

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE MÉCANIQUE
N°:.....



DOMAINE : Science et Technologie
FILIERE : Mécanique
OPTION : Energétique

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Présenter par :

- Hneini Mema Babe

Intitulé

*Etude de la centrale photovoltaïque de
Skhouna (Saida).*

Soutenu devant le jury composé de :

Encadreur :	Ihaddadene R	MCA	Université de M'sila
Président :	Amirat B	MCB	Université de M'sila
Examineur :	Bouaouina L	MCB	Université de M'sila
Examineur :	Taloub D	MCB	Université de M'sila

Année universitaire : 2018 /2019

Dédicace



*Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut...
Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude,
L'amour, le respect, la reconnaissance...
Aussi, c'est tout simplement que*

A ma bien-aimée mère, Aïcha Moustapha Wellata, qui m'a entouré d'amour, d'affection et qui fait tout pour ma réussite, que dieu la garde ;

Mon père, Babe Mohamed Mahmoud Hnyny qui m'a aidé à devenir ce que je suis aujourd'hui, que dieu le garde et le protège ;

Mon grand frère Dr. Moustapha Sidi Mohamed que je pris comme mon idole.

Mon oncle Babe Moustapha wallata, je ne peux trouver les mots justes et sincères pour vous exprimer mon affection et mes pensées.

Ma chère tante Khadjetou Moustapha Wallata qui m'a entouré d'amour, que dieu la garde.

Mon grand frère Cap. Moustapha Babe Hnyny. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour l'estime et le respect que j'ai toujours eu pour toi.

Mon frère Jebril Babe Hnyny, mon conseiller, et ami fidèle, qui m'a assisté dans les moments difficiles et m'a pris doucement par la main pour traverser ensemble des épreuves pénibles....

A ma grande sœur, Zeinebou le bonheur d'avoir une grande sœur sur laquelle on peut compter.

Ma sœur, Mariem kerima la généreuse, merci pour tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils.

Ma petite sœur Lalle, que j'aime profondément.

Mon petit frère que j'adore, imad el-din. Yasmine la prunelle de mes yeux.

Fiston Mohamed tes yeux brillants sont incomparables.

A MES CHERS ET ADORABLE FRERES ET SŒURS.

Puisse Dieu vous garder, éclairer votre route et vous aider à réaliser à votre tour vos vœux les plus chers.

Remerciements

Je tiens à remercier avant et après tout Allah le tout puissant qui nous a donné la foi et la force pour réaliser notre travail

J'adresse mes plus vifs remerciements à mon encadreuse

«Dr. Ihaddadene Razika» d'abord pour l'aide qu'elle m'a apporté durant toutes les années de spécialité, pour disponibilité constante.

Tout d'abord, j'adresse mes remerciements à mon professeur, Cheikh Elhamel, directeur de la centrale PV Ain Skhouna.

Je tiens à remercier toutes les membres de la société (SKTM) qui ont contribué au succès de mon stage et qui m'ont aidé lors de déroulement de stage.

Je remercie également toute l'équipe (les techniciens principaux) pour leur accueil, leur esprit d'équipe et en particulier ingénieur Kemal, qui m'a beaucoup aidé à comprendre les problématiques d'achats sécurisés.

Je remercie également mon frère doctorant Med Hassen El jed.

J'apprécie particulièrement sa disponibilité, son soutien moral et sa sympathie.

Nous adressons notre plus sincère remerciement à notre famille particulièrement à nos parents pour leur patience à notre égard sans jamais douter de nos capacités

Enfin nous remercions chaleureusement toute les personnes du proche qui nous donné un coup de main afin de terminer ce travail.

Sommaire

Introduction Générale	2
Chapitre I : Etat de l'art sur l'énergie photovoltaïque	5
Partie 1 : l'énergie photovoltaïque	5
I.1.1 Le rayonnement solaire	5
I.1.2 Le spectre solaire	6
I.1.3 Application de l'énergie solaire	7
I.1.4 Statistique sur l'énergie photovoltaïque dans le monde	10
I.1.5 Statistique sur l'énergie photovoltaïque en Algérie	12
Partie 2 : Système photovoltaïque	16
I.2.1 La conversion photovoltaïque	16
I.2.1.1 Matériau semi-conducteur	17
I.2.1.2 Formation de la jonction PN	17
I.2.1.2 Principe de la conversion photoélectrique	18
I.2.2 Composition d'une cellule photovoltaïque	18
I.2.3 Les technologies photovoltaïques	19
I.2.4 Modélisation d'une cellule photovoltaïque	21
I.2.4.1 Cas d'une cellule idéale	21
I.2.4.2 Cas d'une cellule réelle	23
I.2.5 Paramètres caractéristiques d'un module photovoltaïque	25
I.2.5.1 Courant de court-circuit I_{cc}	26
I.2.5.2 Tension de circuit ouvert V_{co}	26
I.2.5.3 Puissance maximale	26
I.2.5.5 Rendement de conversion	27
I.2.6 Association des modules Photovoltaïques en parallèle	27
I.2.7 Association des modules Photovoltaïques en série	28
I.2.8 Association des modules Photovoltaïques en série/parallèle	28

Partie 3 : Les centrales photovoltaïques	29
I.3.1. Types d'installations photovoltaïques	29
I.3.1.1 Installations autonomes	29
I.3.1.2 Installations raccordées au réseau	30
I.3.2 Principaux composants d'une centrale PV	31
I.3.1 Générateur photovoltaïque :	31
I.3.2 Les convertisseurs	31
I.3.3 Les batteries	32
I.4. Conclusion	33
Chapitre II : Présentation de la centrale PV de Skhouna	35
II.1 Situation géographique de la centrale PV Ain Skhouna	35
II.2 Développement de la centrale PV Skhouna	36
II.3 Description de la centrale PV Skhouna (Saida)	37
II.3.1 Les champs solaires PV	38
II.3.2 Les boîtes de jonctions (les centraux box)	39
II.3.3 La salle de contrôle	40
II.3.4 Les onduleurs photovoltaïques « Power Conditionners »	41
II.3.5 L'armoire de communication des charges	43
II.3.6 Le système de surveillance des données	44
II.4 Fonctionnement de la centrale PV de Skhouna	45
II.5 Opération d'entretien et de maintenance	45
II.5.1 Présentation et classification de la maintenance	45
II.5.2 Répartition des tâches	46
II.5.3 Plan d'entretien annuel	46
II.5.4 Contrôle courant	47

II.5.5 Contrôle périodique	48
II.5.8 Le Nettoyage	48
II.6. Conclusion	50
Chapitre III : Analyse de performances réelles de la centrale PV d'Ain Skhouna	
III.1 Analyse des données météorologiques du site d'Ain Skhouna	52
III.1.1 Evolution de l'insolation journalière	52
III.1.2 Evolution des températures journalières	53
III.1.3 Evolution de la vitesse du vent journalière	53
III.2 Analyse des performances journalières	55
III.2.1 Energie générée et énergie cumulée	55
III.2.2 Rendement de référence (Yr)	56
III.2.3 Rendement du champ PV (Ya)	57
III.2.4 Rendement final du système PV (Yf)	57
III.2.5 Indice de performance normalisé (PR)	57
III.2.6 Les pertes du système par conversion (LS)	58
III.2.7 Les pertes diverses (LC)	58
III.2.8 Rendement du champ PV (η_{PV})	58
III.2.9 Rendement du système PV (η_{SYS})	59
III.2.10 Rendement de l'onduleur photovoltaïque (η_{inv})	59
III.2.11 Facteur de charge (FC)	60
III.3 Analyse de l'évolution des performances de centrale PV d'Ain Skhouna	60
III.3.1 Energie générée(E_{dc}) et énergie fournie(E_{ac})	60
III.3.2 Les rendements : de référence (Yr), du champ PV (Ya) et final du système PV (Yf)	61

III.3.3 Indice de performance normalisé (PR)	62
III.3.4 Les pertes (LS) et (LC)	63
III.3.5 Les efficacités du champ (η_{champ}), du système ($\eta_{\text{système}}$) et de l'onduleur(η_{onduleur})	64
III.4. Conclusion	66
Chapitre IV : L'interface graphique PERF-ANALYSE	68
IV.1. Introduction	68
IV.2. Présentation du langage de programmation MATLAB ...	68
IV.3. Présentation générale de l'interface PERF-ANALYSE ...	70
IV.3.1. Donnée de base	71
IV.3.2. Analyse de performance	71
IV.3.3. Résultats	72
IV.4. Présentation visuelle de l'interface PERF-ANALYSE	72
IV.4.1. Page d'accueil	73
IV.4.2. Page d'analyse des données métrologiques	73
IV.4.3. Page d'analyse de l'évolution des performances de centrale PV ...	73
IV.5. Conclusion	77

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Carte mondiale de l'irradiation solaire globale (annuelle et journalière moyenne)	5
Figure I.2 : Les spectres du Soleil, théorique, sur, et sous l'atmosphère	6
Figure I.3a : Application de l'énergie solaire individuelle	8
Figure I.3b : Centrale photovoltaïque de Tamanarasset 13 MWc	8
Figure I.4 : Les principaux systèmes thermodynamiques à concentration	9
Figure I.5 : La part de l'énergie renouvelable dans la production mondiale d'électricité en 2017, par source d'énergie renouvelable	10
Figure I.6 : Capacité d'énergie solaire photovoltaïque dans le monde en 2017, selon le pays (en Gigawatts)	11
Figure I.8 : Répartition des centrales photovoltaïques en Algérie selon les régions	14
Figure I.9 : Production d'électricité par conversion photoélectrique	18
Figure I.10 : Composition d'une cellule photovoltaïque	19
Figure I.11 : Les différents types de cellule photovoltaïque	21
Figure I.12 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale	21
Figure I.13 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle	24
Figure I.14 : Les différentes zones de la caractéristique I (V)(G= 1000W :m ² T=25°C)	25
Figure I.15a : Caractéristique I=f(v). Figure .15b : Caractéristique P=f(v) ...	26
Figure I.16 : Courbe caractéristique d'un groupement en parallèle des modules photovoltaïque	27
Figure I.17 : Courbe caractéristique d'un groupement en série des modules photovoltaïque	28
Figure I.18 : Courbe caractéristique d'un groupement en parallèle /série des modules photovoltaïque	28
Figure 1.19 : Schéma de principe d'une installation PV autonome	29
Figure 1.20 : Schéma de principe d'une installation PV raccordée au réseau ...	30

Liste des figures

Chapitre II

Figure II.1a : La société SKTM de Saida Ain skhouna	35
Figure II.1b : La situation géographique de la société SKTM de Saida Ain skhouna	36
Figure II.2 : les champs PV de la centrale.	38
Figure II.3 : les rangés du champ PV de la centrale	39
Figure II.4.a : Central box à l'extérieure	40
Figure II.4.b : Central box à l'intérieur	40
Figure II.5 : Salle de contrôle	41
Figure II.6 : Armoire de l'onduleur de type Sunny Central 880 CP XT	43
Figure II.7 : Armoire de communication des charges	44
Figure II.8 : Ces instruments permettent d'enregistrer les conditions climatiques dans la zone de l'installation des modules PV	45
Figure II.9 : - Classification de l'entretien. Source: DIN EN 13306	47
Figure II.10 : Machine mobile pour le nettoyage	49

Chapitre III

Figure III.1 : Evolution de l'insolation (Ht) journalières de la centrale PV Ain Skhouna (Avril 2019)	53
Figure III.2 : Evolution des températures journalières (Tam, Tmod) de la centrale PV Ain Skhouna (Avril 2019).	54
Figure III.3 : .Evolution journalière de la vitesse du vent de la centrale PV Ain Skhouna (Avril 2019)	54
Figure III.4 : Evolution journalière des énergies Edc, Eac de la centrale PV Ain Skhouna (Avril 2019)	61
Figure III.5 : Evolution journalière des rendements Yr, Ya et Yf de la centrale PV Ain Skhouna (Avril 2019)	62
Figure III.6 : Evolution journalière de l'indice de performance PR de la centrale PV Ain Skhouna (Avril 2019)	63
Figure III.7 : Evolution journalière des pertes de la centrale PV Ain Skhouna (Avril 2019) 64	
Figure III.8 : Evolution journalière des efficacités (champs et système) de la centrale PV Ain Skhouna (Avril 2019)	65

Liste des figures

Figure III.9 : Evolution journalière de l'efficacité des onduleurs de la centrale PV Ain Skhouna (Avril 2019)	66
Chapitre IV :	
Figure IV.1 : Commande d'ouverture de GUIDE	69
Figure IV.2 : Fenêtre principale du GUIDE	69
Figure IV.3 : l'inspecteur de propriété	70
Figure IV.4 : Organigramme général du processus de calcul de l'interface PERF-ANALYSE	71
Figure IV.5 : Page de d'accueil de l'interface graphique PERF-ANALYSE	72
Figure IV.6 : La page d'analyse des données météorologiques	73
Figure IV.7 : La page d'analyse de l'évolution des performances de la centrale PV	74
Figure IV.8 : Graphe de l'évolution mensuelle du rendement de l'onduleur	75
Figure IV.9 : Graphe de l'évolution mensuelle des pertes du système (Ls) et les pertes divers (Lc)	75
Figure IV.10 : Message d'erreur dans l'interface PERF-ANALYSE	76

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : La puissance des centrales photovoltaïques en Algérie 16

Tableau I.2 : Performances des différentes technologies des cellules photovoltaïques 21

Chapitre II

Tableau II.1 : Spécifications des modules PV 38

Tableau II.2 : Spécifications de l'onduleur PV 42

Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
ΔE	Quantum d'énergie	(J)
C	La vitesse de propagation	(m/s)
ν	La fréquence	(hertz)
I_{or}	Le courant de court- circuit de la cellule	(A)
T	Température de la jonction des cellules PV	[°K]
T_n	Température de référence des cellules PV	[°K]
B	Facteur d'idéalité de la jonction	
E_g	Énergie de gap	[ev]
V_d	La tension aux bornes de la diode	[V]
V_t	La tension thermique	[V]
N	Facteur d'idéalité de la photopile	
I_{ph}	Le photo-courant dépendant de l'éclairement (G)	(A)
G	L'éclairement absorbé par la cellule photovoltaïque	[W/m²]
I_{cc}	Courant de court-circuit du panneau	(A)
K_i	Courant de court-circuit divisé par le coefficient de température du panneau	[A/K]
T_a	Température ambiante	[K]
P	La puissance mesurée aux bornes du module photovoltaïque	[W]
V	La tension mesurée aux bornes du module photovoltaïque	[V]
V_{dc}	La tension produite par le champ PV	[V]
I_{dc}	Le courant produit par le champ PV	[A]
E_{dc,d}	L'énergie journalière générée par le champ PV	[kWh]
E_{ac,d}	L'énergie journalière fournie au réseau de distribution	[kWh]
I_{POA}	Le rayonnement solaire arrivant à la surface	(kWh/m²)
P₀	Puissance nominale	(W)

Nomenclature

Y_r	Rendement de référence	(h)
Y_a	Rendement du champ PV	(h)
T_{mod}	Température de module mesurée	(°C)
V_{mp}	Tension au point de puissance maximale	(V)
VOC	Tension à circuit ouvert	(V)
Y_f	Rendement final	(h/j)
W_s	Vitesse du vent	(m/s)
η_{PV}	Rendement des modules PV	(%)
η_{SYS}	Rendement du système PV	(%)
η_{inv}	Rendement de l'onduleur	(%)

Introduction générale

Introduction Générale

L'Algérie dispose d'un des plus grands gisements solaires au monde, la durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). De ce fait, le potentiel national en énergies renouvelables étant fortement dominé par le solaire, l'Algérie considère cette énergie comme une opportunité et un levier de développement économique et social, notamment à travers l'implantation d'industries créatrices de richesse et d'emplois.

De toutes les énergies renouvelables, le solaire photovoltaïque présente un intérêt particulier en Algérie, puisqu'elle dispose d'un gisement solaire très important. La stratégie énergétique de l'Algérie repose sur l'accélération du développement de l'énergie solaire. Le gouvernement prévoit le lancement de plusieurs projets solaires photovoltaïques d'une capacité totale d'environ 800 MWc d'ici 2020. D'autres projets d'une capacité de 200 MWc par an devraient être réalisés sur la période 2021-2030.

Actuellement on compte 23 centrales photovoltaïques sur le territoire national. Parmi ces centrales photovoltaïques on distingue la centrale photovoltaïque d'Ain skhouna (Saida). Le but de notre étude est d'étudier cette centrale PV de 30MWc en présentant ces différents constituant et son principe de fonctionnement, d'évaluer les performances du champ photovoltaïque Saida1 dont la capacité est de 15,936 MWc selon les normes standardisées (Commission Electrotechnique Internationale) CEI 61724 et en fin de réaliser une interface graphique qui permettra d'analyser ces performances rapidement.

Notre mémoire de fin d'étude s'articule autour de quatre chapitres répartie comme suit:

Le premier chapitre présente un état de l'art sur l'énergie photovoltaïque, il est composé de trois parties. La première partie est consacrée à l'énergie photovoltaïque, la deuxième partie est réservée au système photovoltaïque et la dernière partie est réservée aux centrales photovoltaïques, leur type et leur composition

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation générale de la centrale photovoltaïque d'Ain Skhouna de Saida à savoir : sa situation géographique, son développement, sa composition(les champs solaire, les boites de jonctions, les

onduleurs, la salle de contrôle, l'armoire de communication des charges et le dispositif de mesures environnementales) et le fonctionnement de cette centrale. Une partie sur l'opération d'entretien et de maintenance a été également effectuée.

Le troisième chapitre traite l'analyse des performances du champ photovoltaïque Saida 1 d'une puissance de 15,936 MWc raccordée au réseau national durant le mois d'Avril de l'année 2019 (période de notre stage). Les paramètres de performance de cette analyse ont été spécifiés par l'Agence Internationale de l'Energie (IEA) et sont décrits dans les normes standardisées (Commission Electrotechnique Internationale) CEI 61724. Ces paramètres sont le rendement de référence (Y_r), le rendement du champ PV (Y_a), le rendement final du système PV (Y_f), le rapport de performance (PR), les pertes du système (LS) et les pertes diverses (LC). Ce chapitre est divisé en deux parties, la première traite l'analyse des données météorologiques du site d'Ain Skhouna et la deuxième, l'analyse des performances journalières du champ Saida1.

Le dernier chapitre est consacré à la description de l'interface graphique PERF-ANALYSE pour l'analyse de performance de centrale photovoltaïque d'Ain Skhouna (Saida) que nous avons réalisée. Il permet de calculer et de tracer les évolutions des paramètres de performance étudiés. Notre interface graphique a été réalisée en utilisant le logiciel Matlab grâce au GUIDE (Graphical User Interface Development Environment).

Enfin, une conclusion générale vient terminer ce mémoire.

Chapitre I

Etat de l'art sur l'énergie
photovoltaïque

Ce Chapitre présente un état de l'art sur l'énergie photovoltaïque, il est composé de trois parties. La première partie est consacré à l'énergie photovoltaïque, elle comporte le rayonnement solaire, le spectre solaire, l'application de l'énergie solaire (la solaire thermodynamique et le solaire photovoltaïque) et enfin des statistiques sur l'application du photovoltaïque au monde et en Algérie.

La deuxième partie est réservée au système photovoltaïque à savoir ; la conversion photovoltaïque, la composition d'une cellule photovoltaïque, les technologies photovoltaïques, la modélisation d'une cellule photovoltaïque, les caractéristiques d'un module photovoltaïque et en fin l'association des modules(en série, en parallèle et série/parallèle). La dernière partie est réservée aux centrales photovoltaïques, leur type et leur composition

Partie 1 : l'énergie photovoltaïque

I.1.1 Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est l'énergie émise par le processus de fusion de l'hydrogène contenu dans le soleil; cette énergie n'atteint pas la surface terrestre de manière constante, sa quantité varie au cours de la journée, en fonction des saisons et dépend de la nébulosité, de l'angle d'incidence et de la réflexion des surfaces. Le rayonnement total reçu par une surface de un mètre carré est appelé rayonnement global et il est la somme du rayonnement direct et du rayonnement réfléchi. La Figure I.1 illustre la carte mondiale de l'irradiation solaire globale (annuelle et journalière moyenne).

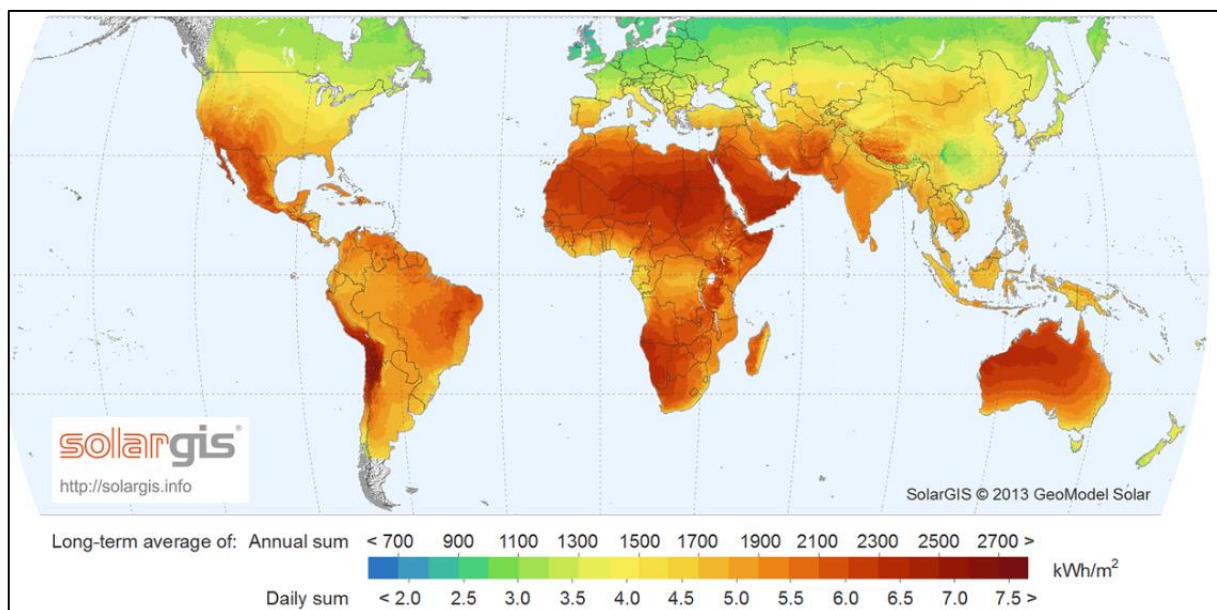


Figure I.1 : Carte mondiale de l'irradiation solaire globale (annuelle et journalière moyenne) [web2].

Le rayonnement direct est celui qui arrive directement du soleil, tandis que le rayonnement réfléchi est celui reflété par le ciel, les nuages et par les autres surfaces. On obtient un rayonnement direct uniquement lorsque le soleil est bien visible. En hiver le rayonnement réfléchi est nettement supérieur en pourcentage et sur base annuelle, il est égal à 55% du rayonnement global. Dans les calculs de dimensionnement des systèmes solaires photovoltaïques il est souvent nécessaire de considérer la quantité de rayonnement solaire réfléchi par les surfaces proches modules photovoltaïques (albédo) [web1].

I.1.2 Le spectre solaire

Le rayonnement solaire peut être considéré comme un ensemble de photons, particules transportant chacune une quantité d'énergie appelée "quantum d'énergie" et notée " ΔE ". L'énergie d'un photon de fréquence ν (en hertz), dont la longueur d'onde λ (en mètre) est égale à la célérité divisée par ν , est exprimée par la relation :

$$\Delta E = h \times \nu = \frac{h \times c}{\lambda} \quad (\text{I.1})$$

h : c'est la constante de Planck ($6,62 \times 10^{-34}$ J/s) ;

C : la vitesse de propagation (3×10^8 m/s).

La répartition spectrale du rayonnement solaire est déterminée par la température de sa surface, à savoir 5900 K. La Figure (I.2) donne l'allure de la répartition spectrale du rayonnement solaire réel hors atmosphère (l'éclairement spectral est définie comme une puissance reçue par une surface pour une longueur d'onde donnée; il s'exprime en $\text{W/m}^2 \cdot \text{nm}$) comparé à celle du corps noir à 5900 K, on constate que le soleil se comporte approximativement comme un corps noir.

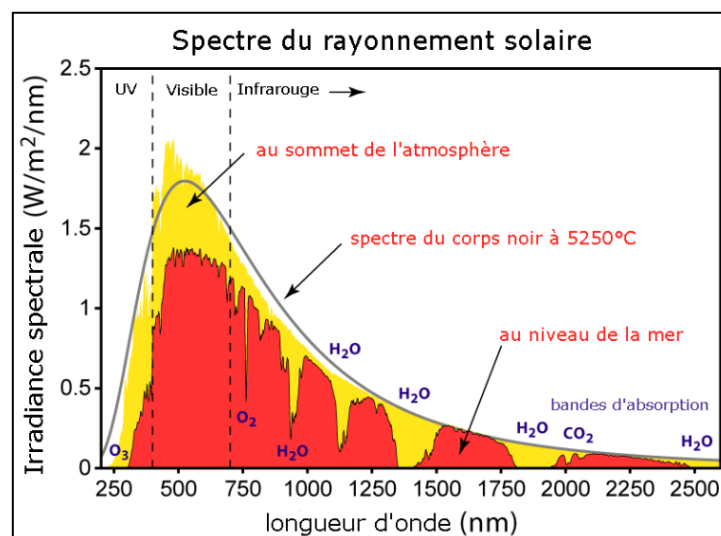


Figure I.2 : Les spectres du Soleil, théorique, sur, et sous l'atmosphère [web1].

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800° K. Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom d'AM0. Sa distribution en énergie est répartie en [1] [2] :

- Ultraviolet UV $0.20 < \lambda < 0.38 \text{ mm}$ (6.4%)
- Visible $0.38 < \lambda < 0.78 \text{ mm}$ (48.0%)
- Infrarouge IR $0.78 < \lambda < 10 \text{ mm}$ (45.6%)

I.1.3 Application de l'énergie solaire

L'énergie solaire est souvent employée pour désigner l'électricité ou l'énergie thermique obtenue à partir de la source énergétique primaire qui est le rayonnement solaire. Actuellement, il existe deux voies principales d'exploitation de l'énergie solaire en électricité; les systèmes de conversion photovoltaïque et les systèmes thermodynamique.

➤ Le solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire en utilisant des cellules photovoltaïques. Ces cellules photovoltaïques sont reliées entre-elles pour former un panneau photovoltaïque. Ces panneaux peuvent être utilisés individuellement pour charger une batterie et pour répondre aux besoins en électricité des particuliers (Figure I.3a), ou à plus grande échelle, dans des centrales photovoltaïques (Figure I.3b) pour alimenter le réseau de distribution publique.

➤ Le solaire thermodynamique

Le solaire thermodynamique est un terme regroupant toutes les techniques de transformation des rayons du soleil en chaleur. L'énergie solaire thermodynamique est l'un des modes de valorisation du rayonnement solaire direct. Cette technologie consiste à concentrer le rayonnement solaire à l'aide de collecteurs pour chauffer un fluide à haute température et produire ainsi de l'électricité ou alimenter en énergie des procédés industriels comme illustré sur la Figure I.4.

Les centrales solaires thermodynamiques utilisent une grande quantité de miroirs qui font converger les rayons solaires vers un fluide caloporteur chauffé à haute température. Pour ce faire, les miroirs réfléchissants doivent suivre le mouvement du soleil afin de capter et de concentrer les rayonnements tout au long du cycle solaire quotidien.

Il existe trois grands types de **centrales solaires thermodynamiques**. Toutes comportent un dispositif de concentration des rayons du soleil. Il peut être soit linéaire soit par foyer.

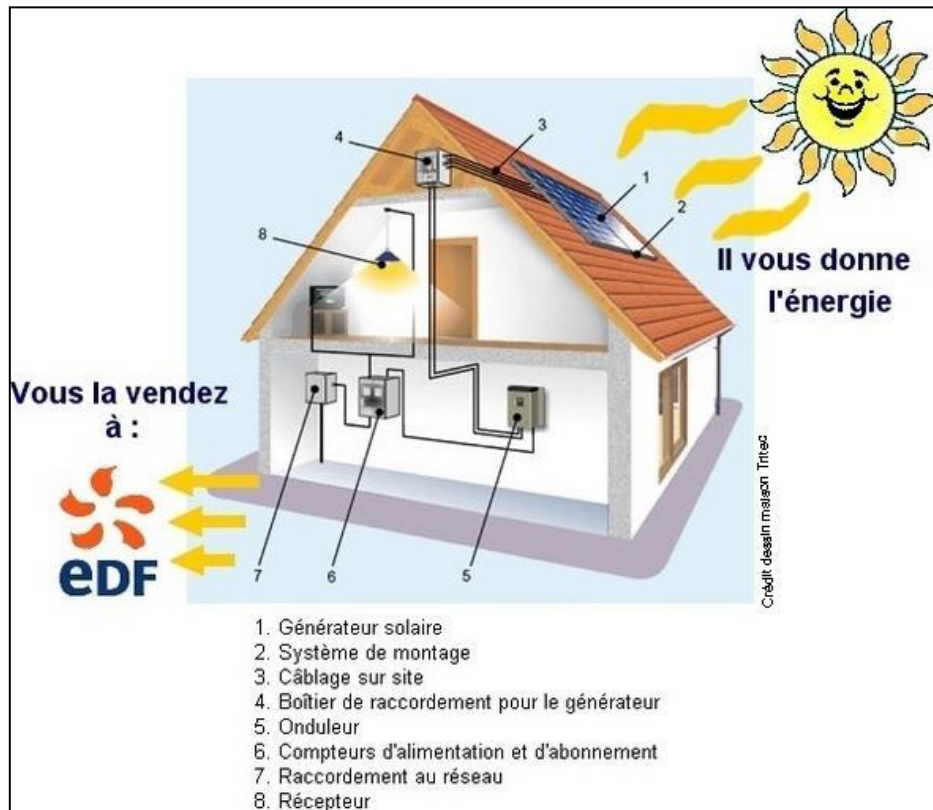


Figure I.3a : Application de l'énergie solaire individuelle [web4].



Figure I.3b : Centrale photovoltaïque de Tamanarasset 13 MWe [3].

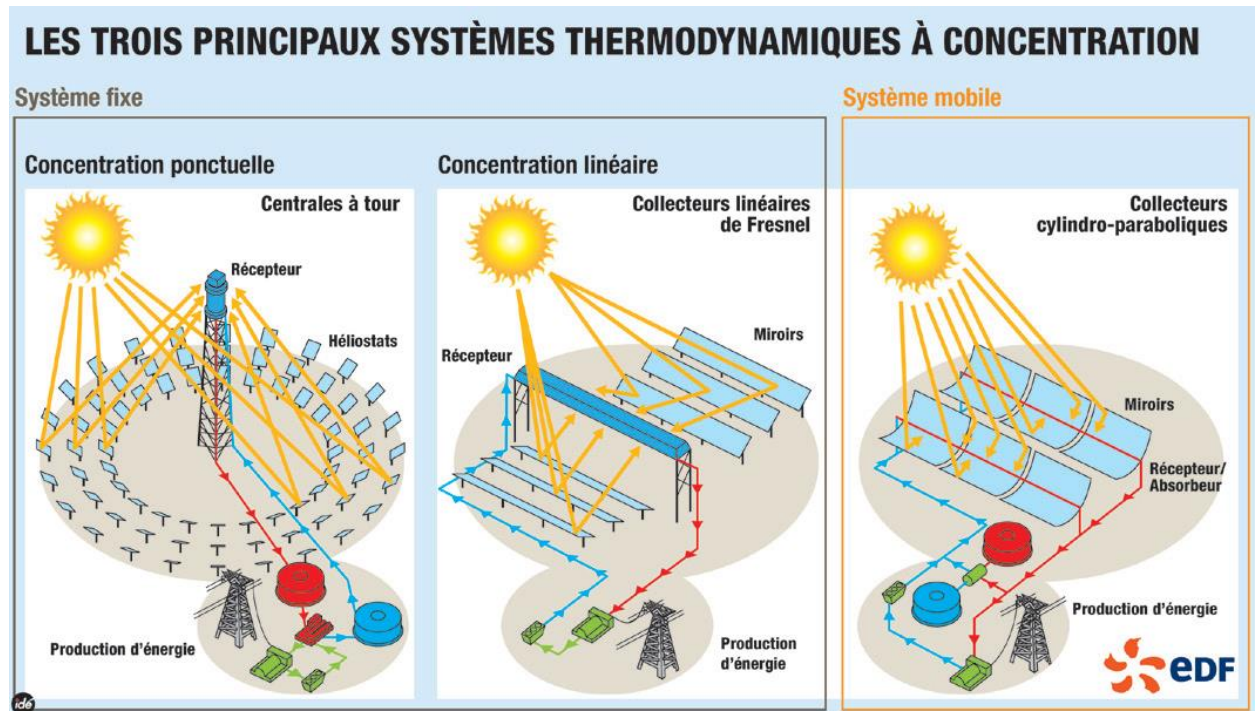


Figure I.4 : Les principaux systèmes thermodynamiques à concentration [4].

✚ Centrales à miroirs cylindro-paraboliques (linéaire)

Installées dans le désert, ces centrales sont aujourd'hui les plus répandues dans le monde. Le Maroc abrite d'ailleurs une des structures les plus puissantes du Monde: NOOR. Ce type de centrale se caractérise par plusieurs alignements de miroirs courbés où passe au centre le fluide caloporteur(FigureI.4).

✚ Centrales solaires à miroirs Fresnel (Linéaire)

Ces centrales ont l'avantage d'être moins coûteuses que celles à miroirs courbés, elles sont relativement peu utilisées. Cette baisse du coût est attribuée au fait que les miroirs de Fresnel ne sont que très légèrement courbés, donc moins chers à réaliser. La captation du rayonnement solaire se fait grâce à un système faisant bouger uniquement les miroirs comme noté sur la Figure I.4.

✚ Centrales à tour (par foyer)

Les centrales à tour sont composées d'une haute tour et d'un champ d'héliostats. Au sommet de la tour existe un récepteur où circule le fluide caloporteur. Il est directement chauffé par les centaines de miroirs des héliostats disposés concentriquement autour de la

tour (comme indiqué sur la Figure I.4) et il est transféré à un cycle à vapeur. Ce système présente une perte thermique réduite ce qui garantit sa performance.

I.1.4 Statistique sur l'énergie photovoltaïque dans le monde

La Figure I.5 illustre la part de l'énergie renouvelable dans la production mondiale d'électricité en 2017, par source d'énergie renouvelable. On peut constater que plus du quart (26,5%) de la production mondiale d'électricité portait sur l'électricité renouvelable et le reste 75,45% présente la part d'électricité portait sur l'électricité non renouvelable. On note également que le solaire occupe encore une place minime dans la production mondiale d'électricité durant cette année mais connaît une très forte progression depuis quelques années.

Parmi les énergies renouvelables, l'hydroélectricité comptait pour environ 75.45%, suivie par l'énergie éolienne avec un pourcentage 9.89%, ensuite l'énergie biomasse avec 12.03% et l'énergie photovoltaïque avec 1.14% de la production mondiale d'électricité en 2017.

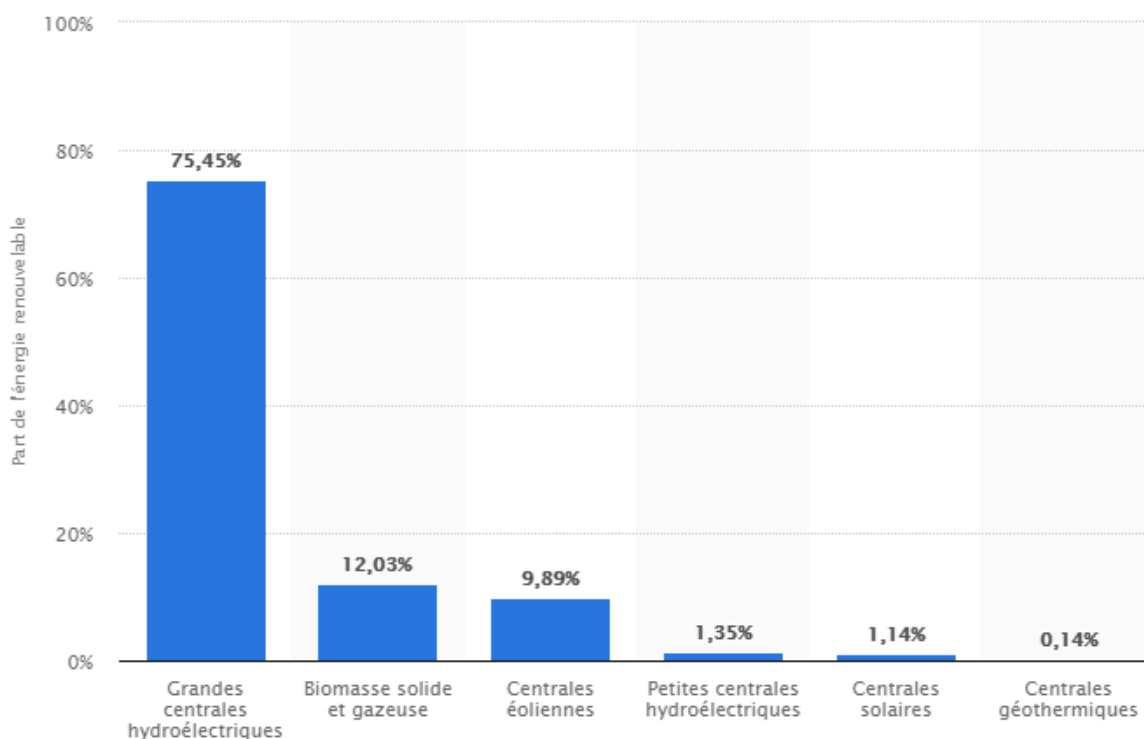


Figure I.5 : La part de l'énergie renouvelable dans la production mondiale d'électricité en 2017, par source d'énergie renouvelable [web4].

La Figure I.6 illustre la capacité en énergie solaire photovoltaïque dans le monde en 2017, selon le pays en gigawatts. La capacité la plus grande en énergie solaire photovoltaïque est réservée à la Chine avec une valeur de 131,1 Gigawatts, elle est suivie par les États-Unis avec une capacité d'énergie solaire photovoltaïque de 51 Gigawatts et le Japon avec 49 Gigawatts. Cette dernière est suivie par l'Allemagne (42,4 Gigawatts), Italie(19,7 Gigawatts), Inde(18,3 Gigawatts), Royaume-Uni (12,7 Gigawatts), France (8 Gigawatts), Australie(7,2 Gigawatts) et l'Espagne(5,6 Gigawatts).

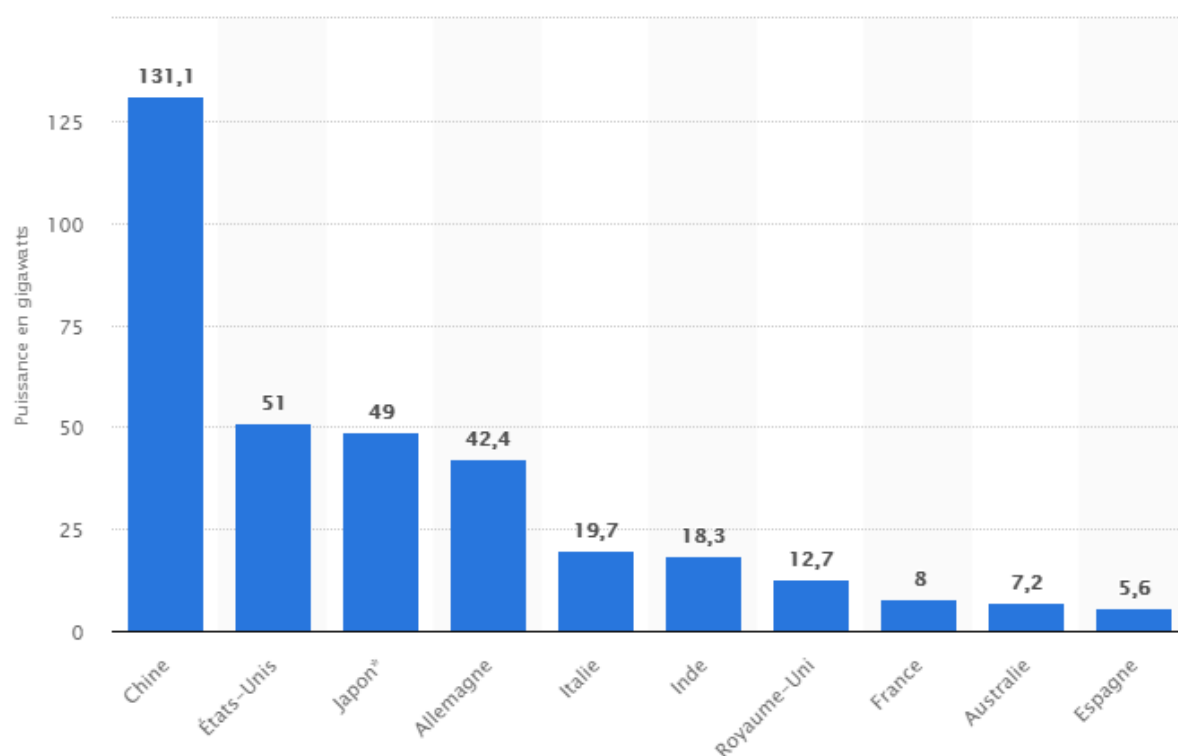


Figure I.6 : Capacité d'énergie solaire photovoltaïque dans le monde en 2017, selon le pays (en Gigawatts) [web7]

Les principaux pays producteurs de cellules solaires et de panneaux solaires sont la Chine, les Etats-Unis, le Japon et l'Allemagne. La puissance installée dans le monde est passée de quelques MegaWatts au début des années 2000 à 102 GigaWatts fin 2012 puis 227 GigaWatts fin 2015 et 300 GigaWatts fin 2016. Le rythme d'installation de puissance solaire photovoltaïque est actuellement de plus de 70 GigaWatts par an. C'est en Asie, notamment en Chine et en Inde, que plus de la moitié des installations solaires sont réalisées [web7].

I.1.5 Statistique sur l'énergie photovoltaïque en Algérie

L'Algérie a adopté en 2011 une stratégie ayant pour objectif de produire d'ici 2030, 40% d'électricité à partir de ressources renouvelables. Cette stratégie vise en outre à développer une véritable industrie du solaire, associée à un programme de formation et de capitalisation qui permettra, à terme, d'asseoir un savoir-faire efficient, notamment en matière d'engineering et de management de projets [6].

L'Algérie dispose d'un des plus grands gisements solaires au monde, la durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). De ce fait, le potentiel national en énergies renouvelables étant fortement dominé par le solaire, l'Algérie considère cette énergie comme une opportunité et un levier de développement économique et social, notamment à travers l'implantation d'industries créatrices de richesse et d'emplois.

Un plan à long terme sur les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique a été adopté pour objectif, la mise en place de 22.000 MW de capacité installée entre 2011 et 2030 dont 12.000 MW pour couvrir la demande nationale et 10.000 MW pourraient être exportés, si des garanties d'achat à long terme et des financements extérieurs étaient sécurisées [6]. Ce programme inclut la réalisation, d'ici 2020, d'une soixantaine de centrales solaires photovoltaïques et solaires thermiques, de fermes éoliennes et de centrales hybrides. Sa mise en œuvre, placée sous l'égide du ministère de l'énergie et des mines.

La stratégie énergétique de l'Algérie repose sur l'accélération du développement de l'énergie solaire. Le gouvernement prévoit le lancement de plusieurs projets solaires photovoltaïques d'une capacité totale d'environ 800 MWc d'ici 2020. D'autres projets d'une capacité de 200 MWc par an devraient être réalisés sur la période 2021-2030 [7].

Actuellement on compte 23 centrales photovoltaïques sur le territoire national comme illustré sur la Figure I.7. Elles ont été installées par la société SKTM (Shariket Kahraba wa Taket Moutadjadiada) depuis 2014. Ces centrales sont réparties en trois groupes selon la situation géographiques comme illustré sur la Figure I.8:

- **L'unité des Hauts Plateaux Est** : elle comporte les centrales suivantes; M'sila, El Hadjira, Oued Nechou, Batna, Djelfa et Souk Ahras. Elle présente une puissance totale de 121,1 MW.

- **L'unité des Hauts Plateaux Ouest** : elle comporte les centrales suivantes; Laghouat, S.B Abbas, Naama, Saida et El Bayadh. Elle présente une puissance totale de 145 MW.
- **L'unité du Sud** : elle comporte les centrales suivantes; Adrar, Kabertène, Tindouf Djanet, ZouietKounta, In Salah, Timimoune, Tamanrasset, Reggane, Aoulef. Elle présente une puissance totale de 78 MW.

Ces installations photovoltaïques ont été implantées dans le cadre d'un projet des 343 MWc, qui constitue un extrait de la première phase de déploiement du programme national des énergies renouvelables [Web3].

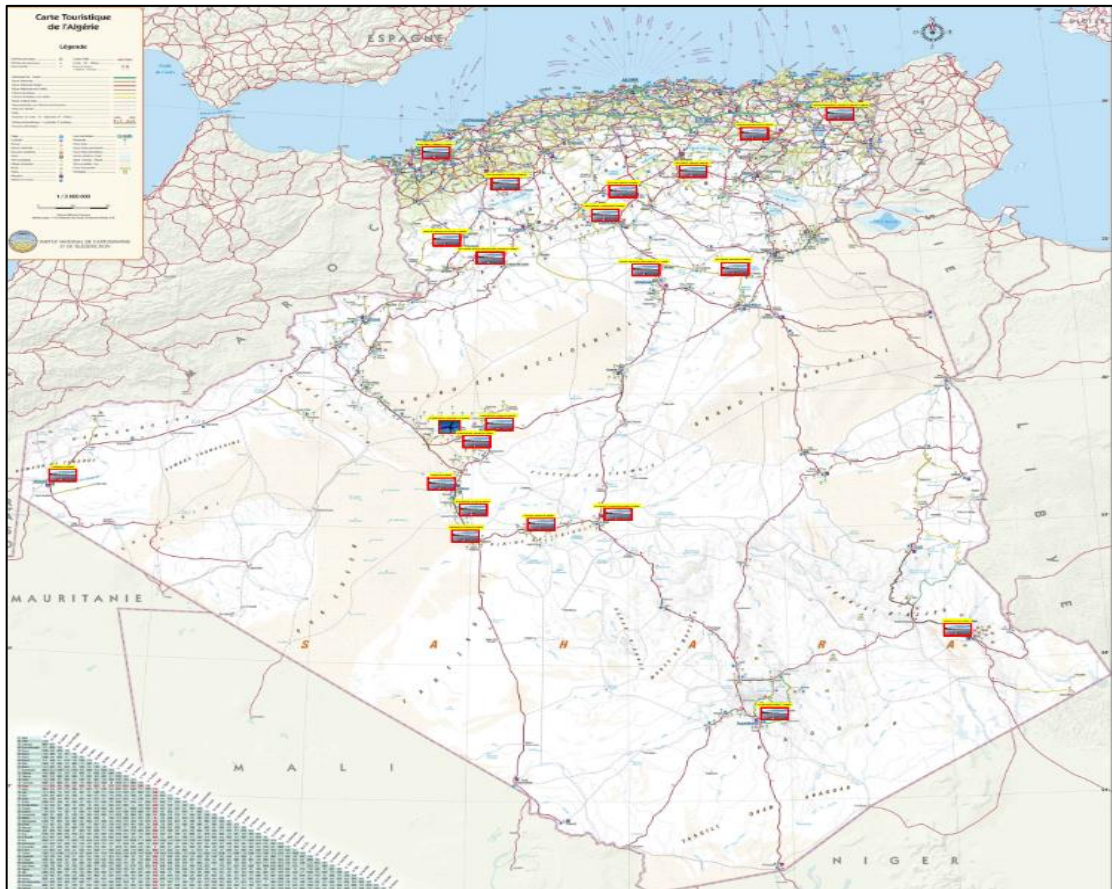


Figure I.7 : Capacité: Situation géographique des centrales EnR relevant de SKTM [5].

Les opérateurs chinois ont exploité les lots hauts plateaux est (Batna, Souk Ahras, Setif, Bourdj Bouararidj et Mila), centre (M'sila, Djalfa, Laghouat et Ouargla), le pôle In Salah-Adrar-Timimoun (Adrar, Kabertène, Aoulef, Reggane, Zaouyet Kounta, In Salah et Timimoun) , ainsi que les trois (03) centrales RIS (Réseaux Isolés du Sud) implantées à Tindouf, Djanet et Tamanrasset, soit une puissance de 258MWc, cependant, le lot hauts

plateaux ouest (Sidi Belabes, Saida, Nâama et El Bayodh) est consacré au constructeur allemand représentant une puissance de 85MWc [Web3].

Les quatre (04) centrales qui devaient être implantées dans les hauts plateaux Est, Batna, Sétif, Bordj Bouararidj et Mila, totalisant une puissance de 75MWc n'ont pas pu être lancées en réalisation, faute de distraction des terrains choisis initialement, classés dans la catégorie des terrains à vocation agricole. Par conséquent, les quatre sites ont été délocalisés vers Laghouat (40MWc), Djelfa (33MWc) et 02 MWc maintenus à Batna, dans le but de préserver le foncier agricole d'une part, et de réaliser la puissance prévue, d'autre part. Il convient de souligner que ces projets lancés tardivement pour les raisons évoquées précédemment, seront réceptionnés ultérieurement [Web3].

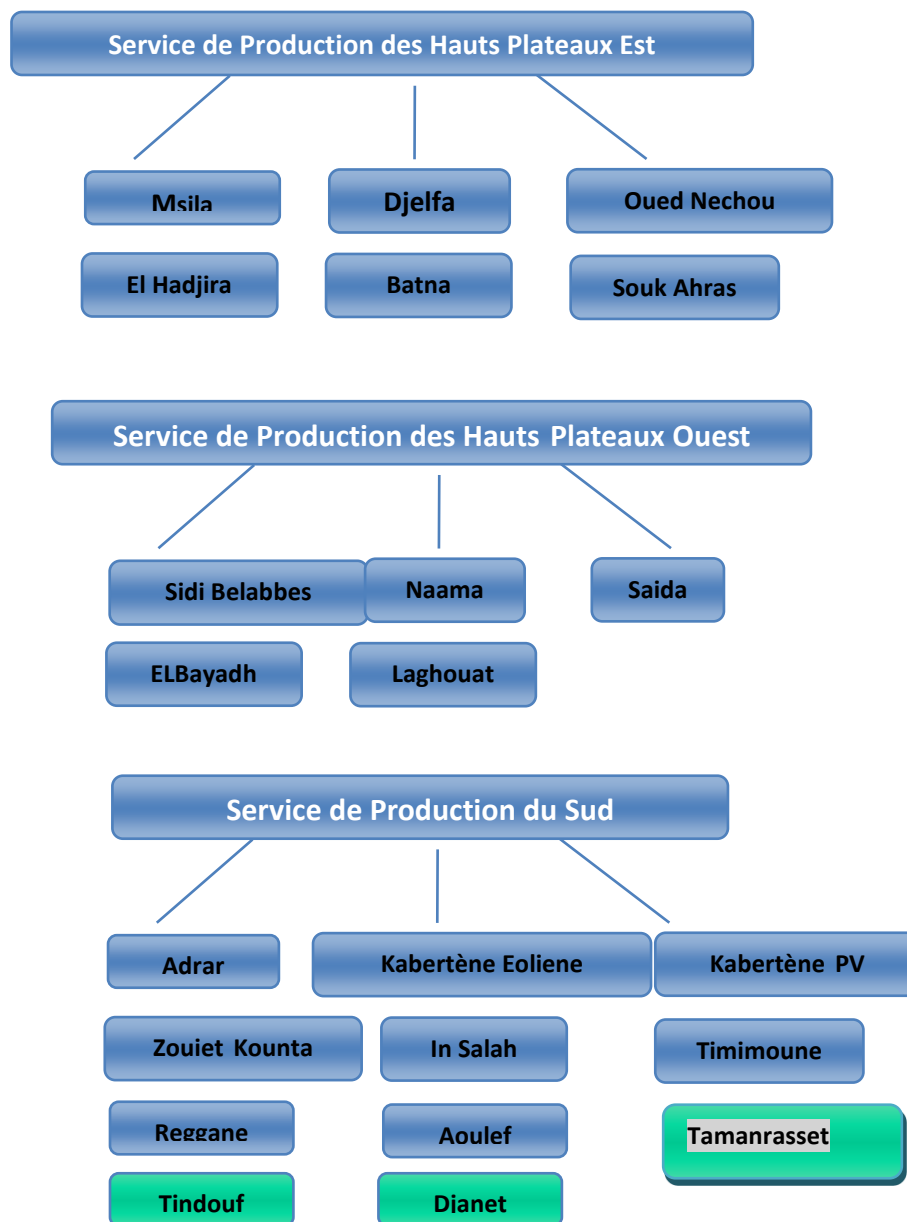


Figure I.8 : Répartition des centrales photovoltaïques en Algérie selon les régions [web3].

Il importe de noter au passage, que sur l'ensemble des centrales lancées, dix-neuf (19) centrales sont déjà mises en service et injectent sur les réseaux 30 KV et 60 KV, totalisant une puissance installée de 268 MWc. La première centrale mise en service est celle de Djanet, le 19 février 2015, d'une puissance de 03MWc. cinq (05) centrales totalisant une puissance de 48 MWc ont été raccordées au réseau durant l'année 2015, à savoir Djanet, Adrar, Kabertène, Tindouf et Tamanrasset. L'année 2016 a été marquée par le raccordement de quatorze (14) centrales totalisant une puissance de 220 MWc, lesquelles : Timimoune, Aoulef, Reggane, In Salah, Zouyet Kounta, El Bayodh, Naâma, Sidi Belabes, Saida, Ouargla, M'sila, Souk Ahras, Djalfa (1) et Laghouat (1)[Web3].

Les puissances individuelles de chacune des centrales photovoltaïques fonctionnelles sont regroupées dans le Tableau I.1. Notant que la centrale de Laghouat présente la puissance la plus grande de toutes les centrales installées avec une puissance de 60 MW, par contre la centrale de Batna présente la plus petite valeur de puissance (2 MW) [7].

Site	Puissance (MwC)	Operateur	Année d'injection sur 30kV/60kV
BATNA	02	Groupeement YINGLI SOLAR/SINO HYDRO/CNTIC.	2015
SOUK AHRAS	15	Groupeement YINGLI SOLAR/SINO HYDRO/CNTIC.	2016
M'SILA	20	Groupeement YINGLI SOLAR/SINO HYDRO/CNTIC.	2016
DJELFA	20+33	Groupeement YINGLI SOLAR/SINO HYDRO/CNTIC.	2015/2016
LAGHOUAT	40+20	Groupeement YINGLI SOLAR/SINO HYDRO/CNTIC.	2016/2015
OUIARGLA	30	Groupeement YINGLI SOLAR/SINO HYDRO/CNTIC.	2016
ADRAR	20	Groupeement YINGLI SOLAR/SINO HYDRO/CNTIC.	2015
KABERTENE	03	Groupeement YINGLI SOLAR/SINO HYDRO/CNTIC.	2015
AOULEF	05	Groupeement YINGLI SOLAR/SINO HYDRO/CNTIC.	2016
REGGANE	05	Groupeement YINGLI SOLAR/SINO HYDRO/CNTIC.	2016
ZAOUYET KOUNTA	06	Groupeement YINGLI SOLAR/SINO HYDRO/CNTIC.	2016
IN SALLAH	05	Groupeement YINGLI SOLAR/SINO HYDRO/CNTIC.	2016
TIMIMOUNE	09	Groupeement YINGLI SOLAR/SINO HYDRO/CNTIC.	2016
TINDOUF	09	Groupeement YINGLI SOLAR/SINO HYDRO/CNTIC.	2015
DJANET	03	Groupeement YINGLI SOLAR/SINO HYDRO/CNTIC.	2015
TAMANRASSET	13	Groupeement YINGLI SOLAR/SINO HYDRO/CNTIC.	2015
SIDI BELABBAS	12	BELECTRIC	2016
SAIDA	30	BELECTRIC	2016
NAAMA	20	BELECTRIC	2016
EL BAYADH	23	BELECTRIC	2016

Tableau I.1: La puissance des centrales photovoltaïques en Algérie [5].

Partie 2 : Système photovoltaïque

I.2.1 La conversion photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique de base du module photovoltaïque et ainsi du champ photovoltaïque. Son principe de fonctionnement repose sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque, c'est la conversion d'énergie lumineuse (solaire) en énergie électrique. Le courant obtenu est proportionnel à la puissance lumineuse incidente.

La tension générée peut varier entre 0.3 V à 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que la température de la cellule et du vieillissement de la cellule. L'effet photovoltaïque est une des propriétés électriques des semi-conducteurs.

I.2.1.1 Matériau semi-conducteur

Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charge libre est très faible par rapport aux métaux. Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction). Cette énergie est appelée l'énergie du «bande gap» (E_g en électronvolt (eV)), elle est propre à chaque matériau semi-conducteur, sa valeur varie entre 1.0 et 1.8 eV pour les applications photovoltaïques. A titre d'exemple, on a 1.1 eV pour le silicium cristallin ($c - Si$), et 1.7 eV pour le silicium amorphe ($a - Si$).

Le rayonnement arrivant à surface de la cellule solaire sera réparti en trois parties : une partie réfléchi, une autre absorbée et la dernière traverse l'épaisseur de la cellule [8]. Les photons absorbés dont l'énergie est supérieure à l'énergie de la bande gap vont libérer un électron négatif, laissant un 'trou' positif derrière lui. Pour séparer cette paire de charges électriques de signes opposés (positive et négative) et recueillir un Courant électrique, il faut introduire un champ électrique e , de part et d'autre de la cellule [9].

I.2.1.2 Formation de la jonction PN.

Une jonction P-N est créée par la mise en contact d'un semi-conducteur dopé N (donneur d'électron) et d'un semi-conducteur dopé P (donneur de trous). L'interface entre ces deux régions s'appelle **une jonction**. Pour réaliser des cellules photovoltaïques, il existe trois configurations de jonctions [10] :

- Une jonction PN (homo jonction ; les deux régions sont constituées d'un même matériau semi-conducteur, du silicium dans la majorité des cas).
- Une hétérojonction (jonction entre deux semi-conducteurs différents).
- Une jonction métal-semi-conducteur.

Dans ces trois types de jonction, les phénomènes physiques intervenant dans le fonctionnement des cellules photovoltaïque sont similaires.

I.2.1.2 Principe de la conversion photoélectrique

Une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi-conducteur qui sont dopées différemment comme illustré sur la Figure I.9. 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 du semi-conducteur. L'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons lumineux. Une couche anti reflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbée [11].

La naissance d'une différence de potentiel lorsque les porteurs de charges sont créés dans les environs de la jonction par excitation lumineuse, permet à la cellule de fonctionner comme un générateur électrique quand les deux faces de la cellule sont électriquement reliées à une charge.

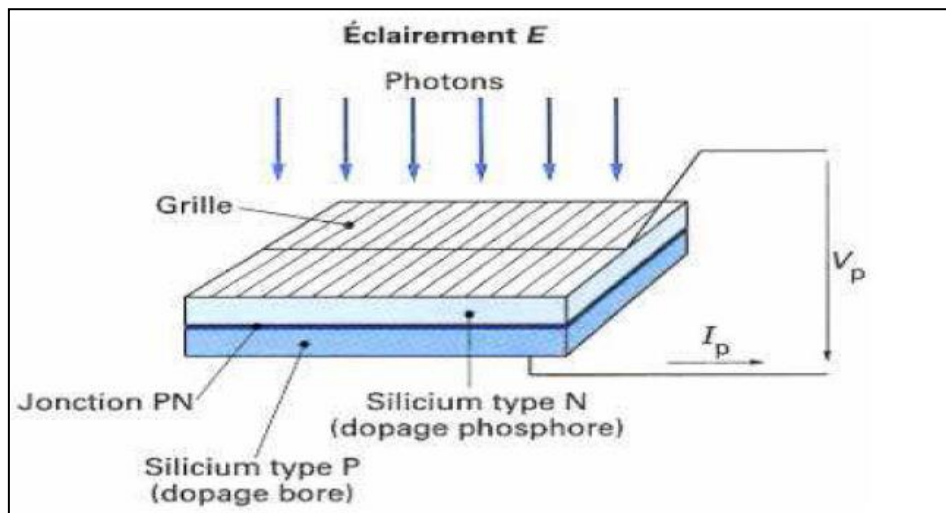


Figure I.9 : Production d'électricité par conversion photoélectrique [11].

I.2.2 Composition d'une cellule photovoltaïque

Le panneau solaire est constitué d'un assemblage de cellules photovoltaïque afin d'obtenir une puissance suffisante. La cellule photovoltaïque est composée des éléments suivants comme représenté sur la Figure I.10:

- Une couche de verre qui protège la cellule. Les couvertures de protections sont indispensables puisque la cellule est très fragile.

- Une couche anti-reflet, puisque le silicium est très réflécheur, on place donc un revêtement anti-réflexion sur le dessus de la cellule permettant ainsi une pénétration maximale des rayons solaires,
- Une grille conductrice (ou une couche conductrice), il faut que cette couche soit conductrice et ne subisse pas des phénomènes de corrosion. On a donc une couche qui sert de cathode (pôle +) recouvrant la couche semi-conductrice dopée N et une couche qui joue le rôle de l'anode (pôle -) en dessous la couche semi-conductrice P.
- Une couche avec porteurs de charges libres négative (N) en contact avec une autre couche avec porteurs de charges libres positives (P).

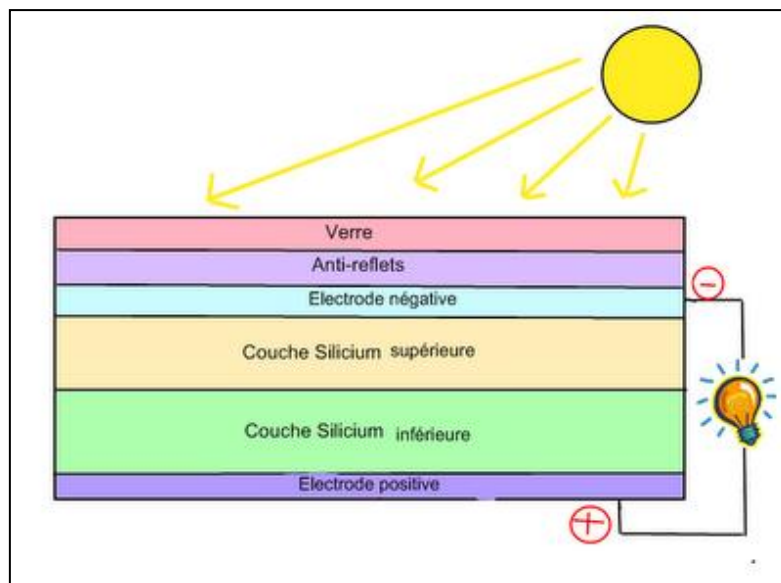


Figure I.10 : Composition d'une cellule photovoltaïque [web8].

I.2.3 Les technologies photovoltaïques

Il existe plusieurs types de cellules photovoltaïques et chaque type est caractérisé par son rendement et son coût. Il faut noter quel que soit le type de la cellule photovoltaïque, le rendement reste assez faible, il est compris entre 8 et 23 % de l'énergie que la cellule reçoit.

Notant qu'il existe trois générations de technologies des cellules photovoltaïques à savoir : la technologie à base de silicium cristallin, la technologie à base de couche mince, la technologie des cellules organiques comme illustré sur la Figure I.11.

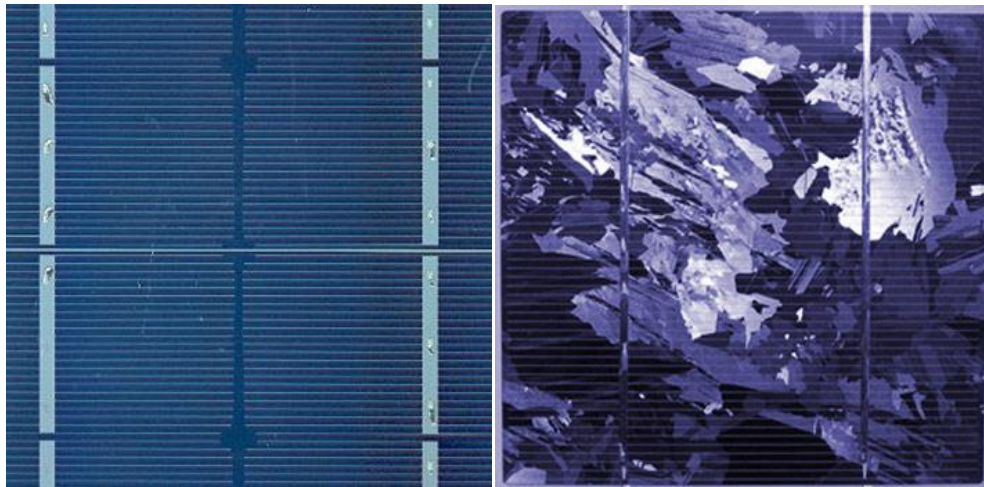
La première génération existe depuis plusieurs dizaines d'années, elle comprend le monocristallin et le poly cristallin, elle offre de loin le meilleur rendement pour un rapport qualité/ prix assez satisfaisant [web5].

La deuxième génération, récemment apparue regroupe les technologies dites « couches minces », leurs rendement est encore inférieur à celui des cellules cristallines mais tend à s'améliorer pour un coût inférieur. Ce type de technologie regroupe les cellules amorphes, le tellure de Cadmium (CdTe) et le Cuivre indium sélénium (CIS) /Cuivre indium Gallium sélénium (CIGS).

La dernière et troisième génération, celle des cellules organiques est en cours de développement et vise de hauts rendements avec des coûts de productions de plus en plus bas. Il en existe principalement deux types : les cellules photovoltaïques organiques moléculaires et les cellules photovoltaïques organiques en polymères.

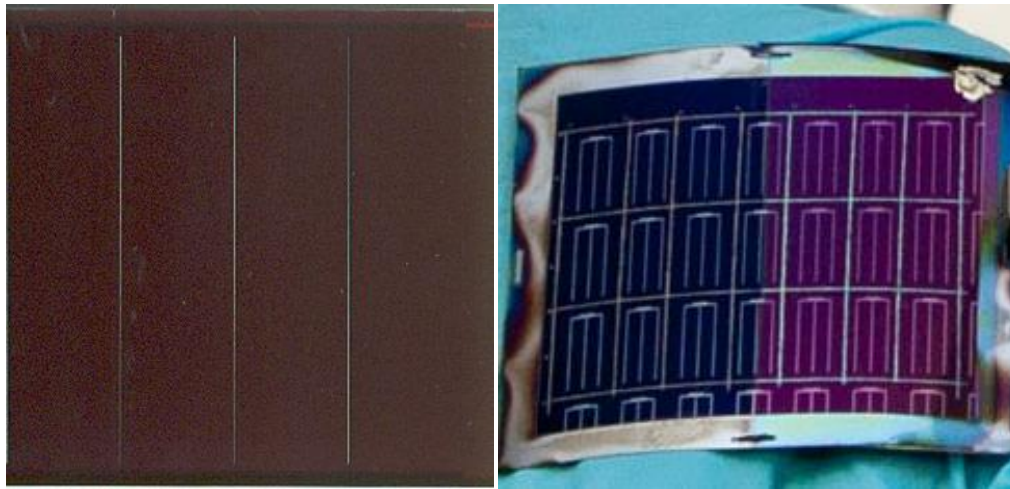
Les progrès de cette technologie est très rapide, des records de rendement sont très fréquemment annoncés (actuellement près de 6%). Le principal frein à ces technologies est actuellement la stabilité de leurs performances ainsi que leur durée de vie (actuellement environ 1000 heures d'exposition).

Le tableau I.2 regroupe les performances de ces différentes technologies des cellules photovoltaïques.



a) Monocristalline

b) Polycristalline



c) Amorphe

d) Organique

Figure I.11 : Les différents types de cellule photovoltaïque [web5].

	Technologies	Rendement	Avantages	Inconvénients	Durée de vie
1 ^{ère} Génération	Silicium monocristallin	14-17%	Bon rendement pour une cellule	Coût élevé, perte de matière première en cours de fabrication	35 ans
	Silicium polycristallin	12-15%	Bon rendement pour un module	Coût élevé, perte de matière première en cours de fabrication	35 ans
2 ^{ème} Génération	Silicium Amorphe	6-10%	Facile à fabriquer	Mauvais rendement	<10 ans
	Cdte	8-11%	Absorbe 90% des photons incidents	Cadmium très polluant	Non évaluée
	CIS/CIGS	10-12%	Energie de gap ajustable 99% des photons absorbés	Manque de matière première	5 ans
3 ^{ème} Génération	Cellules organiques	10%	Faible coût de fabrication, Flexible	Rendement encore trop bas	Faible actuellement

Tableau I.2: Performances des différentes technologies des cellules photovoltaïques [12].

I.2.4 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

De nombreux modèles mathématiques de modules photovoltaïques ont été développés dans le but d'obtenir les caractéristiques Courant-Tension et Puissance-Tension afin d'analyser et d'évaluer des performances des systèmes photovoltaïques.

I.2.4.1 Cas d'une cellule idéale

La cellule photovoltaïque peut être représentée par le circuit électrique équivalent notée sur la Figure I.12. Il est composé d'un générateur de courant et d'une diode parallèle. Le courant I généré par la cellule s'écrit alors [9] :

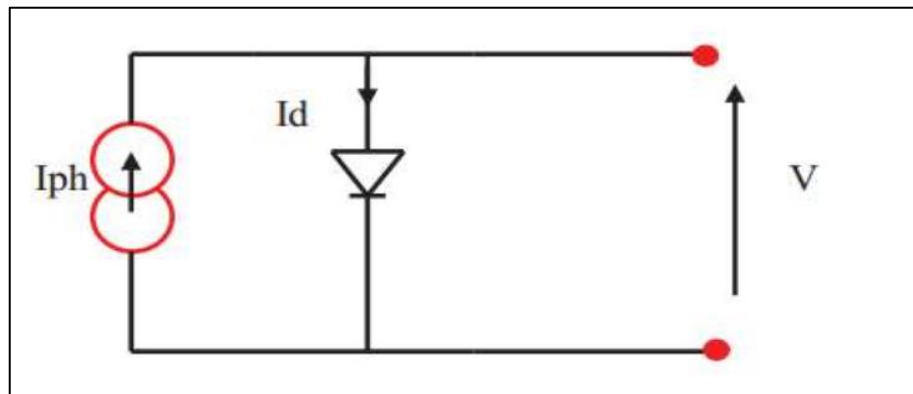


Figure I.12 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale.

D'après la loi de nœuds le courant généré par la cellule photovoltaïque est donné par la relation suivante:

$$I = I_{ph} - I_d \quad (I.2)$$

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation :

$$I_d = I_0 \left(\exp \frac{V_d}{V_t} - 1 \right) \quad (I.2)$$

Avec :

I_0 : Le courant de saturation inverse de la diode [A]. Il est exprimé par :

$$I_{ph} = I_{or} \left[\left(\frac{T}{T_n} \right)^3 \times \exp \left[\frac{E_g}{BK} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right] - 1 \right] \quad (I.3)$$

I_{or} : est le courant de court-circuit de la cellule à la température de référence T_n et l'éclairement de référence

T : Température de la jonction des cellules PV [$^{\circ}K$]

T_n : Température de référence des cellules PV [$^{\circ}K$]

B : facteur d'idéalité de la jonction

E_g : Énergie de gap [eV]

V_d : La tension aux bornes de la diode [V].

V_t : La tension thermique est donnée par :

$$V_t = \frac{NKT}{q} \quad (I.4)$$

Avec :

N : Facteur d'idéalité de la photopile ;

K : Constant de Boltzmann ($1,38.10^{-23}J/K$) ;

q : Charge de l'électron ($1,6.10^{-19}C$) ;

I_{ph} : Le photo-courant dépendant de l'éclairement (G). Il est exprimé par la relation :

$$I_{ph} = [I_{cc} + K_i(T_a - T_{ref})] \times \frac{G}{G_{ref}} \quad (I.5)$$

Avec :

G : L'éclairement absorbé par la cellule photovoltaïque [W/m^2] ;

G_{ref} : L'éclairement de référence ($1000 w/m^2$) ;

I_{cc} : Courant de court-circuit du panneau (donné par le constructeur) [A] ;

K_i : Courant de court-circuit divisé par le coefficient de température du panneau [A/K] ;

T_a [K] : Température ambiante ;

T_{ref} [K] : Température de référence (298 K).

Donc la relation devient :

$$I = I_{ph} - I_o \times \left(\exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1 \right) \quad (I.6)$$

I.2.4.2 Cas d'une cellule réelle

La Figure I. 13 illustre le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque. Il correspond à un générateur de courant I monté en parallèle avec une diode. Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma, elles ont une influence sur les caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$ de la cellule :

- La résistance série (R_s) est la résistance interne de la cellule : elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.
- La résistance shunt (R_p) est due à un courant de fuite au niveau de la jonction; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

Dans ce cas, le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque se met sous la forme mathématique suivante:

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (I.7)$$

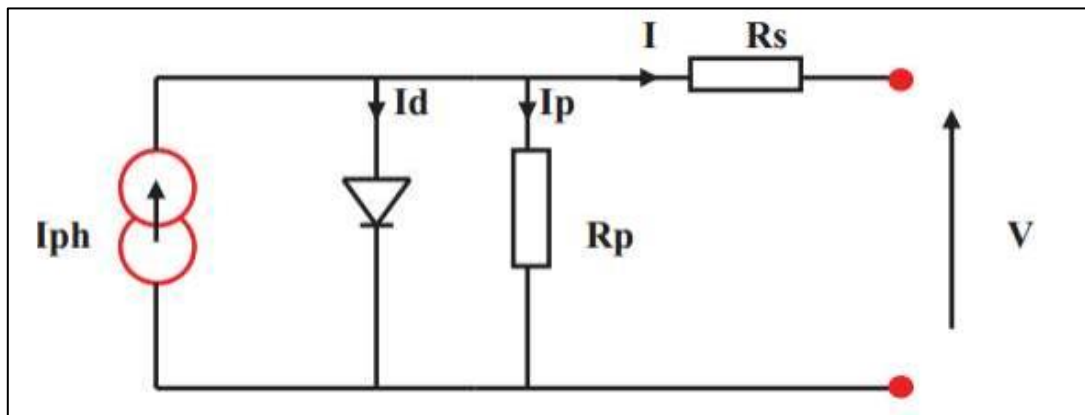


Figure I.13 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.

Avec:

R_s : résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi-conducteur, ainsi les résistances ohmiques et de contact au niveau des connexions des cellules ;

V : La tension de sortie :

I_p : Le courant circulant dans la résistance R_p :

R_p : Résistance shunt représente les fuites autour de la jonction p-n dues aux impuretés et sur les coins de cellule.

L'équation finale prend la forme suivante :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{V + I \times R_s}{V_t}} - 1 \right] - \frac{V + I \times R_s}{R_p} \quad (I.8)$$

Le même raisonnement s'applique sur un module photovoltaïque, sauf que les caractéristiques liées à la cellule photovoltaïque doivent être remplacées par celles d'un module photovoltaïque. Dans ce cas, on appelle caractéristique courant tension $I(V)$, la courbe représentant la variation du courant I en fonction de la tension V aux bornes du module photovoltaïque suivant l'équation I.8. Cette évolution est représentée sur la Figure I.14. Elle présente trois zones [13] :

- **La zone (I)** : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.

- **La zone (II)** : correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

- **La zone (III)** : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.

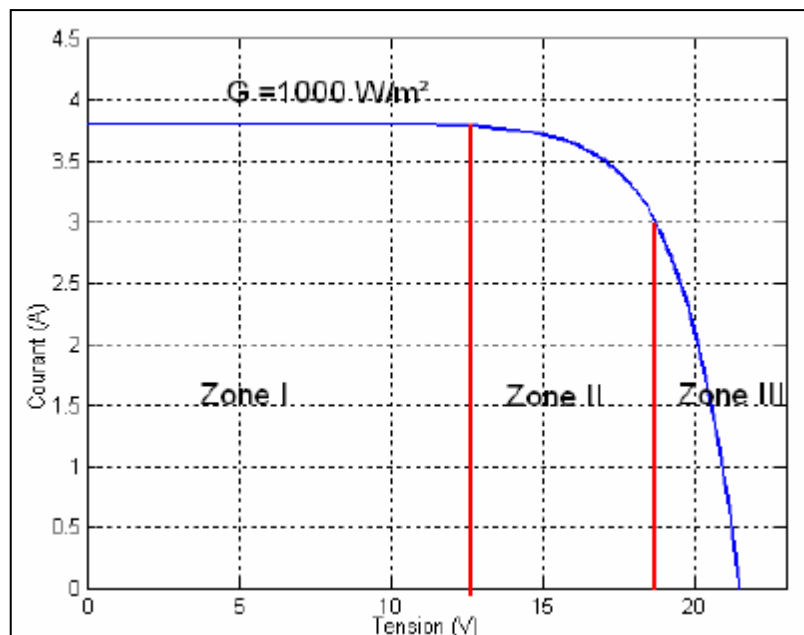


Figure I.14 : Les différentes zones de la caractéristique I (V)($G= 1000\text{W} : \text{m}^2$ $T=25^\circ\text{C}$)[13].

I.2.5 Paramètres caractéristiques d'un module photovoltaïque

Les paramètres caractéristiques d'un module photovoltaïques sont : le courant de court-circuit I_{cc} , tension de circuit ouvert V_{co} , le courant I_m et la tension V_m qui produisent la puissance maximale P_m , la puissance maximale P_m , le facteur de forme FF et le rendement η . Ces caractéristiques permettent de comparer différentes modules dans des conditions identiques.

I.2.5.1 Courant de court-circuit I_{cc}

C'est le courant débité par le module photovoltaïque quand la tension à ses bornes est nulle, ce point est illustré sur la Figure I.15a .Pratiquement ce courant est très proche de la photo courant I_{ph} .

I.2.5.2 Tension de circuit ouvert V_{co}

C'est la tension qui apparait aux bornes de la cellule quand le courant débité est nul, ce point est illustré sur la Figure I.15a.

I.2.5.3 Puissance maximale

Dans des conditions de fonctionnement bien déterminées (éclairage et température), la puissance électrique (P) disponible aux bornes du module photovoltaïque est égale au produit du courant continu fourni (I) et de la tension continue donnée (V) :

$$P = U.I \quad (I.9)$$

Avec :

P : La puissance mesurée aux bornes du module photovoltaïque [W] ;

V : La tension mesurée aux bornes du module photovoltaïque [V] ;

I : L'intensité mesurée aux bornes du module photovoltaïque [A].

Le point de puissance maximale (P_m) est le point de coordonnées (V_m , I_m) noté sur les Figures I.15a et 15b qui correspond à la puissance maximale. Pour des raisons de simplification, les professionnels caractérisent un module PV par sa puissance maximale aux conditions de fonctionnement standard (STC) c'est-à dire l'ensoleillement de $1000W/m^2$ et une température de $25^\circ C$.

I.2.5.4 Le facteur de forme FF

On appelle facteur de forme FF le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule P_m , et le produit du courant de court-circuit (I_{cc}) par la tension de circuit ouvert (V_{co}) (c'est à dire la puissance maximale d'une cellule idéale).

$$FF = \frac{P_{max}}{(V_{co} \times I_{cc})}$$

$$FF = \frac{I_m \times V_m}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (I.10)$$

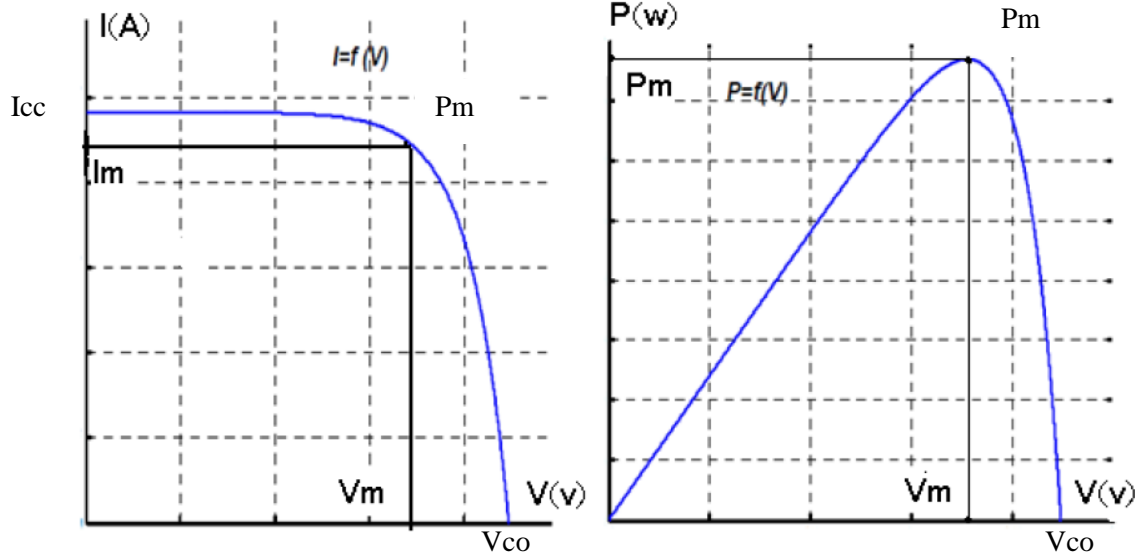


Figure I.15a : Caractéristique $I=f(v)$.

Figure I.15b : Caractéristique $P=f(v)$.

I.2.5.5 Rendement de conversion

Le rendement des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} .

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \times V_{co} \times I_{cc}}{P_{in}} \quad (I.11)$$

La puissance incidente est égale au produit de l'ensoleillement et de la surface réceptrice.

I.2.6 Association des modules Photovoltaïques en parallèle

En additionnant des modules identiques en parallèle, la tension du groupement est égale à la tension de chaque module et le courant augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans le groupement. La courbe caractéristique de ce groupement est donnée sur la Figure I.16.

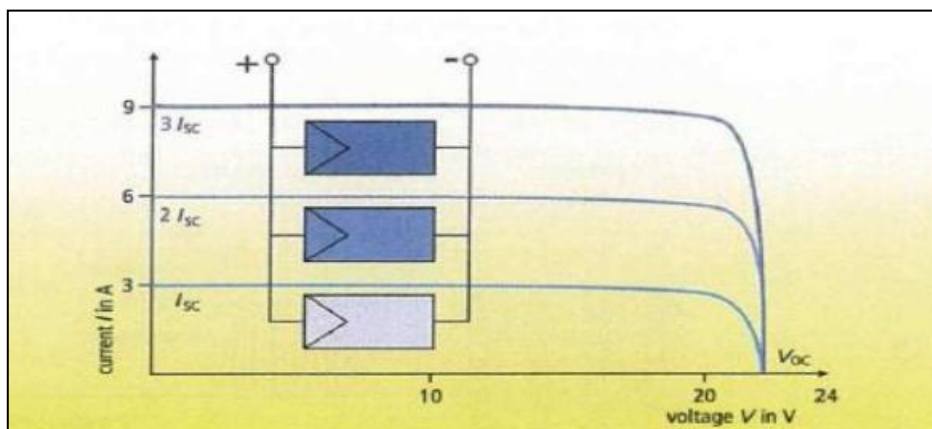


Figure I.16 : Courbe caractéristique d'un groupement en parallèle des modules photovoltaïque [14].

I.2.7 Association des modules Photovoltaïques en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné, comme illustré sur la Figure I.17.

I.2.8 Association des modules Photovoltaïques en série/parallèle

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est-à-dire le montage série/parallèle, un exemple est illustré sur la Figure I.18.

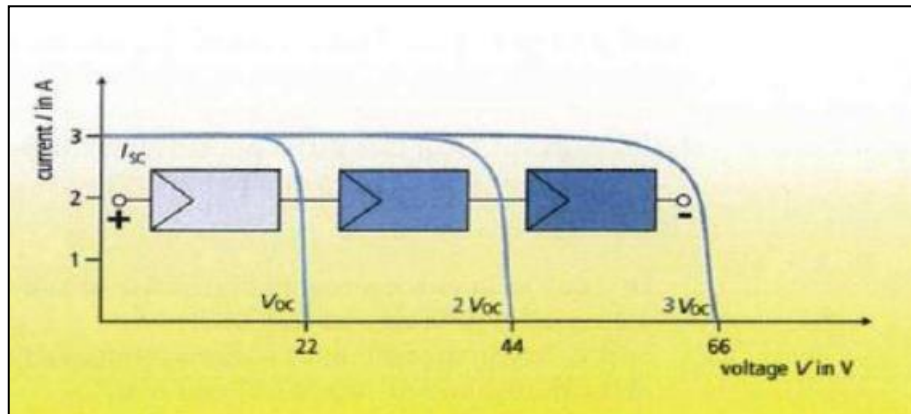


Figure I.17 : Courbe caractéristique d'un groupement en série des modules photovoltaïque [14].

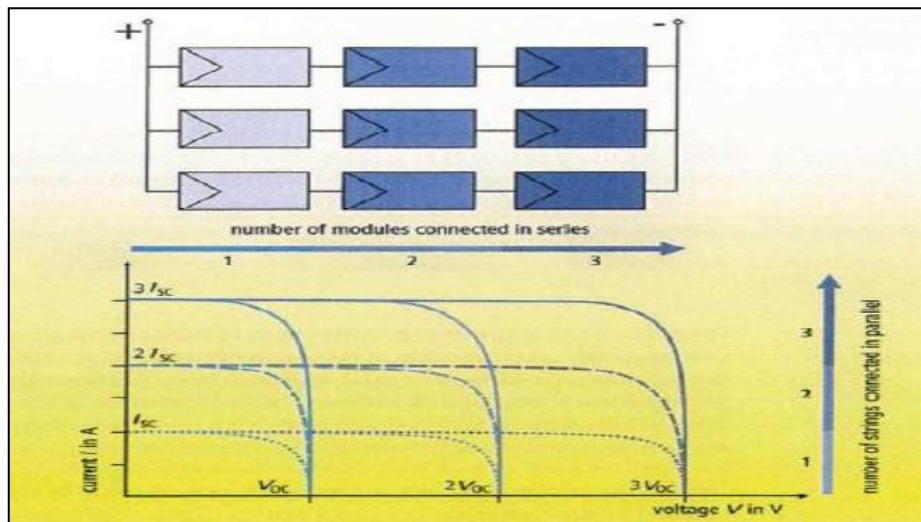


Figure I.18 : Courbe caractéristique d'un groupement en parallèle /série des modules photovoltaïque [14].

Partie 3 : Les centrales photovoltaïques

I.3.1. Types d'installations photovoltaïques

I.3.1.1 Installations autonomes

Les installations autonomes sont des installations non raccordées au réseau, composées de panneaux PV et dont le système de stockage garantit une énergie électrique même en cas de faible éclairage ou d'obscurité. La Figure 1.20 illustre une installation autonome non raccordée au réseau.

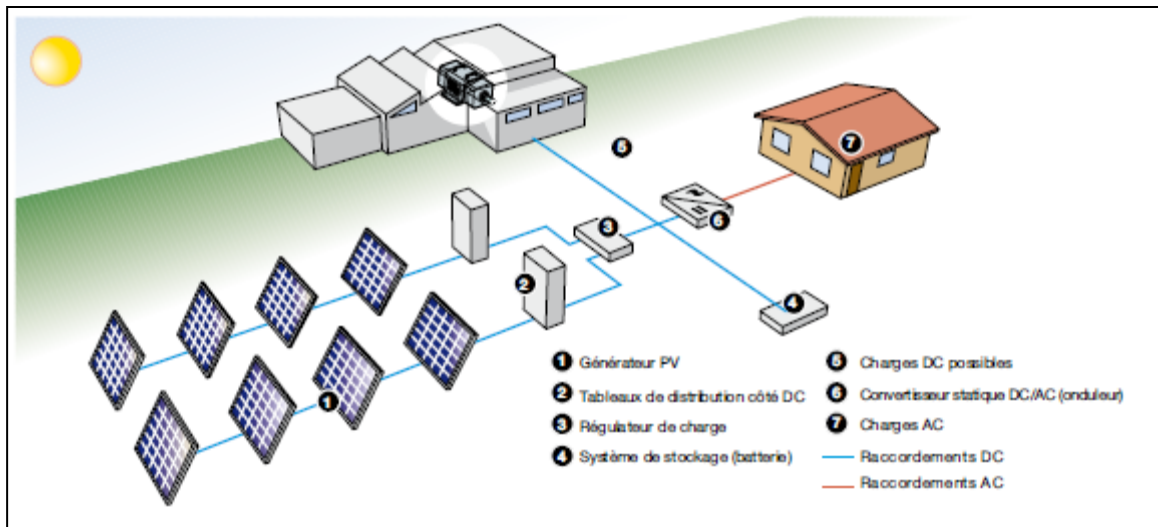


Figure 1.19 : Schéma de principe d'une installation PV autonome [15].

Etant donné que le courant fourni par le générateur PV est du courant DC, si l'installation de l'utilisateur requiert du courant AC, un onduleur est nécessaire. Ces installations présentent des avantages d'un point de vue technique et financier si le réseau électrique n'est pas présent ou s'il n'est pas facile d'accès, car elles peuvent remplacer des ensembles moteur-générateur. D'autre part, dans une centrale autonome, le champ PV est surdimensionné de sorte que, pendant les heures d'ensoleillement, l'alimentation de charge ainsi que la recharge des batteries de stockage puissent être garanties avec une certaine marge de sécurité en tenant compte des jours de faible ensoleillement. Actuellement, ces installations autonomes sont utilisées pour alimenter les [15]:

- équipement de pompe à eau ;
- répéteurs radio, stations de transmission de données et d'observation météorologique ou sismique ;
- systèmes de protection contre la foudre ;
- systèmes de signalisation routière, portuaire ou aéroportuaire;

- services de caravanes et camping-cars ;
- installations publicitaires ;
- refuges de haute montagne.

I.3.1.2 Installations raccordées au réseau

Les installations raccordées en permanence au réseau utilisent l'énergie du réseau lorsque le générateur PV n'est pas en mesure de produire l'énergie nécessaire pour satisfaire les besoins du consommateur. En revanche, si le système PV produit un excédent d'énergie électrique, celui-ci est mis sur le réseau, qui agit par conséquent comme un grand accumulateur : les systèmes raccordés au réseau n'ont donc pas besoin de batterie d'accumulateur. La Figure (1.22) montre le schéma de principe d'une installation photovoltaïque raccordée au réseau.

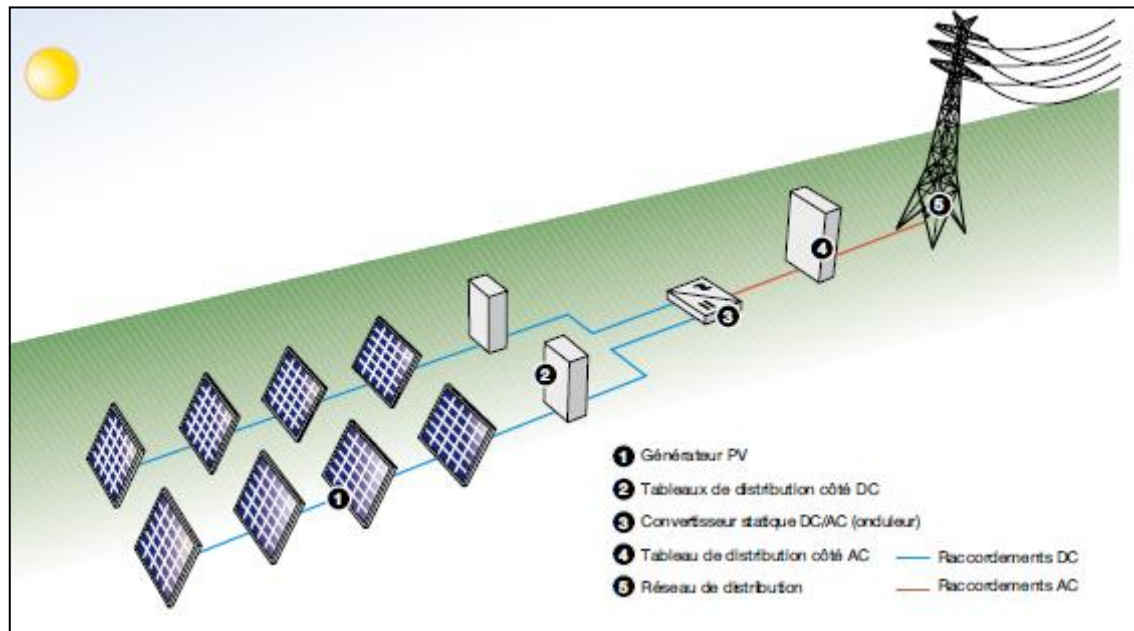


Figure 1.20 : Schéma de principe d'une installation PV raccordée au réseau [15].

Ces installations présentent l'avantage de fournir une génération répartie et non centralisée : en effet, la valeur de l'énergie produite près de la zone de consommation est supérieure à celle de l'énergie produite dans les grandes centrales traditionnelles, car les pertes par transmission sont limitées et les dépenses liées au transport et aux systèmes électriques de répartition sont réduites. En outre, la production d'énergie lors des heures d'ensoleillement permet de réduire le recours au réseau pendant la journée, autrement dit lorsque la demande est supérieure [15].

I.3.2 Principaux composants d'une centrale PV

Les composants d'un système photovoltaïque dépendent de l'application considérée : habitation isolée ou proximité d'un réseau, utilisation de batterie ou « au fil du soleil », convertisseurs de puissance. Il existe plusieurs composants d'un système photovoltaïque parmi lesquels:

I.3.1 Générateur photovoltaïque :

Par définition un module photovoltaïque est un ensemble de photopiles regroupées pour produire une puissance électrique exploitable. En effet, une photopile élémentaire produit une tension comprise entre 0.5 et 1.5 V selon les technologies, elle présente une valeur faible. Le module photovoltaïque comporte généralement 36 cellules en série qui sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène-vinyle-acétate) et protégé sur la surface avant d'un verre trempé à haute transmission et d'une bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'un polyéthylène.

Pour former un panneau ou un champ photovoltaïque avec une puissance de quelques kilowatts à quelques mégawatts, les modules photovoltaïques sont associés en série et en parallèle, sous une tension convenable.

I.3.2 Les convertisseurs

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le champ photovoltaïque et la charge (sans stockage avec charge en continu, il portera le nom de convertisseur continu-continu), soit entre la batterie et la charge (il sera alors appelé onduleur ou convertisseur continu alternatif) [16].

➤ Convertisseur continu-continu :

Ce type de convertisseur est désigné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ photovoltaïque correspondant au point de puissance maximale. Ce système d'adaptation est couramment appelé MPPT (Maximum Power Point Tracking). Son rendement se situe entre 90 et 95 %.

➤ Convertisseur continu-alternatif :

Le convertisseur continu-alternatif est un dispositif destiné à convertir le courant continu en courant alternatif. La forte évolution de ce type de convertisseur s'est appuyée d'une part sur le développement de composants à semi-conducteurs entièrement commandé, robustes et rapides,

et, d'autre part, sur l'utilisation quasi généralisée des techniques dites de « Modulation de Largeur d'Impulsions » (MLI). Ces dernières s'appuient sur les performances en matière de fréquence de découpage des semi-conducteurs [16].

I.3.3 Les batteries

La batterie est utilisée pour le stockage de l'énergie produite par le champ de modules photovoltaïques. Il y a nécessité de stockage chaque fois que la demande énergétique est décalée. Les batteries les plus utilisées pour les systèmes photovoltaïques sont les batteries d'accumulateurs électrochimiques. Elles doivent remplir trois fonctions importantes [16] :

Autonomie : Une batterie permet de répondre aux besoins de la charge en tout temps, même la nuit ou par temps nuageux.

Courant de surcharge : Une batterie permet de fournir un courant de surcharge pendant quelques instants, c'est-à-dire un courant plus élevé que celui que peut fournir le champ photovoltaïque. Ceci est nécessaire pour faire démarrer les moteurs et les autres appareils requérant un courant de démarrage de 3 à 5 fois supérieur au courant d'utilisation.

Stabilisation de la tension : Une batterie permet de fournir une tension constante, en éliminant les écarts de tension du champ photovoltaïque et en permettant aux appareils un fonctionnement à une tension optimisée.

Il existe deux types de batteries [16]:

Les batteries ouvertes : Sont des batteries au plomb contenant de l'électrolyte liquide dont l'eau doit être contrôlée.

Les batteries étanches : Ne contiennent pas de liquide, mais du gel. Ainsi, elles peuvent fonctionner dans toutes les positions et ne demandent absolument aucun entretien puisqu'il n'y a pas d'eau à rajouter.

I.4. Conclusion

L'étude faite durant ce chapitre nous permet de retenir les points suivants :

- L'application d'énergie solaire dans les domaines d'électricité et chaleur ;
- Les différentes sortes de l'énergie solaire photovoltaïque, thermodynamique ;
- Dans les statistiques de l'énergie photovoltaïque dans le monde montre que l'énergie est assez faible par rapport au l'énergie hydraulique ;
- Le gouvernement prévoit le lancement de plusieurs projets solaires photovoltaïques d'une capacité totale d'environ 800 MWc d'ici 2020. Actuellement on compte 23 centrales photovoltaïques sur le territoire national. Elles ont été installées par la société SKTM ;
- Le système photovoltaïque repose sur la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique car l'effet photovoltaïque est une propriété électrique du semi-conducteur ;
- Les modules photovoltaïques ont été développés dans le but d'obtenir les caractéristiques Courant-Tension et Puissance-Tension afin d'analyser et d'évaluer des performances des systèmes photovoltaïques ;
- Il y'a deux types d'installations PV une est autonome (non raccordées au réseau) et une autre raccordée au réseau (transporter par les lignes de la tension) ;

Chapitre II

Présentation de la centrale PV de Skhouna

Ce Chapitre présente une présentation générale de la centrale photovoltaïque d'Ain Skhouna de Saida à savoir : sa situation géographique, son développement, sa composition (les champs solaires, les boîtes de jonctions, les onduleurs, la salle de contrôle, l'armoire de communication des charges et le dispositif de mesures environnementales) et le fonctionnement de cette centrale. Notant qu'une partie sur l'opération d'entretien et de maintenance a été également effectuée.

II.1 Situation géographique de la centrale PV Ain Skhouna

La centrale photovoltaïque d'Ain Skhouna 30MWc illustrée sur la Figure II.1a est située dans la Wilaya de Saida à une distance de 80 km de la capitale de wilaya et à 150 km au sud de la wilaya de Tiaret. Ce mégaprojet couvre une superficie de 42 ha pour un coût de réalisation estimé à 50 millions d'euros, soit l'équivalent à l'époque de 480 millions de dinars. Elle a été réalisée par Shariket Khahraba wa Taket Moutadjadida (SKTM), le schéma générale de cette centrale est illustrée sur la Figure II.1b.



Figure II.1a : La société SKTM de Ain Skhouna (Saida).

II.2 Développement de la centrale PV Skhouna

La stratégie énergétique de l'Algérie repose sur l'accélération du développement de l'énergie solaire. Le gouvernement prévoit le lancement de plusieurs projets solaires photovoltaïques d'une capacité totale d'environ 800 MWc d'ici 2020. D'autres projets d'une capacité de 200 MWc par an devraient être réalisés sur la période 2021-2030[1]. Actuellement on compte 23 centrales photovoltaïques sur le territoire national.

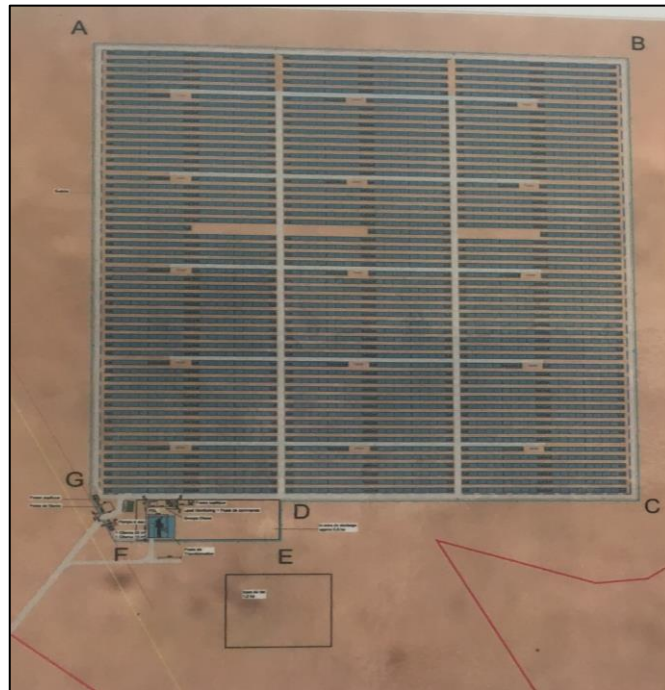


Figure II.1b : Le schéma général de centrale photovoltaïque Ain Skhouna de Saida.

La centrale photovoltaïque d'Ain Skhouna 30MWc a été installée en 2015, elle s'inscrit dans le cadre du programme national des énergies renouvelables. Cette centrale injecte sa puissance produite directement dans le réseau national 60KV. Elle a été réalisée par les opérateurs Allemand, groupe BELECTRIC.

Avec sa capacité de 30 mégawatts, cette centrale solaire photovoltaïque pour la production d'énergie électrique est la première du genre dans la région sud-ouest et dont la réalisation a nécessité la mobilisation d'un investissement de près de 3,9 milliards de dinars [14].

II.3 Description de la centrale PV Skhouna(Saida)

La centrale solaire photovoltaïque d'Ain Skhouna a été mise en service en 2018, elle s'inscrit dans le cadre du programme national des énergies renouvelables et elle fait partie de 23 stations similaires construites à travers les hauts plateaux et le sud du pays pour produire 400 mégawatts. On peut noter les constituants suivants dans cette centrale

II.3.1 Les champs solaires PV

Tous les champs solaires de la centrale d'Ain Skhouna occupent une superficie de 42.3 ha avec 119520 panneaux photovoltaïques (CS6P-250P-silicium poly-cristallin) installés comme illustré sur la Figure II.2. Cette centrale se compose de deux champs (appelé aussi boule) ; Saida 1(Boucle 1) et Saida 2 (Boucle 2) avec une puissance de 15.936 MWc et 13.944MWc respectivement. Le champ Saida 1(Boucle 1) comporte 8 sous champ (Skide) et le champ Saida2 (Boucle 2) 7 sous champ photovoltaïques, ce qui fait un total de 15 sous champ.



Figure II.2 : les champs photovoltaïques de la centrale d'Ain Skhouna.

Tous les sous-champs sont identiques (chacun avec une puissance crête de 1,992 MWc), chaque sous-champ est composé de deux (2) onduleurs, quatre (4) boîtes centrales et un transformateur. Chaque onduleur est alimenté par deux boîtes centrales (une avec les bornes positives (+) et l'autre avec les bornes négatifs (-)). Chaque boîte ressemble un total de 11 câbles avec des fusibles de protection (voir la Figure II.3.b), les 10 premiers câbles avec des fusibles de protection de **200 A** chacun porte huit 8 tables en parallèle et le

dernier câble avec un visible de protection de **100 A** porte trois 3 tables en parallèle. Une table est composée de deux (2) strings en parallèle et chaque string comprend 24 panneaux photovoltaïques de type CS6P-250P chacune d'une puissance crête de 250 Wc avec les caractéristiques électriques regroupées dans la Tableau II.1. Donc chaque onduleur rassemble 3984 panneaux qui sont réparties comme indiqué sur le Tableau II.2. Ces panneaux photovoltaïques sont dirigés vers le sud et ils sont inclinés d'un angle de 15°.

Tableau II.1 : Caractéristiques électriques des modules PV de la centrale d'Ain Skhouna.

Type de module PV	CS6P-250P
Données électriques	
Puissance maximale (P_{max})	250 W
Tension pour puissance maximale (V_{mp})	30.1 V
Courant pour puissance maximale (I_{mp})	8.30 A
Tension à l'ouverture (V_{oc})	37.2 V
Courant de court-circuit (I_{sc})	8.87 A
Coefficient de température de V_{oc}	-0.34%/°C
Coefficient de température de (I_{sc})	0.065 %/°C
Coefficient de température de (P_{max})	-0.43 %/°C
NOCT	47 °C
Réduction du rendement de 1000 W/m ² à 200 W/m ²	+ 96.5 %
Dimensions	
Longueur	1.638 m
Largeur	0.982 m
Poids	18.5 kg
Cellules	
Nombre par module	60
Technologie de cellule	poly-cristalline
Taille de cellule (carré)	(0.163*0.163) m ²
Rendement de cellule	15.54 %
Liaison des cellules	3 busbars

Tableau II.2 : Répartition des panneaux photovoltaïques dans la centrale d'Ain Skhouna

Nomenclature	string	Table	La boîte centrale	
			Le premier câble (x10)	Le dernier câble (1)
Disposition	24 panneaux en série	2 strings en parallèle	8 tables en parallèle	3 tables en parallèle
Nombre de panneaux	24	48	384 (×10)	144
			3984	

II.3.2 Les boîtes centrales (les centraux box)

Les boîtes centrales ou les centraux box sont appelé également les boîtes de jonctions. On note un nombre de 60 boîtes de jonctions dans la centrale photovoltaïque d'Ain Skhouna qui sont placés à l'amont des onduleurs photovoltaïques. Le courant ainsi produit par chaque sous-champ est collecté dans les boîtes centrales, les bornes positives et les bornes négatives des boîtiers de jonction sont raccordées respectivement aux bornes positives et négatives des générateurs PV. Des photos représentatives de la boîte de jonction de l'extérieur et de l'intérieur sont illustrées sur les Figures II.3a et II.3b respectivement.



Figure II.3a : La boîte centrale de l'extérieur.

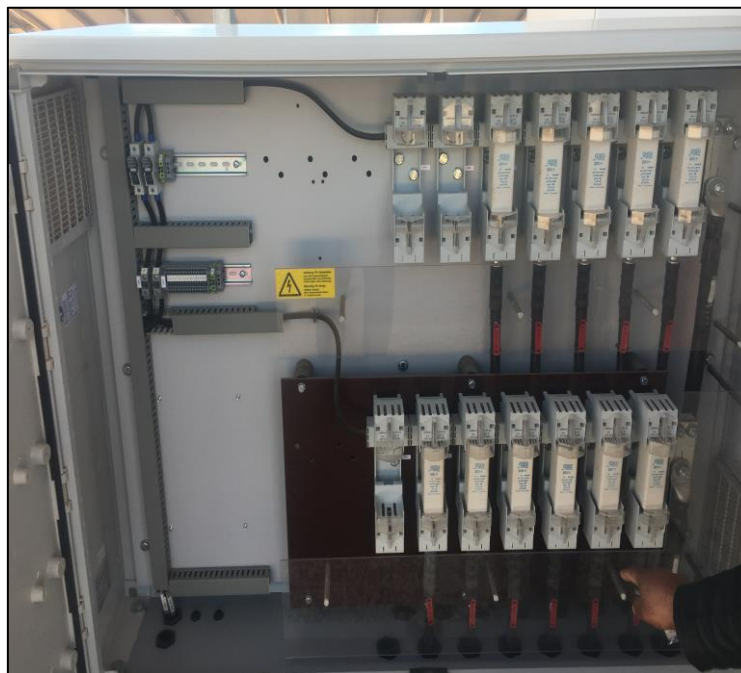


Figure II.3b : La boîte centrale à l'intérieur.

II.3.3 Les onduleurs photovoltaïques « Power Conditionners »

Dans une installation photovoltaïque, l'onduleur (ou inverseur de courant) appelé aussi l'appareil de conditionnement de la puissance occupe une place essentielle, il a le rôle principale de transformer le courant continu délivré par les panneaux solaires photovoltaïques en un courant alternatif comme illustré sur la Figure II.4a.

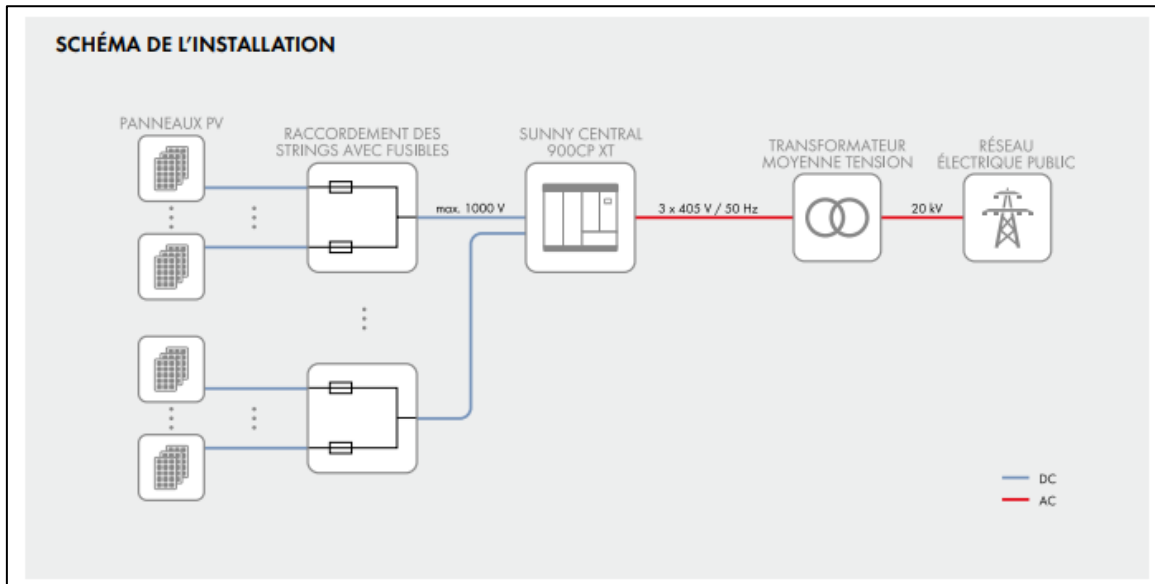


Figure II.4a : Schéma de l'installation photovoltaïque d'Ain Skhouna.

Dans la centrale d'Ain Skhouna, il existe un nombre de 30 onduleurs de type Sunny Central 850CP XT dont les spécifications sont regroupées dans le Tableau II.3. Chaque onduleur (Figure II.5) possède une puissance d'entrée maximum DC de 954 kW, une tension d'entrée maximum de 1000 V et avec un courant d'entrée max de 1400 A. La puissance nominale de sortie AC est de 850 kVA, d'où un rendement de l'ordre de 98% dans les conditions standards.

Notant qu'il existe un dispositif de suivi du point de puissance maximum (MPPT "Maximum PowerPoint Tracking" en anglais) qui permet de contrôler la tension et le courant de sortie des rangées PV pour générer la puissance maximale possible à une irradiation et une température données.

Tableau II.3 : Spécifications des onduleurs de la centrale Ain Skhouna.

Entrée (DC)	
Puissance DC max. (pour $\cos \varphi = 1$)	954 kW
Tension d'entrée max.	1000 V
U_{MPP_min} pour $I_{MPP} < I_{DCmax}$	568 V
Tension d'entrée assignée	681 V
Courant d'entrée max	1400 A
Courant de court-circuit max.	2500 A
Nombre d'entrées MPP indépendantes	1
Nombre d'entrées DC	9
Sortie (AC)	
Puissance assignée (à 25 °C) / Puissance nominale AC	(à 50 °C) 935 kVA / 850 kVA
Tension nominale AC / Plage de tension nominale AC	386 V / 348 V à 443V
Fréquence du réseau AC / Plage	50 Hz, 60 Hz / 47 Hz à 63 Hz
Fréquence / tension de réseau assignée	50 Hz / 386 V
Courant de sortie max. / Taux de distorsion harmonique max	1411 A / 0.03
Phases d'injection / Phases de raccordement	3/3
Rendement	
Rendement max. / Rendement européen / Rendement CEC	98,6 % / 98,4 % / 98,5 %
Caractéristiques générales	
Dimensions (L / H / P)	2562 / 2272 / 956 mm
Poids en kg	1900 kg
Désignation de type	SC 880CP-10



Figure II.5: Armoire de l'onduleur de type Sunny Central 880CP XT.

II.3.4 La salle de contrôle

Les équipements de la centrale solaire PV (hormis l'armoire de commutation des charges et les panneaux d'affichages) sont connectés à une cabine de type salle de contrôle (Figure II.6) qui est isolée de la chaleur extérieure. De ce fait, elle est équipée de quatre climatiseurs fonctionnant en alternance permettant de garder une température convenable dans la salle de contrôle.

La salle de contrôle contient trois ordinateurs, deux pour l'acquisition des données de la centrale et le contrôle des systèmes (onduleurs, les connecteurs, les panneaux...ect) et l'autre pour la surveillance du réseau électrique GRTE (Société Gestionnaire du Réseau de Transport de l'Électricité) dans le but d'assurer le bon fonctionnement des onduleurs photovoltaïques.

Le système de surveillances des données a été conçu suivant la norme IEC61724. Les paramètres tels que : le rayonnement solaire (G), la température ambiante (T_a), la température du module (T_m), la vitesse du vent (v), l'énergie générée DC et AC (E_{DC} et E_{AC}) sont mesurés instantanément chaque 5 minutes durant la journée.

La salle de contrôle respecte la norme standardisée CEI 60529 [21] avec un indice de protection IP 54. Cet indice correspond à une protection contre la pénétration de corps étrangers (tel que le dépôt de poussière) et les effets nuisibles dus à la pénétration de l'eau.



Figure II.6 : La salle de contrôle.

II.3.5 L'armoire de communication des charges

L'armoire de communication des charges est appareil qui assure la fonction de branchement dans chaque bâtiment alimenté et la fonction de commutation des sources énergétiques entre le réseau et l'installation photovoltaïque (Figure II.7).



Figure II.7: Armoire de communication des charges.

Cette armoire comporte les dispositifs principaux suivants :

- des disjoncteurs de distributions installés avec des verrous mécaniques pour la commutation des sources énergétiques : réseau / PV ou réseau / groupe électrogène. (Moteur diesel de 30kVA);
- Deux compteurs d'énergies : un compteur mesurant l'énergie électrique injectée au réseau par le système solaire PV et un second compteur mesurant l'énergie reçue du réseau ;
- Un serveur bleu pour enregistrer les données respectivement les puissances instantanées : consommées par les différentes charges.

II.3.6 Dispositif de mesures environnementales

La centrale d'Ain Skhouna est équipée des appareils de mesures environnementales, comportant des instruments de mesures des rayonnements solaires (pyranomètre de type ISO9060), un capteur de mesure de température (de type DLE120), un capteur de mesure d'humidité (de type DMA672.1) et d'un anémomètre pour la mesure de la vitesse du vent (de type KIT 5.0).

Ces instruments illustrés sur la Figure II.8 permettent d'enregistrer les conditions climatiques dans la zone de l'installation des modules PV. Les données collectées sont

enregistrées dans un des ordinateurs d'acquisition des données de la centrale installé dans la salle de contrôle.



Figure II.8:Mini station météorologique de la centrale d'Ain Skhouna.

II.4 Fonctionnement de la centrale PV d'Ain Skhouna

La centrale fonctionne suivant deux principaux modes : le mode connectée au réseau et le mode autonome. Dès le lever du soleil, les panneaux commencent à produire de l'électricité qui sera convertie à l'aide des onduleurs. Une partie de la production est utilisée pour alimenter la centrale et le reste est envoyé vers la poste d'évacuation puis vers le réseau. Lorsque la centrale PV est connecté au réseau on parle du « mode connecté ». En général, le système fonctionne sur ce mode, le surplus de l'énergie produite est injecté au réseau de distribution de l'GRTE (Gestion du Réseau de Transport de l'Electricité). Dans le cas où la centrale n'est pas connectée au réseau on parle du mode autonome. Ces modes de fonctionnement de la centrale photovoltaïque d'Ain Skhouna sont gérés par le panneau de contrôle.

II.5 Opération d'entretien et de maintenance

II.5.1 Présentation et classification de la maintenance

La maintenance est définie comme "la combinaison de toutes les actions techniques, administratives et de gestion pendant le cycle de vie d'un élément destiné à maintenir ou à le restaurer, un état dans lequel il peut effectuer la fonction requise" [26].

L'entretien se divise en maintenance préventive et corrective (Figure II.9). L'objectif du premier est de conserver la fonctionnalité d'un élément et d'éviter ainsi les échecs, alors que la maintenance corrective a lieu après la survenue d'une défaillance et rétablit la fonctionnalité de l'élément.

La maintenance corrective est lancée après la reconnaissance des défauts. L'action corrective peut avoir lieu immédiatement ou elle peut être reportée conformément aux règles données. La maintenance périodiquement programmée est une forme de maintenance corrective différée, puisque les fonctionnalités de l'élément ne seront pas restaurées immédiatement mais la prochaine fois qu'un événement de maintenance est programmé [26].

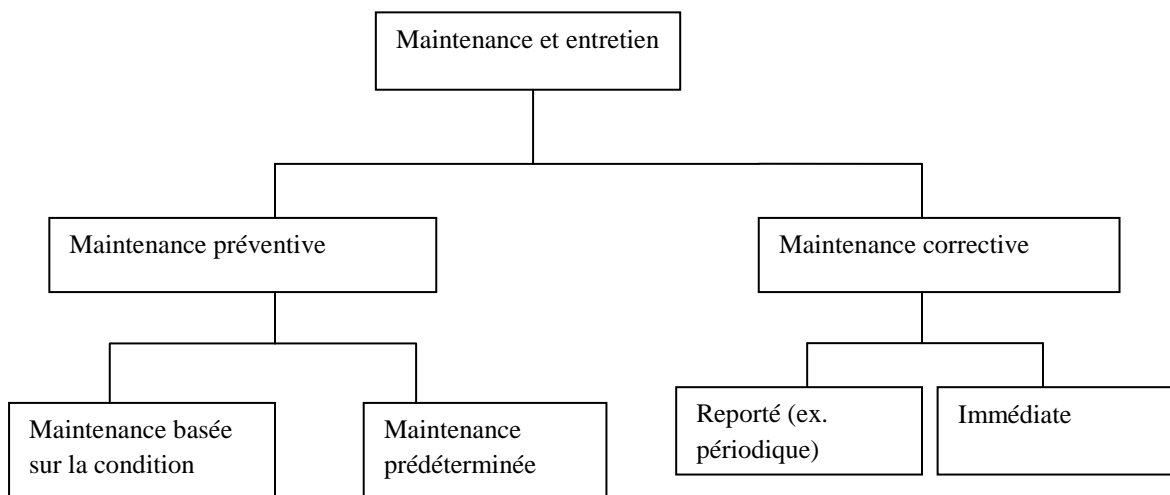


Figure II.9 : Classification de l'entretien. Source: DIN EN 13306 [26].

II.5.2 Répartition des tâches

La société Allemand a établi un planning qui permet de suivre toute les taches dans les centrales et les représentants de différentes organisations en charge du projet de la centrale solaire photovoltaïque. Il contient certains éléments tels que : le nettoyage, les équipements, l'inspections, les pièces de rechange, le budget... etc.

II.5.3 Plan d'entretien annuel

Le plan d'entretien comporte les prévisions annuelles des différents contrôles à effectuer sur la centrale solaire : à savoir les contrôles courant, périodique et les nettoyages. Une fiche technique a été élaborée, elle comporte les dates de déroulement de différentes inspections de la centrale, le planning et les résultats. Ces derniers consistent à observer si le planning s'est bien déroulé à la date mentionnée. Ce planning est renouvelable chaque année.

II.5.4 Contrôle courant

Le contrôle courant consiste à l'inspection visuelle des différentes installations de la centrale solaire. Ce contrôle s'effectue dans chaque jour on contrôle élément de la centrale visualisé par l'ordinateur et il sert à observer le bon fonctionnement du système et à anticiper d'éventuels problèmes. Il est réalisé par les techniciens en charge de la centrale. Une fiche qui est remplir journalier récapitulative détaillée sert à noter les constatations de ce contrôle. Elle comprend les sections à inspecter, les points de contrôle et les résultats (présence ou absence de défaut) de l'inspection. En cas de présence d'un quelconque défaut observé lors de ce contrôle, il sera signalé dans cette ordinateur pour permet d'intervenir, le type d'anomalie et le numéro de la composante en panne. Les sections à contrôler sont :

- les rangées des modules photovoltaïques ;
- les centraux box;
- les armoires dans la salle de contrôle ;
- le commutateur de charge ;

II.5.5 Contrôle périodique

C'est un contrôle qui se déroule une fois tous les deux mois et il consiste à réaliser une inspection visuelle et électrique des différents composants de la centrale solaire photovoltaïque. Au cours de ce contrôle, il s'agit d'intervenir sur les différentes sections

qui composent la centrale solaire photovoltaïque. Ce contrôle s'effectue sur les différents points de contrôle des mesures et des essais tels que :

- ✓ la mesure des résistances d'isolement et de la tension d'ouverture des boites de jonctions ;
- ✓ l'essai de fonctionnement de la minuterie d'arrêt et d'injection.
- ✓ en cas de défaillance d'une des composantes de la centrale, nous le signalons dans la fiche de contrôle périodique chaque jour dans un registre afin de procéder au remplacement. Par comparaison au contrôle courant, le contrôle périodique est effectué comme mesures préventives à long terme pour se saisir de l'état de l'installation photovoltaïque avec plus de précision.

II.5.7 Anomalies et réparations

Au cours de son fonctionnement, la centrale peut être sujette à une défaillance engendrant une panne. Par conséquent, dans le même registre du Contrôle périodique et Plan d'entretien annuel on doit enregistrer tout répertoriant les anomalies détectées ainsi que les réparations effectuées. Une fiche a été élaborée, elle comprend :

- ✓ La date de détection de la panne ;
- ✓ Les intervenants (est dirigé par la société BELECTRIC) ;
- ✓ Les équipements utilisés ;
- ✓ La nature de l'anomalie ;
- ✓ Les causes de l'anomalie ;
- ✓ La date de réparation ;

Notant bien que toutes ces tâches sont sous la responsabilité de la société allemande BELECTRIC, qui est la société responsable de construction et de maintenance de la centrale solaire PV d'Ain Skhouna de Saïda, elle est toujours sous garantie.

II.5.8 Le Nettoyage

D'une manière générale, les méthodes de nettoyage de la surface des modules photovoltaïque n'ont pas été au centre de l'attention des chercheurs [27]. Ce manque d'attention peut résulter de l'idée que la quantité de pluie dans la région où le système PV est installé, est suffisante pour nettoyer la surface des modules PV. Les méthodes de nettoyage des modules PV peuvent être classées comme suit:

- Nettoyage par la pluie : Cette méthode de nettoyage est très volatile et dépend de la pluviométrie du site.
- Nettoyage par une machine mobile : Cette méthode utilise des machines (Figure II.10) pour effectuer le nettoyage et un stockage pour l'approvisionnement en eau ou un système d'arrosage est l'une des meilleures façons de nettoyer la surface des modules PV [28].



Figure II.10 : Machine mobile pour le nettoyage.

Conclusion

L'étude faite durant ce chapitre nous permet de retenir les points suivants :

- La centrale photovoltaïque d'Ain Skhouna (Saida) d'une capacité de 30 MWc est un mégaprojet qui fait partie d'un programme national de production de l'électricité à partir des énergies renouvelables visant une production de 22.000MW d'électricité à l'horizon 2030. Son but est de satisfaire la demande nationale face aux besoins croissants du consommateur algérien et de préserver la ressource en hydrocarbures du pays.

- La centrale d'Ain Skhouna s'étale sur une superficie de 42.3 ha avec 119520 panneaux photovoltaïques de type CS6P-250P (silicium poly-cristallin) réparties en deux champs Saida1 et Saida2. Elle comporte également 60 boites de jonctions, 30 onduleurs de type Sunny Central 850CP XT, une armoire de communication des charges et une salle de contrôle. En plus d'une mini station pour la mesure des données météorologiques.

- Notant que la centrale photovoltaïque d'Ain Skhouna est toujours sous garantie par la société allemande BELECTRIC et que toutes les tâches de maintenance et d'entretien sont sous la responsabilité de cette société.

Chapitre III

Analyse de performances réelles
de la centrale PV d'Ain Skhouna

Ce Chapitre présente l'analyse des performances du champ photovoltaïque Saida 1 d'une puissance de 15,936 MWc raccordée au réseau national durant le mois d'Avril de l'année 2019(durant notre stage). Les paramètres de performance de cette analyse ont été spécifiés par l'Agence Internationale de l'Energie (IEA) et sont décrits dans les normes standardisées (Commission Electrotechnique Internationale) CEI 61724. Ces paramètres sont le rendement de référence (Y_r), le rendement du champ PV (Y_a), le rendement final du système PV (Y_f), le rapport de performance (PR), les pertes du système (LS) et les pertes diverses (LC). Ce chapitre est divisé en deux parties, la première traite l'analyse des données météorologiques du site d'Ain Skhouna et la deuxième, l'analyse des performances journalières du champ Saida1.

III.1 Analyse des données météorologiques du site d'Ain Skhouna

Les principales limitations extérieures des performances optimales d'une installation photovoltaïque en phase de production sont les conditions environnementales dans lesquelles elle doit fonctionner. Le rayonnement solaire (irradiation) est le facteur principal qui affecte le système, les températures également influencent sur les performances des principaux composants, des facteurs moins importants tels que la vitesse et la direction du vent. Ces facteurs concourent à créer les conditions environnementales qui déterminent le fonctionnement réel de la centrale photovoltaïque dans un site bien déterminé.

Afin d'é l'analyse des conditions environnementales du site de Saida, nous interprétons les données issues ces différents capteurs (pyranomètre, thermomètre, anémomètre) du mois d'Avril 2019.

III.1.1 Evolution de l'insolation journalière

Afin de comprendre l'environnement dans lequel évolue la centrale solaire photovoltaïque de Saida, nous avons commencé par l'évolution du rayonnement solaire global journalier sur le plan des modules (I_{POA}) durant le mois d'avril de l'année 2019 comme illustré sur la Figure III.1.

On note que l'insolation journalière durant ce mois varie de jour en jour, elle prend un maximum de 8,638 KWh/m² enregistré durant de 27 jour du mois d'Avril et un minimum de 2,117 KWh/m² noté durant de 21 jour du ce mois. La valeur moyenne de l'insolation durant ce mois est de 6,832 KWh/m²/jour.

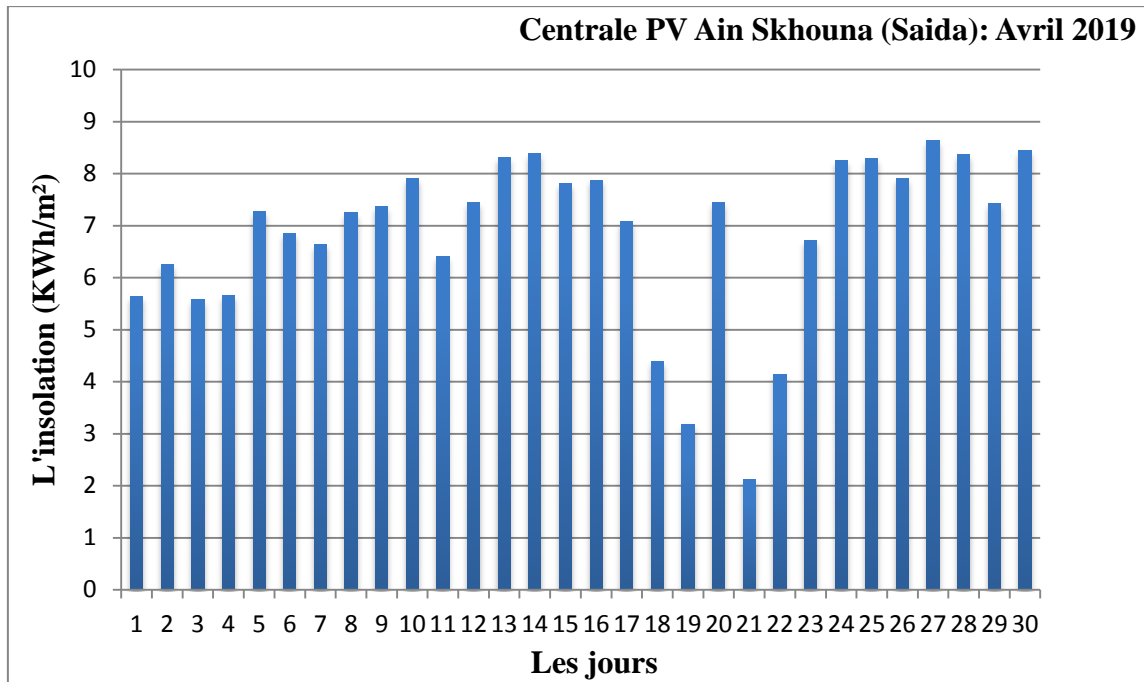


Figure III.1 : Evolution de l'insolation (Ht) journalières de la centrale PV Ain Skhouna (Avril 2019).

III.1.2 Evolution des températures journalières

La Figure III.2 illustre l'évolution des températures journalières (ambiante et du module) durant le mois d'Avril 2019. On note que ces températures varient de jour en jour. La température journalière ambiante varie entre 26°C et 9,52 °C avec une valeur moyenne de 16,56°C. La température journalière du module varie entre 33°C et 10,73°C avec une moyenne de 22,96°C. On constate que les deux températures suivent la même allure, la température du module est plus élevée que la température ambiante. Cela est dû à la génération de pertes thermiques qui se produit évidemment lors de la production d'énergie. Les températures moyennes journalières ambiante et du module sont 16,56°C et 22,96 °C respectivement.

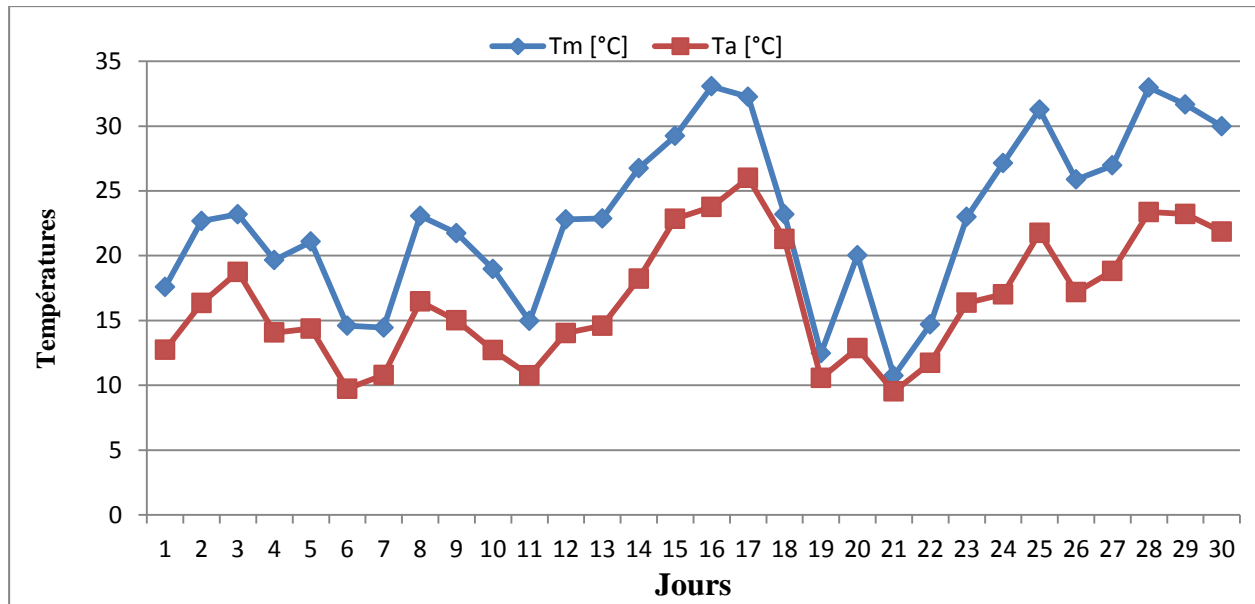


Figure III.2 : Evolution des températures journalières (Tam, Tmod) de la centrale PV Ain Skhouna (Avril 2019).

III.1.3 Evolution de la vitesse du vent journalière

La Figure III.3 présente l'évolution journalière de la vitesse du vent durant le mois d'Avril 2019 dans la centrale Ain Skhouna. On note que la variation de la vitesse du vent est aléatoire, elle prend un maximum de 14,25 m/s noté durant le 18^{ème} jour et un minimum de 2,93 m/s enregistré durant le 16^{ème} jour du mois. La vitesse moyenne du mois d'Avril est de 6,56 m/s.

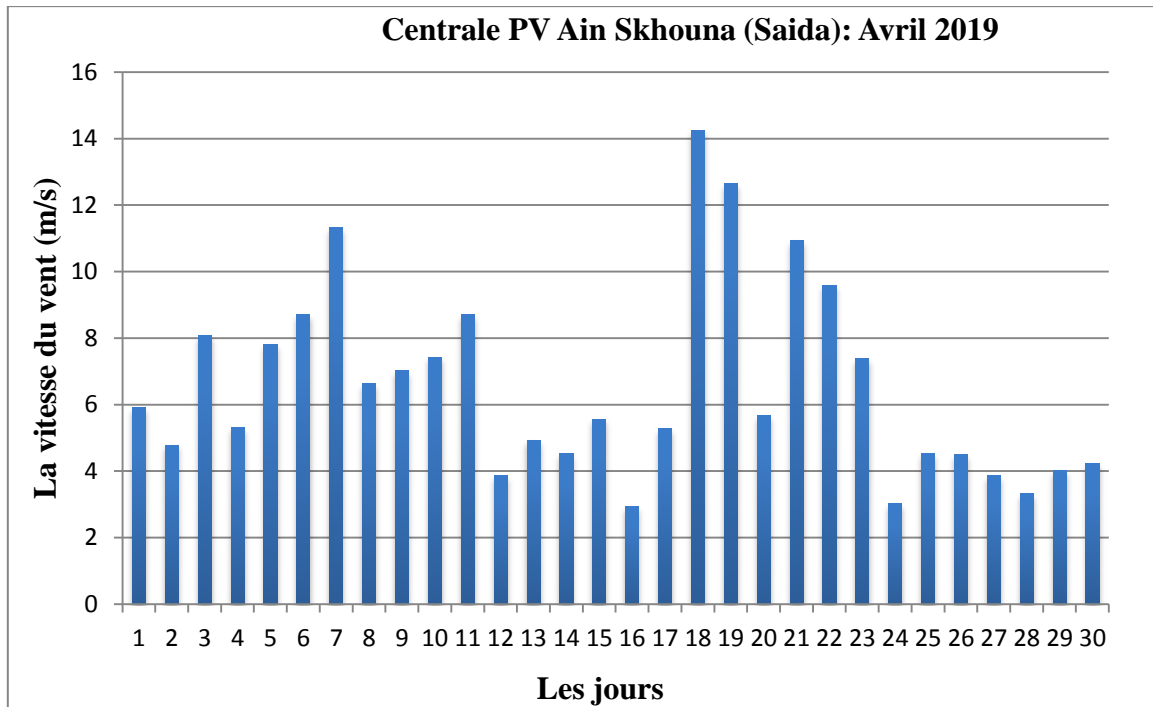


Figure III.3 : Evolution journalière de la vitesse du vent de la centrale PV Ain Skhouna (Avril 2019).

III.2 Analyse des performances journalières

Afin d'analyser les performances d'un système solaire PV, des paramètres de performance ont été spécifiés par l'Agence Internationale de l'Energie (IEA) et sont décrits dans les normes standardisées (Commission Electrotechnique Internationale) CEI 61724 [21]. Ces paramètres sont le rendement de référence (Y_r), le rendement du champ PV (Y_a), le rendement final du système PV (Y_f), le rapport de performance (PR), les pertes du système (LS) et les pertes diverses (LC). Ces paramètres sont utilisés pour définir les performances du système dans son ensemble par rapport à la production d'énergie, les ressources solaires et l'effet global des pertes du système photovoltaïque.

Les indicateurs normalisés agissent comme des clés de comparaison pour connaître la performance d'un système PV connecté au réseau.

III.2.1 Energie générée et énergie cumulée

➤ Energie générée par un système de champ PV (E_{dc})

L'énergie journalière générée par un système de champ PV est notée par $E_{dc,d}$, elle exprime la somme du produit de la puissance produite par le temps de la durée du jour. Elle est donnée par la relation suivante:

$$E_{dc,d} = \sum_{i=1}^{b=Trp} V_{dc} \times I_{dc} \times Tr \quad (\text{III.1a})$$

Avec :

Tr : c'est le temps d'intervalle ;

Trp : c'est la période de fonctionnement ;

Vdc : la tension produite par le champ PV ;

Idc : le courant produit par le champ PV ;

De même, l'énergie mensuelle générée par un système de champ PV est notée par $E_{dc,m}$, elle présente la somme de toutes les énergies générées durant les jours du mois, elle est exprimée par la relation suivante :

$$E_{dc,m} = \sum_{i=1}^N E_{dc,d} \quad (\text{III.1b})$$

Avec :

N : le nombre de jours durant le mois ;

$E_{dc,d}$; l'énergie journalière générée par le champ PV .

➤ L'énergie fournie au réseau de distribution (E_{ac})

L'énergie journalière fournie au réseau de distribution (E_{ac}) exprime la somme du produit de la puissance produite par le temps de la durée du jour, elle est donnée par la formule suivante :

$$E_{ac,d} = \sum_{i=1}^{t=Trp} V_{ac} \times I_{ac} \times Tr \quad (\text{III.2a})$$

Avec :

Tr : c'est le temps d'intervalle ;

Trp : c'est la période de fonctionnement ;

Vac : la tension fournie au réseau de distribution ;

Iac : le courant au réseau de distribution ;

De même, l'énergie mensuelle fournie au réseau de distribution est notée par $E_{ac,m}$, elle présente la somme de toutes les énergies fournies durant les jours du mois, elle est exprimée par la relation suivante :

$$E_{ac,m} = \sum_{i=1}^N E_{ac,d} \quad (\text{III.2b})$$

Avec :

N : le nombre de jours durant le mois ;

$E_{ac,d}$; l'énergie journalière fournie au réseau de distribution..

III.2.2 Rendement de référence (Y_r)

Le rendement de référence est le rapport entre la quantité totale de rayonnement solaire arrivant à la surface des panneaux solaires photovoltaïques I_{POA} (kWh/m²) et la quantité de rayonnement de référence G_0 (1kW/m²). Ce paramètre représente le nombre d'heures durant lesquelles l'éclairement est égal à celui de référence, Le rendement de référence journalier $Y_{r,d}$ est exprimé par la formule suivante :

$$Y_{r,d} = \frac{I_{POA}}{G_0} \quad (\text{III.3a})$$

$I_{POA,d}$: l'énergie journalière du rayonnement arrivant à la surface des panneaux PV ;

G_0 : le rayonnement de référence (dans les conditions standard).

Notant que le rendement de référence mensuel $Y_{r,m}$ est la moyenne des rendements de référence journaliers $Y_{r,d}$, il est exprimé par la formule suivante :

$$Y_{r,m} = \frac{1}{N} Y_{r,d} \quad (\text{III.3b})$$

Avec :

N : le nombre de jours durant le mois ;

$Y_{r,d}$: le rendement de référence journalier;

$Y_{r,m}$: le rendement de référence mensuel .

III.2.3 Rendement du champ PV (Y_a)

Le rendement du champ PV est défini comme le rapport entre l'énergie totale générée E_{DC} (kWh) par les rangées PV pour une période définie (jour, mois ou année) et la puissance nominale P_0 (kWc) des rangées sous les conditions standard (STC : irradiation :

1000 W/m², 25°C température ambiante et spectre de référence AM 1.5-G). Le rendement du champ journalier est donné par :

$$Y_{a,d} = \frac{E_{ac,d}}{P_0} \quad (\text{III.4a})$$

Le rendement du champ mensuel est la moyenne des rendements du champ journaliers, il est donné par :

$$Y_{a,m} = \frac{1}{N} Y_{a,d} \quad (\text{III.4b})$$

III.2.4 Rendement final du système PV (Y_f)

Le rendement final correspond à l'énergie totale produite par le système PV, E_{AC} (kWh) par rapport à la puissance nominale installée P_0 (kWc). Cette quantité représente le nombre d'heures pendant lesquelles le champ PV devrait fonctionner à sa puissance nominale. Le rendement final journalier est donnée par :

$$Y_{f,d} = \frac{E_{ac,d}}{P_0} \quad (\text{III.5a})$$

Le rendement final du système mensuel est la moyenne des rendements finaux du système journaliers, il est donné par :

$$Y_{f,m} = \frac{1}{N} Y_{f,d} \quad (\text{III.5b})$$

III.2.5 Indice de performance normalisé (PR)

Le rapport de performance PR indique l'effet global des pertes sur la production énergétique des rangées d'un système PV. Les valeurs de PR indiquent à quel point un système PV approche les performances idéales dans des conditions réelles d'exploitation. PR est défini par le ratio entre le rendement final et le rendement de référence, c'est une quantité adimensionnelle. L'indice de performance journalier est exprimé par :

$$PR_d = \frac{Y_{f,d}}{Y_{r,d}} \quad (\text{III.6a})$$

De même, l'indice de performance mensuel est donné par :

$$PR_m = \frac{Y_{f,m}}{Y_{r,m}} \quad (\text{III.6b})$$

III.2.6 Les pertes du système par conversion (L_S)

Les pertes du système par conversion (L_S) sont dues aux pertes par conversion des onduleurs (courant continu courant alternatif) et elles sont définies par la différence entre le rendement du champ PV (Y_a) et le rendement final (Y_f). Les pertes du système par conversion journalières sont données par :

$$L_{S,d} = Y_{a,d} - Y_{f,d} \quad (\text{III.7a})$$

Les pertes du système par conversion mensuelles sont exprimées par :

$$L_{S,m} = Y_{a,m} - Y_{f,m} \quad (\text{III.7b})$$

III.2.7 Les pertes diverses (L_C)

Les pertes diverses (L_C) sont définies par la différence entre le rendement de référence et le rendement du champ PV. Elles représentent les pertes dues aux : températures des panneaux, câblages, ombrage partiel, pertes spectrales, la salissure, erreurs dans la recherche du point de puissance maximale, de conversions (DC-AC), etc. Les pertes du diverses journalières sont données par :

$$L_{C,d} = Y_{r,d} - Y_{a,d} \quad (\text{III.8a})$$

Les pertes diverses mensuelles sont exprimées par :

$$L_{C,m} = Y_{r,m} - Y_{a,m} \quad (\text{III.8b})$$

III.2.8 L'efficacité du champ PV (η_{PV})

L'efficacité du champ photovoltaïque est le rapport de l'énergie totale générée par les rangées PV (E_{DC}) au produit de la quantité d'irradiation sur le plan des panneaux et de la surface globale du champ photovoltaïque. L'efficacité journalière du champ photovoltaïque est donnée par :

$$\eta_{PV,d} = \frac{E_{DC,d}}{I_{POA} \times A_m} \times 100 \quad (\text{III.9a})$$

Avec:

A_m : La surface du champ photovoltaïque ;

$I_{POA,d}$: L'énergie journalière du rayonnement arrivant à la surface des panneaux PV ;

$E_{DC,d}$: L'énergie journalière totale générée par les rangées PV (E_{DC}).

L'efficacité mensuelle du champ photovoltaïque est donnée par :

$$\eta_{PV,m} = \frac{E_{DC,m}}{I_{POA} \times A_m} \times 100 \quad (III.9b)$$

Avec:

$I_{POA,m}$: L'énergie mensuelle du rayonnement arrivant à la surface des panneaux PV ;

$E_{DC,m}$: L'énergie mensuelle totale générée par les rangées PV (E_{DC}).

III.2.9 L'efficacité du système PV (η_{sys})

L'efficacité du système PV est le rapport de l'énergie totale générée par le système PV (E_{AC}) au produit de la quantité d'irradiation sur le plan des panneaux et de la surface globale du champ photovoltaïque.

$$\eta_{sys,d} = \frac{E_{AC,d}}{I_{POA} \times A_m} \times 100 \quad (III.10a)$$

Avec:

A_m : La surface du champ photovoltaïque ;

$I_{POA,d}$: L'énergie journalière du rayonnement arrivant à la surface des panneaux PV ;

$E_{AC,d}$: L'énergie journalière totale générée par le système PV (E_{AC}).

L'efficacité mensuelle du système est donnée par :

$$\eta_{sys,m} = \frac{E_{AC,m}}{I_{POA} \times A_m} \times 100 \quad (III.10b)$$

Avec:

$I_{POA,m}$: L'énergie mensuelle du rayonnement arrivant à la surface des panneaux PV ;

$E_{AC,m}$: L'énergie mensuelle totale générée par le système PV (E_{AC}).

III.2.10 L'efficacité de l'onduleur PV (η_{inv})

L'efficacité de l'onduleur (η_{inv}) présente le rapport de l'énergie totale générée par le système PV à l'énergie totale générée par les rangées photovoltaïques. L'efficacité journalière de l'onduleur est donnée par :

$$\eta_{inv,d} = \frac{E_{AC,d}}{E_{DC,d}} \times 100 \quad (III.11a)$$

L'efficacité mensuelle de l'onduleur est exprimée par l'équation suivante:

$$\eta_{inv,m} = \frac{E_{AC,m}}{E_{DC,m}} \times 100 \quad (III.11b)$$

III.2.11 Facteur de charge (FC)

Enfin, le facteur de charge (FC) est défini comme le rapport de la production annuelle d'énergie réelle à la quantité d'énergie générée par la centrale solaire photovoltaïque si elle fonctionnait à sa puissance nominale maximale (P_0) pendant 24 h par jour pendant une année.

$$FC = \frac{E_{AC,ann}}{P_0 \times 24 \times 365} = \frac{Y_{f,ann}}{8760} = \frac{Y_{r,ann} \times PR_{ann}}{8760} \quad (III.12)$$

III.3 Analyse de l'évolution des performances de centrale PV d'Ain Skhouna

Notre analyse de performance porte sur le mois d'Avril de l'année 2019 (période de notre stage pratique) du champ photovoltaïque (Saida1), d'une capacité de 15,936 MWc raccordée au réseau, de la centrale d'Ain Skhouna de la willaya de Saida.

III.3.1 Energie générée (E_{dc}) et énergie fournie (E_{ac})

La Figure III.4 illustre l'évolution journalière du mois d'Avril de l'énergie générée par le champ photovoltaïque (E_{DC}) et de l'énergie fournie au réseau de distribution (E_{AC}). On note que ces deux énergies E_{DC} et E_{AC} suivent la même allure et que l'énergie générée par le champ photovoltaïque (E_{DC}) est plus importante que l'énergie fournie au réseau de distribution (E_{AC}).

L'énergie journalière générée par le champ photovoltaïque (E_{DC}) présente une valeur maximale de 117,29 MWh enregistrée durant le 27^{ème} jour du mois et présente également une valeur minimale de 34,18 MWh notée durant le 21^{ème} jour du mois. La moyenne mensuelle de l'énergie générée est de 95,30 MWh.

L'énergie journalière fournie au réseau (E_{AC}) présente une valeur maximale de 113,93 MWh enregistrée durant le 27^{ème} jour du mois et présente également une valeur minimale de 32,36 MWh notée durant le 21^{ème} jour du mois. La moyenne mensuelle de l'énergie fournie au réseau est de 92,51 MWh.

On note que ces des énergies (générée par le champ photovoltaïque (E_{DC}) et fournie au réseau (E_{AC}) suivent la même allure que l'insolation (H_t) journalière comme illustré sur la Figure III.1. Elles sont proportionnelles à l'insolation, elles présentent des valeurs élevées pour des insolation élevées et des valeurs faibles pour des faibles valeurs d'insolation.

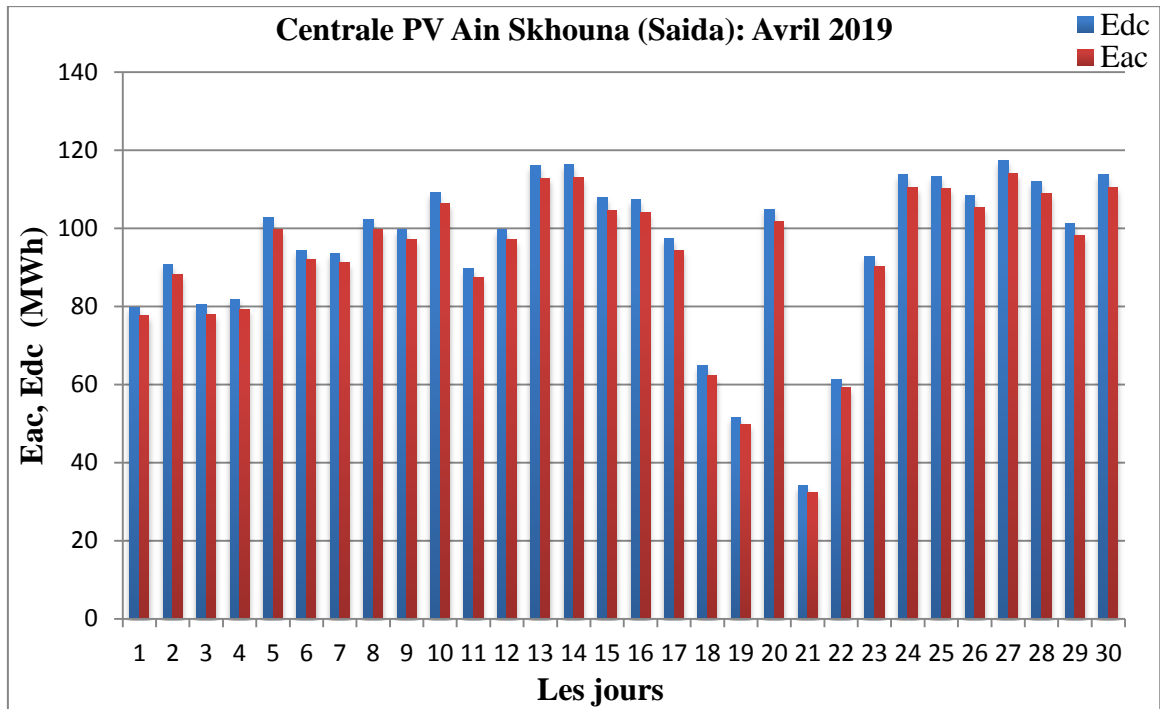


Figure III.4 : Evolution journalière des énergies Edc, Eac de la centrale PV Ain Skhouna (Avril 2019).

III.3.2 Les rendements : de référence (Y_r), du champ PV (Y_a) et final du système PV (Y_f)

L'évolution journalière du mois d'Avril des rendements ; rendement de référence (Y_r), rendement du champ photovoltaïque (Y_a) et le rendement final du système photovoltaïque (Y_f) sont illustré sur la Figure III.5.

On remarque que tous ces rendements évoluent de la même façon. Le rendement de référence varie entre 2,12 h/d noté au 21^{ème} jour du mois et 8,64 h/d enregistré le 27^{ème} jour du mois et la valeur mensuelle du rendement de référence pour le mois d'Avril est de 6,83 h/d.

Le rendement du champ photovoltaïque présente une valeur maximale de 7,36 h/d enregistrée le 27^{ème} jour du mois et une valeur minimale de 2,14 h/d noté le 21^{ème} jour du mois. La valeur mensuelle du rendement du champ photovoltaïque pour le mois d'Avril est de 5,98 h/d.

Le rendement du final présente une valeur maximale de 7,15 h/d enregistré le 27^{ème} jour du mois et une valeur minimale de 2,03 h/d noté le 21^{ème} jour du mois. La valeur mensuelle du rendement du champ photovoltaïque pour le mois d'Avril est de 5,81 h/d.

On note que tous ces rendements sont proportionnels à l'insolation ce qui explique la même allure notée entre ces rendements (rendement de référence, rendement du champ photovoltaïque et le rendement final) et l'insolation comme illustré sur la Figure III.1.

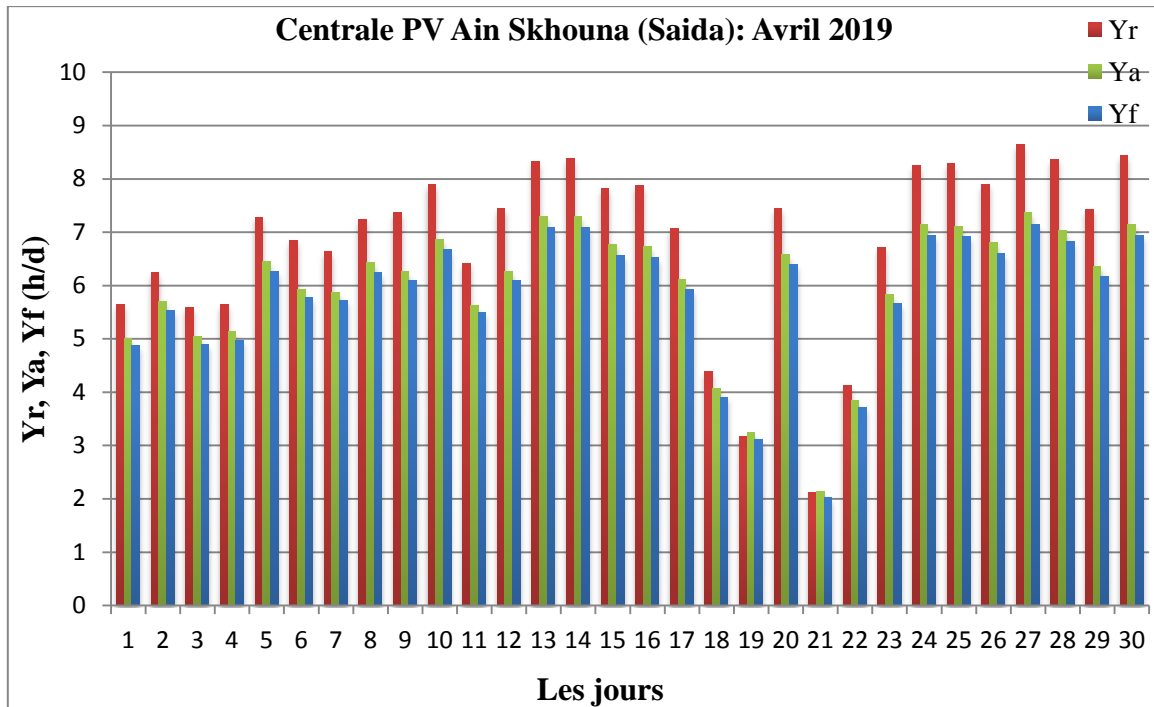


Figure III.5 : Evolution journalière des rendements Yr, Ya et Yf de la centrale PV Ain Skhouna (Avril 2019).

III.3.3 Indice de performance normalisé (PR)

L'évolution journalière de l'indice de performance du mois d'Avril est illustrée sur la Figure III.6. L'indice de performance normalisé (PR) durant ce mois est presque stable, il varie entre 98,39 % (19 jour du mois) et 81,60% (28 jour du mois), avec une valeur moyenne du mois de 85,75%. Notant qu'un indice de performance supérieur à 80 % correspond à un système dont les performances approchent les performances idéales dans les conditions STC. Donc la centrale d'Ain Skhouna présente un indice de performance très intéressant qui confirme son bon état de fonctionnement (pas de dégradation).

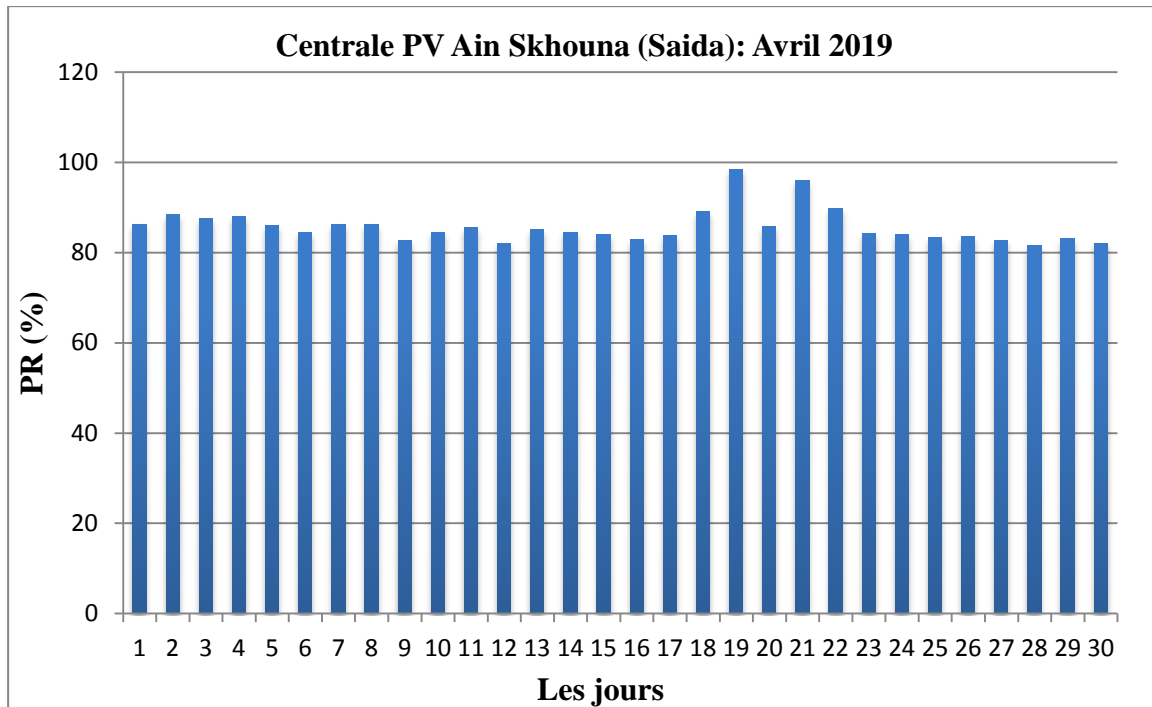


Figure III.6 : Evolution journalière de l'indice de performance PR de la centrale PV Ain Skhouna (Avril 2019).

III.3.4 Les pertes (L_S) et (L_C)

L'évolution journalière des pertes du système par conversion (L_S) et les pertes divers (L_C) sont présentées sur la Figure III.7. Les pertes journalières du système par conversion sont relativement stables avec une moyenne de 0.17 h/jour, s'étalant d'un minimum de 0,11 h au 21 jour du moi à un maximum de 0,22 h au 30 jour du mois. Ceci montre que les onduleurs du sous champ Saida 1 sont performants quant à la conversion DC-AC.

Les pertes journalières diverse sont plus prononcées, elles varient entre un minimum de 0.07 h/d et un maximum de 1,34 h/d. Pour les valeurs négatives notées, moins la perte de capture est négative, moins le temps nécessaire au système photovoltaïque pour produire de l'énergie à courant continu à sa capacité nominale est élevé. La valeur moyenne des pertes journalières sont 0.86 h/d.

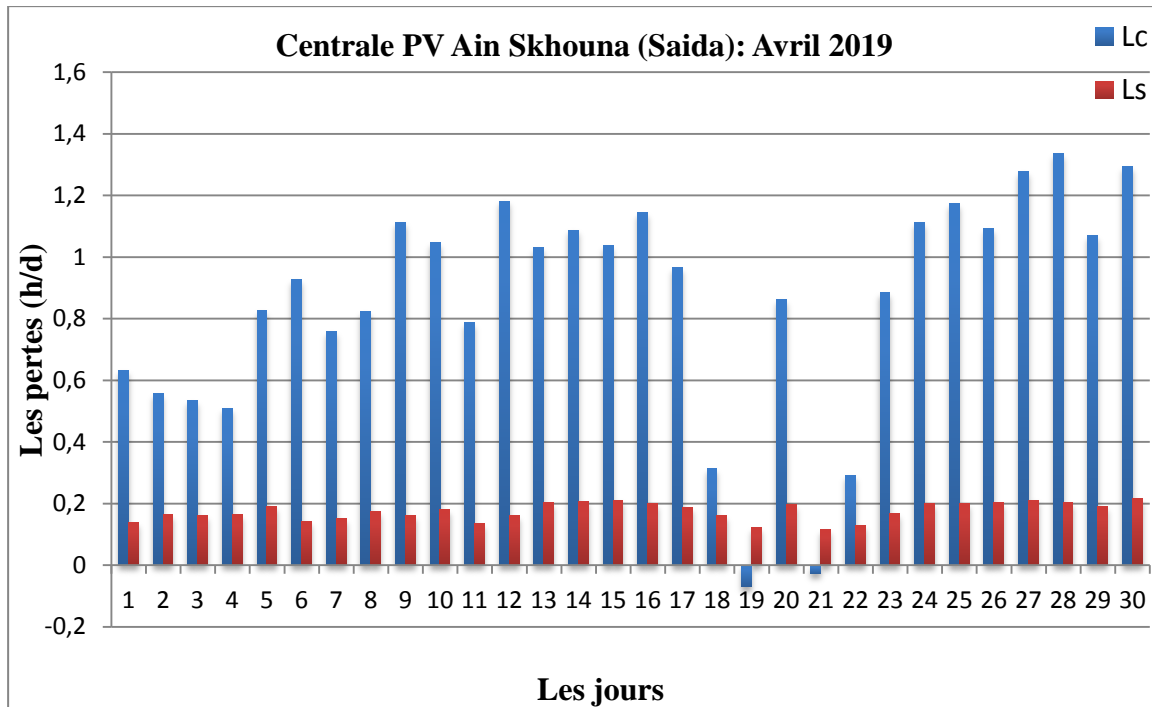


Figure III.7 : Evolution journalière des pertes de la centrale PV Ain Skhouna (Avril 2019).

III.3.5 Les efficacités du champ (η_{champ}), du système ($\eta_{\text{système}}$) et de l'onduleur (η_{onduleur})

L'évolution journalière des efficacités du champ et du système du champ Saida1 est illustrée sur la Figure III.8. Ces deux efficacités suivent la même allure, l'efficacité du système est moins prononcée que l'efficacité du champ.

L'efficacité journalière du champ varie entre 15,88 % noté au 19^{ème} jour du mois d'Avril et un minimum de 13,06 % noté au 19^{ème} jour du même mois avec une valeur moyenne de mois de 13,74%. Par contre, l'efficacité journalière du système varie entre un maximum de 15,29 % et un minimum de 12,68 % noté durant les mêmes dates que l'efficacité du champ. La valeur moyenne journalière du système est de 13,33 %.

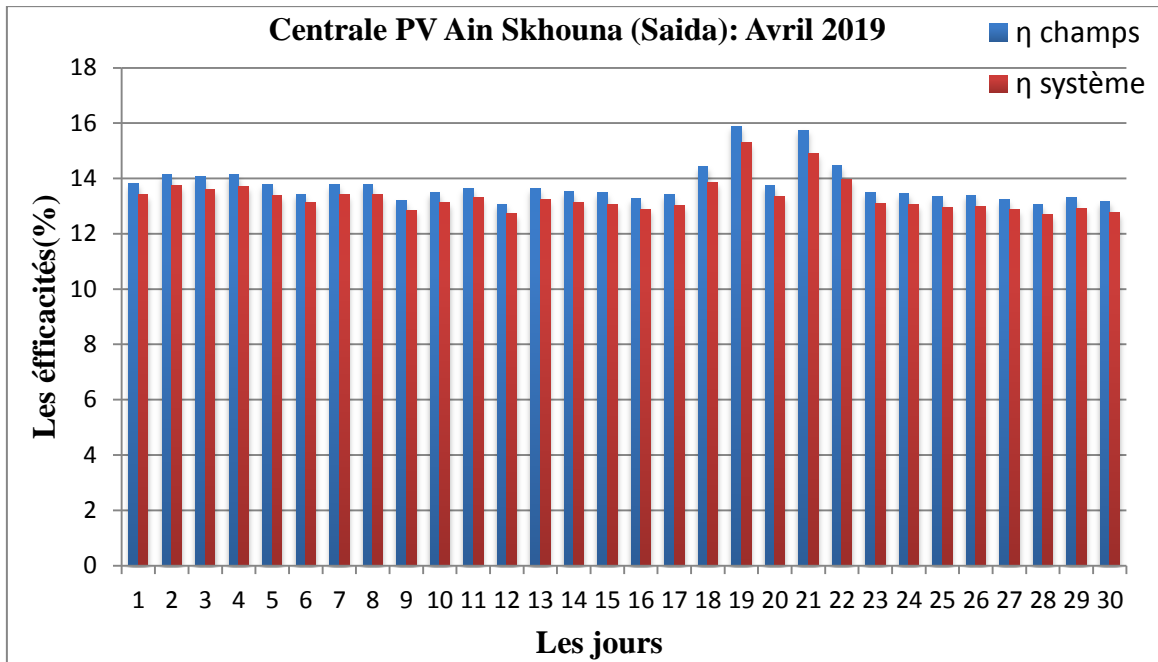


Figure III.8 : Evolution journalière des efficacités (champs et système).
de la centrale PV Ain Skhouna (Avril 2019).

La Figure III.9 présente l'évolution journalière de l'efficacité des onduleurs du champ Saida1. Elle varie entre 79,62 % noté au 6^{ème} jour du mois d'Avril et un minimum de 94,67 % noté au 21^{ème} jour du même mois avec une valeur moyenne de mois de 96,99%. Ce qu'est on accord avec les résultats des pertes journalières du système par conversion.

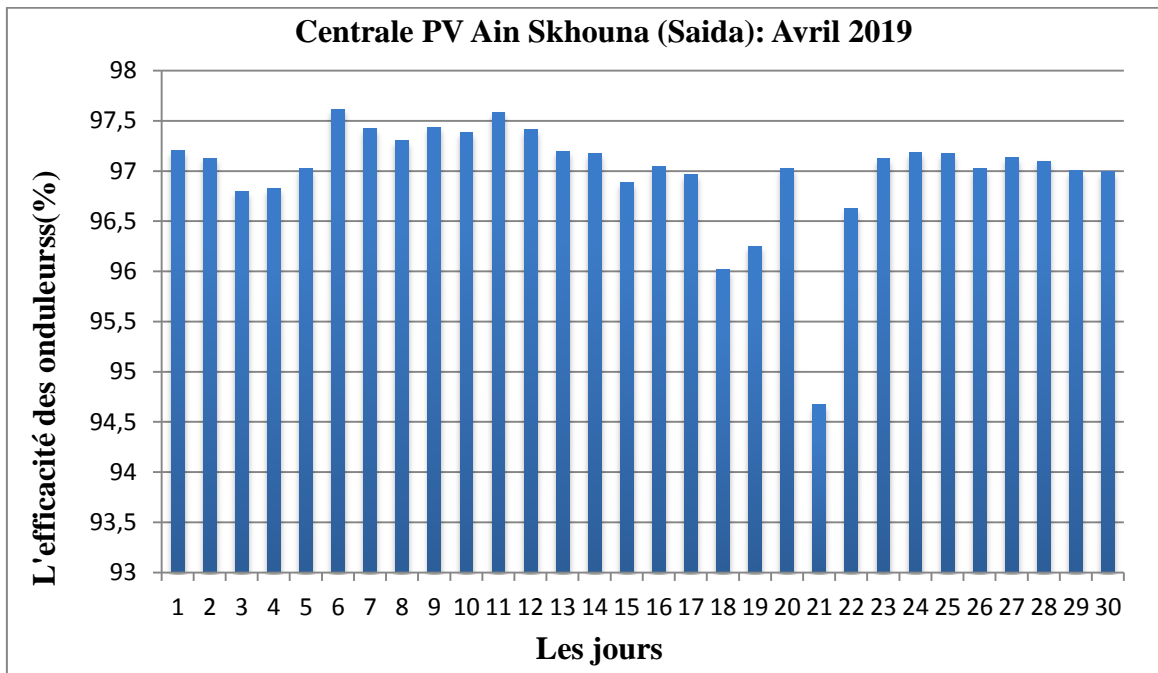


Figure III.9 : Evolution journalière de l'efficacité des onduleurs
de la centrale PV Ain Skhouna (Avril 2019).

III.4. Conclusion

L'analyse de performance du champ photovoltaïque (Saida1) d'une capacité de 15.936MWc de la centrale Ain Skhouna de 30 MW durant le mois de notre stage nous a permis de constater que :

- L'énergie générée (E_{DC}) et l'énergie fournie au réseau (E_{AC}) sont 95,30MWh et 92,51MWh respectivement. Elles sont proportionnelles à l'insolation ;
- Les rendements de référence, du champ photovoltaïque et final sont 6,83 h/d, 5,98 h/d et 5,81 h/d respectivement. Ils sont également proportionnels à l'insolation ;
- L'indice de performance normalisé (PR) présente une valeur moyenne de 85,75%. Ce qui est supérieur à 80 % correspond à un système dont les performances approchent les performances idéales dans les conditions STC. Donc la centrale d'Ain Skhouna présente un indice de performance très intéressant qui confirme son bon état de fonctionnement (pas de dégradation) ;
- Les pertes journalières du système par conversion sont relativement stables avec une moyenne de 0.17 h/jour. Ceci montre que les onduleurs du sous champ Saida 1 sont performants quant à la conversion DC-AC. La valeur moyenne des pertes journalières sont 0.86 h/d ;
- L'efficacité journalière moyenne du champ et du système du système sont 13,74% et 13,33 % respectivement;
- L'efficacité des onduleurs du champ Saida1 présente une valeur moyenne du mois de 96,99%. Ce qu'est en accord avec les résultats des pertes journalières du système par conversion.

Donc on peut dire que cette centrale présente de très bons résultats d'analyse de performance, qui confirme son bon état de fonctionnement (pas de dégradation) après 3 ans de service. Notant que cette centrale est classée la première dans le classement des centrales photovoltaïques en Algérie.

Chapitre IV

L'interface graphique

PERF-ANALYSE

IV.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la description de l'interface graphique PERF-ANALYSE pour l'analyse de performance de centrale photovoltaïque d'Ain Skhouna (Saida) que nous avons réalisée. Il permet de calculer et de tracer les évolutions des paramètres de performance étudiés. Ces paramètres de performance ont été spécifiés par l'Agence Internationale de l'Energie (IEA) et sont décrits dans les normes standardisées (Commission Electrotechnique Internationale) CEI 61724 [21].

Notre interface graphique PERF-ANALYSE a été réalisée en utilisant le logiciel Matlab grâce au GUIDE (Graphical User Interface Development Environment).

IV.2. Présentation du langage de programmation MATLAB

L'interface graphique PERF-ANALYSE a été développée à l'aide du langage de programmation de quatrième génération MATLAB (Matrix laboratory) fournis par la société MathWorks fin des années 70. En effet, le logiciel MATLAB est utilisé à des fins de calcul numérique, il permet de manipuler les matrices, d'afficher les courbes et les données, de mettre en œuvre des algorithmes, de créer des interfaces utilisateurs, et peut s'interfacer avec d'autres langages tels que le C, C++, Java, et Fortran.

Les utilisateurs de MATLAB sont de milieux très différents comme l'ingénierie, les sciences et l'économie dans un contexte aussi bien industriel que pour la recherche. MATLAB peut s'utiliser seul ou bien avec des toolbox 'boîte à outils' [web10].

Le logiciel MATLAB possède un outil dédié à la création des interfaces graphiques appelé GUIDE (Graphical User Interface Development Environment). Il s'ouvre, soit en cliquant



sur l'icône, soit en tapant guide dans la fenêtre de commande 'Command Window' de MATLAB comme noté sur la Figure IV.1. Ce dernier 'GUIDE' regroupe tous les outils (objets graphiques : boutons, menus, cases à cocher...) dont le programmeur a besoin pour créer son interface comme illustré sur la Figure IV.2. Ces objets sont généralement actionnés à l'aide de la souris ou du clavier. [web11]

Le placement des objets est réalisé par la sélection dans une boîte à outils. Leur mise en place et leur dimensionnement se font à l'aide de la souris. Un double-clic sur un objet permet de faire apparaître l'inspecteur de propriété 'Property Inspector' où les propriétés des objets sont facilement éditables. Leurs modifications et la visualisation de ces modifications sont immédiates comme noté sur la Figure IV.3.

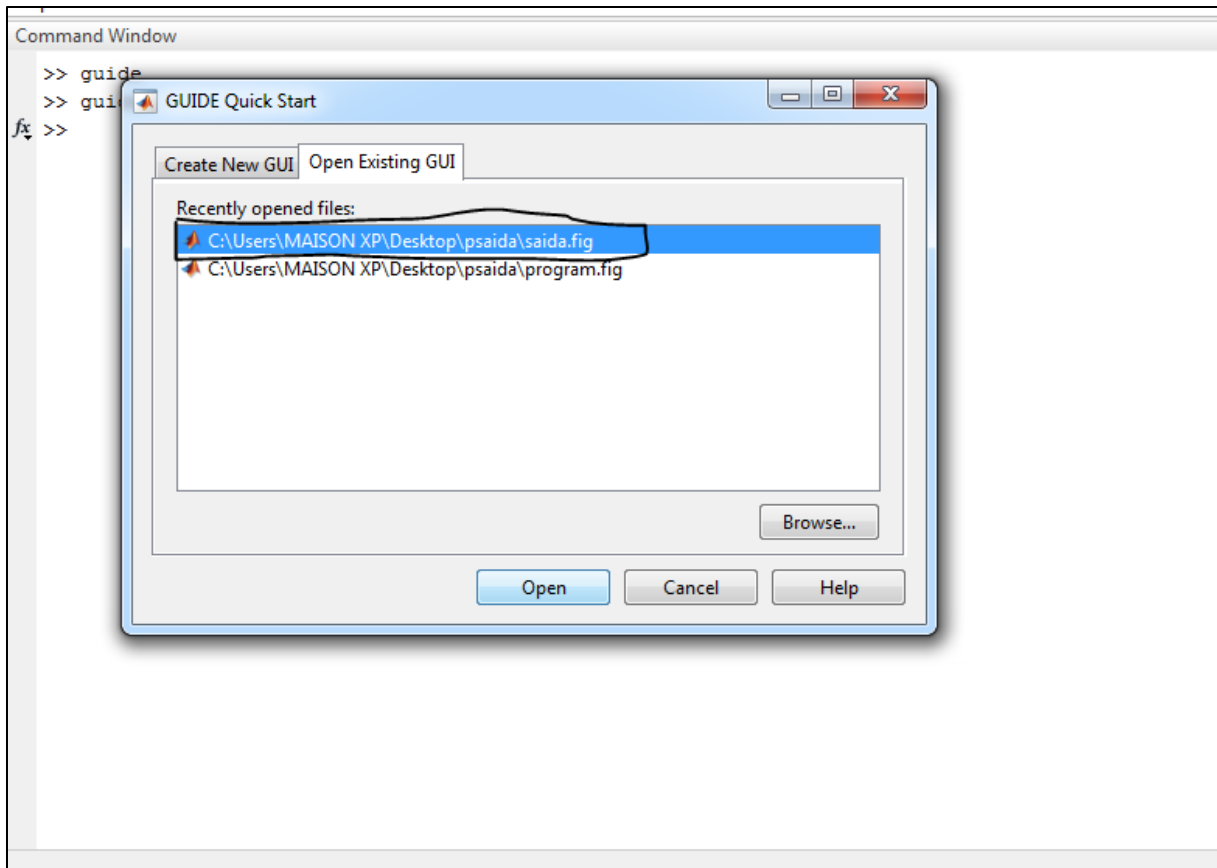


Figure IV.1 : Commande d'ouverture de GUIDE.

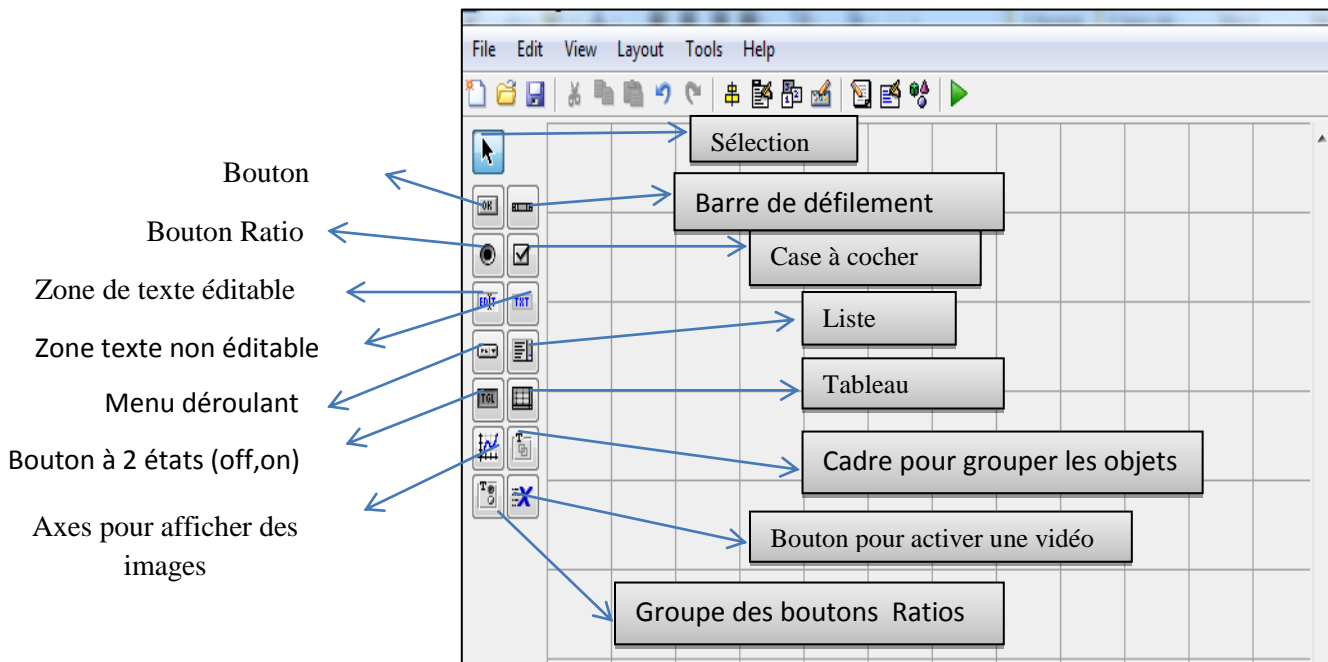


Figure IV2 : Fenêtre principale du GUIDE.

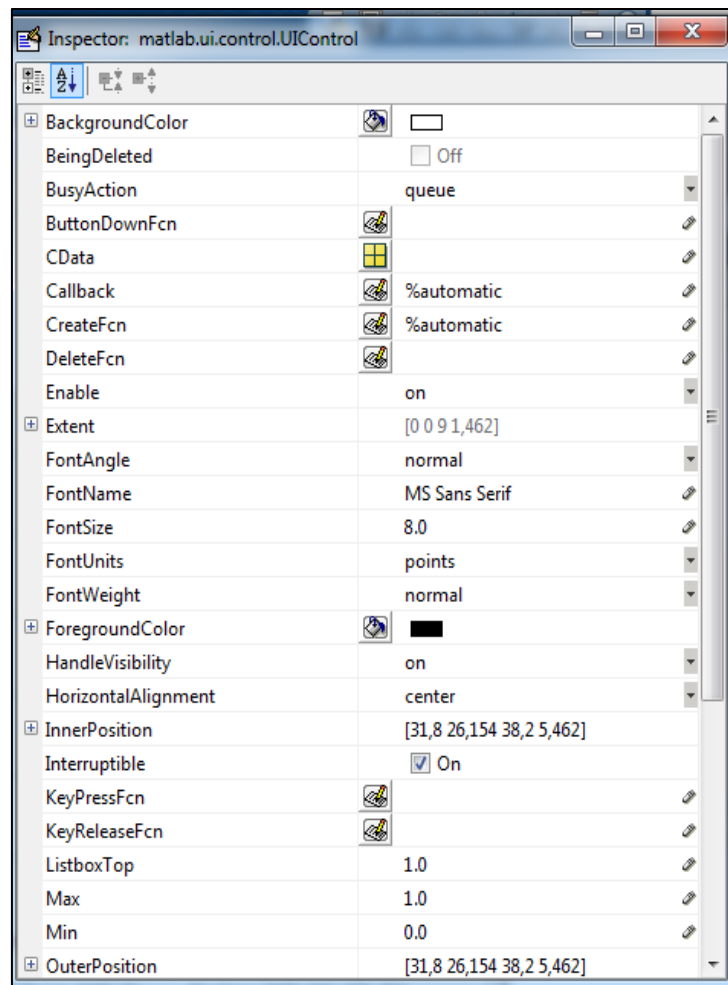


Figure IV.3 : l'inspecteur de propriété.

Le GUIDE possède également des outils pour gérer l'alignement des objets et pour créer des barres d'outils ou des menus. Une fois l'interface graphique terminée, son enregistrement donne deux fichiers portant le même nom mais dont les deux extensions sont différentes (.fig et .m). Le fichier (.fig) contient la définition des objets graphiques (positions et propriétés). Ce fichier peut être ouvert ultérieurement avec le GUIDE pour modifier les objets graphiques. Le fichier (.m) contient les lignes de code qui assurent le fonctionnement de l'interface graphique (actions des objets). Ce fichier peut être édité dans l'éditeur de MATLAB 'MATLAB Editor'.

IV.3. Présentation générale de l'interface PERF-ANALYSE

Dans ce qui suit, on présente une vue d'ensemble des différentes boîtes de dialogue que propose l'interface PERF-ANALYSE afin de se familiariser avec elle. L'interface PERF-ANALYSE fonctionne sous Windows, elle est écrite en langage MATLAB et assure l'automatisation des tâches de calculer et de tracer des différents paramètres qui sont décrits dans les normes standardisées (Commission Electrotechnique Internationale). Elle se base lors de ses calculs sur les performances du système dans son ensemble par rapport à la production d'énergie représentant le projet à créer (Analyse de performance de centrale) comme visualisé sur la Figure IV.4.

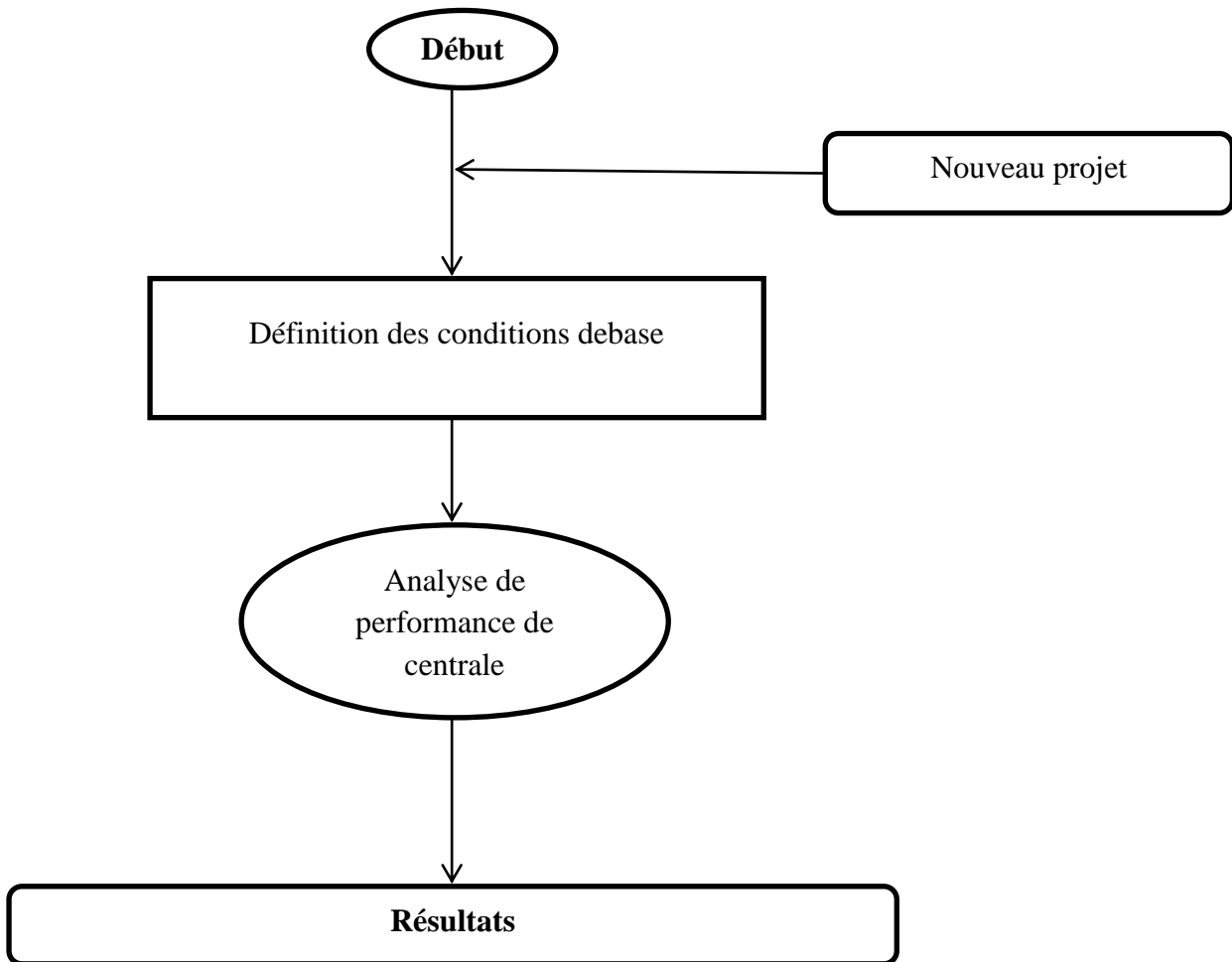


Figure IV.4 : Organigramme général du processus de calcul de l'interface PERF-ANALYSE.

IV.3.1. Donnée de base

Notre interface graphique PERF-ANALYSE sous sa version actuelle est destinée aux calculs de performance de la boucle 1 (avec une puissance de 15.936 MWc) de la centrale photovoltaïque Ain Skhouna pour le mois d'Avril uniquement (duré de notre stage). Les données de base utilisées dans cette interface sont le nombre de jour du mois d'Avril (30 jours), les températures (ambiantes et du module), les radiations, la vitesse du vent chaque 15 minutes pour chaque jour. De même, les puissances journalières AC et DC pour chaque 15 minutes (les mêmes données utilisées dans le chapitre3).

IV.3.2. Analyse de performance

L'analyse de performance pour le mois d'avril est effectuée suivant les normes standardisées (Commission Electrotechnique Internationale) CEI 61724. Cette analyse comporte les paramètres suivants ; le rendement de référence (Y_r), le rendement du champ PV (Y_a), le rendement final du système PV (Y_f), le rapport de performance (PR), les pertes du système (LS) et les pertes diverses (LC). Ils sont décrits dans le chapitre 3.

IV.3.3. Résultats

Les résultats obtenus peuvent être représentés sous forme d'une évolution mensuelle en fonction de nombre de jour ou sous forme d'une moyenne mensuelle du mois d'Avril.

IV.4. Présentation visuelle de l'interface PERF-ANALYSE

Notre interface graphique PERF-ANALYSE comporte trois pages, la page d'accueil, la page d'analyse des données météorologiques et la page d'analyse de l'évolution des performances de la centrale PV.

IV.4.1. Page d'accueil

La page d'accueil de notre interface PERF-ANALYSE est la page principale, elle est notée sur la Figure IV.5. Elle comporte des informations sur la centrale photovoltaïque étudiée (ces caractéristiques ; 30MWc, 119520 panneaux photovoltaïques de type poly-cristallin, 30 onduleurs et 15 transformateurs) ainsi que sa photo, le nom de notre interface PERF-ANALYSE qui signifie analyse de performance. De même, le cadre de réalisation de cette interface, il s'agit d'un projet de fin d'étude Master II (option énergétique de l'année universitaire 2018/2019) de l'étudiant Hneini Mema sous la direction de son encadreur Dr. Ihaddadene Razika et bien sûr du département de génie mécanique de l'université de Med Boudiaf. La page d'accueil de l'interface est illustrée sur la Figure IV.5.



Figure IV.5 : Page de d'accueil de l'interface graphique PERF-ANALYSE.

IV.4.2. Page d'analyse des données météorologiques

La page de l'analyse des données météorologiques permet d'analyser les données météorologiques (la température journalière, l'insolation journalière, la vitesse du vent journalière) en plus de la température journalière des modules, en présentant l'évolution mensuelle de ces différents paramètres (l'insolation, les températures (ambiante et modules) et la vitesse du vent comme noté sur la Figure IV.6.

On peut également avoir l'insolation, la température ambiante, la température du module et la vitesse du vent pour chaque jour après avoir choisie le jour du mois d'Avril comme indiqué sur la Figure IV.6.

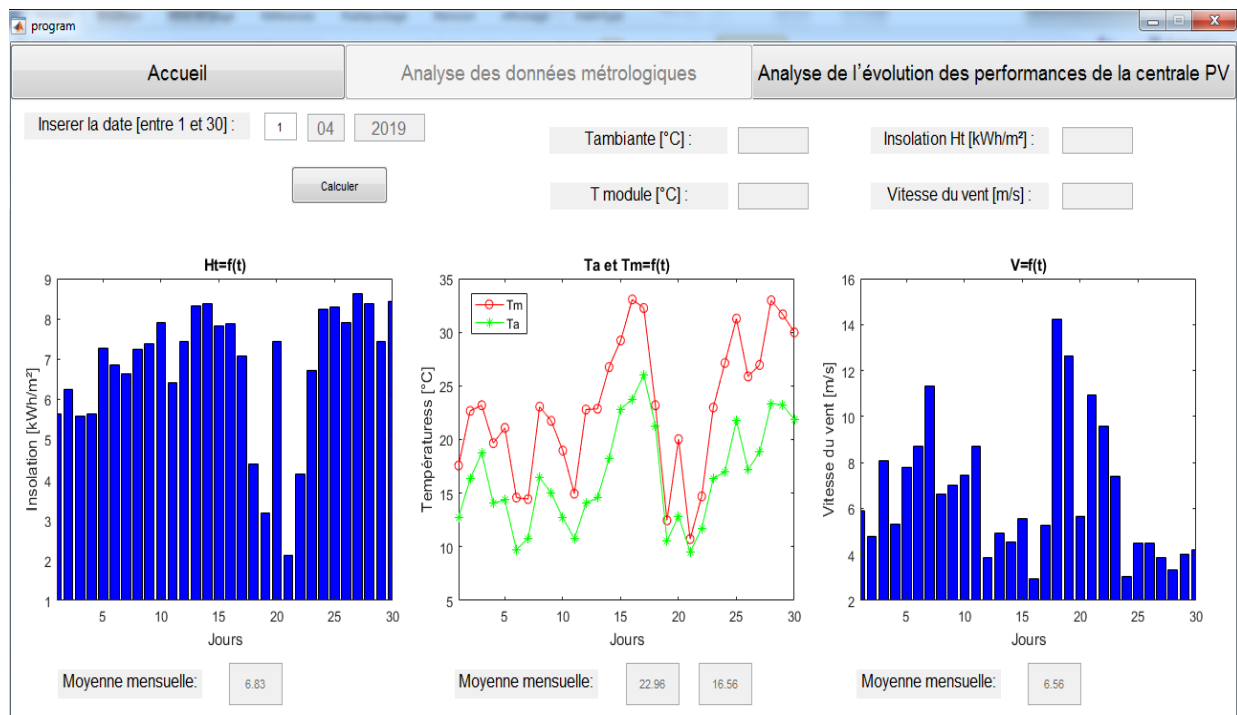


Figure IV.6 : La page d'analyse des données météorologiques.

IV.4.3. Page d'analyse de l'évolution des performances de centrale PV.

La page d'analyse de l'évolution des performances de la centrale PV est la page de base dans notre interface. Une fois cliqué sur cet icône la fenêtre illustrée sur la Figure IV.7 apparaît. Elle comporte quatre graphes:

- Le premier graphe illustre l'évolution mensuelle des énergies continue E_{dc} et alternatif E_{ac} sous forme d'un histogramme ;
- Le deuxième graphe présente l'évolution mensuelle du Rendement du champ PV et rendement du système sous forme d'un histogramme ;
- Le troisième graphe évolue le rapport de performance durant le mois d'Avril ;
- Le quatrième graphe présente l'évolution mensuelle des rendements de référence (Y_r), du champ (Y_a) et final (Y_f) comme indiqué sur la Figure IV.7.

En plus de ces graphes, on peut également avoir deux graphes supplémentaires à l'extérieur de l'interface graphique ; le graphe de l'évolution mensuelle du rendement de l'onduleur indiqué sur la Figure IV.8 et le graphe de l'évolution mensuelle des pertes du système (L_s) et les pertes divers (L_c) (Figure IV.9) en tapant sur le bouton d'exécution correspondant noté sur la Figure IV.7.

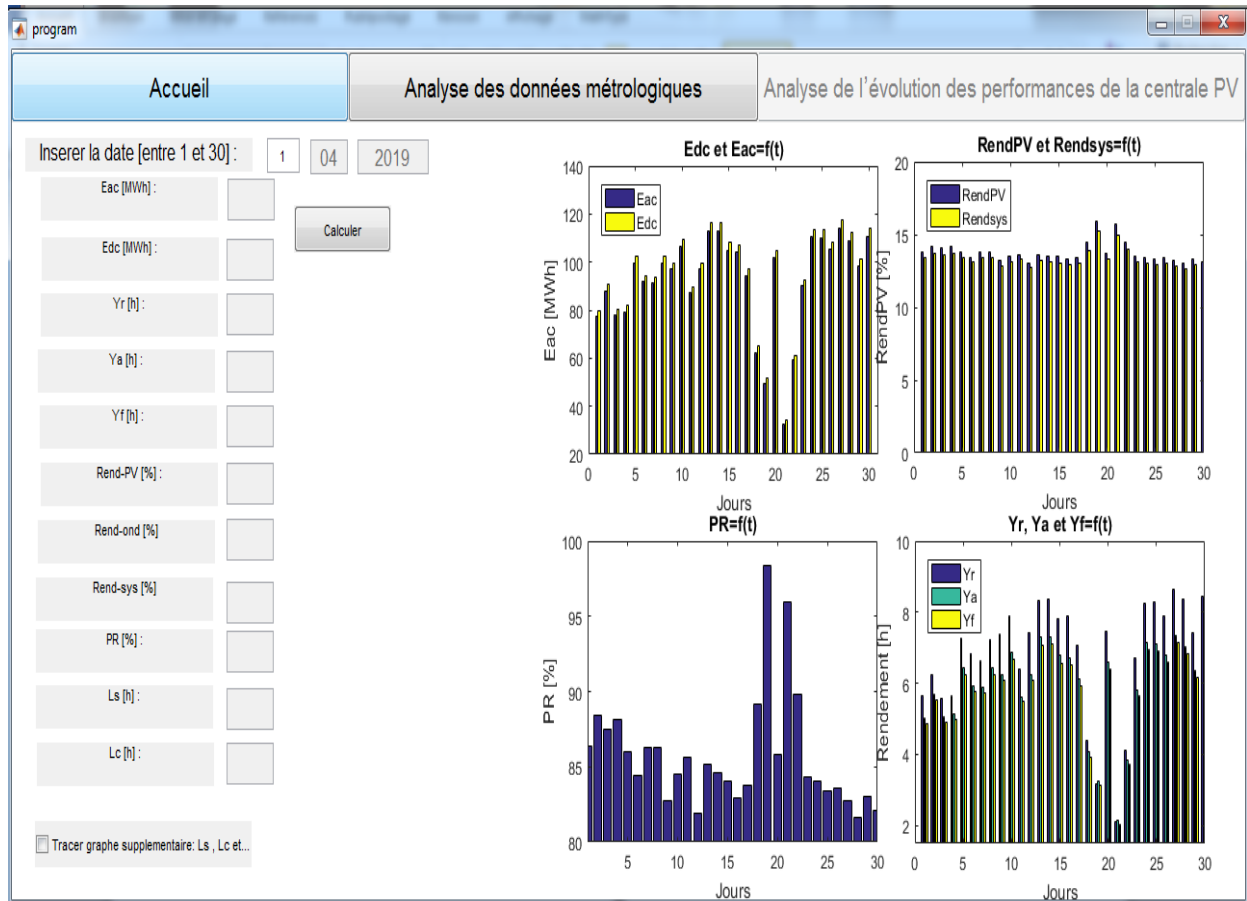


Figure IV.7 : La page d'analyse de l'évolution des performances de la centrale PV.

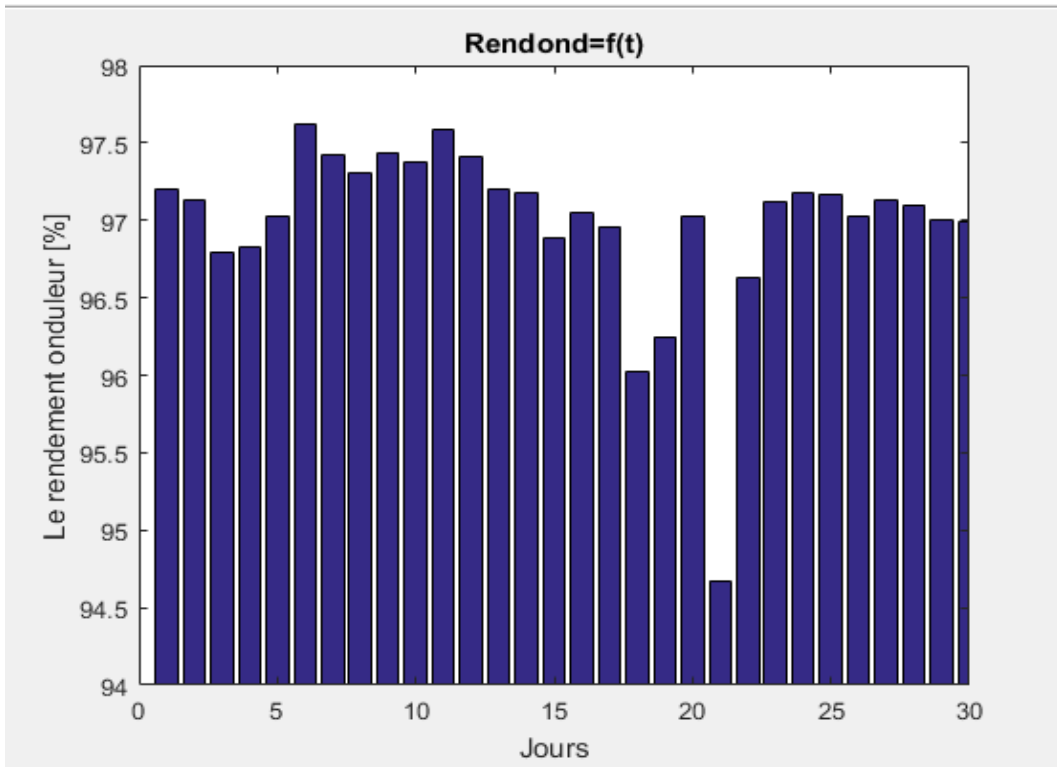


Figure IV.8 : Graphe de l'évolution mensuelle du rendement de l'onduleur.

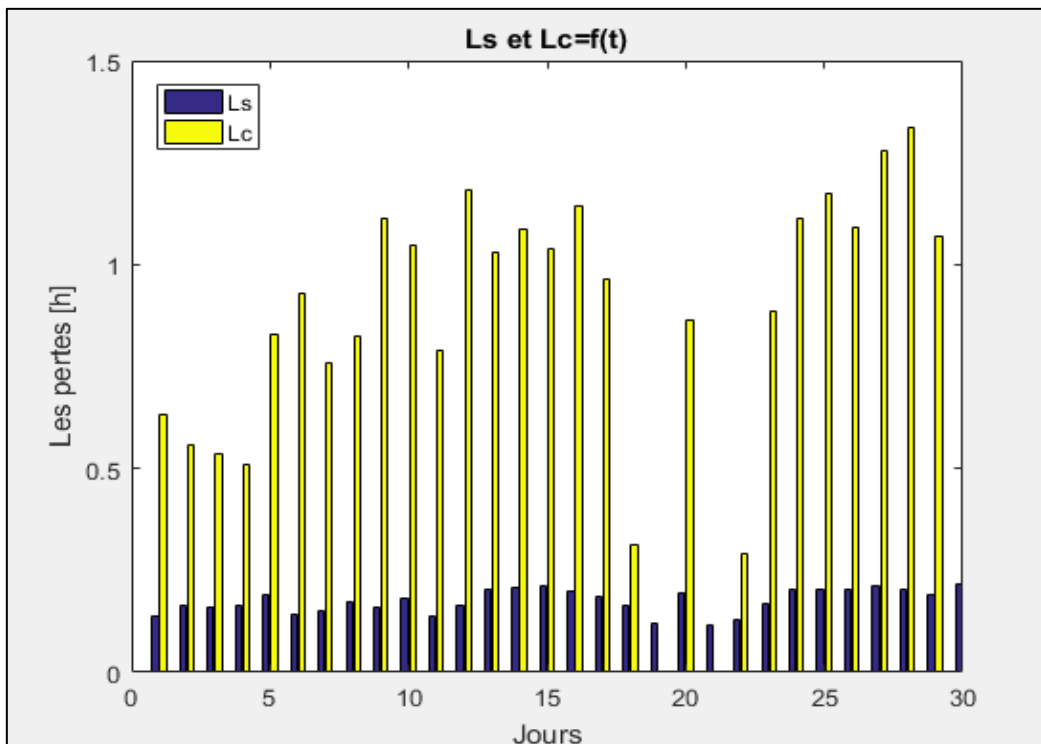


Figure IV.9: Graphe de l'évolution mensuelle des pertes du système (Ls) et les pertes divers (Lc).

On peut également avoir des valeurs moyenne pour chaque jour du mois d'Avril de tout ces paramètres cités au paravent (les puissances Ac et DC, le rendement de référence (Yr), le

rendement du champ PV (Y_a), le rendement final du système PV (Y_f), le rapport de performance (PR), les pertes du système (LS) et les pertes diverses (LC) comme indiqué sur la Figure IV.7. Ces valeurs s'affichent en tapant sur le bouton 'calculer'

La comparaison des valeurs des ces différents paramètres en utilisant le logiciel Excel (résultats du chapitre3) et ceux en utilisant l'interface graphique en utilisant le logiciel Matlab révèle que les résultats sont les mêmes, il n'existe de différence entre les deux.

Remarque :

Dans le cas ou on tape un nombre de jour qui n'est pas dans l'intervalle [1,30] les deux fenêtres d'analyse des données météorologiques et l'analyse des performances de la centrale PV affichent un message d'erreur 'ERREUR' comme illustré sur la Figure IV.10.

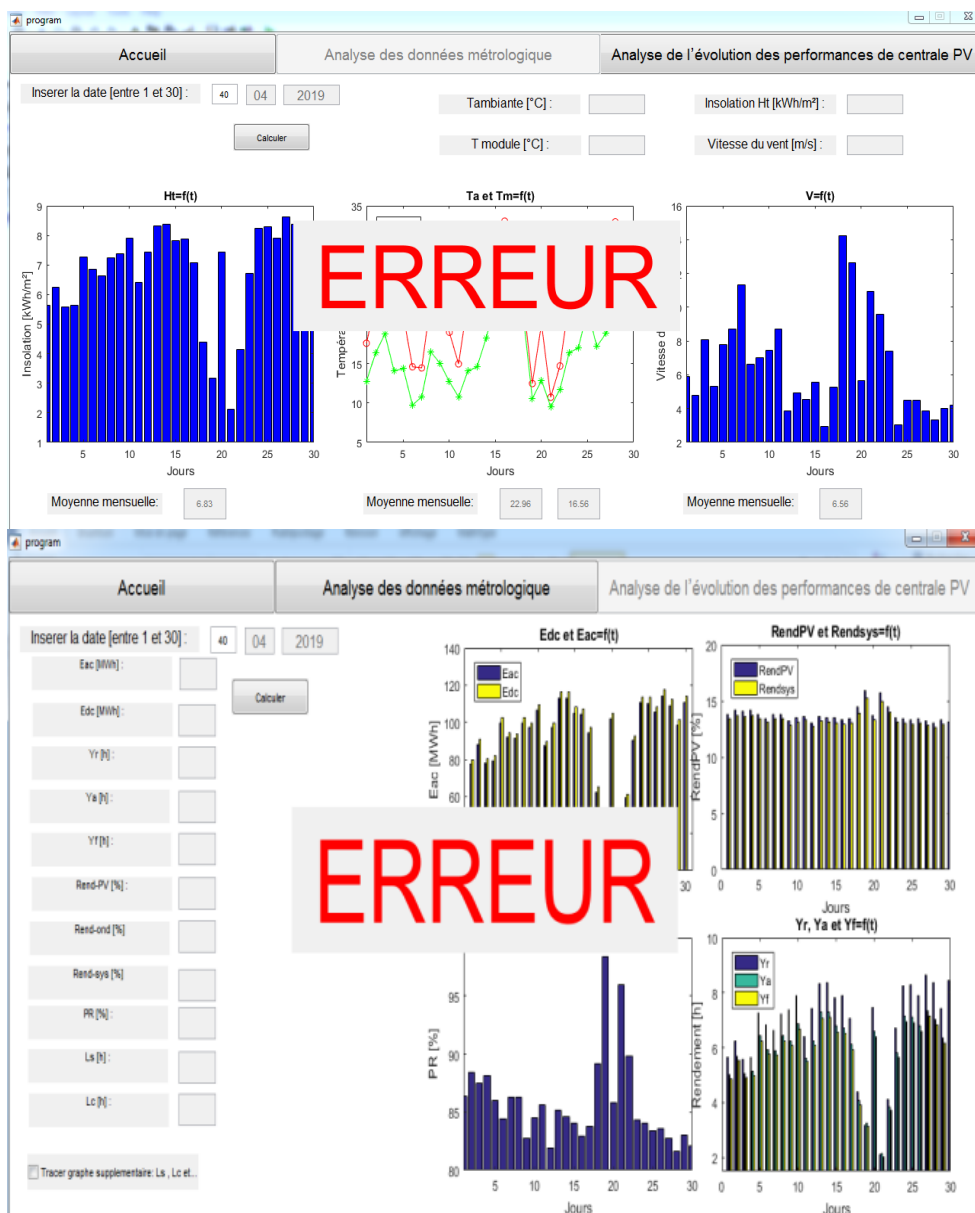


Figure IV.10: Message d'erreur dans l'interface PERF-ANALYSE.

IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre, on a pu réaliser une interface graphique PERF-ANALYSE pour l'analyse de performance de la centrale de Ain Skhoua (Saida) pour le mois d'Avril en utilisant le logiciel Matlab (GUIDE : Graphical User Interface Development Environment). Les résultats de cette interface sont les mêmes résultats calculés en utilisant le logiciel de calcul Excel.

L'interface graphique PERF-ANALYSE permet de calculer et d'analyser les paramètres de performance suivants ; l'énergie AC, l'énergie DC, le rendement de référence (Yr), le rendement du champ PV (Ya), le rendement final du système PV (Yf), le rapport de performance (PR), les pertes du système (LS) et les pertes diverses (LC). Il présente un outil qui aide à contrôler le fonctionnement des centrales photovoltaïques.

Cette interface peut être utilisée également pour le calcul des mois qui contiennent 30 jours exemple le mois de Juin, Septembre, Novembre.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'Algérie a adopté en 2011 une stratégie ayant pour objectif de produire d'ici 2030, 40% d'électricité à partir de ressources renouvelables. Un plan à long terme sur les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique a été adopté pour objectif, la mise en place de 22.000 MW de capacité installée entre 2011 et 2030 dont 12.000 MW pour couvrir la demande nationale et 10.000 MW pourraient être exportés, si des garanties d'achat à long terme et des financements extérieurs étaient sécurisés. Ce programme inclut la réalisation, d'ici 2020, d'une soixantaine de centrales solaires photovoltaïques et solaires thermiques, de fermes éoliennes et de centrales hybrides.

Notre étude porte sur une de ces centrale photovoltaïques, c'est la centrale d'Ain Skhouna située dans la wilaya de Saida en algérie.

La centrale photovoltaïque d'Ain Skhouna (Saida) d'une capacité de 30 MWc est un mégaprojet qui fait partie d'un programme national de production de l'électricité à partir des énergies renouvelables. Elle s'étale sur une superficie de 42.3 ha avec 119520 panneaux photovoltaïques de type CS6P-250P (silicium poly-cristallin) réparties en deux champs Saida1 et Saida2. Elle comporte également 60 boîtes de jonctions, 30 onduleurs de type Sunny Central 850CP XT, une armoire de communication des charges et une salle de contrôle. En plus d'une mini station pour la mesure des données météorologiques.

L'analyse de performance du champ photovoltaïque (Saida1) d'une capacité de 15.936MWc de la centrale Ain Skhouna de 60 MW durant le mois d'Avril 2019 de (durée de notre stage) selon les normes standardisées (Commission Electrotechnique Internationale) CEI 61724, nous a permis de constaté que :

- L'énergie générée (E_{DC}) et l'énergie fournie au réseau (E_{AC}) sont 95,30MWh de 92,51MWh respectivement. Elles sont proportionnelles à l'insolation ;
- Les rendements de référence, du champ photovoltaïque et final sont 6,83 h/d, 5,98 h/d et 5,81 h/d respectivement. Ils sont également proportionnels à l'insolation ;
- L'indice de performance normalisé (PR) présente une valeur moyenne de 85,75%. Ce qui est supérieur à 80 % correspond à un système dont les performances approchent les performances idéales dans les conditions STC. Donc la centrale d'Ain Skhouna présente un indice de performance très intéressant qui confirme son bon état de fonctionnement (pas de dégradation) ;

Conclusion générale

- Les pertes journalières du système par conversion sont relativement stables avec une moyenne de 0.17 h/jour. Ceci montre que les onduleurs du sous champ Saida 1 sont performants quant à la conversion DC-AC. La valeur moyenne des pertes journalières sont 0.86 h/d ;
- L'efficacité journalière moyenne du champ et du système du système sont 13,74% et 13,33 % respectivement;
- L'efficacité des onduleurs du champ Saida1 présente une valeur moyenne du mois de 96,99%. Ce qu'est on accord avec les résultats des pertes journalières du système par conversion.

Une interface graphique PERF-ANALYSEa été réalisée pour l'analyse de performance de la centrale de Ain Skhouna (Saida) pour le mois d'Avril en utilisant le logiciel Matlab (GUIDE : Graphical User Interface Development Environment). Les résultats de cette interface sont les mêmes résultats calculés en utilisant le logiciel de calcul Excel.

L'interface graphique PERF-ANALYSE permet de calculer et d'analyser les paramètres de performance suivants ; l'énergie AC, l'énergie DC, le rendement de référence (Y_r), le rendement du champ PV (Y_a), le rendement final du système PV (Y_f), le rapport de performance (PR), les pertes du système (LS) et les pertes diverses (LC). Il présente un outil qui aide à contrôler le fonctionnement des centrales photovoltaïques. Cette interface peut être utilisée également pour le calcul des mois qui contiennent 30 jours exemple le mois de Juin, Septembre, Novembre.

Comme perspective, on propose de compléter cette interface graphique en tenant compte des mois de 31 jours et 28 ou 29 jours et ainsi avoir une interface d'analyse de performance pour toute l'année. De même, introduire le champ Saida2 pour balayer toute la centrale. Dans ce cas, cette interface présentera un outil indispensable dans le suivie et le contrôle de performance de cette centrale photovoltaïque suivant les normes internationales.

Bibliographie

Bibliographie.

Références Bibliographiques

- [1]. ZEGGAOUI.S, « Stockage de l'énergie Solaire », Master en Electronique, Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hacén Badi, El-Harrach, Alger, Algérie.2013.
- [2]. Zerga .A, Benyarou. F. et B. Benyousef : « Optimisation du rendement d'une cellule solaire NP au silicium monocristallin », Rev. Energ. Ren : physique Energétique (1998pp.95-100).
- [3]. TOUMI Abdallah Bakir « Programme National des Energies Renouvelables 2015-2030 » SKTM.
- [4].Boubaya Djoudi et Bourezg Soheyb « Les centrales photovoltaïques en Algérie », mémoire de license en génie mécanique option énergétique. Université de Mohamed Boudiaf M'sila, 2018.
- [5]. Document de la SKTM : Centrales PV de SKTM.
- [6]. DER, Les énergies renouvelables en Algérie : chiffres clefs, publication des services économiques, novembre 2013, p17.
- [7]. TOUMI Abdallah Bakir « Programme National des Energies Renouvelables 2015-2030 » SKTM.
- [8]. B. Robyns, P. Bastard, "Production décentralisée d'électricité : contexte et enjeux techniques", La revue 3EI n°39, Décembre 2004.
- [9]. BELAKEHAL. S, «Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables», THÈSE Doctorat, UNIVERSITE DE CONSTANTINE, 10/06/2010.
- [10]. ZIDANE Ammar, «Etude et dimensionnement d'une installation photovoltaïque au niveau d'un puits de gaz», mémoire de Master en Electrotechnique., Université d'Abderrahmane Mira, Bejaia, 2012.
- [11]. Singo, A.T. « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome ». Thèse de doctorat, Henri Poincaré, Nancy (2010).
- [12]. Halouane Assia, «Modélisation du transfert radiatif dans les strates supérieures d'un module photovoltaïque», mémoire de Master en Génie mécanique. Université M'hamed Bougara , Boumerdes, 2017.
- [13] Bouguerra.T, «Optimisation d'un système photovoltaïque : Application en continu et en alternatif», Mémoire Magister, UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE 1, 30/06/2014.
- [14] F. Jackson. <<Planning and installing photovoltaic systems green dragon energy>>. A Guide For Installers, Architects And Engineers Second Edition Berlin October.2007.

Bibliographie.

- [15]. Document d'application technique n°10 Installations photovoltaïques, Technical Application Papers 2010 ABB. www.plaisance-pratique.com/IMG/pdf/Panneaux_solaires.pdf
- [16]. Mustapha Belarbi, « Contribution à l'étude d'un générateur solaire pour site autonome » Thèse de Doctorat Es-Sciences, Université des sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf 2015.
- [17]. A. Labouret, P. Cumunel, and J.-paul B.B. Faraggi, “Cellules solaires Les bases de l'énergie,”Dunod ; Paris ; (2010).
- [18] DIN EN 13306. Deutsches Institut für Normung: Instandhaltung – Begriffe der Instandhaltung; 2015.
- [19] Maghami, M. R., Hizam, H., Gomes, C., Radzi, M. A., Rezadad, M. I., & Hajighorbani, S. (2016). Power loss due to soiling on solar panel: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 59, 1307-1316.
- [20] Ayompe, L. M., Duffy, A., McCormack, S. J., & Conlon, M. (2011). Measured performance of a 1.72 kW rooftop grid connected photovoltaic system in Ireland. Energy conversion and management, 52(2), 816-825.
- [21]. International Standard IEC 61724, Photovoltaic system performance monitoring guidelines for measurement, Data exchange and analysis. 1998.

Webographe

- [web1]. <http://www.aros-solar.com/fr/le-rayonnement-solaire>.
- [web2]. https://fr.wikipedia.org/wiki/Irradiation_solaire#/media/File:SolarGIS-Solar-map-World-map-en.png.
- [Web3]. <http://www.sktm.dz/?page=article&id=56>
- [web4]. <https://fr.statista.com/statistiques/720332/repartition-energie-renouvelable-par-source-energie/>
- [web5] https://www.ecosources.info/dossiers/Types_de_cellules_photovoltaiques
- [web6]. <https://www.algerie-eco.com/2018/04/04/energie-solaire-lalgerie-enfin-determinee-a-exploiter-son-enorme-potentiel/>
- [web7]. <https://fr.statista.com/statistiques/753576/capacite-puissance-solaire-photovoltaique-selon-le-pays-monde/>.

Bibliographie.

[web8]. <http://energiesdedemain.e-monsite.com/pages/les-bateaux/l-energie-solaire/>

[web9]. <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?map=africa&lang=fr>.

[web10]. <https://fr.wikipedia.org/wiki/MATLAB>, vue le 02/06/2019

[web11]. <https://briot-jerome.developpez.com/matlab/tutoriels/introduction-programmationinterfaces-graphiques/> vue le 29/05/2019

Résumé

La centrale photovoltaïque d'Ain Skhouna (Saida) d'une capacité de 30 MWc est un mégaprojet qui fait partie d'un programme national de production de l'électricité à partir des énergies renouvelables. Notre étude porte sur l'analyse de performance du champ photovoltaïque (Saida1) d'une capacité de 15.936MWc selon les normes standardisées (Commission Electrotechnique Internationale) CEI 61724 durant le mois d'Avril 2019. Nos résultats révèlent que l'indice de performance normalisé (PR) est de 85,75% qui présente une valeur très intéressante et qui confirme son bon état de fonctionnement (pas de dégradation). De même, une interface graphique PERF-ANALYSE a été élaborée pour l'analyse de performance de la centrale de Ain Skhouna (Saida) pour le mois d'Avril et pour tous les mois de 30 jours en utilisant le logiciel Matlab (GUIDE : Graphical User Interface Developpement Environment).

Abstract

The Ain Skhouna (Saida) photovoltaic plant with a capacity of 30 MWp is a megaproject that is part of a national program for the production of electricity from renewable energies. Our study focuses on the performance analysis of the photovoltaic field (Saida1) with a capacity of 15.936MWc according to the standardized standards (International Electrotechnical Commission) IEC 61724 during the month of April 2019. Our results reveal that the performance index standardized (PR) is 85.75% which presents a very interesting value and which confirms its good state of operation (no degradation). Similarly, a PERF-ANALYZE graphical interface has been developed for the performance analysis of the Ain Skhouna (Saida) plant for the month of April and for all 30-day months using the Matlab software (GUIDE: Graphical User Interface Developpement Environment).

ملخص

تعتبر محطة عين سخونة (سعيدة) الكهروضوئية بطاقة 30 ميغاوات ، وهو مشروع ضخم يمثل جزءاً من برنامج الوطني لإنتاج الكهرباء من الطاقات المتجددة. تركز دراستنا على تحليل أداء الحقل الكهروضوئي (سعيدة1) بسعة 15.936 ميغاوات خلال شهر ابريل وفقاً للمعايير الموحدة المسندة من طرف (اللجنة الكهربية الدولية). حيث يمثل قيمة مثيرة للاهتمام للغاية والتي تؤكدنا نتائجنا حيث تكشف أن مؤشر الأداء المعياري ما يقرب 85.75 حالتها الجيدة للتشغيل (بدون تدهور). وبالمثل ، تم تطوير واجهة الرسومية لتحليل أداء مصنع عين سخونة (سعيدة) لشهر أبريل ولمدة 30 يوماً باستخدام برنامج (واجهة المستخدم).