



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة والأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Instrumentation

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Industrielle

Spécialité : Génie Industrielle

Thème

Maintenance d'une Installation Photovoltaïque

Présenté et soutenu publiquement par :

Kerroucha Hadjer Nesrine et Bensehoul Nihel Chaimaa

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Benaicha Halima	MCB	IMSI	Président
Arbi Maachia	MCB	IMSI	Encadreur
Belkacem Belkacem	MCA	IMSI	Examinateur

Année 2023/2024

Remerciements

Au seuil de ce travail, nous tenons tous d'abord à remercier notre dieu ALLAH le tout puissant pour toute la volonté et le courage qu'il nous a donné pour l'achèvement de ce mémoire. A cette occasion Je remercie également les membres de jury, Pr. Benaïcha Halima et Pr Arbi Maachia. Et Pr Belkacem Belkacem. Pour l'intérêt et l'attention qu'ils ont accordés à ce modeste travail et pour avoir acceptés de faire partie de ce jury, mes remerciements vont également à l'ensemble des profs de notre institut pour leur enseignement de qualité et les connaissances qu'ils m'ont transmises durant mon parcours universitaire. Je ne saurais oublier mes familles pour leur soutien indéfectible et pour avoir toujours cru en moi. Leurs encouragements ont été mon refuge et ma motivation durant tout le parcours académique

Enfin. Je tiens à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Que ce soit à travers des discussions enrichissantes, des conseils ou simplement par leur présence, leur contribution a été précieuse.

Table des matières

Abréviations :	XII
Nomenclature :	XII
Technique et méthode de la maintenance	1
I.1 Introduction :	2
I.2 Définition de la maintenance :	3
I.2.1 : Notions sur la maintenance :	3
I.2.2 Rôle de la maintenance :	3
I.3 Place de la maintenance dans la structure d'une entreprise :	4
I.4 Les objectifs de la maintenance :	6
I.4.1 Des objectifs opérationnels :	6
I.4.2 Des objectifs de coût :	6
I.5 Organigramme de maintenance :	7
I.6 Maintenance préventive :	8
I.6.1 But de la maintenance préventive :	8
I.6.2 Les différents types de maintenance préventive :	8
I.6.2.1 Maintenance préventive systématique :	8
I.6.2.2 Maintenance préventive conditionnelle :	9
I.6.2.3 Maintenance préventive prévisionnelle :	9
I.6.3 Buts de la maintenance préventive :	9
I.7 Maintenance corrective :	9
I.7.1 Les différents types de maintenance corrective :	10
I.7.1.1 Maintenance curative :	10
I.7.1.2 Maintenance palliative :	10
I.7.2 Buts de la maintenance corrective :	10
I.7.3 La maintenance corrective débouche sur 2 types d'interventions :	10
I.7.3.1 Le dépannage :	10
I.7.3.2 La réparation :	10
I.8 Maintenance d'amélioration :	10
I.9 La différence entre la maintenance corrective et la maintenance préventive :	11
I.10 Les Cinq niveaux de maintenance :	11
I.11 Les méthodes d'analyse de défaillances :	13
I.12 Analyse des modes de défaillances et leurs effets et leur criticité (AMDEC) :	14

I.12.1	Origine AMDEC :	14
I.12.2	Définition :	15
I.12.3	But de la méthode AMDEC :	16
I.12.4	L'analyse AMDEC et la définition des actions :	16
I.12.4.1	Gravité des effets de la défaillance (G) :	17
I.12.4.3	La capacité de détection de la défaillance (D) :	18
I.13	Méthode de Pareto « ABC » OU « 20/80 » :	19
I.13.1	Définition :	19
I.13.2	Fonction :	20
I.13.3	But de la méthode ABC :	20
I.13.4	Objectifs de la méthode ABC :	21
I.13.5	Caractéristiques :	21
I.14	Conclusion :	22
Chapitre II :		23
Le système solaire PV		23
II.1	Introduction :	24
II.2	Historique :	25
II.3	L'énergie solaire :	26
II.3.1	Le Soleil :	26
II.3.2	Rayonnement Solaire :	27
II.3.3	Absorption de la lumière :	29
II.4	L'effet photovoltaïque :	30
II.5	Cellule photovoltaïque [9] :	31
II.5.1	Technologie de fabrication de la cellule solaire :	31
II.5.2	Type des cellules photovoltaïques :	32
II.4.3	Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque :	37
II.4.4	Les différentes caractéristiques d'une cellule solaire :	39
II.4.4.1	Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque :	39
II.4.5	Rendement d'une cellule solaire :	44
II.5	Module photovoltaïque :	47
II.5.1	Composition d'un Module photovoltaïque :	47
II.6	Dimensionnement d'un système photovoltaïque :	49
II.6.1	Différents types de systèmes photovoltaïques :	49

II .6.2- Les principaux facteurs influençant la production d'énergie électrique d'une installation PV :.....	51
II .6.3. Eléments constitutifs d'un système PV :	52
II .7 Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque :	58
II .8. Conclusion :	59
Chapitre III :	60
Analyse de la dégradation dans le secteur PV	60
III.1 Introduction :	61
III.2 Constituants principaux d'un système PV :.....	62
III.3.1 Les problèmes d'onduleur photovoltaïque :.....	64
III.3.1.1 Onduleur qui clignote rouge :.....	64
III.3.1.2 Onduleur en surtension :.....	65
III.3.1.3 Onduleur qui ne fonctionne plus :	65
III.3.2 Les problèmes liés aux panneaux solaires :	65
III.3.2.1 Panneau solaire qui baisse en rendement :	65
III.3.2.2 Jaunissement et brunissement « la décoloration » :.....	66
III.3.2.3 Panneau solaire endommagé :	67
III.3.2.5 Panneau solaire qui prend feu :	69
III.3.2.6 Panneau solaire qui ne fonctionne plus :	69
III .3.3 Défaut de décalage et d'ombrage :.....	69
III.3.3.1 Décalage :	70
III.3.3.2 Ombrage :	70
III.3.4 défauts dans la batterie :.....	72
III.4. Diagnostique et défauts d'une installation photovoltaïque :	72
III.4.1 Défauts dans le générateur photovoltaïque :	73
III.4.2 Défauts dans la boîte de jonction :	75
III.4.3 Défauts dans le système de câblage :	76
III.4.4 Défauts dans le système de protection :	77
III.4.5 Défauts de l'onduleur :.....	78
III.4.6 Défauts dans le système d'acquisition des données :.....	80
III.4.7 Défauts dans la batterie :	80
III. 4.8 Contrôler l'état de sa batterie :	82
III.5 Maintenance du système solaire photovoltaïque :	83
III.5.1 Conditions de réglage :	83

III.5.2 Etablir un bon système de gestion des documents techniques :.....	84
III. 5.3 Entretien des composants :.....	84
III.5.3.1 Entretien des panneaux solaire :.....	85
III.5.3.2 Entretien de l'onduleur :.....	85
III.5.3.3 Entretien des batteries :.....	85
III.5.3.4 : entretien des câbles :.....	86
III.5.3.5 Entretien du système de protection électrique :.....	86
III.5.4 Former les ouvriers de maintenance :.....	86
III.6 Conclusion :.....	87
Dimensionnement et simulation de système photovoltaïque	88
IV.1 Introduction :.....	89
IV.2 présentation du profile de charge :.....	89
IV.3 situations géographiques :.....	89
IV.4 Gisement solaire :.....	90
IV.4.1 Influence de l'angle d'incidence :.....	91
IV.4.2 Influence de l'orientation :.....	92
IV.5 Dimensionnements D'un système PV par la méthode simplifiée :.....	93
IV.5.1 Energie totale consommée :.....	93
IV.5.3 Calcul du nombre des panneaux photovoltaïques :.....	94
IV.5.4 Calcul du nombre des Batteries :.....	94
IV.6 Présentation du logiciel de simulation PVsyst V7.8.2 :.....	94
IV.7 Menus principaux :.....	95
IV.7.1 Pré-dimensionnement :.....	95
IV.7.2 Conception du projet :.....	95
IV.7.3 Principaux résultats :.....	97
IV.7.3.1 Données de localisation du site :.....	97
IV.7.3.2 Coordonnées Géographiques :.....	98
IV.7.3.3 Données météorologiques du site :.....	98
IV.7.3.4 Trajectoire du soleil :.....	99
IV.7.3.5 Orientation et inclinaison des modules PV :.....	100
IV.8 Résultats et interprétations :.....	101
IV.8.1 Besoins électriques :.....	101
IV.8.2 Distribution horaire :.....	102
IV.8.3 système :.....	104

IV.8.3.1. Batteries :	104
IV.8.3.2 Régulateur :	104
IV.8.3.3 Schéma de l'installation PV :	106
IV.9 Simulation finale :	107
IV.9.1 Première étape : Lancement de la simulation	107
IV.9.2 Deuxième étape : Résultats obtenus après la simulation	107
IV.9.3 Troisième étape : Impression des Résultats obtenus	108
IV.10 Modules photovoltaïques	121
IV.10.1 Branchement de PPV pour la mosquée ayoub	121
IV.10.2 Branchement des batteries pour la mosquée Ayoub	123
IV.10.3 Onduleurs	124
IV.10.4 Caractéristiques d'onduleurs	124
IV.11 Le choix des appareils de protections	126
Bibliographie	129

Liste des Figures :

FIGURE I.1:LA PLACE DU SERVICE DE LA MAINTENANCE DANS L'ENTREPRISE.....	5
FIGURE.I.2: OBJECTIFS DE LA MAINTENANCE.....	7
FIGURE I.3 : DIFFERENTS TYPES DE MAINTENANCE.....	7
FIGURE. I.4 : INTERETS DE L'ETUDE DES DEFAILLANCES (AMDEC).....	14
FIGURE I.5 : DIAGRAMME D'ANALYSE DE LA METHODE ABC.....	20
FIGURE II.1 : STRUCTURE DU SOLEIL.....	27
FIGURE. II.2: ANALYSE SPECTRALE DU RAYONNEMENT SOLAIRE [6].....	27
FIGURE. II.3: LE RAYONNEMENT SOLAIRE.....	28
FIGURE. II.4: NORMES DE MESURES DU SPECTRE D'ENERGIE LUMINEUSE EMIS PAR LE SOLEIL.....	29
FIGURE. II.5: LES PHOTOELECTRONS SONT EMIS PAR LA SURFACE DU METAL LORSQUE LUMIERE L'ECLAIRE.....	30
FIGURE II.6 :LA CHAINE DE FABRICATION D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE.....	31
FIGURE. II.7 : PRINCIPE DE LA CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE.....	32
FIGURE II.8 : EXEMPLE CELLULE MONOCRISTALLIN.....	33
FIGURE II.9: EXEMPLE CELLULE POLYCRISTALLIN.....	34
FIGURE II.10: EXEMPLE CELLULE AMORPHE.....	35
FIGURE II.11: UNE CELLULE ORGANIQUE [10].....	36
FIGURE II.12 : OFFRES DE PRODUITS INITIALES DE TESLA SOLAR [10].....	37
FIGURE II.13: LE DOPAGE DE SEMI CONDUCTEUR.....	38
FIGURE II.14 : SEMI-CONDUCTEUR DE TYPE N.....	38
FIGURE II.15 : SEMI-CONDUCTEUR DE TYPE P.....	39
FIGURE II.16 : JONCTION PN A L'EQUILIBRE.....	39

FIG.II.17 : SCHEMA EQUIVALENT ELECTRIQUE DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE [10].	40
FIGURE II.18: COURBE CARACTERISTIQUE P-V.	42
FIGURE II.19: CARACTERISTIQUES RESULTANTES D'UN GROUPEMENT DE CELLULES EN SERIE.	46
FIGURE II.20 : CARACTERISTIQUES RESULTANTES D'UN GROUPEMENT DE CELLULES EN PARALLELE.	46
FIGURE II.21 : MODULE PHOTOVOLTAÏQUE.	47
FIGURE. II.22: LES DIFFERENTS COMPOSANTS D'UN MODULE PHOTOVOLTAÏQUE.	47
FIGURE. II.23: SYSTEME AUTONOME.	50
FIGURE. II.24: SYSTEME HYBRIDE.	51
FIGURE II.25 : SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUE CONNECTES AU RESEAU.	51
FIGURE II.26 : LES DIFFERENTS COMPOSANTS D'UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE.	52
FIGURE II.27: REGULATEUR	54
FIGURE II.28: BATTERIE AU PLOMB ACIDE.	55
FIGURE II.29: BATTERIE AU NICKEL-CADAMIUM.	55
FIGURE II.30 : BATTERIE LI-ION	56
FIGURE II.31 : LES TYPES D'ONDULEUR SOLAIRE.	57
FIGURE. III.1 : SCHEMA SYNOPTIQUE DU SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE	62
FIGURE III.2 : DEGRADATION DES PANNEAUX SOLAIRES	63
FIGURE III.3 : ONDULEUR QUI CLIGNOTE ROUGE	65
FIGURE. III.4 : DECOLORATION DES PANNEAUX SOLAIRES	66
FIGURE III.5 : PANNEAUX SOLAIRES ENCRASSEE	68
FIGURE III.6 : INCENDIE LIE AUX PANNEAUX SOLAIRES	69

FIGURE III.7 : OMBRAGE PARTIEL	71
FIGURE III.8 : ENTRETIEN DE L'INSTALLATION PV	84
FIGURE IV.1 : LOCALISATION DE LA WILAYA DE SIDI BEL ABBES AVEC PVGIS.....	90
FIGURE IV.2 : INCLINAISON PAR RAPPORT AUX RAYONS DU SOLEIL [63].....	91
FIGURE IV.3 : LE RENDEMENT EN FONCTION DE L'ANGLE D'INCIDENCE [63].	92
FIGURE IV.4 : L'ANGLE D'INCLINAISON [63].	92
FIGURE IV.5 : FENETRE DE DE PRE-DIMENSIONNEMENT DANS LE LOGICIEL PVSYST 7.8.2.	95
FIGURE IV.6 : INTERFACE DE CREATION DE LA STRUCTURE.....	96
FIGURE IV.7: INTERFACE GLOBALE DU PVSYST POUR SIMULATION.....	97
FIGURE IV.8: EMBLEMMENT GEOGRAPHIQUE DE LA WILAYA DE SIDI BEL ABBES.	97
FIGURE IV.9: COORDONNEES GEOGRAPHIQUES DU SITE DE SIDI BEL ABBES	98
FIGURE IV.10: CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES DU SITE DE SIDI BEL ABBES	99
FIGURE IV.11 : TRAJECTOIRE DU SOLEIL A SIDI BEL ABBES.	100
FIGURE IV.12 : ORIENTATION ET INCLINAISON DU SYSTEME PV.....	101
FIGURE IV.13 : USAGE DOMESTIQUE JOURNALIERS DE LA MOSQUEE	102
FIGURE IV.14 : DISTRIBUTION HORAIRE DU SITE	103
FIGURE IV.15 : BESOINS D'UTILISATEUR.....	103
FIGURE IV.16 : DIMENSIONNEMENT DES BATTERIES.	104
FIGURE IV.17 : DIMENSIONNEMENT DE MODULE ET REGULATEUR :	105
FIGURE IV.18 : SCHEMA SIMPLIFIE D'UNE INSTALLATION PV AUTONOME.	106
FIGURE IV.19 : PRODUCTIONS NORMALISEES (PAR KWP INSTALLE).....	116

FIGURE IV.20 : INDICE DE PERFORMANCE (PR) ET FRACTION SOLAIRE (SF).	117
FIGURE IV.21 : COMPORTEMENT DU MODULE SELON IRRADIATION INCIDENTE.....	118
FIGURE IV.22: COMPORTEMENT DU MODULE SELON LA TEMPERATURE. ...	119
FIGURE IV.23: COMPORTEMENT DU MODULE SELON LA RESISTANCE EN SERIE.	120
FIGURE IV.24: COMPORTEMENT DU MODULE SELON LA RESISTANCE EN PARALLELE.	121
FIGURE IV.25 : GROUPE DE CHAINE EN PARALLELE.....	122
FIGURE IV.26: DIMENSIONS ET CARACTERISTIQUES DES PV.	123
FIGURE IV.27 : BATTERIE PB-ACIDES DE 150 AH/12V.	124
FIGURE IV.28 : DIFFERENTES CARACTERISTIQUES DU CONVERTISSEUR.....	125
FIGURE IV.29 : ONDULEUR DE 1000W	125

Liste des Tableaux

TABLEAU I.1: LES CINQ NIVEAUX DE MAINTENANCE	13
TABLEAU I.2 : GRAVITE DES EFFETS DE DEFAILLANCE	17
TABLEAU I.3 : FREQUENCE D'APPARITION DE LA DEFAILLANCE	17
TABLEAU I.4 : CAPACITE DE DETECTION DE DEFAILLANCE :	18
TABLEAU I.5 : NIVEAU DE CRITICITE (C).....	18
TABLEAU II.1 LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS D'UNE CELLULE MONOCRISTALLIN.....	33
TABLEAU II.2. LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS D'UNE CELLULE POLYCRISTALLIN	34
TABLEAU II.3 LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS D'UNE CELLULE AMORPHE.....	35
TABLEAU II.4. : TECHNOLOGIE DE CELLULES	45
TABLEAU II.5: LES COMPOSANTS PV.....	52
TABLEAU III .1 : DEFAUTS DU GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE.....	73
TABLEAU III.2 : DEFAUTS DANS LA BOITE DE JONCTION.....	75
TABLEAU III.3 : DEFAUTS DU SYSTEME DE CABLAGE	76
TABLEAU III.4 : DEFAUTS DU SYSTEME DE PROTECTION	77
TABLEAU III.5 : DEFAUTS DE L'ONDULEUR	78
TABLEAU III.6 : DEFAUTS DANS LE SYSTEME D'ACQUISITION DES DONNEES	80
TABLEAU IV.1 : BESOINS ENERGETIQUES JOURNALIERS POUR LA MOSQUEE AYOUB.....	93

Abréviations :

SDF	sûreté de fonctionnement
AMDEC	Analyse des modes, des effets et de la criticité des défaillances
FMEA	Failure Modes and Effects Analysis
PV	Photovoltaïque
UV	Ultraviolet
EVA	ethylene vinyl acetate
STC	Standard Test Conditions
NOCT	Normal Operating Cell Temperature
PTC	PVUSA Test Conditions
PVUSA	Photovoltaics for Utility Scale Applications
MPPT	Maximum Power Point Tracking

Nomenclature :

Symbole	Désignation
AM	Coefficient Air Masse.
I _{cc}	Courant de court-circuit.
V _{co}	Tension de circuit-ouvert.
e	Charge de l'électron (1.609×10^{-19} C).
k	Constante de Boltzmann (1.381×10^{-23} J/K).
n	Facteur de non idéalité de la jonction
T	Température effective de la cellule en degré Kelvin.
MPPT	maximum power point tracking

I	Le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur.
V	La tension aux bornes de cette même cellule.
I_{ph}	Le photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température ou bien courant de (court-circuit).
R_p	La résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction.
R_s	La résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions.
I_{sat}	Le courant de saturation de la diode
C	La célérité de la lumière (=300 000 km/s).
λ	La longueur d'onde [m].
h	La constante de Planck (= $6,63 \times 10^{-34}$ J.s).
S	surface du panneau photovoltaïque (m²)
N_s	nombre de cellules en série
N_P	nombre de cellules en parallèle
V_{max}	tension correspondante à la puissance maximale
P_m	Puissance maximale
I_{max}	Courant correspondant à la puissance maximale fournie
FF	facteur de forme

I_{ph}	Photo-courant (A)
E_{ph}	L'énergie d'un photon
V_{cos}	la somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série.
V_{cop}	la tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle.
η	Rendement énergétique
DC	courant continu
AC	courant alternatif
KW	Kilowatt.
K°	Kelvin.
C°	Celsius
θ	L'angle du soleil depuis le zénith.
Wc/m²	Watt crête par mètre carré.
P	puissance en watt

V	Volte.
A	Ampère.
Wh	Wattheure
KWh	Kilowattheure
Gh	Gisement horizontal global (pour chaque mois).
Ghm	Gisement horizontal moyenne (de chaque mois).
Ej	Energie journalière,
Ir	Irradiation de site, en Wh/m² ou (J/m²).

Introduction Général

Le marché du photovoltaïque a énormément augmenté au cours de la dernière décennie, en particulier ces dernières années, grâce à une variété de facteurs incitatifs : réduction des coûts de production et politiques de soutien. Ces facteurs de stimulation rendent le retour sur investissement des systèmes photovoltaïques de plus en plus attractif. Comme tous les autres procédés industriels un système photovoltaïque peut être soumis, au cours de son fonctionnement, à différents défauts et anomalies conduisant à une baisse de la performance du système et voire à l'indisponibilité totale du système. Toutes ces conséquences défavorables réduisent clairement la productivité de l'usine et donc les bénéfices de l'usine.

Sans parler des frais de maintenance pour remettre le système en état de marche. Le but de ce mémoire est d'étudier plus avant les défauts et les échecs d'une installation photovoltaïque et trouver des solutions pour maintenir notre installation en appliquant une maintenance.

Dans le premier chapitre nous avons parlé des techniques et méthodes de la maintenance qui englobent diverses approches visant à garantir la fiabilité et la longévité des équipements industriels et les types de la maintenance, en mentionnant aussi les méthodes d'analyses des modes de défaillances et leurs effets et leur criticité afin de trouver des solutions pour améliorer la performance de notre installation PV

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté les différents éléments qui entrent dans la constitution d'un système solaire photovoltaïque tel que la cellule, module et champ PV, avec la mention de la fonction du système photovoltaïque et les avantages et les Inconvénients. Ainsi, on a abordé le système solaire photovoltaïque en général et de manière approfondie les composants photovoltaïques.

Dans le troisième chapitre nous entamons une Présentation des différentes pannes et défauts d'une chaîne photovoltaïque en analysant la dégradation de notre installation PV qui peut être due à plusieurs facteurs, tels que l'exposition prolongée aux intempéries, les variations de température, et l'accumulation de poussière et de saleté sur les panneaux solaires. Et surtout comment appliquer une maintenance afin d'éviter ou bien de réparer les pannes subis et trouver des solutions

Dans le quatrième chapitre on a parlé sur le dimensionnement et la simulation du système PV en faisant une étude technique concernant une Mosquée équipée d'énergie solaire qui se distingue par une consommation moyenne. En utilisant un logiciel de simulation de systèmes photovoltaïques appelé « PVSYST » pour obtenir une estimation adéquate des besoins de consommation journalière de la structure qui est une mosquée

À la fin de ce travail nous terminerons avec une conclusion générale.

Chapitre I :

Technique et méthode de la maintenance

I.1 Introduction :

Le mot Maintenance est apparu dans le vocabulaire industriel dans les années 1950, par contre les concepts de maintenance, tels que nous les connaissons aujourd'hui, remontent en fait à la plus haute antiquité, depuis le développement de l'homme des premières machines. Pour souligner l'importance de la maintenance dans le fonctionnement de l'entreprise, elle est nommée « Fonction maintenance ». Il s'agit même d'une fonction vitale puisque, sans maintenance, tout processus industriel cesse, généralement à court terme, de produire les biens ou les services pour lesquels il a été conçu.

La fonction maintenance a été considérée pendant longtemps comme une activité secondaire à l'intérieur de l'entreprise, qui génère des dépenses non productives. Assimilée souvent à l'entretien qui consistait aux réparations subites et aux dépannages des outils de production. L'Association Française de la Normalisation *AFNOR*, définit la maintenance comme étant « L'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé » AFNOR X-60-010. Dans cette définition, l'aspect économique de la fonction maintenance n'apparaît pas, chose qui a été traitée dans le document d'introduction X 60-000 : « bien maintenir, c'est assurer ces opérations au coût global optimal ». Dans le nouveau contexte industriel, les entreprises sont sujettes de grandes pressions de la part de leurs clients. Ces derniers sont de plus en plus exigeants, demandant des produits et des services de qualité, à moindre coût et dans les délais impartis. Pour cela, les entreprises doivent assurer au coût minimal, la disponibilité et la fiabilité de leurs outils de production, par une bonne gestion de maintenance bien choisie et adaptée. Ce n'est pas une tâche facile. Certes, les concepts de maintenance proposent des façons pour optimiser la performance globale de l'entreprise, mais cela nécessite des ressources humaines compétentes, des moyens matériels adaptés aux équipements à maintenir, des systèmes de gestion de pièces de rechange et d'informations adéquats.

La maintenance, discipline essentielle dans le secteur industriel, vise à assurer la disponibilité, la fiabilité et la longévité des équipements et des infrastructures. Elle regroupe un ensemble de techniques et de stratégies destinées à prévenir les pannes, à réparer les défaillances et à optimiser les performances des systèmes. Dans un environnement où les interruptions peuvent entraîner des coûts considérables et affecter la productivité, une gestion efficace de la maintenance est cruciale pour maintenir la continuité des opérations et garantir la sécurité. Ce chapitre explore les différentes approches de maintenance - préventive, corrective, prédictive et proactive - et leur rôle stratégique dans l'amélioration de la performance opérationnelle. En maîtrisant ces techniques, les entreprises peuvent non seulement minimiser les coûts et les temps d'arrêt imprévus, mais aussi prolonger la durée de vie de leurs équipements, assurant ainsi une compétitivité et une rentabilité accrues.

I.2 Définition de la maintenance :

I.2.1 : Notions sur la maintenance :

Une première définition normative de la maintenance fut donnée par l'AFNOR « L'Association Française de la Normalisation », en 1994 par la norme NF X 60-010 [1], la maintenance se définit comme étant : « ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé ». Il devient plus précis en apportant un complément avec le document X 60-000 « Bien maintenir, c'est assurer les opérations au coût optimal.

La maintenance peut être définie aussi comme l'ensemble des actions entreprises pour maintenir ou rétablir un équipement, un système ou un bien dans un état spécifié ou satisfaisant, afin d'assurer son bon fonctionnement, sa fiabilité et sa durabilité. Elle comprend un large éventail d'activités préventives, prédictives et correctives visant à garantir que les équipements ou les systèmes restent opérationnels et efficaces tout au long de leur cycle de vie. La maintenance peut être réalisée sur divers types de biens, tels que des machines industrielles, des installations électriques, des véhicules, des bâtiments, ». Depuis 2001, elle a été remplacée par une nouvelle définition, désormais européenne (NF EN 13306 X 60-319) : « Ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management effectuées durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise ».[2]

La maintenance peut être définie aussi comme l'ensemble des actions entreprises pour maintenir ou rétablir un équipement, un système ou un bien dans un état spécifié ou satisfaisant, afin d'assurer son bon fonctionnement, sa fiabilité et sa durabilité. Elle comprend un large éventail d'activités préventives, prédictives et correctives visant à garantir que les équipements ou les systèmes restent opérationnels et efficaces tout au long de leur cycle de vie. La maintenance peut être réalisée sur divers types de biens, tels que des machines industrielles, des installations électriques, des véhicules, des bâtiments, des équipements informatiques, etc.

I.2.2 Rôle de la maintenance :

En général, le rôle de la maintenance est de mettre en œuvre le fameux proverbe

« Mieux vaut prévenir que guérir ». Le rôle de la maintenance est crucial dans de

Nombreux secteurs et industries. Voici quelques-uns de ses principaux rôles :

1. Assurer la disponibilité des équipements : En entretenant régulièrement les équipements et les systèmes, la maintenance vise à garantir qu'ils restent opérationnels et disponibles lorsque nécessaire, minimisant ainsi les temps d'arrêt non planifiés et assurant la continuité des opérations.

2. Prévenir les pannes : La maintenance préventive permet d'identifier et de corriger les problèmes potentiels avant qu'ils ne se transforment en pannes majeures. En remplaçant les pièces usées ou en effectuant des ajustements réguliers, on réduit le risque de défaillance des équipements.

3. Optimiser la performance : En maintenant les équipements dans un état optimal, la maintenance contribue à maximiser leur efficacité opérationnelle et leur productivité. Cela peut se traduire par des gains de performance, une meilleure qualité des produits ou services, et une utilisation plus efficace des ressources.

4. Prolonger la durée de vie des équipements : Une maintenance adéquate permet de prolonger la durée de vie des équipements en réduisant l'usure et en prévenant la détérioration prématurée des composants. Cela aide à maximiser le retour sur investissement et à éviter les coûts liés au remplacement prématuré des équipements.

5. Garantir la sécurité : La maintenance joue un rôle crucial dans la préservation de la sécurité des travailleurs, des utilisateurs et de l'environnement. En identifiant et en corrigeant les risques potentiels, elle contribue à prévenir les accidents et les incidents liés aux équipements défaillants.

6. Réduire les coûts : Bien que la maintenance implique des coûts initiaux, elle peut permettre d'éviter des coûts beaucoup plus élevés associés aux pannes non planifiées, aux réparations d'urgence et aux interruptions de production. Elle contribue également à minimiser les coûts liés au remplacement prématuré des équipements.

En bref, la maintenance joue un rôle essentiel dans la préservation de la performance, de la fiabilité et de la sécurité des équipements et des installations, tout en contribuant à optimiser les coûts et à maximiser la valeur à long terme.

I.3 Place de la maintenance dans la structure d'une entreprise :

La position de la maintenance dans la structure générale de l'entreprise influence considérablement l'efficacité de cette fonction. La maintenance pourra, en fonction de sa position dans la structure générale, obtenir une meilleure coopération des autres fonctions, une meilleure assistance technique ou créer davantage d'intérêt de la part de la direction. La place de la maintenance dans la structure générale de l'entreprise (ou dans l'organigramme de l'entreprise), ainsi que son organisation interne, dépendent principalement des paramètres suivants : [3]

- Taille de l'entreprise ;
- La nature de son activité ;
- La technologie et la complexité des équipements,
- Installations et matériels exploités ;

- La qualité et la technologie du produit fabriqué ou du service rendu.
- La politique choisie.

Sachant qu'il existe deux types d'organisation de la maintenance dans l'entreprise :

a- Les avantages de la centralisation de la maintenance :

- Standardisation des méthodes, des procédures et des moyens de communication.
- Possibilité d'investir dans du matériel onéreux grâce au regroupement.
- Vision globale de l'état du parc du matériel à gérer.
- Gestion plus aisée et plus souple des moyens en personnels.
- Rationalisation des moyens matériels et optimisation de leur usage (amortissement plus rapide).
- Diminution des quantités de pièces de rechange disponibles.
- Communication simplifiée avec les autres services

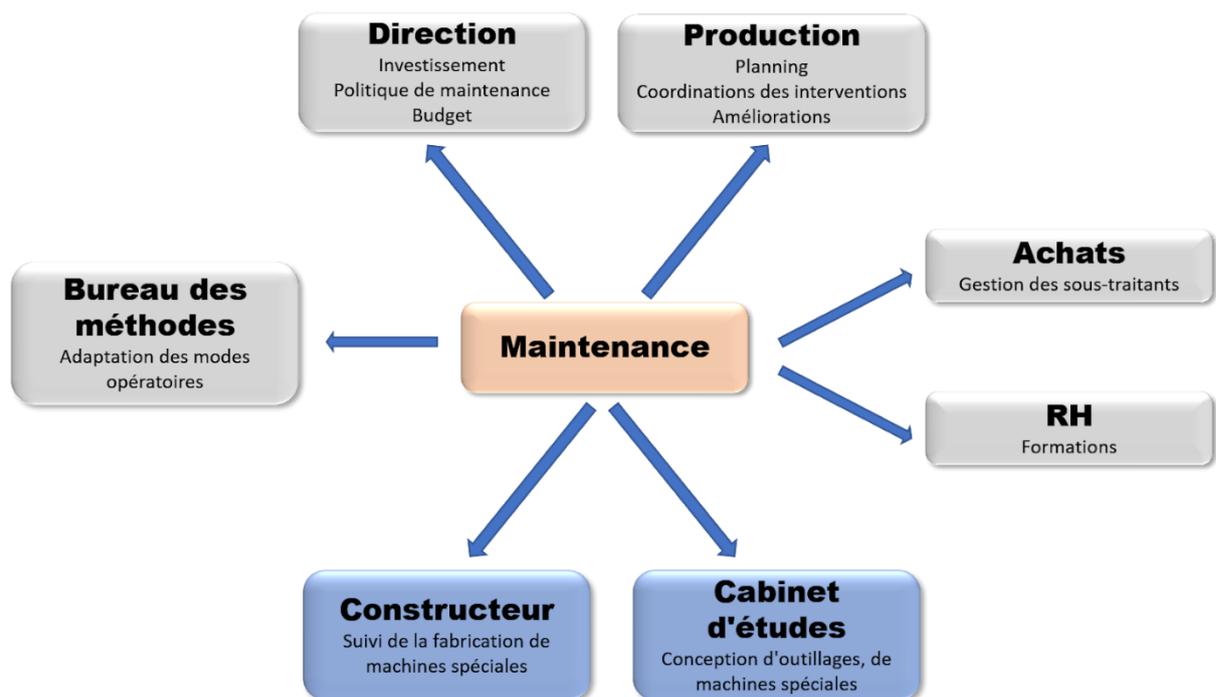


Figure I.1: La place du service de la maintenance dans l'entreprise

b. Les avantages de la décentralisation de la maintenance :

- Meilleures communications et relations avec le service responsable et l'utilisateur du parc à maintenir.
- Effectifs moins importants dans les différentes antennes.
- Réactivité accrue face à un problème.
- Meilleure connaissance du matériel.
- Gestion administrative allégée

I.4 Les objectifs de la maintenance :

I.4.1 Des objectifs opérationnels :

- Assure la disponibilité maximale à un raisonnable coût.
- Eliminer les pannes à tout moment et au meilleur coût.
- Maximiser la durée de vie de bien.
- Remplacer le bien à des périodes prédéterminées.
- Assurer au bien des performances de haute qualité.

I.4.2 Des objectifs de coût :

- Avoir des dépenses de maintenance portant sur le service exigé par l'installation en fonction de leur âge et de leur taux d'utilisation.
- Assurer la maintenance dans les limites d'un budget.
- Minimiser les dépenses de maintenance [3].

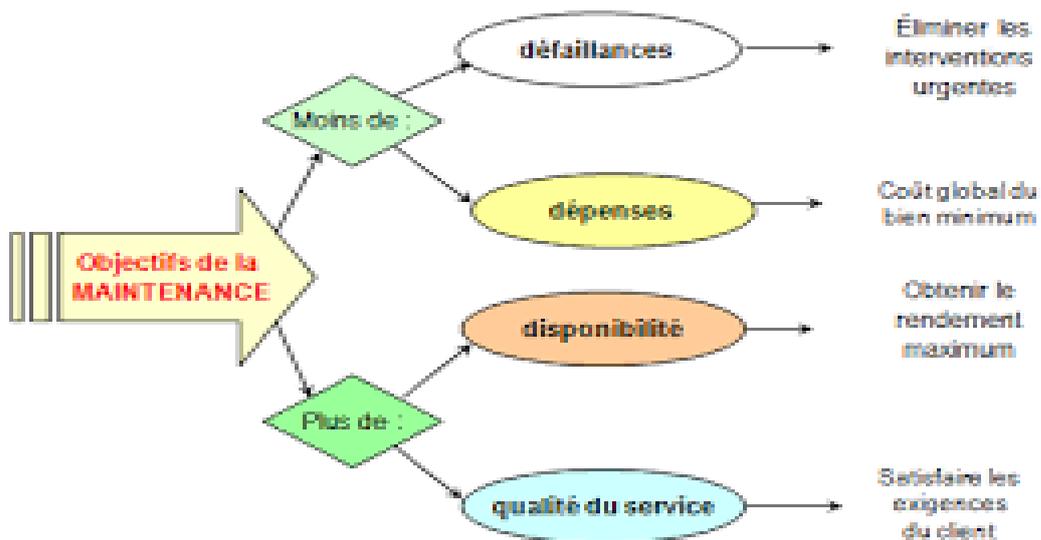


Figure.I.2 : objectifs de la maintenance

I.5 Organigramme de maintenance :

Nous trouvons deux mots-clés dans la définition de la maintenance : maintenir et rétablir. Le mot maintenir fait référence à une action préventive, alors que la deuxième à une action corrective. La Figure ci-dessous décrit les différents types de maintenance :

Les différents types de maintenance

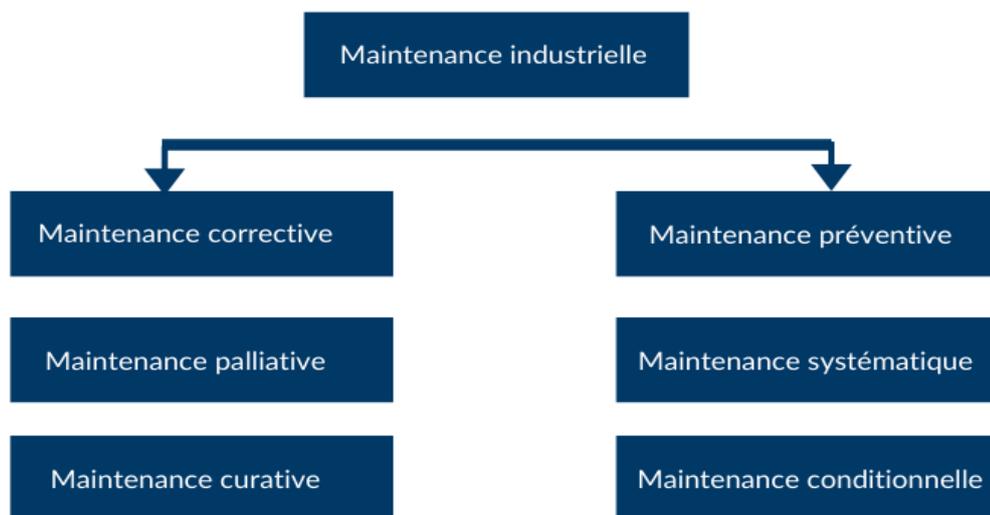


Figure I.3 : Différents types de maintenance

I.6 Maintenance préventive :

La maintenance préventive est de la maintenance faite en amont de la défaillance. Elle permet de vérifier que les machines n'ont pas de risque de défaillance. Elle concerne les composants, les pièces détachées, les équipements et les machines. [4]

I .6.1 But de la maintenance préventive :

- Augmenter la durée de vie des matériels.
- Diminuer la probabilité des défaillances en service.
- Réduire les périodes d'interruption en cas de révision ou de panne..
- Prévenir et aussi prévoir les interventions coûteuses de maintenance corrective.
- Réduire et régulariser la charge de travail
- Faciliter la gestion des stocks (consommations prévues)
- Assurer la sécurité (moins d'improvisations dangereuses)

La mise en œuvre d'une politique de maintenance préventive implique le développement d'un service « méthodes de maintenance » efficace. En effet, on ne peut faire de préventif sans un service méthodes qui va alourdir à court terme les coûts directs de maintenance, mais qui va permettre :

- La gestion de la documentation technique, des dossiers machines, des historiques.
- Les analyses techniques du comportement du matériel.
- La préparation des interventions préventives.
- La concertation avec la production.

I. 6.2 Les différents types de maintenance préventive :

I .6.2.1 Maintenance préventive systématique :

La Maintenance préventive exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du bien. Même si le temps est l'unité la plus répandue, d'autres unités peuvent être retenues telles que : la quantité de produits fabriqués, la longueur de produits fabriqués, la distance parcourue, la masse de produits fabriqués, le nombre de cycles effectués, etc. Cette périodicité d'intervention est déterminée à partir de la mise en service ou après une révision complète ou partielle.

I.6.2.2 Maintenance préventive conditionnelle :

On l'appelle aussi maintenance prédictive (terme non normalisé). La maintenance préventive conditionnelle se caractérise par la mise en évidence des points faibles. Suivant le cas, il est souhaitable de les mettre sous surveillance et, à partir de là, de décider d'une intervention lorsqu'un certain seuil est atteint.

• **Remarque** : la maintenance conditionnelle est donc une maintenance dépendante de l'expérience et faisant intervenir des informations recueillies en temps réel.

Tous les matériels sont concernés. Cette maintenance préventive conditionnelle se fait par des mesures pertinentes sur le matériel en fonctionnement. Les paramètres mesurés peuvent porter sur :

- Le niveau et la qualité de l'huile
- Les températures et les pressions
- La tension et l'intensité des matériels électriques
- Les vibrations et les jeux mécaniques

I.6.2.3 Maintenance préventive prévisionnelle :

La maintenance prévisionnelle est une maintenance conditionnelle basée sur l'anticipation du franchissement d'un seuil prédéfini qui permet de donner l'état de dégradation du bien avant sa détérioration complète.

I.6.3 Buts de la maintenance préventive :

- Améliorer les conditions de travail du personnel de production.
- Diminuer le budget de maintenance.
- Supprimer les causes d'accidents graves et Augmenter la durée de vie des matériels.
- Diminuer la probabilité des défaillances en service et Diminuer les temps d'arrêt en cas de révision ou de panne.
- Prévenir et aussi prévoir les interventions coûteuses de maintenance corrective.

I.7 Maintenance corrective :

La maintenance corrective est l'élimination d'une avarie ou d'une altération dans le fonctionnement d'un élément matériel par sa réparation, sa restauration à l'état antérieur ou son remplacement Et aussi l'Ensemble des activités réalisées après la défaillance d'un bien, ou la dégradation de sa fonction pour lui permettre d'accomplir une fonction requise [5]

I.7.1 Les différents types de maintenance corrective :

I.7.1.1 Maintenance curative :

Qu'est-ce que la maintenance curative ?

Appelé couramment dépannage, cette maintenance palliative est principalement constituée d'actions à caractère provisoire qui devront être suivies d'actions curatives. Contrairement à la maintenance corrective palliative, qui, pour rappel, consiste à réparer un équipement provisoirement, la maintenance curative s'applique lorsqu'une machine ou une installation est en panne et ne peut être réparée.

I.7.1.2 Maintenance palliative :

La maintenance corrective palliative consiste à réparer un équipement provisoirement, Contrairement à la maintenance curative qui s'applique lorsqu'une machine ou une installation est en panne et ne peut être réparée. Dans ce cas il faut changer le matériel partiellement ou dans son intégralité.

I.7.2 Buts de la maintenance corrective :

La maintenance corrective palliative intervient lorsqu'un problème important ou bloquant, a été identifié. Ici, l'objectif est de réparer provisoirement le défaut afin de rétablir l'utilisation du matériel avant une maintenance corrective ou une maintenance préventive

I.7.3 La maintenance corrective débouche sur 2 types d'interventions :

I.7.3.1 Le dépannage :

Le dépannage a un caractère provisoire parfois sans interruption du fonctionnement de l'ensemble concerné. Les dépannages caractérisent la maintenance palliative. Le palliatif est caractéristique du 2^{ème} niveau de maintenance.

I.7.3.2 La réparation :

Faite en atelier de maintenance, parfois après dépannage. Elle a un caractère définitif. La réparation caractérise la maintenance curative. Le curatif est caractéristique des 2^{èmes} et 3^{ème} niveaux de maintenance.

I.8 Maintenance d'amélioration :

Cette action de maintenance est un état nécessitant un ensemble des mesures techniques, administrative, aussi un pouvoir d'observation critique et une attitude créative. Un projet d'amélioration passe obligatoirement par une étude économique rentable, tout le matériel est concerné sauf le matériel proche de la réforme ou les objective sont :

- Augmentation des performances de production

- Augmentation de la fiabilité
- Augmentation de la sécurité des utilisations C'est de donner au matériel une vie utile plus longue dont on fait le remplacement d'équipement, accessoire ou logiciels.

I.9 La différence entre la maintenance corrective et la maintenance préventive :

En bref, les maintenances corrective et curative résolvent les problèmes tandis que la maintenance préventive les évite en premier lieu. C'est la différence majeure entre ces types de maintenance.

I.10 Les Cinq niveaux de maintenance :

La norme AFNOR X 60011, présente 5 niveaux de maintenance selon la complexité du travail à réaliser, la compétence des ressources humaines et les moyens matériels nécessaires à la réalisation du travail [6]

Premier niveau :

La maintenance de 1er niveau correspond aux interventions simples, nécessaires et réalisées sur des éléments facilement accessibles. Il s'agit donc d'opérations qui ne nécessitent pas un démontage ou l'ouverture de l'équipement, et qui peuvent être effectuées par l'exploitant lui-même ou par un opérateur non spécialisé.

Donc ça consiste aux réglages simples prévus par le constructeur au moyen d'éléments accessibles sans aucun démontage ou ouverture de l'équipement, ou échanges d'éléments consommables accessibles en toute sécurité, tels que voyants ou certains fusibles, etc....Ce type d'intervention peut être effectué par l'exploitant du bien, sur place, sans outillage et à l'aide des instructions d'utilisation. Le stock des pièces consommables nécessaires est très faible.

Deuxième niveau :

La maintenance de 2ème niveau correspond aux interventions peu complexes, dont les procédures sont simples à suivre. De plus, le remplacement de pièces lors de ces opérations ne nécessite pas le démontage global de l'équipement concerné. Ces interventions doivent être effectuées par un technicien qualifié ayant suivi une formation sur la sécurité et les risques. On les confie donc généralement à un technicien de qualification moyenne.

Donc c'est le Dépannage par échange standard des éléments prévus à cet effet et opérations mineures de maintenance préventive, telles que graissage ou contrôle de bon fonctionnement. Ce type d'intervention peut être effectué par un technicien habilité de qualification moyenne, sur place, avec l'outillage portable défini par les instructions de maintenance, et à l'aide de ces mêmes instructions. On peut se procurer les pièces de rechange transportables nécessaires sans délai et à proximité immédiate du lieu d'exploitation.

Troisième Niveau :

Le niveau 3 de maintenance correspond à des interventions considérées comme complexes. Elles doivent donc être précédées d'un diagnostic et d'une identification. Elles peuvent être réalisées sur place ou dans un atelier de maintenance, et doivent prendre en compte l'équipement dans sa globalité, car la modification d'un élément peut avoir des conséquences sur son fonctionnement général. Les interventions de maintenance de niveau 3 doivent être effectuées par des techniciens spécialisés au moyen de l'outillage indiqué dans les instructions de maintenance de la machine.

Donc c'est l'Identification et diagnostic des pannes, réparations par échange de composants ou d'éléments fonctionnels, réparations mécaniques mineures et toutes opérations courantes de maintenance préventive telles que réglage général ou réaligement des appareils de mesure. Ce type d'intervention peut être effectué par un technicien spécialisé, sur place ou dans le local de maintenance, à l'aide de l'outillage prévu dans les instructions de maintenance ainsi que des appareils de mesure et de réglage, et éventuellement des bancs d'essais et de contrôle des équipements et en utilisant l'ensemble de la documentation nécessaire à la maintenance du bien ainsi que les pièces approvisionnées par le magasin.

Quatrième Niveau :

Les interventions de maintenance de niveau 4 sont des opérations complexes et de grande importance, qui nécessitent une expertise technique particulière. Elles doivent donc être réalisées par un technicien ou une équipe de techniciens spécialisés disposant d'une qualification spécifique, et supervisés par un responsable spécialisé lui aussi. Ces interventions sont effectuées dans des ateliers fournissant un outillage, une documentation et des bancs de mesure adaptés.

En général c'est Tous les travaux importants de maintenance corrective ou préventive à l'exception de la rénovation et de la reconstruction. Ce niveau comprend aussi le réglage des appareils de mesure utilisés pour la maintenance, et éventuellement la vérification des étalons du travail par les organismes spécialisés. Ce type d'intervention peut être effectué par une équipe comprenant un encadrement technique très spécialisé, dans un atelier spécialisé.

Cinquième Niveau :

La maintenance de niveau 5 regroupe des actions complexes réalisées par le constructeur de l'équipement ou par une société agréée par celui-ci. Les actions à réaliser sont semblables à des actions de fabrication. On peut citer comme exemples d'interventions de maintenance de niveau 5 la reconstruction ou la réparation d'un équipement ou la mise en conformité d'un équipement selon une nouvelle réglementation.

Ça sert à la Rénovation, reconstruction ou exécution des réparations importantes confiées à un atelier central ou à une unité extérieure. Par définition, ce type de travaux est donc

effectué par le constructeur, ou par le reconstruteur, avec des moyens définis par le constructeur et donc proches de la fabrication.

Voici le tableau actualisé incluant les moyens logistiques associés à chaque niveau de maintenance

Tableau I.1 : les Cinq Niveaux de maintenance

Niveau de maintenance	Actions	Intervenants	Moyens
1	Travaux simples (Réglages, contrôle)	Exploitant sur place	Outillage léger définis dans les consignes de conduites
2	Travaux courants (réparations et échanges standards simples)	Personnel habilité	Outillages standard et rechanges situées à proximité
3	Diagnostic, réparations et remplacements	Technicien qualifié	Outillage prédéfinis et appareils de mesure
4	Travaux importants de maintenance préventive ou corrective	Technicien ou équipe spécialisée	Outillage général et spécialisé
5	Travaux de rénovation et reconstruction	Constructeur du matériel ou société spécialisée	Moyens importants, proches de ceux du constructeur

I.11 Les méthodes d'analyse de défaillances :

De nombreuses méthodes ont été développées pour identifier et diagnostiquer la (ou les multiples) causes, racine(s), et prendre des mesures correctives. Cependant, l'un des aspects les plus difficiles de l'établissement d'une taxonomie des méthodes de recherche des causes est de déterminer comment ces causes sont perçues. Méthode d'analyse appropriée pour arriver à un plan d'action. L'influence négative d'une l'occurrence d'une insuffisance dans la perfection production arrêt d'exploitation, image de marque et sécurité des personnes impose aux entreprises et aux personnes chargées de la maintenance a l'utilisation de cette méthodologie afin d'arriver à déterminer les natures de défaillances (technique, humaine, organisationnelle, environnementales, etc...) En effet de nombreuses variante de méthodes d'analyse ont vu le jour suite au développement des méthodes de contrôle de qualité réalisées, ce qu'il présente l'objectif finale de ces outils comme : PDCA – QQQQCCP - PARETO - DIAGRAMME ISHIKAWA - LES CINQ POURQUOI – AMDEC ...etc. [7]

I.12 Analyse des modes de défaillances et leurs effets et leur criticité (AMDEC) :

I.12.1 Origine AMDEC :

Créée en 1966 aux États Unis par la société Mc DONNEL DOUGLASS, le processus AMDEC consistait à dresser la liste des composants d'un produit et à cumuler les informations sur les modes de défaillance, leur fréquence, et leurs conséquences.

La méthode a été mise au point par la NASA et le secteur de l'armement pour évaluer l'efficacité de leur système.

La méthode a fait ses preuves dans le secteur industriel, secteur dans lequel la fiabilité et la sécurité du produit, ou des procédés ou des processus sont de rigueur.

Ainsi, on retrouvait cette méthode dans le secteur spatiale, armement, mécanique, et bien d'autre.

En effet c'est L'analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC) a pour but de vous aider à mener une analyse poussée de vos interventions de maintenance et de votre parc machine. L'AMDEC vous permet de gérer votre maintenance industrielle puisque cet outil de sûreté de fonctionnement est aussi très utilisé dans le cadre de démarches qualité.



Figure. I.4 : intérêts de l'étude des défaillances (AMDEC)

I.12.2 Définition :

Est un outil de sûreté de fonctionnement (SDF) et de gestion de la qualité. AMDEC est la traduction de l'anglais FMECA (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis, litt. « Analyse des modes, des effets et de la criticité des défaillances »), désignation d'une méthode élaborée par l'armée américaine dans les années 1940. L'AMDEC se distingue de l'AMDE (Analyse des modes de défaillance et de leurs effets, traduction de l'anglais FMEA ou Failure Modes and Effects Analysis) par une quantification portée par la notion de criticité C. La criticité d'un mode de défaillance se détermine généralement par le produit (indice de fréquence) \times (indice de gravité) \times (indice de détection). Ces indices sont définis par le client, l'entreprise qui fixe également un seuil d'acceptabilité, au-dessus duquel toute criticité doit être réduite, par un moyen à définir (reprise de conception, plan de maintenance, action de surveillance, ...). Par exemple, imaginons une machine équipée de pneumatiques, pour diminuer la criticité d'une crevaison jugée inacceptable, on pourrait décider de reprendre la conception et minimiser l'indice de fréquence, en améliorant la structure du pneu, voire en utilisant un pneu increvable, l'indice de gravité, en utilisant des roues jumelées, l'indice de détection, en équipant le poste de conduite de témoins de pression pneumatique.

De telles analyses peuvent être adaptées à toute interrogation dans tout domaine. Elles peuvent servir de base, entre autres, aux analyses fiabilité, maintenabilité, disponibilité, qualité et testabilité. Le but est de hiérarchiser les actions d'amélioration à conduire sur un processus, un produit, un système en travaillant par ordre de criticité décroissante. L'AMDEC peut s'appliquer à tous les systèmes risquant de ne pas tenir les objectifs de fiabilité, maintenabilité, qualité du produit fabriqué et/ou de sécurité.

On différencie plusieurs types d'AMDEC :

- **L'AMDEC produit** : Elle sert à assurer la fiabilité d'un produit en améliorant sa conception.
- **L'AMDEC processus** : Assure la qualité d'un produit en améliorant les opérations de production de celui-ci.
- **L'AMDEC moyen de production** : Elle assure la disponibilité et la sécurité d'un moyen de production en améliorant sa maintenance. Pour réaliser une AMDEC, il faut bien connaître le fonctionnement du système, du processus ou du produit analysé ou, à défaut, avoir les moyens de se procurer l'information auprès de ceux qui la détiennent.

La méthode AMDEC se déploie en 4 étapes :

- La préparation.
- La décomposition fonctionnelle.
- La phase d'analyse.
- La mise en place et le suivi des plans d'actions.

I.12.3 But de la méthode AMDEC :

L'AMDEC vise à satisfaire le client par la prévention des défaillances à tous les niveaux de la conception contribuant ainsi à l'amélioration de la qualité et de la fiabilité du sujet abordé.

Pour l'utiliser au mieux, il vous suffit de suivre ces quelques étapes :

- déterminer le mode de défaillance ainsi que la cause ;
- mesurer les effets sur le système, la fonction touchée ainsi que le dommage induit ;
- identifier les critères suivants :
 - N : Nombre de pannes
 - F : Fréquence
 - G : Gravité
 - E : Évidence
- calculer la criticité d'après la formule suivante : Fréquence * Gravité * Évidence.

La forme de l'AMDEC peut être multiple (fonctionnelle, produit, processus, moyen de production, flux) et avoir chaque fois des effets différents, mais qui permettront toujours d'obtenir un document de travail incontournable pour savoir quelles actions entreprendre, quelles interventions réaliser, etc.

En définitive, cette méthode permet d'augmenter la production en limitant les problèmes de défaillance, d'analyser les défauts de production, de constamment chercher à s'améliorer...

Elle consiste à :

- Identifier les causes et les effets de l'échec potentiel d'un procédé ou d'un moyen de production
- Identifier les actions pouvant éliminer (ou du moins réduire) l'échec potentiel

Elle consiste à imaginer les dysfonctionnements menant à l'échec avant même que ceux-ci ne se produisent.

C'est donc essentiellement une méthode prédictive

I.12.4 L'analyse AMDEC et la définition des actions :

A partir de chaque fonction du produit ou du moyen de production ou phase du processus identifiée, pour chaque défaillance possible, le groupe de travail doit noter sa criticité selon

des critères à définir ensemble, basés la plupart du temps sur une cotation préalablement définie. Exemple de critères (pour une AMDEC Moyen de production) :

I.12.4.1 Gravité des effets de la défaillance (G) :

Tableau I.2 : Gravité des effets de défaillance

Niveau	Valeur	Définition
Mineure	1	Influence légère sur le traitement en cours, légère perturbation technique
Moyenne	2	Influence moyenne à importante sur le traitement en cours, détérioration technique grave.
Majeure	3	Nécessité d'un traitement spécifique important, détérioration technique grave.
Importante	4	Risque vital, altération de l'état général, catastrophe technique.

I.12.4.2 Fréquence d'apparition de la défaillance (F) :

Tableau I.3 : Fréquence d'apparition de la défaillance

Niveau	Valeur	Définition
Exceptionnel	1	Pas de mémoire de participant
Rare	2	Cela est déjà arrivé 1 ou 2 fois
Fréquent	3	Cela est déjà arrivé plusieurs fois
Certain	4	Cela arrivera à coup sûr

I.12.4.3 La capacité de détection de la défaillance (D) :*Tableau I.4 : capacité de détection de défaillance :*

Niveau	Valeur	Définition
Evident	1	Détection certaine
Possible	2	Délectable par l'opérateur
improbable	3	Difficilement détectables
Impossible	4	Indétectable

La combinaison (multiplication) de ces critères permet ensuite d'obtenir actuellement un niveau de criticité (C) et selon ce niveau on décide des actions (et des délais) à entreprendre :

Tableau I.5 : niveau de criticité (C)

Valeur	Définition
$1 < C < 8$	Négligeable : on les laisse de côté
$8 < C < 14$	Moyenne : on se pose les questions de les laisser ou conserver
$14 < C < 27$	Élevée : il faut trouver des actions à mettre en œuvre et regarder l'importance de mettre en stock les composants ou organes
$27 < C < 64$	Interdit : il faut trouver des actions à mettre en œuvre et mettre obligatoirement en stock les composants ou organes

En donnée de sortie de l'analyse, le groupe de travail dispose d'un plan d'actions priorisées en fonction de la criticité de chaque mode de défaillance. Le suivi du plan d'actions est ensuite soumis aux règles habituelles (QUI, QUOI, QUAND, Mesure de l'efficacité des actions [8])

I.13 Méthode de Pareto « ABC » OU « 20/80 » :

L'analyse Pareto, autrement appelée méthode des 20-80, permet d'analyser les pannes les plus importantes, aussi bien en termes de fréquence d'intervention que de temps passé. Elle permet d'affirmer que 20 % (voire moins) des causes sont responsables de 80 % des problèmes rencontrés dans une usine, et donc d'analyser toutes les problématiques pour trouver une réponse adaptée. Pour utiliser cette méthode et avoir un aperçu général de la situation, vous devez au préalable vous munir de vos historiques de défaillance. La GMAO nouvelle génération Mobility Work vous permet, grâce à son module d'analytique, de ressortir automatiquement toutes vos données afin de les exploiter.

I.13.1 Définition :

Parmi l'affluence des soucis auxquels fait face un manager incessant, il doit décider quelles défaillances doivent être étudiées et/ou améliorées en priorité. Pour cela, il faut identifier ceux qui sont les plus énormes et dont la résolution ou la mise à niveau serait la plus rentable, en particulier en termes de coûts d'immobilisation. La difficulté réside dans le fait que ce qui « est énorme » et ce qui « est moins » ne se distinguent pas toujours clairement. La méthode ABC apporte une réponse. Il permet un sondage qui met en évidence les éléments les plus importants d'un problème afin de faciliter les choix et les priorités. Nous classons les événements (pannes par exemple) par ordre décroissant de coûts (immobilisation, coût financier, nombre, etc.), chaque événement relatif à une entité. Un graphique est alors établi faisant correspondre les pourcentages de coûts additionnels aux pourcentages d'hommes d'échecs ou d'échecs cumulés. Nous observer trois domaines.

- Zone A : 20% des pannes occasionnent 80% des coûts.
- Zone B : Les 30% de pannes supplémentaires ne coûtent que 15% supplémentaires.
- Zone C : Les 50% de pannes restantes ne concernent que 5% du coût global.

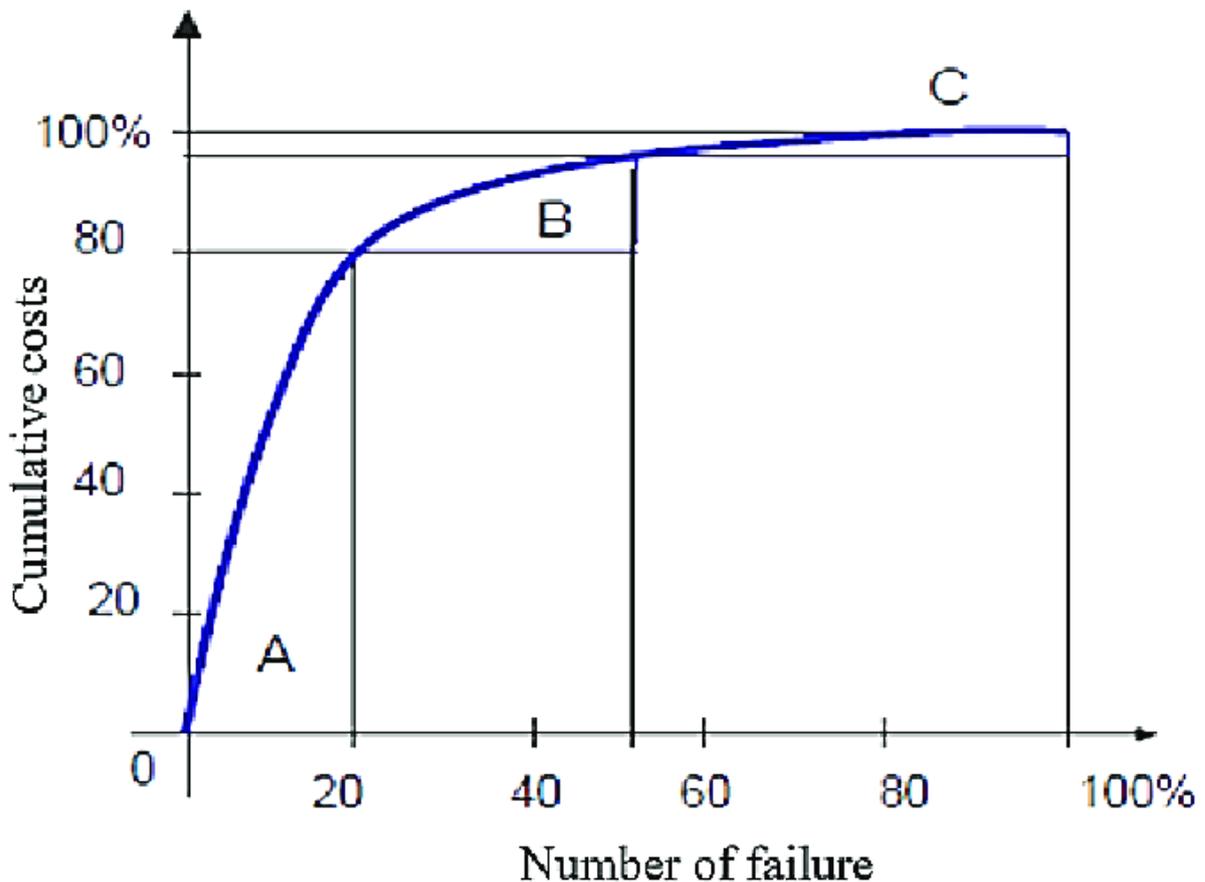


Figure I.5 : diagramme d'analyse de la méthode ABC

Conclusion : il est clair que la préparation des travaux de maintenance doit être entreprise à propos de la panne de la zone A. [9]

I.13.2 Fonction :

Suggérer objectivement un choix, c'est-à-dire par ordre d'importance des Éléments (produits, machines, pièces, etc.) de la base de connaissances de la période précédente (par exemple, historique des pannes). Les résultats sont affichés dans La forme d'une courbe appelée courbe ABC, qui peut être utilisée pour détecter Le problème à résoudre et l'élément le plus important pour prendre une décision permettre sa résolution

I.13.3 But de la méthode ABC :

L'analyse ABC est une analyse qui permet de :

- Déterminer la proportion ou l'importance de chaque élément à l'étude Tous les éléments. •
- Trier et classer les éléments en conséquence.
- Tirer les enseignements de cette proportionnalité.

- Utilisez l'indice de concentration de Gini pour vérifier la concentration.
- Déterminer l'importance relative des causes ou d'autres critères.
- Classez-les par ordre d'importance.
- Identifier les axes prioritaires.

I.13.4 Objectifs de la méthode ABC :

La méthode ABC vise à optimiser la gestion des stocks en classant les articles en trois catégories (A, B, C) selon leur valeur et leur importance. Elle permet de concentrer les ressources de gestion sur les articles les plus précieux (catégorie A), tout en simplifiant la gestion des articles moins critiques (catégories B et C).

L'objectif de la méthode ABC est d'identifier les facteurs de coûts réels et les économies potentielles et d'améliorer la rentabilité des produits et des clients.

En bref, La méthode ABC vise à optimiser la gestion des stocks en catégorisant les articles selon leur importance relative et en adaptant les stratégies de gestion en conséquence. En se concentrant sur les articles les plus critiques (catégorie A) et en allouant des ressources de manière appropriée aux catégories B et C, les entreprises peuvent améliorer l'efficacité opérationnelle, réduire les coûts et améliorer la prise de décision stratégique.

I .13.5 Caractéristiques :

- Les activités sont définies comme un ensemble de tâches de base.
- Le premier principe est de lister toutes les activités génératrices en premier, puis évaluez le coût correspondant pour chacun d'elles le cout correspondant.
- L'inducteur est l'unité de mesure pour l'activité.
- Un processus est un ensemble d'activités nécessaires pour livrer un produit ou livrer un produit. Un service.
 - L'approche ABC se concentre principalement sur le coût des activités, Le coût de fabrication et de vente du produit
- Par conséquent, le coût de toute activité peut être composé de coûts liés aux activités. Les tâches suivantes :

Commande + Fabrication + Facturation + Expédition + Maintenance

I.14 Conclusion :

La maintenance ne se limite pas simplement à la détection des dysfonctionnements et à leur correction. Elle englobe un processus beaucoup plus large qui vise à garantir le bon fonctionnement et la durabilité des équipements industriels. Au-delà de simplement mesurer et redémarrer un matériel défaillant, la maintenance consiste à maîtriser chaque composant de ce matériel au point de pouvoir anticiper et planifier son entretien de manière proactive. C'est ce qui fait que dans le secteur photovoltaïque, les techniques et méthodes de la maintenance revêtent une importance cruciale pour assurer le bon fonctionnement et la durabilité des installations solaires. En conclusion, il est évident que l'adoption de pratiques de maintenance efficaces permet non seulement de maximiser le rendement énergétique des systèmes PV, mais aussi de prolonger leur durée de vie et de garantir un retour sur investissement optimal pour les propriétaires et les exploitants. En intégrant des technologies de surveillance avancées, des stratégies de maintenance préventive et prédictive, ainsi que des programmes de formation continue pour les techniciens, le secteur PV peut continuer à évoluer vers une plus grande fiabilité et une performance accrue. En outre, une approche proactive en matière de maintenance peut contribuer à réduire les coûts opérationnels, à minimiser les temps d'arrêt et à renforcer la résilience des installations solaires face aux conditions environnementales variables. En somme, investir dans des pratiques de maintenance de qualité est essentiel pour soutenir la croissance durable et l'efficacité opérationnelle du secteur photovoltaïque à long terme.

Chapitre II :

Le système solaire PV

II.1 Introduction :

Le système solaire photovoltaïque est une technologie innovante : il transforme l'énergie solaire en électricité propre et renouvelable. En raison de l'augmentation des prix des énergies traditionnelles d'une part, et de la limitation de leurs ressources d'autre part, l'énergie solaire photovoltaïque devient de plus en plus une option énergétique prometteuse. Elle présente des avantages tels que sa disponibilité, son absence de pollution et sa disponibilité en plus ou moins grandes quantités à n'importe quel endroit du monde.

À l'heure actuelle, l'intérêt pour les installations solaires est de retour, en particulier pour les applications sur des sites isolés. La transformation photovoltaïque représente l'un des moyens les plus captivants d'exploiter l'énergie solaire. Grâce à un matériel fiable et d'une durée de vie assez longue, elle permet d'obtenir de l'électricité de manière directe et autonome, ce qui permet une maintenance réduite.

L'objectif d'un système solaire photovoltaïque (PV) est de transformer directement l'énergie solaire par effet photovoltaïque afin de répondre aux besoins en énergie électrique de l'utilisateur. Le recours à l'énergie solaire photovoltaïque permet d'obtenir une énergie inépuisable, mais surtout une énergie propre et non polluante, ce qui représente un avantage indéniable. Le problème quotidien des populations des régions rurales et sahariennes, que ce soit dans les mosquées ou dans les usines, demeure l'utilisation de l'énergie solaire pour l'alimentation en électricité.

Tant que le soleil brille encore, l'énergie solaire photovoltaïque offre une opportunité de développement efficace et durable. C'est pourquoi les études scientifiques se développent dans le but de généraliser, d'améliorer et d'optimiser l'utilisation des systèmes solaires. Les critères de dimensionnement et de maximisation de la puissance générée sont essentiels pour optimiser les systèmes solaires afin d'obtenir un rendement optimal.

Étant donné que l'objectif principal de toutes les études est d'améliorer les performances globales des systèmes de conversion photovoltaïque (PV), l'alimentation d'une charge photovoltaïque, peu importe sa nature, ne signifie pas nécessairement une rentabilité négative du système global. Cependant, l'équivalence entre le rendement admissible et le coût moyen d'exploitation détermine le degré d'efficacité de l'utilisation de l'énergie solaire.

De nos jours, grâce à sa fiabilité et à son concept écologique, le photovoltaïque occupe une position prépondérante.

II .2 Historique :

Une brève note sur l'étymologie du photovoltaïque. C'est l'abréviation de PV et est formé de deux mots : « Photo », un mot grec signifiant lumière, et « Volta » — le nom d'un physicien italien nommé Alessandro Volta qui a inventé la batterie électrochimique en 1800[1].

- Quelques dates :

- **1839** : Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque.

- **1883** : La première cellule en silicium et en or est construite par Charles Fritts. Son taux de rendement est d'environ 1%.

- **1905** : Albert Einstein émet un article sur une perspective heuristique sur la production et la métamorphose de la lueur. Le prix Nobel de physique lui sera décerné pour cet article en 1922.

- **1918** : Jan Czochralski, un scientifique polonais, invente une méthode pour produire du silicium monocristallin.

- **1954** : Une cellule photovoltaïque en silicium est développée par les chercheurs américains Gerald Pearson, Darryl Chapin et Calvin Fuller pour les laboratoires Bell.

- **1955** : Des scientifiques américains (Chapin, Fuller, Pearson et Prince) collaborent avec le développement d'une cellule photovoltaïque à haut rendement de 6 % est en cours dans les laboratoires Bell Telephone (aujourd'hui Alcatel-Lucent Bell Labs).

- 1958** : Développement d'une batterie avec un rendement de 9 %. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires ont été lancés dans l'espace.

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université du Delaware.

1983 : Le premier véhicule à énergie photovoltaïque parcourt 4 000 kilomètres en Australie.

- **2003** : George W. Bush met en place un système photovoltaïque de 9 kW ainsi qu'un système solaire thermique pour la Maison Blanche [2]

- **2012** : Des scientifiques de l'Université de technologie de Chine méridionale parviennent à obtenir un taux de rendement de 9,31 % sur une cellule organique. [3]

- **2018** : Des chercheurs de l'école polytechnique fédérale de Lausanne et du centre suisse d'électronique et de microtechnique réalisent une conversion de 25,2 % en utilisant des cellules tandem en silicium et en matériau de type pérovskite. [4]

À l'heure actuelle, l'énergie solaire peut être obtenue dans les quartiers commerciaux et résidentiels, et les panneaux solaires ont un rendement plus élevé [5].

II .3 L'énergie solaire :

II .3.1 Le Soleil :

Le soleil est une étoile naine jaune du système solaire. Il équivaut à une énorme boule de gaz très chaud. Il est composé de 80 % d'hydrogène et de 19 % d'hélium. Les 1 % restants sont un mélange de plus de 100 éléments chimiques. Sa lumière met environ 8 minutes pour nous parvenir.

Sur le plan humain, le Soleil est vital car il est à l'origine de la vie sur Terre et assure sa continuité en fournissant d'énormes quantités d'énergie.

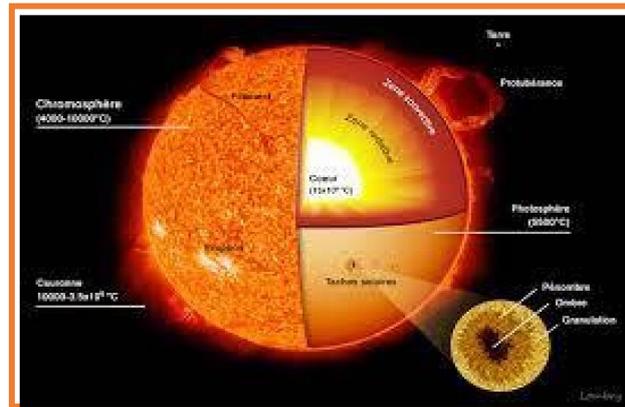


Figure II.1 : Structure du Soleil.

II .3.2 Rayonnement Solaire :

Le rayonnement solaire désigne l'énergie produite par la fusion de l'hydrogène au soleil. Cette énergie n'est pas constante et ne parvient pas à atteindre la surface de la Terre tout au long de la journée.

La longueur d'onde de ces rayons qui atteignent la surface de la Terre est principalement :

- Les rayons UV représentent environ 56 %.
- Éclairage visible - près de 39%
- L'infrarouge (IR) représente environ 5%.

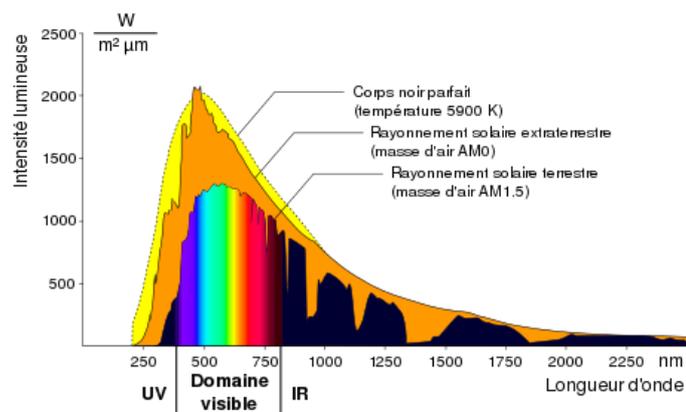


Figure. II.2: Analyse spectrale du rayonnement solaire [6].

L'intensité du rayonnement solaire reçu au sol dépend de l'angle d'inclinaison.

❖ **Le rayonnement direct :**

Les rayons solaires arrivent au sol sans être altérés (sans être diffusés par l'atmosphère). Les rayons sont parallèles les uns aux autres.

❖ **Le rayonnement diffus :**

Le rayonnement solaire traverse l'atmosphère et fait face à des obstacles tels que les nuages, la poussière, etc. En raison de ces obstacles, un faisceau parallèle est réparti en une multitude de faisceaux dans toutes les directions.

❖ **Le rayonnement réfléchi :**

C'est le résultat de la réflexion des rayons lumineux sur une surface réfléchissante par exemple : la neige ; cette réflexion dépend de l'albédo (pouvoir réfléchissant) de la surface concernée. Le rayonnement global est tout simplement la somme de ces diverses contributions comme le montre la figure suivante [7].

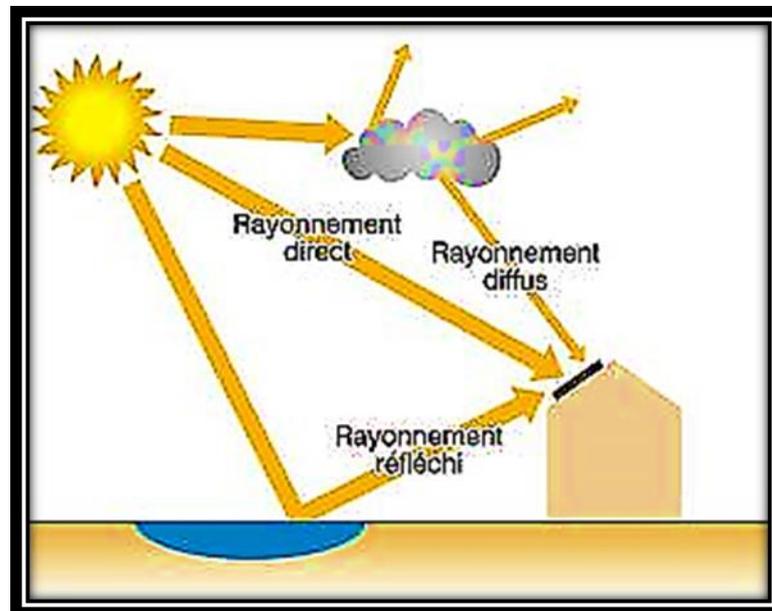


Figure. II.3 : Le rayonnement solaire.

La mise en place de la notion de masse d'air (MA) est nécessaire pour calibrer et comparer les performances des cellules photo-voltaiques développées dans différents laboratoires à travers le monde. Il mesure la quantité d'énergie absorbée par l'atmosphère en fonction de l'angle θ que font les rayons solaires avec le zénith.

$$AM = \frac{1}{\sin(\theta)} \quad (\text{II.1})$$

AM1 est obtenu lorsque le soleil est à son zénith soit $AM = 1 / \sin(90^\circ) = 1$ et on note AM1. 30 degrés au-dessus de l'horizon nous donneront $AM2 = 1 / \sin(30^\circ)$ pour AM2.

AM0 désigne les conditions de rayonnement solaire dans l'espace en dehors de l'atmosphère ; cette désignation utilisée, par exemple, dans la caractérisation des cellules solaires comme sources d'énergie des satellites.

- Les conditions AM1.5, encore appelées conditions de tests standards, caractérisent un spectre de référence d'une puissance de 1000 W/m^2 [8].

Dans un laboratoire appelé simulateur solaire, des sources artificielles sont utilisées pour simuler le spectre AM1.5. Ces simulateurs sont constitués de différents types de lampes, telles que des lampes au xénon ou halogènes, utilisées pour simuler le spectre AM1.5.

La figure " II.4" montre le spectre du rayonnement solaire reçu dans différentes conditions de MA.

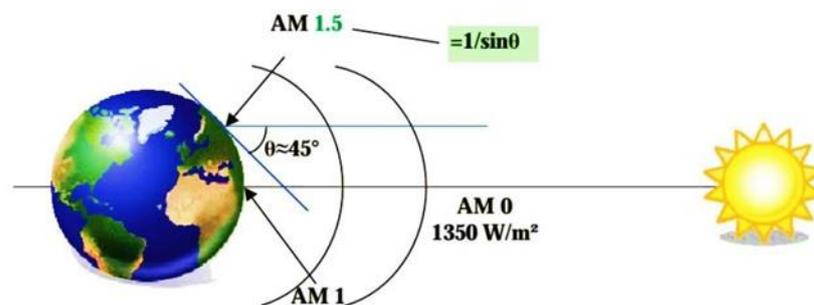


Figure. II.4 : Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil [8].

II .3.3 Absorption de la lumière :

La lumière est constituée de photons, qui sont des particules liées aux ondes électromagnétiques qui possèdent une certaine quantité d'énergie en fonction de leur longueur d'onde. L'absorption est le phénomène par lequel l'énergie d'un photon est captée par un matériau et convertie en une autre forme d'énergie.

- Transfert d'énergie du photon à la charge :

Les photons absorbés transfèrent leur énergie aux électrons périphériques (les plus éloignés du noyau), leur permettant d'échapper à l'attraction du noyau.

Ils sont ensuite « attirés » vers l'extérieur pour créer un courant électrique. L'électron libéré laisse un « trou » derrière lui, créant une charge positive. Lorsque cet électron est attiré vers l'extérieur, les électrons des atomes voisins rempliront le trou, laissant à nouveau un trou lui-même rempli par les électrons voisins, et ainsi de suite.

On crée donc un cycle de charges élémentaires, des électrons dans un sens et des trous dans l'autre, créant un courant électrique

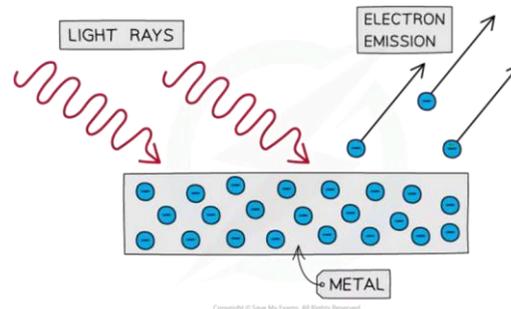


Figure. II.5 : Les photoélectrons sont émis par la surface du métal lorsque lumière l'éclaire.

II .4 L'effet photovoltaïque :

Le phénomène de conversion photovoltaïque est provoqué par des modifications de la conductivité électrique des matériaux sous l'action de la lumière. Les cellules photovoltaïques sont constituées de deux couches de silicium, l'une dopée au P (dopé au bore) et l'autre dopée au N (dopé au phosphore), formant une jonction PN avec une barrière de potentiel. Le principe réside donc dans la collision de photons incidents (flux lumineux) avec des électrons libres et de valence, leur transférant une énergie appelée énergie photonique, comme le montre l'équation (I.2).

$$E = (h \cdot C) / \lambda \quad (II.2)$$

E : énergie de photon.

h : la constante de Planck, ($h = 6,63 \times 10^{-34}$ J.s).

λ : la longueur d'onde, en mètre [m].

C : la vitesse de la lumière.

II. 5 Cellule photovoltaïque [9] :

La cellule photovoltaïque est un composant électronique qui génère de l'électricité lorsqu'il entre en contact avec des photons lumineux. En fait, la cellule solaire est la principale pierre angulaire d'un système photovoltaïque.

Les cellules photovoltaïques à base de semi-conducteurs sont les plus utilisées. La composition principale est du silicium (Si) avec occasionnellement d'autres semi-conducteurs tels que le cuivre et le sélénium d'indium ($\text{CuIn}(\text{Se})_2$ ou $\text{CuInGa}(\text{Se})_2$), le tellure de cadmium (CdTe), etc. Ces cellules prennent généralement la forme de plaques minces, d'une dizaine de centimètres, enfermées entre deux contacts métalliques, le tout d'une épaisseur d'un millimètre. En fonction de la puissance nécessaire, ces cellules sont fréquemment assemblées en modules solaires photovoltaïques ou en panneaux solaires.

II .5.1- Technologie de fabrication de la cellule solaire :

Les cellules photovoltaïques sont le plus souvent constituées de silicium. Il est obtenu par réduction de la silice, un composé abondant dans la croûte terrestre, notamment dans le sable. Plus de 90 % des cellules solaires produites aujourd'hui sont constituées de silicium cristallin. La première étape consiste à créer du silicium métallurgique pur à seulement 98 % ; Le silicium de qualité électronique doit être purifié davantage pour atteindre plus de 99,99 %. Les lingots de silicium sont généralement produits en sections rondes ou carrées, provenant de lingots monocristallins et de briques multicristallines qui sont découpés en tranches d'environ 250 μm d'épaisseur après la première étape à l'aide d'une scie à fil.

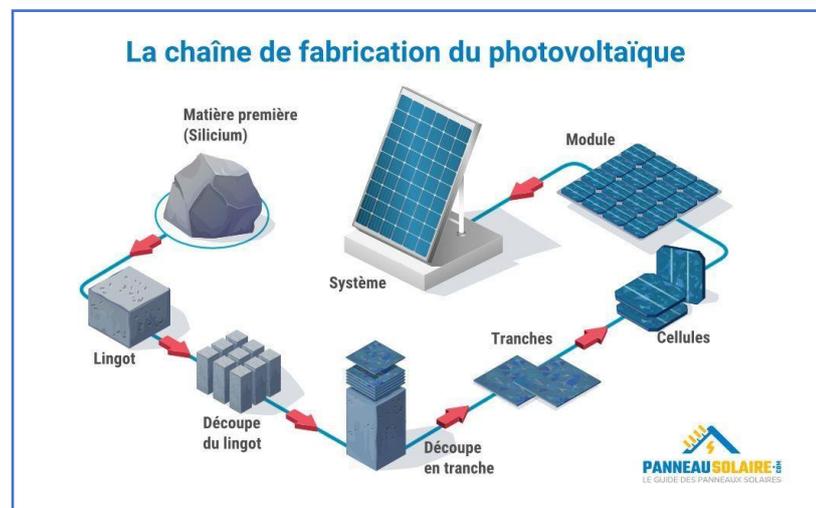


Figure II.6 : La chaîne de fabrication d'une cellule Photovoltaïque.

Une centaine de microns d'épaisseur sont nécessaires pour que la plaque absorbe les photons entrants. La face arrière est dopée p+ par diffusion d'aluminium, servant de

conducteur ohmique avec l'électrode arrière. Pendant ce temps, la zone avant est dopée n+. Une couche antireflet est placée au-dessus de la cellule, la face supérieure et inférieure recevant des électrodes pour la collecte des électrons. Le traitement de surface de la cellule supérieure optimise la quantité de lumière entrant via une autre couche antireflet : une caractéristique double face pour garantir que les deux surfaces captent efficacement l'énergie lumineuse et la convertissent en charge électrique.

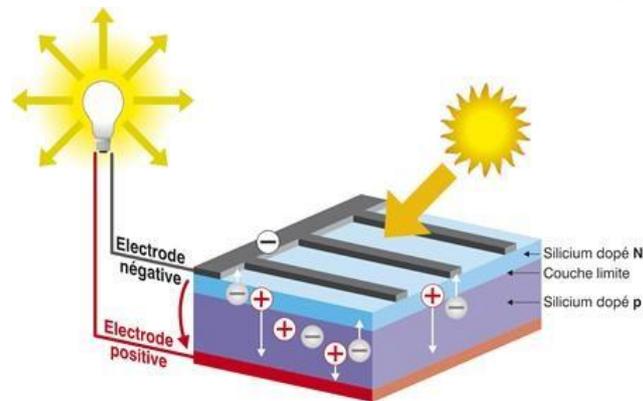


Figure. II.7 : Principe de la conversion photovoltaïque.

II .5.2 Type des cellules photovoltaïques :

Les cellules solaires se présentent sous diverses formes – ou cellules photovoltaïques si vous préférez le terme technique – chacune différant par son efficacité et son coût. Pourtant, malgré leurs différences, tous les types partagent un trait commun : un taux d'efficacité assez faible, qui se situe dans une large fourchette de 8 à 23 % pour l'énergie

Absorbée. Il existe aujourd'hui trois principaux types de cellules ; l'époque actuelle est dominée par eux.

- Monocristallin_:

Dans cette application technologique, le silicium pur est produit à partir de silice de quartz ou de sable par conversion chimique métallurgique. L'efficacité électrique et la durée de vie du silicium sont environ deux fois supérieures à celles du silicium.

Tableau II.1 : les avantages et les inconvénients d'une cellule monocristallin

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ● Rendement électrique des panneaux : 15% STC. ● Puissance des panneaux : 5 à 150 Wc. ● Gamme d'éclairement : 100 à 1000 W/m². ● Usage : Tous usages en extérieur de forte et moyenne puissance (télécoms, balisage, relais, habitat,...). 	<ul style="list-style-type: none"> ● Méthode de Production laborieuse et difficile, donc très chère. ● Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.



Figure II.8 : Exemple cellule monocristallin

Polycristallin :

Le silicium polycristallin est un matériau constitué de cristaux placés côte à côte. C'est plus rentable que le monocristallin. La facilité d'utilisation de cellules carrées ou rectangulaires a été dûment notée.



Figure II.9 : exemple cellule poly cristallin

Tableau II.2 : Les avantages et les inconvénients d'une cellule poly cristallin

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Rendement électrique des panneaux : 12-14% STC. • Puissance des panneaux : 5 à 150Wc. • Gamme d'éclairement 200 à 1000 W/m2. • Usage identique à celui du silicium monocristallin. 	<ul style="list-style-type: none"> • Rendement faible sous un faible éclairement.

- **Amorphe :**

Cette très fine couche de silicium est nettement moins intense en lumière solaire que les deux précédentes, mais elle répond à tous les types d'éclairage (extérieur et intérieur).

Sa technologie de fabrication est théoriquement moins chère (mais les rendements ne sont pas encore à des niveaux comparables) et peut être produite en petits formats grâce à la sérialisation intégrée et à la simplicité de découpe.



Figure II.10 : Exemple cellule amorphe.

Tableau II.3 : Les avantages et les inconvénients d'une cellule amorphe

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Rendement électrique des panneaux : 5-7% STC (jusqu'à 9% pour les multi-jonctions). • Puissance des panneaux extérieurs : 0.5 à 60 Wc. 	<ul style="list-style-type: none"> - Faible rendement (environ 60 Wc/m²), fine couche de cellules en plein soleil (amorphe) nécessite plus de surface pour obtenir le même rendement que des cellules épaisses. - Durée de vie courte (+/- 10 ans) avec dégradation significative des performances temps.

- Gamme d'éclairement : **20 lux** (en intérieur) à **1000 W/m²** (en extérieur).
- Usage : électronique professionnelle et grand public (montres, calculettes,...), électronique de faible consommation en extérieur.

- **Cellules organiques :**

La technologie, encore en phase de recherche, permet désormais de produire des cellules solaires organiques légères, de grande surface et moins coûteuses à produire. Il existe trois types de cellules photovoltaïques organiques : moléculaires, polymères et hybrides.

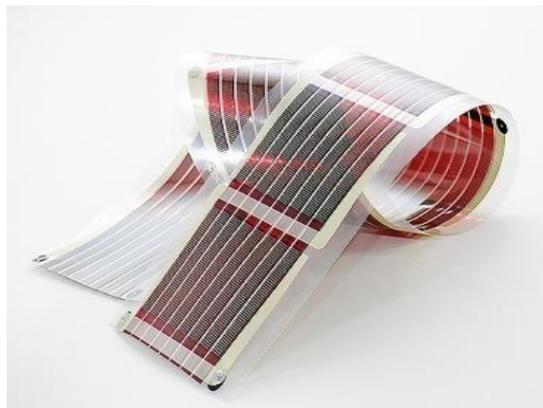


Figure II.11 : Une cellule organique [10].

Les tuiles solaires Tesla :

En 2016, le patron du groupe californien annonçait que son premier lot de tuiles photovoltaïques arriverait prochainement en Europe et en Chine. Depuis, la date de lancement a été retardée d'année en année. Alors que la troisième version est prête, testée et approuvée outre-Atlantique, Elon Musk a tweeter-x : "Elle sera disponible sur les marchés européens en 2020".

Les carreaux sont en verre trempé et se déclinent en quatre styles différents : texturé, lisse, toscan et ardoise. Tesla a évoqué un prix de lancement de 21,85 dollars le pied carré, soit près de 220 euros le mètre carré. Pour ce prix, l'entreprise s'occupe de tout, de la dépose de la toiture existante à l'installation d'un toit solaire.



Figure II.12 : Offres de produits initiales de TESLA Solar [10].

*Il existe d'autres types de cellules en cours de développement que nous ne mentionnerons pas ici.

II .4.3. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque :

- Le dopage des semi-conducteurs :

Un matériau semi-conducteur est un matériau dont la conductivité peut être modifiée en fonction de ce qu'il contient. Pour améliorer sa conduction, les fabricants dopent des impuretés dans une plaquette semi-conductrice : ces impuretés contiennent un peu moins ou un peu plus d'électrons périphériques que les 4 électrons du silicium.

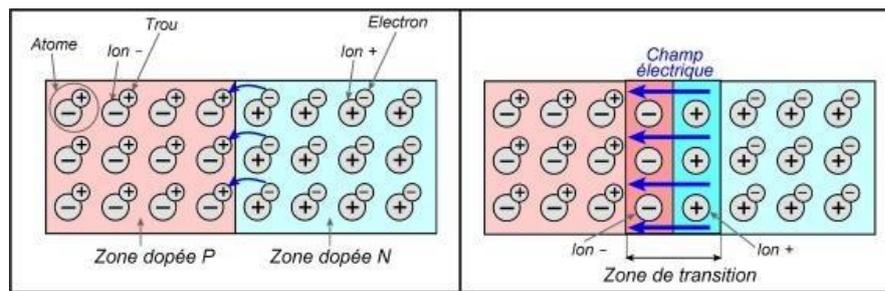


Figure II.13 : Le Dopage de semi-conducteur

► **Dopage N :**

Le processus de dopage N consiste à introduire des atomes comportant cinq électrons périphériques (pentavalents), par exemple du phosphore, dans le semi-conducteur. Quatre de ces électrons seront impliqués dans la formation de la structure cristalline tandis qu'un électron supplémentaire sera libéré et pourra migrer à travers le cristal. Cela conduit le semi-conducteur à acquérir une caractérisation de type N où les porteurs majoritaires sont des électrons (nous les appelons charges mobiles) tandis que les ions + sont fixes car ils constituent une partie de la structure atomique cristalline de la plaquette de silicium.

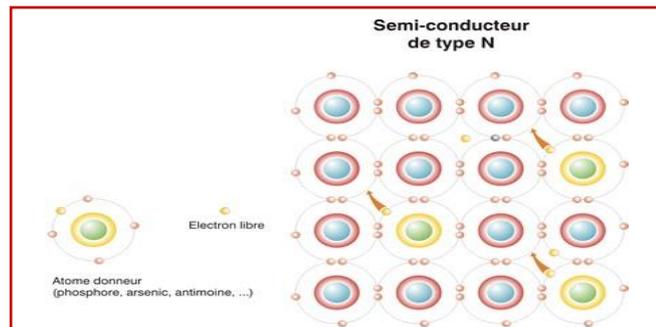


Figure II.14 : Semi-Conducteur de type N

► **Dopage P :**

Le dopage P est l'incorporation de 3 atomes d'électrons périphériques (trivalentes) comme le bore dans le semi-conducteur. Bien que ces trois électrons rejoignent la structure cristalline, chaque atome étranger crée un « trou » du fait de l'absence d'électron périphérique. Par conséquent, les charges mobiles dominantes dans cette zone de silicium sont des trous positifs ; en d'autres termes, ces trous sont chargés de conduire une plaquette de silicium dopée en tant que porteurs de charge électrique.

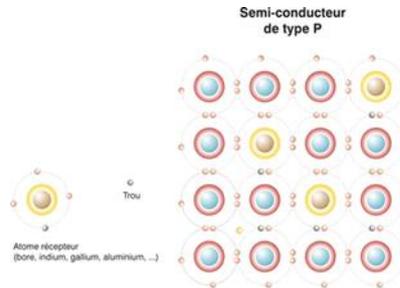


Figure II.15 : semi-conducteur de type P

► **La jonction P-N :**

Une interaction entre les deux régions entraîne le flux de certains électrons du semi-conducteur de type N vers le matériau de type P, alors que les trous du semi-conducteur de type P se déplacent simultanément dans la direction opposée. Ce flux de porteurs majoritaires crée une région neutre grâce à la formation de paires électron-trou ; par conséquent, nous obtenons ce que l'on appelle une jonction PN où la conductivité passe progressivement du type P au type N. L'établissement d'une jonction PN implique des processus réciproques au sein de différentes zones d'un semi-conducteur.

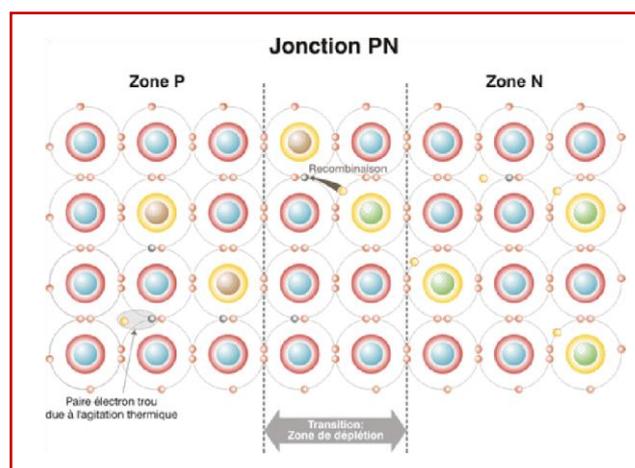


Figure II.16 : Jonction PN à l'équilibre.

II .4.4- Les différentes caractéristiques d'une cellule solaire :

II .4.4.1 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque :

Pour localiser le modèle du générateur photovoltaïque, il faut d'abord localiser le circuit électrique similaire à cette source. La figure « I-12 » illustre le schéma équivalent de la

cellule photovoltaïque réelle. Il s'agit d'un "modèle à une diode". C'est similaire à un générateur de courant connecté à une diode en parallèle.

Deux impédances parasites sont représentées sur cette figure. Ces obstacles ont un impact spécifique sur la propriété $I=f(V)$ de la cellule :

- La résistance série (R_s) est la résistance interne de la cellule ; elle dérive principalement de la résistance du semi-conducteur, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité des grilles.
- La résistance du shunt (R_p) est causée par un courant qui s'échappe de la jonction, cela dépend de la façon dont elle a été construite [10].

Il est important de souligner que ces deux résistances sont associées à la procédure de fabrication des électrodes. Il est nécessaire de réduire les R_s afin que R_p soit extrêmement important.

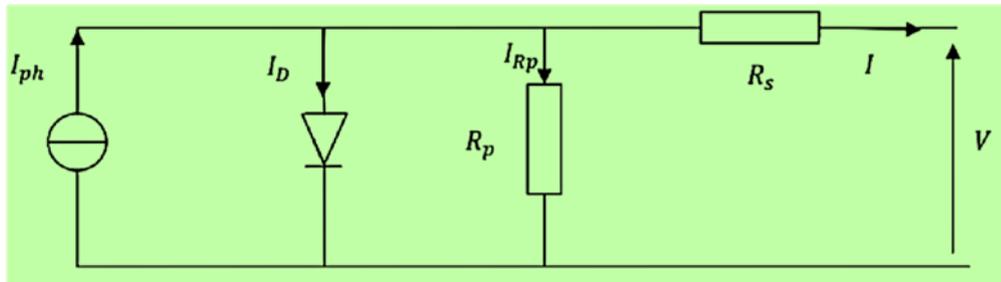


Fig.II.17 : Schéma équivalent électrique de la cellule photovoltaïque [10].

A partir du circuit équivalent de la figure «II.13 », on peut écrire :

$$I_{ph} = I_D + I + I_{Rp} \quad (\text{II.3})$$

Le courant qui passe dans la résistance R_p est donné par :

$$I_{Rp} = \frac{V + I \cdot R_s}{R} \quad (\text{II.4})$$

Le courant dans la diode est donné par :

$$I_D = I_{sat} \left[\exp \left(\frac{V + I \cdot R_s}{nV_t} \right) - 1 \right] \quad (\text{II.5})$$

Avec :

I_{sat} : courant de saturation de la diode.

Et $V_t = \frac{KT}{e}$: Tension thermique à la température T.

On connectant une charge à cette cellule, le courant absorbé (I) est exprimée par l'équation (I.6)

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \frac{(V + I \cdot R_s)}{nV_t} - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (\text{II.6})$$

Où :

e : Charge de l'électron (1.609×10^{-19} C).

K : Constante de Boltzmann (1.381×10^{-23} J/K).

n : Facteur de non idéalité de la jonction.

T : Température effective de la cellule en degré Kelvin.

I : Le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur.

V : la tension aux bornes de cette même cellule.

I_{ph} : est le photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairage et de la température ou bien courant de (court-circuit).

R_p : est la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction.

RS : est la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions.

Les paramètres des cellules solaires (I_{cc} , V_{co} , P_m , FF et η), extraits des caractéristiques de courant et de tension, offrent la possibilité de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions similaires.

• **Un court-circuit de courant I_{cc} :**

Le courant de court-circuit désigne le courant qui commence à circuler dans la cellule lorsque l'éclairage est en court-circuit à sa sortie. En d'autres termes, ($V=0$) Le courant de court-circuit d'une cellule solaire idéale est équivalent au courant photovoltaïque I_{ph} . $I_{cc}(V=0) = I_{ph}$

• **Tension de circuit ouvert V_{co} :**

La tension V_{co} est obtenue lorsque le courant qui traverse la cellule est nul. Son importance repose sur la barrière d'énergie et la résistance shunt. Elle diminue avec la température et fluctue peu en fonction de l'intensité de la lumière.

$$V_{co} = V_t \cdot \ln \left[\frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1 \right] \quad (\text{II.7})$$

• **Puissance maximale P_m :**

La puissance fournie par une cellule photovoltaïque sous éclairage au circuit extérieur est influencée par la résistance de charge (la résistance externe fixée aux bornes de la cellule). Pour un point de fonctionnement P_m (I_m , V_m) de la courbe courant-tension, cette puissance est maximale (notée P_m) (courant compris entre 0 et I_{cc} et tension comprise entre 0 et V_{co}).

$$P_m = I_m V_m. \quad (\text{II.8})$$

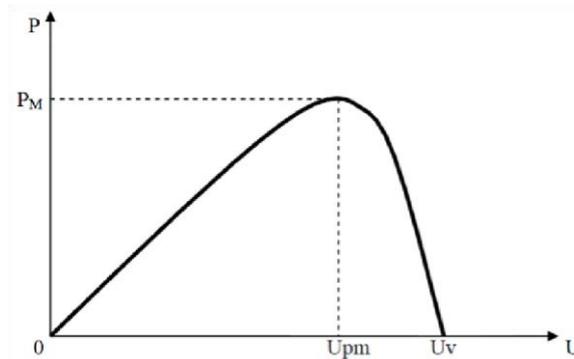


Figure II.18: Courbe caractéristique P-V.

- **Facteur de forme FF : [11]**

Le form factor ou fill factor, encore souvent appelé par son nom anglais (Fill Factor), correspond à la puissance maximale délivrée par la batterie, divisée par le produit $V_{co} \cdot I_{cc}$, qui correspond à la puissance maximale idéale.

$$FF = P_m / V_{co} \cdot I_{cc} \quad (II.9)$$

- **Rendement de conversion η :**

Le rendement de la cellule est défini quant à lui comme le rapport entre la puissance maximale produite et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule photovoltaïque.

$$\eta = P_m / P_i \quad (II.10)$$

S est la surface de la cellule, et G l'éclairement en W/m^2 , le rendement de la cellule peut s'écrire aussi :

$$\eta = P_m G \cdot S \quad (II.11)$$

Ce rendement est souvent mesuré dans les conditions de référence, c'est-à-dire sous l'ensoleillement de $1000 W/m^2$, à la température de $25^\circ C$ et sous un spectre AM 1,5. Ces conditions normalisées sont dites « STC » pour Standard Test Conditions.

- **Les tests d'évaluation de performances :**

Lorsque vous recherchez pour la première fois un panneau solaire, vous pouvez rencontrer des abréviations. Vous pouvez les observer répertoriés sous la fiche technique du panneau solaire et vous demander ce que vous pouvez en faire.

STC et PTC sont des conditions qui évaluent l'efficacité d'un module photovoltaïque (panneau PV), tandis que NOCT est la température de la cellule PV et est prédéterminée

dans des conditions préétablies. Évidemment, vous n'avez pas besoin de comprendre l'importance d'acheter un panneau solaire. Cependant, si vous souhaitez bénéficier d'une offre plus avantageuse, ces configurations sont avantageuses [12].

- Conditions STC (Standard Test Conditions):

Les conditions de test standard décrivent la manière dont les composants photovoltaïques sont évalués en laboratoire pour déterminer leurs propriétés électriques. Ce sont des conditions courantes qui facilitent la comparaison des modules.

Les conditions du STC définissent un certain nombre de conditions de test, notamment :

- Le niveau d'éclairage du module : $P_i=1000 \text{ W/m}^2$
- Température des cellules : 25°C
- Coefficient de masse d'air = 1,5

- **Conditions NOCT (Normal Operating Cell Temperature):**

Le terme NOCT est la forme abrégée de Température de fonctionnement normale, qui correspond à la température typique d'une cellule fonctionnant normalement. En effet, les conditions STC nécessitent un niveau d'éclairage de 1000 W/m^2 et une température de cellule de 25°C . Cependant, les cellules des modules ne sont pas capables de fonctionner dans ces conditions.

En conséquence, la profession a introduit des conditions plus proches de la réalité. Voici les conditions NOCT :

- La quantité de lumière par module : 800 W/m^2 .
- Température extérieure : 20°C
- Vitesse du vent : 1 mètre/sec
- Coefficient de masse d'air : $AM=1,5$

Les conditions associées à la température des cellules ont été supprimées, l'accent étant mis sur la température de l'air autour des cellules et la vitesse du vent (1 m/s). Dans ces conditions « NOCT », similaires aux conditions de fonctionnement des dispositifs photovoltaïques, les cellules qui composent les modules photovoltaïques vont s'échauffer et atteindre une température stationnaire appelée température nominale des cellules.

- **Conditions PTC (PVUSA Test Conditions) :**

PTC préconise l'utilisation de conditions PVUSA (Photovoltaics for Utility Scale Applications) ou simplement de conditions de performance. Ces conditions étaient destinées à évaluer et contraster les systèmes photovoltaïques dans le cadre du projet PVUSA [12].

Le PTC est généralement considéré comme plus pratique pour mesurer la production photovoltaïque, les conditions du test sont plus similaires aux conditions solaires et environnementales du « monde réel » que le STC. Il s'agit des conditions PTC :

- Niveau d'éclairement du module : $P_i=1000 \text{ W/m}^2$
- Température extérieure : $20 \text{ }^\circ\text{C}$
- Vitesse du vent de 1 mètre par seconde à 10 mètres au-dessus du sol
- Coefficient Air Masse : $AM=1.5$.

En réalité, les pertes du système solaire sont plus importantes dans le "monde réel". Les PTC et les STC ne tiennent pas compte de tous les éléments potentiels qui impactent les performances d'un système photovoltaïque. Les éléments tels que l'ombre, l'incompatibilité des modules, les pertes de fils, les pertes d'onduleur et de transformateur, la détérioration du panneau au fil du temps et les pertes à haute température pour les baies situées à proximité ou intégrées dans une ligne de toit peuvent varier en fonction de différents facteurs tels que la saison, l'emplacement géographique, le montage, etc.

II .4.5- Rendement d'une cellule solaire :

Le tableau suivant présente les différents types des cellules avec leur rendement [9].

Tableau II.4. : Technologie de cellules

Technologie de cellules	Rendement en laboratoire	Rendement production	Domaines d'application
Silicium amorphe (aSi)	13%	5-8%	modules de grandes dimensions pour toits et façades, appareils de faibles puissances, espace (satellites)
Silicium poly cristallin (pSi)	19,8%	11 à 15 %	modules de grandes dimensions pour toits et façades, générateurs de toutes tailles (reliés réseau ou sites isolés)
Silicium monocristallin (m-Si)	24,7%	12 à 18%	appareils de faible puissance, production d'énergie embarquée (calculatrice, montre.) ...

En règle générale, l'efficacité d'une cellule solaire est assez minime, allant généralement de 10 à 20 %. Bien que de meilleurs rendements aient été obtenus grâce à l'utilisation de nouveaux matériaux (tels que l'arséniure de gallium, dont les rendements dépassent 25 % lors des tests en laboratoire), cela entraîne un coût considérablement plus élevé. Malgré cela, le silicium reste le matériau le plus couramment utilisé pour les cellules photovoltaïques, et pour ces cellules, l'efficacité énergétique est encore inférieure à 15 %.

Comment augmenter le rendement des cellules solaires ?

Une méthode efficace pour améliorer l'efficacité des cellules solaires consiste à améliorer leur interaction avec la lumière. Les deux principales stratégies consistent à augmenter l'absorption.

- Diminuez la réflexion.
- Focalisez le faisceau.
- Changez et améliorez le spectre solaire
- Grâce à la conversion ascendante pour les photons proche infrarouge
- Et conversion descendante pour les photons ultraviolets.

II .4.6-Association des cellules photovoltaïques :

- Association en série :

Dans un montage en série, les cellules transportent le même courant et les caractéristiques finales du montage en série sont obtenues en ajoutant une tension à un courant donné. Cela permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. L'équation suivante résume les caractéristiques électriques d'une batterie série (Ns).

$$V_{\text{CONs}} = N_s \times V_{\text{co}} ; I_{\text{cc}} = I_{\text{ccNs}} \quad (\text{II.12})$$

- ▶ V_{coN_s} : La somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série.
- ▶ I_{ccN_s} : Courant de court-circuit de N_s cellules en série.

Ce système d'association est généralement le plus communément utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce.

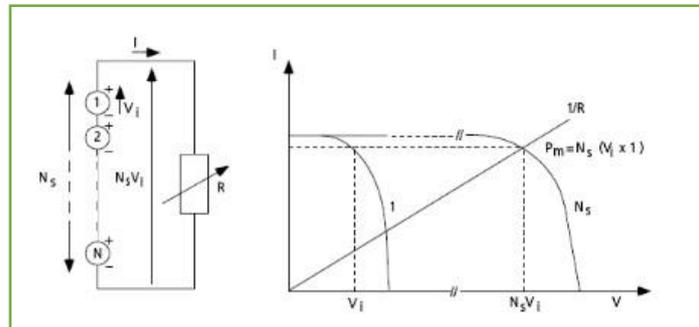


Figure II.19: caractéristiques résultantes d'un groupement de cellules en série.

- Association en parallèle :

La connexion en parallèle des batteries est possible et permet d'augmenter le courant de sortie du générateur obtenu. Dans un réseau de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et les caractéristiques finales du réseau sont obtenues en ajoutant du courant à une tension donnée.

Cette équation et ce graphique résument les caractéristiques électriques des cellules parallèles (N_p).

$$I_{ccN_p} = N_p \times I_{cc} ; V_{co} = V_{coN_p} \quad (II.13)$$

- ▶ I_{ccN_p} : représente la somme des courants de court-circuit de N_p cellules en parallèle.
- ▶ V_{coN_p} : est la tension du circuit ouvert de N_p cellules en parallèle.

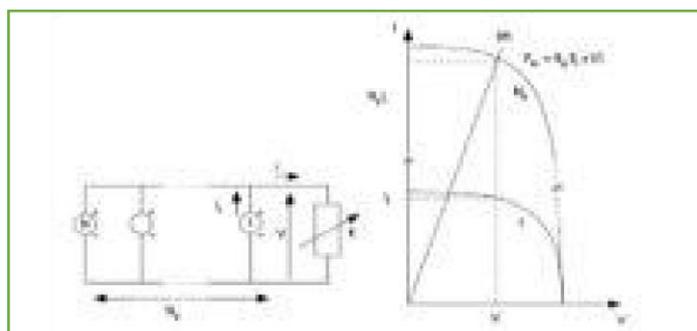


Figure II.20 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de cellules En parallèle.

II .5 Module photovoltaïque :

Le module est par définition un ensemble de cellules solaires assemblées pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition à la lumière (Fig. II.16). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension résultante pour un même courant. La mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension.

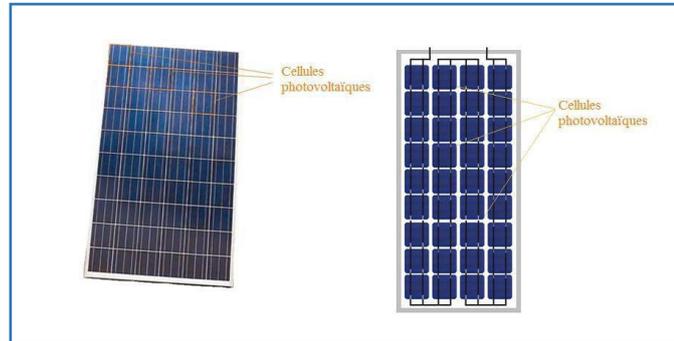


Figure II.21 : Module photovoltaïque.

II .5.1- Composition d'un Module photovoltaïque :

Les cellules cristallines telles quelles ne permettent pas d'utiliser l'énergie photovoltaïque de manière efficace. En effet, les cellules ne développent qu'une puissance relativement faible (de l'ordre de 3 W) et sont extrêmement fragiles et sensibles aux éléments extérieurs.

Pour utiliser l'énergie PV à grande échelle, les cellules sont connectées entre elles en série pour augmenter la tension et en parallèle pour augmenter le courant. Elles sont ensuite encapsulées entre une feuille de verre et une feuille de Tedlar à l'aide d'un polymère (0 EVA).

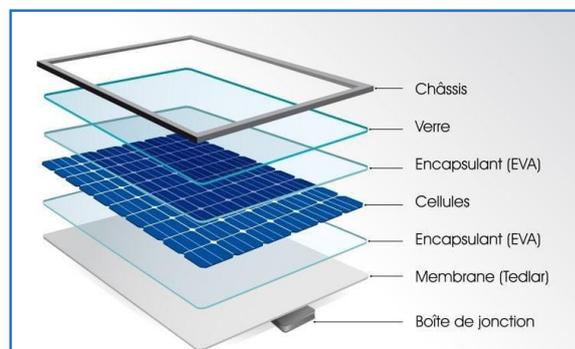


Figure. II.22 : Les différents composants d'un module photovoltaïque.

- Le verre :

L'épaisseur de ce verre est de 4 mm Il s'agit de verre trempé, également appelé « verre solaire » en raison de sa faible teneur en fer qui se traduit par une meilleure transmission optique. Typiquement, la transmission optique du verre d'un module photovoltaïque est d'environ 95 % pour la plage du spectre solaire effectif (380 nm à 1 200 nm).

La surface avant en verre de la cellule solaire à couche mince est dotée d'un revêtement antireflet avec des nano pores. Les pores se forment grâce à l'application d'acide fluosilicique (H_2SiF_6) sur la face externe et aident à piéger la lumière sans lui permettre de se réfléchir de manière significative (moins de 8 % entre 380 nm et 1 200 nm). Le verre est microstructure en face intérieure, ce qui permet d'améliorer le rendement par éclairage diffus.

- Polymère encapsulant :

Les matériaux jouent un rôle essentiel dans l'encapsulation des modules photovoltaïques. Parmi les différentes options disponibles, l'EVA s'impose comme la préférée actuelle de l'industrie. Il agit comme un revêtement de résine transparent sur les cellules photovoltaïques. Chimiquement, l'EVA est créé à partir de chaînes de copolymères d'éthylène et d'acétate de vinyle, choisies pour ses propriétés adhésives, diélectriques (non conductrices), thermiques et d'étanchéité (faible taux d'absorption d'eau). De plus, l'EVA possède d'excellentes capacités de transmission optique (plus de 90 % en fonction du type) dans la plage de 380 nm à 1 200 nm du spectre solaire qu'il laisse passer.

- Le Mylar :

Le Mylar est un film polymère transparent utilisé pour isoler électriquement les connexions de sortie à l'arrière de la batterie. Chimiquement, il est composé de polyéthylène, d'acide téréphtalique, et possède un constant diélectrique très élevé, ce qui en fait un très bon isolant électrique.

- Le Tedlar :

TEDLAR est un fluor polymère ; sa fonction première lorsqu'elle est utilisée dans un module photovoltaïque est la protection de la surface. En effet, TEDLAR se distingue par sa grande imperméabilité aux agressions extérieures telles que les rayons

ultraviolets, les oscillations thermiques, les atmosphères abrasives et autres comme les impacts chimiques.

- Cadre en aluminium :

Sa haute résistance à l'humidité et aux chocs mécaniques justifient l'utilisation d'un cadre en aluminium. De plus, les cadres en aluminium peuvent être anodisés.

L'anodisation est un procédé appliqué à la surface d'une pièce en aluminium : il est possible de protéger ou de donner un nouveau look à votre aluminium par oxydation anodique (une couche électriquement isolante qui varie entre 5 et 50 micromètres). Il confère au matériau une meilleure résistance à l'usure, à la corrosion et à la chaleur.

II .6 Dimensionnement d'un système photovoltaïque :

II .6.1- Différents types de systèmes photovoltaïques :

Trois catégories de systèmes photovoltaïques sont couramment rencontrées : les systèmes autonomes, les systèmes hybrides et les systèmes connectés à un réseau.

Les deux premiers sont autonomes par rapport au réseau d'électricité et se trouvent fréquemment dans les régions éloignées.

- Les systèmes autonomes :

La mise en place de ces systèmes photovoltaïques vise à garantir un fonctionnement autonome sans nécessiter d'autres sources d'énergie. Ces systèmes sont généralement employés dans les zones isolées et éloignées du réseau.

Les systèmes photovoltaïques autonomes peuvent être connectés directement à une charge appropriée ou connectés à un adaptateur d'impédance MPPT (Maximum Power Point Tracking), fonctionné au fil du soleil ou avec un stockage d'énergie électrique.

Le couplage direct consiste à fonctionner en fonction du soleil, ce qui signifie que la puissance varie principalement selon les périodes.

Les accumulateurs électrochimiques sont des charges courantes à courant continu qui peuvent répondre au critère (tension constante avec puissance variable). Les différentes options de charge sont les pompes à eau, qui permettent de pomper l'eau en fonction du soleil. Cependant, le stockage est toujours présent sous la forme d'eau stockée (dans un réservoir).

Il est généralement nécessaire d'effectuer une adaptation d'impédance en introduisant un dispositif électronique entre le générateur et sa charge électrique afin de forcer le système à fonctionner à sa puissance maximale.

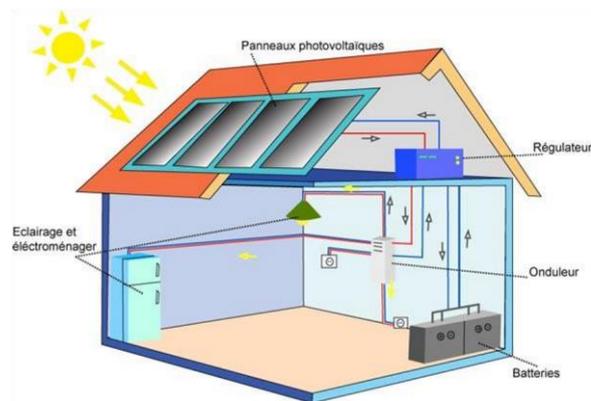


Figure. II.23 : Système autonome.

- Les systèmes hybrides :

Les systèmes énergétiques hybrides sont le résultat de la combinaison de plusieurs sources d'énergie renouvelables aux côtés de sources d'énergie conventionnelles. Même si les sources renouvelables comme le photovoltaïque et les éoliennes ne fournissent pas une production d'énergie constante, leur combinaison synergique permet une production continue d'électricité.

Les systèmes énergétiques hybrides, couramment utilisés dans les zones reculées, possèdent la capacité de fonctionner de manière indépendante sans dépendre de vastes réseaux électriques interconnectés. Ces systèmes peuvent être structurés en deux configurations distinctes, à savoir une architecture de bus DC et une architecture de bus AC, qui permettent l'intégration de diverses sources d'énergie.

La configuration initiale consiste à consolider l'alimentation de chaque source sur un seul bus ininterrompu. Cela signifie que les systèmes de conversion de puissance, notamment ceux qui fonctionnent en courant alternatif (AC), délivrent leur énergie à un redresseur afin de la convertir en courant continu (DC).

Pour alimenter les charges CA, les générateurs sont reliés en série avec l'onduleur. Il est de la responsabilité de l'onduleur de fournir la puissance nécessaire aux charges alternatives à partir du bus DC, tout en s'assurant que l'amplitude et la fréquence sont conformes au point de consigne prédéterminé.

Le rôle premier du système de supervision est de gérer l'activation et la désactivation des générateurs et du système de stockage. Un avantage notable de cette configuration particulière est la simplicité de son mécanisme de contrôle. Dans la configuration alternative, tous les éléments du système hybride sont liés à la charge alternative.

L'intégration des systèmes de production d'énergie photovoltaïque dans le réseau électrique est une conséquence directe de la tendance actuelle à la décentralisation. Cette approche permet de produire de l'énergie plus près des zones où elle est consommée. En connectant ces systèmes au réseau, il y a une réduction significative de la nécessité d'étendre les lignes de transport et de distribution afin de répondre à la demande énergétique croissante.

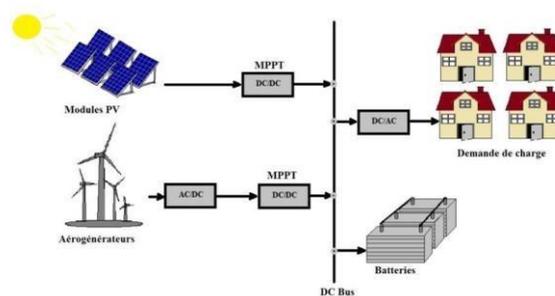


Figure. II.24 : Système Hybride.

- Système connecté au réseau :

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque connectés à un réseau résultent de la tendance à la décentralisation du réseau électrique ; l'énergie est produite plus près des lieux de consommation. Les systèmes connectés au réseau réduisent la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transport et de distribution. Ils produisent leur propre électricité et acheminent leur excédent d'énergie vers le réseau, à partir duquel ils s'approvisionnent selon leurs besoins ; ces transferts éliminent le besoin d'achat ou d'entretien d'une batterie. Pourtant, de tels systèmes peuvent toujours servir d'alimentation de secours en cas de panne de réseau, évitant ainsi toute dépendance aux batteries.

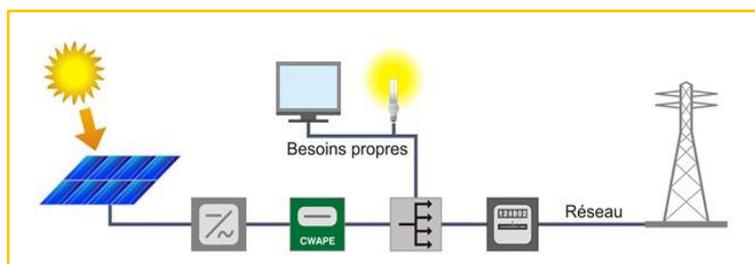


Figure II.25 : Systèmes photovoltaïque Connectés au réseau.

II .6.2- Les principaux facteurs influençant la production d'énergie électrique d'une installation PV :

- ▶ _____ L'ensoleillement : la quantité d'énergie produite par un panneau dépend de l'ensoleillement journalier moyen du lieu. Il s'exprime en kWh/m²/jour.
- ▶ _____ L'orientation et l'inclinaison La position et l'angle sont des facteurs importants. Afin de garantir des performances optimales – ou

en d'autres termes, de capter le plus de lumière possible – les panneaux photovoltaïques doivent être installés dans des endroits qui reçoivent suffisamment de soleil, comme les toits. Il est cependant essentiel que ces placements répondent à des critères précis : une orientation totale vers le sud et un angle de 30° par rapport au niveau du sol.

- ▶ Irradiance : "L'irradiance est définie comme la puissance reçue par la surface. Exprimée en W/m²" Lorsque l'irradiance diminue, le courant PV diminue proportionnellement.
- ▶ Température : Le comportement de la cellule dépend de la température, qui à son tour affecte ses performances. À des températures élevées du module, la tension diminue, ce qui nuit aux performances du panneau en ce qui concerne la production d'énergie électrique. C'est ainsi que la température affecte la productivité d'un panneau solaire : en influençant le comportement de la cellule.
- ▶ Ombrage : Les panneaux ne seront pas en bon état de marche dans un lieu qui n'est pas suffisamment éclairé par le soleil tout au long de la journée en raison de la présence d'obstacles tels que des bâtiments ou des arbres. Cependant, cela signifie une Diminution du rendement plutôt que l'inactivité complète du module.

II .6.3. Eléments constitutifs d'un système PV :

Pour une bonne compréhension du fonctionnement d'un système photovoltaïque, il est essentiel d'examiner les principaux éléments.

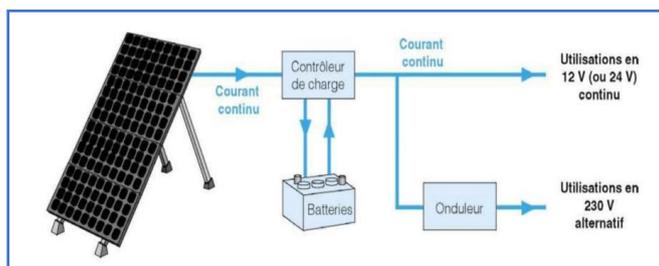


Figure II.26 : Les différents composants d'une installation

Tableau II.5 : les composants PV

Générateur	Se constitue essentiellement par la cellule photovoltaïque dans lequel se transforme l'énergie solaire (rayonnement) en énergie électrique. Un générateur est formé à partir de raccordement électrique de plusieurs rangées qui constituent à leurs tours de nombreux panneaux interconnectés.
L'onduleur	Est l'appareil dans lequel le courant continu se converti en courant alternatif et qui contrôle la qualité de la puissance de sortie transférée au réseau par un filtre qui se trouve à l'intérieure de l'onduleur. L'onduleur possède une forme d'une boîte en métal de petite dimension.

Régulateur	Est un ensemble électronique employé pour la gestion des flux du courant utilisé pour charger la batterie, arrivé des panneaux et le courant transmit de la batterie vers les consommateurs.
Batterie	Son rôle essentiel est d'accumuler du courant et de stocker de l'énergie pendant la journée pour l'employer durant la nuit et durant les périodes de rendement moindre.
Les câbles	Sont les éléments qui raccordent les diverses parties de l'installation photovoltaïque entre elles et entre le module et l'élément à alimenter, il a ainsi la charge de conduire le courant et l'énergie.

A) Régulateur :

Le rôle essentiel du régulateur dans le système photovoltaïque est de réguler les flux d'énergie. Celui-ci a pour fonction de préserver la batterie des surcharges (solaires), des décharges profondes (utilisateur) et du court-circuit. Ainsi, le régulateur augmente la longévité de la batterie. Il a également pour responsabilité de garantir la surveillance et la sécurité de l'installation (alarmes, fusibles, polarisation inversée). Dans les dispositifs plus avancés, il est également capable de gérer la recharge à partir d'autres sources d'énergie. Dans certaines situations, il est possible d'effectuer un contrôle de puissance (recherche du pont de puissance maximale, MPPT).

• Technologies des régulateurs :

Trois grandes catégories de régulateurs de charge sont présentes, chacune utilisant une méthode de contrôle de charge différente :

- ▷ Le type shunt : La technique du shunt consiste à dévier le courant de charge des batteries vers une résistance, ce qui entraîne un court-circuit au niveau des panneaux solaires photovoltaïques. Cette méthode est adaptée aux applications de faible puissance.
- ▷ Le type « série » : Le modèle « série » permet de couper le courant de charge des batteries par l'ouverture d'un circuit entre les panneaux solaires photovoltaïques et les batteries, ce qui est adapté aux applications de moyenne puissance.
- ▷ Le type MPPT (Maximum Power Point Tracker): Les paramètres électriques de fonctionnement entre les trois systèmes suivants peuvent être optimisés en permanence grâce au type MPPT (Maximum Power Point Tracker). Les panneaux solaires, les piles et les dispositifs de réception (moteur, pompe, éclairage, réfrigérateur, etc.) Il y parvient en surveillant constamment la tension et le courant du panneau afin de générer de l'énergie au maximum. Grâce à son système de balayage, il peut analyser la tension du panneau

solaire toutes les deux heures afin de déterminer le point de sortie haute puissance. Le coût élevé de ce type de régulateur le rend plutôt réservé aux systèmes de grande puissance.

Il existe deux éléments essentiels à considérer :

- Le régulateur doit être capable d'accepter cette tension entre les panneaux et les batteries (généralement 12V, 24V ou 48V).
- Le régulateur doit avoir une intensité maximale (en ampères, A) qui dépasse l'intensité de court-circuit du ou des panneaux solaires auquel il est connecté.



Figure II.27: Régulateur

B) Batterie:

Dans ce cas, la batterie remplit trois fonctions importantes :

Dans un système photovoltaïque, l'énergie solaire n'étant pas toujours disponible, il est nécessaire de stocker quotidiennement ou saisonnièrement l'énergie électrique générée par les panneaux solaires.

Dans cette situation, la batterie joue trois rôles essentiels :

- **Autonomie** : Une batterie offre la possibilité de satisfaire les besoins de charge à tout moment, même pendant la nuit ou en cas de nuages.
- **Courant de surcharge** : Les batteries peuvent produire des courants de surcharge pendant un certain temps, c'est-à-dire des courants supérieurs à ceux que le champ photovoltaïque peut produire. Il est essentiel pour faire fonctionner les moteurs et autres équipements qui nécessitent un courant de démarrage 3 à 5 fois supérieur au courant de fonctionnement.
- **Stabilité de tension** : Les cellules contribuent à fournir une tension constante, éliminant les variations de tension dans le champ photovoltaïque et permettant à l'appareil de fonctionner à une tension optimisée.

Types d'accumulateurs :

Les systèmes photovoltaïques utilisent principalement deux types de batteries : les batteries à accumulateurs au plomb-acide (Pb acide) et les batteries à accumulateurs au

nickel-cadmium (Ni-Cd). Toutes ont leurs propres spécificités et, en fonction des techniques de construction, elles présenteront des caractéristiques de fonctionnement très différentes.

• **Les Accumulateurs au plomb acide :**

Les Accumulateurs à base de plomb acide sont la technologie la plus couramment employée dans les systèmes solaires autonomes. Actuellement, elle propose la solution la plus abordable en termes de prix et de durée de vie. En outre, elle offre les traits les plus recherchés d'une batterie solaire, tels qu'un niveau de rendement élevé, une durée de vie prolongée avec un nombre important de cycles et une faible autodécharge.

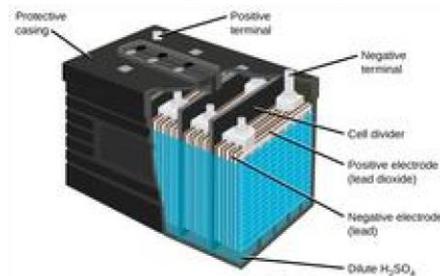


Figure II.28: Batterie au plomb acide.

• **Les Accumulateurs au Nickel - cadmium :**

La structure physique des batteries de nickel-Cadmium est similaire à celle du plomb-Acide. Elles se servent de l'hydroxyde de Nickel pour les plaques positives et de l'oxyde de Cadmium pour les plaques négatives au lieu du Plomb. Ce genre d'accumulateur a une tension comprise entre 1,15 et 1,17 Volts. Le taux de rendement énergétique est d'environ 70%. Ce genre d'accumulateur offre de nombreux bénéfices :

- Une résistance mécanique remarquable.
- Capacité de faire face à des décharges profondes.
- Il n'y a aucune émission toxique de l'électrolyte.
- N'aie pas peur du gel.



Figure II.29 : Batterie au Nickel-cadamium.

- **Les Accumulateurs NiMH (Nickel-Métal-Hydrure) :**

Ces piles sont utilisées en remplacement des NiCD en raison de leur manque de toxicité. Cependant, leur prix est assez élevé et elles sont employées dans les établissements de luxe. Elles ont une durée de vie bien supérieure à celle des batteries au plomb (50% de plus), mais elles ont une capacité extrêmement limitée.

- **Les Accumulateurs Li-ion (Lithium-ion) :**

La batterie Li-ion possède une énergie massique considérable, ce qui en fait l'une des moins lourdes et des moins volumineuses. Son efficacité est remarquable et son autodécharge est plutôt faible. Ainsi, le gaspillage est diminué. Il est équipé d'un système de sécurité supplémentaire car cette batterie peut exploser en cas de surcharge, de décharge excessive ou de court-circuit. Elle est âgée d'environ 3 ans.

C) Onduleur :

On trouve souvent un convertisseur d'énergie entre le champ photovoltaïque et la charge (sans stockage avec charge en continu, il sera appelé convertisseur continu-continu), ou entre la batterie et la charge (il sera alors appelé onduleur ou convertisseur continu-alternatif).



Figure II.30 : Batterie Li-Ion

En général, on retrouve l'onduleur avec un redresseur qui transforme le courant alternatif en courant continu. Son rôle consiste à charger les batteries et à alimenter le circuit en continu de l'installation pendant une période prolongée sans soleil.

Deux catégories d'onduleurs peuvent être distinguées dans le domaine des énergies renouvelables : les onduleurs autonomes et les onduleurs connectés au réseau. Les onduleurs hybrides ou intelligents sont également disponibles.

Onduleurs autonomes : Les onduleurs autonomes offrent une alternative de tension provenant d'une source continue (batterie ou panneau). Fig. II.31 (a).

Onduleurs non autonomes (connecté au réseau) :

Il est nécessaire de le connecter au réseau et à la source située afin de fournir une tension alternative et de pouvoir l'injecter dans le réseau électrique. Fig. II.31 (b).

Onduleurs hybrides ou intelligents (onduleur solaire) : ils sont une nouvelle génération spécialement conçue pour les applications d'énergie renouvelable, notamment pour les panneaux solaires photovoltaïques. Le pompage des panneaux solaires photovoltaïques est recommandé uniquement pendant la journée et principalement lorsque le Soleil est au zénith. Fig. II.31 (c).

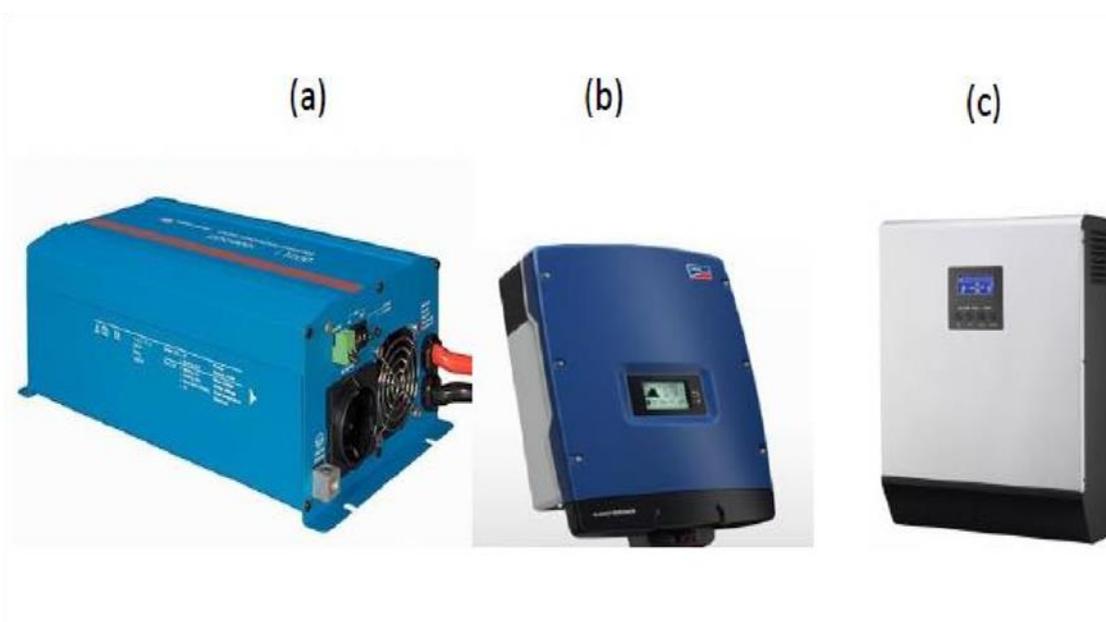


Figure II.31 : Les types d'onduleur solaire.

II .7 Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

a) Avantages :

- Premièrement, une grande fiabilité. L'appareil ne comporte aucune pièce mobile, Ce qui le rend idéal pour les zones reculées. C'est pourquoi il est utilisé sur les vaisseaux spatiaux.

- La nature modulaire des panneaux photovoltaïques rend leur montage simple et adaptable aux différents besoins énergétiques. Le système est dimensionné pour s'adapter aux applications de puissance allant des milliwatts aux mégawatts.

- Les coûts d'exploitation sont très faibles en raison d'une maintenance réduite et aucun carburant, transport ou personnel hautement spécialisé n'est requis.

- Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités écologiques car ses produits finis sont non polluants, silencieux et n'entraînent aucune nuisance pour l'environnement hormis l'espace occupé par les grandes installations.

b) Inconvénients :

- La production du module photovoltaïque est une activité de haute technologie qui nécessite des investissements élevés.

- Le module a un rendement de conversion réel faible, d'environ 10 à 15 % (équivalant à 10 à 15 MW/km² par an pour le BENELUX), avec une limite théorique pour une cellule de 28 %. • Les générateurs photovoltaïques ne rivalisent pas avec les générateurs diesel que lorsqu'il s'agit de faibles besoins d'énergie dans des régions isolées.

- Quand il est nécessaire de stocker l'énergie électrique sous forme chimique (batterie), cela entraîne une augmentation du coût du générateur.

- Le stockage de l'énergie électrique suscite toujours de multiples difficultés. Le manque de performance des panneaux solaires photovoltaïques est dû au fonctionnement interne des cellules. Afin de pouvoir déplacer un électron, l'énergie du rayonnement doit

être au moins de 1 eV. Il n'y aura donc pas de transformation en électricité de tous les rayons incidents ayant une énergie inférieure. Les rayons lumineux ayant une énergie supérieure à 1 eV perdront également cette énergie, tandis que le reste sera dissipé sous forme de chaleur.

II .8. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous proposons une introduction complète aux systèmes photovoltaïques, englobant leurs composants et en nous concentrant uniquement sur les cellules photovoltaïques. Nous approfondissons leurs principales caractéristiques, explorons les différents types de ces systèmes et concluons en décrivant les avantages et les inconvénients associés à l'installation photovoltaïque.

Chapitre III :

Analyse de la

dégradation dans le

secteur PV

III.1 Introduction :

Les défauts d'une installation photovoltaïque peuvent l'affecter à la fois lors de sa conception et de son installation, ainsi que lors de son fonctionnement. Ces défauts réduisent les performances des systèmes solaires autonomes, réduisant ainsi la production photovoltaïque. L'efficacité de la production d'énergie solaire photovoltaïque (PV) est largement déterminée par les conditions dans lesquelles le générateur photovoltaïque fonctionne. Ces conditions peuvent être liées au processus ou à l'exploitation de fabrication d'un point de vue environnemental ou opérationnel. Ces facteurs sont à l'origine d'un grand nombre de défauts qui entraînent la dégradation du générateur photovoltaïque.

Plusieurs méthodes pour traiter ce type de problème ont récemment été développées dans la littérature. Les types d'erreurs rencontrées, leurs origines et leurs conséquences ont tous été discutés dans ce chapitre. Les méthodes de surveillance et de diagnostic des systèmes photovoltaïques ont fait l'objet de nombreuses recherches. Les systèmes photovoltaïques ne fonctionnent pas toujours à leur efficacité maximale, ils peuvent Au cours de leur fonctionnement, ils seront affectés par divers défauts et exceptions, entraînant une dégradation des performances du système. Ainsi, la surveillance et le diagnostic des pannes éventuelles dans les installations photovoltaïques sont aujourd'hui au-dessus de la priorité des fabricants. Afin de mieux positionner notre travail, il est nécessaire d'étudier quelle méthode est utilisée pour diagnostiquer et détecter les conditions anormales dans les systèmes photovoltaïques.

Donc La dégradation d'une installation photovoltaïque peut être le résultat de plusieurs facteurs, Un des principaux facteurs est l'exposition aux éléments environnementaux. Les rayons UV du soleil, les variations de température et l'humidité peuvent tous contribuer à la dégradation des composants du système, notamment des panneaux solaires eux-mêmes. Cette dégradation peut se manifester sous forme de fissures, de décoloration ou de dégradation de la couche anti-réfléchissante, réduisant ainsi l'efficacité de la conversion de la lumière solaire en électricité.

C'est pour cela on implique une maintenance qui est une composante essentielle de la durabilité et de la performance de notre installation à long terme. Tout au long de la durée de vie d'un système photovoltaïque, divers facteurs peuvent affecter sa capacité à produire de l'électricité de manière optimale. Par conséquent, une stratégie de maintenance proactive est nécessaire pour identifier, prévenir et résoudre les problèmes potentiels.

Cette maintenance comprend plusieurs aspects clés. Tout d'abord, l'inspection régulière des panneaux solaires est essentielle pour détecter les dommages physiques tels que les fissures, les éclats ou l'accumulation de saleté qui pourraient réduire l'efficacité des cellules solaires. De plus, les composants électriques du système, tels que les onduleurs et les câbles, doivent être surveillés pour s'assurer qu'ils fonctionnent correctement et qu'ils ne présentent aucun signe de surchauffe ou de dysfonctionnement.

En outre, la maintenance implique également la gestion des facteurs environnementaux tels que l'ombrage, qui peut réduire la production d'énergie dans certaines

zones des panneaux solaires. Cela peut nécessiter des ajustements dans l'orientation des panneaux ou des actions pour éliminer les obstacles à la lumière du soleil. En bref, la maintenance d'une installation photovoltaïque nécessite une approche holistique qui comprend l'inspection régulière, la surveillance continue et des mesures correctives promptes pour assurer un fonctionnement optimal du système sur le long terme.

III.2 Constituants principaux d'un système PV :

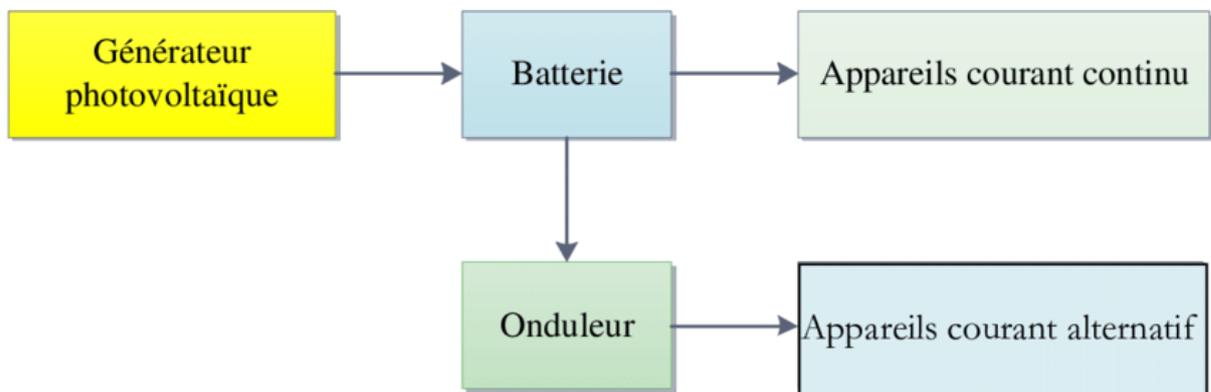


Figure. III.1 : Schéma synoptique du système photovoltaïque

Un système photovoltaïque est composé de plusieurs éléments clés qui travaillent ensemble pour convertir la lumière du soleil en électricité utilisable.

Le synoptique électrique d'un système PV connecté au réseau est composé de :

- **Générateur PV** : unité de production d'énergie électrique sous forme de courant continu.
- **Convertisseur** : également connu sous le nom d'onduleur solaire, est un composant essentiel d'un système photovoltaïque. Son rôle principal est de convertir le courant continu (DC) produit par les panneaux solaires en courant alternatif (AC) utilisable pour alimenter les appareils électriques dans les maisons, les bâtiments ou pour l'injection dans le réseau électrique.
- **Batterie** : Les batteries photovoltaïques jouent un rôle crucial dans le stockage de l'énergie produite par les panneaux solaires, permettant de l'utiliser lorsque la production est insuffisante, comme la nuit ou par temps nuageux. Ces batteries stockent l'électricité sous forme de courant continu (CC) et la libèrent lorsque nécessaire, contribuant ainsi à une

alimentation électrique stable et fiable. Les types courants de batteries photovoltaïques incluent les batteries au lithium-ion, les batteries au plomb-acide et les batteries à flux. Chacune de ces technologies offre des avantages spécifiques en termes de durée de vie, de coût et de performance. Un bon dimensionnement et un entretien régulier des batteries sont essentiels pour maximiser leur efficacité et leur durée de vie.

- Câblage et boîte de jonction : Dans un système photovoltaïque, le câblage et les boîtes de jonction jouent un rôle crucial dans la connectivité sécurisée et efficace des différents composants du système. En général, ils assurent une connexion sécurisée et fiable entre les différents composants du système. Ils contribuent à la performance, à la durabilité et à la sécurité globale du système photovoltaïque.

- Système de protection : Dans une installation photovoltaïque, la sécurité est une priorité absolue, et divers systèmes de protection sont intégrés pour garantir un fonctionnement fiable et sécurisé. Ces systèmes comprennent des dispositifs de protection contre les surtensions, les surintensités et les arcs électriques. Les parafoudres sont utilisés pour protéger contre les surtensions, tandis que les disjoncteurs et les fusibles préviennent les surintensités et les courts-circuits. De plus, les interrupteurs différentiels à courant résiduel (DDR) offrent une protection contre les arcs électriques dangereux. Ces dispositifs agissent ensemble pour minimiser les risques pour la sécurité des personnes et des équipements, assurant ainsi une exploitation sûre et efficace de l'installation photovoltaïque.

III.3 Problèmes rencontrés dans un système photovoltaïque :



Figure III.2 : dégradation des panneaux solaires

Les installations photovoltaïques peuvent être confrontées à diverses difficultés qui affectent leur performance, leur fiabilité et leur rentabilité à long terme

Nous allons explorer les principaux problèmes auxquels sont confrontés les systèmes photovoltaïques. Cela comprend les problèmes liés à la dégradation des composants, tels que les panneaux solaires, les onduleurs et les câbles électriques, qui peuvent affecter la production d'électricité. De plus, nous aborderons les défis liés à la conception, à l'installation et à la maintenance des systèmes photovoltaïques, tels que les erreurs de dimensionnement, les problèmes de connectivité et les obstacles à la performance causés par l'ombrage ou les conditions environnementales défavorables.

En comprenant les problèmes potentiels auxquels sont confrontés les systèmes photovoltaïques, nous serons mieux équipés pour développer des stratégies d'optimisation et de résolution de problèmes afin de maximiser la durabilité et l'efficacité de cette source d'énergie renouvelable cruciale. Cette exploration nous permettra de mieux comprendre les défis et les opportunités associés à l'intégration des installations photovoltaïques dans le paysage énergétique mondial en constante évolution

Voici une liste des problèmes que vous pouvez rencontrer :

III.3.1 Les problèmes d'onduleur photovoltaïque :

Ce problème est en tête de liste Lorsque vous constatez une anomalie d'origine électrique, le problème provient souvent de votre onduleur photovoltaïque. Son dysfonctionnement est la cause n°1 des dépannages solaires. Constitué en grande majorité de composants électroniques, votre onduleur peut parfois mal résister aux intempéries. Voici les soucis les plus fréquents que vous pouvez rencontrer avec votre onduleur

III.3.1.1 Onduleur qui clignote rouge :

Lorsque le voyant de votre onduleur clignote rouge, c'est qu'il est éteint. La raison est le plus souvent un problème de connectique, qui entraîne l'arrêt de son alimentation électrique. Il peut s'agir par exemple d'un câble mal connecté. S'agissant de composants électriques, il est préférable pour vous de ne pas tenter de le réparer seul et d'appeler l'installateur qui s'est chargé de la pose de vos panneaux solaires. Celui-ci peut effectuer des vérifications et remettre votre installation en route. Sachez qu'en cas de dysfonctionnement interne de votre onduleur, vous êtes normalement protégé par la garantie du fabricant.



Figure III.3 : onduleur qui clignote rouge

III.3.1.2 Onduleur en surtension :

Une surtension peut survenir pour plusieurs raisons, notamment en raison de fluctuations de tension dans le réseau électrique, de problèmes internes à l'onduleur ou de conditions météorologiques extrêmes. La surtension peut endommager les composants électroniques sensibles de l'onduleur, tels que les transistors de puissance et les condensateurs. Cela peut entraîner une défaillance partielle ou totale de l'onduleur, interrompant ainsi la production d'électricité du système photovoltaïque.

Bien que ces appareils soient conçus pour résister à des tensions importantes, une surtension trop forte peut faire griller les circuits internes de l'onduleur.

III.3.1.3 Onduleur qui ne fonctionne plus :

Il peut arriver que votre onduleur ne fonctionne plus, sans raison apparente. Dans ce cas, inutile de tergiverser : vous devez faire appel à un professionnel. En effet, si vous essayez de trouver tout seul la solution à votre problème d'onduleur, vous pouvez vous mettre en danger en raison des composants électriques qui entourent l'appareil. Les mesures de sécurité vont donc être respectées, et le diagnostic sera de qualité [22]

III.3.2 Les problèmes liés aux panneaux solaires :

Si vous avez vérifié votre onduleur et que rien ne semble anormal dessus, le problème vient peut-être directement de vos panneaux photovoltaïques. Ces derniers peuvent rencontrer divers problèmes qui compromettent leur performance et leur efficacité à convertir la lumière du soleil en électricité. Parmi les problèmes courants rencontrés avec les panneaux solaires, on peut citer :

III.3.2.1 Panneau solaire qui baisse en rendement :

C'est la panne la plus fréquente liée aux panneaux solaires. Si vous constatez que votre production d'électricité a diminué mais que l'onduleur fonctionne correctement, le problème de vos panneaux solaires peut alors provenir :

- ✓ D'un simple souci d'ombrage
- ✓ Votre installation peut être partiellement recouverte de feuilles ou de branches.
- ✓ La végétation peut avoir poussé fortement, et sans que vous vous en rendiez compte, recouvre désormais vos panneaux.
- ✓ D'un problème d'étanchéité.
- ✓ Vos panneaux sont peut-être endommagés par des infiltrations.
- ✓ D'un encrassement de vos modules.
- ✓ Nous reviendrons plus en détail sur ce point.

Si vous avez vérifié tous ces points, mais que votre rendement continue à être très faible, vous êtes en droit de vous poser des questions. En effet, si vous constatez que votre production solaire est insuffisante par rapport à ce qui a été mentionné sur le devis, votre installation a peut-être un défaut caché ou une malfaçon.

III.3.2.2 Jaunissement et brunissement « la décoloration » :



Figure. III.4 : décoloration des panneaux solaires

Les panneaux solaires photovoltaïques sont composés d'une multitude de couches comparables à un mille feuilles. Il y a en premier lieu, le verre de protection transparent (verre, Pyrex, téflon...). Ensuite, une feuille transparente en général de l'EVA (Ethylène

Vinyle Acétate) dont le rôle essentiel est d'assurer une isolation galvanique (électrique). La cellule de silicium Une seconde feuille transparente d'EVA Sous l'effet des UV et de l'humidité l'EVA se décompose et crée de l'acide acétique – dit encore acide éthanoïque qui diminue le pH du complexe EVAPVF (polyvinyle fluorite) et augmente ainsi la corrosion. Ces désordres se manifestent par le jaunissement des panneaux solaires qui restent à ce stade de nature principalement esthétiques. « Ce jaunissement pourrait être un problème s'il provoquera un manque d'adhérence entre la matière d'enrobage polymère et les cellules du module » Au stade du brunissement (browning) la corrosion a commencé à faire son effet : les cellules photovoltaïques sont attaquées et risquent de perdre de leur puissance. Des études ont déterminé que la cause principale de ce défaut est l'exposition au rayonnement UV combinée avec l'eau à des températures supérieures à 50 Co ce qui provoque une modification de la structure chimique du polymère.

Donc cela entraînera une certaine perte de transmission et donc une puissance réduite. La décoloration est due à la décoloration de l'oxygène, donc avec une feuille arrière respirant, le centre des cellules se décolore tandis que les anneaux extérieurs restent clairs. Cela peut se produire en raison d'une mauvaise réticulation et / ou d'additifs dans la formulation d'EVA.

III.3.2.3 Panneau solaire endommagé :

Les panneaux solaires sont conçus pour résister aux aléas climatiques, y compris les fortes grêles. Cependant, si vous constatez que ceux-ci ont été abîmés à la suite d'un choc trop violent, appelez rapidement un professionnel afin qu'il puisse évaluer les conséquences de cet impact sur votre installation. Ce qui fait que Les dommages physiques tels que les fissures, les éclats ou les déformations sur la surface du panneau solaire peuvent entraîner une diminution de la performance du système photovoltaïque. Ces dommages peuvent être causés par des conditions environnementales extrêmes, des impacts mécaniques ou une mauvaise manipulation lors de l'installation ou de la maintenance. Lorsqu'un panneau solaire est endommagé, il est essentiel de procéder à une évaluation approfondie pour déterminer l'ampleur des dommages et décider s'il doit être réparé ou remplacé. Une action rapide est nécessaire pour minimiser les pertes de production d'électricité et maintenir la performance globale du système solaire.

III.3.2.4 Panneau solaire encrassé dans certaines régions :



Figure III.5 : panneaux solaires encrassée

Vos panneaux solaires peuvent s'encrasser avec le temps. C'est le cas des zones géographiques exposées aux matières volatiles comme le sable, les fines poussières, etc. Si c'est votre cas, un nettoyage minutieux de vos panneaux devrait leur permettre de produire davantage d'électricité.

Vous pouvez procéder au nettoyage de vos panneaux solaires vous-même, uniquement si vos panneaux sont accessibles avec un balai télescopique. Dans ce cas, prenez un chiffon doux et de l'eau tiède. S'ils ne sont pas accessibles, ne montez pas sur votre toit par mesure de sécurité. Faites appel à un professionnel, qui utilisera tout le matériel nécessaire pour procéder au nettoyage de vos panneaux sans prendre de risque.

III.3.2.5 Panneau solaire qui prend feu :



Figure III.6 : incendie lié aux panneaux solaires

Les panneaux solaires en eux-mêmes ne peuvent pas provoquer d'incendie. En revanche, il peut arriver, dans de très rares cas et uniquement si l'installation n'est pas correctement effectuée, qu'un feu se déclare. Pour éviter qu'une telle chose se produise dans votre habitation, il est important que votre installation soit effectuée par des professionnels qualifiés et labellisés. Il en va de la sécurité de votre logement.

III.3.2.6 Panneau solaire qui ne fonctionne plus :

Différentes raisons peuvent être à l'origine d'un problème avec vos panneaux solaires. Même si le plus souvent, le défaut provient de l'onduleur solaire, il peut arriver que les panneaux en eux-mêmes subissent une panne ou une baisse de rendement. Certains problèmes peuvent être résolus par vos soins, mais bien souvent, vous devez vous tourner vers un professionnel afin d'établir un diagnostic précis de ce qui cause votre problème de panneaux. Le plus important à retenir est que vous ne devez jamais vous mettre dans une situation dangereuse pour réparer vos panneaux solaires. [23]

III .3.3 Défaut de décalage et d'ombrage :

Les erreurs d'inadéquation et d'ombrage sont des erreurs courantes dans les systèmes photovoltaïques qui peuvent significativement affecter leur performance et leur rendement énergétique.

III.3.3.1 Décalage :

Un défaut de « mésappariement » est un défaut Supplémentaire par le regroupement des cellules. Les fonctions IV ne sont pas les mêmes. L'échec de l'ombrage est le cas En particulier, l'absence de mésappariements est due à leur présence entraînant une diminution du rayonnement solaire. Reçu par les cellules. Les changements de ces paramètres sont dus à deux facteurs principaux. Premièrement, cela peut permettre aux cellules d'avoir des propriétés physiques différentes Tolérance de fabrication. Seule la tolérance de puissance du module est donnée par Fabricant de la cellule ou du module. Peut varier de +/- 3% à +/- 5% selon Fabricant. Deuxièmement, les cellules photovoltaïques peuvent être exposées à des conditions de fonctionnement Différentes améliorations par différentes erreurs.

Cela peut être dû à d'autres raisons :

- ✓ **Variations de Fabrication** : Même des panneaux solaires identiques provenant du même fabricant peuvent avoir de légères différences de performance.
- ✓ **Viellissement Différentiel** : Avec le temps, les panneaux solaires peuvent se dégrader à des taux différents.
- ✓ **Différences d'Orientations et d'Inclinaison** : Si les panneaux ne sont pas installés avec le même angle ou orientation, ils recevront différentes quantités de lumière solaire.
- ✓ **Températures Variables** : Les panneaux peuvent fonctionner à différentes températures en raison de la circulation d'air variable ou de la chaleur localisée, affectant leur efficacité.
- ✓ **Défaillances des Composants** : Les problèmes liés aux connexions électriques, aux câbles ou aux diodes de contournement peuvent également causer des défauts de décalage.

III.3.3.2 Ombrage :

Il existe deux types d'ombrage : l'ombrage total et l'ombrage partiel. L'ombrage complet empêche tout rayonnement d'atteindre les cellules photovoltaïques, d'autre part ombrage partiel empêche uniquement le rayonnement d'atteindre une partie de la cellule photovoltaïque (une cheminée, un arbre, de la poussière, de la neige...)

L'expression "ombrage partiel photovoltaïque" se réfère aux situations où une partie des panneaux solaires d'un système photovoltaïque est ombragée, réduisant ainsi la production d'électricité. Les ombres peuvent être causées par des objets tels que des arbres, des bâtiments ou des structures environnantes, ou même par des nuages passagers.

Lorsqu'une partie des panneaux est ombragée, cela crée un déséquilibre dans le système. Les panneaux ombragés produisent moins d'électricité, ce qui peut entraîner une baisse de la performance globale du système photovoltaïque. Dans les cas extrêmes, un ombrage important peut même endommager les panneaux. Pour minimiser l'impact de l'ombrage partiel sur la production d'électricité, il est important de concevoir et d'installer le système photovoltaïque de manière à réduire autant que possible les sources potentielles d'ombrage. Cela peut inclure l'orientation des panneaux, l'installation de dispositifs anti-ombrage tels que des combrières, ou même l'utilisation de micro-onduleurs ou d'optimiseurs de puissance qui permettent à chaque panneau de fonctionner indépendamment des autres.

Haut du formulaire

Chaque générateur photovoltaïque dispose d'un point de fonctionnement unique sur lequel il peut délivrer la puissance électrique maximale possible, appelée point de puissance maximale (MPP, point de puissance maximale). Cette puissance dépend principalement de l'intensité du rayonnement. Si les différents modules d'un "String" au sein d'un générateur photovoltaïque sont dans l'ombre, ses propriétés l'électricité sont clairement modifiées : le générateur photovoltaïque a maintenant différents points de travail "favorables". Les cellules qui reçoivent moins d'énergie doivent dissiper l'excès de courant qu'elles fournissent. La plupart allumés, donc une surchauffe (point haut) se produit lorsque le module n'est pas allumé Il est correctement protégé. Pour éviter la surchauffe des cellules et les points chauds, et Dommages permanents, diode de protection attachée au générateur PV haute puissance (diode de dérivation). Cependant, ces garanties sont payantes en termes de pertes. [24]

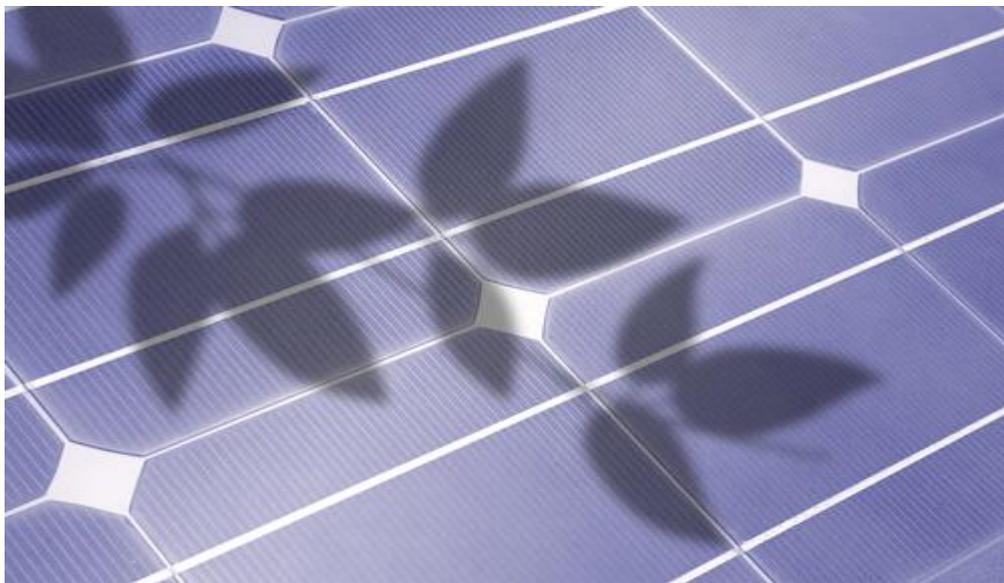


Figure III.7 : Ombrage partiel

III.3.4 défauts dans la batterie :

Les batteries photovoltaïques peuvent présenter divers défauts qui affectent leur performance et leur durée de vie. Parmi les défauts les plus courants, on trouve :

1. **Sulfatation** : Ce défaut survient principalement dans les batteries au plomb-acide, où des cristaux de sulfate de plomb se forment sur les plaques de la batterie, réduisant ainsi sa capacité de stockage.

2. **Cyclage Incomplet** : Un cycle de charge/décharge incomplet peut entraîner une diminution progressive de la capacité de la batterie, un phénomène courant dans les batteries lithium-ion.

3. **Déséquilibre Cellulaire** : Dans les batteries composées de plusieurs cellules, un déséquilibre peut se produire si certaines cellules se chargent ou se déchargent plus rapidement que d'autres, ce qui peut endommager les cellules plus faibles.

4. **Surchauffe** : Une utilisation excessive ou une mauvaise ventilation peut entraîner une surchauffe des batteries, réduisant leur efficacité et pouvant provoquer des dommages irréversibles ou même des risques d'incendie.

5. **Dégradation Chimique** : Avec le temps, les réactions chimiques internes peuvent dégrader les composants de la batterie, réduisant sa capacité et son efficacité.

6. **Autodécharge** : Toutes les batteries perdent une partie de leur charge même lorsqu'elles ne sont pas utilisées, un phénomène qui peut être plus prononcé dans certaines technologies de batterie.

Ces défauts peuvent être atténués par un entretien régulier, une surveillance constante des paramètres de la batterie et l'utilisation de systèmes de gestion de la batterie (BMS) pour équilibrer les cellules et prévenir les conditions extrêmes.

III.4. Diagnostique et défauts d'une installation photovoltaïque :

Les défauts que l'on peut retrouver sur une installation photovoltaïque, surviennent autant lors de sa conception, de son installation, que lors de son exploitation. Ils sont alors responsables d'une baisse voire d'un arrêt total de la production photovoltaïque. Une bonne

connaissance des différents défauts possibles permet d'assurer une bonne maintenance du système photovoltaïque.

Les défauts sont classifiés selon la fonction des différents composants constituant l'installation PV. Sept groupes de défauts ont été formés :

- ✓ Défauts dans le générateur photovoltaïque
- ✓ Défauts dans la boîte de jonction
- ✓ Défauts dans le système de câblage
- ✓ Défauts dans le système de protection
- ✓ Défauts de l'onduleur
- ✓ Défauts dans le système d'acquisition des données
- ✓ Les tableaux ont été établis en considérant le type du défaut, Et sa conséquence principale [25]

III.4.1 Défauts dans le générateur photovoltaïque :

Tableau III.1 : Défauts du générateur photovoltaïque

Défaut	Conséquences
Salissure (pollution, sable, neige)	Perte de puissance
Inversion des liaisons de sortie	Module mal câblé, diminution des performances
Air marin	Corrosion
Dégradation des modules par vandalisme	Diminution des performances, Non fonctionnement de l'installation
Vol des modules	Non fonctionnement de l'installation
Mauvaise orientation et/ou inclinaison des modules	Ombrage, diminution des performances
Couple galvanique dû au mélange de matériau de la jonction module/support	Corrosion
Module mal ou pas ventilé	Échauffement

Module mal fixé	Déplacement du module, diminution des performances
Modules non câblés	Diminution des performances
Fissure	Perte d'étanchéité, détérioration des cellules, diminution des performances
Rouille par infiltration d'eau	Perte d'étanchéité, détérioration des cellules
Mauvaise isolation entre modules et onduleur	Court-circuit, destruction du module, incendie
Détérioration des joints d'étanchéité	Perte d'étanchéité, détérioration des cellules
Déformation du cadre des modules	Infiltration d'eau
Corrosion du cadre des modules	Perte d'étanchéité, détérioration des cellules
Délaminage	Diminution des performances, échauffement
Foudre	Détérioration des modules
Tempête	Module arraché, cassé
Pénétration de l'humidité	Corrosion, perte d'adhérence et d'isolation, diminution de la résistance de CC à la terre
Faiblesse au vent des structures	Module arraché, cassé
Foudre sur l'installation	Destruction des modules
Modules de performances différentes	Diminution des performances du champ
Sortie par le bas des boîtes de connexions impossible	Mauvais câblage
Bouchons de presse-étoupe manquant sur la boîte de connexion	Pénétration d'eau, corrosion des liaisons
Boîte de connexion montée à l'envers	Entrée d'eau dans le boîtier par le presse-étoupe
Ombrage partiel (feuilles d'arbre, déjections)	détérioration de cellules
Dégradation de l'encapsulant à cause des ultraviolets, EVA jaunissant	Absorbe les photons qui n'arrivent plus jusqu'à la cellule, diminution des performances
Augmentation de la résistance série due au cycle thermique	Diminution des performances
Détérioration de la couche antireflet	Diminution des performances

Dégradation à cause de la lumière	Diminution des performances, surtension, destruction de diodes
Dégradation à cause de la chaleur	Diminution des performances, échauffement, détérioration des joints
Inclinaison des modules trop faible	Stagnation d'eau, dépôt de terre, prolifération de champignons, problème d'étanchéité
Dégradation des interconnexions	Détérioration des joints, diminution des performances, augmentation de la résistance série, de la chaleur
Support mécanique des modules inadéquat ou mal posé	Efforts mécaniques importants sur les modules
Mauvaise résistance mécanique des supports des modules	Déformation du support
Diffusion du phosphore (dopant) vers la surface	Perte d'adhérence de l'encapsulant
Important courant de fuite	Échauffement
Échauffement des modules par la boîte de connexion	Diminution des performances
Nid d'insectes sur les modules	Diminution des performances
Panneaux inaccessibles	Nettoyage impossible
Module produisant moins que prévu	Diminution des performances
Apparition de bulles à la surface des modules	Diminution des performances

III.4.2 Défauts dans la boîte de jonction :

Tableau III.2 : Défauts dans la boîte de jonction

Défaut	Conséquences
Absence de parafoudre ou protection foudre inadaptée	Destruction en cas de foudre

Presse-étoupe mal serré	Corrosion des contacts, rupture du circuit électrique
Liaison de mise à la terre non fixée ou sectionnée	sectionnée Pas de mise à la terre
Boîte de jonction sans presse-étoupe	Pas d'étanchéité, corrosion des contacts, rupture du circuit électrique
Presse-étoupe en caoutchouc	Corrosion des contacts, rupture du circuit électrique
Infiltration d'eau par les vis de fixation	Corrosion des contacts, rupture du circuit électrique
Boîte de jonction non repérée	Problème pour contrôle et maintenance
Déconnexion des soudures	Arc électrique, incendie, diminution des performances
Boîtier infesté d'insectes	Rupture du circuit électrique
Fourreaux non prévus pour usage extérieur	Destruction de la protection
Liaison sans protection	Destruction de la liaison
Pénétration de l'eau ou de l'humidité	Corrosion des connexions, des diodes, des bornes, incendie

III.4.3 Défaits dans le système de câblage :

Tableau III.3 : Défaits du système de câblage

Défaut	Conséquences
Mauvais dimensionnement des câbles	Chute de tension >3 %, échauffement
Connexion desserrée ou cassée	Arc électrique, incendie, destruction de la boîte de jonction, destruction des diodes

Principe de câblage en goutte d'eau non respecté	Mauvais câblage
Câbles inter module de section trop faible par rapport au presse-étoupe	Corrosion des contacts, rupture du circuit électrique
Bornes rouillées	Faux contacts, circuit ouvert, arc électrique
Câbles non fixés	Boucle de câblage, circuit ouvert
Mauvais câblage	Court-circuit, claquage des diodes anti-retour, destruction des connecteurs (circuit ouvert), aléas de fonctionnement sur disjoncteur
Toron	Boucle électromagnétique
Câbles d'arrivée des sous-champs entamés lors du dénudé	Mauvais câblage, faux contacts, circuit ouvert, arc électrique
Absence de graisse de silicone	Humidité
Câble mal dénudé	Mauvais câblage, faux contacts, circuit ouvert, arc électrique
Câble rongé par des rats	Faux contacts, circuit ouvert, arc électrique
Modification du câblage par l'utilisateur non compétent	Mauvais câblage, faux contacts, circuit ouvert, arc électrique
Boîte de connexion décollée	Connexion des cellules en série endommagée

III.4.4 Défauts dans le système de protection :

Tableau III.4 : Défauts du système de protection

Défaut	Conséquences
--------	--------------

Protections inappropriées ou mal dimensionnées	Court-circuit, hot spot, incendie, arrêt de l'installation
Interrupteur, disjoncteur inapproprié	Arc électrique, incendie, destruction à l'ouverture
Disjoncteur différentiel non conforme à la norme	Non déclenchement, tension entre neutre et terre
Armoire électrique posée à même le sol à l'extérieur	Dysfonctionnement en cas de pluie
Parafoudre non connecté à la terre	Pas de protection
Impossibilité de déconnecter les modules par branche	Problème de sécurité
Pas de possibilités de sectionnement extérieur au coffret	Problème de sécurité
Mauvaise dissipation de la chaleur des diodes	Échauffement
Sous dimensionnement des diodes de bypass	Hot spot, destruction des diodes, échauffement de la boîte de jonction
Absence de protection contre les courants inverses	Hot spot, destruction des diodes, échauffement de la boîte de jonction
Diode mal connectée	Non fonctionnement des diodes, absence de protection contre les courants inverses
Inversion de la polarité des diodes au montage	Non fonctionnement des diodes, court-circuit, hot spot
Phénomènes de résonance	Non fonctionnement des fusibles et des protections de surtension
Dégradation à cause de la lumière	Non fonctionnement des diodes de bypass
Échauffement des diodes placées dans un endroit mal ventilé	Température de destruction atteinte
Vieillessement des disjoncteurs	Non fonctionnement des disjoncteurs

III.4.5 Défauts de l'onduleur :

Tableau III.5 : Défauts de l'onduleur

Défaut	Conséquences

Dégradation à cause de la chaleur	Détérioration de l'onduleur, des connexions
Faux contact	Arrêt de l'onduleur
Surtension	Déconnexion de l'onduleur
Fusible fondu	Arrêt de l'onduleur
Foudre sur le réseau	Surtension, destruction de l'onduleur
Tension du générateur inférieure à la limite basse de l'onduleur	Déconnexion de l'onduleur
Onduleur sous dimensionné	Destruction de l'onduleur
Bobine des filtres, thyristors, capacités en défaut	Arrêt de l'onduleur
Problème d'interface avec le réseau	Découplage de l'onduleur
Défaut d'isolement	Détérioration de l'onduleur
Surchauffe des onduleurs	Diminution des performances
Onduleur installé dans un lieu non étanche	Panne de l'onduleur
Onduleur mal fixé	Chute de l'onduleur
Onduleur surdimensionné	Perte de puissance, diminution des performances
Visserie et bouton de commande oxydés	Réglage impossible
Mauvais choix de la tension nominale d'entrée	Diminution des performances
Pile de sauvegarde HS	Perte de données
Témoins de défaut d'intensité allumé en permanence	Mauvaise information sur l'intensité
Onduleur non mis à la terre	Disjoncteur différentiel non actif
Perte de la mémoire (mauvaise manipulation du technicien)	Perte de données
Afficheur de cristaux liquide endommagé ou illisible	Pas d'information sur le fonctionnement

III.4.6 Défauts dans le système d'acquisition des données :

Tableau III.6 : Défauts dans le système d'acquisition des données

Défaut	Conséquences
Coupure de courant	Perte de données
Sonde de température non câblée	Mesure impossible
Sonde d'ensoleillement non câblée	Mesure impossible
Défaut de paramétrage	Enregistrement de fausses données
Mauvais câblage des shunts de mesure	Mesure impossible ou erronée
Afficheur de données mal placé (trop haut)	Données non visibles
Carte électronique mal positionnée	Touches inactives, défaut de commande
Non configuré pour l'acquisition des données	Pas de donnée enregistrée
Armoire fermée par le service de maintenance ou présence d'un code	Lecture des données par l'exploitant impossible
Bornier de mesures et de sonde de température trop proches	Câblage difficile, risque de court-circuit
Acquisition de données vierge	Aucune information enregistrée
Mesure de données non nulles alors que système PV à l'arrêt	Données non fiables

III.4.7 Défauts dans la batterie :

Le plus souvent, la santé de la batterie décline lentement au fil des cycles de charge/décharge, ce qui se traduit par de moins en moins d'autonomie, les appareils se coupent pendant la nuit alors qu'il n'y a aucune nouvelle consommation par exemple. C'est une usure normale, les autres cas sont les suivants :

1. Plus de tension aux bornes de la batterie ou inférieure à 7V / 14V / 28V pour une batterie 12V / 24V / 48V (un élément interne est défectueux).
2. Après une charge complète à 100%, la tension chute rapidement (la batterie ne tient plus la charge).
3. Même après plusieurs heures de charge la tension de la batterie ne monte pas (la batterie ne stock plus l'énergie).

Défaut	Conséquences
<u>Fuite acide à cause d'un défaut de fabrication</u> qui a dû avoir lieu au moment de la soudure du couvercle et du bac. L'acide peut également fuir par le joint de la borne. Le terme professionnel utilisé pour ce phénomène est : suintement. Et enfin, l'acide peut s'écouler des bouchons de remplissage.	L'acide peut également fuir par le joint de la borne. Il est très corrosif et peut occasionner de graves dégâts à son environnement.
La corrosion des grilles à cause d'une surcharge structurelle ou d'une tension de charge trop élevée ou d'un facteur de charge trop élevé. La température joue également un rôle important. Des températures élevées vont accélérer la corrosion des grilles, alors que des températures modérées prolongeront la durée de vie de la batterie.	le plomb de la grille positive est transformé en dioxyde de plomb. Comme résultat de cette transformation, la conductivité électrique et la force mécanique déclinent progressivement jusqu'à ce que les plaques se plient. Ceci est un processus inéluctable, dont il a été tenu compte lors de la conception de la batterie.
<u>Corrosion des bornes</u> La corrosion des parties métalliques d'une batterie résulte d'une réaction chimique entre les bornes et les connexions.	une mauvaise conductivité électrique.
<u>Sulfatation</u>	boucher les pores de la masse active et recouvrir la surface de la plaque, rendant peu à peu la charge impossible. cest une perte permanente de capacité
<u>Stratification</u> Dans une batterie plomb acide, l'électrolyte est un mélange d'eau et d'acide sulfurique. La stratification a lieu lorsque l'eau et l'acide se séparent, laissant le lourd acide se concentrer au fond du bac et amenant la partie haute des éléments à s'appauvrir en acide.	à partie supérieure de la plaque va sulfater à cause de la réduction de l'électrolyte et la partie inférieure va subir une importante perte de masse active ainsi que la corrosion des grilles à cause de la surcharge !
Lorsqu'elle atteint son état de charge maximal, toute batterie plomb/acide produit du gaz oxyhydrogène explosif, qui	toute étincelle peut provoquer une explosion, qui endommagera la batterie et son environnement et qui projettera de l'acide sur ce même environnement

s'échappe par les trous d'aération de la batterie	
---	--

III. 4.8 Contrôler l'état de sa batterie :

Les batteries solaires sont des composants clés des systèmes photovoltaïques, et leur entretien adéquat est essentiel pour assurer leur durée de vie et leur performance optimales.

Le tout premier élément à vérifier est l'état général extérieur de l'enveloppe de la batterie, il ne doit pas y avoir de choc visible ou de trou qui pourrait laisser sortir l'électrolyte liquide ou sous forme de gaz. Les plots (+) et (-) sont scellés et ne doivent avoir aucun jeu.

L'indicateur principal d'état de charge d'une batterie est sa tension en Volts (V), en mesurant simplement avec un testeur, voltmètre ou multimètre, on peut contrôler la quantité d'énergie disponible.

Pour une batterie dite "12V" on considérera qu'elle est chargée à partir de > 13V, à 12V elle est environ à 50% de décharge et en dessous de < 11V elle est complètement déchargée, il faut arrêter de consommer dessus et la recharger entièrement à 100% sous peine de l'endommager définitivement.

Pour un parc batterie en 24V, les tensions ci-dessus sont doublées, même logique pour un parc en 48V (tension x 4).

Remarque : Attention toutefois, une tension élevée indique le bon état de charge, mais ne garantit pas que la batterie soit encore bonne, cette tension peut s'écrouler dès lors que l'on consomme sur la batterie et indiquer donc qu'elle est en fin de vie.

Voici quelque conseil pratique pour l'entretien et le dépannage de vos batteries solaires :

1. **Vérifiez le câblage et la tension** : Lorsque vous installez vos batteries solaires, assurez-vous que le câblage est effectué conformément aux instructions du fabricant, que ce soit en série ou en parallèle. Utilisez un voltmètre pour vérifier que la tension correspond à celle requise par vos appareils (12V/24V/48V).
2. **Contrôlez les câbles de liaison et le raccordement** : Examinez attentivement les câbles de liaison pour vous assurer qu'ils sont en bon état, sans coupures ni fils dénudés. Vérifiez également que les raccordements sont intacts et correctement réalisés. Assurez-vous que les câbles ne sont pas tendus et que les cosses sont bien serrées.
3. **Astuces pour les batteries au lithium** : Si vous utilisez des batteries au lithium, référez-vous au manuel des batteries pour connaître les spécificités de raccordement. Vérifiez que les câbles RJ45 sont correctement connectés aux bons ports de la batterie maîtresse.
4. **Surveillez la capacité de charge** : Gardez un œil sur la capacité de charge de vos batteries solaires. Si vous constatez une diminution significative de leur performance ou une réduction de leur autonomie, cela peut indiquer un problème. Suivez les recommandations du fabricant concernant les cycles de charge et la durée de vie.

5. **Évitez les températures extrêmes** : Les batteries solaires sont sensibles aux températures extrêmes. Évitez de les exposer à des températures trop élevées ou trop basses, car cela peut réduire leur durée de vie et leur efficacité. Placez les batteries dans un endroit bien ventilé et à l'abri des variations de température si possible.
6. **Faites des contrôles réguliers** : Effectuez des contrôles réguliers de vos batteries solaires pour détecter tout problème potentiel. Vérifiez visuellement l'état des batteries, des câbles et des raccordements. Si vous observez des signes de détérioration ou des anomalies, n'hésitez pas à faire appel à nos techniciens.

III.5 Maintenance du système solaire photovoltaïque :

La maintenance est également une partie importante du système PV. Étant donné que tous les composants du système sont cassés, le système ne peut pas bien fonctionner, et le système est assez énorme, donc les travailleurs devraient effectuer la maintenance régulièrement pour vous assurer que le système peut fonctionner comme prévu. S'il n'y a pas maintenance du système, lorsqu'il y a des problèmes, cela coûtera trop cher de le réparer et peut-être prendre trop de temps pour le faire. Un entretien régulier peut l'éviter. [26]

La maintenance régulière d'un système solaire photovoltaïque est cruciale pour garantir son efficacité et sa longévité. Cela implique principalement le nettoyage périodique des panneaux solaires pour éliminer la saleté et les débris, ainsi que l'inspection des connexions électriques pour détecter les signes de corrosion ou de dommages. La surveillance continue des performances du système permet de repérer les problèmes potentiels rapidement. En effectuant ces tâches de manière proactive, on peut minimiser les interruptions et maximiser la production d'électricité du système.

III.5.1 Conditions de réglage :

Il est crucial d'éviter les ombres et de maintenir les panneaux propres. Un entretien régulier des composants électriques, comme les onduleurs et le câblage, est essentiel. L'installation de systèmes de surveillance permet de suivre la performance en temps réel et d'effectuer des ajustements saisonniers pour optimiser l'angle des panneaux. Enfin, il est important de respecter les réglementations locales et les normes de sécurité.

Les facteurs de conception du système solaire photovoltaïque sont les suivants :

1. Nécessité de tenir compte de l'utilisation des lieux des systèmes solaires photovoltaïques et des conditions de rayonnement solaire ;
2. Nécessité d'examiner la quantité de puissance de charge qui doit être transportée par le système solaire photovoltaïque ;
3. Pour la tension de sortie du système, l'utilisation d'une alimentation CC ou CA doit être envisagée ;
4. Le nombre d'heures par jour dont les systèmes ont besoin pour fonctionner ;

5. S'il n'y a pas de lumière solaire par temps de pluie, combien de jours le système doit-il fournir en continu ?

6. Il convient de déterminer si le cas de la charge est purement résistif, capacitif ou inductif, la taille du courant de démarrage.

III.5.2 Etablir un bon système de gestion des documents techniques :

1. Établir un système pour la conception des équipements de la centrale électrique et les dessins de construction et les fichiers de documents techniques.

2. Établir un système pour les systèmes de gestion de l'information des usines.

3. Établir un système pour l'exploitation des centrales électriques des archives.

4. Établir un système d'analyse des opérations.

Chaque station doit constituer un dossier de documentation technique complet et la personne qui est responsable de la mise en place de la gestion des dossiers de technologie des centrales électriques pour fournir un support technique solide des données sous-jacentes.

III. 5.3 Entretien des composants :



Figure III.8 : entretien de l'installation PV

Dans les zones de sable plus vastes, essayer périodiquement les composants du système pour s'assurer que le système peut travailler correctement. Essayez la surface des composants avec un chiffon doux, n'utilisez pas ceux qui sont durs et tissu rugueux. Et

vérifiez régulièrement les différents composants et le câblage, prenez des mesures préventives mesures. Prenez les notes après avoir vérifié le système en détail.

Donc L'entretien des composants d'un système photovoltaïque est essentiel pour assurer une performance optimale et prolonger la durée de vie du système.

III.5.3.1 Entretien des panneaux solaire :

- Inspection visuelle des panneaux solaire
- Nettoyage régulier avec de l'eau claire et une brosse douce pour éliminer la poussière et les débris ainsi que prévoir le contrôle de son installation à intervalle régulier

III.5.3.2 Entretien de l'onduleur :

Les onduleurs nécessitent une surveillance constante des indicateurs de performance et un nettoyage des grilles de ventilation pour prévenir la surchauffe.

- garder le local où se situe le ou les onduleurs propre
- dépoussiérer l'onduleur au niveau des entrées d'air, ses filtres, et s'assurer que les grilles de ventilations ne soient pas obstruées
- vérifier visuellement l'état général de l'onduleur
- vérifier le fonctionnement des Led témoins et des affichages
- vérifier que les câbles de connexion AC et DC sont correctement serrés
- vérifier qu'il n'y ait pas de trace d'échauffement et/ou de corrosions au niveau des connexions
- s'assurer du fonctionnement des ventilateurs
- contrôlez la pile
- vérifiez les dispositifs de coupure d'urgence de l'onduleur

III.5.3.3 Entretien des batteries :

Les batteries, si le système en est équipé, doivent être vérifiées pour le niveau d'électrolyte et les connexions nettoyées pour éviter la corrosion.

- nettoyer les bacs et la surface supérieure des batteries (enlever toute trace de saleté, de poussière et d'humidité)
- nettoyer les bornes et les connexions (éliminer les sels et les traces d'acide avec une éponge humide)
- graisser avec une graisse neutre les bornes de chaque élément
- vérifier le serrage des bornes
- vérifier la tenue des câbles et l'état des fusibles

- pour les batteries ouvertes, vérifier l'état et le niveau de l'électrolyte

III.5.3.4 : entretien des câbles :

• Les câbles et les connexions doivent être inspectés pour détecter toute usure ou dégradation

- Il est nécessaire de vérifier la stabilité de la structure de montage.
- surveillance régulière des données de production via un système de monitoring permet de détecter rapidement toute baisse de performance.

III.5.3.5 Entretien du système de protection électrique :

• vérifier le bon état des isolants et l'absence de dégâts causés par les animaux (rongeurs)

- vérifier le serrage des connexions
- contrôler l'état des parafoudres (des voyants, mécaniques ou lumineux, indiquent l'état des parafoudres : par exemple vert = en bon état, rouge = hors service)
- contrôler l'état des fusibles (à l'aide d'un testeur de fusibles ou d'un multimètre)
- manœuvrer les protections AC et contrôler le découplage de l'onduleur.
- manœuvrer les protections DC
- vérifier la continuité des liaisons équipotentielles (à l'aide d'un ohmmètre)
- mesurer les tensions de branche DC
- tester les dispositifs d'arrêt d'urgence
- mesurer l'isolement des câbles DC et AC

Donc un entretien diligent et régulier garantit un fonctionnement fiable et efficace du système photovoltaïque. Enfin, Faites le remplacement ou la réparation pour ceux composants en fonction de la situation réelle.

III.5.4 Former les ouvriers de maintenance :

La formation vise principalement deux aspects du personnel, l'un d'entre eux est la formation du personnel professionnel et technique pour ces problèmes majeurs et difficiles et la gestion de la maintenance des opérations. Et organiser ces personnes pour faire la formation professionnelle et faire des recherches sujettes spéciales.

Deuxièmement, la formation de ces opérateurs de système est importante, et la quasi-totalité de ces personnes sont les trucs locaux. Mais généralement, le personnel local n'aura pas trop de connaissances professionnelles en matière d'énergie solaire Photovoltaïque, ils doivent donc être formés avec les connaissances de base.

Ce qui fait que La formation des ouvriers de maintenance pour une installation photovoltaïque doit couvrir les aspects théoriques et pratiques essentiels pour garantir leur compétence et leur sécurité. Cela comprend une introduction aux principes de l'énergie solaire et aux composants des systèmes photovoltaïques, ainsi qu'une connaissance approfondie des normes de sécurité.

La formation pratique doit inclure l'installation, la configuration, l'entretien préventif, le dépannage et l'utilisation des outils spécialisés. L'évaluation continue et la certification assurent que les ouvriers maintiennent un haut niveau de compétence, indispensable pour la performance optimale et la durabilité des installations solaires.

III.6 Conclusion :

Ce chapitre a été principalement consacré à deux parties, la première partie concerne les principaux défauts et pannes d'un système PV. Dans la deuxième partie, nous avons fait une entrée à la maintenance de l'installation PV.

En conclusion, la maintenance régulière d'une installation photovoltaïque est essentielle pour garantir son efficacité, sa fiabilité et sa longévité. Un entretien rigoureux des panneaux solaires, des onduleurs, des batteries, des câblages et des structures de montage permet de prévenir les pannes, d'optimiser la production d'énergie et de prolonger la durée de vie de l'ensemble du système. En surveillant les indicateurs de performance et en tenant un journal de maintenance détaillé, il est possible de détecter rapidement et de résoudre les problèmes potentiels. Faire appel à des professionnels qualifiés pour les inspections et les réparations majeures assure également la sécurité et la performance optimale de l'installation. Par conséquent, investir du temps et des ressources dans la maintenance régulière d'un système photovoltaïque est une démarche judicieuse pour maximiser les avantages économiques et environnementaux de l'énergie solaire.

Chapitre IV :

Dimensionnement et simulation de système photovoltaïque

IV.1 Introduction :

L'importance d'étudier un projet d'installation photovoltaïque. Pour mettre en place cette installation photovoltaïque, il est nécessaire de procéder à des évaluations afin de choisir les éléments appropriés des systèmes photovoltaïques, qui seront déterminés en fonction de différentes exigences telles que l'ensoleillement et le profil de charge. Au cours de ce chapitre, une étude technique a été exposée concernant une Mosquée équipée. Il est nécessaire de vérifier la stabilité de la structure de montage.

L'étude a été réalisée en utilisant un logiciel de simulation de systèmes photovoltaïques appelé « PVSYST » développé par le Groupe de Physique Appliquée (GAP) de l'Université de Genève [27]. Son objectif est de cibler les architectes, les ingénieurs et les chercheurs, mais il peut également être instructif. Le programme dispose d'une aide intégrée qui décrit entièrement les processus et les modèles utilisés dans le programme. Son utilisation est particulièrement rentable car il vous accompagne tout au long du processus de développement du projet et vous permet d'importer des données météorologiques et personnelles provenant d'une dizaine de sources différentes grâce à PVSYST [28].

IV.2 présentation du profile de charge :

Afin de modéliser une installation photovoltaïque pour n'importe quelle structure, nous devons avoir une estimation adéquate des besoins de consommation journalière de la structure, qui dans notre cas est une mosquée située dans la Wilaya de Sidi Bel Abbas.

IV.3 situations géographiques :

Les informations sur l'irradiation de notre site ont été collectées en utilisant le logiciel PVGIS. La base de données climatique pour chaque site à travers le monde est incluse dans ce logiciel.



Figure IV.1 : Localisation de la wilaya de Sidi Bel Abbès avec PVGIS.

IV.4 Gisement solaire :

L'application en ligne gratuite PVGIS est un excellent outil de simulation qui permet de calculer gratuitement la production de systèmes photovoltaïques connectés au réseau en Europe et en Afrique (et également pour sites isolés).

A l'aide de son interface Google Maps intégrée, il est très facile d'obtenir les données de production d'un système PV à partir des données d'ensoleillement précises du site (intégrant notamment les masques lointains liés au relief, collines, montagnes).

Par ailleurs, PVGIS propose des cartes d'ensoleillement (irradiation en kWh/m²) et de température précises haute définition de toute l'Europe, l'Afrique et le Proche-Orient

IV.4.1 Influence de l'angle d'incidence :

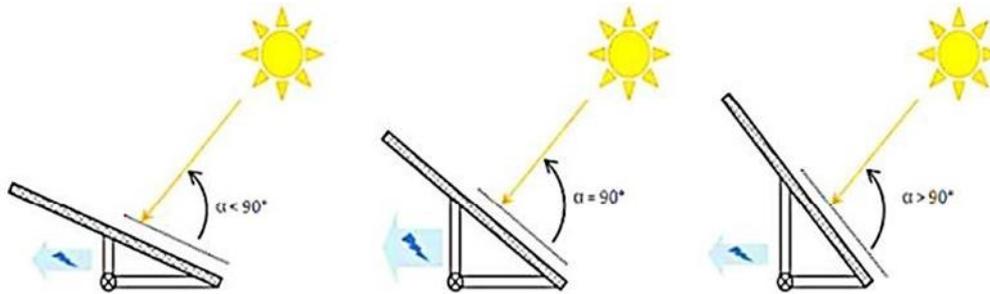


Figure IV.2 : Inclinaison par rapport aux rayons du soleil [28]

Les rayons du Soleil et le plan du panneau forment un angle appelé angle d'incidence. Elle a un impact significatif sur les performances du panneau. On le détermine en utilisant l'équation suivante :

$$R = \sin \beta \times 100 \quad (\text{IV.1})$$

En utilisant R pour le rendement en % et β pour l'angle d'incidence en $^{\circ}$.

On pouvait donc s'en douter, le rendement est le plus élevé lorsque les rayons se déplacent perpendiculairement au panneau.

$$R = \sin \beta \times 100 = \sin 90^{\circ} \times 100 = 100 \%. \quad (\text{IV.2})$$

Tandis que, par exemple, pour un angle de 45° , le rendement n'est que de 70% [28].

$$R = \sin \beta \times 100 = \sin 45^{\circ} \times 100 = 70 \%. \quad (\text{IV.3})$$

Le graphique illustrant le rendement en fonction de l'angle d'incidence est présenté dans la « FIGURE III-4 ».

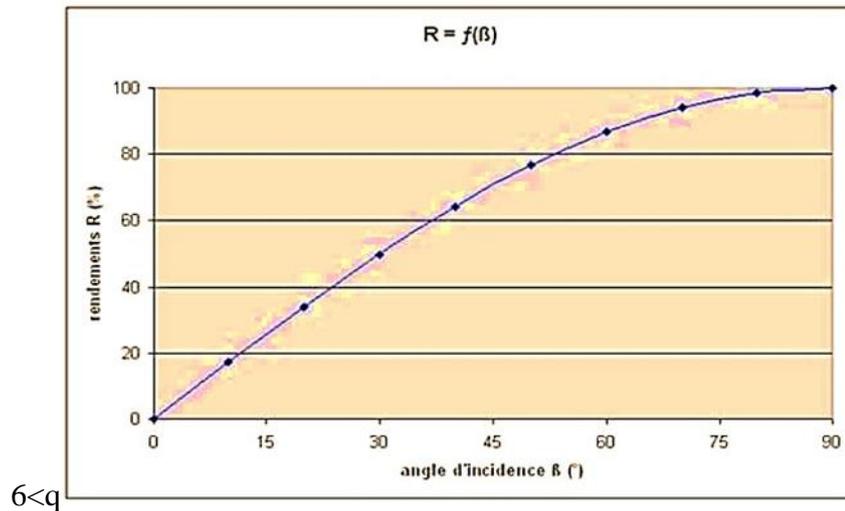


Figure IV.3 : Le rendement en fonction de l'angle d'incidence [28].

IV.4.2 Influence de l'orientation :

Dans l'ensemble, les rayons du Soleil proviennent davantage du Sud que des autres directions par rapport à notre site. À midi, lors de son zénith, le rayonnement est le plus élevé.

Il est donc préférable d'orienter un panneau solaire vers le Sud.

[63].

L'angle d'inclinaison correspond à l'angle qui existe entre le plan du sol et celui du panneau.

« FIGURE IV.4 ».



Figure IV.4 : L'angle d'inclinaison [28].

Ainsi, le panneau est perpendiculaire aux rayons solaires. Toutefois, l'inclinaison de la Terre fluctue en fonction des saisons [28]. Il est préférable d'avoir une pente de structure orientée vers le Sud, avec une inclinaison comprise entre 19° et 37° en Algérie pour installer des panneaux photovoltaïques.

IV.5 Dimensionnements D'un système PV par la méthode simplifiée :

On a résumé les besoins énergétiques de notre mosquée Ayoub dans le tableau suivant :

Equipements	Puissance unitaire (W)	Temps de fonctionnement (heure)	Nombre	Puissance (W)	Consommation journalière (Wh/j)
Lampes	15	5	100	1500	7500
Prise	100	3	12	1200	3600
Microphone	150	3	3	450	1350
Haute parleur	15	3	8	120	360
Montre électrique	90	24	2	180	182
Climatiseur	1000	3	5	5000	15000
Amplificateur	60	2	1	60	120
				P_{tot}= 8510	E_{cj}= 28112

Tableau IV.1 : Besoins énergétiques journaliers pour la mosquée Ayoub.

IV.5.1 Energie totale consommée :

$$E_{cj} = \sum E_j = 28112 \text{ Wh/j}$$

IV.5.2 La puissance totale :

Puissance totale = Lampes (15W×100) + Prise (100W×12) + Microphone (150W×3) +

Haute parleur (15W×8) + Montre électrique (90W×2) + Climatiseur (1000W×5) + Amplificateur (60W×1)

$$\text{➤ } P_{tot} = (1500 \text{ W} + 1200\text{W} + 450\text{W} + 120\text{W} + 60\text{W} + 180\text{W} + 5000\text{W}) = 8510 \text{ W.}$$

IV.5.3 Calcul du nombre des panneaux photovoltaïques :

$$N_{pv} = \frac{E_{Cj}}{P_{PPV}} \quad (\text{IV.4})$$

IV.5.4 Calcul du nombre des Batteries :

$$N_{Batterie} = \frac{P_g}{P_{Batterie}} \quad (\text{IV.5})$$

IV.6 Présentation du logiciel de simulation PVsyst V7.2.8 :

PV SYST est un logiciel complet de dimensionnement de panneaux solaires qui fournit une gamme de données précieuses, notamment la production d'énergie, les niveaux d'irradiation, le coût d'installation, la surface requise et la production annuelle d'énergie. Pour une analyse plus approfondie, un mode avancé est disponible pour accéder à des informations encore plus détaillées.

Le logiciel se compose principalement de deux modes de fonctionnement distincts. Le mode initial sert d'outil de pré dimensionnement convivial, conçu pour répondre aux besoins des débutants grâce à sa simplicité et son accessibilité. En revanche, le deuxième mode propose une analyse plus complète, prenant en considération une multitude de variables supplémentaires. De plus, ce mode s'appuie sur des données matériaux spécifiques pour ses calculs, contrairement au premier mode qui effectue des calculs basés sur un scénario généralisé. Quel que soit le mode choisi, le principe sous-jacent reste le même : saisir les coordonnées géographiques de l'installation et fournir les données d'installation pertinentes.

Pour une étude plus approfondie, de nombreux paramètres sont à prendre en compte, le choix de l'orientation des panneaux solaires, les calculs sont basés sur des systèmes réels du marché, qui seront sélectionnés parmi une large liste. Nous générons ensuite une simulation qui nous offre plusieurs choix de résultats et des graphiques personnalisables.
[14]

Le logiciel PVsyst permet de :

- * Estimation préliminaire de la production afin de réaliser une étude primale de vos installations.
- * Élaboration de projet.
- * Analyse approfondie, calcul des dimensions et simulation des horaires, résultats dans un rapport exhaustif imprimable.

- * Informations météorologiques (importation de différentes sources, création synthétique,).
- * Catalogue de composants (module solaire photovoltaïque, onduleur, batteries, pompes, etc.)
- * ressources pédagogiques, telles que la géométrie solaire, l'optimisation de l'orientation et le comportement électrique des champs PV avec des ombres.
- * étude de mesures de données réelles (en cours).

IV.7 Menus principaux :

IV.7.1 Pré-dimensionnement :

Pour une étude rapide et facile, il est nécessaire de fournir une location et un système, puis le logiciel Calcule quelques paramètres de pré-dimensionnement, ainsi qu'un graphe de production énergétique annuelle, un graphe d'irradiation par mois, un tableau récapitulatif et une étude de coût. La fenêtre de pré-dimensionnement du logiciel est illustrée dans la figure III.3.

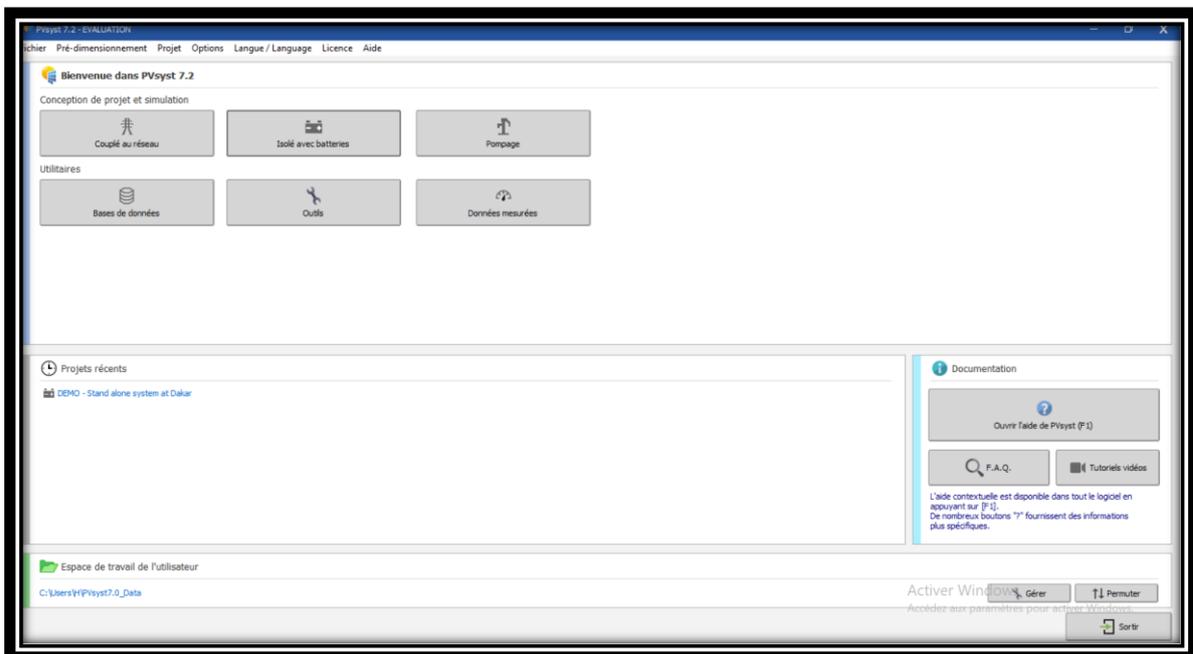


Figure IV.5 : Fenêtre de de pré-dimensionnement dans le logiciel PVsyst 7.2.8

IV.7.2 Conception du projet :

Le menu principal nous propose des options. Les deux premières options ouvrent une fenêtre comportant plusieurs boutons correspondant chacun à une étape spécifique. Un

bouton rouge indique une étape à accomplir, tandis qu'un bouton vert indique une étape déjà effectuée ou optionnelle.

Lorsqu'on sélectionne cette option, il est d'abord nécessaire de sélectionner le type d'installation : connecté au réseau, isolé avec batteries, système de pompe solaire

La suite se passe en quatre étapes : la localisation géographique, la consommation quotidienne, la configuration du système, puis les résultats.

Lors de la conception du projet, nous avons pris en compte notre structure en tant que système isolé, ce qui nous a conduit à la deuxième fenêtre du logiciel afin de localiser notre site et de consulter les conditions météorologiques correspondantes pour notre structure, située dans la wilaya de Sidi Bel Abbés.



Figure IV.6 : Interface de création de la structure.

Ensuite, la fenêtre suivante s'ouvrira.

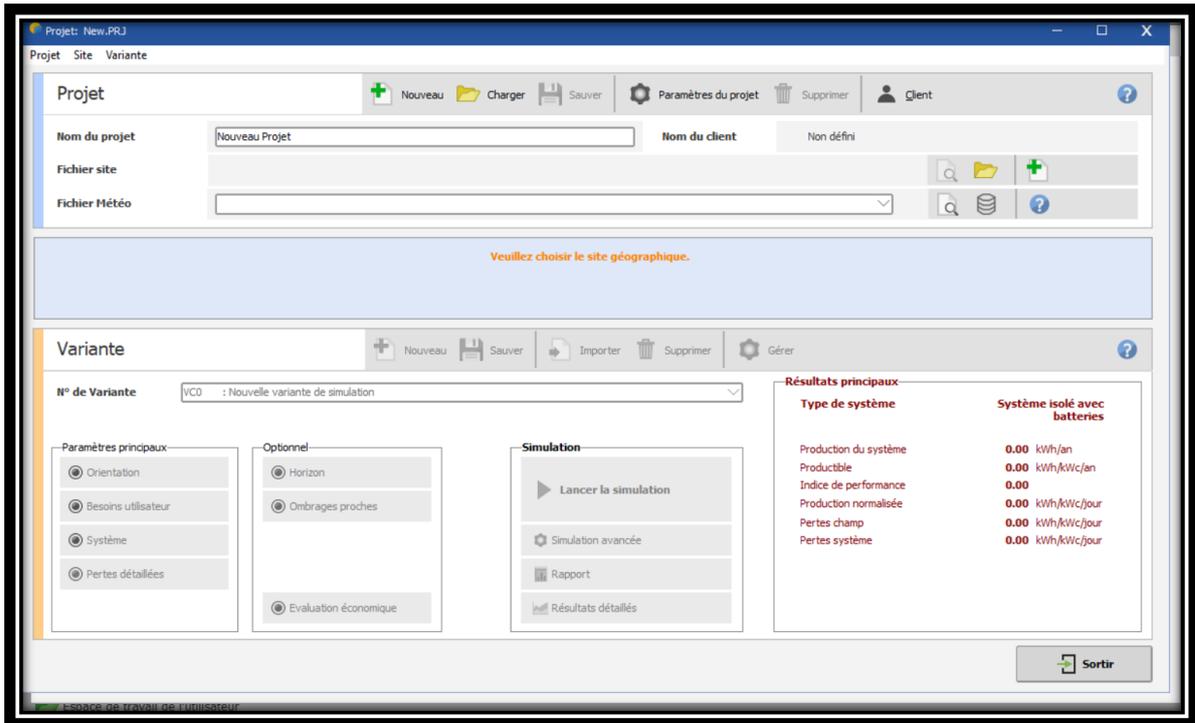


Figure IV.7 : Interface globale du PVsyst pour simulation.

IV.7.3 Principaux résultats :

IV.7.3.1 Données de localisation du site :

Tout d'abord, le projet est nommé, puis on sélectionne un pays et une ville.

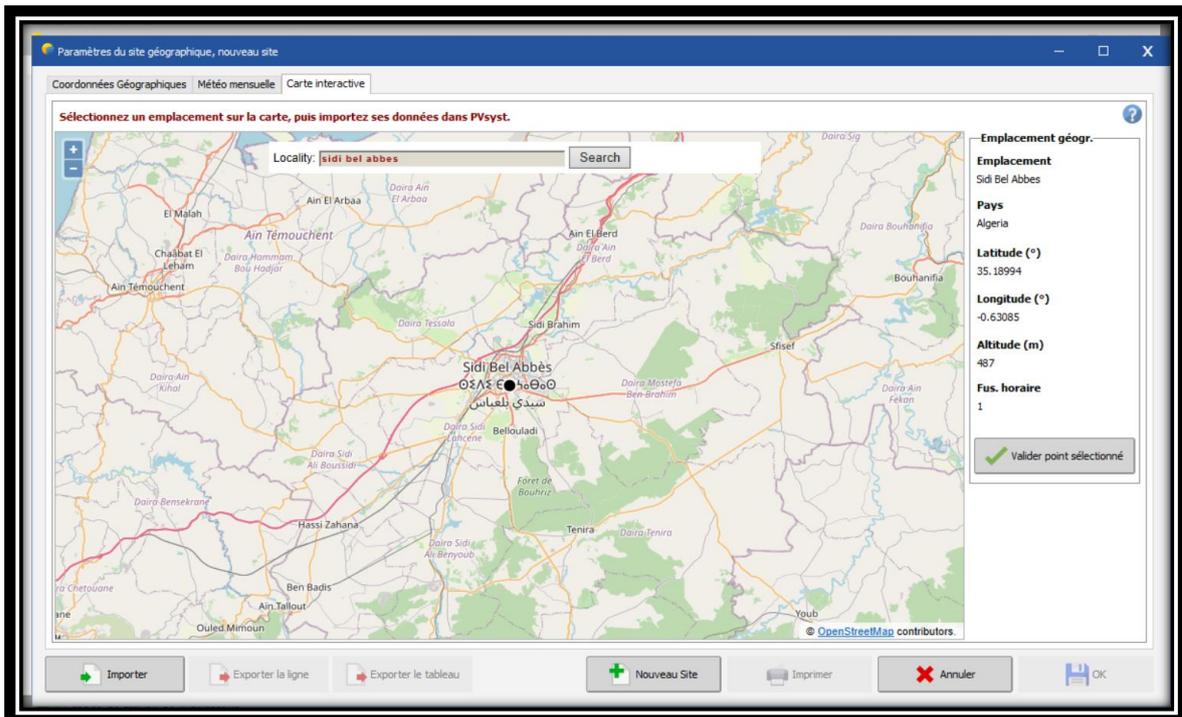


Figure IV.8 : Emplacement géographique de la wilaya de Sidi Bel Abbés.

IV.7.3.2 Coordonnées Géographiques :

Il est indispensable de connaître les coordonnées géographiques afin de déterminer la latitude, la longitude et l'altitude de cette position dans la wilaya de Sidi Bel Abbés.

Paramètres du site géographique, nouveau site

Coordonnées Géographiques | Météo mensuelle | Carte interactive

Lieu

Nom du site: Sidi Bel Abbés Obtenir depuis les coordonnées

Pays: Algérie Région: Afrique

Coordonnées Géographiques

Trajectoires du soleil

Latitude: 35.1899 [°] 35 11 23 (+ = Nord, - = Hémisph. Sud)

Longitude: -0.6309 [°] 0 -37 51 (+ = Est, - = Ouest de Greenwich)

Altitude: 487 M au-dessus du niv. de la mer

Fus. horaire: 1.0 Correspondant à une différence moyenne
Temps Légal - Temps Solaire = 1h 3m

Importation météo

Meteonorm 8.0

NASA-SSE

PVGIS TMY

NREL / NSRDB TMY

Solcast TMY

Importer

Importer Exporter la ligne Exporter le tableau Nouveau Site Imprimer Annuler Activer Windows

Figure IV.9 : Coordonnées géographiques du site de Sidi Bel Abbés

IV.7.3.3 Données météorologiques du site :

Une fois que l'on a identifié le site, on sélectionne le bouton « importer » afin d'importer les données météorologiques du site dans PVSYSY. Ces données mensuelles incluent l'irradiation, la température, la vitesse du vent, l'humidité, etc.

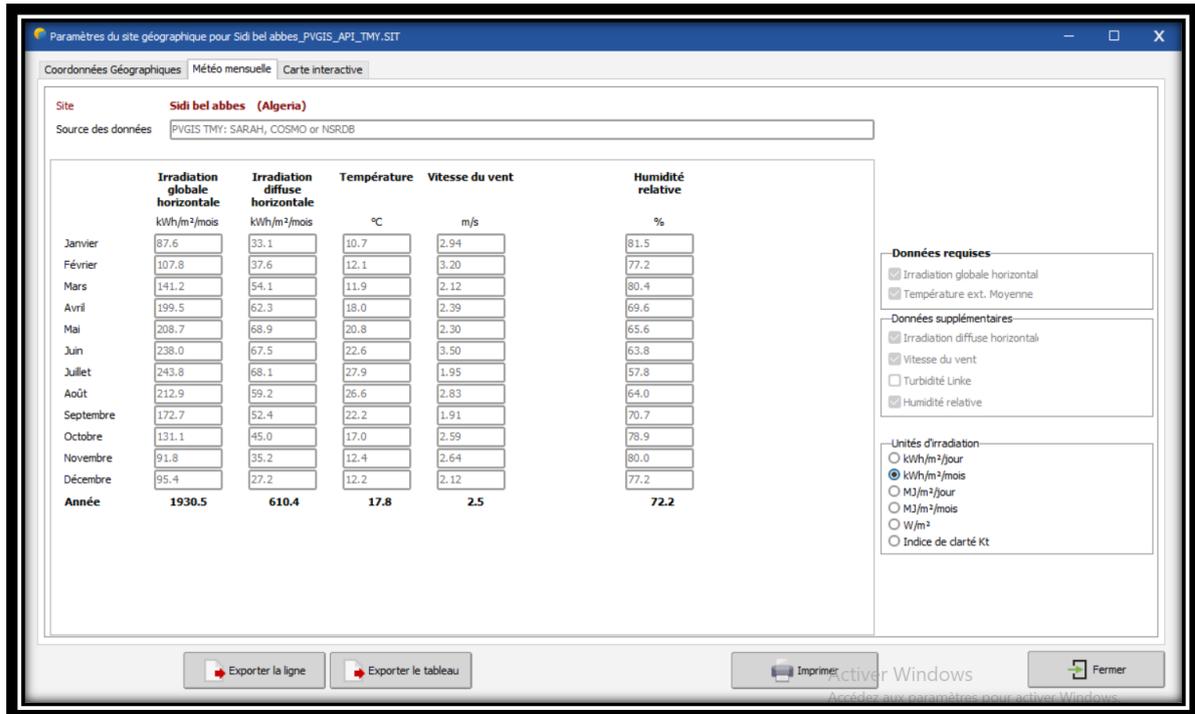


Figure IV.10 : Caractéristiques climatiques du site de Sidi Bel Abbés

IV.7.3.4 Trajectoire du soleil :

Il est indispensable de connaître le mouvement apparent du soleil pour un point spécifique de la surface terrestre pour toute application solaire. Deux angles définissent la position du soleil : la hauteur HS (angle entre le soleil et le plan horizontal du lieu) et l'azimut AZ (angle avec la direction du Sud, compté négativement vers l'Est). 1.

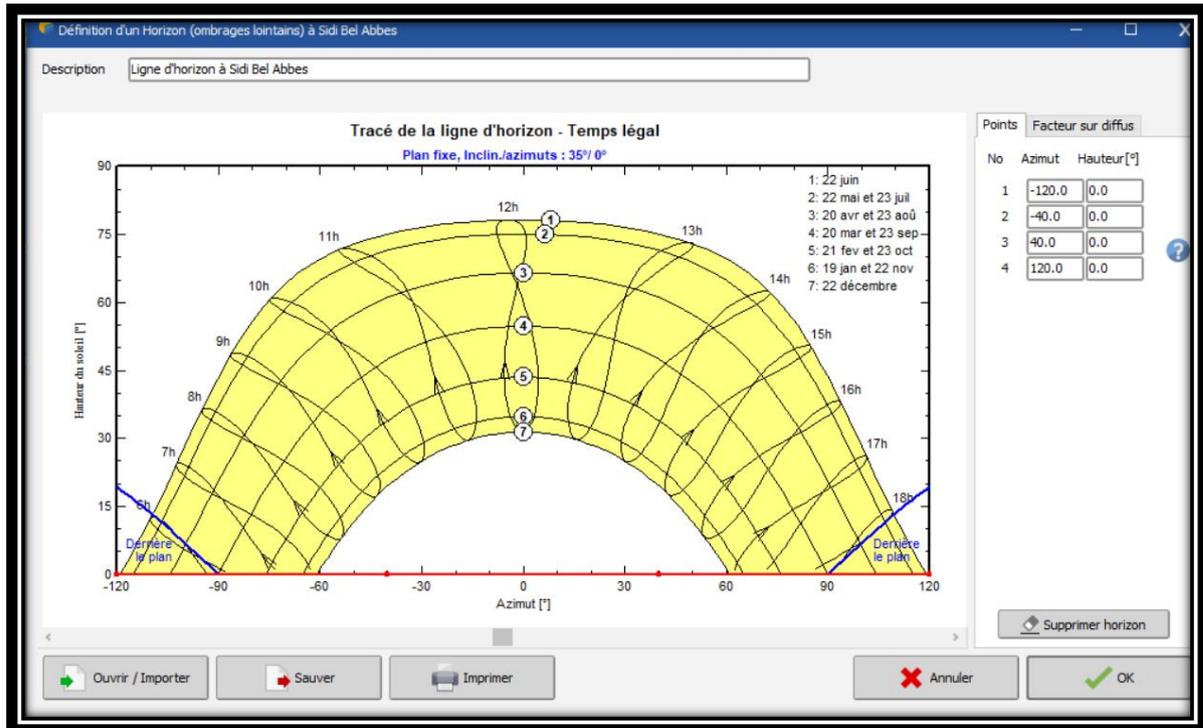


Figure IV.11 : Trajectoire du soleil à Sidi Bel Abbés.

IV.7.3.5 Orientation et inclinaison des modules PV :

Étant donné le coût élevé des modules photovoltaïques, il est essentiel de sélectionner des orientations et des inclinaisons qui favorisent la production d'énergie. Comme le montre la figure (12), nous avons opté pour un plan incliné fixe par rapport à l'horizontale, ce qui correspond à l'inclinaison optimale fournie par le logiciel PVSYST.

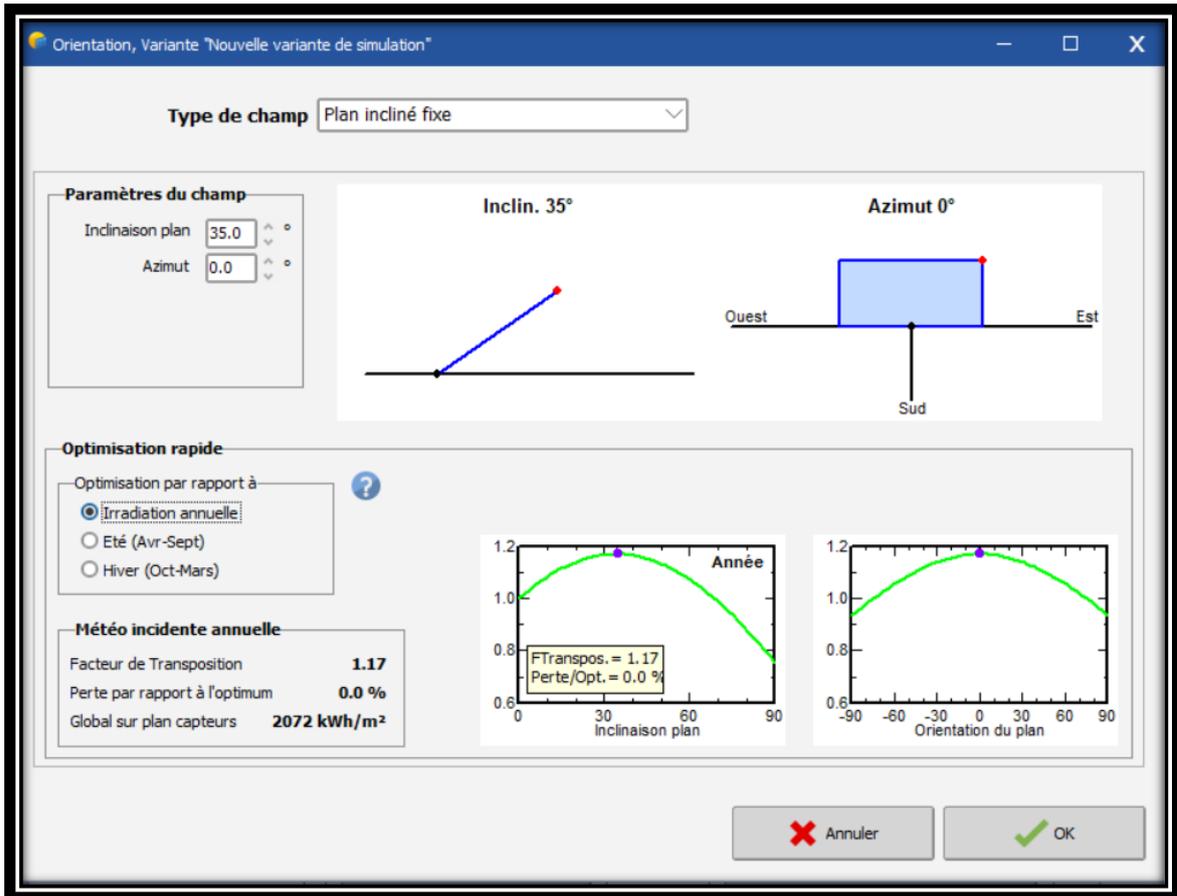


Figure IV.12 : Orientation et inclinaison du système PV.

IV.8 Résultats et interprétations :

IV.8.1 Besoins électriques :

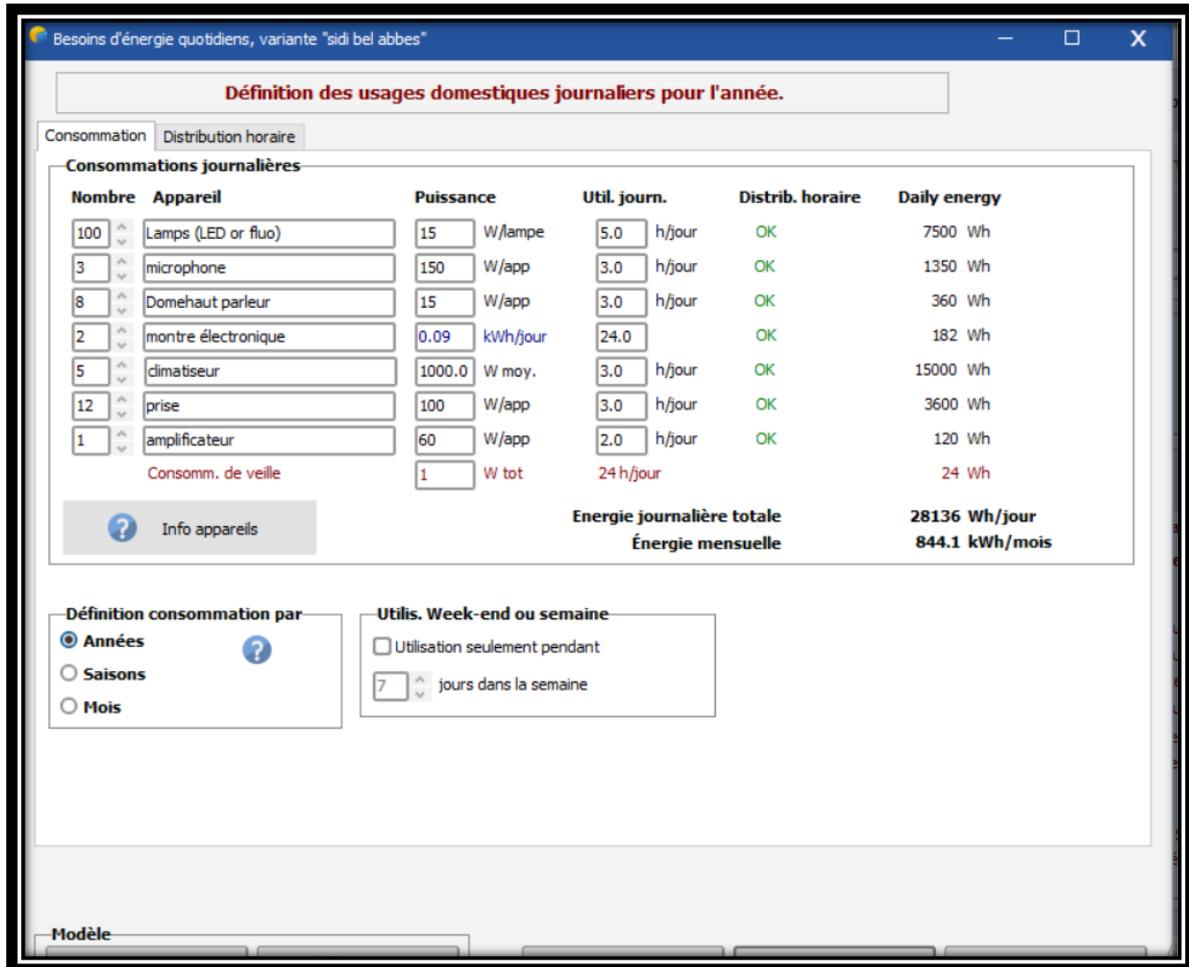


Figure IV.13 : Usage domestique journaliers de la mosquée

IV.8.2 Distribution horaire :

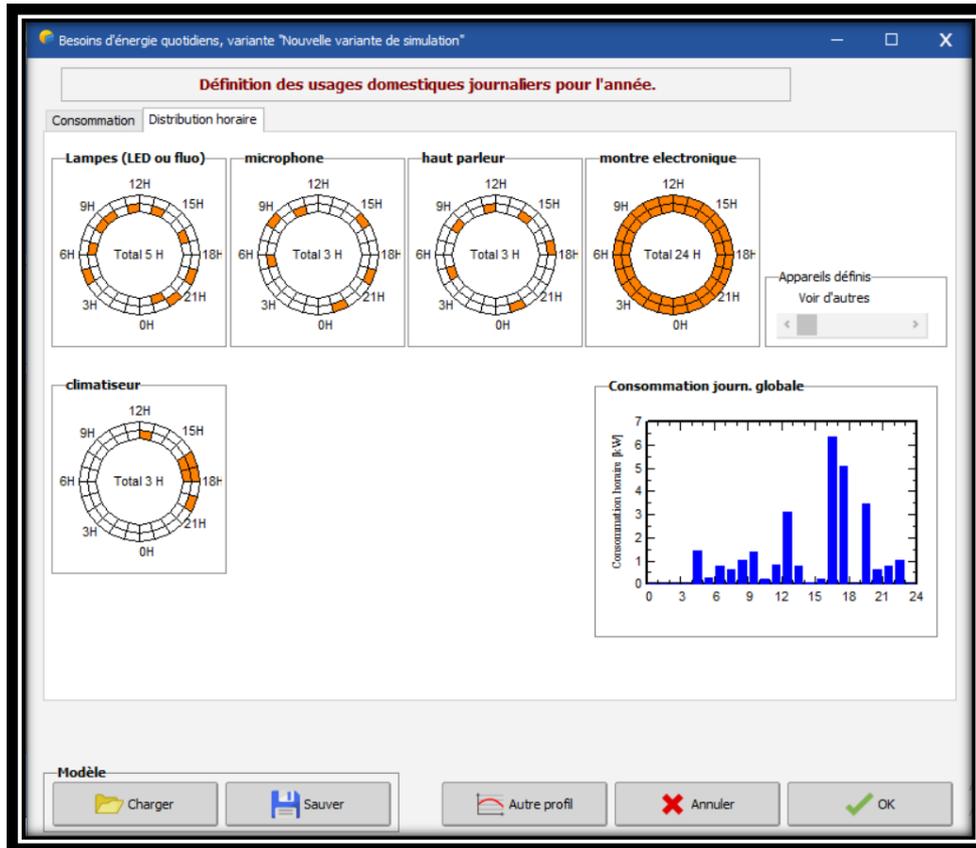


Figure IV.14 : Distribution horaire du site

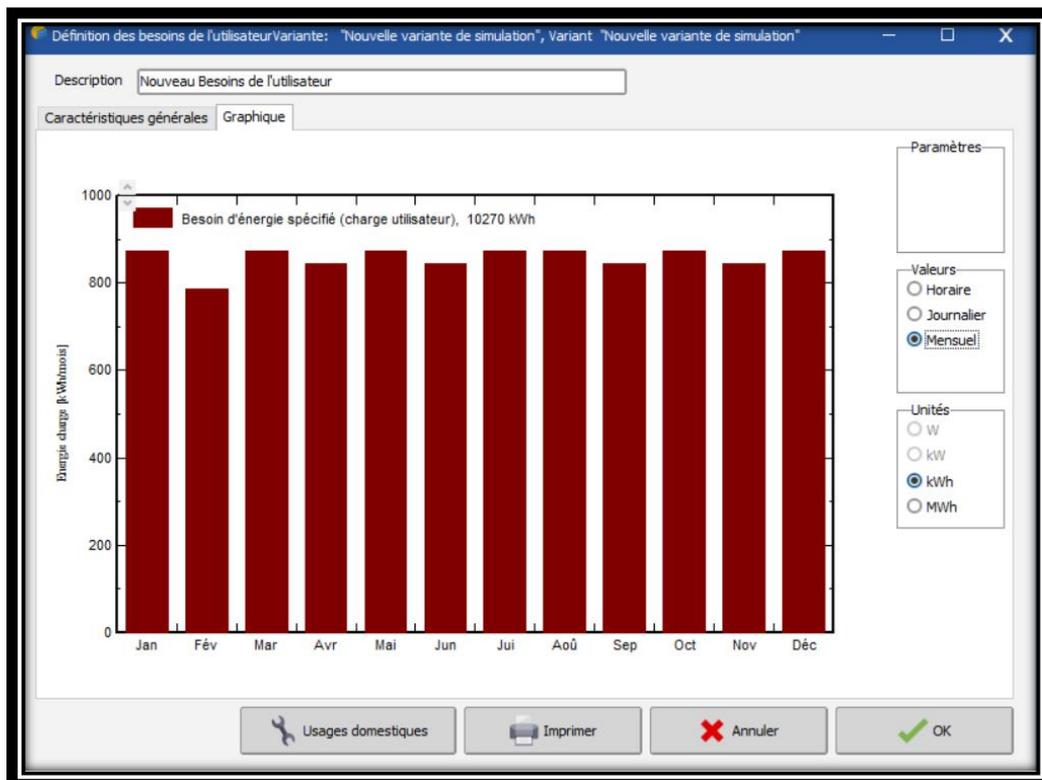


Figure IV.15 : Besoins d'utilisateur.

IV.8.3 système :

Avant toute simulation, il sera nécessaire de sélectionner les batteries, les modules photovoltaïques, les régulateurs et le convertisseur de puissance en fonction de la puissance, des différentes caractéristiques de la structure et de sa localisation, afin de prévoir une simulation appropriée et concluante.

La figure (IV.15) montre les besoins d'utilisateur de la mosquée par le PVSYST :

IV.8.3.1. Batteries :

La capacité de stockage est le premier critère de sélection d'une batterie solaire. On peut la mesurer en milliampère/heure, ou en mAh. De manière logique, plus cette capacité est grande, plus la quantité d'énergie que votre appareil peut fournir sera importante. Un parc de batteries solaires sera essentiel lorsque nous installons un système photovoltaïque sur un site isolé afin de stocker l'énergie produite et de la transmettre la nuit lorsque l'ensoleillement ne sera pas suffisant pour alimenter les consommateurs électriques. Évidemment, la capacité de la batterie doit être adaptée à nos besoins. Une batterie trop petite sera toujours déchargée, ce qui diminuera considérablement sa durée de vie. En revanche, une batterie trop grosse risque de nous coûter très cher.

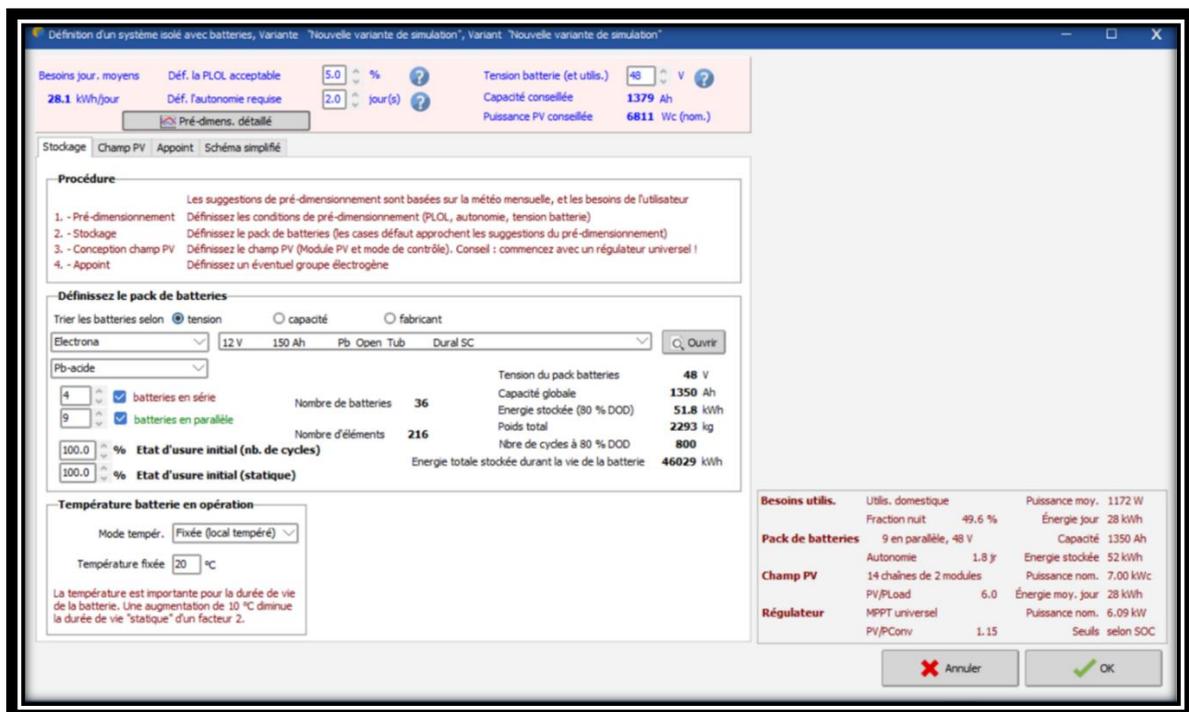


Figure IV.16 : Dimensionnement des batteries.

IV.8.3.2 Régulateur :

Un régulateur MPPT de 1000W/48V/160A est sélectionné.

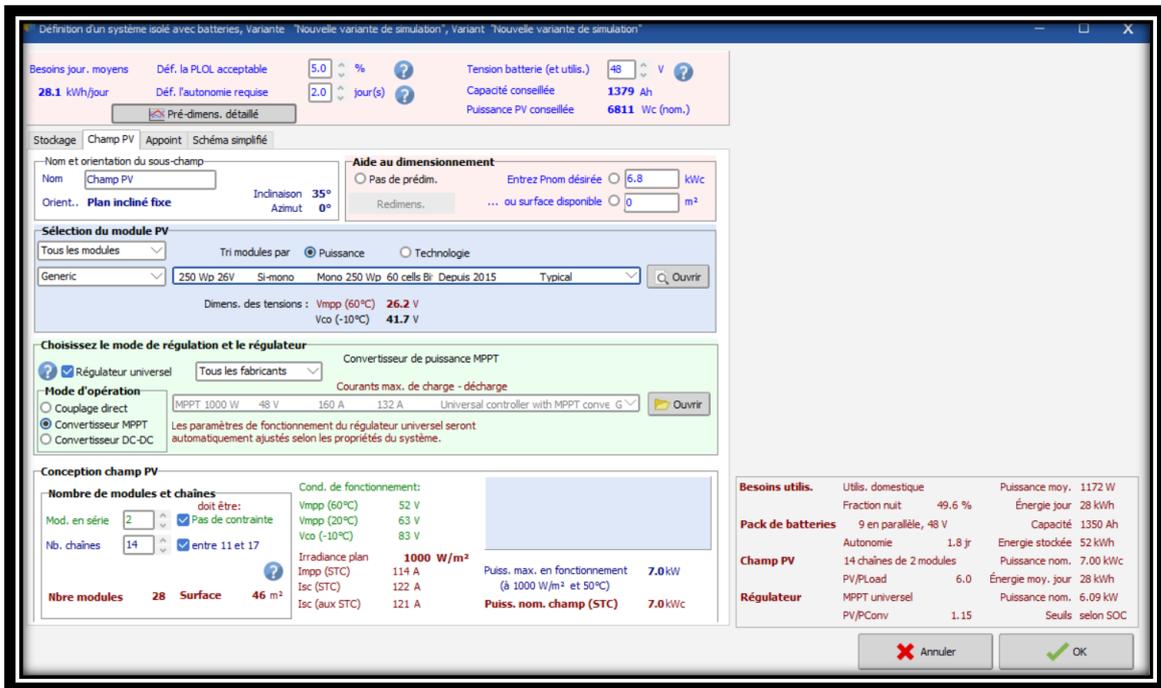
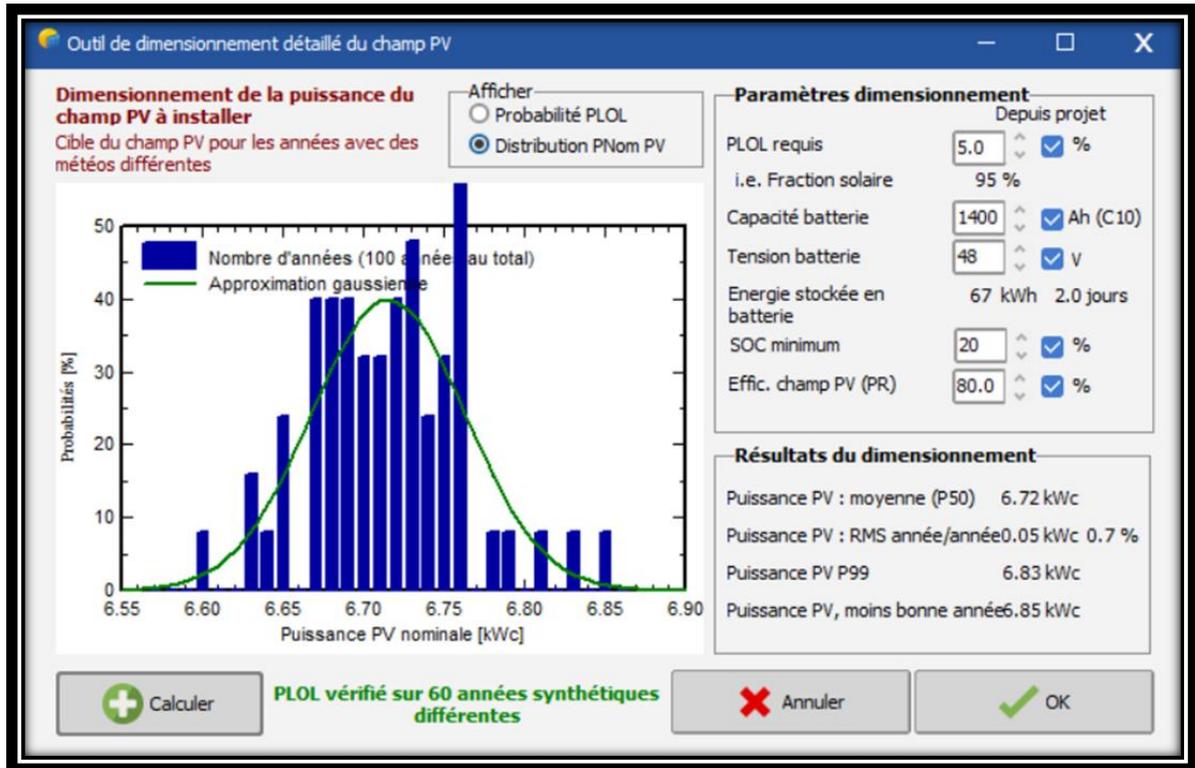


Figure IV.17 : Dimensionnement de module et régulateur :

- Nombre de module = 28 (2 en série, 14 en parallèle).
- Inclinaison = 35°.
- Surface module = 46m².



IV.8.3.3 Schéma de l'installation PV :

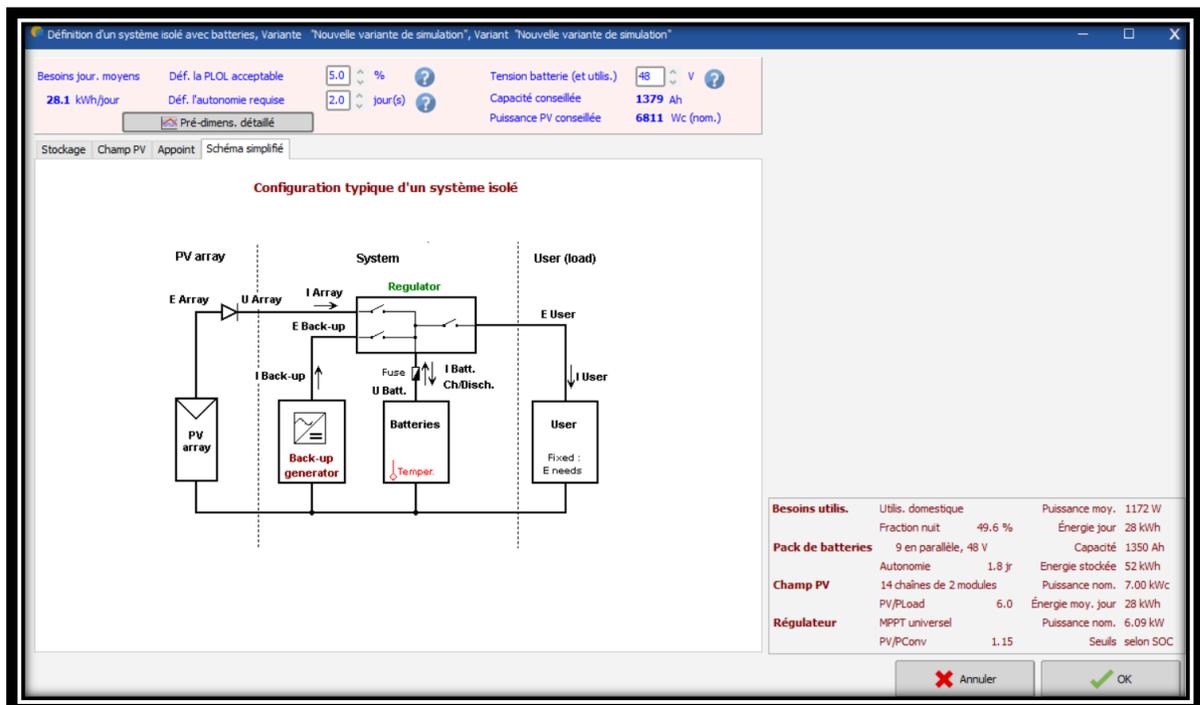


Figure IV.18 : Schéma simplifié d'une installation PV autonome.

Pendant la journée les panneaux alimentent simultanément les batteries, les charges DC (éclairage) et les charges AC via un onduleur ou Back-up generator. En absence du

rayonnement les batteries alimentent les charges DC et AC toujours via un onduleur car le courant délivré par les batteries est continu. Ce régulateur est équipé d'un convertisseur MPPT qui consiste à faire correspondre le courant et la tension de sortie au point de puissance maximum (PPM).

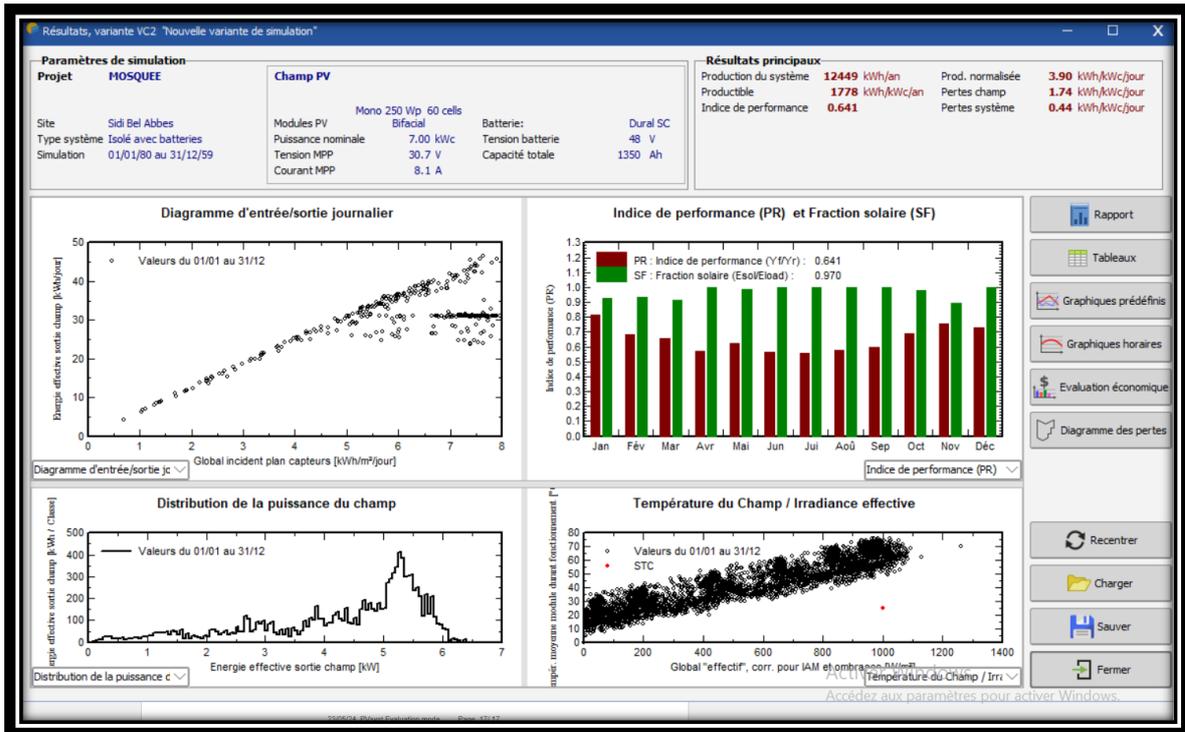
Avant toute simulation, il sera nécessaire de sélectionner les batteries, les modules photovoltaïques, les régulateurs et le convertisseur de puissance en fonction de la puissance, des différentes caractéristiques de la structure et de sa localisation, afin de prévoir une simulation appropriée et concluante.

IV.9 Simulation finale :

IV.9.1 Première étape : Lancement de la simulation



IV.9.2 Deuxième étape : Résultats obtenus après la simulation



IV.9.3 Troisième étape : Impression des Résultats obtenus

❖ Rapport de simulation :

Une fois que la consommation de la mosquée a été simulée avec le PVSYS V7.2.8, un rapport des résultats est obtenu



Version 7.2.8

PVsyst - Simulation report

Stand alone system

Project: MOSQUEE

Variant: Nouvelle variante de simulation

Stand alone system with batteries

System power: 7.00 kWp

Sidi Bel Abbes - Algeria

PVsyst TRIAL

PVsyst TRIAL

PVsyst TRIAL

| Author



PVsyst V7.2.8

VC2, Simulation date:
06/06/24 02:01
with v7.2.8

Project: MOSQUEE

Variant: Nouvelle variante de simulation

Project summary

Geographical Site		Situation		Project settings	
Sidi Bel Abbes		Latitude	35.19 °N	Albedo	0.20
Algérie		Longitude	-0.63 °W		
		Altitude	487 m		
		Time zone	UTC+1		
Meteo data					
sidi bel abbes					
PVGIS api TMY					

System summary

Stand alone system		Stand alone system with batteries			
PV Field Orientation		User's needs			
Fixed plane		Daily household consumers			
Tilt/Azimuth	35 / 0 °	Constant over the year			
		Average	28.1 kWh/Day		
System information					
PV Array					
Nb. of modules	28 units	Battery pack			
Pnom total	7.00 kWp	Technology	Lead-acid, vented, tubular		
		Nb. of units	36 units		
		Voltage	48 V		
		Capacity	1350 Ah		

Results summary

Available Energy	12448 kWh/year	Specific production	1778 kWh/kWp/year	Perf. Ratio PR	64.13 %
Used Energy	9963 kWh/year			Solar Fraction SF	97.01 %

Table of contents

Project and results summary	2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses	3
Detailed User's needs	4
Main results	5
Loss diagram	6
Special graphs	7



PVsyst V7.2.8

VC2, Simulation date:
06/06/24 02:01
with v7.2.8

Project: MOSQUEE

Variant: Nouvelle variante de simulation

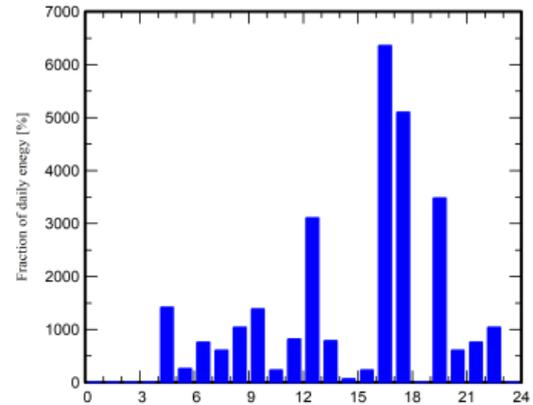
Detailed User's needs

Daily household consumers, Constant over the year, average = 28.1 kWh/day

Annual values

	Number	Power	Use	Energy
		W	Hour/day	Wh/day
Lampes (LED ou fluo)	100	15W/lamp	5.0	7500
microphone	3	150W/app	3.0	1350
haut parleur	8	15W/app	3.0	360
montre electronique	2		24	182
climatiseur	5		3	15000
prise	12	100W tot	3.0	3600
amplificateur	1	60W tot	2.0	120
Consomm. de veille			24.0	24
Total daily energy				28136Wh/day

Hourly distribution





Project: MOSQUEE
 Variant: Nouvelle variante de simulation

PVsyst V7.2.8

VC2, Simulation date:
 06/06/24 02:01
 with v7.2.8

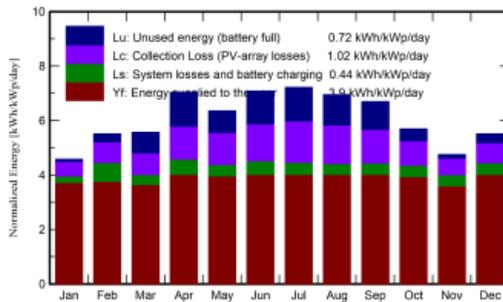
Main results

System Production

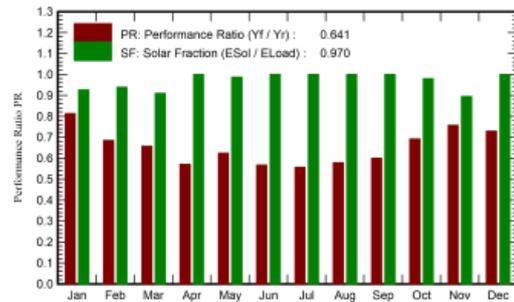
Available Energy 12448 kWh/year
 Used Energy 9963 kWh/year
 Excess (unused) 1832 kWh/year
Loss of Load
 Time Fraction 3.5 %
 Missing Energy 307 kWh/year

Specific production 1778 kWh/kWp/year
 Performance Ratio PR 64.13 %
 Solar Fraction SF 97.01 %
Battery aging (State of Wear)
 Cycles SOW 89.3 %
 Static SOW 90.0 %
 Battery lifetime 9.4 years

Normalized productions (per installed kWp)



Performance Ratio PR



Balances and main results

	GlobHor kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	E_Avail kWh	EUnused kWh	E_Miss kWh	E_User kWh	E_Load kWh	SolFrac ratio
January	87.6	139.6	843	16.7	63.58	808.6	872.2	0.927
February	107.8	151.5	894	57.6	47.93	739.9	787.8	0.939
March	141.2	168.4	997	162.8	78.17	794.1	872.2	0.910
April	199.5	206.2	1181	260.5	0.00	844.1	844.1	1.000
May	208.7	191.3	1079	171.0	11.41	860.8	872.2	0.987
June	238.0	206.0	1162	252.9	0.00	844.1	844.1	1.000
July	243.8	217.5	1193	266.0	0.00	872.2	872.2	1.000
August	212.9	209.9	1159	241.1	0.00	872.2	872.2	1.000
September	172.7	196.2	1106	212.5	0.00	844.1	844.1	1.000
October	131.1	173.2	1000	93.2	17.52	854.7	872.2	0.980
November	91.8	139.8	833	26.7	88.23	755.9	844.1	0.895
December	95.4	168.2	1001	71.2	0.00	872.2	872.2	1.000
Year	1930.5	2167.7	12448	1832.3	306.84	9962.9	10269.8	0.970

Legends

GlobHor Global horizontal irradiation
 GlobEff Effective Global, corr. for IAM and shadings
 E_Avail Available Solar Energy
 EUnused Unused energy (battery full)
 E_Miss Missing energy
 E_User Energy supplied to the user
 E_Load Energy need of the user (Load)
 SolFrac Solar fraction (EUsed / ELoad)

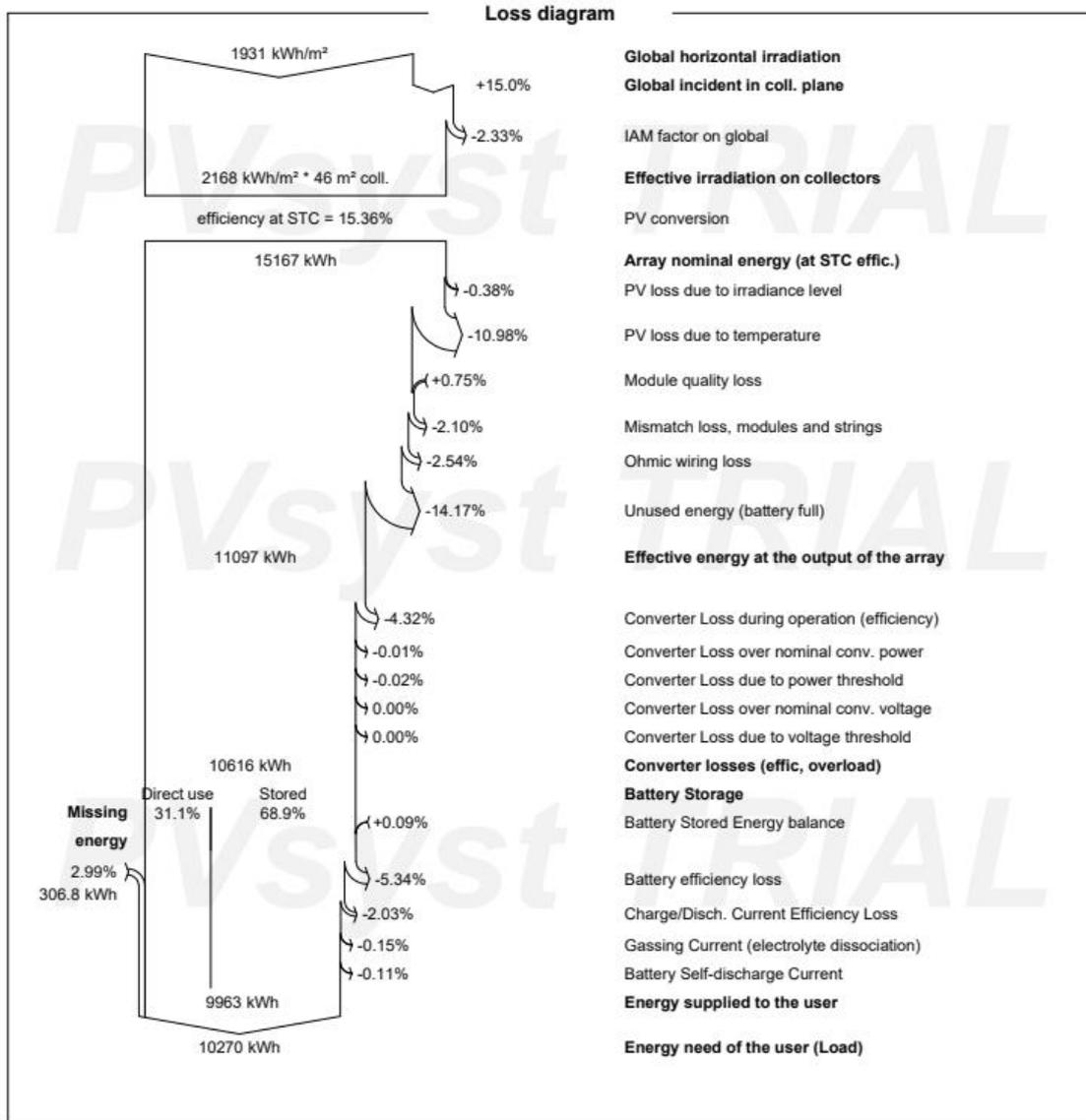


PVsyst V7.2.8

VC2, Simulation date:
06/06/24 02:01
with v7.2.8

Project: MOSQUEE

Variant: Nouvelle variante de simulation



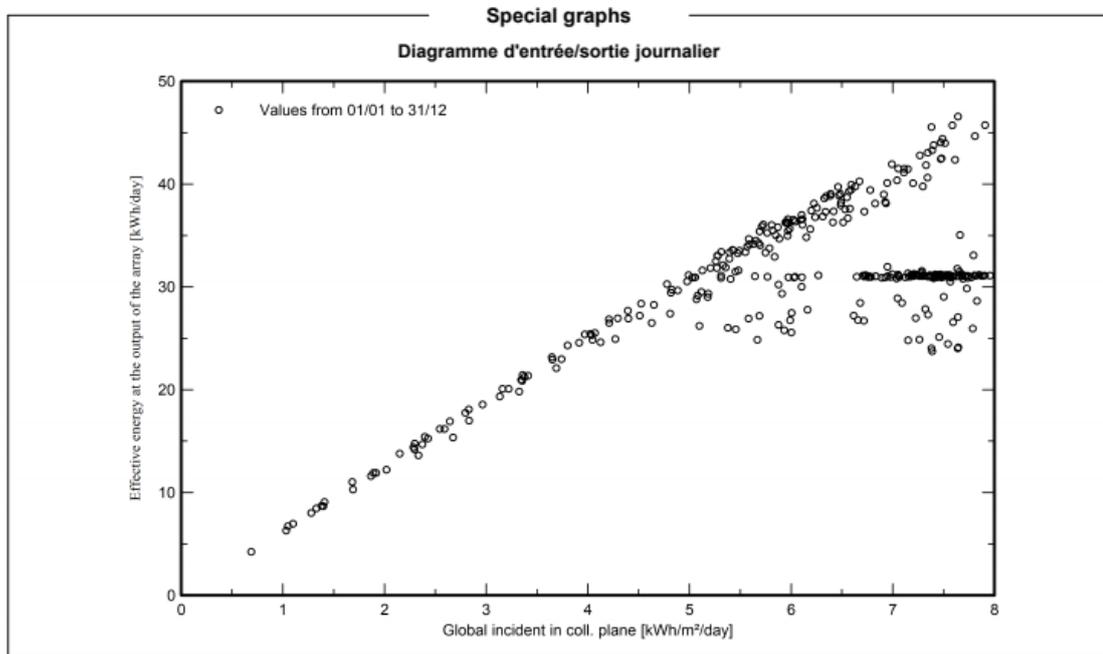


PVsyst V7.2.8

VC2, Simulation date:
06/06/24 02:01
with v7.2.8

Project: MOSQUEE

Variant: Nouvelle variante de simulation



PVsyst TRIAL

PVsyst TRIAL

a) Production normalisées par kWp installé :

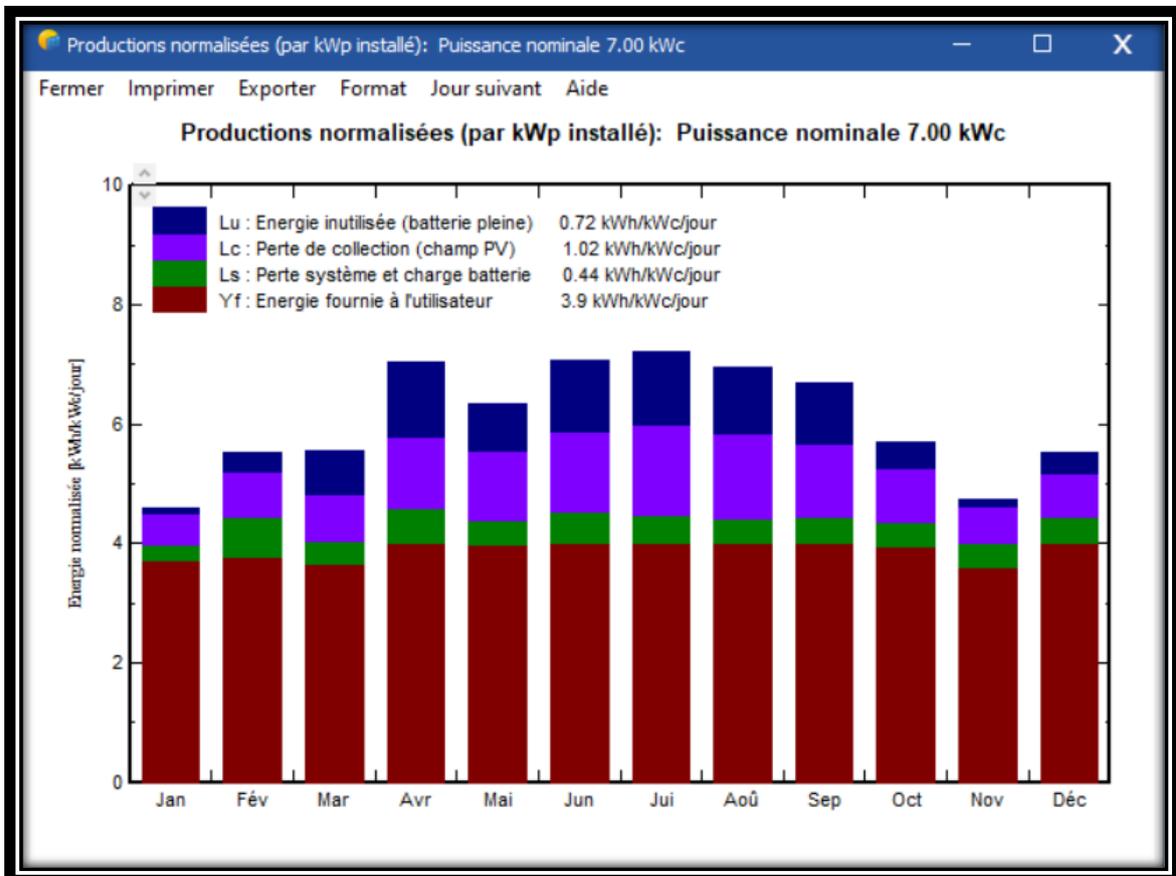


Figure IV.19 : Productions normalisées (par kWp installé).

Le graphique présenté illustre la fluctuation standardisée de la production du système pour chaque mois de l'année. Il est évident que l'énergie livrée au consommateur reste relativement stable (indiquée par la ligne marron) tout au long de l'année, avec un approvisionnement constant de 3,9 KWh/j. On constate seulement une légère baisse à 3,7 KWh/j en janvier, mars et novembre.

Pendant les mois autres que l'hiver, lorsque les batteries sont complètement chargées et ont un excès d'énergie, les valeurs sont assez intrigantes. Cela indique que les batteries sont déchargées et qu'il y a une plus grande demande de lumière solaire. Les pertes du système et la charge de la batterie s'élèvent à environ 0,44 kWh par jour.

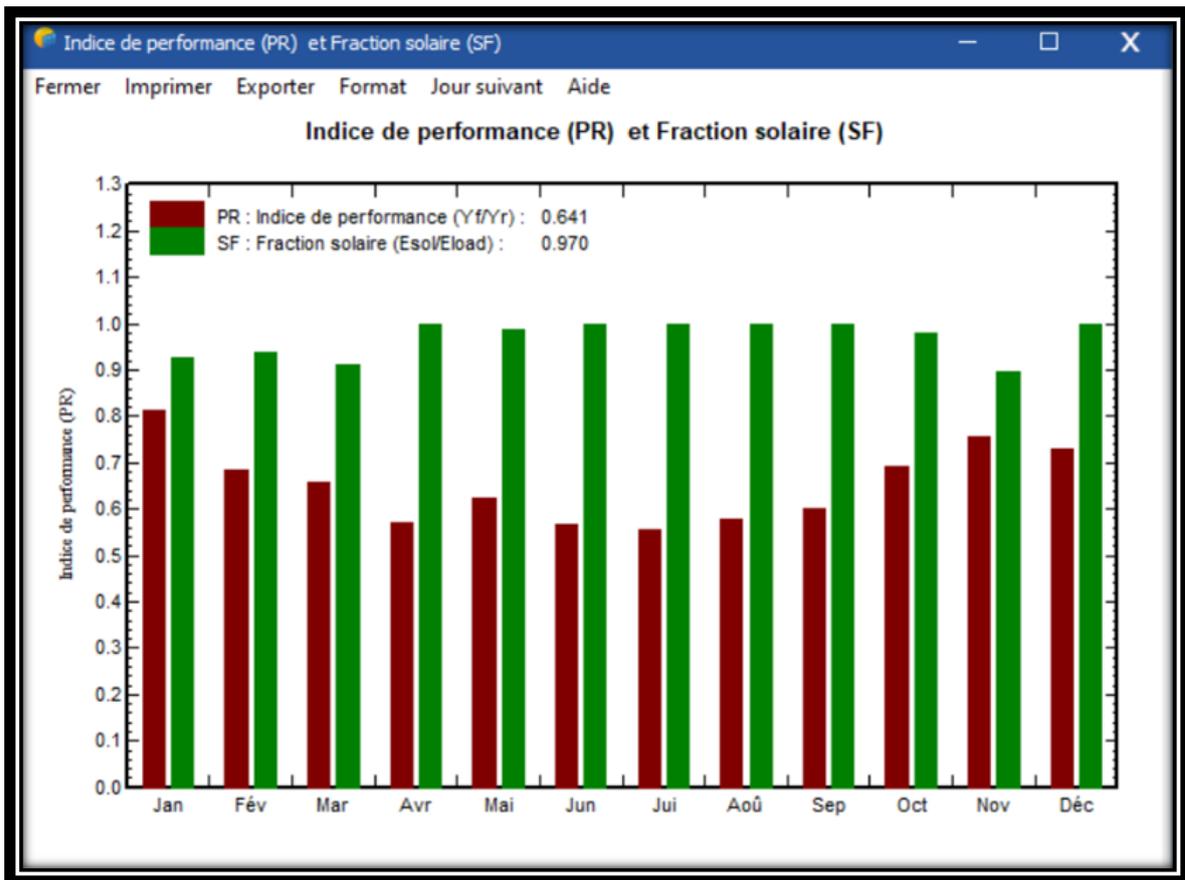
b) Indice (PR) et (SF) :

Figure IV.20 : Indice de performance (PR) et Fraction solaire (SF).

La figure IV.20 présente un histogramme illustrant la fluctuation de l'indice de performance tout au long de l'année. Il est évident qu'à l'exception de la saison hivernale, où l'indice peut atteindre 0,73 en décembre et 0,81 en janvier, l'indice reste inférieur à 0,6 pour tous les autres mois.

Pour la fraction solaire dans la fraction de charge solaire, cette variation est quasiment constante tout au long de l'année, avec une valeur moyenne d'environ 0,97.

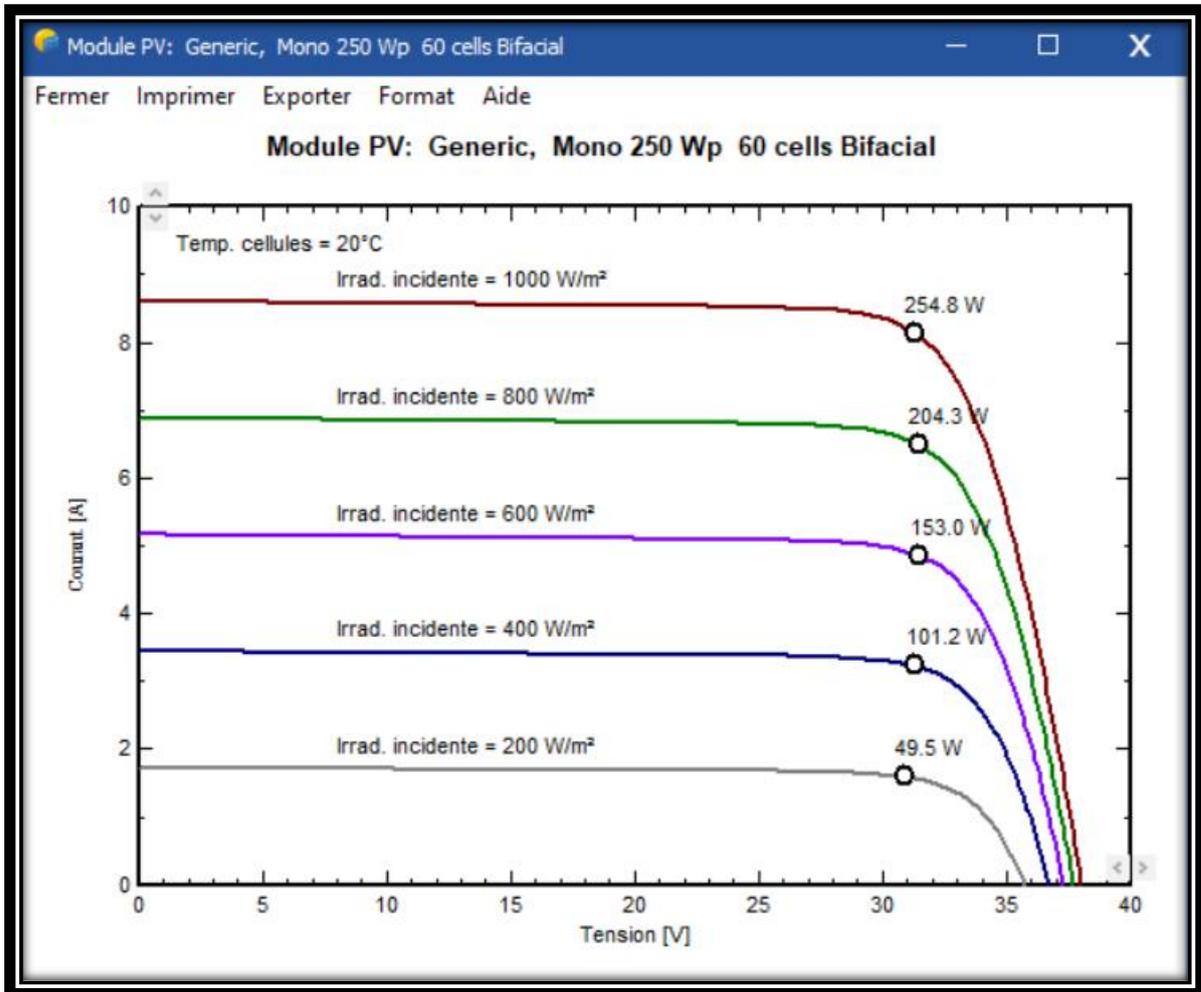
c) Comportement du module selon irradiation incidente [w / m^2].

Figure IV.21 : Comportement du module selon irradiation incidente.

À mesure que l'ensoleillement augmente, le courant photovoltaïque devient plus fort, provoquant un déplacement des courbes I-V (qui représentent la relation entre l'intensité du courant et la tension) vers des valeurs plus élevées. Ce changement permet au module de générer plus d'énergie électrique. Les points de puissance maximale sur les courbes sont indiqués par des cercles (voir figure IV.21), démontrant comment l'irradiation incidente affecte le comportement du module.

d) Comportement du module selon la température :

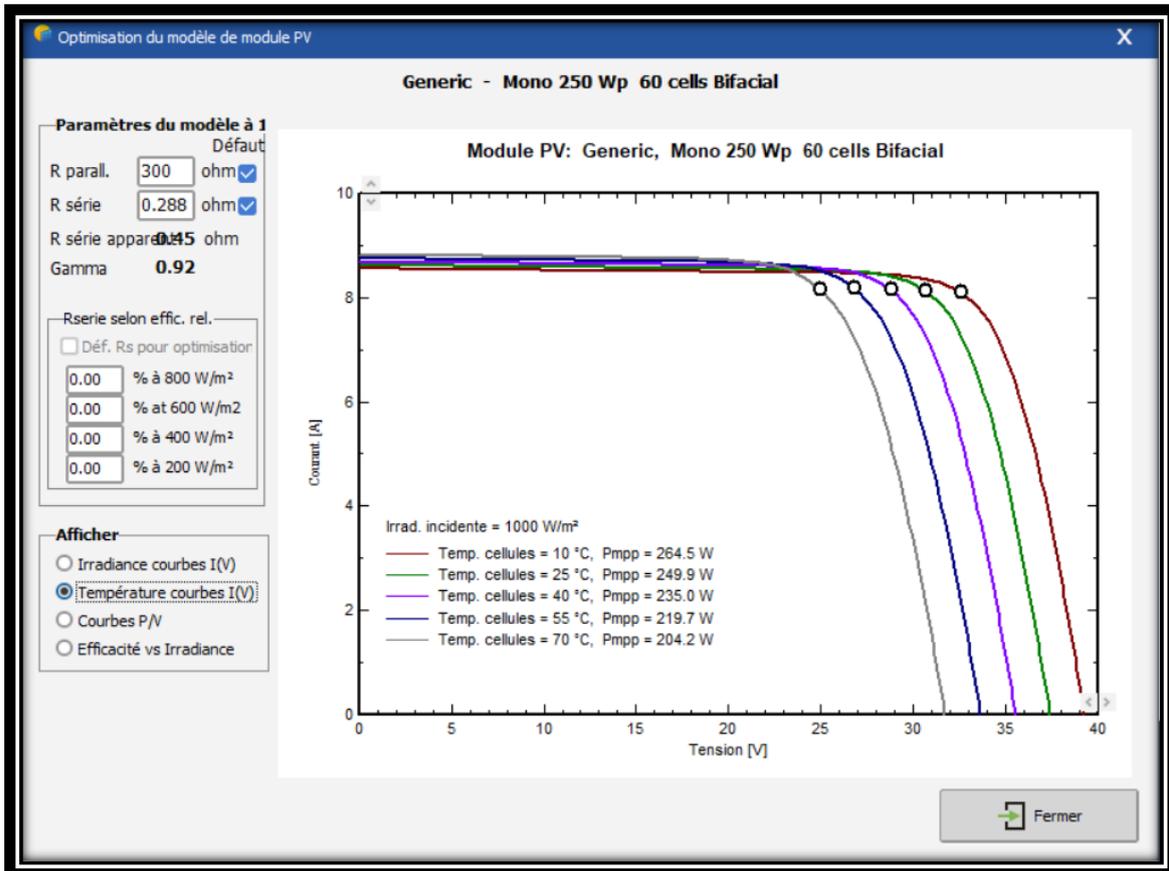


Figure IV.22 : Comportement du module selon la température.

La figure IV.22 illustre qu'à mesure que la température augmente, le courant augmente rapidement tandis que la tension en circuit ouvert connaît une diminution moins significative. Cela conduit à une diminution relative de la puissance disponible. Par conséquent, on peut conclure que la température a l'impact le plus significatif sur la conception des panneaux et des systèmes.

e) Comportement du module selon la résistance en série :

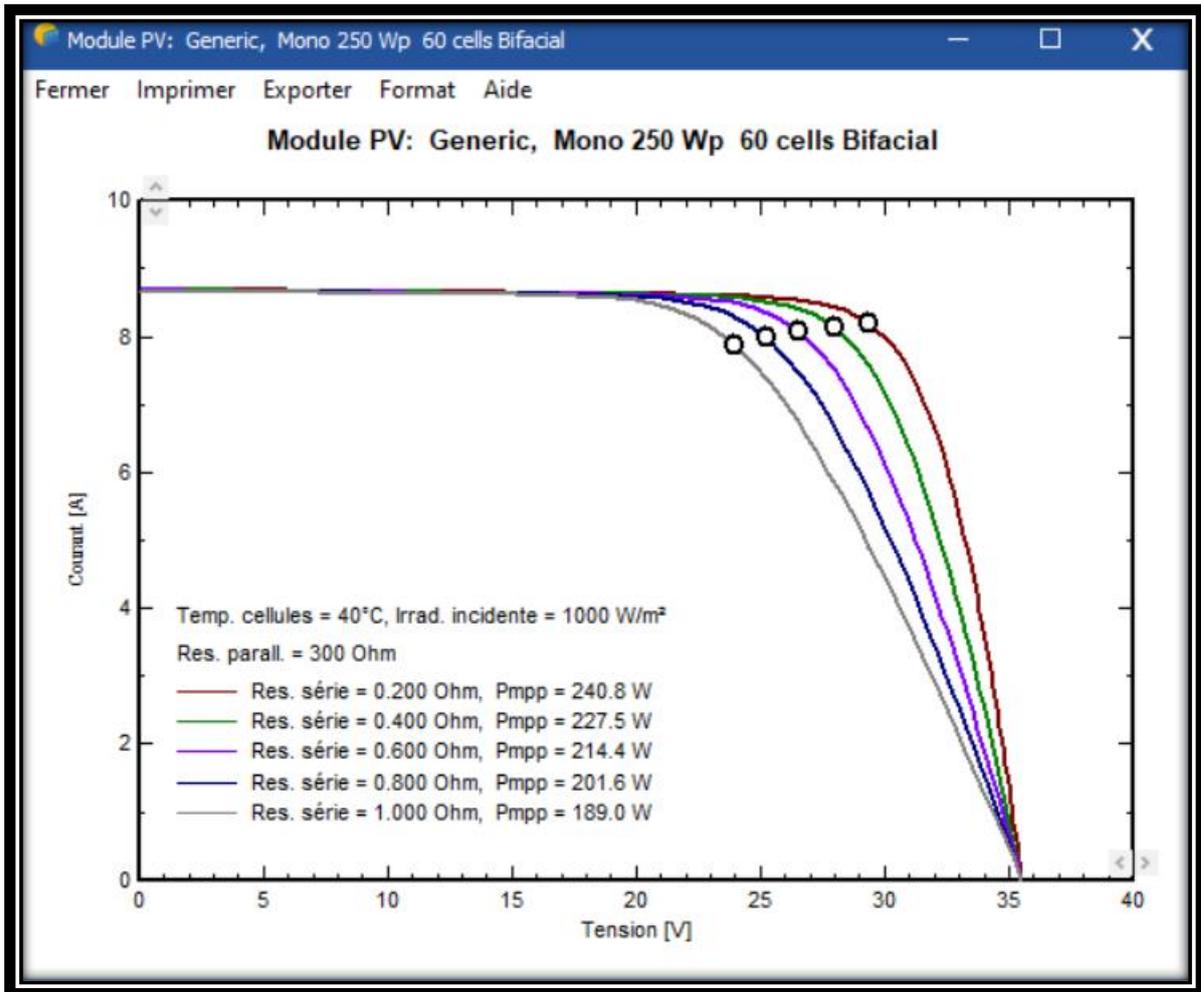


Figure IV.23 : Comportement du module selon la résistance en série.

Lorsque R_s est élevé ou faible, les performances des cellules photovoltaïques se dégradent plus sévèrement. La figure IV.23 montre l'effet de la résistance série sur les caractéristiques I-V. Cet effet provoque une diminution de la pente de la courbe $I = f(V)$ dans la zone où le panneau fait office de source de tension (à droite du point de puissance maximale) (idem sur la figure). La chute de tension correspondante est liée au courant généré par le panneau.

f) Comportement du module selon la résistance en parallèle :

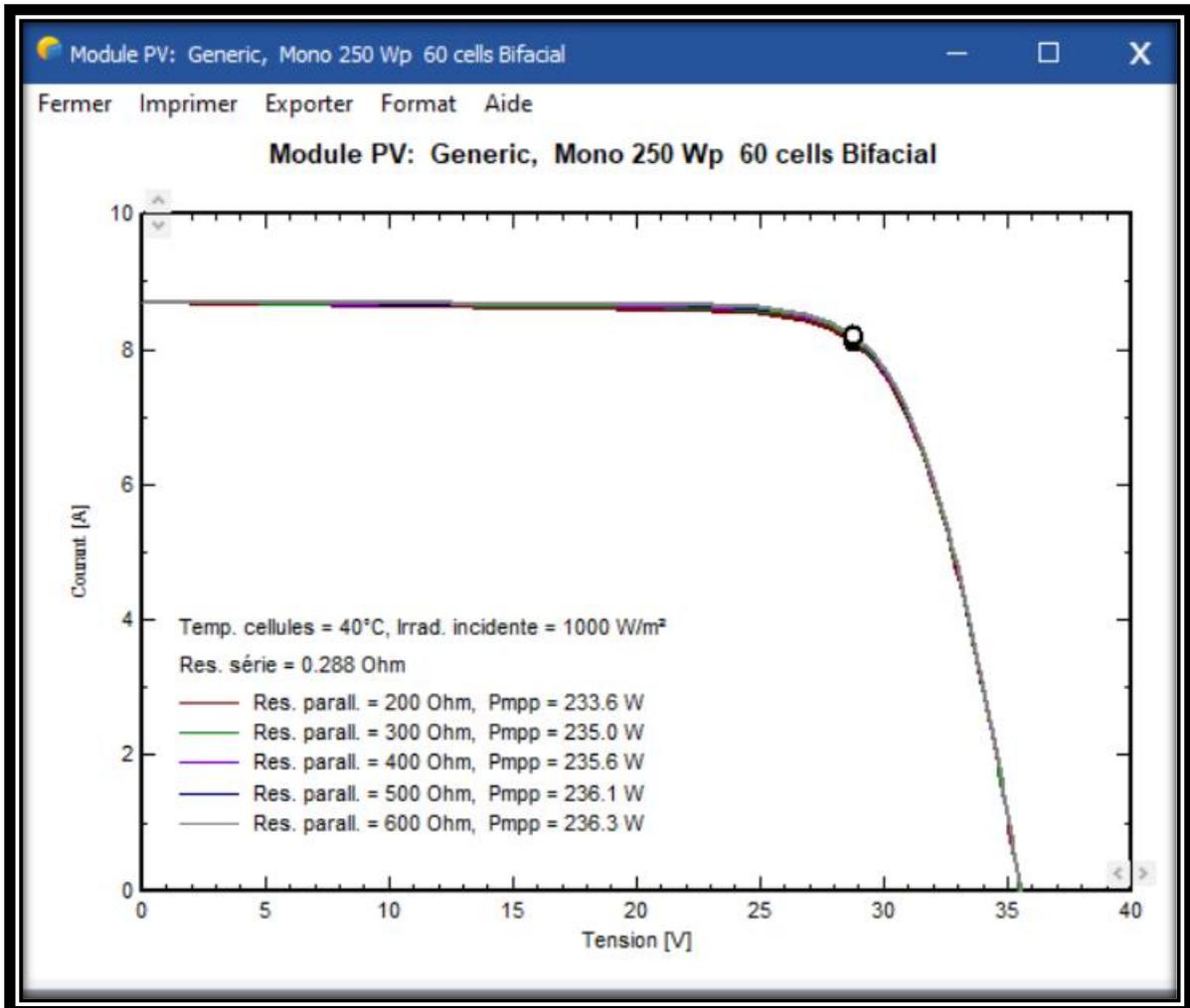


Figure IV.24 : Comportement du module selon la résistance en parallèle.

La résistance shunt est directement liée au processus de fabrication et son effet ne sera sentir qu'à des valeurs de courant très faibles. La figure montre que cet effet provoque une augmentation de la pente de la courbe I-V du panneau dans la région correspondant au fonctionnement en source de courant. En effet, en plus du courant continu de la diode, un courant supplémentaire qui varie linéairement avec la tension résultante doit être soustrait de la photo courant.

IV.10 Modules photovoltaïques

IV.10.1 Branchement de PPV pour la mosquée Ayoub :

Selon le rapport de la simulation et les résultats, nous avons conclu que notre modélisation avec le logiciel PVsys a donné lieu à 28 modules photovoltaïques (14 chaînes en parallèle et 2 modules en série) avec une puissance unitaire de 250 W et une puissance

nominale globale de 7.00 KWp. La puissance totale nominale des modules est de 45.6 m2, soit 39,8 m2 de surface cellulaire.

- ❖ Les modules sont des composants de cellules (ou cellules) photovoltaïques installées en série pour obtenir la tension requise (12V, 24V, etc.). Les cellules photovoltaïques sont des composants de base pour la conversion du rayonnement. Plusieurs unités sont associées dans un module, qui est la plus petite surface volumétrique déformable, affichable et démontrable du site.
- ❖ Les modules sont regroupés en panneaux, eux-mêmes reliés selon les besoins pour obtenir un champ photovoltaïque. Les cellules photovoltaïques sont principalement constituées de silicium cristallin qui, selon les dernières technologies, est utilisé sous forme monocristalline ou poly cristalline dans des tranches ou des bandes ou des couches semi-minces sur des substrats. Ces modules sont connectés en série et en parallèle pour obtenir une puissance importante et la tension requise. Chaque cellule photovoltaïque est protégée contre la surchauffe en installant en parallèle une diode de court-circuit appelée « diode by-pass ».
- ❖ Aussi on évite qu'un module PV soit récepteur en mettant en série à chaque branche une diode dite « diode anti retour » de chute de tension négligeable.
- ❖ On évite également que le module PV ne devienne un puits en plaçant une diode dite "diode anti-retour" en série avec chaque branche (sa chute de tension est négligeable).

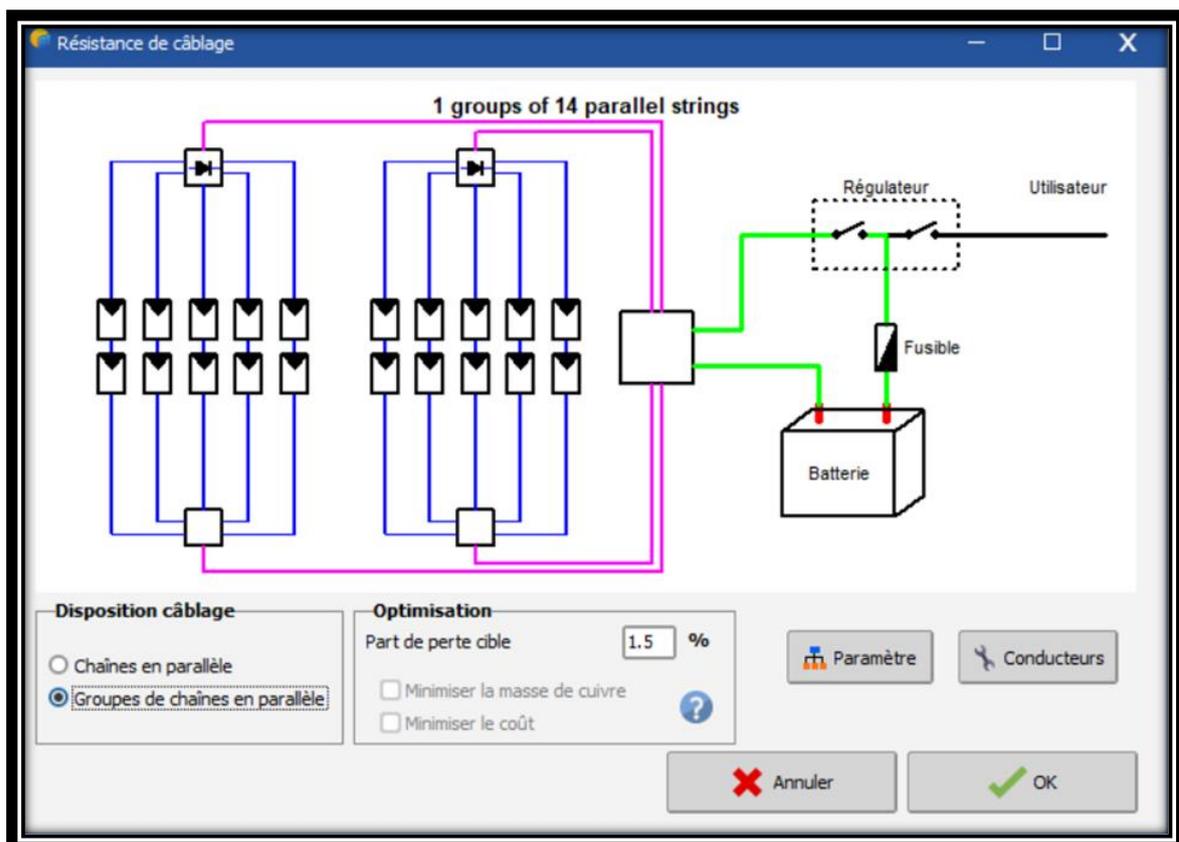


Figure IV.25 : groupe de chaîne en parallèle

On a utilisé des PV de 1640mm de longueur, de 992mm de largeur et de 50mm d'épaisseur, avec un poids de 19.8kg

Figure IV.26 : Dimensions et caractéristiques des PV.

IV.10.2 Branchement des batteries pour la mosquée Ayoub :

Toujours sur la base de nos résultats, nos simulations de ce modèle nous conduisent à : Batterie de 36 cellules, 4 cellules en série \times 9 cellules en parallèle (voir Figure IV.16), tension 48 V, capacité nominale 1 350 Ah, stockage d'énergie 51,8 kWh.

Nous avons choisi des batteries au plomb Elctrona 12V/150Ah, fixées à 20C°.

En fait, l'énergie solaire n'est pas disponible pendant toute la durée du fonctionnement du système d'alimentation électrique, des batteries sont donc nécessaires pour stocker l'énergie dans des unités autonomes.



Figure IV.27 : Batterie Pb-acides de 150 Ah/12V.

IV.10.3 Onduleurs :

On utilise un dispositif électronique statique de conversion ou convertisseur DC/AC pour convertir le courant continu en courant alternatif afin d'alimenter des équipements fonctionnant en courant alternatif.

IV.10.4 Caractéristiques d'onduleurs :

Les onduleurs légers (de faible puissance) offrent une puissance de sortie de 100 à 10000W. La puissance des onduleurs de résistance moyenne varie de 500 à 20000W. Les onduleurs solides (puissants) offrent une puissance électrique allant de 10 000 à 60 000W.

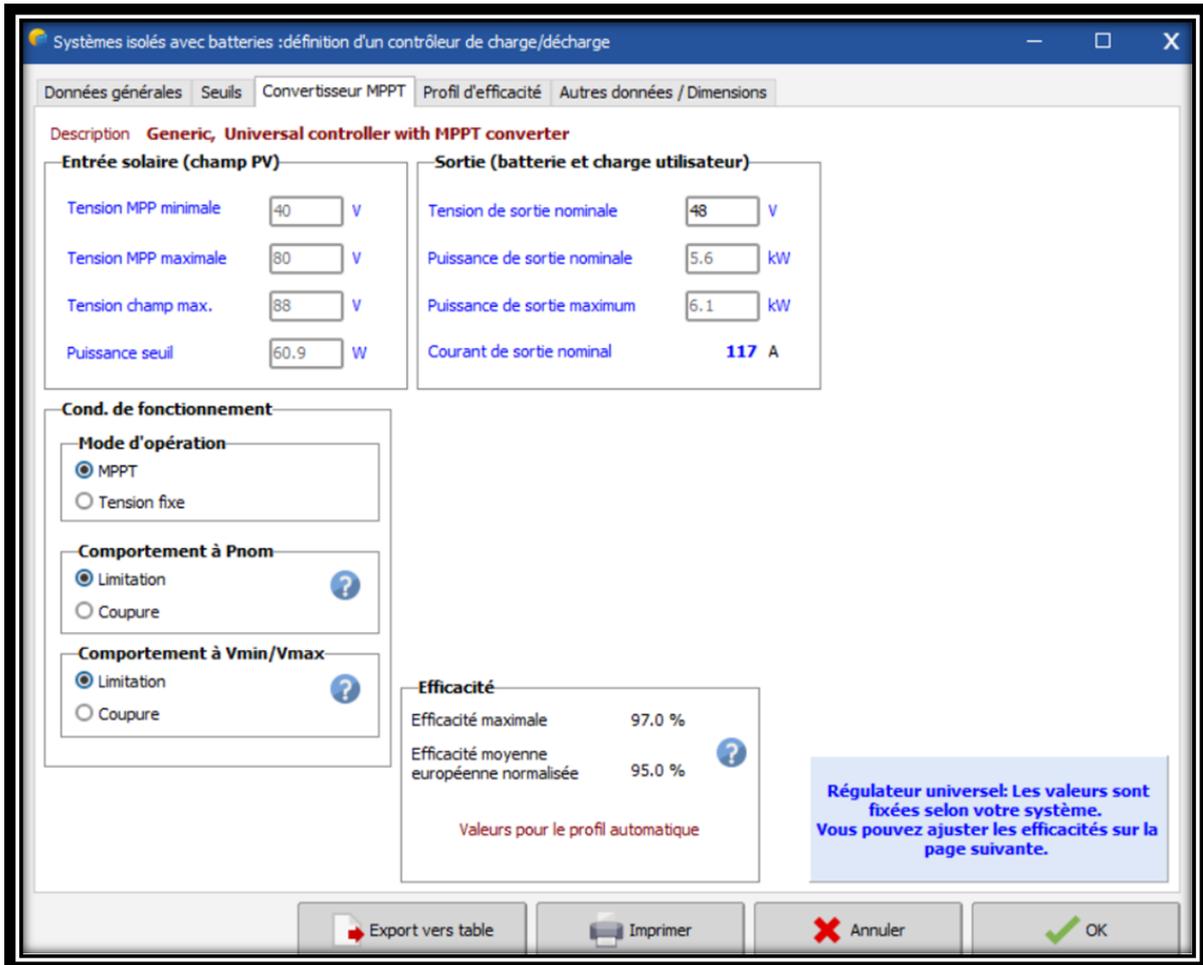


Figure IV.28 : Différentes caractéristiques du convertisseur.



Figure IV.29 : Onduleur de 1000W

IV.11 Le choix des appareils de protections :

D'après la norme *UTE C 15-712-1*, il est nécessaire d'installer un fusible dans les deux pôles de chaque chaîne de panneaux solaires photovoltaïques. En général, le fabricant communique les valeurs de fusible "chaîne. Un disjoncteur DC est installé entre les panneaux et l'onduleur afin de garantir la protection. Un disjoncteur AC est placé entre l'onduleur et la charge afin de garantir la protection.

Le câble qui connecte les panneaux à l'onduleur est un câble photovoltaïque spécial qui peut supporter une température allant de -40 C° à 120 C° et une tension de 1500V, avec la référence H07RN-F.

IV.12 Conclusion :

Un système photovoltaïque (PV) est un système de production d'énergie conçu pour répondre à la demande en électricité. Il se compose de divers composants, principalement des modules photovoltaïques qui servent de collecteur de rayons solaires. De plus, les batteries stockent l'énergie générée par les modules, tandis qu'un régulateur protège contre la surcharge ou la décharge profonde de la batterie. L'onduleur joue un rôle crucial dans la conversion du courant continu en courant alternatif, et les fils électriques facilitent l'interconnexion entre les différents composants du système.

Le principe de l'effet photovoltaïque, le potentiel solaire et diverses technologies de cellules solaires ont été introduits dans notre présentation. Grâce à l'utilisation du logiciel PVSYST, nous avons déterminé que notre installation nécessite 28 panneaux PV d'une capacité de 250 W chacun, ainsi qu'une configuration de 4 batteries connectées en série et 9 batteries connectées en parallèle, fournissant une tension totale de 48 V et une capacité de 150Ah, spécifiquement pour la mosquée "Ayoub".

Il est possible de conclure que les systèmes photovoltaïques autonomes peuvent jouer un rôle crucial en offrant une solution réellement abordable pour répondre aux besoins énergétiques.

L'objectif de notre étude était de simuler une installation photovoltaïque autonome pour alimenter une mosquée à Sidi Bel Abbés en électricité.

Au cours de ce projet, nous avons réalisé une étude technique ainsi qu'une analyse.

Le fonctionnement d'une mosquée équipée d'une énergie solaire photovoltaïque PV à Sidi Bel Abbés entraîne des émissions :

➤ Il est essentiel de connaître le rayonnement solaire utile sur le site d'installation pour concevoir des systèmes photovoltaïques. Il est crucial de posséder cette connaissance pour mener une étude préalable sur le plan des panneaux solaires. Pour une personne

Demande d'énergie électrique, D'après cette recherche, nous avons remarqué que le site de Sidi Bel Abbés présente un potentiel solaire élevé. Grâce à cette étude, nous avons pu évaluer la contribution du système photovoltaïque pour répondre aux besoins énergétiques et réaliser des économies sur les coûts d'électricité.

Conclusion générale :

La performance et le bon fonctionnement du système PV sont des conditions préalables à la stabilité et aux systèmes de production. La Stratégie d'entretien et de maintenance est l'une des caractéristiques qui améliore la prospérité d'une entreprise au niveau de sa situation économique et industrielle. Par conséquent, la stratégie de maintenance Pour gérer les coûts de maintenance, on doit choisir le plus approprié, la Disponibilité des produits et services, le moyen de production et la qualité.

Lors de notre étude qui a porté sur la maintenance d'une installation PV, nous avons parlé en premier de la maintenance et ces types et son importance dans le secteur industriel. Puis en deuxième lieu on a présenté que signifie une installation PV et de quoi est formé. En troisième lieu qui est la partie la plus importante nous avons parlé des défaillances et des pannes qui peut toucher chaque constituant de notre chaine PV comme les modules solaires. La batterie Puis nous avons exploré diverses techniques et méthodes de maintenance, allant de la maintenance préventive et corrective à la maintenance prédictive et proactive. Chacune de ces approches offre des avantages distincts, permettant de prévenir les pannes, de réduire les coûts de réparation, et d'optimiser la production Donc Afin d'éviter la réduction du rendement et minimiser les effets de la dégradation des composants on doit suivre un entretien régulier. C'est pour cela Qu'en mettant en œuvre ces bonnes et cruciales pratiques comme La gestion proactive des ombrages et des défauts de décalage, ainsi que l'utilisation de technologies avancées pour le monitoring des systèmes, vous pouvez non seulement garantir une gestion efficace de votre installation photovoltaïque mais aussi contribuer activement à la transition énergétique vers des sources plus propres et plus durables. Et en quatrième partie nous avons effectué un dimensionnement de notre installation PV à l'aide du logiciel PVsys7. Ensuite, nous avons fait appel à la pour bien obtenir les différentes Courbes à propos de notre étude et d'analyser le rapport de projet contenant le rendement spécifique annuel et le rendement du système. D'après le rapport de la simulation et nos résultats de simulation de l'installation photovoltaïque, nous déduisons que : notre modélisation par le logiciel PVsys7 a abouti à : 28 modules photovoltaïques (14 chaînes en parallèle et 2 modules en série) d'une puissance unitaire de 250 wc et de puissance globale nominale de 7.00 KWp. avec une surface totale des modules de 45.6 m², soit 39,8 m² de surface cellulaire. Batterie de 36 cellules, 4 cellules en série × 9 cellules en parallèle (voir Figure IV.16), avec une tension de 48 V et une capacité nominale 1 350 Ah, stockage D'énergie 51,8 kWh. . On a choisi une batterie Electron de type Pb-acide 12V/150Ah sous une Température fixe 20C°.

Ce mémoire démontre qu'une installation bien entretenue et régulièrement mise à jour est synonyme de performance optimale, de réduction des coûts énergétiques, et d'un impact environnemental positif sur le long terme, et que par une compréhension approfondie des techniques de maintenance et une application rigoureuse des meilleures pratiques, il est possible de surmonter les obstacles et d'optimiser les bénéfices des installations photovoltaïques. En fin de compte, la maintenance bien exécutée est la clé pour exploiter pleinement le potentiel des énergies renouvelables et pour promouvoir un avenir énergétique durable. Donc, la maintenance des installations photovoltaïques est une composante essentielle et primordiale pour garantir leur performance optimale, leur longévité et leur rentabilité.

Bibliographie :

[1] A. Wahiba && le problème conjoint de l'ordonnancement de la production et de planification de la

Maintenance : cas du flow shop flexible && Mémoire de magister. Université M'HAMED BOUGARA

BOUMARDAS.2014

[2] Norme AFNOR FD X 60-000, && Maintenance industrielle – fonction maintenance && Edition

afnor. Paris. Www.afnor.fr. Mai 2002

[3]: Abubakar, A., Almeida, C. F. M., & Gemignani, M. (2021, August). A Review of Solar Photovoltaic

System Maintenance Strategies. In 2021 14th IEEE International Conference on Industry Applications

(INDUSCON) (pp. 1400-1407). IEEE.

[4]: Bamber, C. J., Sharp, J. M., & Castka, P. (2004). Third party assessment: the role of the

Maintenance function in an integrated management system. Journal of Quality in maintenance

Engineering.

[5]: Zhu, G., Gelders, L., & Pintelon, L. (2002). Object/objective-oriented maintenance management.

Journal of quality in maintenance engineering.

[6] : Héng, J. (2005). Pratique de la maintenance préventive : mécanique, pneumatique, hydraulique,

Électricité, froid.

[7] : Sheut, C., & Krajewski, L. J. (1994). A decision model for corrective maintenance management.

The International Journal of Production Research, 32(6), 1365-1382.

[8] : Pham, T. T. L. (2011). Contribution à l'étude de nouveaux convertisseurs sécurisés à tolérance de

Panne pour systèmes critiques à haute performance. Application à un PFC Double-Boost 5 Niveaux

(Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT).

[9] : Meyrieux, C., Garcia, R., Pourel, N., Mège, A., & Bodez, V. (2012). Analyse des risques a priori du

Processus de prise en charge des patients en radiothérapie : exemple d'utilisation de la méthode

Amdec. Cancer/Radiothérapie, 16(7), 613-618.

[10] K.Touafek, "Etude d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique", mémoire de magister, école nationale polytechnique, Alger, 2005.

[11] « White House installs solar-electric system - 1/22/2003 - ENN.com » [archive du 29 février 2004], 29 février 2004 (consulté le 8 avril 2017).

[12] « CORRECTING and REPLACING Phillips 66, South China University of Technology, and Solarmer Energy Set a World Record in Solar Power Conversion Efficiency » [archive], sur businesswire, 22 août 2012 (consulté le 10 December 2017).

[13] Laure-Anne Pessina, « Rendement record pour des cellules solaires en silicium et pérovskite » [archive], sur EPFL, 11 juin 2018 (consulté le 12 juin 2018).

[14] S. Bensmail, « Contribution à la modélisation Et à l'optimisation des systèmes photovoltaïques ». Mémoire De Magister, Génie électrique, Université De A. Mira-Bejaia, 2012.

[15] Mohammed Telidjane « Modélisation des panneaux photovoltaïques et adaptation de la cyclostationarité pour le diagnostic ». Thèse de Doctorat, Université de Jean Monnet SaintEtienne, 2017.

[16] - ZERROUKI Zolikha & BEREKSI REGUIG Rym << Dimensionnement d'un système Photovoltaïque autonome >> UNIVERSITÉ ABOU-BEKR BELKAID – TLEMCEM

[17] IEC (2008). IEC 60904-3 (Ed. 2), Photovoltaic devices - Part 3 : Measurement Principles for Terrestrial Photovoltaic (PV) Solar Devices with Reference Spectral Irradiance Data. Technical report.

[18] - Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07

[19] I. Tsuda, K. Kurokawa, K.Nozaki, «Annual simulation results of photovoltaic system with redox flow battery », solar Energy Materials and solar cells 35, pp 503 –508, 1994.

[20] TRAHY Fatiha. « Application pour le dimensionnement d'une installation

Photovoltaïque pour l'alimentation du laboratoire de recherche LAMPA. » Mémoire de Magister, université de Tizi Ouzou Génie électrique 2011.

[21] <http://www.photovoltaique.guidenr.fr/cours-photovoltaique-autonome-1/fiche-techniquemodule-photovoltaique.php>.

[22] : Labouret, A., & Villos, M. (2006). Energie solaire photovoltaïque (Vol. 3). Malakoff, France : Dunod.

[23] : YOUSSEF, B. Étude Et Réalisation D'une Installation PV Connectée Au Réseau Avec Gestion D'énergie.

[24] : Gergaud, O. (2002). Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur (Doctoral dissertation, École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan)

[25] - MOSTAHSINE Smail, «Etude comparatif de panneaux solaires photovoltaïques à Ifrane», Rapport de licence, Université Sidi Mohammed Ben Abdellah 16 Jin 2015.

[26]- BOUKHLIF Hamza, « Dimensionnement technique d'une installation photovoltaïque De 300kw », Mémoire de Master, Université M'hamed Bougara de Boumerdes, Promotion juin 2017.

[27] .- Damien MAZILLE ; Vincent BOITIER « Documentation pour l'utilisation du logiciel PVSyst V5

[28] <https://narsolar.com/la-distance-entre-les-panneaux/#result>