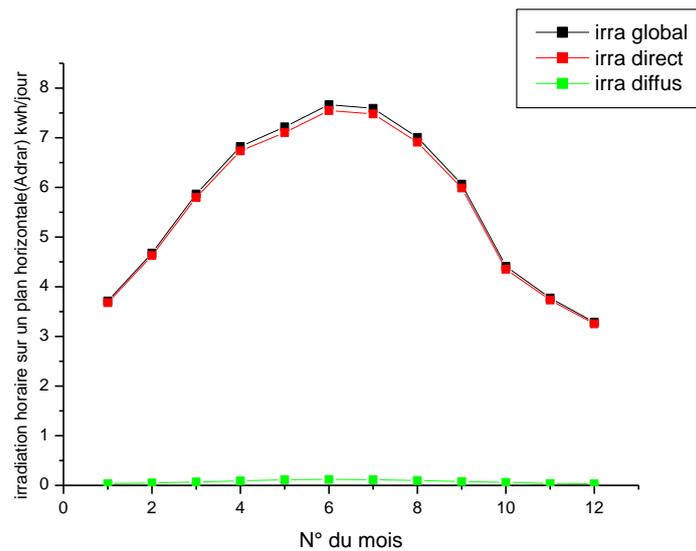
#### V-2-2-2. Indice de clarté :



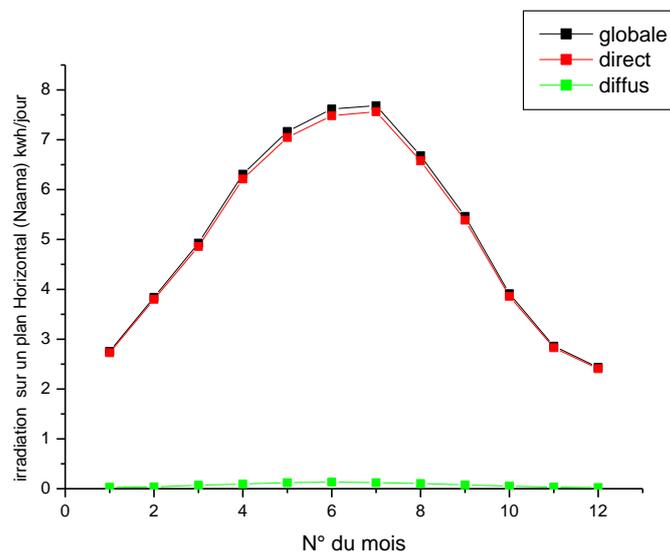
**Figure 29 :Variation mensuelle de l'indice de clarté**

La figure 29 représente l'indice de clarté qui exprime le rapport entre le rayonnement au sol et le rayonnement hors atmosphère. il varie pour le site d'Adrar entre 0.56 pour le mois de décembre et 0.68 pour de juillet et pour le site de Naama entre 0.49 pour le mois de décembre et 0.685 pour le mois de juillet. Donc on peut estimer que le climat de Naama est plus nuageux que celle d'Adrar.

**V-2-2-3. Irradiation globale, diffuse et directe sur un plan horizontale :**



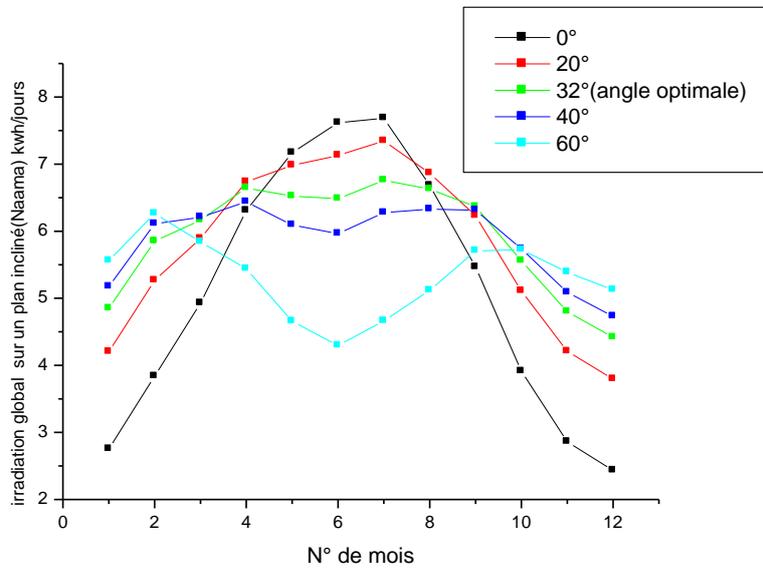
**Figure 30 L'évolution mensuelle de l'irradiation directe, diffuse et globale sur un plan horizontale à Adrar**



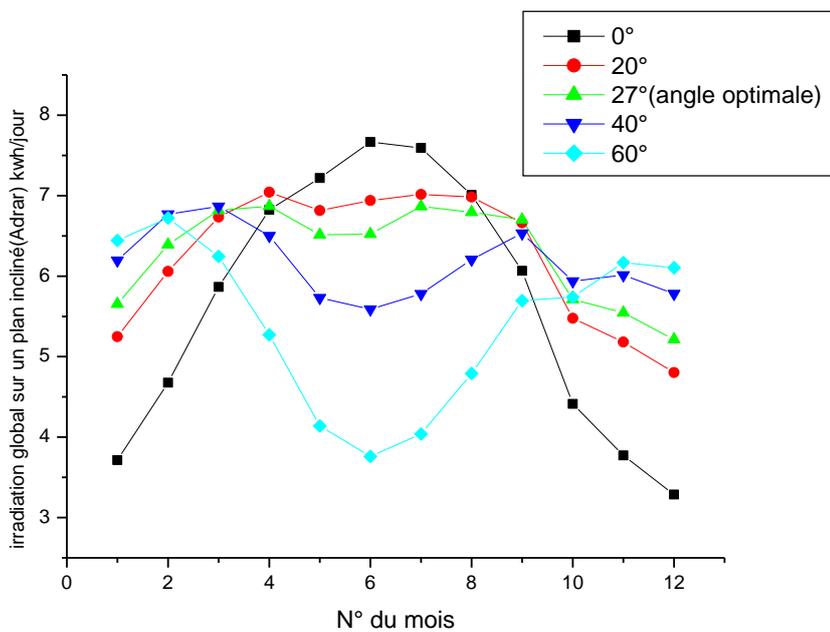
**Figure 31 : L'évolution mensuelle de l'irradiation directe, diffuse et globale sur un plan horizontale à Naama**

Les figure (30) et (31) représentent l'évolution mensuelle de l'irradiation (globale, diffuse, directe) sur un plan horizontale dans les sites de Naama et Adrar. Elles nous montrent que l'irradiation globale sur un plan horizontale d'Adrar est plus intense sur celle de Naama.

**V-2-2-4. Irradiation globale sur un plan incliné :**



**Figure 32 : l'évolution mensuelle de l'irradiation globale sur un plan incliné à Naama**



**Figure 33 :l'évolution mensuelle de l'irradiation globale sur un plan incliné à Adrar**

Les figures (32-33) représentent l'irradiation globale sur les sites d'Adrar et de Naama pour des plans inclinés. Elles montrent que l'inclinaison optimale est de l'ordre de 32° pour le site de Naama et de l'ordre de 27° pour le site d'Adrar.

#### V-2-2-5. Optimisation de l'irradiation mensuelle par suiveur de soleil

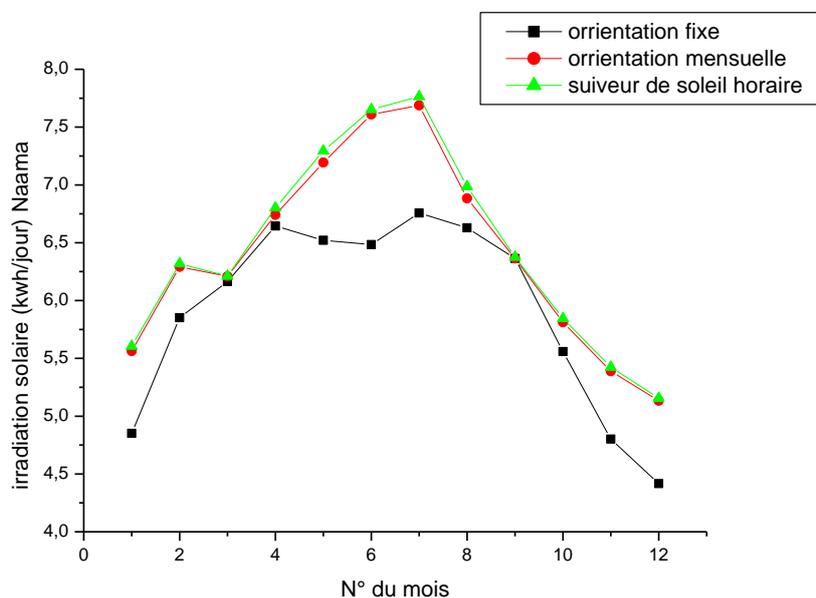


Figure 34 : d'optimisation de l'angle sur l'irradiation mensuelle à Naama

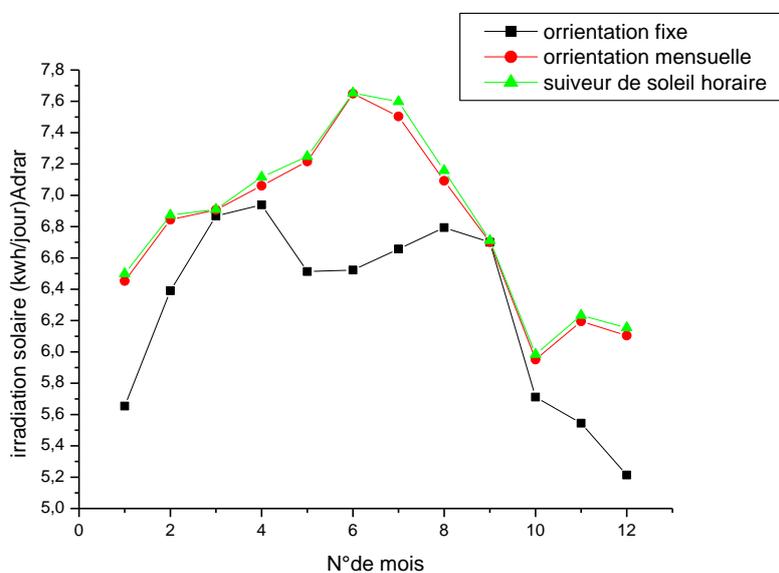


Figure 35 : d'optimisation de l'angle sur l'irradiation mensuelle à Adrar

Les figures (33-34) représentent l'optimisation de l'irradiation mensuelle sur un plan incliné en fonction de l'orientation du capteur solaire. Elle montre que le système de suivi de soleil permet d'optimiser d'une façon très significative, l'irradiation solaire.

#### V-2-2-6. les différents angles d'orientation de capteur solaire

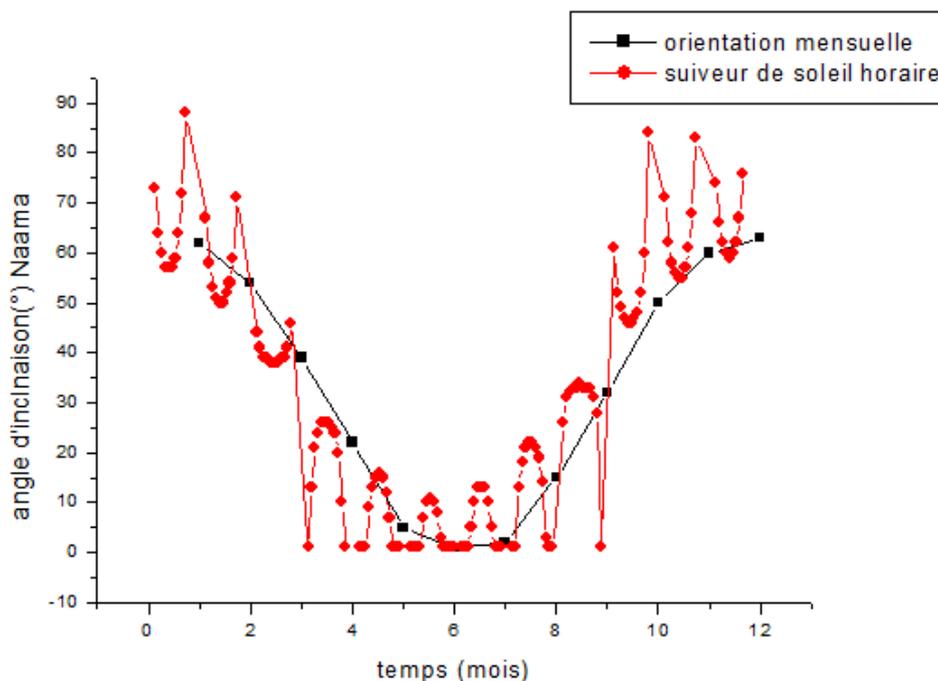


Figure 36 : les différents angles d'orientation de capteur solaire (Naama)

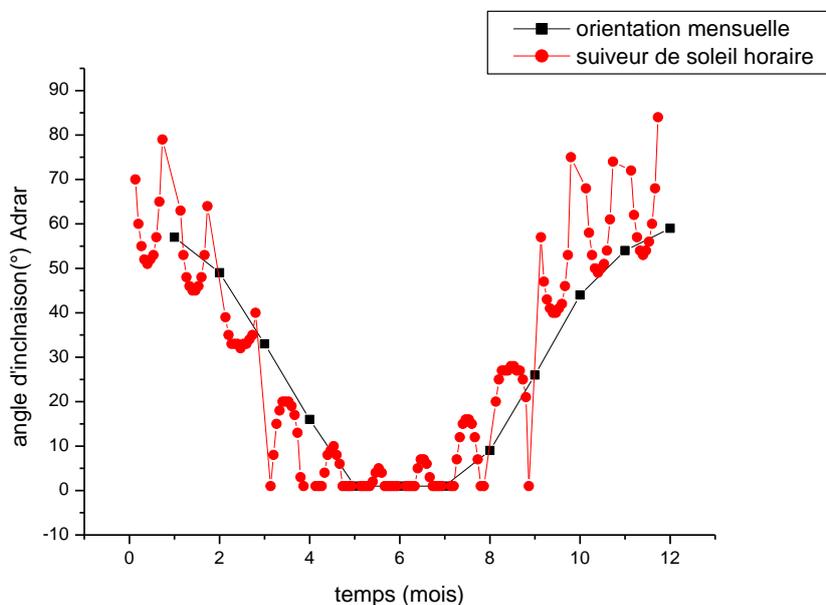


Figure 37 : les différents angles d'orientation de capteur solaire (Adrar)

Les figures (35-36) représentent les différents angles d'inclinaison du capteur solaire pour les sites d'Adrar et de Naama. Elles montrent que le système de suivi de soleil permet de balayer une large gamme d'angles d'orientation. Le suivi de soleil nécessite alors un apport supplémentaire d'énergie.

### V-3. Résultats et interprétation de l'Energie éolien disponible

#### ■ Caractéristique des stations météorologiques choisies

Tableau 3: caractéristique des sites étudié (éolien)

Wilaya	Adrar	Naama
Nom de station	Touat Cheikh Sidi Mohamed	Naama
Numéro ID	606200 99999	605570 99999
Longitude	-0.186	-0.30
Latitude	+27.838	+33.267

#### ■ Histogramme distribution de Weibul des vitesses du vent à Adrar et Naama

Mois de Janvier :

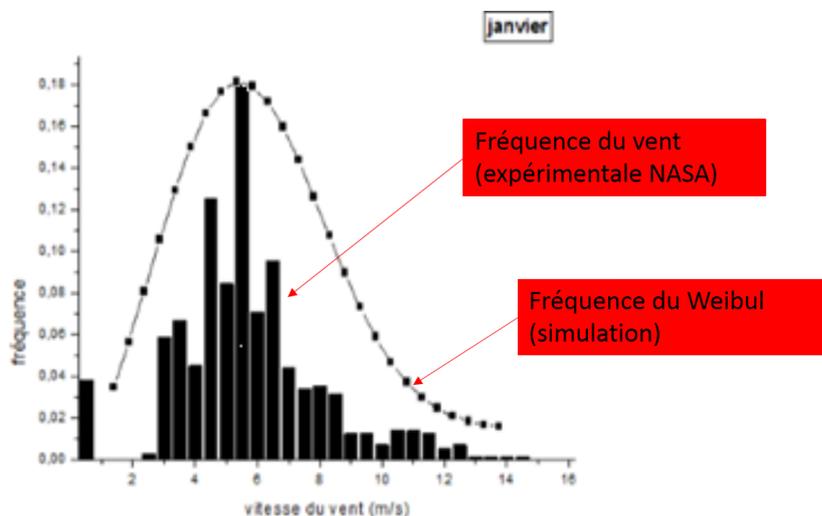
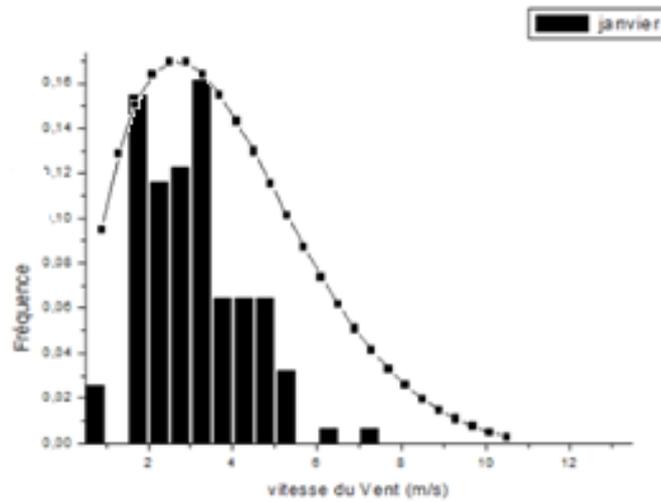


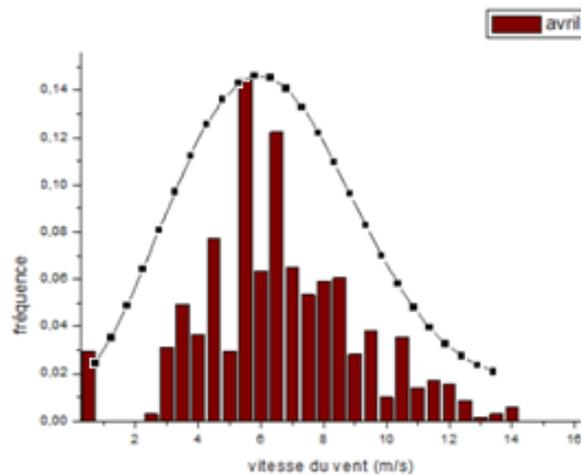
Figure 38 Histogramme distribution de Weibul des vitesses du vent à Adrar (Janvier)



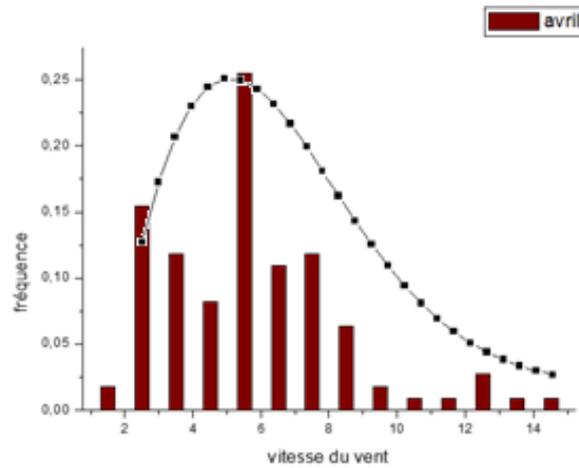
*Figure 39 Histogramme et distribution de Weibul des vitesses du vent à Naama (Janvier)*

Les figures (38-39) représentent la variation de la distribution de Weibul et les histogrammes des fréquences du vent durant le mois de Janvier sur les deux sites. Elles montrent que la vitesse du vent sur la région d’Adrar couvre une large gamme qui s’étend jusqu’à 15 m/s, tandis qu’elle ne dépasse pas 8 m/s sur la région de Naama. Le mode de la vitesse (la vitesse la plus fréquente) de l’ordre de 5.5 m/s pour Adrar et 3 m/s à Naama.

*Mois d’Avril :*



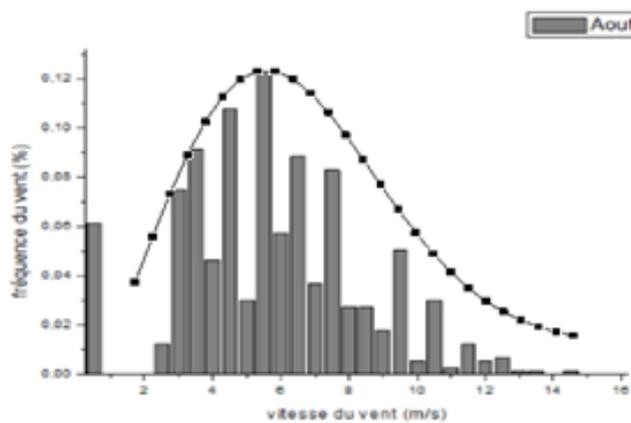
*Figure 40 Histogramme et distribution de Weibul des vitesses du vent à Adrar (Avril)*



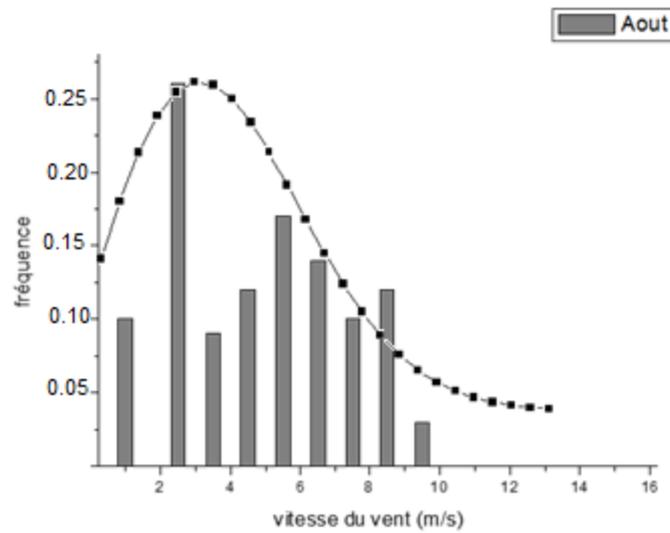
*Figure 41 histogramme et distribution de Weibul des vitesses du vent à Naama (Avril)*

Les figures (40-41) représentent la variation de la distribution de Weibul et les histogrammes des fréquences du vent durant le mois d'Avril sur les deux sites. Elles montrent que la vitesse du vent couvre une large gamme qui s'étend jusqu'à 14 m/s sur la région d'Adrar et Naama.,. Le mode de la vitesse (la vitesse la plus fréquente) de l'ordre de 5.5 m/s pour Adrar Naama.

*Mois d'Aout :*



*Figure 42 histogramme et distribution de Weibul des vitesses du vent à Adrar (Aout)*



**Figure 43** histogramme et distribution de Weibull des vitesses du vent à Naama (Aout)

Les figures (42-43) représentent la variation de la distribution de Weibull et les histogrammes des fréquences du vent durant le mois d'août sur les deux sites. Elles montrent que la vitesse de vent sur la région d'Adrar couvre une large gamme qui s'étend jusqu'à 14 m/s, tandis qu'elle ne dépasse pas 9 m/s sur la région de Naama. Le mode de la vitesse (la vitesse la plus fréquente) est de l'ordre de 5.5 m/s pour Adrar et 2 m/s à Naama.

**■ Paramètres de Weibull des sites Adrar et Naama :**

**Tableau 4** Paramètres de Weibull des sites Adrar et Naama pour le mois de Janvier

	Adrar	NAAMA
Vitesse moyenne (m/s)	5.34713896	3.89
Ecart type (m/s)	2.36	2.82
Facteur d'échelle (m/s)	6.02	4.38
Facteur de forme	2.43	1.42

**Tableau 5 Paramètres de Weibull des sites Adrar et Naama pour le mois d'Avril**

	Adrar	NAAMA
Vitesse moyenne (m/s)	6.27412096	4.8804878
Ecart type (m/s)	2.59	2.90
Facteur d'échelle (m/s)	7.07	5.50
Facteur de forme	2.62	1.76

**Tableau 6 Paramètres de Weibull des sites Adrar et Naama pour le mois d'Aout**

	Adrar	NAAMA
Vitesse moyenne (m/s)	5.37972789	4.68
Ecart type (m/s)	2.69	2.37
Facteur d'échelle (m/s)	6.06	5.28
Facteur de forme	2.12	2.09

Tableaux 4-5-6 représentent l'étude comparative entre les paramètres de Weibull Adrar et Naama. Ses tableaux montrent aussi que le site d'Adrar a un potentiel du vent plus important de celle que Naama durant tt les saisons.

## VI. Conclusion Générale Et Perspectives

Notre étude a été portée sur l'évaluation des potentiels énergétiques éoliens et solaires dans les sites d'Arar et de Naama.

Nous avons dans un premier temps fait une étude bibliographique portant sur :

- L'énergie photovoltaïque et toutes les technologies existantes.
- Un aperçu général sur le taux d'irradiation solaire dans l'Algérie et dans les sites choisis.
- L'énergie éolienne ainsi que les aérogénérateurs les plus fréquemment utilisés.
- Un aperçu général sur la carte des vents dans l'Algérie et dans les sites choisis.

La deuxième partie de notre étude a été consacrée à la modélisation, aux méthodes d'optimisations et à la simulation des potentiels énergétiques disponibles sur les sites d'Adrar et de Naama.

Pour cela nous avons collecté les données météorologiques (vitesse du vent par heure et à 25m de hauteur, ensoleillement mensuel et température par heure et par jour) pour une période de dix années (2004 à 2014).

La vitesse du vent a été mise sous forme de classes, puis recalculée par la distribution de Weibull afin de modéliser la vitesse du vent dans la région d'Adrar.

Les données mensuelles de l'ensoleillement sur plan horizontale, de la même région ont été modélisées pour pouvoir extraire l'ensoleillement par heure pour une journée type du mois sur un plan incliné.

L'angle optimal de l'inclinaison du capteur solaire est de l'ordre de  $32^\circ$  pour la région de Naama et de l'ordre de  $27^\circ$  pour le cas d'Adrar.

Le suivi de soleil horaire permet d'optimiser d'une façon très significative l'irradiance solaire mais il nécessite un apport supplémentaire d'énergie.

Toutes ces données nous ont permis d'évaluer les potentiels énergétiques éoliens et solaires disponibles par un programme informatique réalisé sous environnement Matlab. Celui-ci nous a permis de trouver des résultats à la fois continue, sans aucunes lacunes et précises.

Comme perspectives de ce travail nous envisageons de :

- Valider le modèle et le programme informatique destiné à évaluer le potentiel énergétique solaire.
- Prendre une période de trente ans au lieu de dix ans pour évaluer le potentiel énergétique éolien disponible.
- Construire une base de données qui regroupe les données du vent et de l'ensoleillement sur tout le territoire national.
- Prendre en considération l'effet de température et de poussières (vent de sable) sur les composantes: globale, directe et diffus du rayonnement solaire.

## ***BIBLIOGRAPHIE***

- [1] José Miguel Navarro « Cellules Photovoltaïques Organiques Transparents Dans Le Visible ». Thèse de doctorat. Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2008.
- [2] HELALI KAMELIA « Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative » Mémoire de MAGISTER, université de Tizi Ouzou ,2012.
- [3] ]Mémoire de Magister « Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride eolien-photovoltaïque » BELGHITRI HOUDA, 2010.
- [4] David Wilge bus « L'énergie solaire ». 31 juillet 2001
- [5] Webmaster « Communications Télé signal Lac St-Jean Inc. ». 2013
- [6] Abdelilah SLAOUI, Directeur de recherche, Laboratoire des Sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie (ICUBE), CNRS et Université de Strasbourg p 6, 7,8.
- Article « Électricité photovoltaïque – Principes » [7] Collection « physique des semi-conducteurs : Fondamentaux » Noël SERVAGENT - Ecole des Mines de Nantes, 2007
- [8] BELGHITRI HOUDA Mémoire de Magister « Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride eolien-photovoltaïque », 2010.
- [9] Angel Cid Pastor « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques ». Thèse de Docteur. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006.
- [10] Revue scientifique, toutes l'information sur le photovoltaïque, p7, du 23 Aout 2012
- [11] Journal VIPress « vers une production mondiale de panneaux photovoltaïque de 50 GW en 2014 ? » 28/10/2013.
- [12] La revue du palais de la découverte, n°344-345 janvier-février 2007, Daniel lincot, directeur de recherches au CNRS
- [13] Revue scientifique de ACLEN « Electricité solaire photovoltaïque », collection connaissance des énergies, p3 ,2013
- [14] Revue scientifique « les technologies photovoltaïque », collection solar Word P1-2, juin 2012

- [15] “Kho J. Thin-film solar set to take market share from crystalline solar PV » September 8, 2008
- [16] Mémoire « Impression des cellules solaires photovoltaïques » Elsa CORROYER et Sophie HUGUET, Mai 2009, université de Grenoble
- [17] MATHieu URIEN, cellules photovoltaïques organique à base copolymères à bloc de type rigide flexible, thèse de doctorat, l’université Bordeaux I, 2008
- [18] « panneau-solaire-souple.com » 15/05/2012
- [19] Quentin Mauguit, Futura-Sciences «développement durable, cellule solaire,CZTS, CIGS, terre rare, semi-conducteur module » 30/09/2013.
- [20] Les Dossiers Environnement de GAZACA «Les énergies renouvelables (partie II – L’énergie Solaire)», Mai 2006.
- [21] Zarour laid « Etude technique d’un système d’énergie Hybride photovoltaïque-eolien hors réseau » Doctorat en sciences en électrotechnique, université de Mentouri de Constantine ,2010
- [22] S.M. 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.
- [23] Thomas Ackermann, Wind power in power systems. Chichester, Angleterre : Wiley, 2005
- [24] [www.ncdc.noaa.gov](http://www.ncdc.noaa.gov)

## ANNEXE

### Les données obtenus par NASA

Applications ↑ Types de cellules sol... NASA Surface mete... DS3505 - Surface D...

USAF-WBAN_ID	STATION NAME	COUNTRY	STATE	LATITUDE	LONGITUDE	ELEVATION
605570	99999 NAAMA	ALGERIA		+33.267	-000.300	+1166.0

Identification							WIND				
USAF	NCDC	Date	HrMn	I	Type	QCP	Dir	Q	I	Spd	Q
605570	99999	20140101	0600	4	FM-12		999	9	C	0.0	1
605570	99999	20140101	0900	4	FM-12		999	9	C	0.0	1
605570	99999	20140101	1200	4	FM-12		260	1	N	3.1	1
605570	99999	20140101	1500	4	FM-12		999	9	C	0.0	1
605570	99999	20140101	1800	4	FM-12		999	9	C	0.0	1
605570	99999	20140102	0600	4	FM-12		999	9	C	0.0	1
605570	99999	20140102	0900	4	FM-12		999	9	C	0.0	1
605570	99999	20140102	1200	4	FM-12		999	9	C	0.0	1
605570	99999	20140102	1500	4	FM-12		300	1	N	2.1	1
605570	99999	20140102	1800	4	FM-12		300	1	N	2.1	1
605570	99999	20140103	0600	4	FM-12		999	9	C	0.0	1
605570	99999	20140103	0900	4	FM-12		999	9	C	0.0	1
605570	99999	20140103	1200	4	FM-12		999	9	C	0.0	1
605570	99999	20140103	1500	4	FM-12		280	1	N	2.1	1
605570	99999	20140103	1800	4	FM-12		999	9	C	0.0	1
605570	99999	20140104	0600	4	FM-12		999	9	C	0.0	1
605570	99999	20140104	0900	4	FM-12		240	1	N	2.1	1
605570	99999	20140104	1200	4	FM-12		280	1	N	2.1	1
605570	99999	20140104	1500	4	FM-12		320	1	N	3.1	1
605570	99999	20140104	1800	4	FM-12		999	9	C	0.0	1
605570	99999	20140105	0600	4	FM-12		260	1	N	2.1	1
605570	99999	20140105	0900	4	FM-12		280	1	N	4.1	1
605570	99999	20140105	1200	4	FM-12		280	1	N	5.1	1
605570	99999	20140105	1500	4	FM-12		300	1	N	5.1	1
605570	99999	20140105	1800	4	FM-12		999	9	C	0.0	1
605570	99999	20140106	0600	4	FM-12		999	9	C	0.0	1
605570	99999	20140106	0900	4	FM-12		999	9	C	0.0	1
605570	99999	20140106	1200	4	FM-12		240	1	N	1.0	1
605570	99999	20140106	1500	4	FM-12		270	1	N	4.1	1
605570	99999	20140106	1800	4	FM-12		320	1	N	2.1	1
605570	99999	20140107	0600	4	FM-12		999	9	C	0.0	1
605570	99999	20140107	0900	4	FM-12		999	9	C	0.0	1
605570	99999	20140107	1200	4	FM-12		180	1	N	5.1	1
605570	99999	20140107	1500	4	FM-12		180	1	N	5.1	1
605570	99999	20140107	1800	4	FM-12		170	1	N	3.1	1

USAF-WBAN_ID	STATION NAME	COUNTRY	STATE	LATITUDE	LONGITUDE
606200 99999	TOUAT CHEIKH SIDI MOHAMED BELK	ALGERIA		+27.838	-000.186

Identification							WIND				
USAF	NCDC	Date	HrMn	I	Type	QCP	Dir	Q	I	Spd	Q
606200	99999	20140101	0000	4	FM-15		020	1	N	4.1	1
606200	99999	20140101	0100	4	FM-15		010	1	N	3.6	1
606200	99999	20140101	0200	4	FM-15		010	1	N	4.1	1
606200	99999	20140101	0300	4	FM-15		020	1	N	4.6	1
606200	99999	20140101	0400	4	FM-15		010	1	N	4.1	1
606200	99999	20140101	0500	4	FM-15		010	1	N	3.6	1
606200	99999	20140101	0600	4	FM-15		010	1	N	4.6	1
606200	99999	20140101	0700	4	FM-15		010	1	N	4.6	1
606200	99999	20140101	0800	4	FM-15		020	1	N	4.6	1
606200	99999	20140101	0900	4	FM-15		080	1	N	7.7	1
606200	99999	20140101	1000	4	FM-15		010	1	N	7.2	1
606200	99999	20140101	1100	4	FM-15		030	1	N	7.2	1
606200	99999	20140101	1200	4	FM-15		030	1	N	8.2	1
606200	99999	20140101	1300	4	FM-15		030	1	N	8.2	1
606200	99999	20140101	1400	4	FM-15		030	1	N	8.8	1
606200	99999	20140101	1500	4	FM-15		020	1	N	8.8	1
606200	99999	20140101	1600	4	FM-15		040	1	N	9.3	1
606200	99999	20140101	1700	4	FM-15		040	1	N	7.7	1
606200	99999	20140101	1800	4	FM-15		030	1	N	5.1	1
606200	99999	20140101	1900	4	FM-15		360	1	N	6.2	1
606200	99999	20140101	2000	4	FM-15		010	1	N	6.7	1
606200	99999	20140101	2100	4	FM-15		010	1	N	8.2	1
606200	99999	20140101	2200	4	FM-15		010	1	N	9.3	1
606200	99999	20140101	2300	4	FM-15		020	1	N	8.2	1
606200	99999	20140102	0000	4	FM-15		030	1	N	5.7	1
606200	99999	20140102	0100	4	FM-15		030	1	N	5.7	1
606200	99999	20140102	0200	4	FM-15		030	1	N	5.7	1
606200	99999	20140102	0300	4	FM-15		030	1	N	6.2	1
606200	99999	20140102	0400	4	FM-15		050	1	N	6.7	1
606200	99999	20140102	0500	4	FM-15		050	1	N	6.7	1
606200	99999	20140102	0600	4	FM-15		010	1	N	6.2	1
606200	99999	20140102	0700	4	FM-15		030	1	N	4.1	1
606200	99999	20140102	0800	4	FM-15		010	1	N	4.6	1
606200	99999	20140102	0900	4	FM-15		360	1	N	6.7	1
606200	99999	20140102	1000	4	FM-15		030	1	N	6.2	1
606200	99999	20140102	1100	4	FM-15		030	1	N	6.7	1
606200	99999	20140102	1200	4	FM-15		030	1	N	5.7	1
606200	99999	20140102	1300	4	FM-15		030	1	N	6.2	1
606200	99999	20140102	1400	4	FM-15		030	1	N	7.7	1
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

## Le programme informatique Matlab:

```
1  function ioph=irr1(inc)
2
3  %abreviation:
4  %dec declinaison
5  %dj duré de jour
6  %h0m irradiation hors atmosphère
7  %kt indice de clarté
8  %hdm hiradiance diffus mensuel
9  %ind indice de la journée moyenne
10 %iglm irradiation globale horaire sur un plan horizontal
11 %idfm irradiation diffus horaire sur un plan horizontal
12 %idrm irradiation direct horaire sur un plan horizontal
13 %iincm irradiation globale horaire sur un plan incliné (/24h)
14 %lal laltitude
15 %long longitude
16 %ati atitude
17 %alb albédo
18 %inc incliné
19 %hm irradiation globale horizontale mensuelle
20 %iincm irradiation globale mensuelle sur un plan incliné
21
22 % [dec,dj,h0m,kt,hdm,ind,iglm,idfm,idrm,iincm]=irr1(inc)
23 - r=0;
24 - c=0;
25 % données géographique du site ADRAR
26 %lal=27.52;
27 %lon=-0.17;
28 %ati=279;
29 %hm=[3.75,4.74,5.93,6.88,7.26,7.7,7.63,7.07,6.13,4.46,3.81,3.32];
30 %alb=0.2;
31
32 % données géographique du site NAAMA
33 - lal=33.15;
34 - lon=-0.18;
35 - ati=891;
36 - alb=0.2;
37 - hm=[2.79,3.88,4.98,6.36,7.20,7.64,7.72,6.73,5.52,3.96,2.89,2.46];
38 %
```

```

39 -
40 - for n=1:365
41 -   dec(n)=23.45*sind((360/365)*(284+n));
42 -   ws(n)=acosd(-tand(lal)*tand(dec(n)));
43 -   dj(n)=2*ws(n)/15;
44 -   i=1;
45 -   tsv(n,1)=12-(dj(n)/2);
46 -   w(n,1)=15*(tsv(n,1)-12);
47 -   while tsv(n,i)<(12+(dj(n)/2))
48 -     i=i+1;
49 -     tsv(n,i)=12-(dj(n)/2)+(i-1);
50 -     w(n,i)=15*(tsv(n,i)-12);
51 -   end
52 -   hmaxj(n)=i;
53 -   %*sind(ws(n))+((pi*ws(n)/180)*sind(lal)*sind(dec(n)));
54 -
55 -   hs(12)=0;
56 -   wss(12)=0;
57 -   for m=1:12;
58 -     nj=0;
59 -     if (m==1)||(m==3)||(m==5)||(m==7)||(m==8)||(m==10)||(m==12)
60 -       c=0;
61 -     end
62 -     if (m==4)||(m==6)||(m==9)||(m==11)
63 -       c=1;
64 -     end
65 -     if m==2
66 -       c=3;
67 -     end
68 -     r=r+c;
69 -     for j=1+31*(m-1)-r:31*m-c-r
70 -       hs(m)=hs(m)+h0(j);
71 -       wss(m)=wss(m)+ws(j);
72 -       nj=nj+1;
73 -     end
74 -     h0m(m)=hs(m)/nj;
75 -     wsm(m)=wss(m)/nj;

```

```

77 -   kt(m)=hm(m)/h0m(m);
78 -   if wsm(m)<81.4
79 -     hdm(m)=hm(m)*(1.391-(3.560*kt(m))+4.189*(kt(m))^2-2.137*(kt(m))^3);
80 -   else
81 -     hdm(m)=hm(m)*(1.311-3.022*kt(m)+3.427*(kt(m))^2-1.821*(kt(m))^3);
82 -   end
83 - end
84 - % determination des journée moyenne
85 - r=0;
86 - c=0;
87 - ind(12)=0;
88 - for m=1:12;
89 -   nbj=0;
90 -   if (m==1)||(m==3)||(m==5)||(m==7)||(m==8)||(m==10)||(m==12)
91 -     c=0;
92 -   end
93 -   if (m==4)||(m==6)||(m==9)||(m==11)
94 -     c=1;
95 -   end
96 -   if m==2
97 -     c=3;
98 -   end
99 -   r=r+c;
100 -
101 - for j=1+31*(m-1)-r:31*m-c-r
102 -   nbj=nbj+1;
103 -   comp(nbj)=abs(h0(j)-h0m(m));
104 - end
105 -   mini=(min(comp));
106 -   nbj=0;
107 - for j=1+31*(m-1)-r:31*m-c-r
108 -   nbj=nbj+1;
109 -   if comp(nbj)==mini;
110 -     ind(m)=j;
111 -     %display(nbj);
112 -   end
113 - end
114 - end

```

```

115 %display(ind);
116 %calcul des valeurs horaires des différentes irradiation sur un plan
117 r=0;
118 c=0;
119
120 for m=1:12
121     aj(m)=0.409+0.5016*sind(ws(ind(m))-60);
122     bj(m)=0.6609-0.4767*sind(ws(ind(m))-60);
123     hmax(m)=hmaxj(ind(m));
124     for h=1:hmax(m)
125         rth(m,h)=pi/24*(aj(m)+bj(m)*cosd(w(ind(m),h)))*((cosd(w(ind(m),h))-cosd(ws(ind(m))))/(sind(ws(ind(m)))-(pi*ws(ind(m))/180)*cosd(ws(ind(m)))))
126         if rth(m,h)<0
127             rth(m,h)=0;
128         end
129         rdh(m,h)=pi/24*(cosd(w(ind(m),h))-cosd(ws(ind(m))))/(24*sind(ws(ind(m)))-(pi*ws(ind(m))/180)*cosd(ws(ind(m))));
130         if rdh(m,h)<0
131             rdh(m,h)=0;
132         end
133         rzh(m,h)=(cosd(lal-inc)*cosd(dec(ind(m))))*cosd(w(ind(m),h))+sind(lal-inc)*sind(dec(ind(m)))/(cosd(lal)*cosd(dec(ind(m))))*cosd(w(ind(m),h))
134         if rzh(m,h)<0
135             rzh(m,h)=0;
136         end
137         igl(m,h)=hm(m)*rth(m,h);
138         idf(m,h)=hdm(m)*rdh(m,h);
139         idr(m,h)=igl(m,h)-idf(m,h);
140         iinc(m,h)=(idr(m,h)*rzh(m,h))+(idf(m,h)*((1+cosd(inc))/2))+(igl(m,h)*alb*((1-cosd(inc))/2));
141     end
142 end
143
144 iinc=sum(iinc');
145 iglm=sum(igl');
146 idfm=sum(idf');
147 idrm=sum(idr');
148 %optimisation fixe
149 %minc=sum(iinc)/12;
150 %optimisation mensuelle
151 minc=iinc(12);

```

```

152 %optimisation angle horaire
153
154 - ioph=iinc(12,:);
155
156 %a copier dans command window
157
158 %inc=[1:90];
159 %for j=1:length(inc)
160 %ioph(j,:)=irrl(inc(j));
161 %end
162 %for i=1:15
163 %v5(i)=max(ioph(:,i));
164 %end
165 %re =sum(v5);
166 %for x=1:15
167 %     for y=1:90
168 %         if ioph(y,x)==v5(x)
169 %             ang(x)=y;
170 %         end
171 %     end
172 %end
173
174 - end

```