



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



Université Amar Thelidji- Laghouat

**FACULTE : Technologies**

**DEPARTEMENT : Electrotechnique**

**MEMOIRE DE MASTER**

**Présenté par :**

**KAOUKA Houssame**

**MECHRAOUI Ahmed Dhia**

**DOMAINE : Sciences et Technologies.**

**FILIERE : Electrotechnique.**

**OPTION : Energies renouvelables en électrotechnique.**

**Thème**

**Etude Techno-Economique d'une centrale hybride  
PV/Eolien à la région de EL KHNEG**

**Jury de soutenance :**

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>qualité</b>
<b>HAMDI Abd El Wahab</b>	<b>MAA</b>	<b>Président</b>
<b>BIRANE Mouhoub</b>	<b>MCA</b>	<b>Examineur</b>
<b>BOUCHIBA Oum El Kheir</b>	<b>MCB</b>	<b>Encadreur</b>
<b>CHETTIH Saliha</b>	<b>Professeur</b>	<b>Co -Encadreur</b>

**Promotion : 2021/2022**

## *Dédicace*

*Je dédie ce mémoire A mes chers  
parents pour leur amour inestimable,  
leur confiance, leur soutien, leurs  
sacrifices et toutes les valeurs qu'ils  
ont su m'inculquer. A toute ma  
famille. A Mohammed Betaimi pour  
son aide et son soutien, mes amis et  
tous ceux que j'aime. À Toute la  
promotion d'Energies renouvelables  
2022*

*Kaouka Houssame Eddine*

## إهداء

أهدي هذا العمل إلى روح الغائبين جسدا الحاضرين  
روحا

جدي رحمة الله عليه

أخي فوضيل طيب الله ثراه

إلى نبراس حياتي أمي إلى سندي وقدوتي أبي، إلى  
من ساندني طوال الطريق

إلى دلال إسراء بوضلة

إلى إخوتي (عبد الحق، أيمن، رياض يوسف) إلى  
زهرة بيتنا أختي فاطمة عواطف

إلى الأستاذة المشرفة أم الخير بوشيبة التي لم تدخر  
جهدا ولم تمنعها الظروف القاهرة أن تواصل العطاء

إلى كل العائلة والرفاق إلى من كان خير عون لتمام  
هذا العمل محمد بطيمي ومحمد إبراهيم وحسام قوقة

(المجهد)

إلى الدفعة الرائعة وكل أستاذ أشرف عليها سعيد

بأن أضع هذا العمل سائلا المولى القبول

## **Remerciements**

*Avant tout, nous remercions notre DIEU le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'études et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.*

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadrante, Mme **O. BOUCHIBA**, pour ses encouragements et son suivi constants, ainsi que sa rigueur et ses précieux conseils. Sans sa perspicacité et son soutien, ce travail aurait été impossible à mener à bien. Ses connaissances et son expérience resteront une source constante d'apprentissage pour nous.*

*Nous lui devons notre gratitude, c'est avec beaucoup de plaisir que j'exprime ici ma profonde gratitude à Mme **CHETTIH SALIHA** (Professeur), mon co-encadreur de thèse, pour son encadrement et soutien, sa patience, sa disponibilité et la confiance qu'elle m'a témoignée.*

*Je remercie également les membres du jury Qui ont accepté d'examiner et d'estimer ce travail.*

*Nous remercions au Département de technologies de l'université Amar Telidji de Laghouat et à tous les enseignants pendant les années de cours.*

*Nous tenons également à exprimer notre plus profonde gratitude à nos familles pour leur formidable soutien moral et leur encouragement au fil des ans.*

*De nombreuses personnes nous ont aidés et encouragés lors de la préparation de cette lettre. Qu'ils soient tous chaleureusement remerciés.*

*Enfin, nos remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet de fin d'études.*

## Liste des symboles et abréviation

A1	la largeur de la structure du générateur photovoltaïque
A <sub>mod</sub>	la surface de module
A <sub>tot/mod</sub>	la surface totale des modules
A <sub>tot /sou- champ</sub>	la surface totale inclinée d'un sous-champ
A <sub>tot/centrale</sub>	La surface totale optimale de la centrale
C	Facteur d'échelle de Weibull [m/s]
D	le diamètre du rotor de la machine ;
H	La hauteur du pylône
E <sub>dis /A</sub>	la densité d'énergie disponible annuelle en [kWh/m <sup>2</sup> /an]
E <sub>rec-max /A</sub>	la densité d'énergie récupérable annuelle en [kWh/m <sup>2</sup> /an]
f(v)	la densité de probabilité de présence de la vitesse du vent
I	la dimension du terrain parallèlement à la direction prédominante du vent
k	Facteur de forme de Weibull
L1	la longueur de la structure du générateur photovoltaïque
L	la dimension du terrain parallèlement à la direction prédominante du vent
N <sub>t</sub>	nombre des panneaux ou modules
N1	le nombre d'aérogénérateurs par rangée
N2	le nombre de rangée d'aérogénérateurs
N	le nombre total d'aérogénérateurs à placer sur le site
P <sub>c</sub>	la puissance crête du sous-champ
P <sub>n</sub>	puissance nominale du module PV
P <sub>dis /A</sub>	la densité de puissance disponible en [W/m <sup>2</sup> ]
R <sub>s</sub>	la résistance série
R <sub>p</sub>	la résistance parallèle,
V (str)	La tension de sortie de la structure
V (mod)	La tension nominale du module
V(z)	la vitesse en m/s à calculer a la hauteur z
V (Z R)	la vitesse connue à l'altitude de référence en m/s
W1	la longueur de la projection de A1
Z	L'altitude en m à laquelle on désire calculer la vitesse du vent
ZR	L'altitude de référence en m

$z_0$	la rugosité en m
$\alpha$	la hauteur solaire minimum (généralement prise le 21 décembre ( $n_j=355$ ) soit un angle de $32.74^\circ$ )
$Com(p)$	la valeur actualisée des coûts d'exploitation et de maintenance
$E_W$	représente l'énergie totale générée par l'éolienne pendant toute sa durée de vie
IC	le coût d'investissement initial.
$C_{ele}$	le coût d'investissement, d'exploitation et d'entretien de l'électrolyseur
$C_w$	coût énergétique d'éolien (\$)
$M_{H_2}$	la masse annuelle d'hydrogène (Kg/an).
T	la durée de vie du projet et est fixé à 20 ans
$\eta_{el}$	L'efficacité de l'électrolyseur
$E_{gwt}$	L'énergie annuelle produite.
$LHV_{H_2}$	Le faible pouvoir calorifique d'hydrogène.
$C_{ele,u}$	le coût unitaire de l'électrolyseur (\$/kW).
$K_{el,th}$	l'énergie spécifique théorique requise par l'électrolyseur.

## Liste des figures

Figure I.1 : Les composants du rayonnement solaire.....	3
Figure I.2 : Carte d'Algérie de l'ensoleillement moyen annuel.....	4
Figure I.3 : Dunes souvent rencontrées dans le Sahara Algérien.....	5
Figure I.4 : Indicateurs écologiques.....	6
Figure I.5 : Ensemble d'un anémomètre et girouette.....	6
Figure I.6 : Rose du vent.....	7
Figure I.7 : Conversion d'énergie solaire en photovoltaïque.....	8
Figure I.8 : Cellule photovoltaïque.....	9
Figure I.9 : Générateur photovoltaïque.....	10
Figure I.10 : Circuit électrique équivalent d'une cellule PV model à une diode.....	10
Figure I.11 : Caractéristique $I=f(V)$ .....	11
Figure I.12 : Comportement des caractéristiques $I_{pv}$ ( $V_{pv}$ ) et $P_{pv}(V_{pv})$ sous l'influence de l'éclairement et la température.....	12
Figure I.13 : Cellules ou modules photovoltaïques en série.....	13
Figure I.14 : Cellules ou modules photovoltaïques en parallèle.....	13
Figure I.15 : Type de cellules photovoltaïques.....	14
Figure I.16 Principaux organes du système de conversion éolien.....	16
Figure I.17 : Aérogénérateur de Type Darrieus.....	17
Figure I.18 : Aérogénérateur Type Savonius.....	17
Figure I.19 : Eolienne à axe horizontale.....	17
Figure I.20: Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.....	18
Figure I.21 : système hybride a bus DC.....	20
Figure I.22 : système hybride à bus AC.....	20
Figure I.23 : Schémas de principe de différentes topologies d'installations PV connectés à un réseau électrique.....	22
Figure I.24 : Structure de conversion multi-string mixte.....	23
Figure I.25 : Principe de fonctionnement d'une pile à combustible.....	25
Figure II.1 : Schéma bloc d'une ligne de production PV.....	35
Figure II.2 : La variation journalier de l'irradiation solaire (22 et 28/03/2020).....	36
Figure II.3 : La variation mensuelle de l'irradiation solaire.....	36

Figure II.4 : trajectoire du soleil.....	37
Figure II.5: Schéma block de la chaine de production du sous-PV au Réseau.....	38
Figure (III.1) : Plan de situation de la centrale.....	41
Figure (III.2) : La distribution annuelle de Weibull.....	42
Figure (III.3) : Distribution de Weibull a déférente hauteur.....	43
Figure (III.4) : Courbes de puissance des éoliennes choisies.....	44
Figure (III.5) : la production annuelle et le facteur de capacité de chaque éolienne...	46
Figure (III.6): la production annuelle et le facteur de capacité de chaque centrale....	46
Figure (III.7): Désignation du projet dan PVSYST.....	53
Figure(III.8): Schéma synoptique du projet.....	54
Figure(III.9): Caractéristiques du module choisi selon la variation G et T.....	54
Figure (III.10) Variation journalière de l'irradiation.....	55
Figure (III.11) : Evaluation du dimensionnement.....	56
Figure (III.12): Énergie utile produite par le sous-champ PV (à la sortie de l'onduleur).....	57
Figure (III.13) : Indice de performance du sous-champ.....	58
Figure (III.14) : Configuration de la centrale PV à simuler.....	58
Figure (III.15) : les pertes de la centrale.....	59
Figure (III.16) : Interface principale de logiciel.....	60
Figure (III.17) : Interface du dimensionnement de la centrale éolienne.....	61
Figure III.18 : Interface du système de stockage PAC.....	61

## Liste des tableaux

Tableau I-1 : Comparatif pour quelque technologie.....	14
Tableau I.2 : Les différents types de piles à combustibles.....	25
Tableau III.1 : coordonnées géographiques du site El KHNEG.....	41
Tableau (III.2) : les paramètres du vent de la région (à 10m).....	42
Tableau (III.3) : les paramètres du site à déférente hauteurs.....	43
Tableau (III.4) Données techniques des différentes éoliennes commerciales utilisées.....	44
Tableau (III.5) : les paramètres du site pour les éoliennes choisies.....	45
Tableau (III.6) : Production annuelle, capacité facteur, et taux de fonctionnement de chaque éolienne.....	47
Tableau (III.7) : dimensions optimales de terrain d'implémentation.....	47
Tableau (III.8) : Gamme de coût spécifique des éoliennes en fonction de la puissance nominale.....	48
Tableau (III.9) : Analyse des coûts pour une centrale éolienne de 30 MW installée à l'aide de différents modèles d'éoliennes (\$/kWh).....	48
Tableau (III. 10) : Analyse des coûts pour une centrale éolienne de 30 MW installée à l'aide de différents modèles d'éoliennes (\$/kWh).....	49
Tableau (III.11) : Analyse des coûts pour le système de stockage.....	50
Tableau (III.12) : les caractéristiques techniques du module choisi.....	50
Tableau (III.13) : résultats de dimensionnement de sous champ de 500Kw.....	51
Tableau (III.14) : résultats d'implémentation du sous champ [m <sup>2</sup> ].....	51
Tableau (III.15) : Caractéristiques de l'onduleur.....	52
Tableau (III.16) : Caractéristiques électriques à la sortie du sous-champ PV.....	52
Tableau (III.17) : Variation mensuelle de l'irradiation solaire.....	55
Tableau (III.18) : Bilans et résultats principaux .....	57
Tableau III.19 : Coût global de l'installation photovoltaïque.....	60
Tableau III.20 : Les besoins énergétiques de la centrale	61
Tableau III.21 : Les résultats obtenus par logiciels	62
Tableau III.22 : Coût global de la centrale hybride.....	62
Tableau III.23 : Cout global de cas étudie.....	63

# Sommaire

Dédicace	i
Remerciement	iii
Liste des abréviations	iv
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	viii
Table des matières	ix
Introduction générale	1
<b>Chapitre 1 : Généralités sur les énergies renouvelables (Photovoltaïques éoliennes)</b>	
I.1. Introduction.....	2
I.2. Gisement énergétique.....	2
I.2.1. Gisement solaire.....	2
I.2.1.1. Rayonnement solaire.....	2
I.2.1.2. Gisement solaire au Algérie.....	3
I.2.2. Gisement éolienne.....	4
I.2.2.1. Origine de vent.....	4
I.3. Système de conversion photovoltaïque.....	7
I.3.1. Effet photovoltaïque.....	7
I.3.2. Cellule photovoltaïque.....	8
I.3.3. Générateur photovoltaïque.....	9
I.3.4. Modèle électrique d'une cellule PV.....	10
I.3.4.1. Caractéristique de la cellule photovoltaïque.....	10
I.3.4.2. Influence de l'éclairement et la température.....	11
I.3.5. Association des cellules photovoltaïques.....	12
I.3.5.1 Association en série.....	12
I.3.5.2 Association en parallèle.....	13
I.3.6. Type de cellules photovoltaïques.....	13
I.3.7. Installation photovoltaïque.....	15
I.3.7.1. Système connecté au réseau.....	15
I.3.7.3. Système hybride.....	15
I.4. Système de conversion éolien.....	15
I.4.1. Types des éoliennes.....	16
I.4.1.1. Eolienne à axe verticale.....	16

I.4.1.2. Eolienne à axe horizontale.....	17
I.4.2. Principe de fonctionnement du SCE.....	18
I.4.3. Installations éoliennes.....	18
I.4.3.1 Installation autonome.....	18
I.4.3.2 Installation connectée au réseau.....	18
I.4.3.3. Installation hybride.....	19
I.5. Architectures des systèmes hybrides PV/éolien.....	19
I.6. Intégration des systèmes (PV et Eolien) aux réseaux.....	21
I. 6.1 Intégration des systèmes photovoltaïque aux réseaux.....	21
I.6.1.1 Configurations des systèmes PV connectée aux réseaux.....	21
I.6.2. Intégration des systèmes éoliens aux réseaux.....	23
I.7. Stockage avec pile à combustible.....	24
I.7.1. Principe de fonctionnement.....	24
I.7.2. Les différents types de piles à combustibles.....	25
I.7.2.1. Avantages des piles à combustibles.....	26
I.7.2.2 Inconvénients des piles à combustibles.....	26
I.8. Conclusion.....	26

## **Chapitre II Modélisation d'une central hybride PV-Eolien**

II.1. Introduction.....	27
II.2. Modélisation d'une chaîne de conversion éolienne.....	27
II.2.1. Modélisation du vent.....	27
II.2.2. Variabilité temporelle du vent.....	27
II.2.2.1. Distribution de Weibull.....	27
II.2.2.2. Distribution hybride Weibull.....	27
II.2.2.3. Distribution de Rayleigh.....	28
II.2.3. Paramètres du vent.....	28
II.2.3.1. Vitesse moyenne.....	28
II.2.3.2. Vitesse du vent transportant le maximum d'énergie.....	29
II.2.3.3. Vitesse la plus fréquente.....	29
II.2.3.4. Vitesse cubique moyenne.....	29
II.3. Variabilité spatiale du vent.....	29

II.3.1. Loi cisaillement du vent.....	29
II.3.2. Extrapolation verticale des paramètres de Weibull.....	29
II.4. Modélisation de potentiel énergétique éolien.....	30
II.4.1 Densité de puissance disponible.....	30
II.4.2. Densité d'énergie annuelle récupérable maximale.....	30
II.4.3. Productivité éolienne (WPP).....	30
II.4.4. Évaluation des performances des éoliennes.....	30
II.4.5. Facteur de capacité.....	31
II.4.6. Taux de fonctionnement.....	31
II.5. Implémentation de la centrale.....	31
II.5.1. Condition de l'installation.....	31
II.6. Etude économique.....	32
II.6.1. La valeur actuelle des couts.....	32
II.6.2 Coût actualisé de l'énergie.....	33
II.6.3. Etude économique du système de stockage.....	33
II.6.3.1. Coût de la production d'hydrogène.....	33
II.6.3.2. Masse d'hydrogène.....	33
II.6.3.3. Coût de l'électrolyse.....	34
II.7. Dimensionnement de la centrale photovoltaïque.....	34
II.7.1. Potentiel énergétique solaire.....	35
II.7.2. Dimensionnement du sous-champ de 500kW.....	37
II.7.2.1. Nombres de module nécessaire.....	38
II.7.2.2. Nombre de structure.....	39
II.7.4 Dimensionnement des éléments de conversion d'énergie.....	40
II.7.5 Etude de la rentabilité de la centrale.....	40
II.7.6 Les années de rentabilité.....	40
II.8. Conclusion.....	40
<b>Chapitre III Etude et dimensionnement de la centrale hybride PV/EOLIENNE</b>	
III.1 Introduction.....	41
III.2 Etude de la centrale éolienne.....	41
III.2.1 Présentation du site.....	41
III.2.2 Résultats de la simulation.....	42

III.2.3 Adaptation et choix des aérogénérateurs.....	43
III.2.4 Analyse des coûts énergétiques.....	47
III.2.5 Analyse des coûts énergétiques du système de stockage.....	49
III.3. Etude de la centrale photovoltaïque.....	50
III.3.1 Implémentation du sous-champ.....	51
III.3.2 Dimensionnement des éléments de conversion d'énergie.....	52
III.3.3 Simulation de la centrale PV raccordé au réseau.....	52
III.3.4 Présentation de logiciel de simulation PVSYST.....	52
III.3.5 Gestion du projet.....	53
III.3.6 Paramètres de la simulation.....	54
III.3.7 Résultats de simulation.....	56
III.3.8 Simulation de la centrale PV connectée au réseau.....	58
III.3.9 Analyse des coûts énergétiques de la centrale photovoltaïque.....	60
III.3.10 Dimensionnement de la consommation locale de la centrale hybride.....	60
III.3.10.1. Résultats obtenue par logiciel.....	62
III.3.11. Analyse des coûts énergétiques de la centrale hybride.....	62
III.3.12 Les sommes économisé pendant la durée de vie.....	63
III.4. Conclusion.....	64

# **Introduction générale**

### **Introduction générale**

La vie humaine demande beaucoup d'utilisation d'énergie pour se préserver dans le temps. En premier lieu a été l'utilisation des sources fossiles (Charbon, pétrole, gaz), qui sont des sources épuisables. Puis vue les besoins intensifs de l'énergie ; l'évolution des sciences physiques sur les matériaux. Le remède remplaçant les sources fossiles et fissiles, c'est bien les sources des énergies renouvelables pour protéger et préserver la vie humaine. Les sources des énergies renouvelables sont majoritairement : (le soleil, le vent, la géothermie, la biomasse,..) , mais les sources les plus réponsus et exploiter dans le monde sont le soleil et le vent est pour en profiter de ces deux sources d'énergie ,la science et technologie ont développées les capteurs pour la conversion de ces énergie de l'irradiation solaire à l'énergie électrique , et la conversion de l'énergie cinétique du vent disponible à l'énergie électrique comme des énergies utiles. Ces convertisseurs sont les cellules solaires (panneaux solaires) et aérogénérateur (éoliennes) leur facteur commun c'est la fourniture de l'électricité. La production d'électricité au moyen d'un système hybride combinant plusieurs sources d'énergie renouvelable est d'un grand intérêt pour les pays en développement comme les pays de Algérie ces pays possèdent de nombreuses régions isolées et éloignées des réseaux classique de distribution d'électricité ainsi l'extension de ces réseaux serait d'un cout financier exorbitant. Pour résoudre ce problème l'exploitation du potentiel en énergies renouvelables dont dispose ces pays doit être une priorité. L'objectif de notre travail est l'hybridation d'un système PV de 60 MW avec un système éolien de 30 MW et stocké par des piles à combustible pour assurer les besoins électriques de la station.

L'intégration des systèmes des énergies renouvelables aux réseaux électriques ne peut être réalisée que par l'hybridation des sources des énergies ENR présentes et suffisantes autour du site lieu pour consolider les besoins en énergie électrique. L'hybridation se fait après la conversion du système ENR en énergie électrique soit un bus commun DC ou bus commun AC.

Le premier chapitre expose une généralité sur les énergies renouvelables (photovoltaïques/éoliennes) ensuite la modélisation de la centrale hybride et du système de stockage est le sujet du deuxième chapitre. Les études et les dimensionnent de la centrale PV de 60MWet de la centrale éolienne de 30MW avec un système de stockage pour assurer l'autonomie pour la consommation locale suivi par une étude économique et une simulation avec le programme PVsyst est le but du troisième chapitre. Enfin on termine par une conclusion, où les principaux résultats obtenus sont mentionnés.

**CHAPITRE I**  
**Généralités sur les énergies**  
**renouvelables**

### **I.1 Introduction**

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie des photons, intégrés dans le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en énergie électrique. Pour ce faire, elle utilise des modules photovoltaïques constitués de cellules photovoltaïques ou de cellules constituées de matériaux sensibles aux longueurs d'onde visibles qui effectuent cette transformation d'énergie, d'autre part, une éolienne est une installation qui convertit l'énergie éolienne en énergie électrique. , donc la puissance maximale émise dépend non seulement de la machine mais aussi de la limite de vitesse du vent. D'autre part, ils convertissent l'énergie éolienne en énergie mécanique. L'électricité produite par les éoliennes est utilisée dans les circuits de charge des batteries, les systèmes de production d'électricité résidentiels, les systèmes de production distribués et les grands réseaux de services publics. Les différents composants de l'éolienne sont conçus pour maximiser cette conversion d'énergie. Le système hybride pour les énergies renouvelables comprend au moins deux sources d'énergie différentes, des équipements pour adapter ces énergies, des dispositifs de contrôle et des systèmes de stockage de pile à combustible, notamment ceux qui dépendent de l'hydrogène vert. Ces systèmes d'alimentation hybrides sont de plus en plus populaires dans leurs applications pour produire de l'électricité dans des régions éloignées grâce aux avancées des technologies dédiées aux énergies renouvelables, sans compter l'augmentation significative des prix des produits pétroliers.

### **I.2 Gisement énergétique**

#### **I.2.1 Le gisement solaire**

Le gisement solaire est l'ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire en un lieu donné et au cours d'une période donnée. Son étude représente le point de départ de toute investigation dans le domaine de l'énergie solaire. Elle est utilisée pour simuler le dimensionnement et l'optimisation des systèmes utilisant l'énergie solaire tenue des demandes en énergie à satisfaire. La connaissance du potentiel énergétique solaire en un site donné est un paramètre important pour les concepteurs des systèmes de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

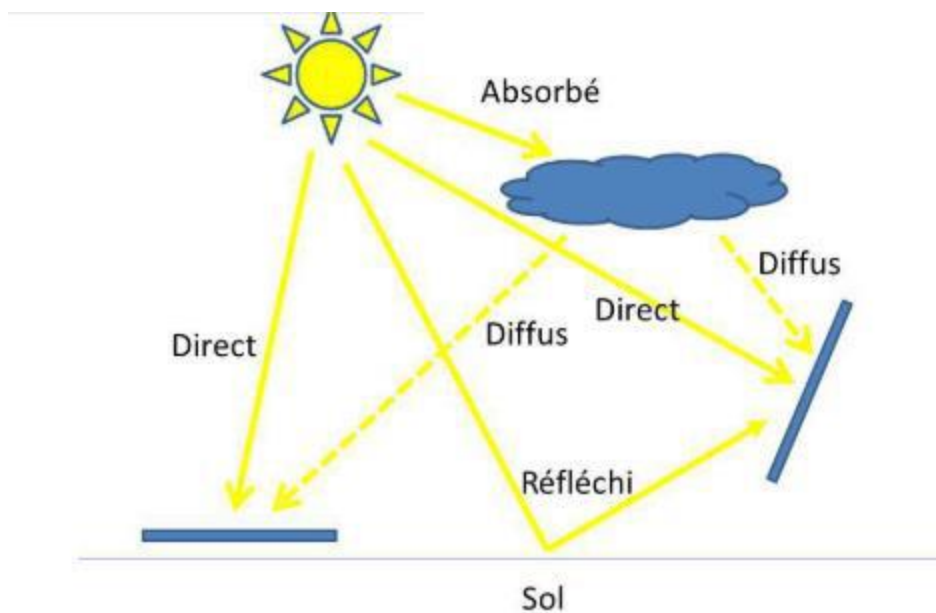
Les heures du lever et du coucher ainsi que la trajectoire du soleil dans le ciel au cours d'une journée permettent d'évaluer certaines grandeurs telles que la durée maximale d'insolation, l'irradiation globale. [1]

##### **I.2.1.1 Rayonnement solaire**

L'énergie reçue au niveau du sol est plus faible que  $1354 \text{ w/m}^2$  (la constante solaire) car l'atmosphère absorbe une partie du rayonnement solaire (environ 15%) et la réémet dans toutes les directions sous forme de rayonnement diffus. L'atmosphère réfléchit une autre partie du

rayonnement solaire vers l'espace (environ 6%). Le rayonnement global au niveau du sol se définit donc comme la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus figure (1) L'énergie reçue par une surface dépend en outre de la saison, de la latitude, des conditions météorologiques, du relief, de la pollution, de l'orientation de la surface considérée, etc. [1]

- **Rayonnement direct** : Le rayonnement direct est la lumière parvenant directement du soleil par ciel clair.
- **Rayonnement diffus** : Le rayonnement diffus est le rayonnement émis par des obstacles (nuages, sol, bâtiments) et provient de toutes les directions. La part du rayonnement diffus n'est pas négligeable et peut atteindre 50% du rayonnement global (selon la situation géographique du lieu).
- **Rayonnement global** : Le rayonnement global est la somme des rayonnements diffus et direct. Le rayonnement global sur la terre et sa part de rayonnement diffus varie au cours de l'année.



*Figure I.1 : Les composants du rayonnement solaire*

### **I.2.1.1 Gisement solaire au Algérie**

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire. [2]

De par sa situation géographique, l'algerie dispose d'un gisement solaire considérable d'une capacité de 20 000 MW, avec plus de 3 000 h/an d'ensoleillement et d'un potentiel moyen 5.5kWh/m<sup>2</sup>/jour comme le montre la figure (I.2) :

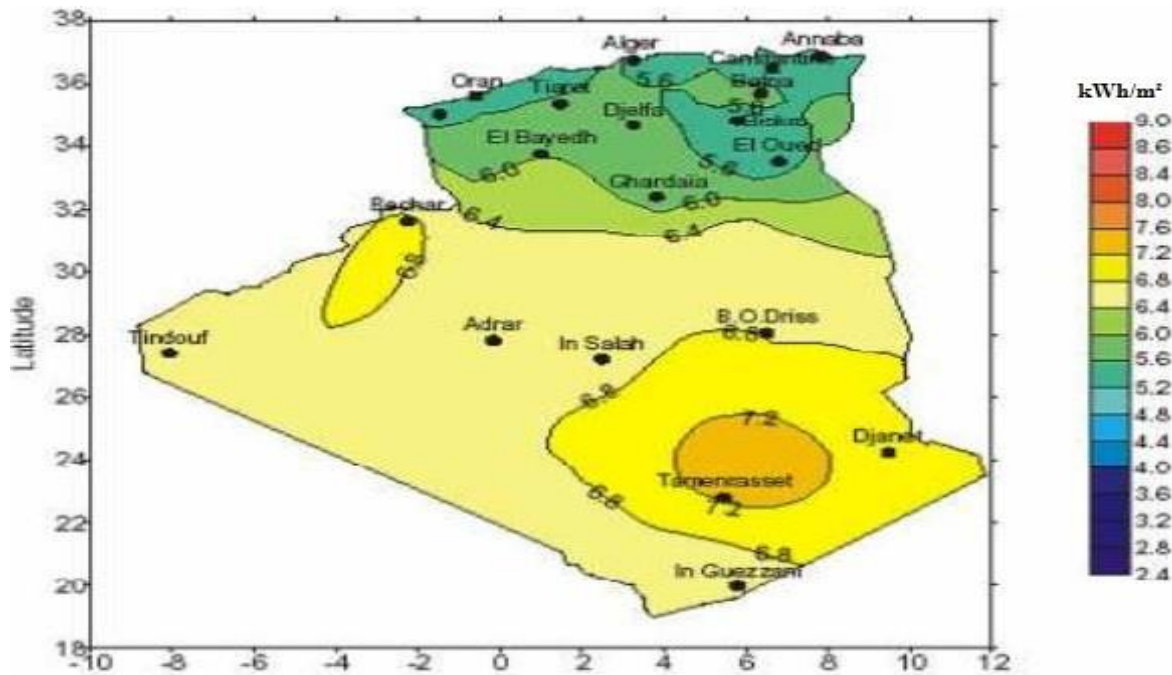


Figure I.2 : Carte d'Algérie de l'enseillent moyen annuel

### I.2.2. Gisement éolienne

Le vent correspond au déplacement d'une masse d'air consécutif à des différences locales de température et de pression. D'une légère brise à une forte tempête, la vitesse et l'amplitude géographique des vents peuvent être très variables dans l'espace et dans le temps. Parfois destructeur, le vent participe à de nombreux processus sur Terre, comme l'oxygénation des océans et des rivières, ou l'érosion des sols et le déplacement de minéraux. L'Homme l'utilise aujourd'hui comme source d'énergie éolienne. Le vent fait également office d'énergie renouvelable et devient de plus en plus prisé afin de compenser les énergies fossiles, accusées de contribuer au réchauffement climatique, ou le nucléaire, du fait des potentiels dangers que cette source énergétique représente

#### I.2.2.1 L'origine du vent :

Deux paramètres principaux contribuent à la formation des vents à la surface de la Terre : la température et la pression. Par exemple, lorsqu'une masse d'air se réchauffe, elle s'élève en altitude au-dessus des couches plus froides, ce qui génère une diminution de la pression. Pour combler le vide, la masse d'air voisine va s'engouffrer dans l'espace laissé vacant : ce mouvement crée le vent.

Un exemple concret : celui de la brise de mer et la brise de terre. Le jour, la terre se réchauffe plus vite que la mer. L'air au-dessus de la terre s'élève et crée une dépression, compensée par l'air surplombant la mer, générant ainsi une brise qui circule de la mer vers le continent. À l'inverse, la

nuit, l'eau conserve mieux sa chaleur et l'air de la terre se refroidit plus vite. Cette différence thermique génère un courant d'air de la terre vers la mer : une brise de terre.

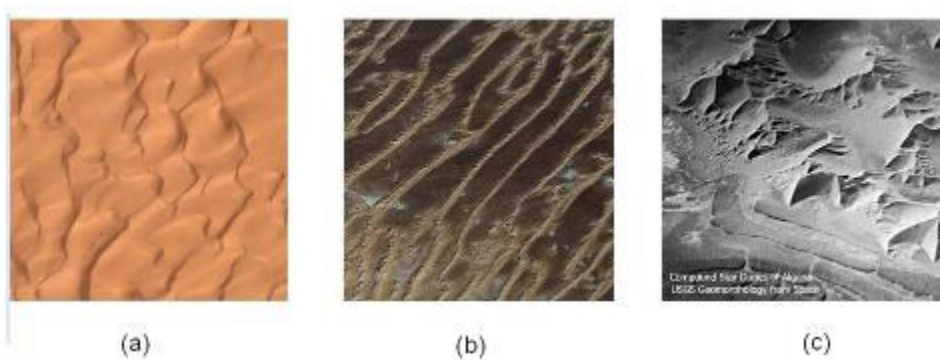
La rotation de la Terre sur elle-même contribue également à la formation des vents, à leur localisation et à leur orientation, par la force de Coriolis. À cela, il faut également rajouter la topographie des continents qui peut favoriser les rencontres entre les masses d'air.[3]

➤ **Mesure du vent**

La vitesse du vent se mesure à l'aide d'un anémomètre. Des échelles ont été établies afin d'estimer l'intensité des vents. L'échelle de Beaufort s'étale de 0 à 12. Elle repose sur la vitesse moyenne des vents sur une durée de 10 minutes, utilisée en association avec l'état de la mer qui en découle. Au niveau 0, le vent est nul, tandis qu'au niveau 12, les vents d'un ouragan soufflent à plus de 118 km/h, générant une mer déchaînée.[3]

- **Indicateurs écologiques**

Les indicateurs écologiques peuvent être utilisés afin de déterminer l'intensité du vent dominant dans une région. Les dunes de sable présentent un exemple pour la formation éolienne. Les particules de sable soulevées et transportées par l'écoulement du vent, sont déposées lorsque la vitesse du vent est plus faible. [4]



**Figure I.3 : Dunes souvent rencontrées dans le Sahara Algérien.**

**(a) Type Barkhane, (b) Type Sif, (c) Type étoile. [4]**

Dans les sites côtiers et montagneux, les arbres peuvent aussi être utilisés tant qu'indicateurs écologiques. On note que les arbres situés dans la région de Chiffa endurent une inclinaison plus une déformation due à l'effet tunnel. [4]



**Figure I.4 : Indicateurs écologiques.**

**(a)Photo du barrage vert près de Djelfa, (b) Photo des arbres près de Chiffa.**

**- Anémomètre et girouette**

L'anémomètre est un instrument qui nous indique la vitesse du vent. L'anémomètre est composé de plusieurs demi-sphères vides orientées dans le même sens (deux trois ou même quatre demi-sphères) qui tournent librement autour d'un axe. Dans les anémomètres modernes, un système électronique permet alors de calculer le nombre de tours effectués dans le temps. La vitesse du vent apparaît alors sur un petit écran. La girouette est un instrument qui nous indique l'origine du vent (c.-à-d. l'orientation du vent). [4]



**Figure I.5 : Ensemble d'un anémomètre et girouette.**

**- La rose des vents**

La rose des vents est construite à partir des observations météorologiques faites dans une région sur une ou plusieurs années. Lors de la localisation d'un site éolien, la rose des vents nous donne une idée sur la direction des vents dominants. Elle est construite pour avoir une idée de la distribution des vitesses et des directions du vent. La rose des vents que nous voyons sur la figure (I.6) est composée de huit secteurs, N, NE, E, SE, S, SO, O, NO. Lors de la localisation d'un site éolien, la rose des vents nous donne une idée sur la direction des vents dominants. [4]

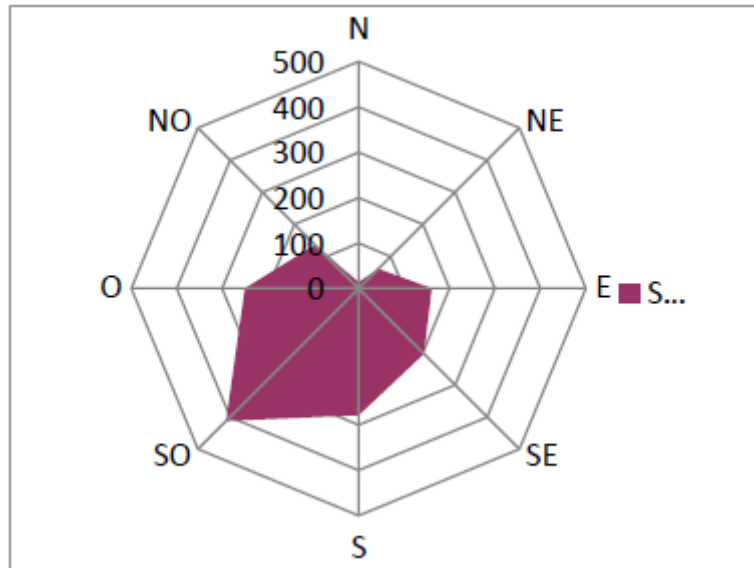


Figure I.6 : Rose du vent

### I.3. Système de conversion photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant de photons, compris dans le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en énergie électrique. Elle utilise pour ce faire des modules photovoltaïques composés de cellules ou de photopiles fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible qui réalisent cette transformation d'énergie. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (PV) qui a une caractéristique statique courant-tension  $I(V)$  non linéaire et présentant un point de puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble. [5]

#### I.3.1 L'effet photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancées sur le plan technologiques et industriel, en effet le silicium est l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique. En effet le mot " photovoltaïque " vient du grec " photo " qui signifie lumière et de " voltaïque " qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754 -1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, alors le photovoltaïque signifie littérairement la lumière électricité [6].

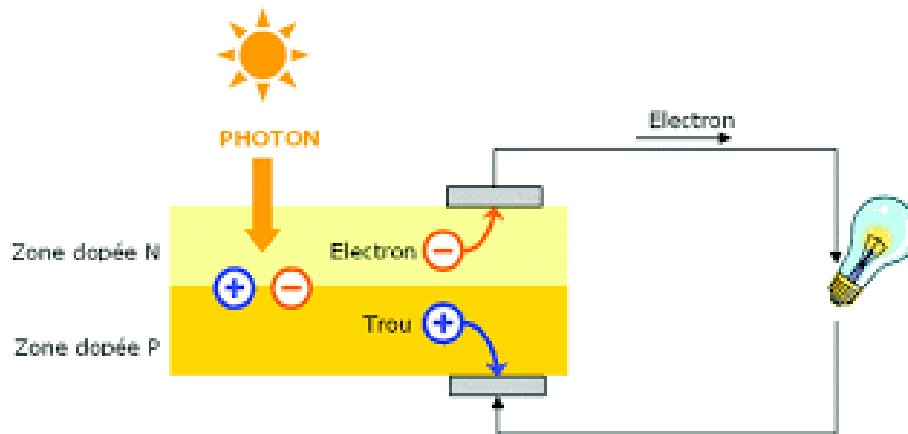


Figure I.7 : Conversion d'énergie solaire en photovoltaïque

### I.3.2 Cellule photovoltaïque

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

Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches de semi-conducteur (figure I.8). L'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons lumineux. Une couche antireflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbée [7].

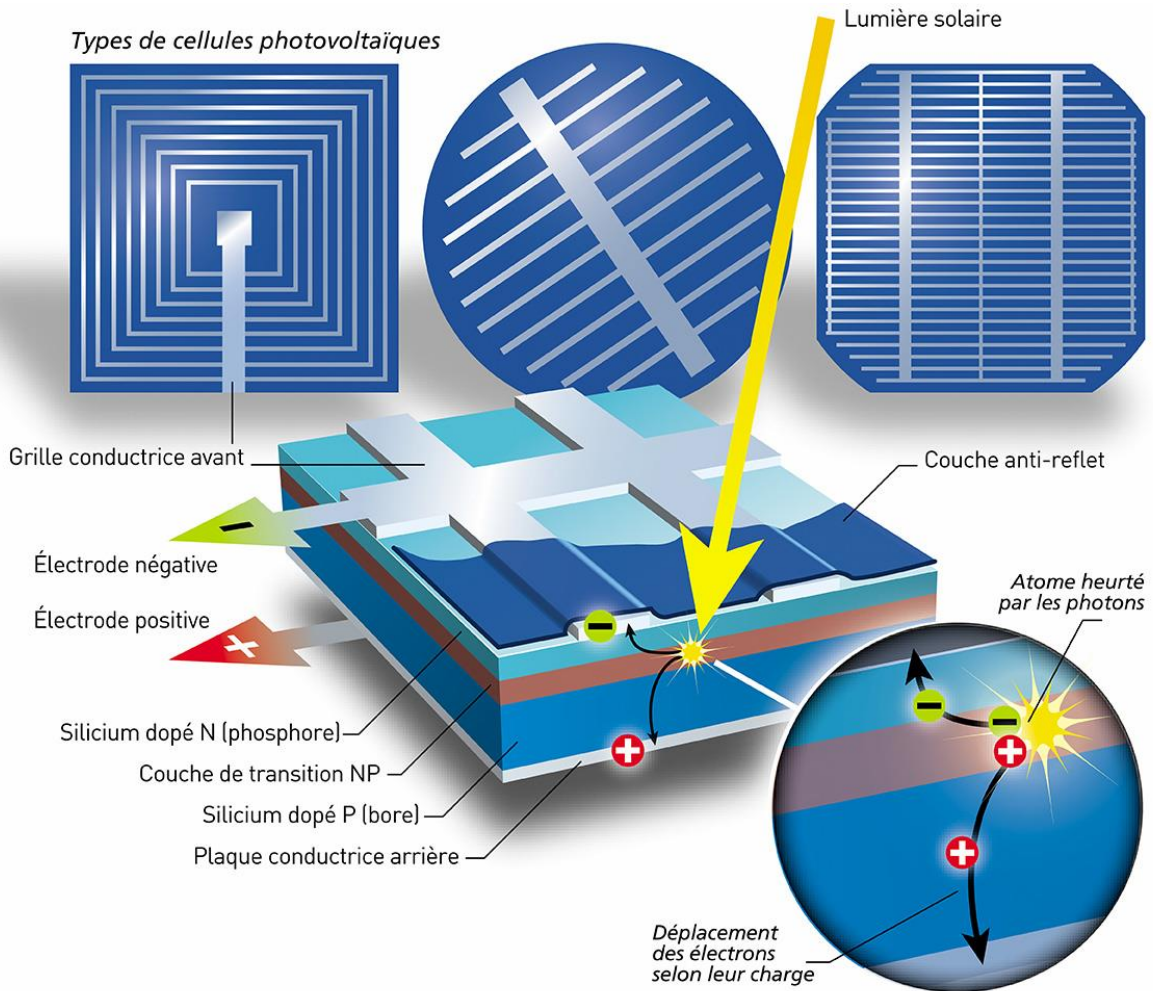


Figure I.8 : Cellule photovoltaïque

### I.3.3 Générateur photovoltaïque

Typiquement une cellule photovoltaïque produit moins de 2 watts sous approximativement 0,5Volt. Alors Pour produire plus de puissance les cellules sont assemblées pour former un module, une association série de plusieurs cellules donne un module et une association série et/ou parallèle de plusieurs modules permet de réaliser un panneau photovoltaïque (Figure I.9) [7].

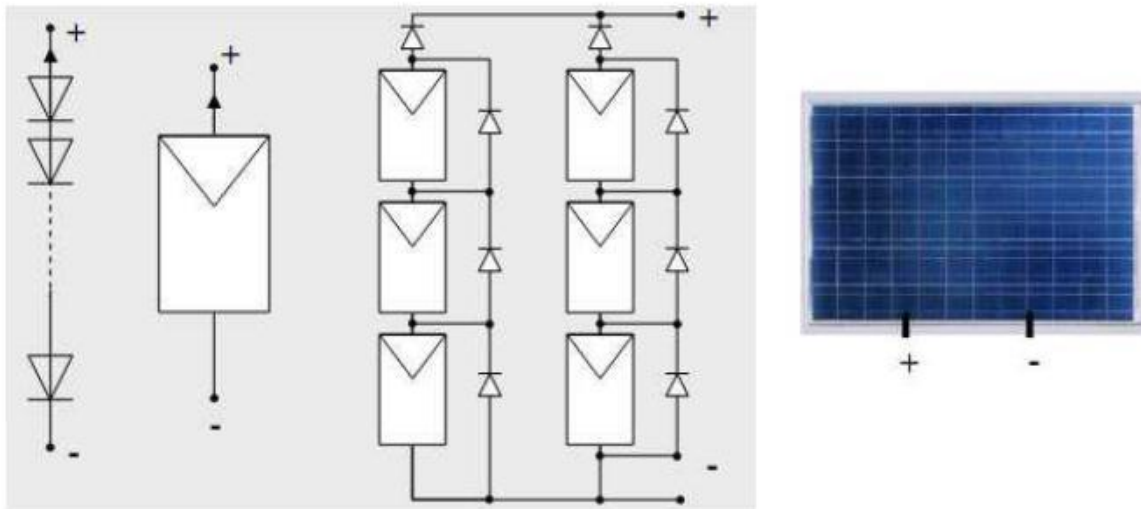


Figure I.9 : Générateur photovoltaïque

Le passage d'un module à un panneau se fait par l'ajout de diodes de protection, une en série pour éviter les courants inverses et une en parallèle, dite diode by-pass, qui n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de production associée.[7]

### I.3.4 Model électrique d'une cellule PV

Chaque cellule peut être modélisée par le schéma électrique équivalent :

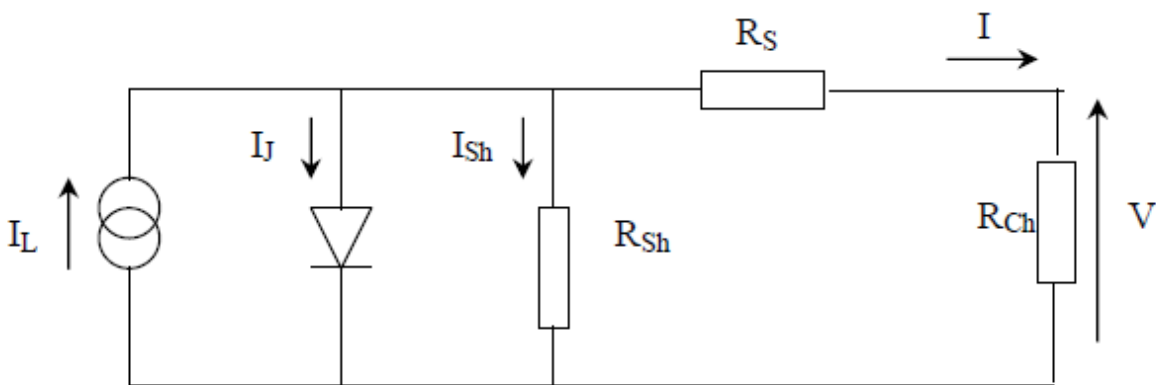


Figure I-10 : Circuit électrique équivalent d'une cellule PV model à une diode

Les résistances  $R_s$  et  $R_{sh}$  permettent de tenir en compte des pertes liées aux défauts de fabrication.  $R_s$  représente les diverses résistances de contact et de connexion tandis que  $R_{sh}$  caractérise les courants de fuite dus à diode et aux effets de bord de la jonction [8]

#### I.3.4.1 Caractéristique de la cellule photovoltaïque

La cellule étant chargée par une résistance, lorsque l'on éclaire la jonction PN, on observe l'apparition d'un courant inverse  $I$  sous une tension en sens direct  $V$ . La jonction fonctionnée

photopile, c'est l'effet photovoltaïque. La caractéristique d'une jonction PN non éclairée est celle d'une diode, en présence d'un éclairage, elle joue le rôle d'un générateur de courant DC, dont la caractéristique est montrée à la figure (I.11). [9]

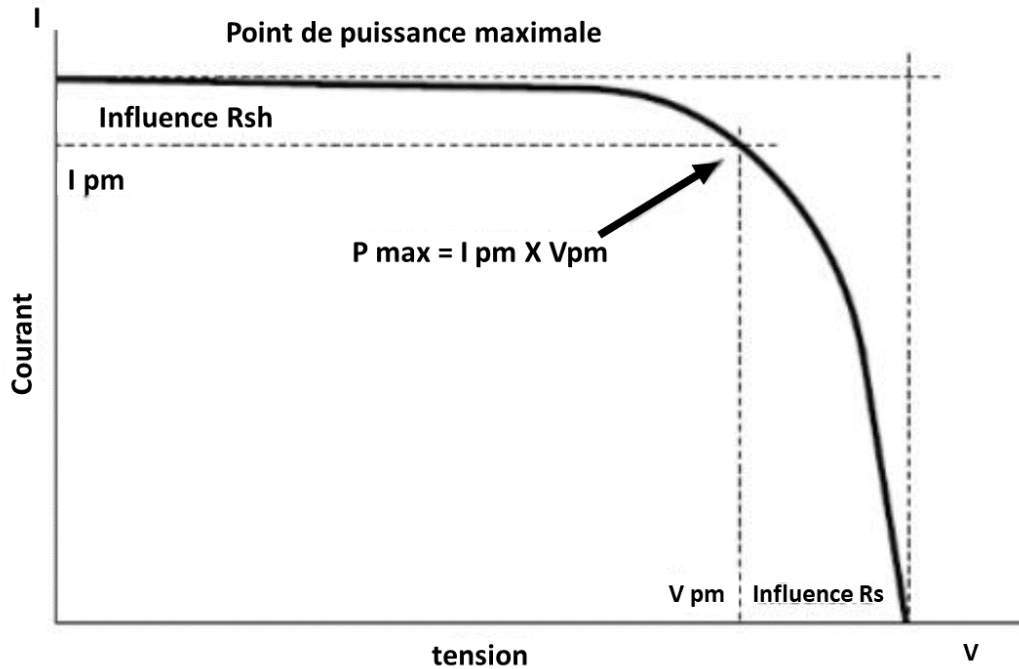


Figure I.11 : Caractéristique  $I=f(V)$

### I.3.4.2 Influence de l'éclairage et la température :

Les caractéristiques tension-courant et puissance-tension varient sensiblement avec la température et sous divers éclairages. L'augmentation d'ensoleillement à température fixe, se traduit respectivement par une augmentation de courant court-circuit et de la puissance produite (l'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que celui de la tension à circuit ouvert), Figure (I.12) (a) et (b). Par ailleurs, une augmentation de la température à éclairage fixe, engendre une diminution de la tension de circuit ouvert et de la puissance produite avec une légère augmentation de courant de court-circuit, Figure (I.12) (c) et (d). [10]

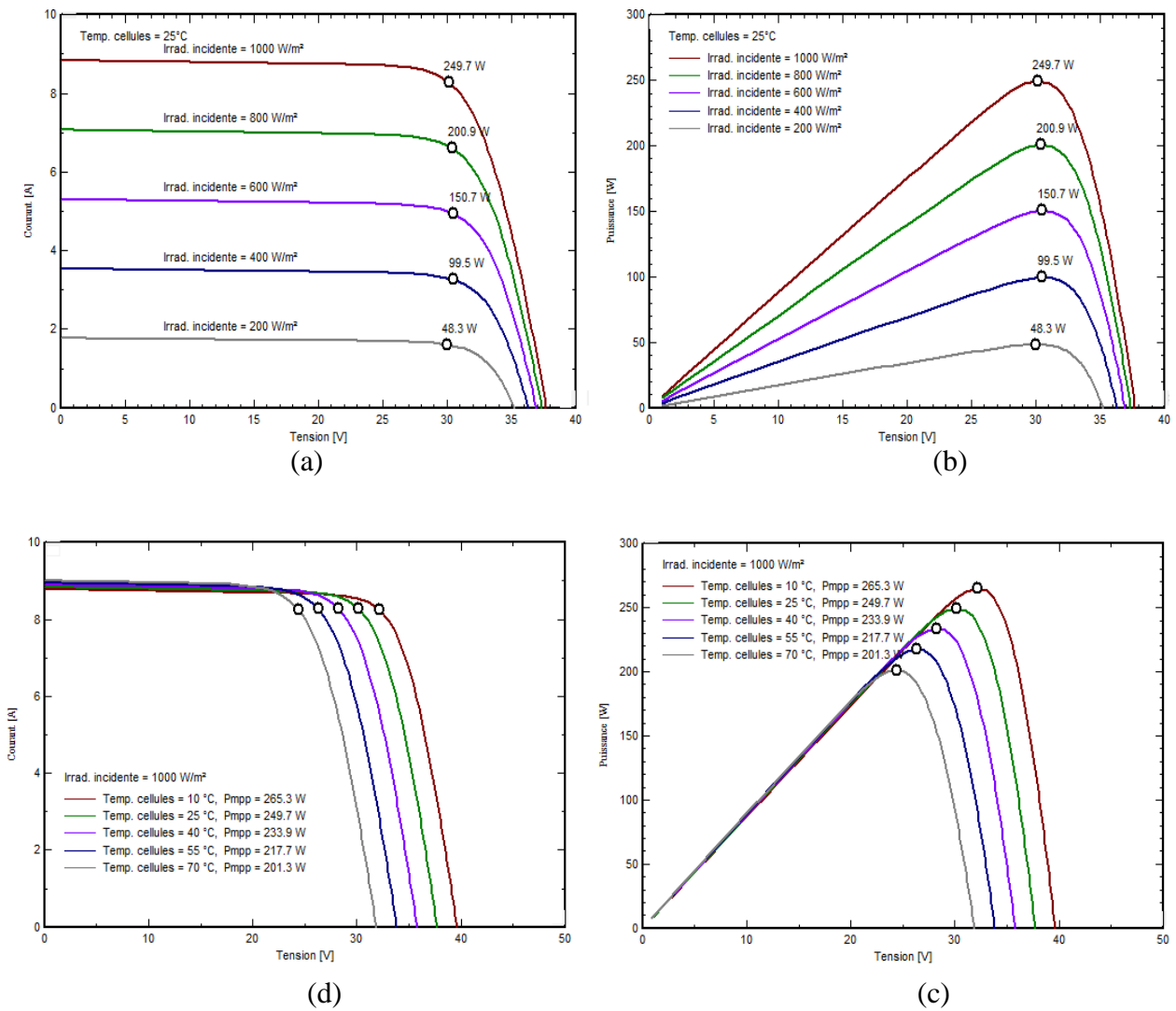


Figure I.12 : Comportement des caractéristiques  $I_{pv}$  ( $V_{pv}$ ) et  $P_{pv}$  ( $V_{pv}$ ) sous l'influence de l'éclairement et la température.

### I.3.5. Association des cellules photovoltaïques

#### I.3.5.1 Association en série

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série. La figure (I.13) montre l'intérêt de l'association des cellules ou modules photovoltaïques identiques en série [11].

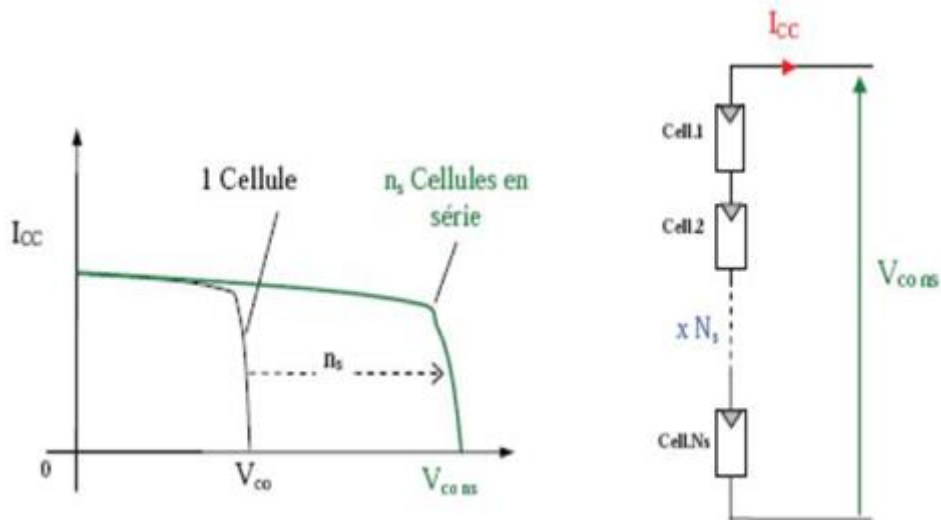


Figure I.13 : Cellules ou modules photovoltaïques en série.

### I.3.5.2 Association en parallèle

En additionnant les modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche. La figure (I.14) montre l'intérêt de l'association des cellules ou modules photovoltaïques identiques en parallèle [11].

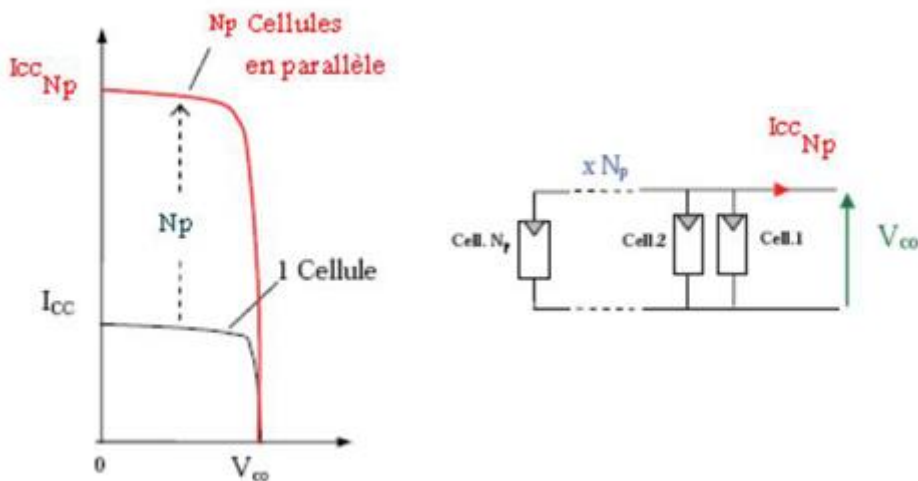


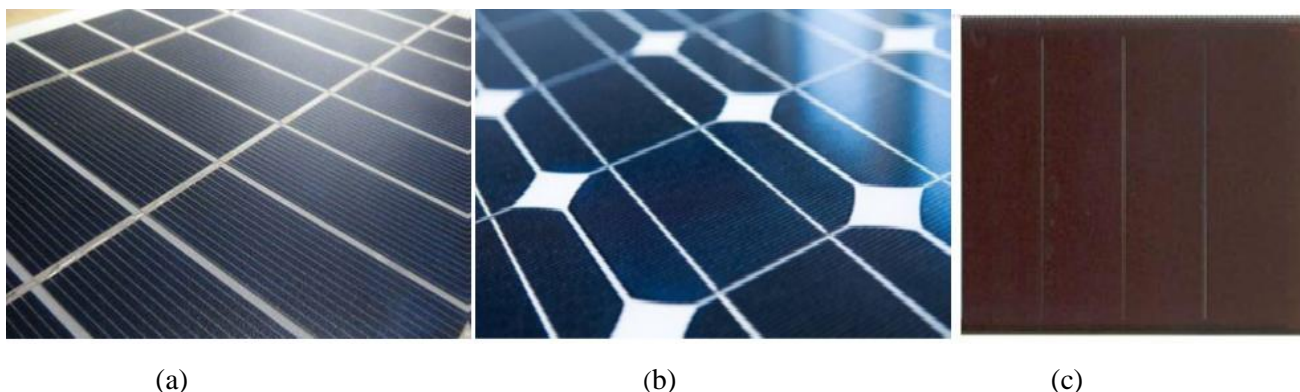
Figure I.14 : Cellules ou modules photovoltaïques en parallèle

### I.3.6 Type de cellules photovoltaïques

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

- **Les cellules monocristallines** : C'est la première génération de photopiles, elles ont un excellent rendement ainsi une méthode de fabrication laborieuse et difficile, donc très chère. (Figure I.15.a)

- **Les cellules polycristallines** : Un rendement élevé et un coût de production moins élevé ainsi un procédé nécessitant moins d'énergie. (Figure I.15.b)
- **Les cellules amorphes** : Un rendement faible et un coût de production bien plus bas ainsi une durée de vie plus faible, (cellules de calculatrices par exemple). (Figure I.15.c)



**Figure I.15 : Type de cellules photovoltaïques. [11]**

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

**Tableau I-1 : Comparatif pour quelque technologie [12]**

Technologies	Monocristallin	Polycristallin	Amorphe
Rendement	15 à 20% (STC)	12 à 17% (STC)	5 à 7% (STC)
Puissance	5 à 300 Wc	5 à 300 Wc	0.5 à 90 Wc
Durée de vie	20 à 30 ans	20 à 30 ans	≤ 10 ans
Gamme d'éclairement	100 à 1000w/m <sup>2</sup>	200 à 1000w/m <sup>2</sup>	20 à 1000w/m <sup>2</sup>
Avantages et inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> <li>• coût de fabrication élevé</li> <li>• rendement faible sous un faible éclairement.</li> <li>• pertes de rendement avec l'élévation de la température.</li> <li>• Très performant.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût de fabrication non chère.</li> <li>• rendement faible sous un faible éclairement.</li> <li>• pertes de rendement avec l'élévation de la température.</li> <li>• Adapté à la production à grande échelle.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cout de fabrication peu onéreux.</li> <li>• Fonctionnement correct avec un faible éclairement.</li> <li>• Rendement faible en plein soleil.</li> </ul>

### **I.3.7 Installation photovoltaïque**

#### **I.3.7.1 Système connecté au réseau**

Dans ce genre de système, l'électricité est produite en courant continu par les capteurs, puis transformée en courant alternatif par un onduleur. Ce dernier contrôle la puissance injectée au réseau, le courant alternatif (converti par l'onduleur) est identique à celui qui circule sur le réseau et peut, soit être consommé sur place, soit être injecté sur le réseau. [13]

#### **I.3.7.2 Systèmes autonomes**

C'est un système photovoltaïque complètement indépendant d'autre source d'énergie et qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries pour le stockage d'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, sur des îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau. En règle générale, les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique. [13]

#### **I.3.7.3 Système hybride**

Les systèmes hybrides se sont des systèmes qui combines entres deux ou plusieurs sources d'énergies différentes, et cela afin d'assurer la continuité du service électrique et présente un double avantage afin de minimiser les perturbations de l'environnement, grâce à une consommation sur le lieu de production de ressources naturelles renouvelables et une sécurité d'approvisionnement, quelles que soient les conditions météorologiques. Les systèmes hybrides se compose généralement de sources d'énergie classique (groupe électrogène), de sources d'énergie renouvelable (éolienne, solaire, hydroélectrique, marémotrice, géothermique etc.) des convertisseurs statiques et dynamique, des systèmes de stockage (batterie, volant d'inertie, le stockage hydrogène.), et un système de surveillance. [13]

## **I.4 Système de conversion éolien**

Le système de conversion éolien (SCE) est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

Le SCE est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin d'un réseau électrique. Ceci est montré sur la figure (I.16). [14]

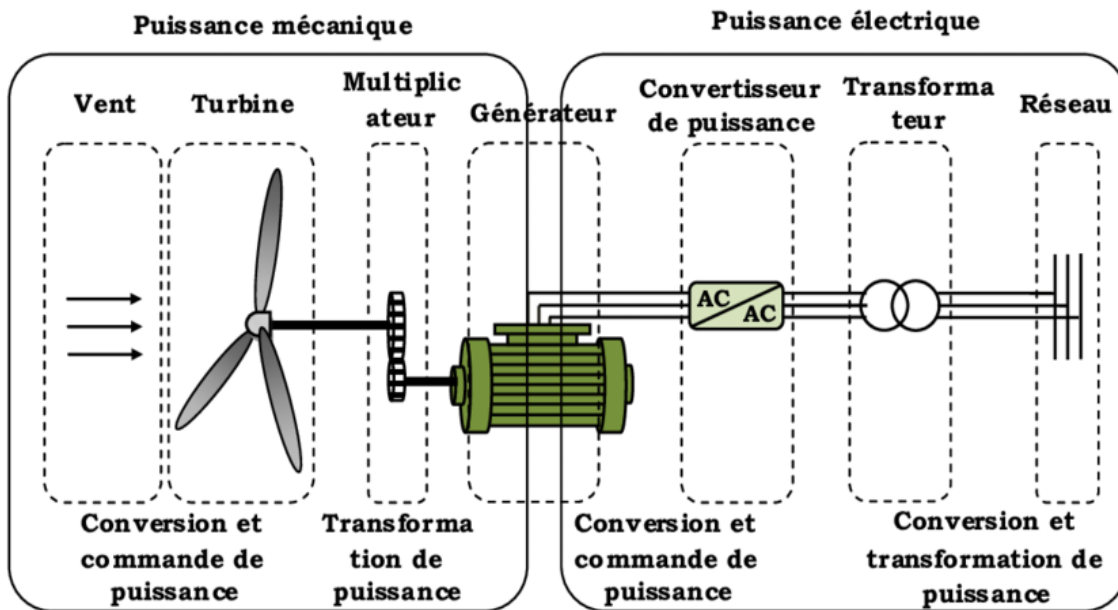


Figure I.16 Principaux organes du système de conversion éolien [14]

## I.4.1 Types des éoliennes

### I.4.1.1 Eolienne à axe verticale

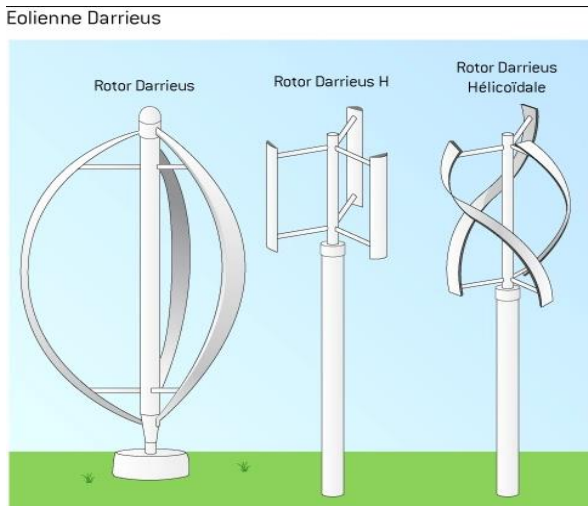
Il est possible de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique via des aérogénérateurs à axes vertical, Les principaux avantages de ces types d'éoliennes, sont :

- Accessibilité de la génératrice et du réducteur de vitesse mis directement au sol, ce qui facilite la maintenance et l'entretien.
- La non nécessité d'un système d'orientation du rotor car le vent peut faire tourner la structure quel que soit sa direction.

Cependant elles ont comme inconvénients les points suivants :

- Faible rendement et fluctuations importantes de puissance.
- Occupation importante du terrain pour les puissances élevées.
- Faible vitesse du vent à proximité du sol.

Les plus reconnue de ces turbines sont les aérogénérateurs de type **Darrieus** (figure I.17) et de type **Savonius** (figure I.18)



*Figure I.17 : Aérogénérateur de Type Darrieus*

*Figure I.18 : Aérogénérateur Type Savonius*

#### **I.4.1.2 Eolienne à axe horizontale**

Ce sont les types de turbines les plus répandus et les plus utilisés dans les fermes éoliennes à grandes puissances. Elles présentent un coût moins important, et fonctionnent dans des vents forts par rapport aux turbines à axe vertical, et donc produisent plus d'énergie, du fait que les pales sont placées à une hauteur importante. En plus elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques. Elles sont constituées d'une ou de plusieurs pales pour générer un couple moteur entraînant la rotation de l'arbre de la turbine. Le rotor tripal est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Le plan de rotation des turbines à axe horizontal est généralement placé face au vent par un mécanisme d'asservissement de l'orientation à l'aide des capteurs de mesure du sens du vent. [14]



*Figure I.19 : Eolienne à axe horizontale*

## I.4.2 Principe de fonctionnement du SCE

Le SCE assure la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en trois étapes telles que montrer sur la Figure (I.20).

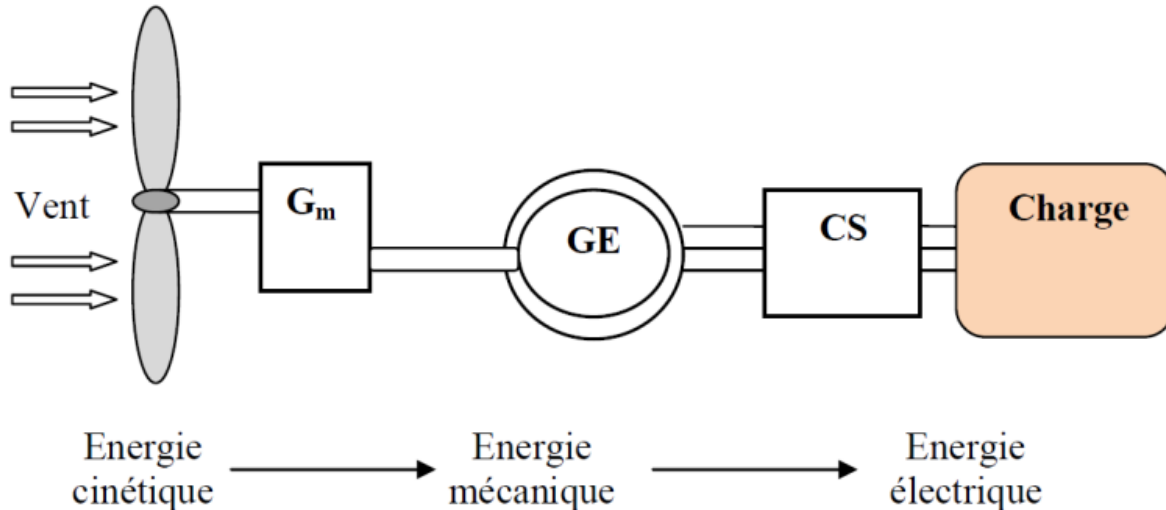


Figure I.20: Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

- Les pales extraient une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- La génératrice électrique reçoit l'énergie mécanique et la convertit ensuite en énergie électrique, qui sera ensuite transmise au convertisseur statique.
- Le convertisseur statique, qui est en général placé entre le générateur électrique et la charge, adapte l'énergie électrique fournie par le générateur à la charge. Cette dernière peut être une résistance, un moteur, une pompe ou un réseau de distribution d'énergie électrique. [14]

## I.4.3 Les installations éolienne

### I.4.3.1 Installation autonome

Ces éoliennes sont associées à des unités de stockage d'énergie, généralement constituées de batteries d'accumulateur. Ces dernières se charge par l'aérogénérateur. Soit directement par une génératrice à courant continu pour les faibles puissances, ou bien par une génératrice synchrone à aimants permanents par l'intermédiaire d'un pont redresseur. La tension continue des batteries est utilisée soit directement ou alors mise en forme par onduleur pour obtenir une alimentation triphasée sinusoïdale de fréquence 50 Hz. [13]

### I.4.3.2 Installation connectée au réseau

En ce mode de fonctionnement souvent munies d'un système d'orientation de pales permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance.

La génératrice est entraînée par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse, et sa vitesse est maintenue approximativement constante autour de la vitesse de synchronisme imposée par la fréquence du réseau.[13]

### **I.4.3.3 Installation hybride**

Un système hybride à sources d'énergie renouvelables est un système électrique, comprenant plus d'une source d'énergie, parmi lesquelles une au moins est renouvelable.

L'objectif principal d'un système hybride est de répondre à la demande de la charge en favorisant l'énergie produite par les sources renouvelables par rapport à celle fournie par les sources auxiliaires comme le groupe Diesel. [13]

## **I.5 Architectures des systèmes hybrides PV/éolien**

Les énergies du vent et solaire sont omniprésents, disponibles gratuitement, et respectueux de l'environnement. Au cours des dernières années, la combinaison de ces sources d'énergie renouvelables (système hybride photovoltaïque/éolienne) est devenue une alternative attrayante et viable à l'énergie fossile produite pour répondre à la demande d'électricité. Les composants de ce système d'énergie hybride renouvelable se composent de deux sources d'énergie, d'un équipement de conditionnement de puissance, d'un contrôleur et un système de stockage d'énergie optionnel. Avec les caractéristiques complémentaires entre les ressources en énergie solaire et éolienne, un système hybride photovoltaïque/éolienne sans stockage présente une bonne alternative pour satisfaire les besoins en électricité pour les sites connectés au réseau régional, en particulier lors de la pointe de consommation.

Le choix d'une architecture selon : le type de sources, de bus et de convertisseurs, offre différentes possibilités de dimensionnement, pour s'adapter aux disponibilités des sources et aux contraintes de l'environnement sur le site à alimenter. Le système hybride choisi peut être connectés en différents configurations,

- L'architecture à bus à DC,
- L'architecture à bus AC.

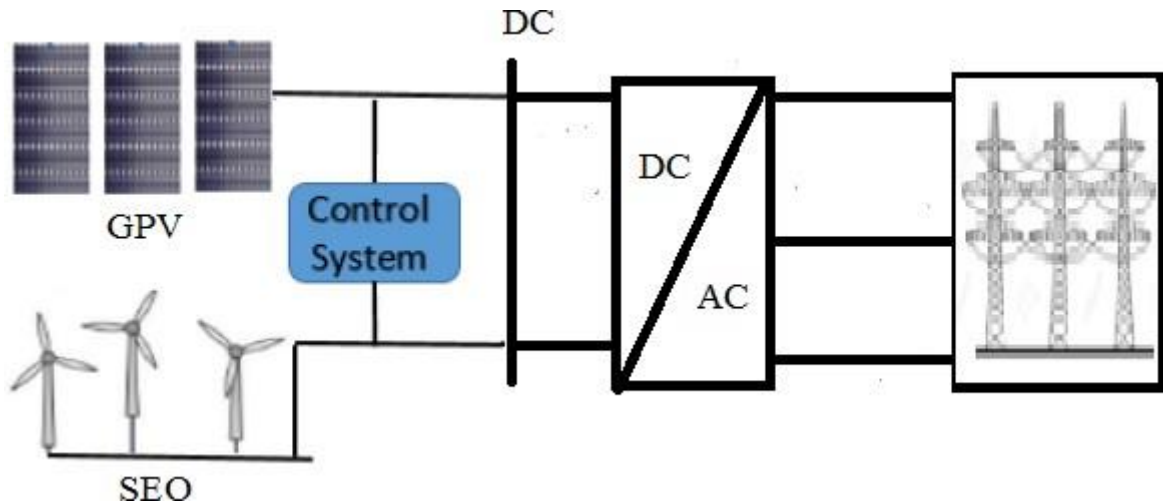


Figure I.21 : système hybride à bus DC

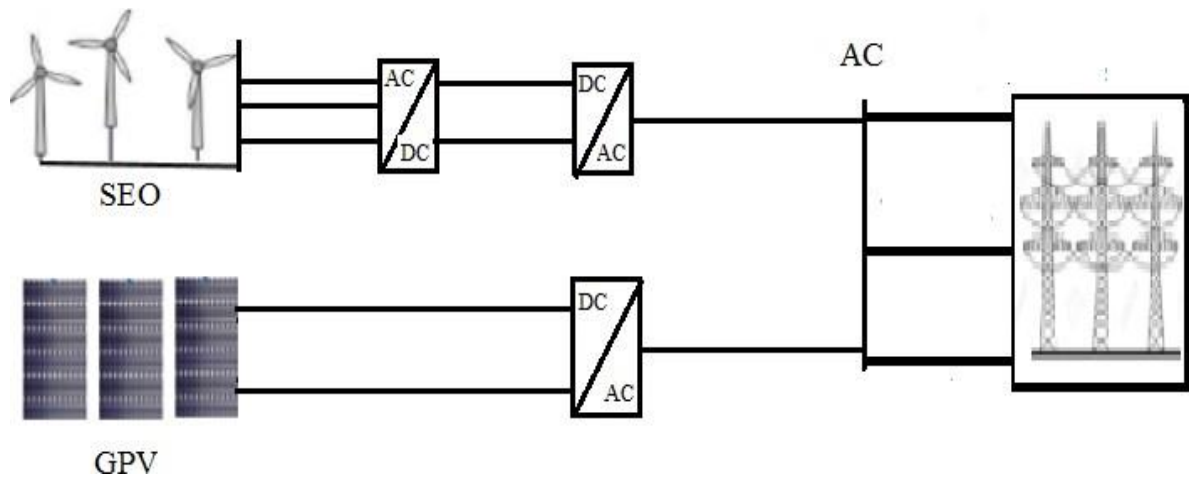


Figure I.22 : système hybride à bus AC.

Dans le cadre de notre étude, nous avons choisi l'architecture à bus AC (toute l'énergie converge vers un même bus AC) [14], [15].

Les avantages de cette architecture sont :

- Découplage des différentes sources de production, ce qui permet d'agir de façon assez indépendante les unes sur les autres.
- Capacité d'augmenter et de réduire la tension à l'aide d'un simple dispositif passif (Transformateur).
- Appareillage de connexion bon marché et disponible facilement.

## I.6 Intégration des systèmes (PV et Eolien) aux réseaux

### I.6.1 Intégration des systèmes photovoltaïque aux réseaux

La problématique majeure liée à l'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux est de deux ordres [16] :

- La variabilité de la production du fait des variations de l'énergie primaire qui est non dispatchée.
- L'incertitude sur les prévisions météorologiques induisant une incertitude sur la production.

Cette problématique est plus marquée pour la production éolienne car les prévisions de vitesse du vent sont moins fiables que celles de l'ensoleillement. Les convertisseurs utilisés aux systèmes PV connectés aux réseaux doivent être utiles et compatibles pour le traitement de puissance et la synchronisation avec la puissance de service.

### **I.6.1.1 Configurations des systèmes PV connectée aux réseaux**

En général, quatre types de système PV connecté au réseau sans batterie de stockage sont identifiés, leurs configurations ont été conçues comme suit [17] :

- Onduleur central (Central-plant inverter) ;
- Hacheur (Multiple-string dc-dc) avec un onduleur unique ;
- Onduleur Multiple-string ;
- Onduleur modulaire (Module-integrated inverter).

Les critères de compatibilité de l'onduleur avec le réseau sont [17] :

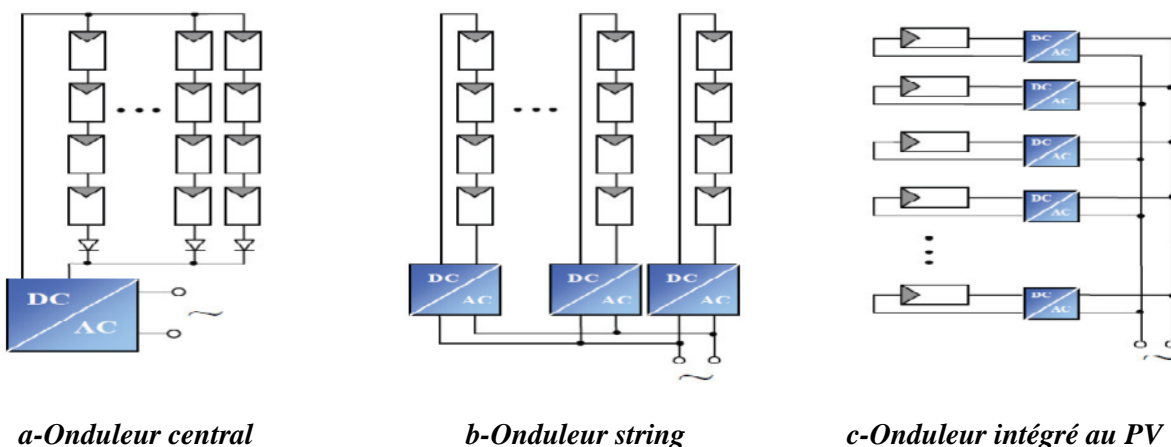
- Temps de réponse
- Facteur de puissance
- Commande de fréquence
- Rendement harmonique
- Synchronisation
- Contribution de courant de défaut
- Injection de courant continu
- Protection.

**L'onduleur central** : dans le cas d'onduleur central, les divers panneaux solaires pour une grande installation (>10kW) sont montés en rangées pour former une chaîne (String en anglais), elle-même couplée en parallèle avec des diodes anti-retours à plusieurs autres (Figure I.23.a). Le générateur PV de forte puissance ainsi structuré est relié du côté DC à un seul onduleur. Cet onduleur central présente une grande efficacité énergétique à des coûts réduits. La fonction principale de cet appareil est de créer une tension alternative à partir d'une tension continue la plus compatible avec le réseau et d'examiner en permanence la présence ou non du réseau pour autoriser l'injection du courant. La structure classique de l'onduleur est souvent un circuit en pont

permettant de relier chacun des deux pôles d'entrée à chacun des deux pôles de sortie par le biais d'interrupteurs de puissance.

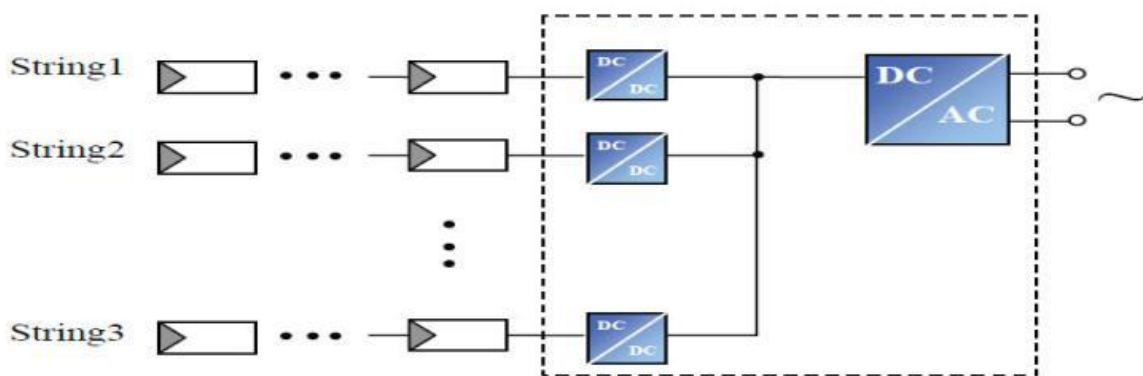
**Les onduleurs string :** de même que pour l'onduleur central, le champ PV est, ici aussi constitué de strings (chaînes). Chaque string est toutefois relié à un onduleur (Figure I.23.b). Chaque string peut ainsi fonctionner à son PPM. Cette technologie réduit considérablement le risque de problèmes d'adaptation ainsi que les pertes dues aux effets d'ombrage, tout en éliminant celles occasionnées par les diodes anti-retours et un câblage prolongé vers le générateur DC. Ces propriétés techniques avantageuses accroissent la fiabilité de l'installation ainsi que sa production énergétique. Mais il faut prendre en compte l'augmentation du nombre d'onduleurs de moyenne puissance disposant de rendement compris entre 92% et 96% nécessaires pour calculer le surcoût d'une telle architecture par rapport à la précédente [17].

**Les onduleurs intégrés aux panneaux photovoltaïques :** chaque panneau dispose ici de son propre onduleur (Figure I.23.c), ce qui permet théoriquement d'éviter toutes pertes liées à la différence de puissance entre chaque module quelle que soit l'origine du défaut. Le rendement des onduleurs intégrés aux panneaux reste cependant en-deçà de celui de l'onduleur string à cause de la grande différence des tensions entre les GPV et la charge. De plus, les onduleurs intégrés aux panneaux induisent des coûts de câblage supplémentaires du côté AC, étant donné que chaque panneau de l'installation doit être relié au réseau 230 V. Le nombre nettement supérieur d'onduleurs intégrés aux panneaux nécessaires dans cette architecture entraîne un travail de couplage nettement plus conséquent. Ce concept ne s'applique donc généralement qu'aux installations PV d'une puissance modeste allant de 50 W à 400 W [17].



**Figure I.23 : Schémas de principe de différentes topologies d'installations PV connectés à un réseau électrique.**

**La conversion multi-string :** En fait, la gestion multi-string est née de la combinaison entre la gestion par onduleur central et la gestion par strings. Comme illustré en (Figure I.24), le principe de la conversion multi-string est basé sur de nombreux convertisseurs DC-DC modulables connectés à un onduleur central via un bus continu. Chaque convertisseur DC-DC dispose de sa propre commande MPPT permettant à chaque string de fonctionner à son PPM. Par conséquent, le dysfonctionnement d'un GPV peut être rapidement détecté et localisé. Le fonctionnement de l'ensemble du champ ne sera donc pas affecté par le dysfonctionnement d'un seul GPV. Grâce aux convertisseurs DC-DC, il est possible de travailler sur une plus large gamme de tension PV (tension plus faible en entrée des DC/DC) optimisant ainsi la production photovoltaïque.



*Figure I.24 : Structure de conversion multi-string mixte.[17]*

## **I.6.2 Intégration des systèmes éoliens aux réseaux**

La nature imprévisible et très fluctuante du vent limite la participation des éoliennes aux services système (réglages des puissances active et réactive, fréquence, tension, possibilité de fonctionner en îlotage, ...etc.) [18]. Pour fournir toute la puissance produite et absorber en permanence la puissance réactive La majorité des éoliennes ont besoin d'un réseau puissant qui impose la fréquence et la tension, et qui est très complexe à gérer, car la puissance produite par les grandes éoliennes (1MW) est très fluctuante à cause des aléas du vent, on ne peut compter que sur 20 à 30% de leurs puissances nominales en moyenne. C'est pour cela il est intéressant d'interconnecter plusieurs fermes entre elles afin d'avoir une source de production fiable [19]. Par conséquent, le taux de pénétration de l'éolien, c'est-à-dire la puissance que génèrent les éoliennes par rapport à la puissance totale consommée, doit alors être limité afin de pouvoir garantir la stabilité du réseau dans des conditions acceptables [20].

Ceci est particulièrement vrai pour les sources à énergie renouvelable dont la source primaire est difficilement prévisible et très fluctuante, comme c'est le cas de l'éolien pour lequel certains retours d'expérience indiquent que lors de taux de pénétration supérieur à 20 ou 30% des problèmes de stabilité peuvent apparaître, telles que les creux de tension ou les variations de

fréquence. Ces perturbations entraînent souvent une déconnexion de la production lors d'incidents sur le réseau. Cette déconnexion peut aggraver un déséquilibre production - consommation et par effet domino accélérer l'avènement d'un incident majeur dans le réseau.

Dans le futur, l'ancienne technologie éolienne à vitesse fixe sera remplacée au fur et à mesure par celles à vitesse variable (à base de machine asynchrone à double alimentation ou de machine synchrone), qui semblent mieux adaptées au système électrique. Les éoliennes à vitesse variable sont capables de participer au réglage de la tension et de la fréquence grâce à la présence des convertisseurs électroniques de puissance. Ceci offre ainsi à ce type d'éoliennes une plus grande souplesse d'adaptation aux conditions techniques de raccordement qui tendent actuellement à se rapprocher des conditions actuelles des groupes conventionnels [21].

## **I.7 Stockage avec pile à combustible**

L'hydrogène est la substance la plus abondante dans la nature. Elle stocke la plus importante quantité d'énergie par unité de masse et peut, dans le futur, être le combustible qui viendra remplacer le pétrole. Mais l'hydrogène a un inconvénient majeur : on ne le trouve pas à l'état libre et, pour l'obtenir, nous avons besoin d'une grande quantité d'énergie. L'énergie éolienne a déjà démontré qu'elle était capable de générer autant d'électricité que souhaité sans aucune contamination environnementale. Une pile à combustible (PAC) est un dispositif électrochimique qui permet de convertir directement l'énergie chimique interne d'un combustible en énergie électrique sans aucun processus thermique ou mécanique.[22]

### **I.7.1 Principe de fonctionnement**

Une pile à combustible (PAC) est un dispositif électrochimique qui permet de convertir directement l'énergie chimique interne d'un combustible en énergie électrique sans aucun processus thermique ou mécanique. [23]

On peut dire que le fonctionnement de toutes les piles à combustible, quel que soit leur technologie (alcaline, carbonate fondu, polymère, céramique....etc.), repose sur le même

principe, à savoir qu'elles sont alimentées en Hydrogène et en Oxygène qui en se combinant dans le cœur de la pile donne lieu à des dégagements de chaleur, d'eau et d'électricité. [23]

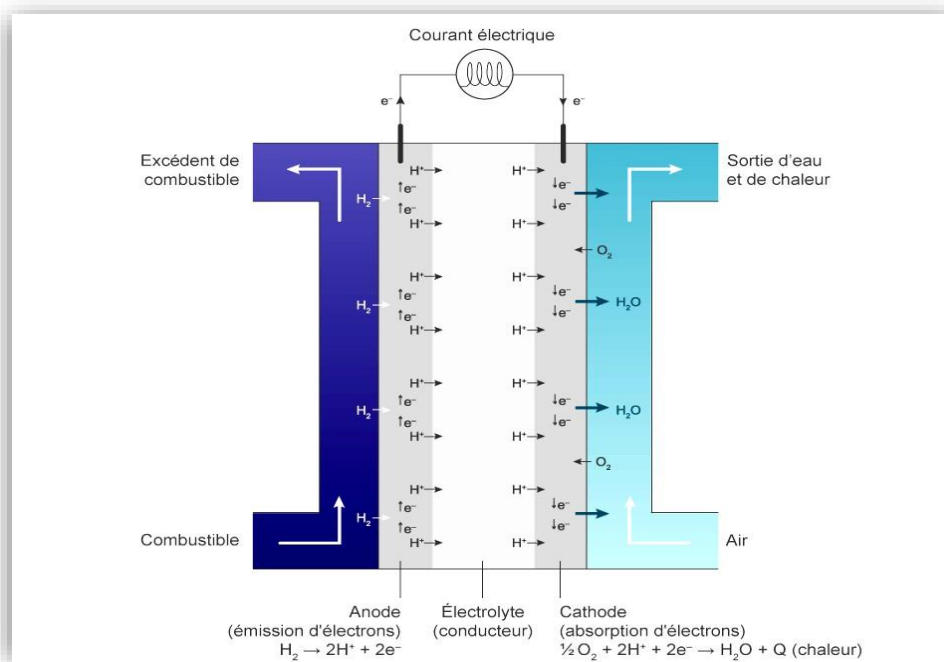


Figure I.25 : Principe de fonctionnement d'une pile à combustible. [24]

### I.7.2 Les différents types de piles à combustibles

On distingue plusieurs types de piles à combustible et on les classifie selon la nature de l'électrolyte utilisé. Celui-ci détermine en même temps la température de fonctionnement. [23]

Tableau I.2 : Les différents types de piles à combustibles.[24]

Modèle	Nom	Électrolyte	Température de fonctionnement	Combustibles	Puissance	Rendement électrique en%	Rendement thermique en %	Coût initial d'investissement	Durée de vie
PEM FC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell	Polymère (solide)	50 – 100°C	H2	De quelques mW à 1MW	30 – 45	45 – 65	3000-4000 Dollar/kW	60 000-90 000 heures
AFC	Alkaline Fuel Cell	Potasse (liquide)	25 – 260°C	H2	10kW – 100kW	55 – 60	<30	200-700 Dollar/kW	5000-8000 heures
PAFC	Phosphoric acid fuel cell	Acide phosphorique (liquide)	190-210 °C	H2	100kW – 400kW	40	40	4000-5000 Dollar/kW	30 000-60 000 heures
MFC	Molten Carbonate Fuel Cell	Sels fondus (liquide)	600 – 660°C	H2, CH4O, CH4	50kW – 10MW	40 – 60	40 – 50	4000-6000 Dollar/kW	20 000-30 000 heures
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell	Céramique (solide)	600 – 1000°C	H2, CH4O, CH4	Jusqu'à 10MW	30 – 60	40 – 60	3000-4000 Dollar/kW	Supérieur à 90 000 heures

### **I.7.2.1 Avantages des piles à combustible**

Les avantages et inconvénients des piles à combustible dépendent bien entendu du type de pile considéré et donc de l'application envisagée. Les avantages les plus importants sont les suivants : [23]

- Très bon rendement énergétique (supérieur à 50 %) : en comparaison avec moteurs à combustion interne (25-30%).
- Protection de l'environnement : 99 % en moins de monoxyde de carbone en comparaison avec un véhicule à essence.
- Efficacité : les piles à combustible sont généralement plus efficaces que les moteurs à combustion à piston ou turbine fondée.
- Mouillabilité : Les piles à combustible ont la caractéristique importante d'être très modulables dans le sens où elles peuvent être facilement de tailles différentes.
- Silence : Les piles à combustible sont très calmes, même ceux qui ont d'importantes transformations au carburant supplémentaire équipement.

### **I.7.2.2 Les inconvénients des piles à combustibles :**

Les inconvénients associés aux piles à combustible sont liés à leur manque de développement : [23]

- Coût trop élevé de production et de maintenance : Le coût qui est très élevé à cause de l'utilisation des métaux nobles comme le platine au niveau des électrodes et à cause du prix de fabrication de la membrane et des plaques bipolaires.
- Le poids et le volume La durée de vie : La plupart des piles sont encore des prototypes, on a donc peu de renseignements sur la durée de vie des piles. Les contraintes diffèrent selon l'application.
- Le manque d'infrastructures au niveau de l'approvisionnement en carburant (hydrogène, méthane). Ceci nécessite la mise en place de systèmes de production, de transport et de distribution. Cependant, la mise en place de tels systèmes ne peut se faire avant la commercialisation de la PAC.

## **I.8 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur le gisement solaire et éolien et leurs paramètres, ainsi que les principes de fonctionnement et les différents types de générateurs d'énergies renouvelables, photovoltaïques, éoliens et piles à combustible, et aussi le système d'hybridation et nous avons abordé l'injection dans le réseau électrique.

## **Chapitre II**

### **Modélisation de la centrale hybride**

#### **PV-Eolien**

## **II.1. Introduction**

La modélisation est un moyen destiné à représenter par une forme mathématique une fonction ou un processus technologique. Elle a pour but d'étudier théoriquement le comportement de certains paramètres et de les optimiser en respectant une contrainte donnée. A cet effet, la modélisation est nécessaire pour établir une relation directe entre l'énergie produite par l'installation et la demande de l'utilisation. Tandis que l'estimation des propriétés d'adaptation du système à chaque période de l'année est obtenue à partir d'une étude théorique et expérimentale. Dans ce chapitre nous présenterons la modélisation du système hybride éolien-photovoltaïque.

## **II.2. Modélisation d'une chaîne de conversion éolienne**

### **II.2.1. Modélisation du vent**

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

### **II.2.2. Variabilité temporelle du vent**

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

#### **II.2.2.1. Distribution de Weibull :**

La distribution du vent se fait en fonction de la loi de Weibull utilisée sur des séries de mesure du vent (d'au moins une année). La loi de distribution de vitesses de Weibull s'exprime par la relation [1] :

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

Où :

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

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

#### **II.2.2.2. Distribution hybride Weibull :**

La loi de Weibull modifiée est utilisée pour caractériser les stations pour lesquelles la proportion de vents nuls est très importante. En effet, la loi de Weibull classique ne permet pas de considérer les vents nuls la loi modifiée [25, 26] est définie par l'équation (II.2) :

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

Où :

$ff_0$  Étant le pourcentage de vitesses de vent nulles.

Les deux distributions sont employées pour déterminer les vitesses caractéristiques du site [27,28] :

### **II.2.2.3. Distribution de Rayleigh:**

La distribution de Rayleigh est un cas particulier de la distribution de Weibull pour le cas où le facteur de forme  $k$  est égal à 2. Sa densité de probabilité est donnée par :

$$f(v) = 2 \left(\frac{v}{c^2}\right) \times \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^2\right] \quad (\text{II.3})$$

### **II.2.3. Paramètres du vent**

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

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

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

#### **II.2.3.1 Vitesse moyenne**

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

$$\langle V \rangle = \int_0^{\infty} f(V) dV \quad (\text{II.4})$$

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

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

Si le calme  $ff_0$  est supérieur à 15% ;

$$\langle V \rangle = (1 - ff_0). C. \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (\text{II.6})$$

#### **II.2.3.2 Vitesse du vent transportant le maximum d'énergie**

$$V_{Em} = C. \left(\frac{K+2}{K}\right)^{\frac{1}{K}} \quad (\text{II.7})$$

### II.2.3.3 Vitesse la plus fréquente

$$V_F = C. \left(\frac{K-1}{K}\right)^{\frac{1}{K}} \quad (\text{II.8})$$

### II.2.3.4 Vitesse cubique moyenne

Alors que la vitesse cubique moyenne se détermine par :

$$\langle V^3 \rangle = \int_0^{\infty} V^3 f f(V) dV \quad (\text{II.9})$$

## II.3 Variabilité spatiale du vent

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

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

### II.3.1 Loi de cisaillement du vent

Cette loi est utilisée dans certaines études [29,30] et a pour principale avantage la prise en compte d'un paramètre physique  $z_0$ , définissant la rugosité du terrain. Elle est loi est définie par :

$$\frac{V(Z)}{V(Z_R)} = \frac{\text{Ln}\left(\frac{Z}{z_0}\right)}{\text{Ln}\left(\frac{Z_R}{z_0}\right)} \quad (\text{II.10})$$

### II.3.2 Extrapolation verticale des paramètres de Weibull

L'estimation des paramètres de Weibull  $k_2$  et  $C_2$  au niveau de l'éolienne permet l'estimation du potentiel éolien au niveau de l'hélice. [31, 32,33] :

$$k_2 = \frac{k_1 \left[1 - 0.881 \ln\left(\frac{Z_1}{10}\right)\right]}{1 - 0.881 \ln\left(\frac{Z_2}{10}\right)} \quad (\text{II.11})$$

$$C_2 = C_1 \left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)^n \quad (\text{II.12})$$

$$n = \left[ \frac{0.37 - 0.881 \ln(C_2)}{1 - 0.881 \ln\left(\frac{Z_1}{10}\right)} \right] \quad (\text{II.13})$$

Où :

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

V(z) est la vitesse en m/s à calculer ;

ZR est l'altitude de référence en m;

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

Zo , est la rugosité en m.

## II.4 Modélisation du potentiel énergétique éolien

### II.4.1 Densité de puissance disponible

La densité de puissance éolienne disponible WPD [34, 35,36] est un moyen utile d'évaluer le potentiel éolien dans un site sans tenir compte d'une éolienne particulière. La densité d'énergie éolienne, mesurée en watts par mètre carré, indique la quantité de puissance éolienne disponible pour la conversion éolienne dans un site est exprimée par l'équation (II.14).

$$\frac{P_{dis}}{A} = \frac{1}{2} \rho \cdot C^3 \cdot \Gamma \left( 1 + \frac{3}{k} \right) \quad (II.14)$$

Où :

A est la surface en [m<sup>2</sup>] ;

ρ est la masse volumique de l'air;

### II.4.2. Densité d'énergie annuelle récupérable maximale

La densité d'énergie maximale récupérable dans un site par un système de conversion éolienne en kWh/m<sup>2</sup> /an est exprimé par l'équation (II.15).

$$\frac{E_m}{A} = 3.25 C^3 \cdot \Gamma \left( 1 + \frac{3}{k} \right) \quad (II.15)$$

### II.4.3. Productivité éolienne (WPP)

Le WPP (wind power plant) est un paramètre très important, il permet de quantifier l'énergie produite pendant un temps T par les éoliennes ou le parc éolien. [35,37]

$$E_{out} = T \cdot \int_0^{\infty} P(V) \cdot f(V) \cdot dV = T \cdot \sum_0^{\infty} P(V_i) \cdot f(V_i) \quad (II.16)$$

Où :

f(v) est la densité de probabilité de présence de la vitesse du vent ;

Pe(V) est la puissance caractéristique de la courbe de puissance de l'éolienne ;

T est le temps de la période de calcul.

### II.4.4. Évaluation des performances des éoliennes

$$P_{out} = P_n \cdot \left\{ A - \exp \left[ - \left( \frac{V_f}{C(h)} \right)^{K(h)} \right] \right\} \quad (II.17)$$

$$A = \frac{\exp \left[ - \left( \frac{V_c}{C(h)} \right)^{K(h)} \right] - \exp \left[ - \left( \frac{V_R}{C(h)} \right)^{K(h)} \right]}{\left( \frac{V_R}{C(h)} \right)^{K(h)} - \left( \frac{V_c}{C(h)} \right)^{K(h)}} \quad (II.18)$$

Avec :

$P_n$  : est la puissance nominale de l'éolienne.

$V_c$  est la vitesse de démarrage de l'éolienne.

$V_f$  est la vitesse d'arrêt de l'éolienne.

$V_R$  est la vitesse nominale de l'éolienne.

k(h) est le facteur de forme de Weibull à la hauteur du moyeu de l'éolienne.

$c(h)$  est le facteur d'échelle de Weibull à la hauteur du moyeu de l'éolienne.

#### **II.4.5. Facteur de capacité**

Le facteur de capacité (CF), est un élément qui permet de mesurer la productivité d'une centrale éolienne, ou de toute autre installation de production d'énergie. Il compare la production réelle de la centrale sur une période de temps donnée  $E_{out}$  à la quantité, de puissance que la centrale aurait produite si elle avait fonctionné à pleine capacité

$E_r = 8760.P_n$  dans le même laps de temps. IL est calculé par l'équation suivante exprimée en pourcentage. [34,35]

$$C_F = \frac{E_{out}}{E_r} \quad (II.19)$$

Où :

$P_n$  est la puissance nominale de WCS.

#### **II.4.6. Taux de fonctionnement**

Le taux de fonctionnement  $E_h$  est un paramètre utilisé pour exprimer l'exploitation des parcs éoliens il est exprimé tel que :

$$E_h = 8760.CF \quad (II.20)$$

### **II.5 Implémentation de la centrale**

L'implémentation nécessite une discipline et démarches liées au gisement du site pour favoriser ou non cette implémentation.

#### **II.5.1 Condition de l'installation**

Afin d'optimiser l'exploitation des parcs éoliens, certaines mesures doivent être prises en compte. En effet, un mauvais choix de certains paramètres pourra porter préjudice à une installation éolienne, afin d'éviter le phénomène de sillage, on tiendra en compte l'espacement des éoliennes. L'installation des éoliennes sur un site doit tenir en compte les dimensions du terrain perpendiculaire et parallèle à la direction prédominante du vent. Les conditions à respecter sont les suivantes [35] :

$$(N_1 + 1) \times 10H < IN \quad (II.21)$$

$$(N_2 + 1) \times 3D < L \quad (II.22)$$

$$N = N_1 \times N_2 \quad (II.23)$$

Où :

$I$  est la dimension du terrain perpendiculaire à la direction prédominante du vent ;

$L$  est la dimension du terrain parallèlement à la direction prédominante du vent ;

$D$  est le diamètre du rotor de la machine ;  $H$ , Hauteur du pylône ;

$N_1$  est le nombre d'aérogénérateurs par rangée ;

$N_2$  le nombre de rangée d'aérogénérateurs ;

$N$  est le nombre total d'aérogénérateurs à placer sur le site.

## **II.6. Etude économique**

Étant donné que la viabilité économique des projets éoliens dépend de leur capacité à produire de l'électricité à un faible coût d'exploitation par unité d'énergie, une estimation précise de tous les coûts liés à la production d'électricité pendant toute la durée de vie du système, est essentiel. Différentes méthodes sont généralement utilisées pour estimer coût d'exploitation d'une unité d'énergie produite par le système de conversion de l'énergie éolienne [41,42].

Le coût actualisé de l'électricité (LCOE) est l'une des méthodes les plus couramment utilisées. Le LCOE du système de conversion de l'énergie éolienne peut être décrit comme le rapport du coût total annualisé du système de conversion de l'énergie éolienne à l'électricité annuelle produite par ce système [41].

La détermination du coût unitaire de l'énergie comporte deux grandes étapes : Dans une première étape, en prenant en considérations le coût d'investissement initial du système et la valeur actuelle des opérations et coût de maintenance (O&M) tout au long de la durée de vie du système, la valeur actuelle des coûts (PVC) est calculée.

La deuxième étape consiste à déterminer le coût unitaire de l'énergie (par kWh).

### **II.6.1. La valeur actuelle des coûts**

La valeur actualisée des coûts (PVC) peut être calculée comme suit :

$$PVC = I_c + C_{om(p)} \quad (II.24)$$

Où  $I_c$  est le coût d'investissement initial,  $C_{om(p)}$  est la valeur actualisée des coûts d'exploitation et de maintenance pour la durée de vie du système

Le coût d'investissement initial de l'IC comprend le coût de l'éolienne et tous les autres coûts initiaux, y compris les coûts des travaux de génie civil, de l'installation, des câbles de connexion au réseau et du conditionnement de l'énergie. Le coût de l'éolienne peut être déterminé comme suit :

$$C_{wt} = C_{spé} \times P_n \quad (II.25)$$

Où  $C_{spé}$  et  $P_n$  sont respectivement le coût spécifique et la puissance nominale de l'éolienne.

La valeur actuelle des coûts O&M (20 ans de maintenance) est exprimée comme [42,43] :

$$C_{om(p)} = C_{om(a)} \left[ \left( \frac{(1+i)}{(1+d)} \right)^t \right] \times \left[ 1 - \left( \frac{(1+i)}{(1+d)} \right)^t \right] \quad d \neq i \quad (II.26)$$

Où :  $i$ ,  $d$ , et  $T$  sont le taux d'inflation pour le fonctionnement, le taux d'intérêt et la durée de vie utile de la turbine en années (20 ans), respectivement.

$C_{om(a)}$ , est le coût d'exploitation et d'entretien pour la première année. Ce coût est exprimé en fraction du coût du composant. Dans cette étude, il est supposé être de 15% du coût annuel de la turbine (prix machine/durée de vie) [44,45].

### **II.6.2 Le coût actualisé de l'énergie**

Le coût unitaire de l'énergie (LCOE) : est déterminé par :

$$LCOE = TAC / E_{wgt} \quad (II.27)$$

Où TAC et  $E_{wgt}$  représentent respectivement le coût total annualisé et l'énergie totale annuelle.

Le TAC est calculé en utilisant la valeur actualisée des coûts (PVC) et le facteur de récupération du capital (CRF) :

$$TAC = PVC \times CRF \quad (II.28)$$

Pour un taux d'actualisation  $d$  et une durée de vie utile du système  $t$  donnés, le facteur de récupération du capital est défini comme [43] :

$$CRF = \frac{d(1+d)^t}{(1+d)^t - 1} \quad (II.29)$$

### **II.6.3. Etude économique du système de stockage**

Pour le stockage du central éolien nous avons choisie stockage avec pile à combustible.

#### **II.6.3.1. Le coût de la production d'hydrogène**

Le coût de la production d'hydrogène  $C_{H2}$  a été le paramètre économique clé retenu pour l'optimisation dimensionnelle du dispositif de production d'hydrogène et elle s'exprime par : [46]

$$C_{H2} = \frac{C_{ele} + C_w}{M_{H2} \times T} \quad (II.30)$$

Où :

$C_{ele}$  : Est le coût d'investissement, d'exploitation et d'entretien de l'électrolyseur (\$).

$C_w$  : coût énergétique d'éolien (\$).

$M_{H2}$  : est la masse annuelle d'hydrogène (Kg/an).

$T$  : Représente la durée de vie du projet et est fixé à 20 ans.

#### **II.6.3.2. La masse d'hydrogène**

La quantité de masse d'hydrogène produite à partir du vent l'énergie est donnée comme suit : [46]

$$M_{H2} = \frac{\eta_{el} \times E_{gwt}}{LHV_{H2}} \quad (II.31)$$

Où :

$\eta_{el}$  : L'efficacité de l'électrolyseur.

$E_{gwt}$  : L'énergie annuelle produite.

$LHV_{H2}$  : Le faible pouvoir calorifique d'hydrogène.

### **II.6.3.3. Coût de l'électrolyse**

La modélisation économique de l'électrolyseur est présentée dans de nombreux travaux antérieurs, dans lesquels l'investissement comprend trois coûts principaux à savoir ; les coûts d'investissement, de remplacement et d'exploitation et d'entretien. L'investissement total de l'électrolyseur dépend sur la taille de l'installation de production d'hydrogène. Le coût en capital de l'électrolyseur est déterminé par le maximum requis le taux de production d'hydrogène, le rendement effectif de l'électrolyseur et le coût d'investissement spécifique estimé par kW à production nominale. [46]

$$C_{ele} = C_{ele,u} \frac{M_{H2} \times K_{el.th}}{8760 \times f \times \eta_u} \quad (II.32)$$

Où :

$C_{ele,u}$  : Est le coût unitaire de l'électrolyseur (\$/kW).

$K_{el.th}$  : Est l'énergie spécifique théorique requise par l'électrolyseur.

$f$  : Est le facteur de capacité.

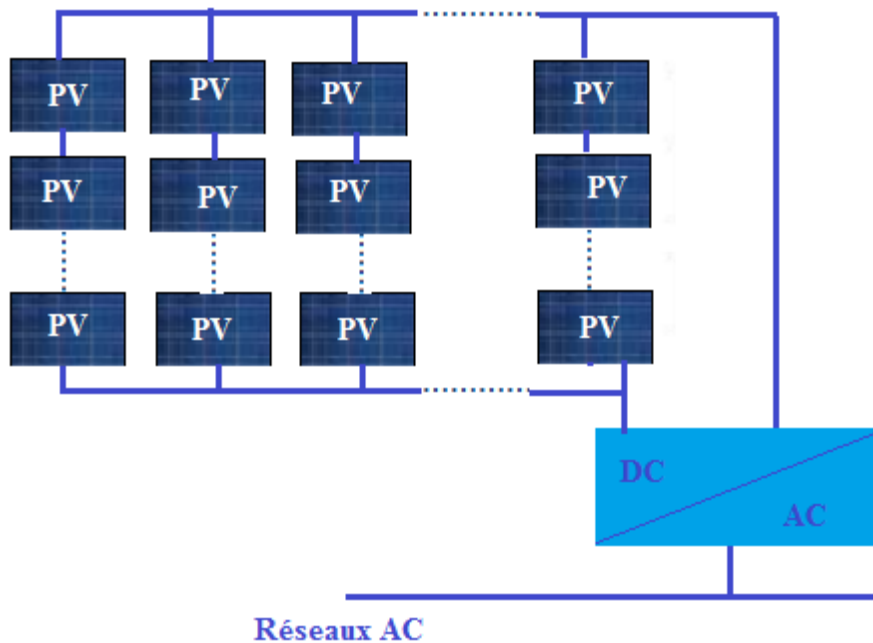
Note : Le cas de référence considère un coût unitaire électrolyseur de 368 \$/kW, ce qui correspond aux valeurs cibles établi par [44]. Nous supposons que les coûts de remplacement et les coûts d'exploitation annuels égaux à 25 % et 2 % de l'investissement des premières cellules. La durée de vie de l'électrolyseur utilisé est de 7 ans. [46]

## **II.2. Dimensionnement de la centrale photovoltaïque :**

La particularité de l'énergie photovoltaïque raccordée au réseau dans la plupart des cas, la centrale photovoltaïque peut être installée à proximité du lieu de consommation, évitant ainsi les pertes en ligne qui peuvent atteindre 15 % sur les grands réseaux électriques lorsque des centaines de kilomètres séparent les lieux de production et de consommation. Cette énergie répond bien au concept de la décentralisation. Une centrale photovoltaïque raccordée au réseau fonctionne «au fil du jour » de manière totalement transparente pour l'utilisateur et sans intervention de sa part. Son fonctionnement est particulièrement optimisé. Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires à moins que si nous voulions une forme autonome d'énergie pendant les pannes d'électricité [47].

Lorsqu'on s'équipé en énergie renouvelable, il est important de respecter un certain nombre d'étapes. Ces dernières permettront, grâce à quelques calculs très simples, de dimensionner la source d'énergie. Une installation d'un système PV nécessite plusieurs étapes dont le chiffrage de l'énergie solaire récupérable selon l'emplacement et la situation géographique. Avec ces données, il sera alors possible de connaître la quantité de modules photovoltaïques nécessaires, la quantité de batteries (en cas d'une installation autonome), le régulateur ainsi que l'onduleur les mieux adaptés, et enfin le câblage adéquat. Notre étude consiste au dimensionnement d'une centrale de production

photovoltaïque de 60MW installée à la région d'EL-Kheneg willaya de Laghouat qui est composée de 60 lignes de production de 1MW, chaque ligne est devisée en de deux sous-champ de 500kW, avec divers éléments permettant l'emplacement stable de ce système. La topologie d'installations des systèmes GPV suivant la partialité surface donnée pour la mini-centrale GPV, champ ou multi-champ, notre choix été sur la technique des onduleurs centrale (figure II.1).



**Figure II.1 : Schéma bloc d'une ligne de production PV.**

**II.2.1. Potentiel énergétique solaire**

La durée d'insolation moyenne dans le Sud Algérien est de l'ordre de 3500 h/an est la plus importante au monde, de l'ordre de 9 h/J, on constater qu'elle est toujours supérieure à 8h/J sur la majorité du territoire. La région du grand Sud, en particulier le Sud-Est et le Sud-Ouest présente le plus grand potentiel de tout le territoire Algérien.

Suivant les données de la station métrologique du SKTM –Kheng Laghouat, et les données obtenues du site Web du logiciel PVGIS, l'irradiation globale journalière et mensuelle présenté respectivement par la figure II.2 et II.3, ce qui réellement explique la variation journalière et mensuelle de l'irradiation solaire d'où la différence d'environ de 65 w/m<sup>2</sup>par jour. [47]

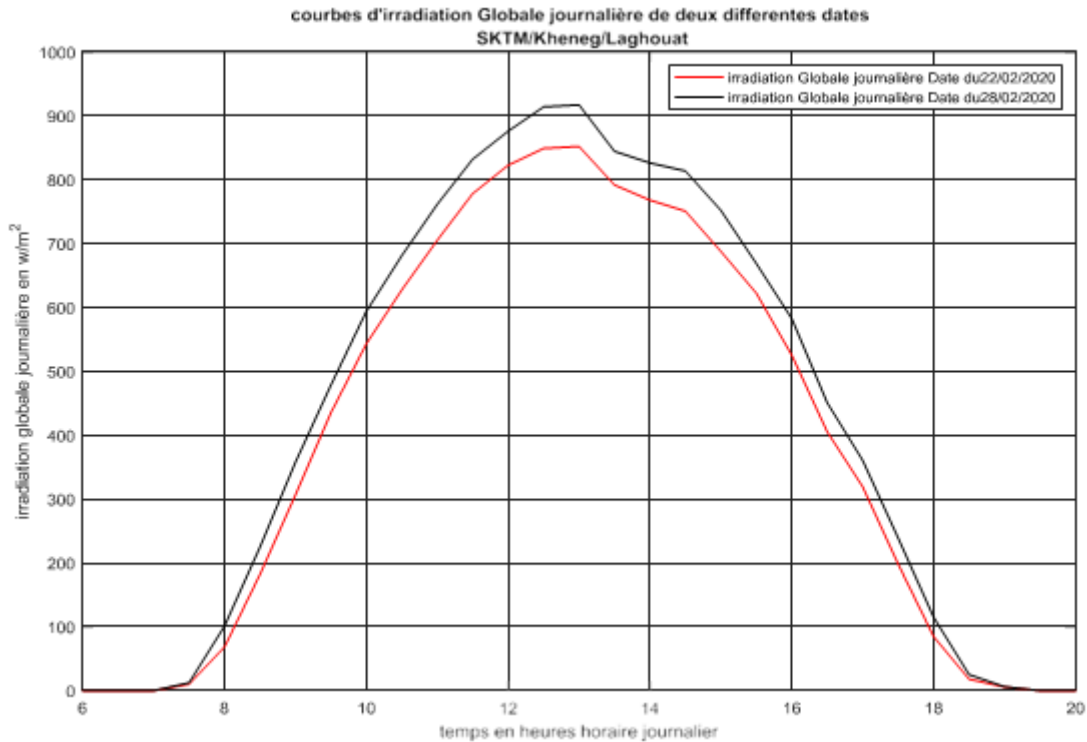


Figure II.2 : La variation journalier de l'irradiation solaire  
(22 et 28/03/2020).



Figure II.3 : La variation mensuelle de l'irradiation solaire  
(2012-2015).

La connaissance du mouvement apparent du soleil pour un point donné de la surface terrestre est nécessaire pour toute application solaire. La position du soleil est définie par deux angles : sa hauteur  $h$  (angle entre le soleil et le plan horizontal du lieu) et son Azimut  $AZ$  (angle avec la direction du sud, compté négativement vers l'est). La figure II.4 présente la hauteur du soleil dans le ciel en fonction de l'azimut à la région d'El Kheneg au cours d'une année.

Trajectoire du soleil à El Kheneg, (Lat. 33.7467° N, long. 2.8049° E, alt. 812 m) Temps légal

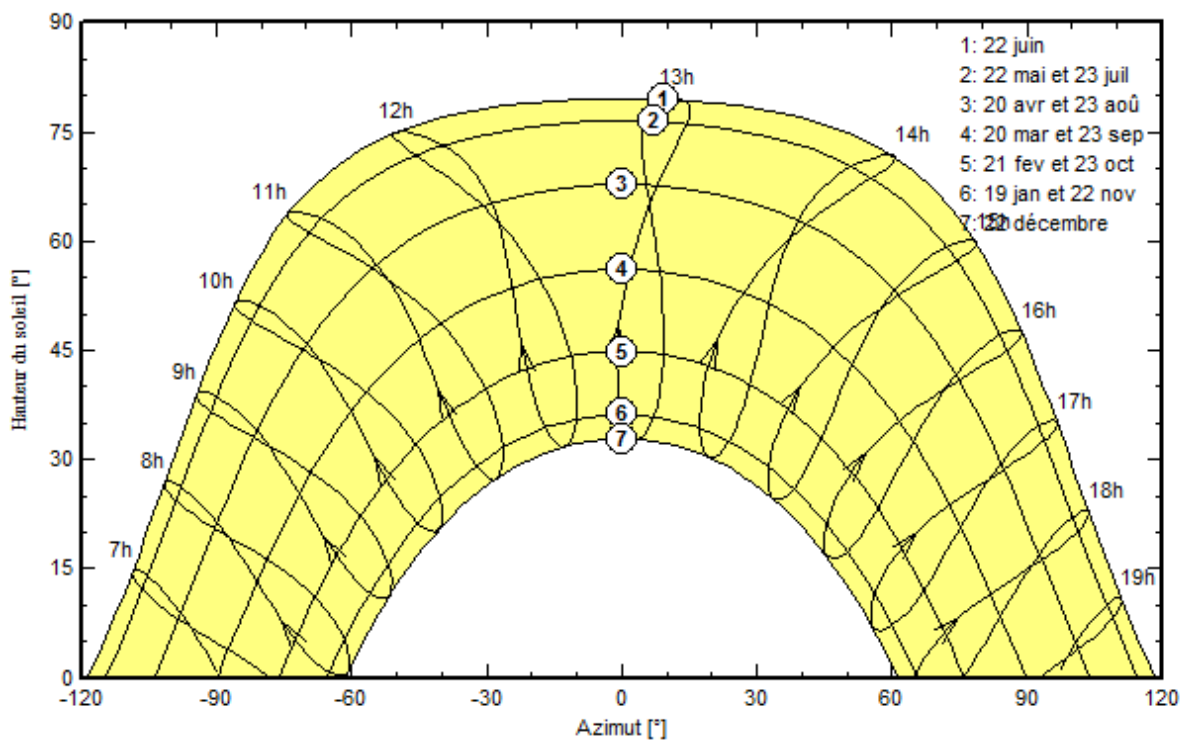


Figure II.4 : trajectoire du soleil

### II.2.2. Dimensionnement du sous-champ de 500kW

Le sous-champ est l'unité constituant le champ GPV, dans cette étude on a choisi 500KW la puissance installée pour chaque sous-champ. Afin d'obtenir la tension nécessaire à l'onduleur, les panneaux sont connectés en série. Ils forment alors une chaîne de modules ou string. Les chaînes sont ensuite associées en parallèle et forment un champ photovoltaïque (champ PV). Le schéma block suivant figure II.5 nous montre les parties de cette installation depuis le GPV jusqu'au réseau.

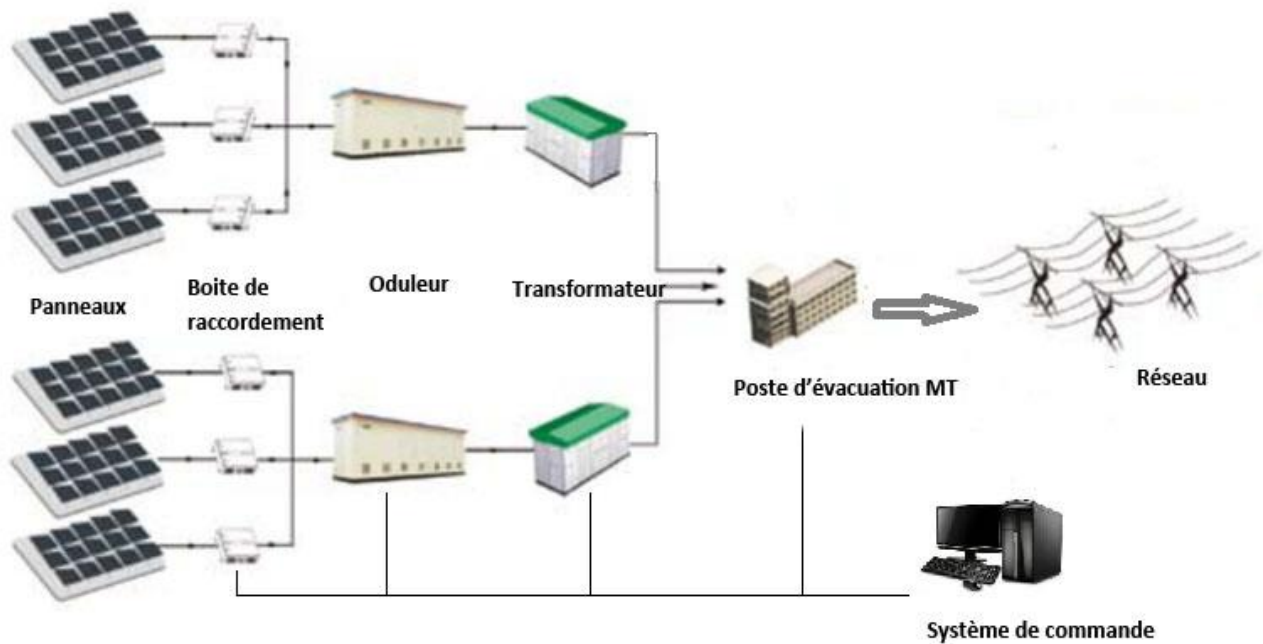


Figure II.5: Schéma block de la chaîne de production du sous-PV au Réseau.[48]

String GPV est déterminé comme :  $\sum_{i=1}^n$  (modules ou panneaux GPV) en série

Structure GPV est définie comme  $\sum_{i=1}^n$  (string GPV) en parallèle où  $n \leq 3$  Max.

Sous-champ GPV est égale  $\sum_{i=1}^n$  (Structure GPV) en parallèle

Champ GPV  $\sum_{i=1}^n$  (Sous-champ GPV) en parallèle.

Multi- champs GPV (for high power and large area);  $\sum_{i=1}^n$  (ChampGPV) en parallèle.

### II.2.2.1. Nombres de module nécessaire

Suite au choix du site lieu qui satisfait le besoin en énergie solaire et de sa superficie, le nombre des modules dépend de la puissance du sous-champ.

$$(mod) = \frac{pC_{(demandé)}}{Pn_{(module)}} \quad (II.32)$$

Avec

Nt : nombre des panneaux ou modules.

Pc : la puissance du sous-champ.

Pn : puissance nominale du module PV.

Alors, ils évident qu'on doit fixer ces modules sur des structures supports en face du rayonnement solaires incidentes ; les structures doivent être fascinées en un plan incliné d'un angle  $\beta$  (angle d'inclinaison du panneau solaire sur le site lieu. [47]

### **II.2.2.2. Nombre de structure**

Le calcul du nombre de structures dépend du nombre de strings et du nombre des modules parallèles, le nombre de strings sera déterminé par la tension (volts) choisie suivant les critères du choix de l'onduleur (inverter) car pour la puissance demandée est hors la gamme des petites tensions (12v,24v,48v,...) dans le cas d'une centrale. Le nombre de modules parallèles sera selon le choix de la puissance de sortie de cette structure. Il est nécessaire de savoir sur la tension d'entrée d'alimentation de l'onduleur choisie et sa sortie.

**Nombre de modules par string** : vue le choix de la tension de la structure et sa puissance :

$V(\text{str}) \text{ volts} \leq [V_{\min}, V_{\max}]$ , imposée par la tension d'entrée de l'onduleur  $V(\text{ond})$ . [47]

$$N_{(\text{mod/string})} = \frac{V_{(\text{str})}}{V_{(\text{mod})}} \quad (\text{II.33})$$

**Nombre de modules par structure** :

$$N_{(\text{mod/structure})} = N_{(\text{mod/string})} \times N_{(\text{string/str})} \quad (\text{II.34})$$

**Nombre de structures** :

Etant connu le nombre des modules par structure, on peut calculer le nombre des structures nécessaires pour satisfaire la puissance demandée. [47]

$$N_{(\text{str})} = \frac{N t_{(\text{mod})}}{N_{(\text{mod.str})}} \quad (\text{II.35})$$

Avec :

$V(\text{str})$ : tension de sortie de structure.

$V(\text{mod})$ : tension nominale de module.

Les jonctions de coordinations entre les différentes parties de l'installation sont :

- Les boîtes de jonctions (J.B...),
- Les boîtes de jonctions (J.B.Adj ou parallèles...) Pour grouper l'ensemble  $n$  des structures,
- L'onduleur et filtre,
- Le Transformateur élévateur pour évacuation de l'énergie électrique vers le réseau électrique,
- Sans oublier les câbles électriques et leurs chemins d'évacuation.
- Dans ceci à chaque phase de connexion entre les parties précédentes, il est incorporé un système électronique son rôle est de transmettre et de recevoir les données du SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition), pour mesure et contrôle. [47]

### II.2.3. Dimensionnement des éléments de conversion d'énergie

Pour la conversion d'énergie DC-AD à la sortie du champ, Il faut que les onduleurs solaires choisis soient équipés de tous les dispositifs nécessaires pour assurer la sécurité de fonctionnement et la protection des personnes et du matériel. Selon les critères indispensables sur le choix des onduleurs. L'équation suivante représente une comparaison entre les paramètres électriques à la sortie du sous-champ PV qui sont correspond aux propriétés de l'onduleur. [47]

$$V_{dc(max)} = \frac{N_{mod}}{string} \times V_{mpp} \quad (II.36)$$

$$I_{sous-champ} = \frac{I_{mpp} \times N_{bp}}{string \times N_{structure}} \quad (II.37)$$

$$P_{max} = I_{max} \times V_{max} \quad (II.38)$$

### II.2.4 Etude de la rentabilité de la centrale

L'indice de rentabilité est défini comme le rapport entre les sommes économiques durant la durée de vie et le cout global. Les années de rentabilités peut être calculé par le cout global de l'installation sur le produit de la production de l'installation fois le cout de kWh. [48]

$$IR = \frac{\text{Les sommes économique durant la durée de vie de cette installation}}{\text{Le cout globale de l'installation}} \quad (II.39)$$

IR : Indice de rentabilité du projet ;

Rentable si  $IR \geq 1$

Non rentable si  $IR < 1$

$$\text{Les années de rentabilité} = \frac{\text{Le cout globale de l'installation}}{\text{La production de l'installation} \times \text{le cout du KWH}} \quad (II.40)$$

Le coût du KWh produit à base des énergies renouvelable est estimé à 0,10 \$/kWh en TTC d'où la durée de vie de ce projet est 20 ans. [48]

## II.3 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation et les caractéristiques une centrale hybride PV-Eolien (Chaine de conversion éolienne et photovoltaïque aussi), ainsi que le coût de la centrale hybride. Les modèles mathématiques du système étudié sont présentés. On commence avec la central éolienne (les modèles des données météorologiques au site, les distributions, ...) On passe après à la chaine photovoltaïque. Ensuite, on étudie la chaine éolienne Où on donne un modèle qui peut calculer la puissance éolienne produite. On passe après à la chaine photovoltaïque, où on fait une modélisation d'un sous-champ de 500KW. Et on finit par le modèle de l'onduleur.

# **Chapitre III**

## **Etude et dimensionnement de la centrale hybride PV/EOLIENNE**

### III.1 Introduction

L'exploitation des potentiels énergétiques (solaire et éolien) pour la production de l'électricité s'avèrent être rentable. A cet effet L'utilisation des systèmes hybrides, combinant ces deux sources d'énergie, permet d'atténuer les fluctuations de la production causées par la nature aléatoire de ces ressources. Dans ce chapitre nous présentons une étude de dimensionnement des deux centrales électriques, la centrale photovoltaïque est de 60MW et la centrale éolienne est de 30MW avec un système de stockage utilisant les piles à combustible. Notre étude est focalisée au site d'El Kheng willaya de Laghouat terminant avec l'étude économique de chaque centrale.

### III.2 Etude de la centrale éolienne

#### III.2.1 Présentation du site

Le site d'El KHNEG se situe à la partie sud-ouest 13 km de la ville de Laghouat. Le Tableau III.1 présente les coordonnées géographiques du site.

Tableau III.1 : coordonnées géographiques du site El KHNEG

Coordonnées du site	
Latitude	33°43 Nord
Longitude	02°48 Est
Altitude	812 m

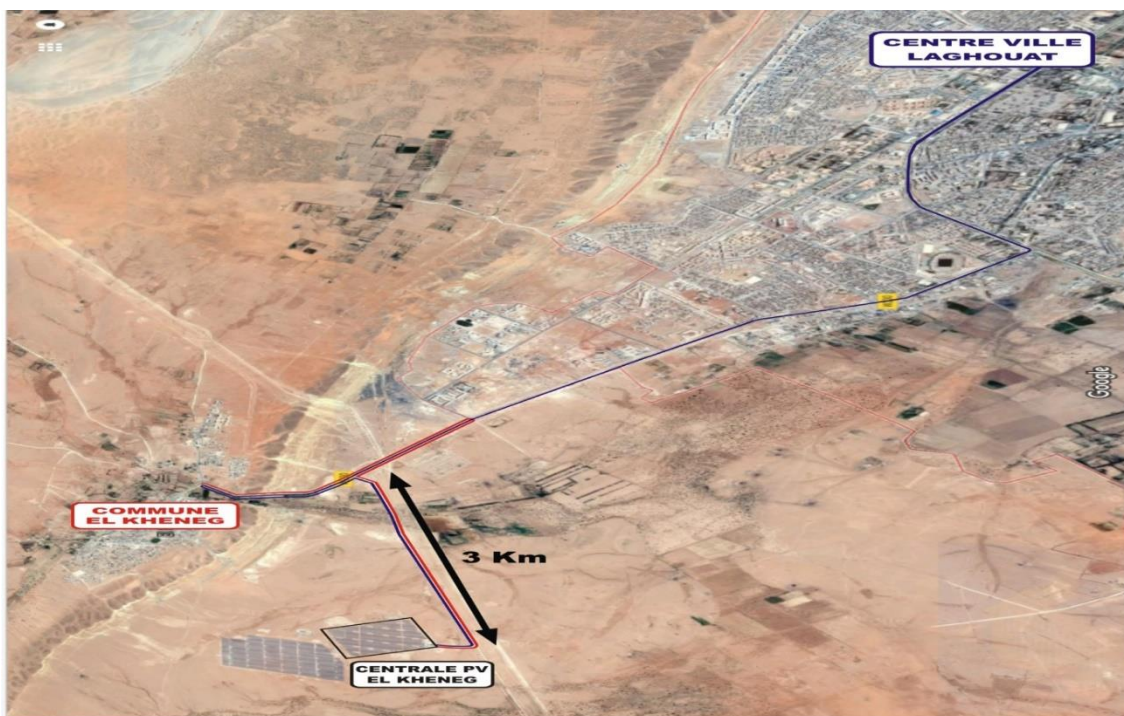


Figure (III.1) : Plan de situation de la centrale

### III.2.2 Résultats de la simulation

#### ➤ Caractérisation spatio-temporelle

Les résultats de l'étude statistique journalière des relevés de vitesses du vent à 10 m de hauteur dont la distribution de Weibull. Les paramètres du vent sont présentés respectivement par les figures (III.2 et III.3), et les tableaux (III.2), (III.3).

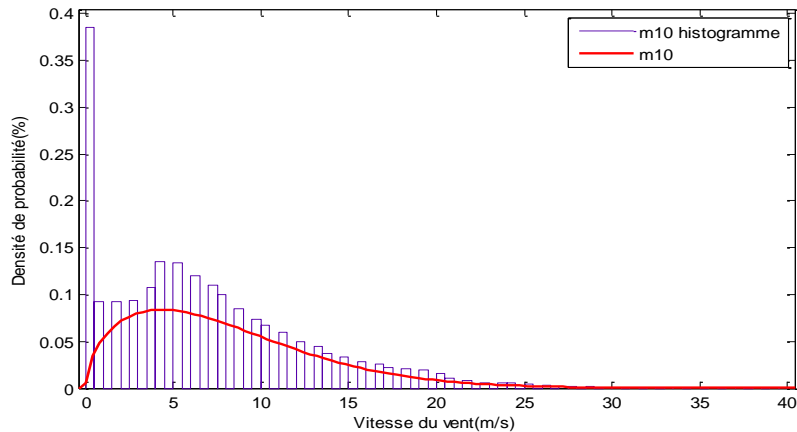


Figure (III.2) : La distribution annuelle de Weibull

Tableau (III.2) : les paramètres du vent de la région (à10m)

K	C [m/s]	<V> [m/s]	VEm [m/s]	VF [m/s]	Pdis/A[W/m <sup>2</sup> ]
1.51346	8.92252	6.456	15.5654	4.3681	685.904

#### ➤ Extrapolation des paramètres du vent

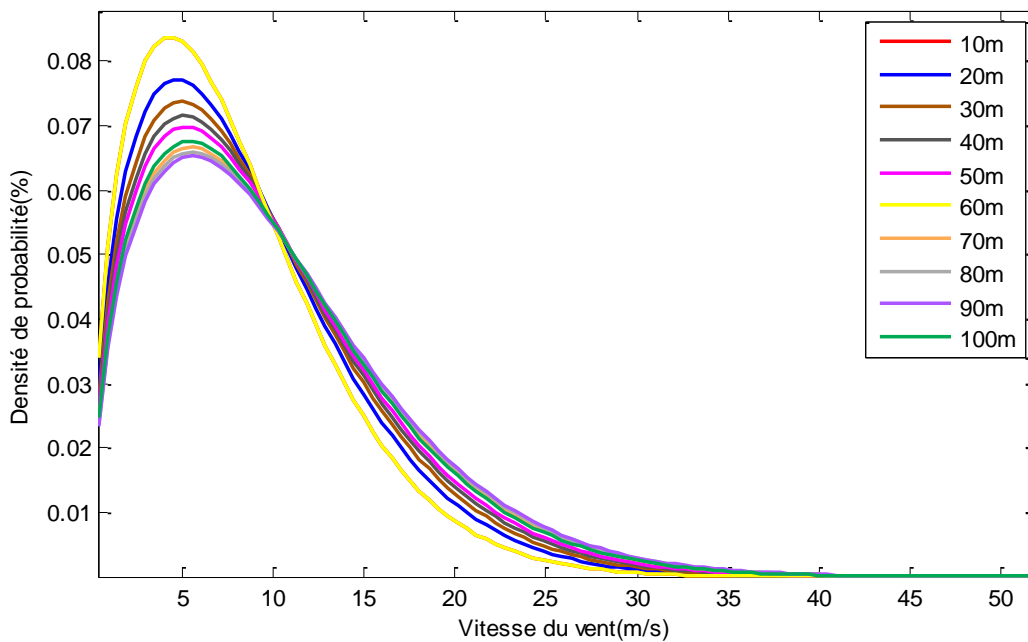


Figure (III.3) : Distribution de Weibull a déférente hauteur.

**Tableau (III.3) : les paramètres du site à déférente hauteurs.**

Paramètre du site	K	C	<V>[m/s]	VEM [m/s]	VF [m/s]	Pdis/A [W/m <sup>2</sup> ]
10m	1.51346	8.9225	6.456	15.5654	4.3681	685.904
20m	1.51346	9.6849	7.008	16.8955	4.7414	877.189
30m	1.51346	10.1309	7.33	17.6735	4.9597	1015.01
40m	1.51346	10.4474	7.559	18.2256	5.1146	1101.09
50m	1.51346	10.6928	7.737	18.6537	5.2348	1180.534
60m	1.51346	10.8892	7.882	18.9963	5.3309	1248.211
70m	1.51346	11.0629	8.005	19.2994	5.4160	1307.409
80m	1.51346	11.2098	8.111	19.5556	5.4897	1360.177
90m	1.51346	11.3394	8.205	19.7817	5.5513	1407.885
100m	1.51346	11.4553	8.289	19.9839	5.6081	1451.494

### III.2.3 Adaptation et choix des aérogénérateurs

L'analyse suivante vise à aider les concepteurs et les utilisateurs à choisir l'éolienne la plus appropriée pour une centrale éolienne de 30MW pouvant être l'installé à notre région. Dans ce contexte, cinq éoliennes commerciales (WinWinD WWD-1 D60, General Electric GE 1.5sl, Enercon E-82 E2 2.000, Gamesa G114-2.5MW, Vestas V90-3.0) avec des puissances nominales différentes ont été sélectionnés. Les données techniques des modèles d'éoliennes choisies sont résumées dans le tableau (III.3) et les courbes des puissances sont indiquées sur la figure (III.9). Pour l'installation d'une centrale éolienne de 30MW on a besoin soit de : 30 éoliennes (WWD-1 D60 de 1MW) ou bien 15 éoliennes (General Electric GE 1.5sl de 1.5MW), ou 14 éoliennes (GE1.5L de 1.5MW) ou bien 8 éoliennes Enercon E-82 E2 de 2MW), ou 12 éoliennes (Gamesa G114 de 2.5MW), ou bien 10 éoliennes (Vestas V90 de 3MW).

**Tableau (III.4) Données techniques des différentes éoliennes commerciales utilisées.**

Type D'éolienne	Vitesse de démarrage [m/s]	Vitesse de coupure [m/s]	Vitesse de nominale [m/s]	Puissance nominale [Kw]	Densité de Puissance [W/ m <sup>2</sup> ]	Hauteur de la nacelle [m]	Diamètre du rotor [m]
WWD-1 D60	3.6	20	12.5	1000	353.7	50/70	60
GE 1.5sl	4	25	13	1500	322.1	64.7/80/85/100	77
V90 2MW	4	25	13	2000	314.4	80/95/105	90
G114-2.5MW	2	25	10	2500	244.9	64/80/93/120/140	114
V90-3.0	4	25	15	3000	471.5	80/105	90

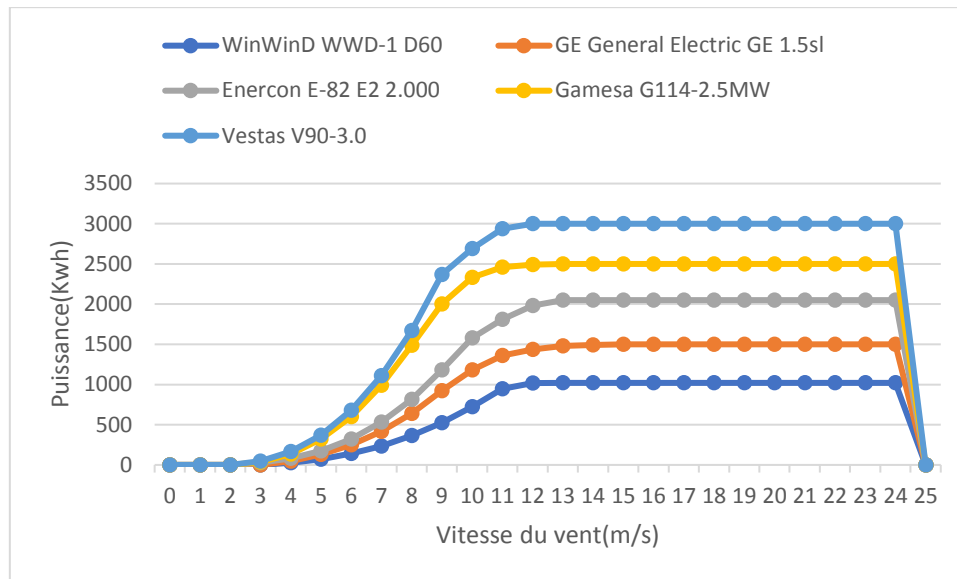


Figure (III.4) : Courbes de puissance des éoliennes choisies.

Tableau (III.5) : les paramètres du site pour les éoliennes choisies

Paramètres du site	k	c	<v> [m/s]	VEM [m/s]	Pdis/A [W/m <sup>2</sup> ]	VF [m/s]
WWD-1 D60	1.51346	10.7996	7.882	18.84	1248.211	5.2871
GE 1.5sl	1.51346	11.033	8.06	19.2477	1334.499	5.4015
V90 2MW	1.51346	11.2765	8.159	19.6720	1384.596	5.5205
G114-2.5MW	1.51346	11.1644	8.248	19.4764	1430.153	5.4657
V90-3.0 MW	1.51346	11.281	8.327	19.6798	1471.99	5.5227

L'énergie annuelle a été obtenue en utilisant la courbe de puissance fournie par le constructeur et les données de vent du site. La figure (III.5) montre la production d'énergie annuelle et le facteur de capacité des éoliennes choisies et le tableau (III.6) représente la production annuelle et le facteur de capacité et le taux de fonctionnement des éoliennes installées.

L'énergie annuelle de la centrale de 30 MW varie de 113.850GWh pour (WWD-1 D60) à 162.327GWh pour (Vestas V90-3.0).

La production annuelle d'une éolienne est aussi exprimée par le facteur de capacité de la turbine. Selon la valeur de ce facteur est généralement affectée par la nature intermittente du vent, la disponibilité de la machine et le rendement de la turbine. Il varie habituellement de 42% à 61 %.

Le facteur de capacité de notre étude varie légèrement entre 42% pour (Vestas V90-3.0) et 61% pour (Gamesa G114-2.5MW). Ceci permet de noter que le facteur de capacité ne dépend pas essentiellement de la taille de l'éolienne.

Le taux de fonctionnement varie entre 3680 pour (Vestas V90-3.0) et 5344 pour (Gamesa G114-2.5MW).

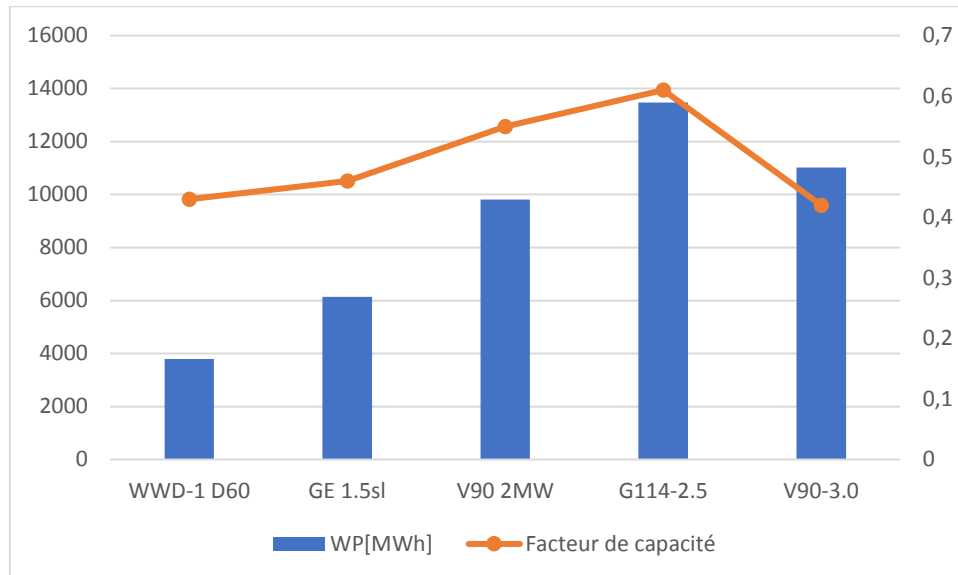


Figure (III.5) : la production annuelle et le facteur de capacité de chaque éolienne.

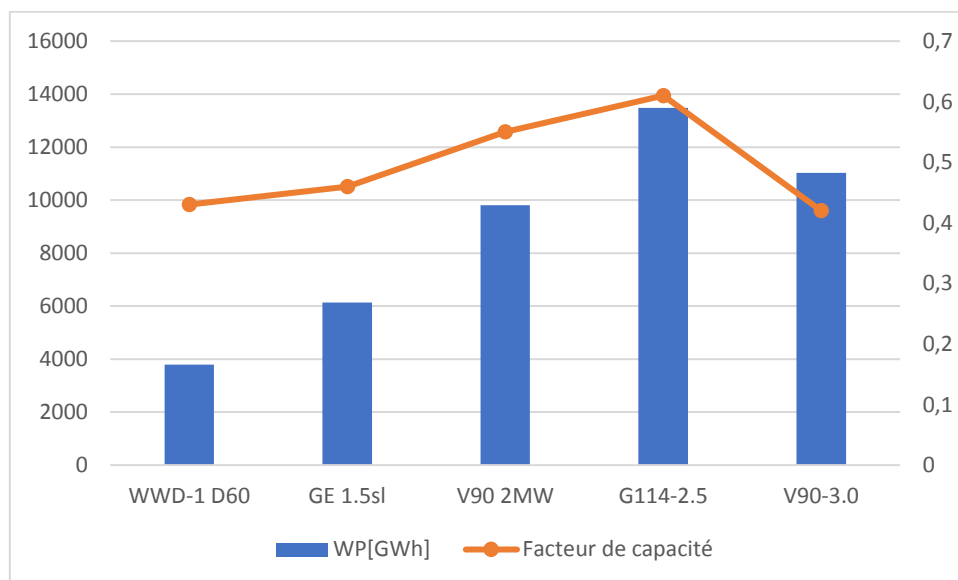


Figure (III.6): la production annuelle et le facteur de capacité de chaque centrale.

Les facteurs de capacité à l'El KHNEG sont supérieurs à la valeur minimale recommandée de 25 % pour toutes les éoliennes. Cela fait suite à l'observation précédente selon laquelle l'emplacement d'El KHNEG est un excellent site pour l'exploitation de l'énergie éolienne.

D'après le facteur de capacité des modèles des éoliennes choisis, le modèle Vestas V90/2 MW sera le meilleur choix.

**Tableau (III.6) : Production annuelle, capacité facteur, et taux de fonctionnement de chaque éolienne**

	WWD-1 D60	GE 1.5sl	V90 2MW	Gamesa G114- 2.5MW	Vestas V90-3.0
E <sub>out</sub> (GWh)	3.795	6.137	9.808	13.476	11.023
Cf	0.43	0.46	0.55	0.61	0.42
Eh	3767	4030	4818	5344	3680

L'éolienne meilleure à installer d'après l'énergie annuelle produite du parc éolien proposé est le type Gamesa G114-2.5MW, non seulement à cause de son mât qui est de 105 mètres, mais présentant également le facteur de capacité très important 0,61.

Pour notre premier choix nous proposons 12 éoliennes du type Gamesa G114-2.5MW le second à 10 éoliennes du type Vestas V90, 2MW les deux alternatives proposées produisent respectivement environ 161.718 GWh/an et 147.132 GWh/an.

**Tableau (III.7) : dimensions optimales de terrain d'implémentation.**

	N1	N2	I <sub>opt</sub> [m]	L <sub>opt</sub> [m]	S <sub>opt</sub> [Hectare]
WinWinD WWD-1 D60	30	1	620	360	22.32
	15	2	320	540	17.28
	10	3	220	720	15.84
	6	5	140	1080	15.12
GE General Electric GE 1.5sl	20	1	787.5	462	36.38
	10	2	412.5	693	28.58
	5	4	225	1155	25.98
Vestas V90 2MW	15	1	906.6	492	44.60
	5	3	340	984	33.45
G114-2.5MW	12	1	1029.16	684	70.39
	6	2	544.16	1026	55.93
	4	3	395.8	1368	<b>54.14</b>
Vestas V90-3.0	10	1	1155	540	62.10
	5	2	630	810	51.03

### III.2.4 Analyse des coûts énergétiques

L'analyse économique a été réalisée pour estimer le coût du kWh produit par la centrale éolienne de 30 MW. Le coût spécifique de l'éolienne dépend de la puissance nominale et varie selon les fabricants. Ainsi, nous considérons un intervalle de bande (valeurs maximales et

minimales). Le tableau (III.8) montre le coût spécifique des éoliennes pour différentes gammes de taille [49,50, 51]. Le coût par kW diminue avec l'augmentation de la taille de l'éolienne. Pour les éoliennes de plus de 200 kW, le coût de l'éolienne peut être fixé à 1150 \$/kW (moyenne entre le minimum de 700 \$/kW et le maximum de 1600 \$/kW).

**Tableau (III.8) : Gamme de coût spécifique des éoliennes en fonction de la puissance nominale**

Taille de l'éolienne (kW)	Coût spécifique (\$/kW)	Coût spécifique moyen (\$/kW)
<20	2200-3000	2600
20-200	1250-2300	1775
200>	700-1600	1150

L'estimation des coûts a été faite sous les hypothèses suivantes [52] :

- Le coût d'O&M et de réparation est considéré comme représentant 15 % du coût annuel de l'éolienne (prix de la machine/durée de vie).
- Le taux d'intérêt (d) et le taux d'inflation (i) ont été respectivement de 8% et 6%.
- La durée de vie de l'éolienne (T) a été supposée être de 20 ans.
- Les autres coûts initiaux, y compris les travaux de génie civil, l'installation, les câbles de connexion au réseau et l'alimentation conditionnement sont supposés représenter 30 % du coût de l'éolienne.

Les résultats de l'analyse des coûts sont présentés dans le tableau (III.9).

**Tableau (III.9) : Analyse des coûts pour chaque éolienne installée à l'aide de différents modèles d'éoliennes (\$/kWh).**

Modèle	Énergie annuelle (MWh)	Facteur de capacité	Coût unitaire (\$/kWh)
WWD-1 D60	3795.017	0.43	0.049
GE 1.5sl	6137.192	0.46	0.050
V90 2MW	9808.824	0.55	0.041
G114- 2.5MW	13476.523	0.61	0.035
V90-3.0	11023.552	0.42	0.058

D'après l'analyse des coûts, on constate que :

- Le coût du kWh dépend de l'éolienne et varie entre 0,035 \$/kWh et 0,058 \$/kWh.
- Le coût minimum et maximum du kWh est obtenu pour le G114, et le V90.

**Tableau (III. 10) : Analyse des coûts pour une centrale éolienne de 30 MW installée à l'aide de différents modèles d'éoliennes (\$/kWh).**

Modèle de turbine	Énergie annuelle (GWh)	Facteur de capacité	Coût unitaire (\$/kWh)	Surface [Hectare]
WWD-1 D60	113.850	0.43	0.049	15.12
GE 1.5sl	122.743	0.46	0.050	25.98
V90 2MW	147.132	0.55	0.041	33.45
G114-2.5MW	162.327	0.61	0.035	54.14
V90-3.0	110.235	0.42	0.058	51.03

La centrale meilleure à installer à notre région d'après le cout unitaire est le type Gamesa G114-2.5MW non seulement à cause de son cout, mais présentant également le facteur de capacité très important 0,61 et la meilleure énergie annuelle produite (162.327GWH).

Les résultats de cette étude en cours encouragent la construction d'une centrale éolienne à notre région.

### III.2.5 Analyse des coûts énergétiques du système de stockage

Dans cette partie nous voulons calculer la masse d'hydrogène à stocker sous forme d'énergie renouvelable nouvelle, le cout de l'électrolyseur et le cout de production de chaque Kg d'hydrogène. Les résultats de calcule sont illustrées dans le tableau (III.11).

**Tableau (III.11) : Analyse des coûts pour le système de stockage.**

Modèle de turbine	Énergie annuelle (GWh)	La masse d'hydrogène (Tonne/an)	Coût de la production d'hydrogène (\$/Kg)
WWD-1 D60	113.850	1478.57	1.850
GE 1.5sl	122.743	1794.571	1.520
V90 2MW	147.132	1934.785	1.410
G114-2.5MW	162.327	2075.828	1.316
Vestas V90-3.0	110.235	2059.417	1.330

D'après l'analyse des coûts, on constate que :

- Le coût du Kg dépend de l'éolienne et varie entre 1.316 \$/Kg et 1.850 \$/Kg.

- Le coût minimum et maximum du kWh est obtenu pour le Gamesa G114-2.5MW et le WinWinD WWD-1 D60.

### **III.3. Etude de la centrale photovoltaïque**

Suivant la disponibilité des panneaux solaires, on a choisi L'YL250P-29b pour notre installation :

**Tableau (III.11) : les caractéristiques techniques du module choisi.**

Pn	250 [Wc]	Nombre des cellules	60
Imp	8.24 Amps	Efficacité maximale	15.3%
Isc	8.79 Amps	NOCT	46°C
Vmp	30.4 Volts	Calibre de fusible série	15 Amps
Voc	38.4 Volts	Tension max du système	1000 volts
Longueur	1650 mm	Poids	19.1 Kg
Profondeur	40 mm	Type	Silicium poly cristallin
Longueur du fil de sortie	1100 mm	Jauge de fil de câble de sortie	12AWG

Selon notre choix et la puissance demandée, la tension de string, la tension d'entrée de l'onduleur, les caractéristiques de module le dimensionnement du sous champ est illustré dans le tableau III.3 :

- Pc installée (demandée) : 500KWc ;
- Pn (module) : 250W ;
- Vm (module) : 30.4 Volts ;
- La tension d'entrée de l'onduleur est entre 450- 860 ;
- Vstring : 655volts ; on prend V string comme la moyenne de 450 et 860 ;
- N string/structure : 2 ; on a choisi comme optimisation deux strings par structure vue

Les critères des contraintes sur support de la structure et pour la facilité de l'entretien et la maintenance.

**Tableau (III.12) : résultats de dimensionnement de sous champ de 500Kw**

Nombre total de module $N_t$	Nombre de module par string $N_{mod/str}$	Nombre de module par structure $N_{mod/stru}$	Nombre de structure $N_{stru}$
2024	22	44	46

### III.3.1 Implémentation du sous-champ

Les résultats de l'implémentation des sous champs sont représentés dans le tableau III.13

**Tableau (III.13) : résultats d'implémentation du sous champ [m<sup>2</sup>].**

N <sub>mod</sub>	D <sub>moy</sub>	W <sub>1</sub>	A <sub>mod</sub> (m <sup>2</sup> )	A <sub>tot/module</sub>	A <sub>tot /sou-champ</sub>	A <sub>tot/centrale</sub>
2024	6.79	3.62	1.633	3305.192	3022,33	362767.68

Avec :

A<sub>mod</sub> est la surface de module ;

A<sub>tot/mod</sub> est la surface totale des modules (A<sub>mod</sub> \* 2024) ;

A<sub>tot /sou-champ</sub> est la surface totale incliné d'un sous-champ ;

A<sub>tot/centrale</sub> est la surface totale optimale de la centrale.

Alors la superficie totale optimale de la totalité de la station base de production doit être au tour **36.28** hectares.

### III.3.2 Dimensionnement des éléments de conversion d'énergie

Pour la conversion d'énergie DC-AD à la sortie du champ, Il faut que les onduleurs solaires choisis soient équipés de tous les dispositifs nécessaires pour assurer la sécurité de fonctionnement et la protection des personnes et du matériel. Selon les critères indispensables sur le choix des onduleurs, le tableau (III.14) représente les caractéristiques électriques de l'onduleur choisi :

**Tableau (III.14) : Caractéristiques de l'onduleur**

La tension maximale d'entrée Vdc(max)	900 Vdc
Les tensions tensions d'entrée	450 ≈ 820 Vdc
Le courant maximal	1200 A
La puissance maximale	550 kWp

Le tableau (III.15) représente une comparaison entre les paramètres électriques à la sortie du sous-champ PV qui sont correspond aux propriétés de l'onduleur.

**Tableau (III.15) : Caractéristiques électriques à la sortie du sous-champ PV**

Vdc(max) = N <sub>mod</sub> /sting*V <sub>mpp</sub>	668.8 < 900
Vdc (sous-champ)	450 Vdc < 668.8 < 820 Vdc
I <sub>sous-champ</sub> (max) = I <sub>mpp</sub> *N <sub>bp</sub> /string*N <sub>structure</sub>	758.08 A < 1200 A
P <sub>max</sub> = I <sub>max</sub> * V <sub>max</sub>	507 kW < 550kw

Notre choix est basé sur un transformateur élévateur de (315/31000) volts.

### **III.3.3 Simulation de la centrale PV raccordé au réseau**

Lorsqu'on s'équipe en énergie renouvelable, il est important de respecter les étapes de dimensionnement qui permettront de dimensionner la source d'énergie. Puis vient le chiffrage de l'énergie solaire récupérable selon l'emplacement et la situation géographique. Avec ces données, il sera alors possible de connaître la quantité de modules photovoltaïques nécessaires, la quantité de batteries (en cas d'une installation autonome), le régulateur ainsi que l'onduleur les mieux adaptés, et enfin le câblage adéquat. En fin La simulation calcule la distribution des énergies tout au long de l'année. Un rapport complet avec tous les paramètres impliqués et les résultats principaux, est conçu pour être directement transmis à l'utilisateur.

### **III.3.4 Présentation de logiciel de simulation PVSYST**

PVsyst est un logiciel conçu pour être utilisé par les architectes, les ingénieurs et les chercheurs, mais c'est aussi un outil pédagogique très utile. Il inclut une aide contextuelle approfondie, qui explique en détail la procédure et les modèles utilisés et offre une approche ergonomique avec guide dans le développement d'un projet. PVsyst permet d'importer des données météo d'une dizaine de sources différentes ainsi que des données personnelles. [54]

### **III.3.5 Gestion du projet**

Après la définition du projet, on passe au choix du site de l'installation puis l'appelle des données météorologiques à partir de la base des données du logiciel comme il possède l'alternative de poursuivre ces données en line.

On peut construire plusieurs variétés de notre système vis-à-vis sa topologie et selon les conditions et l'optimisation adaptée.

La conception du système est basée sur une procédure rapide et simple selon les étapes suivantes figure (III.10) :

- Spécifier la puissance désirée ou la surface disponible ;
- Choisir les modules PV dans la base de données interne ;
- Choisir l'onduleur dans la base de données interne.

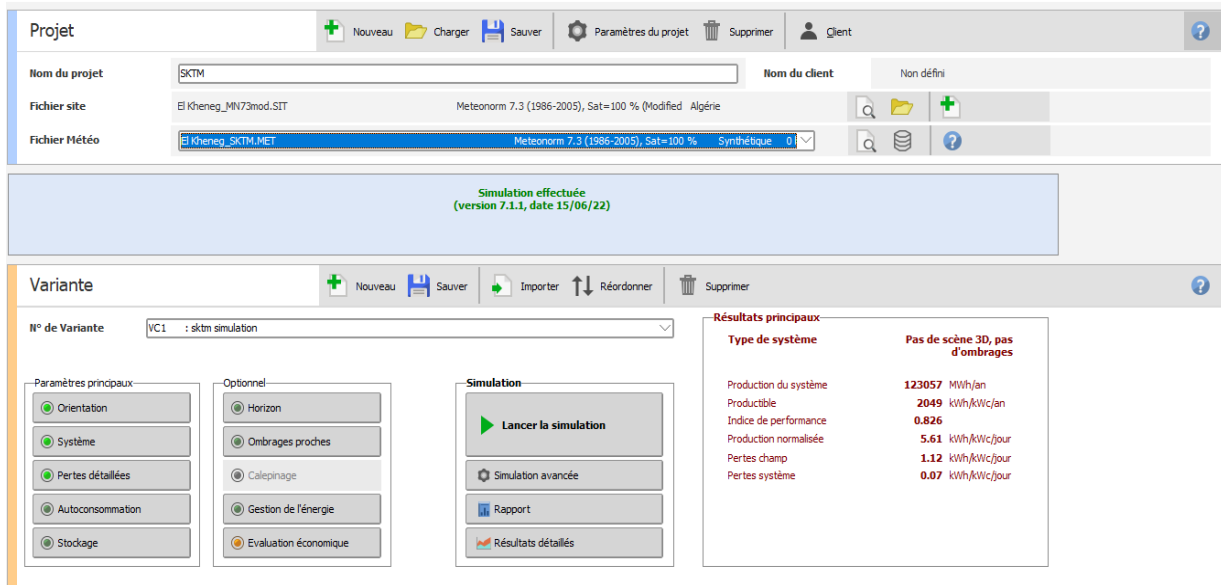


Figure (III.10) : Désignation du projet dans PVSYS.

La figure (III.11) représente le schéma synoptique d'un sous-champ qui montre les principaux composants constituant la centrale PV connectée au réseau simulé par le PVsyst.

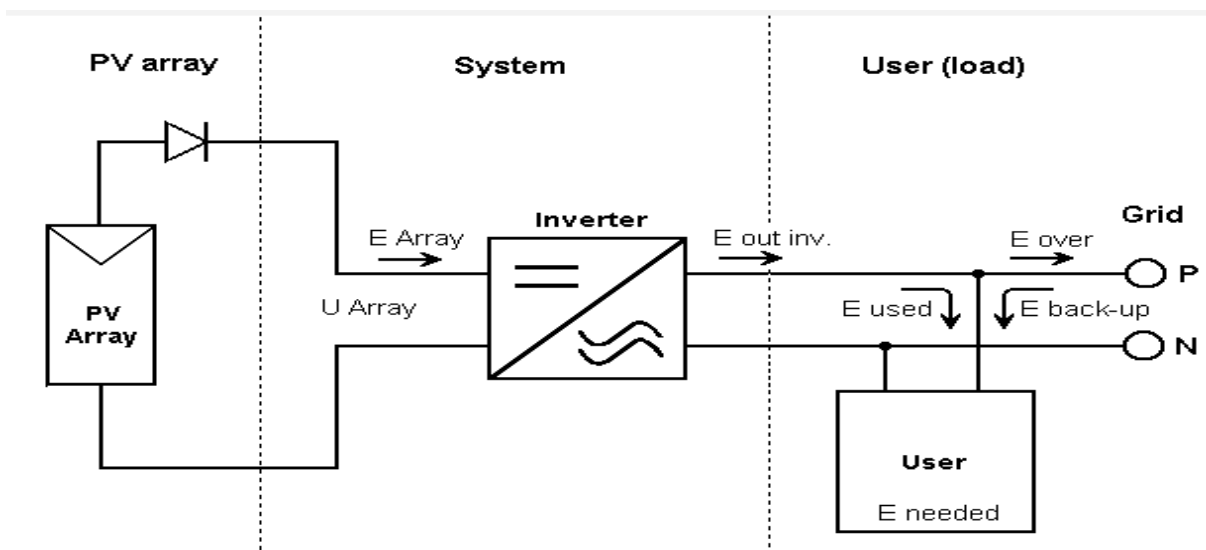


Figure (III.11) : schéma synoptique du projet.

### III.3.6 Paramètres de la simulation

Les paramètres de la simulation de la centrale PV de 60MW sont déjà définis (choix de module, et choix de l'onduleur), les courbes caractéristiques du module, les variations I-V et P-V selon l'irradiation et la température sont présentées dans la figure (III.12). Les données météorologiques et climatiques de la région ciblée sont résumées respectivement dans la figure (III.13) et le tableau (III.16)

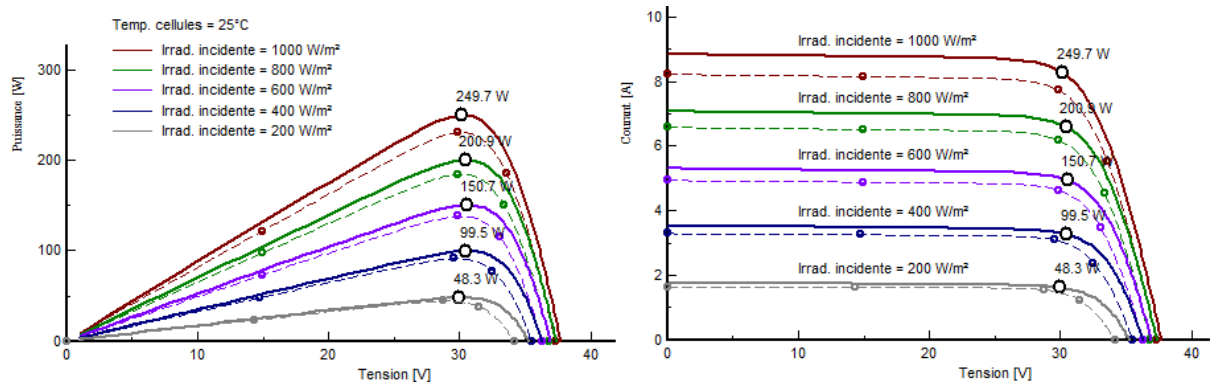


Figure (III.12) : Caractéristiques du module choisi selon la variation  $G$ , et  $T$ .

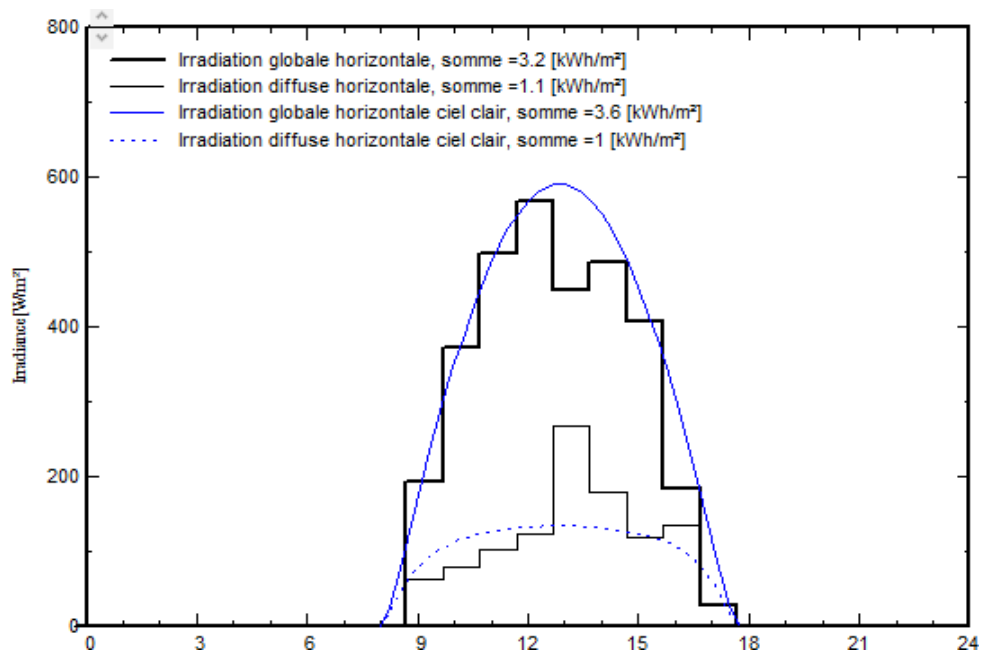


Figure (III.13) : Variation journalière de l'irradiation.

Tableau (III.16) : Variation mensuelle de l'irradiation solaire.

Début intervalle	GlobHor kWh/m <sup>2</sup> /mois	DiffHor kWh/m <sup>2</sup> /mois
Janvier	110.1	31.6
Février	129.2	34.4
Mars	183.1	51.9
Avril	205.0	62.3
Mai	226.2	75.7
Juin	237.5	64.6
Juillet	255.3	68.5
Août	221.8	64.8
Septembre	167.5	52.3
Octobre	145.0	48.9
Novembre	103.5	35.1
Décembre	96.6	31.4
Année	2080.8	621.4

Le PVSYST propose une configuration de système, qui permet de réaliser une première simulation/évaluation, la Figure (III.14) montre un exemple de dimensionnement optimal d'un sous-champ de 500kW.

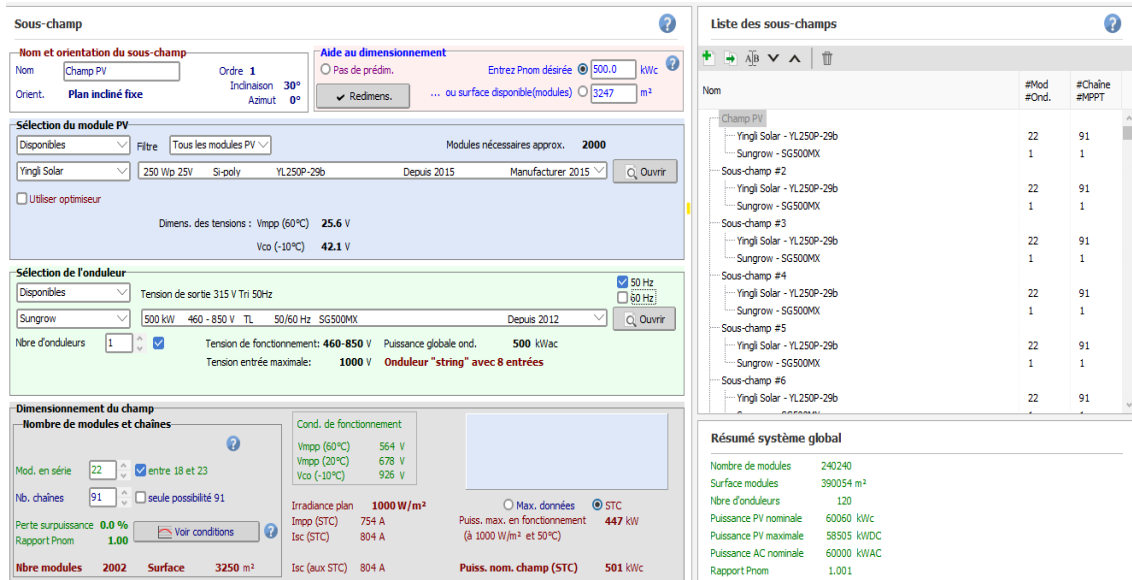


Figure (III.14) : Evaluation du dimensionnement.

### III.3.7 Résultats de simulation

Dans cette partie nous présentons les principaux résultats optimaux de la simulation, commençant par un sous champ suivi par la simulation globale de la centrale (120 sous-champ). Comme illustre la figure (III.14), un sous-champ PV sera constitué de 2002 de modules PV répartis sur une surface de 3247 m<sup>2</sup>, comme suit :

22 Modules connectés en série.

91 Modules connectés en parallèle.

Le nombre d'onduleur est égal à 1 unité avec une puissance globale de 500 KW/AC. La production d'énergie totale d'un sous-champ dans les conditions climatiques de la région d'EL Kheng est de l'ordre de 123057MWh/an, avec un rapport de productibilité de 2049kWh/kWc/an. La production journalière d'un sous-champ est égale à 5.61kWh/kWc/jour avec des pertes de 1.12 kWh/kWc/jour et un indice de performance de 0.8261.

D'après les résultats (tableau III.17), on voit bien que l'énergie produite par le champ photovoltaïque  $E_{Array}$  illustrée sur la figure (III.15) est proportionnelle aux valeurs d'énergie incidente ( $G_{lobInc}$ ). La production du système (à la sortie de l'onduleur :  $Yf$ ) est représentée par la figure (III.16). Les pertes  $Lc$  et  $Ls$  sont les pertes correspondantes au champ PV et dues à l'onduleur, respectivement.

Tableau (III.17) : Bilans et résultats principaux

	GlobHor	DiffHor	T_Amb	GlobInc	GlobEff	EArray	E_Grid	PR
	kWh/m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>	°C	kWh/m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>	kWh	kWh	ratio
Janvier	110.3	24.38	5.51	179.7	177.1	9706058	9593791	0.889
Février	122.2	30.32	7.58	172.7	170.1	9189873	9086936	0.876
Mars	185.3	35.90	12.14	227.7	224.0	11653300	11512481	0.842
Avril	209.4	48.95	14.64	222.9	217.9	11262840	11129904	0.831
Mai	238.7	62.05	20.25	229.2	223.7	11320085	11184384	0.813
Juin	246.6	63.10	26.30	226.6	221.2	10834534	10702906	0.786
Juillet	251.2	76.71	30.65	237.0	231.6	11028589	10893699	0.765
Août	226.9	69.72	29.12	233.0	228.3	10927448	10795811	0.771
Septembre	176.4	50.18	22.59	203.9	200.0	10007292	9890495	0.808
Octobre	148.9	38.20	18.47	199.0	195.7	10014614	9898814	0.828
Novembre	115.8	22.83	10.42	181.3	179.0	9535861	9426863	0.866
Décembre	99.2	22.58	6.67	167.3	165.0	9041172	8940771	0.890
Année	2130.9	544.92	17.09	2480.3	2433.5	124521666	123056854	0.826

Facteurs normalisés de production et de pertes: Puissance nominale 60.06 MWc

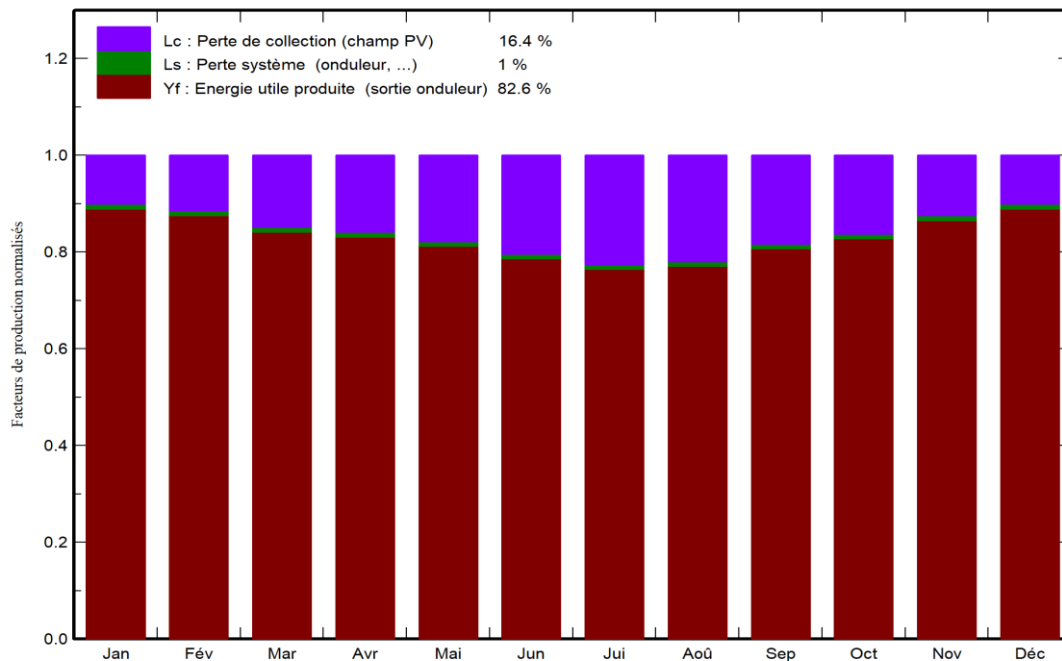


Figure (III.15) : Énergie utile produite par le sous-champ PV (à la sortie de l'onduleur).

La figure (III.16) représente l'indice de performance qui est défini par le rapport de la production du système ( $Yf$ ) par l'énergie incidente de référence ( $Yr$ ) tel que :  $PR = Yf/Yr$ . Autrement dit, il représente l'efficacité globale du système par rapport à ce qu'on pourrait

atteindre selon la puissance installée et peut atteindre 80 % dans les meilleures installations PV. L'énergie produite peut être donnée par la relation :

**Énergie produite = P<sub>nom</sub>.E<sub>inc</sub>.PR**, où : **P<sub>nom</sub>** est la puissance nominale de l'installation.

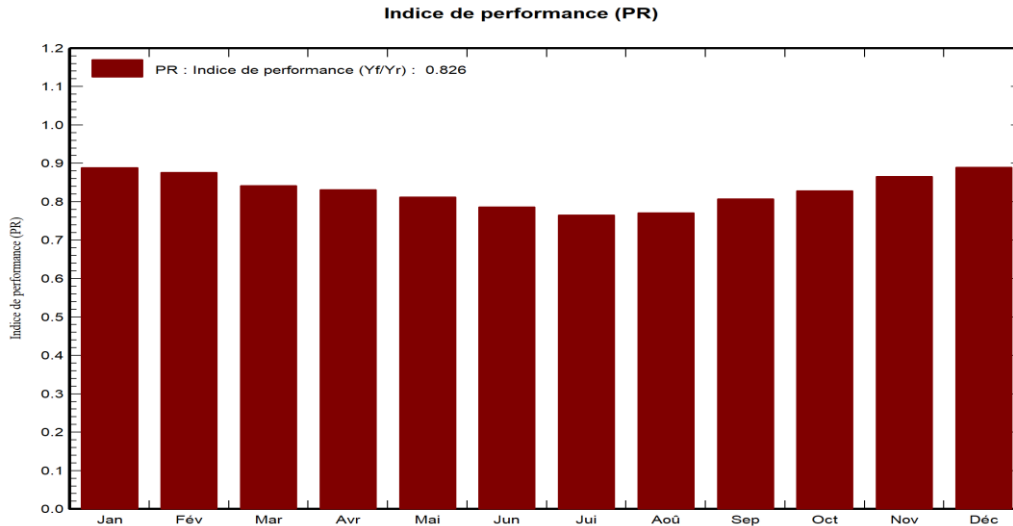


Figure (III.16) : Indice de performance du sous-champ.

### III.3.8 Simulation de la centrale PV connectée au réseau

Notre centrale est composée de 120 sous-champ la figure II.17 résume le dimensionnement total. La centrale est constituée de 240240 modules occupant une surface de 120 hectares (La surface de séparation n'est pas calculée), 120 onduleurs.

**Sous-champ**

**Nom et orientation du sous-champ**  
 Nom: Champ PV, Ordre: 1, Orient.: Plan incliné fixe, Inclinasion: 30°, Azimut: 0°

**Aide au dimensionnement**  
 Pas de prédim., Entrez P<sub>nom</sub> désirée: 500.0 kWc, Redimens., ou surface disponible(modules): 3247 m²

**Sélection du module PV**  
 Disponibles: Tous les modules PV, Filtre: Tous les modules PV, Modules nécessaires approx.: 2000  
 Yingli Solar, 250 Wp 25V, Si-poly, YL250P-29b, Depuis 2015, Manufacturier 2015

Dimens. des tensions : V<sub>mpp</sub> (60°C) 25.6 V, V<sub>oc</sub> (-10°C) 42.1 V

**Sélection de l'onduleur**  
 Disponibles: Sungrow, Tension de sortie 315 V Tri 50Hz, 500 kW, 460-850 V, TL, 50/60 Hz, SG500MX, Depuis 2012  
 Nbre d'onduleurs: 1, Tension de fonctionnement: 460-850 V, Puissance globale ond.: 500 kWac, Tension entrée maximale: 1000 V, Onduleur "string" avec 8 entrées

**Dimensionnement du champ**  
 Nombre de modules et chaînes: Mod. en série: 22, entre 18 et 23, Nb. chaînes: 91, seule possibilité 91  
 Perte surpuissance: 0.0%, Rapport P<sub>nom</sub>: 1.00, Voir conditions  
 Cond. de fonctionnement: V<sub>mpp</sub> (60°C) 564 V, V<sub>mpp</sub> (20°C) 678 V, V<sub>oc</sub> (-10°C) 926 V  
 Irradiance plan: 1000 W/m², I<sub>mp</sub> (STC) 754 A, I<sub>sc</sub> (STC) 804 A, P<sub>uiss. max. en fonctionnement</sub> (à 1000 W/m² et 50°C) 447 kW, P<sub>uiss. nom. champ (STC)</sub> 501 kWc

**Liste des sous-champs**

Nom	#Mod #Ond.	#Chaîne #MPPT
Champ PV		
Yingli Solar - YL250P-29b	22	91
Sungrow - SG500MX	1	1
Sous-champ #2		
Yingli Solar - YL250P-29b	22	91
Sungrow - SG500MX	1	1
Sous-champ #3		
Yingli Solar - YL250P-29b	22	91
Sungrow - SG500MX	1	1
Sous-champ #4		
Yingli Solar - YL250P-29b	22	91
Sungrow - SG500MX	1	1
Sous-champ #5		
Yingli Solar - YL250P-29b	22	91
Sungrow - SG500MX	1	1
Sous-champ #6		
Yingli Solar - YL250P-29b	22	91

**Résumé système global**

Nombre de modules: 240240, Surface modules: 390054 m², Nbre d'onduleurs: 120, Puissance PV nominale: 60060 kWc, Puissance PV maximale: 58505 kWDC, Puissance AC nominale: 60000 kWAC, Rapport P<sub>nom</sub>: 1.001

Figure (III.17) : Configuration de la centrale PV à simuler.

Les principaux résultats de la simulation de la centrale effectuée par le logiciel PVsyst sont donnés tels que, la figure III.17 résume les pertes influençant la production du système PV à savoir : les pertes ohmiques du câblage, effets d'incidence, pertes dues à la température du champ, pertes dues à la qualité des modules, ...etc. Parmi celles-ci, nous remarquons que la contribution la plus importante est celle de l'onduleur, d'où l'importance de prendre en considération l'efficacité de l'onduleur. Notons que la production journalière donnée par cette même simulation de la centrale est représentée comme le montre la figure III.18.

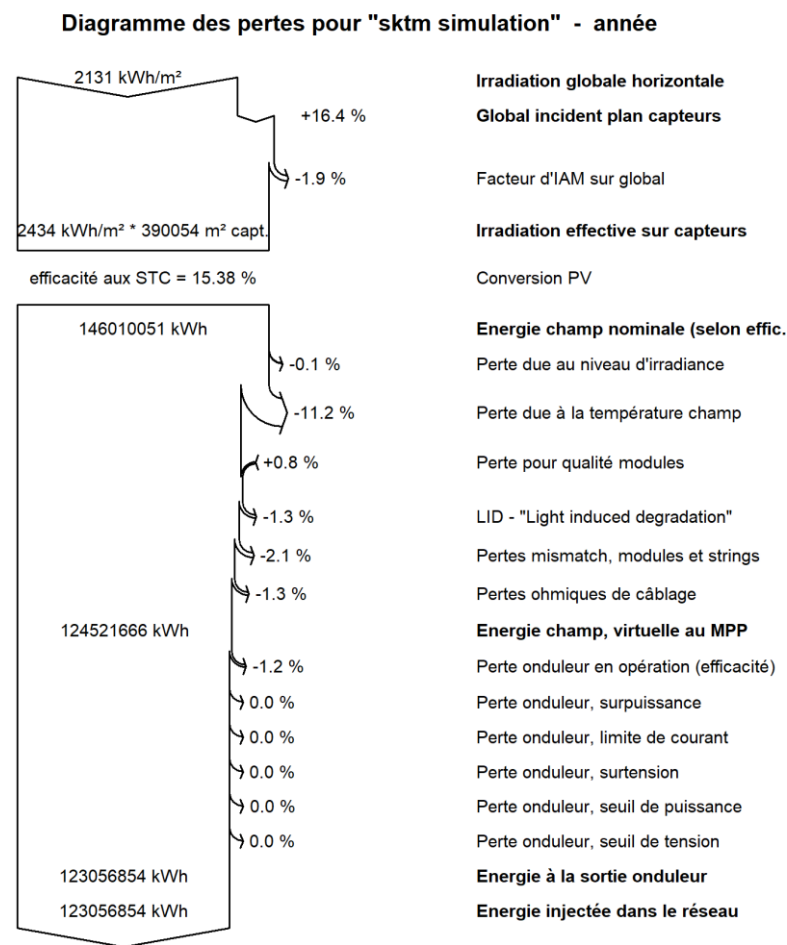


Figure III.18 : les pertes de la centrale.

### III.3.9 Analyse des coûts énergétiques de la centrale photovoltaïque

L'étude économique de la centrale photovoltaïque est basée sur la production réelle de l'entreprise d'énergie renouvelable, sa puissance est de 60MW et ses prix sont tirés des sites de vente

Tableau III.19 : Coût global de l'installation photovoltaïque

Désignation	Quantité	Prix unitaire	Montant
Module Yingli solar YL250P-29b	240,240	135	32.432.400
Support des Panneaux	240,240	35	8.408.400
Câble SPLICE 70mm <sup>2</sup>	3000	20	60.000
Onduleurs	120	200,000	24.000.000
<b>Total</b>			69.900.800

### III.3.10 Dimensionnement de la consommation locale de la centrale hybride

Afin de calculer avec précision la consommation locale de la centrale hybride. Nous avons mis en place un logiciel informatique qui nous permet de réaliser des opérations pour le dimensionnement en court laps de temps, les résultats seront présentés dans les figure III.(19,20,21).

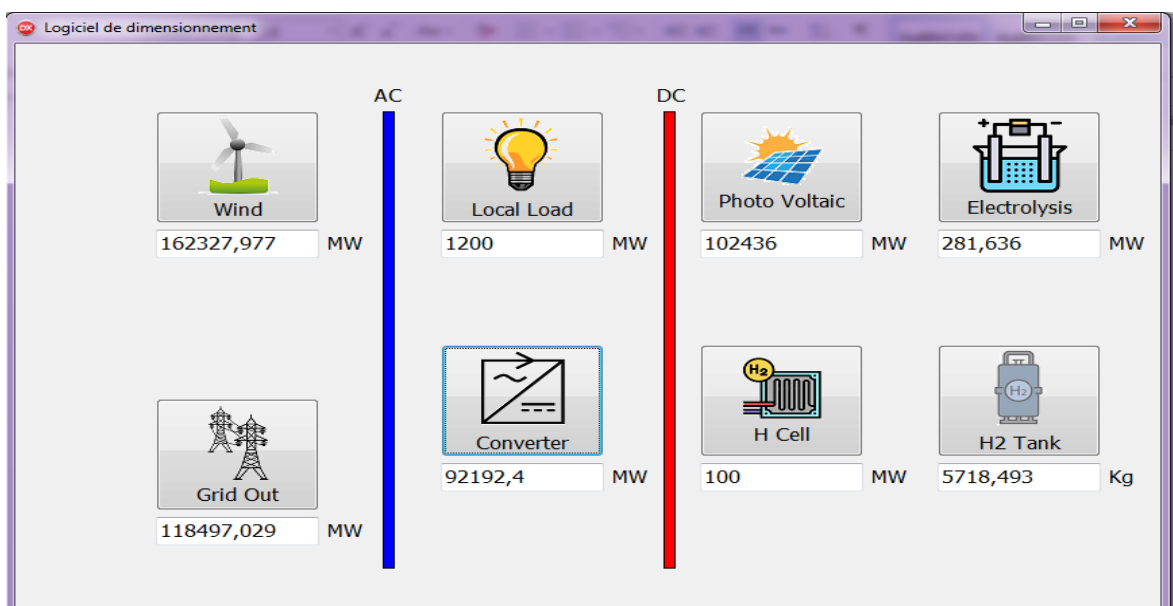


Figure (III.19) : Interface principale du logiciel.

The screenshot shows a software window titled 'WindTurbine' with two main sections: 'Parametres Physique' and 'Parametres de couts'.  
**Parametres Physique:**  
 Rho: 1,225; P Nominal: 2,5; C: 11,399; FF0: 19,26 %  
 H: 95; Vc: 2; K: 1,513; Vmoy: 8,3  
 R: 114; Vr: 10; A: 40828,138  
 Nombre d'Eolienne: 12; Vf: 25; POut: 18,531; Pdisp: 1441,134  
**Parametres de couts:**  
 Année en Service: 20; IC: 44850000; PVC: 49127522,0483; LCOE: 0,03080911762  
 Cout Spec Moy: 1150; COM(a): 258750; CRF: 0,1018  
 Cwind: 34500000; COM(p): 4277522,04838; TAC: 5001181,74452  
 Buttons: 'Donne Vent' and 'Calculate'.

Figure (III.20) : Interface du dimensionnement de la centrale éolienne.

The screenshot shows a software window titled 'Hydrogen Cell' with input fields for various parameters and a 'Calulcate' button.  
 Hydrogen Energy/Kg: 39,4 kW/h; Cout unitaire Electrolys: 368 \$/kW  
 Cell Efficiency: 45 %; f: 0,55  
 Cell Energy / KG of H2: 17,73 kW/h; Facteur cout unit: 1,27  
 H2 needed Per Hour: 0,653 Kg; Cele: 51772,974  
 Duree de vie: 20  
 CH2: 0,49  
 Button: 'Calulcate'.

Figure (III.21) : Interface du système de stockage PAC.

### III.3.11 Analyse des coûts énergétiques de la centrale hybride

L'étude technico-économique de la station totale précise La capacité annuelle du producteur, ainsi que le prix total de l'installation de l'usine et le prix de vente à travers lesquels nous calculons les années de rentabilité.

Tableau (III.20) : les résultats obtenir par logiciel.

	Surface (Hectares)	Puissance (Gwh)	Energie (GWh/ans)	Cout (\$)
Eolienne	54.14	16.18	162.327	49.127.522
PV	120	11.693	102.436	69.900.800
Totale	174.14	27.873	264.763	119.123.089

On note que le prix d'investissement est estimé à 119.123.089 dollars. L'énergie produite par la station hybride est 264.763GWh/ans, après la soustraction de la valeur de la consommation locale et les pertes d'onduleurs on obtient la valeur nette injectée au réseau et le bénéfice

annuels de la station sont estimés 23.057.337 dollars par an, ce qui signifie que la rentabilité est d'environ 6 ans, par rapport à la durée de vie de la station estimée à 20 ans, ce qui signifie que 14 ans d'intérêt.

### **III.4 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats relatifs à la centrale hybride photovoltaïque/éolien d'une production énergétique de 90 MW, dans le site Laghouat el Kheng. La centrale photovoltaïque comprenait 60 sous-champs, chaque sous-champ contenant 4004 panneaux solaires du type Yingli solar YL250P-29b ainsi que deux types d'onduleurs (40 de SUNGROW et 80 de TBEA). La centrale éolienne contient 12 turbines d'un type Gamesa G114-2.5MW d'une capacité de 2,5 MW. La vitesse potentielle du vent était de 8,248 m/s a une hauteur de 95 mètres et une densité de puissance de 1430.153 W/m<sup>2</sup> pour la direction privilégiée. L'exploitation de la centrale assure une capacité de production de 162.327 GWh. De l'analyse des prix, nous avons conclu :

Minimum par kilowattheure 0,035 \$/kWh La durée de vie de la station peut aller jusqu'à 20 ans, et en calculant sa productivité, l'argent dépensé peut être récupéré en un temps d'environ 6 ans, en plus du fait que le prix d'un kilowattheure est très compétitif par rapport au prix de l'électricité payé par le citoyen algérien.

# **Conclusion générale**

### Conclusion générale

L'objectif principal de la présente mémoire repose, d'une part, sur l'étude technico-économique d'une centrale de production d'électricité hybride PV /éolien avec un système de stockage (PAC) connectés au réseau électrique en Algérie.

Pour atteindre cet objectif, nous avons présenté, dans une première étape, une analyse de la situation énergétique de l'Algérie et en particulier de la zone d'étude de ses ressources en énergie renouvelables. Les résultats de cette analyse montrent que le site d'el Kheng dispose d'un potentiel énergétique renouvelable important, solaire et éolien, qui peut contribuer à la production d'une grande partie de l'énergie régionale. Par conséquent, cette région est favorable à l'exploitation hybride de ce type d'énergies.

Pour cela, nous avons étudié dans un premier temps, les paramètres de Weibull, la densité de puissance moyenne et la vitesse moyenne journalière, annuelle à plusieurs hauteurs pour une bonne caractérisation des paramètres du vent au niveau des aérogénérateurs. Dans une deuxième étape, nous avons présenté la méthodologie proposée pour la modélisation optimale des systèmes PV et éolien. Une fois la modélisation établie nous sommes entamé par une simulation et les calculs énergétiques de chaque centrale différemment, ainsi que l'étude économique. Ses résultats obtenus sont résumés comme suit :

- Une vitesse moyenne du vent à la région étudiée qui atteint les 6,48 m/s a 10m de hauteur, La densité de puissance moyenne a montré un potentiel éolien énorme de 856.04 W /m<sup>2</sup>.
- Le meilleur aérogénérateur a installé à notre site et Gamesa G114-2.5MW avec 12 aérogénérateurs pour assurer une puissance nominale de la centrale de 30MW, donnant ainsi une puissance nominale totale au parc de 161.718 GWh.
- Le coût de l'électricité ne dépasse pas 0,031 \$/kWh, ce qui est un prix très compétitif par rapport au prix de l'électricité payé par le consommateur du secteur domestique en Algérie (0,054 \$/kWh) et le coût de l'électricité éolienne diminuera encore avec le développement de la technologie de l'énergie éolienne.
- Un rayonnement solaire annuelle de 2130.9KWh/m<sup>2</sup>, la production d'énergie totale d'un sous-champ dans la région d'EL Kheng est de l'ordre de 123057MWh/an, une production journalière d'un sous-champ est égale à 5.61kWh/kWc/jour, 22 modules connecté en série, et 91 modules connecté en parallèle.
- Notre centrale est composée de 120 sous-champs, 240240 modules occupant une surface de 120 hectares (La surface de séparation n'est pas calculée), et 120 onduleurs.

## ***Conclusion générale***

---

- Le coût de notre centrale photovoltaïque est de 69.900.800 \$.
- La centrale hybride produira une énergie annuelle de 244.199GWh à une puissance de 90MW occupant une surface de 174.14 hectares de cout de 119.123.089 \$.

### **Comme perspectives et pour accomplir ce travail nous conseillons de faire :**

- Préparation d'une étude techno économique du système de stockage par d'autres types de pile à combustible.
- Préparation d'une étude techno économique pour la réalisation d'une usine de production d'hydrogène à partir de l'énergie éolienne.
- Faire une étude pour améliorer la qualité d'énergie produite à partir de la centrale PV de SKTM.

## Références Bibliographies

- [1] : J.M Chassériaux, Conversion thermique du rayonnement solaire ; Dunod, 1984.
- [2] : R. Bernard ; G. Menguy ; M. Schwartz, Le rayonnement solaire conversion thermique et applications ; Technique et documentation Lavoisier, 2ème édition 1980.
- [3] : Merzouk, N. K. (2000). «Wind energy potential of Algeria. Renewable Energy»,21(3-4), 553-562.
- [4] : Chellali, F., Khellaf, A., Belouchrani, A., & Recioui, A. (2011) « A contribution in the actualization of wind map of Algeria » Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(2), 993-1002.
- [5] : M : FERRAH BILLEL, «Etude d'un système Hybride (photovoltaïque –éolien) », MEMOIRE MASTER, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR, ANNABA Année : 2014/2015
- [6] : Benkhelifa abdelaziz « modélisation et expérimentation d'un capteur solaire plan à eau influence de l'intensité de l'éclairement solaire et de l'inclinaison du capteur solaire sur le rendement du capteur » [master Ouargla , (université kasdi merbah) .
- [7] : Mr. MAHAMMEDI Abdellatif, «Etude et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque», MAGISTER, UNIVERSITE FERHAT ABBAS –SETIF1-UFAS (ALGERIE), Année : 2014
- [8] : Mr: Alain Bilbao Learreta, «Réalisation de Commandes MPPT Numériques», UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
- [9] : Mlle. MEZZAI Sonia, Mlle. TADJINE Katia, « Etude d'un système hybride (Eolien – Photovoltaïque) », MEMOIRE MASTER, Université Abderrahmane Mira-Bejaia, Année : 2015
- [10] : Equene philippe , le photovoltaïque [en ligne] 2006 page consulté le 11 janvier 2010.
- [11] : Mlle. MEZZAI Sonia, Mlle. TADJINE Katia, « Etude d'un système hybride (Eolien – Photovoltaïque) », MEMOIRE MASTER, Université Abderrahmane Mira-Bejaia, Année : 2015
- [12] : A. LABOURET, M.VILLOZ : Energie solaire photovoltaïque, le manuel de professionnel, Dunod, Paris (2003).
- [13] : Mr Chelabi Anis, Mr Ibelhoulen Aziz « Etude d'un système hybride autonome», master, Université Abderrahmane Mira– Béjaia, Année 2011 / 2012
- [14] : Mr: K. Idjdarene, Mr: S.Tamalouzt «Etude et commande d'un système éolien à vitesse variable basé sur une génératrice asynchrone à double alimentation. », Master,

- [15]: A. Engler et al, «Control of parallel operating battery inverters », PV Hybrid power systems, conference, Aix-en Provence, France, 2000.
- [16]: A. Engler et al, «standard interface for PV and hybrid systems», 14 th European photovoltaic solar energy conference, Espagne, P. P. 1074, 1997.
- [17] : N. Aouchiche & al « Poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque par les méthodes de l'incrémentation de conductance et laperturbation & observation » Revue des Energies Renouvelables Vol. 16 N°3 (2013) 485 – 498.
- [18]: J. David Irwin, MUHAMMAD H. RASHID «Power electronics Handbook». University of West Florida Joint Program and Computer Engineering», Copyright # 2001 by ACADEMIC PRESS
- [19] : V.Courtecuisse, « supervision d'une centrale multisources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique » ; Thèse de Doctorat, Université de Lille, France, Novembre 2008.
- [20] : A.Boyette, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne » ; Thèse de Doctorat en génieélectrique, Université Henri Poincaré, Nancy I, Décembre 2006.
- [21] : A. Davigny, « Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie » ; Thèse de Doctorat de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, France, Décembre 2007.
- [22] : <https://www.greenmaterials.fr/eolien-et-pile-a-combustible-larrivee-de-lhydrogene-vert/>
- [23] :[http://archives.univbiskra.dz/bitstream/123456789/17922/1/SALLEMINE\\_Heythem\\_LACEFAR\\_Madani.pdf](http://archives.univbiskra.dz/bitstream/123456789/17922/1/SALLEMINE_Heythem_LACEFAR_Madani.pdf).
- [24] : DRA-71\_BENCHMARK%20PAC-30012017.pdf
- [25]: Merzouk, N. K. (2000). «Wind energy potential of Algeria. Renewable Energy», 21(3-4), 553-562.
- [26]: Chellali, F., Khellaf, A., Belouchrani, A., & Recioui, A. (2011) « A contribution inthe actualization of wind map of Algeria » Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(2), 993-1002.

- [27]: Boudia SM, Santos JoãAndrade, Assessment of large-scale wind resource features in Algeria”, Energy (2019).
- [28] : Bouchiba.O., « contribution à l’etude et developpement de parc eolien de la region de laghouat », Magister 11/06/2012.
- [29] : F. Boukli Hacène, N. Kasbadji Merzouk et L. Loukarfi, « Analyse Statistique et Elaboration d’un Atlas Eolien de la Vallée du Cheliff’ », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 10, N°4, pp. 583 – 588, 2007.
- [30]: S.Bivona, R. Burlon, and C.Leone, « Hourly wind speed analysis in Sicily»Renewable Energy.2003 Jul; 28(9):1371-1385.
- [31]: Karen Rosen; Robert Van Buskirk , and Karina Garbesi « Wind Energy Potential of Coastal Eritrea: an Analysis of Sparse Wind Data», Solar Energy. 1999 Jun; 66(3):201-213.
- [32]: M. Elamouri, F. Ben Amar, «Wind energy potential in Tunisia», Renewable Energy 33 (2008) 758–768.
- [33]: M.AZAGNANDJI, & al, « Wind Energy Potential Assessment and Wind Turbine Performance Investigation in the Cotonou Coast (Benin Republic) », International Journal of Engineering Research in Africa, 2019 November; Vol. 45, pp89-98.
- [34]: A.S. Ahmed Shata, R. Hanitsch, « Electricity generation and wind potential assessment at Hurghada, Egypt », Renewable Energy 33 (2008) 141–148.
- [35]: Bonfils Safari\*, Jimmy Gasore, « A statistical investigation of wind characteristics and wind energy potential based on the Weibull and Rayleigh models in Rwanda », Renewable Energy 35 (2010) 2874-2880.
- [36]: M. Al-Ghriyah, & al, «wind energy assessment for the capital city of jordan, amman», Journal of Applied Engineering Science, 17(2019)3, 611, 310 – 319.
- [37]: Bonfils Safari\*, Jimmy Gasore, «A statistical investigation of wind characteristics and wind energy potential based on the Weibull and Rayleigh models in Rwanda» Renewable Energy 35 (2010) 2874-2880.
- [38]: Laerte de Araujo Lima, Celso Rosendo Bezerra Filho, «Wind energy assessment and wind farm simulation in Triunfo-Pernambuco, Brazil», Renewable Energy 35 (2010) 2705-2713.
- [39] : H. Faïda, & al, « Etude et Analyse des Données de Vent en Vue de Dimensionner un Système de Production d’Energie Eolienne- Cas d’un Site au Nord du Maroc», Revue des Energies Renouvelables, Vol. 13, N°3, pp. 477 – 483, 2010.
- [40]: Gökçek M, Genç MS. Evaluation of electricity generation and energy cost of wind

- energy conversion systems (WECS) in Central Turkey. *Appl Energy* 2009; 86:2731–9.
- [41] : Diaf S. Intégration des systèmes à sources renouvelables d'énergie pour la production décentralisée d'électricité en site isolé. *pHd Sciences* 2009, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique Algérie.
- [42] : Shata AS, Hanitsch R. Evaluation of wind energy potential and electricity generation on the coast of Mediterranean Sea in Egypt. *Renew Energy* 2006; 31: 1183–1202.
- [43]: Adaramola MS, Paul SS, Oyedepo SO. Assessment of electricity generation and energy cost of wind energy conversion systems in north-central Nigeria. *Energy Convers Manage*. 2011; 52: 3363–3368.
- [44] : Diaf S, Belhamel M, Haddadi M, Louche A. Technical and economic assessment of hybrid photovoltaic/wind system with battery storage in Corsica Island. *Energy Policy* 2008; 36: 743–754
- [45] : S. Petibon « Nouvelles architectures distribuées de gestion et conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques » thèse doctorat Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2009. France.
- [46] : Douak, M., and N. Settou. 2015. Estimation of hydrogen production using wind energy in Algeria. *Energy Procedia* 74:981–90. doi:10.1016/j.egypro.2015.07.829
- [47] : <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-etmaitrise-de-lrenergie#> (14/06/2021).
- [48] : M. Birane, « Contribution à l'étude et à l'optimisation des chaînes de conversion photovoltaïque », Thèse de doctorat, Université de Laghouat, 2017.
- [49] Gökçek M, Genç MS. Evaluation of electricity generation and energy cost of wind energy conversion systems (WECS) in Central Turkey. *Appl Energy* 2009; 86:2731–9.
- [50] Adaramola MS, Paul SS, Oyedepo SO. Assessment of electricity generation and energy cost of wind energy conversion systems in north-central Nigeria. *Energy Convers Manage*. 2011; 52: 3363–3368.
- [51] Mathew S. *Wind energy: fundamentals, resource analysis and economics*. Berlin Heidelberg: Springer; 2006
- [52] Sathyajith Mathew, & al « Analysis of Wind Regimes for Energy Estimation », *Renewable Energy* Volume 25, Issue 3, March 2002, Pages 381-399
- [53] Cherifi-Oussama-Madache-Hamza.pdf.

## المخلص

إنّ الهدف الرئيس من هذه المذكرة هو الدراسة التقنية والاقتصادية لمحطة طاقة متجددة هجينة (كهروضوئية/رياح) بنظام تخزين يعتمد على خلايا الوقود لتأمين الاحتياجات المحلية للمحطة المتصلة بالشبكة، وللوصول إلى هذا الهدف تم وضع تحليل دقيق للمعطيات الجوية لموقع الخنق بولاية الأغواط، مما أسفر عن وجود إمكانيات ريحية معتبرة، من خلالها تم تقديم منهجية التحجيم المناسبة، بالإضافة إلى قيمة التكلفة المفصلة لكل جزء والتكلفة الإجمالية التي أكدت بأنّ منطقة الدراسة قادرة على توفير الكهرباء بسعر تنافسي جدا.

**الكلمات المفتاحية:** موارد الرياح والكهروضوئية، التحليل الاقتصادي لمحطة هجينة (كهروضوئية / رياح)، محطة هجينة كهروضوئية رياح بنظام تخزين خلايا الوقود.

## Résumé

L'objectif principal de ce mémoire est l'étude technico-économique d'une centrale hybride d'énergie renouvelable (photovoltaïque/éolien) avec un système de stockage à base de piles à combustible pour sécuriser les besoins locaux de la station raccordée au réseau. Potentiel, à travers lequel la méthodologie de dimensionnement appropriée a été présentée, en plus de la valeur du coût détaillé de chaque partie et du coût total, ce qui a confirmé que la zone d'étude est en mesure de fournir de l'électricité à un prix très compétitif.

**Mots clés :** ressources éoliennes et photovoltaïques, analyse économique d'une centrale hybride (photovoltaïque/éolien), une centrale hybride éolienne photovoltaïque avec un système de stockage pile à combustible

## Abstract

The main objective of this memorandum is the technical and economic study of a hybrid renewable energy plant (photovoltaic/wind) with a storage system based on fuel cells to secure the local needs of the station connected to the network. The existence of significant wind potential, through which the appropriate sizing methodology was presented, in addition to the value of the detailed cost of each part and the total cost, which confirmed that the study area is able to provide electricity at a very competitive price.

**Keywords :** wind and photovoltaic resources, economic analysis of a hybrid plant (photovoltaic / wind), a wind photovoltaic hybrid plant with a fuel cell storage system