



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم والعلمي 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 و الأمان الصناعي  
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

**Département de maintenance en instrumentation**

## **MÉMOIRE**

Pour l'obtention du diplôme de Master

**Filière : génie industriel**

**Spécialité : Ingénierie de la maintenance en instrumentation**

### **Thème**

# **Systeme de supervision des cellules photovoltaïques (Maintenance préventive)**

Présenté et soutenu publiquement par :

Mostefa Tounsi Aboubakr Eseddik et Madene Mohamed Radhouane

Devant le jury composé de :

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Etablissement</b>	<b>Qualité</b>
<b>ROUAN SERRIK MEHDI</b>	MCB	IMSI	<b>Président</b>
<b>ARBI MAACHIA</b>	MCB	IMSI	<b>Encadreur</b>
<b>BACHIR BOUIADJRA</b>	MCB	IMSI	<b>Examineur</b>

**Année universitaire**

2023/2024

# **Remerciements**

*Avant tous, nous remercions **ALLAH** tout puissant de nous avoir  
Accordé la force, le courage, la patience et la chance d'étudier et de  
Suivre le chemin de la science.*

*Nos remerciements les plus sincères s'adressent en premier lieu à  
Notre encadrant **M. ARBI MAACHIA** pour ses conseils  
Judicieux et son appui tout au long de cette étude et surtout pour  
Ses Nombreuses critiques constructives. Votre sérieux, votre  
compétence*

*Et votre sens du devoir nous a énormément marqués.*

*Nos remerciements s'adressent également à tous les membres de jury  
qui ont bien voulu accepter de juger ce modeste travail*

*Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches  
et amis.*

## Résumé :

Cette étude met en avant le besoin de systèmes de supervision efficaces pour garantir le succès à long terme des installations photovoltaïques par une maintenance préventive et une gestion optimale des performances. Le premier chapitre présente les éléments constitutifs des systèmes photovoltaïques et leurs caractéristiques. Le deuxième chapitre explore les technologies de supervision pour la maintenance préventive, examinant les composants, architectures et stratégies de surveillance. Le troisième chapitre traite des techniques de maintenance, en insistant sur la planification et l'intégration de la maintenance préventive. En conclusion, l'étude démontre que la mise en place de ces systèmes de supervision est essentielle pour optimiser les performances des installations photovoltaïques et garantir une transition énergétique durable.

## Abstract:

This study highlights the need for effective supervision systems to ensure the long-term success of photovoltaic installations through preventive maintenance and optimal performance management. The first chapter presents the components of photovoltaic systems and their characteristics. The second chapter explores supervision technologies for preventive maintenance, examining the components, architectures, and monitoring strategies. The third chapter addresses maintenance techniques, emphasizing the planning and integration of preventive maintenance. In conclusion, the study demonstrates that the implementation of these supervision systems is essential for optimizing the performance of photovoltaic installations and ensuring a sustainable energy transition.

## ملخص:

هذه الدراسة تبرز الحاجة إلى أنظمة إشراف فعالة لضمان نجاح طويل الأمد للمنشآت الكهروضوئية من خلال الصيانة الاستباقية وإدارة الأداء المثلى. يقدم الفصل الأول العناصر المكونة لأنظمة الكهروضوئية وخصائصها. يستكشف الفصل الثاني تقنيات الإشراف للصيانة الوقائية، ويفحص المكونات والهياكل والاستراتيجيات المراقبة. يتناول الفصل الثالث تقنيات الصيانة، مع التركيز على تخطيط ودمج الصيانة الوقائية. في الختام، تُظهر الدراسة أن تنفيذ هذه الأنظمة الإشرافية ضروري لتحسين أداء المنشآت الكهروضوئية وضمان انتقال طاقي مستدام.

# Sommaire

**Remerciements**

**Résumé**

**Abstract**

**ملخص**

**Liste des abréviations**

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

**Introduction générale**

**Chapitre I : Généralité sur les installations photovoltaïques**

I	Introduction.....	1
II	Effet photovoltaïque.....	1
III	Cellule photovoltaïque.....	2
III.1	La cellule PV.....	2
III.2	La structure.....	3
III.3	Principe de fonctionnement.....	3
III.4	Caractéristiques.....	4
III.4.1	Les cellules mono- cristallines.....	4
III.4.2	Les cellules polycristallines.....	5
III.4.3	Les cellules amorphes.....	6
IV	Composants d'un système PV.....	6
IV.1	Générateur.....	7
IV.2	Onduleur.....	8
IV.3	Batterie.....	9
IV.4	Régulateur.....	9
IV.5	La charge.....	10
IV.5.1	Les lampes.....	10
IV.5.2	Réfrigération.....	10

IV.5.3	Ventilation.....	10
IV.5.4	Ordinateurs.....	10
V	Type d'installation photovoltaïque.....	10
V.1	Système photovoltaïque autonome.....	11
V.1.1	Fonctionnement d'une installation photovoltaïque autonome.....	11
V.1.2	Les avantages.....	12
V.2	Système photovoltaïque résidentiel raccordé au réseau.....	13
V.2.1	Fonctionnement d'un système photovoltaïque grid-connected.....	13
V.2.2	Les avantages.....	14
V.3	Systèmes avec stockage d'énergie électrique « Storage » connecté au réseau. Électrique.....	14
V.3.1	Fonctionnement des systèmes photovoltaïques hybrides.....	16
V.4	Systèmes photovoltaïques plug &Play.....	17
V.4.1	Fonctionnement un système photovoltaïque plug &play.....	18
V.4.2	Les avantages d'un système photovoltaïque plug &play.....	18
VI	Optimisation des pertes des installations photovoltaïques.....	19
VI.1	Pertes des installations PV.....	19
VI.1.1	Pertes par ombrage.....	21
VI.1.2	Pertes par température.....	22
VI.1.3	Pertes par chutes ohmiques.....	24
VI.1.4	Pertes dues à l'encrassement.....	26
VI.1.5	Pertes spectrales.....	29
VI.1.6	Autres pertes.....	30
VII	Dimensionnement d'une installation photovoltaïque.....	31
VII.1	Calcul de l'Energie consommée par jour.....	31
VII.2	Calcul de l'énergie à produire (Prise en compte du rendement Chaîne de conversion).....	33
VII.3	Calcul de la puissance crête des panneaux à installer et leur nombre.....	34

VII.4	Dimensionnement de la batterie, du régulateur, de l'onduleur, des câbles.....	34
VII.5	Vérification du dimensionnement.....	36
VIII	Conclusion.....	37

## **Chapitre II : système de supervision des installations photovoltaïques**

I	Introduction.....	38
II	Système de supervision.....	38
II.1	Définition.....	38
II.2	Objectifs Principaux.....	38
III	Composants des Systèmes de Supervision.....	40
III.1	Capteurs et Instruments de Mesure.....	40
III.1.1	Capteur d'irradiance solaire.....	40
III.1.2	Capteur de température.....	42
III.1.3	Capteurs de vent ou anémomètre.....	42
III.1.4	Voltmètres et ampèremètres.....	43
III.2	Les contrôleurs.....	44
III.2.1	Contrôleur de Charge.....	44
III.2.1.1	Compensation de température.....	45
III.2.1.2	Protection contre les courants inverses.....	45
III.2.1.3	Les technologies de contrôleur de charge.....	46
III.2.1.3.1	Le régulateur PWM.....	46
III.2.1.3.2	Le régulateur MPPT.....	47
III.3	Systèmes de communication.....	49
III.4	Logiciels de Supervision.....	49

III.4.1	Solariens.....	50
III.4.2	PV Système.....	51
III.4.3	SMA Sunny Portal.....	52
III.5	Interfaces utilisateur.....	53
IV	Câblage des composants.....	54
IV.1	Câbles de données.....	54
IV.2	Câbles d'alimentation.....	55
V	Architecture de système de supervision.....	56
V.1	Installations PV pour bâtiments commerciaux et industriels.....	56
V.2	Installations à grande échelle.....	58
V.3	Installations à petite échelle.....	59
VI	Les technologies de système de supervision.....	59
VI.1	Système SCADA.....	59
VI.2	Système de surveillance basé sur l'IoT.....	61
VI.3	L'intelligence artificielle.....	63
VII	Stratégies de surveillance.....	65
VII.1	Surveillance en temps réel.....	65
VII.2	Surveillance périodique.....	66
VII.3	Surveillance basée sur les alarmes.....	66
	Conclusion .....	67

### **Chapitre III : la maintenance préventive des installation photovoltaïques**

I	Introduction.....	68
II	La maintenance.....	68
II.1	Définition de maintenance.....	68
II.2	Rôle de maintenance.....	69
II.3	Objectifs de maintenance.....	69
II.4	Les différents types de maintenance.....	70
II.4.1	Maintenance corrective.....	70
II.4.2	Maintenance préventive.....	71
II.5	Organigramme de politique de maintenance.....	73
III	La maintenance photovoltaïque.....	74
IV	La maintenance préventive des installations photovoltaïques.....	74
IV.1	La planification dans le système de supervision.....	75
IV.1.1	Évaluation Initiale et Analyse des Besoins.....	75
IV.1.2	Élaborer un Calendrier de Maintenance.....	77
IV.1.3	Mise en Œuvre des Procédures de Maintenance.....	78
IV.1.4	Surveillance et Suivi en Temps Réel.....	78
V	Technique de maintenance préventive.....	79
V.1	Inspection Visuelle Régulière.....	80
V.2	Nettoyage des Panneaux.....	80
V.3	Vérification des Onduleurs.....	81
V.4	Batteries.....	82
V.5	Tests électriques.....	82

VI	Le logiciel GMAO photovoltaïque.....	83
VI.1	Utilisation de GMAO pour réduire consommation d'énergie.....	85
VII	Intégration de la maintenance préventive dans le système de supervision.....	87
VIII	Conclusion.....	88

### **Conclusion Générale**

## Liste des abréviations :

**GMAO** : Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur

**SCADA** : Supervisory Control and Data Acquisition

**API** : Automates Programmables Industriels

**RTU** : Remote Terminal Units

**IHM** : Interfaces Homme-Machine

**PLC** : Programmable Logic Controller

**AFNOR** : Association Française de la Normalisation

**DC** : Direct Current (Courant Continu)

**PV** : Photovoltaïque

**RGM** : Réseau de Gestion de Maintenance

**CA** : Courant Alternatif

**CC** : Courant Continu

**UTE** : Union Technique de l'Électricité

**Si** : Silicium

**Ge** : Germanium

**Se** : Sélénium

**P<sub>max</sub>** : Puissance Maximale

**V<sub>max</sub>** : Tension Maximale

**I<sub>max</sub>** : Courant Maximale

**J** : Joule

**M** : mètre

**A** : Ampère

**V** : Volt

**P** : Puissance

**L** : Longueur

**%** : Pourcentage

**PVGIS** : Photovoltaïque Geographical Information System

**KW** : Kilowatt

**MW** : Mégawatt

**KWh** : Kilowatt-heure

**RE** : Régulateur de charge

**TCO** : Total Cost of Ownership (Coût Total de Possession)

**ROI:** Return on Investment (Retour sur Investissement)

**MPPT:** Maximum Power Point Tracking

**BMS :** Battery Management System

**UPS :** Uninterruptible Power Supply (Alimentation Sans Interruption)

**EMS :** Energy Management System (Système de Gestion de l'Énergie)

**DOD :** Depth of Discharge (Profondeur de Décharge)

**SOC :** State of Charge (État de Charge)

**SOH :** State of Health (État de Santé)

**IRR :** Internal Rate of Return (Taux de Rentabilité Interne)

**CAGR:** Compound Annual Growth Rate (Taux de Croissance Annuel Composé)

**NREL:** National Renewable Energy Laboratory

**BIPV:** Building-Integrated Photovoltaics

**LCOE:** Levelized Cost of Energy (Coût Actualisé de l'Énergie)

**PPA:** Power Purchase Agreement (Contrat d'Achat d'Électricité)

**ESR:** Equivalent Series Resistance (Résistance Série Équivalente)

**STS:** Static Transfer Switch

**MTBF:** Mean Time Between Failures (Temps Moyen Entre Pannes)

**MTTR:** Mean Time to Repair (Temps Moyen de Réparation)

**HVAC:** Heating, Ventilation, and Air Conditioning

**LED:** Light Emitting Diode

**IEEE:** Institute of Electrical and Electronics Engineers

**ISO:** International Organization for Standardization

**OEM:** Original Equipment Manufacturer

**OS:** Operating System

**LAN:** Local Area Network

**WAN:** Wide Area Network

## Liste des figures :

### Chapitre I : Généralité sur les installations photovoltaïques

**Figure I.1** : L'effet photovoltaïque

**Figure I.2** : Cellule photovoltaïque

**Figure I.3** : Structure cellules photovoltaïques

**Figure I.4** : Principe de fonctionnement d'une cellule PV

**Figure I.5** : Mono- cristallines

**Figure I.6** : Cellule polycristallines

**Figure I.7** : Cellules amorphes

**Figure I.8** : Les différents composants d'un système photovoltaïque autonome

**Figure I.9** : Générateur photovoltaïque

**Figure I.10** : Symbole de l'onduleur

**Figure I.11** : Régulateur autonome

**Figure I.12** : Système photovoltaïque autonome (éléments caractéristiques)

**Figure I.13** : Système photovoltaïque autonome

**Figure I.14** : système photovoltaïque grid-connected

**Figure I.15** : fonctionnement Système photovoltaïque *grid-connected*.

**Figure I.16** : Composant du système avec Storage connecté au réseau

**Figure I.17** : Système photovoltaïque avec Storage connecté au réseau

**Figure I.18** : Installation avec stockage connecté au réseau

**Figure I.19** : Système photovoltaïque plug&play (éléments caractéristiques)

**Figure I.20** : Fonctionnement Système photovoltaïque plug&play

**Figure I.21** : Pertes des installations PV

**Figure I.22** : Pertes par ombrage

**Figure I.23** : Règle des 18°.

**Figure I.24** : Pertes par température

**Figure I.25** : Coefficient de température.

**Figures I.26** : Solutions Pertes par température

**Figure I.27** : Mesure chutes de tension

**Figure I.28** : Solution Pertes par chutes ohmiques

**Figure I.29** : La pollution sur les panneaux solaires

**Figure I.30** : Perte moyenne annuelle de salissures (2006-2020) ; système PV à inclinaison fixe

**Figure I.31** : Nettoyage des panneaux photovoltaïques.

**Figure I.32 :** les facteurs de correction pour les différents ensembles de coefficients pour une gamme de masses d'air de 1 à 5 et une gamme d'eau précipitable de 0 cm à 10 cm.

**Figure I.33 :** Pertes mis match et L'effet d'incidence

**Figure I.34 :** Procédure de dimensionnement d'une installation photovoltaïque

**Figure I.35 :** méthode lecture de la facture

**Figure I.36 :** relevé informatique

**Figure I.37 :** tableau consommation d'énergie des équipements

## **Chapitre II : système de supervision des installations photovoltaïques**

**Figure II.1 :** Quelques techniques de supervision des installations photovoltaïques

**Figure II.2 :** Le pyranomètre.

**Figure II.3 :** capteur d'irradiance solaire à cellule de référence.

**Figure II.4 :** le capteur CS241DM de température

**Figure II.5 :** Anémomètre

**Figure II.6 :** le contrôleur de charge

**Figure II.7 :** l'emplacement de régulateur de charge dans installation une photovoltaïque

**Figure II.8 :** courbes de charge de régulateur pwm

**Figure II.9:** network monitoring software.

**Figure II.10:** simulation en PV System.

**Figure II.11:** logiciel SUNNY PORTAL.

**Figure II.12:** système de supervision d'une installation pv.

**Figure II.13 :** câbles coaxiaux.

**Figure II.14:** câble STP et UTP.

**Figure II.15:** câbles armés.

**Figure II.16:** Système de monitoring pour les installations PV commerciales.

**Figure II.17:** système de télésurveillance utilisé dans des installations à grande échelle.

**Figure II.18:** les composantes d'un système SCADA.

**Figure II.19:** SCADA dans les installations photovoltaïques.

**Figure II.20:** principe de Iot

**Figure II.21:** un robot place sur le panneau solaire.

**Figure II.22 :** un tracker solaire.

**Figure II.23 :** drone thermique.

**Figure II.24:** Surveillance en temps réel

## **Chapitre III : la maintenance préventive des installation photovoltaïques**

**Figure III.1** : maintenance d'une installation photovoltaïque

**Figure III.2** : Les objectifs de la maintenance

**Figure III.3** : comparaison entre les types de maintenance

**Figure III.4** : Organigramme de politique de maintenance.

**Figure III.5** : Dimensionnement photovoltaïque en Site isolé.

**Figure III.6** : Suivi des données de production.

**Figure III.7** : Détection de points chauds par thermographie

**Figure III.8** : Contrôler les connections à la terre

**Figure III.9** : Salissure à la surface des modules.

**Figure III.10** : Entretien d'un onduleur photovoltaïque.

**Figure III.11** : inspection de l'armoire électrique.

**Figure III.12** : interface GMAO photovoltaïque

### **Liste des tableaux :**

**Tableau I.11** : La différence entre les batteries PV.

**Tableau II.1** : comparaison entre les caractéristiques du pyranomètre et du capteur d'irradiance solaire a cellule de référence.

**Tableau III.1** : Exemple de calendrier de maintenance préventive pour une Installation PV.



## **Introduction générale :**

L'énergie solaire photovoltaïque représente l'une des sources d'énergie renouvelable les plus prometteuses pour répondre aux défis énergétiques mondiaux et réduire notre dépendance aux combustibles fossiles. Avec son potentiel illimité et son impact environnemental réduit, l'énergie solaire est devenue un pilier incontournable de la transition énergétique vers un avenir plus durable et résilient.

Cependant, pour garantir le succès et la durabilité à long terme des installations photovoltaïques, il est impératif de mettre en place des systèmes de supervision efficaces qui permettent une maintenance préventive et une gestion optimale des performances. Ce mémoire se concentre sur l'importance d'un tel système de supervision dans l'optimisation des performances des installations photovoltaïques par le biais de la maintenance préventive. Dans le premier chapitre nous avons présenté les différents éléments qui entrent dans la constitution d'un système photovoltaïque tel que la cellule, module et champ PV, avec la mention de fonctionnement du système Photovoltaïque, et type d'installation PV et leurs caractéristiques.

Le deuxième chapitre explore en détail les concepts et les technologies liés aux systèmes de supervision pour la maintenance préventive. En examinant les différents composants, les architectures de système et les stratégies de surveillance et leur avantage et inconvénient, cette section cherche à identifier les meilleures pratiques et les approches innovantes pour optimiser les performances des installations photovoltaïques.

Le troisième chapitre traite la maintenance préventive des installation PV et leurs techniques, utilisant des technologies avancées pour une meilleur surveillance et pour détecter et résoudre les problèmes avant qu'ils n'affectent gravement la production d'énergie d'un système PV.

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

**Chapitre 1 :**

**Généralité sur les installations**

**photovoltaïques**

## I. Introduction :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. Il utilise pour se faire des modules photovoltaïques composés de cellules. Ces cellules photovoltaïques sont constituées de semi-conducteurs à base de silicium (Si), de germanium (Ge), de sélénium (Se)...etc. Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques, car il est très abondant dans la nature. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. [1]

Ce chapitre introduira la cellule photovoltaïque, son fonctionnement et ses caractéristiques ainsi que les composants d'un système PV et les types des installations photovoltaïques.

## II. Effet photovoltaïque :

Le mot photovoltaïque est composé de deux parties : le préfixe « photo », qui est un dérivé du mot grec désignant « lumière » ou « clarté », et le suffixe « volt », relatif au pionnier de l'électricité Alessandro VOLTA.

L'effet photovoltaïque, souvent abrégé PV, est un phénomène physique observé dans certains Matériaux, en particulier les semi-conducteurs comme le silicium. Il se caractérise par trois étapes essentielles : l'absorption de la lumière par la cellule PV, le transfert de l'énergie des Photons aux charges électriques, et enfin la collecte de ces charges. La puissance générée par un système photovoltaïque est directement proportionnelle au nombre de cellules utilisées. Pour maximiser la rentabilité, il est nécessaire de garantir une exposition homogène de toute la surface au rayonnement solaire. De plus, afin d'obtenir la puissance optimale, il convient de prendre en compte trois paramètres : l'orientation, l'inclinaison et la température. Maintenir cette dernière à un niveau minimal en assurant une ventilation suffisante est crucial pour le bon fonctionnement du dispositif photovoltaïque. En contrôlant ces éléments, on peut améliorer les performances globales du système. [2]

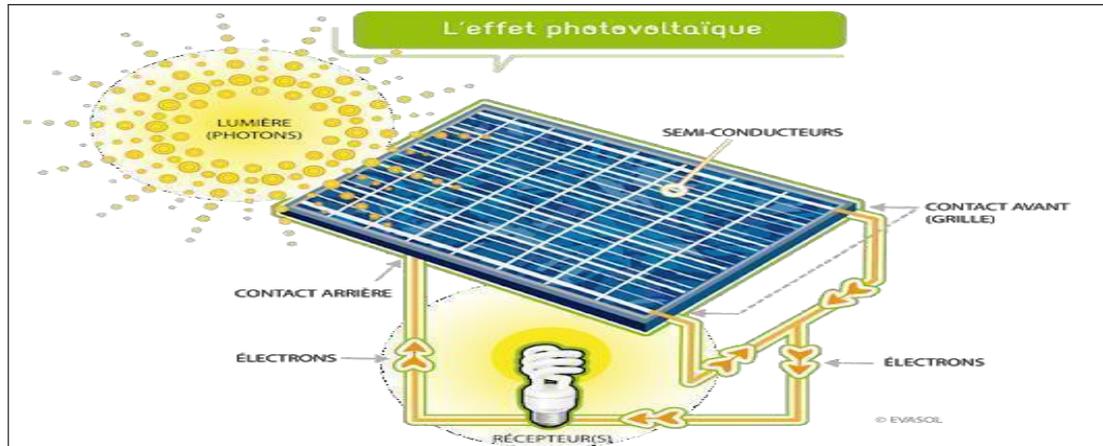


Figure (I.1) : L'effet photovoltaïque.

### III. Cellule photovoltaïque :

#### III.1 La cellule PV :

Une cellule photovoltaïque, également connue sous le nom de cellule solaire, est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque, Elle est composée de matériaux semi-conducteurs de type P-N elle génère de l'électricité lorsqu'elle est exposée à la lumière grâce à l'effet photovoltaïque. La puissance électrique produite est directement liée à l'intensité lumineuse incidente et varie en fonction du rendement de la cellule. Cette transformation repose sur les trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons par le matériau constituant le dispositif
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires d'électrons/trous dans le matériau semi-conducteur
- Collecte des particules générées dans le dispositif. [3]



Figure (I.2) : Cellule photovoltaïque.

### III.2 La structure :

Le silicium, largement utilisé dans la fabrication des cellules photovoltaïques, est obtenu à partir de la silice, abondante dans la croûte terrestre sous forme de sable ou de quartz. Initialement produit comme silicium métallurgique à 98% de pureté, il est ensuite purifié à plus de 99,999% pour être utilisé dans les applications photovoltaïques. Ce processus implique la transformation du silicium en un composé chimique, suivi de distillation et reconversion en silicium. Le silicium purifié est façonné en lingots, puis découpé en plaques fines appelées wafers. Ces wafers subissent un traitement pour devenir du silicium semi-conducteur de type P ou N, puis sont métallisés en ajoutant des rubans de métal pour former les cellules photovoltaïques.

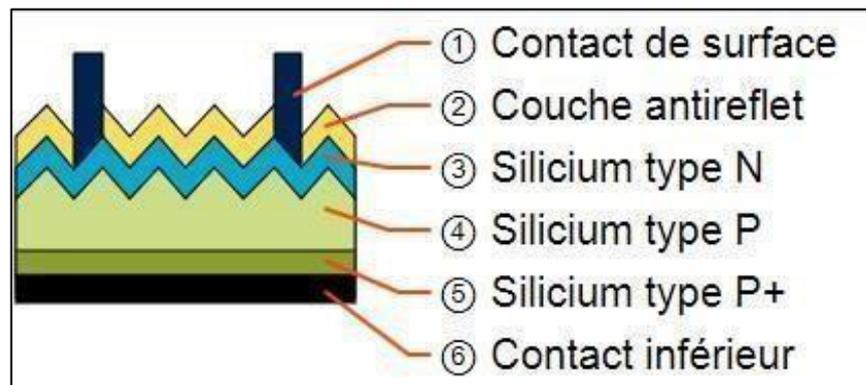


Figure (I.3) : structure cellules photovoltaïques.

### III.3 Principe de fonctionnement :

Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque est fondé sur les propriétés de semi-conducteurs qui percutés par les photons, mettent en mouvement un flux d'électrons. Les photons sont des particules élémentaires qui transportent l'énergie solaire à 300 000 km/s et qu'Albert Einstein appelait dans les années 1920 les « grains de lumière ». Lorsqu'ils frappent un élément semi-conducteur comme le silicium, ils arrachent des électrons à ses atomes. Ces électrons se mettent en mouvement, de façon désordonnée, à la recherche d'autres « trous » où se repositionner.

Mais pour qu'il y ait un courant électrique, il faut que ces mouvements d'électrons aillent tous dans le même sens. Pour les y aider, on va associer deux types de silicium. La face exposée au soleil est « dopée » avec des atomes de phosphore qui comportent plus d'électrons que le silicium, l'autre face est dopée avec des atomes de bore qui comportent moins d'électrons. Cette double face devient une sorte de pile : le côté très chargé en électrons devient la borne négative (N), le côté avec moins d'électrons devient la borne positive (P). Entre les deux il se crée un champ électrique. Quand les photons viennent exciter les électrons, ceux-ci vont migrer vers la zone N grâce au champ électrique, tandis que

les « trous » vont vers la zone P. Ils sont récupérés par des contacts électriques déposés à la surface des deux zones avant d'aller dans le circuit extérieur sous forme d'énergie électrique. Un courant continu se crée. Une couche antireflet permet d'éviter que trop de photons se perdent en étant réfléchis par la surface. [4]

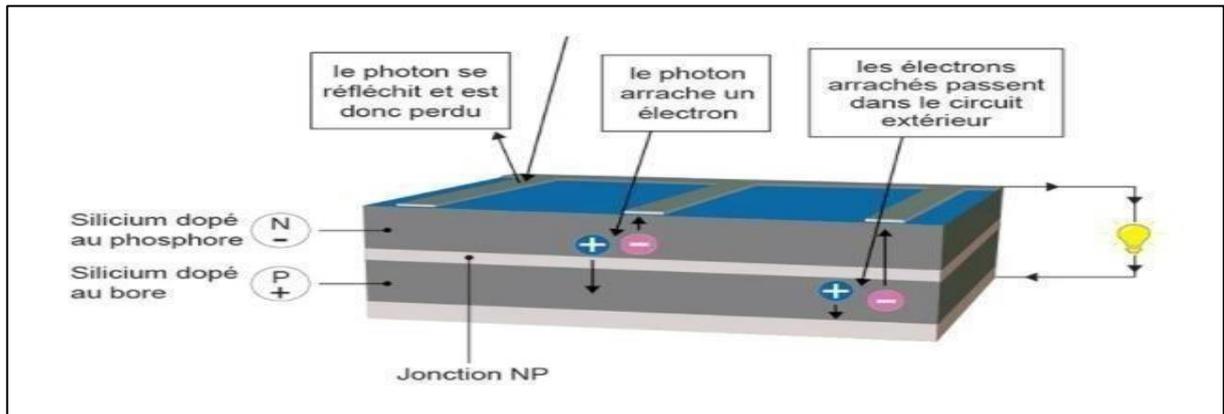


Figure (I.4) : Principe de fonctionnement d'une cellule PV

### III.4 Caractéristiques :

Les différents types des cellules solaires : Il existe trois types principaux de cellules :

#### III.4.1 Les cellules mono- cristallines :

La cellule monocristalline qui s'approche le plus du modèle théorique : cette cellule est effectivement composée d'un seul cristal divisé en deux couches. Les cellules monocristallines permettent d'obtenir de hauts rendements, de l'ordre de 15 à 22 %. Ces cellules souffrent néanmoins des inconvénients :

- Méthode de production exigeante et complexe, ce qui la rend très coûteuse.
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.
- Une durée d'amortissement de l'investissement en énergie élevée (jusqu'à 7 ans).



Figure (I.5) : Mono- cristallines

### III.4.2 Les cellules polycristallines :

Les cellules polycristallines sont composées d'un agglomérat de cristaux. Elles aussi proviennent du sciage de blocs de cristaux, mais ces blocs sont coulés et sont dès lors Hétérogènes.

. Les cellules poly- cristallines sont caractérisées par :

- Coût de production moins élevé.
- Nécessite moins d'énergie.
- Rendement de 13% et jusqu'à 20% en labo.



Figure (I.6) : Cellule polycristalline.

### III.4.3 Les cellules amorphes :

Le silicium amorphe, est apparu en 1976. Sa structure atomique est désordonnée, cristallisée, mais il possède un coefficient d'absorption supérieur à celui du silicium cristallin. Toutefois, les gains en capacité d'absorption sont compensés par une diminution de la mobilité des charges électriques, entraînant ainsi un faible rendement de conversion.

- Coût de production bien plus bas.
- Rendement de seulement 5 % par module et de 14 % au laboratoire.
- Fonctionne sous très faible éclaircissement. [5]



Figure (I.7) : Cellules amorphes.

## IV. Composants d'un système PV :

Un system PV est un ensemble complet d'équipement permettant de transformer la lumière du soleil en électricité et l'utiliser pour alimenter des équipements tels que des lampes, des petits appareils... etc.

En général les installations photovoltaïques comprennent les éléments essentiels : générateur, onduler, régulateur, batterie, stockage.

Par le mécanisme photovoltaïque, les panneaux PV transforment l'énergie solaire en courant continu (CC). Ce dernier peut être utilisé directement, soit sera converti en courant alternatif (CA) par l'onduleur. Le surplus d'énergie produit par le système est emmagasiné dans les accumulateurs (batteries). La charge et la décharge des batteries sont contrôlées par le Régulateur qui assure la régulation entre la production, la consommation et le stockage. [6]

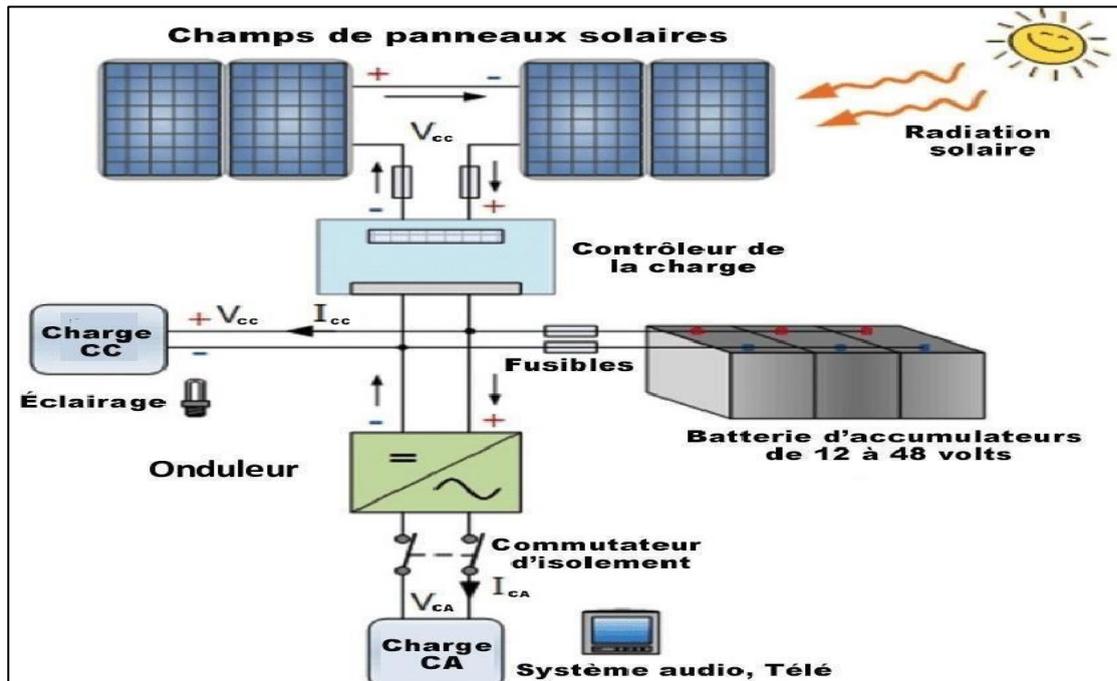


Figure (I.8) : Les différents composants d'un système photovoltaïque autonome.

#### IV.1 Générateur :

Le générateur photovoltaïque est l'unité de production d'énergie électrique sous forme de courant continu. Le composant élémentaire de cette unité qui convertit l'énergie solaire en l'énergie électrique est la cellule photovoltaïque. [7]

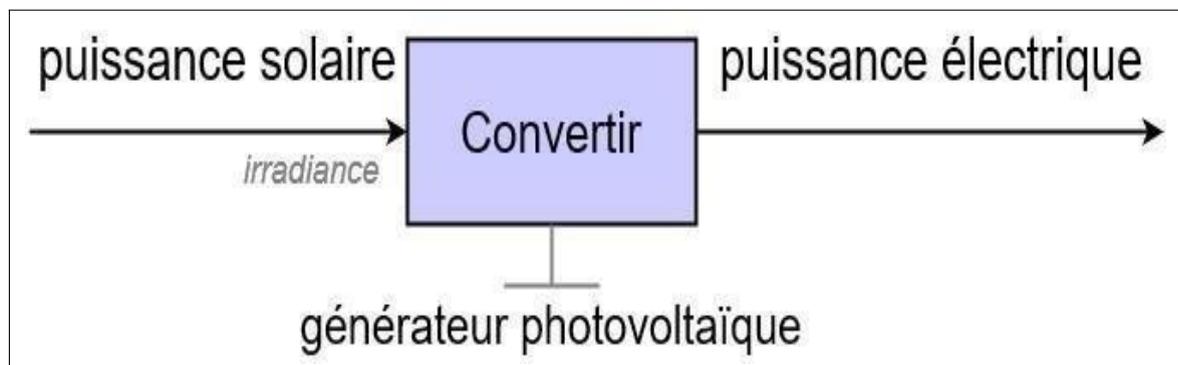
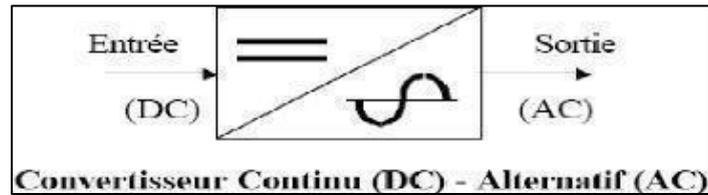


Figure (I.9) : générateur photovoltaïque.

## IV.2 Onduleur :

Un onduleur est un appareil électrique permettant de transformer la tension / courant Continu issue des modules photovoltaïques ou des batteries en tension / courant alternatif il dit autonome s'il Il assure sa propre fréquence et sa propre forme d'onde.



**Figure (I.10) :** Symbole de l'onduleur.

Les principales caractéristiques des onduleurs sont :

- Puissance nominale.
- Puissance de point ou surcharge.
- Consommation à vide.
- Rendement et la durée de vie.
- Tension d'entrée et de sortie.

### IV.3 Batterie :

Les batteries utilisées pour stocker l'énergie sont spécifiquement conçues pour répondre aux besoins de cyclage quotidien et à la charge lente provenant des panneaux solaires. Leur durée de vie est significativement prolongée lorsque la profondeur de décharge quotidienne est maintenue en dessous de 30% de la capacité totale pour les batteries au plomb, et jusqu'à 70% pour les batteries au lithium.

TECHNOLOGIE	PLOMB-ACIDE	GEL	AGM
Tension	12 V	6 V et 12 V	6 V et 12 V
Capacité de la batterie (Ah)	de 40 à 180	de 16 à 210	de 33 à 225
Courant de démarrage à froid EN (A)	de 330 à 920	de 180 à 1030	de 680 à 950
Angle de montage	Sans inclinaison	N'importe quelle position	N'importe quelle position
Exigence de charge	DC. 10 % de la capacité	DC. de 25 % à 50 % de la capacité	DC. de 25 % à 50 % de la capacité
Temps de décharge	Au bout de 8 mois, elle maintient 35% de la charge	Au bout de 2 ans, elle maintient 85 % de la charge	Au bout de 2 ans, elle maintient 85 % de la charge
Durée de vie utile (cycles de charge/décharge)	Entre 350 et 400	Entre 550 et 600	Entre 550 et 600
Capacité de décharge maximale	Environ 55 % -60 %	Environ 75 %	Environ 75 %
Perte d'électrolyte possible	Perte de liquide possible	Perte de gel possible	Perte de gel possible

**Tableau (I.1) :** La différence entre les batteries PV.

### IV.4 Régulateur :

Le régulateur joue un rôle essentiel au sein d'un système photovoltaïque. Positionné entre les panneaux solaires et les batteries, son rôle principal est de protéger ces derniers contre les surcharges et les décharges excessives. En assurant une gestion optimale de l'énergie, le régulateur contribue à prolonger la durée de vie des batteries et garantit ainsi une autonomie prolongée du système photovoltaïque.



**Figure (I.11) :** Régulateur autonome.

#### **IV.5 La charge :**

La charge et l'équipement électrique alimenté par le système, pouvant être de type continu. Des équipements de télécommunication, nécessite un onduleur.

##### **IV.5.1 Les lampes :**

Constituent les récepteurs principaux des systèmes. La lampe fluorescente est largement privilégiée en raison de son rendement élevé. Les lampes à incandescence et à halogène, quant à elles, seront utilisées de manière limitée pour des périodes d'éclairage courte.

##### **IV.5.2 Réfrigération :**

Les réfrigérateurs pour installations utilisent des compresseurs fonctionnant avec un moteur DC et une armoire à isolation renforcée. [8]

##### **IV.5.3 Ventilation :**

Pour la ventilation de petits espaces, il existe une large gamme de ventilateur DC utilisés en électronique. Certains sont même déjà montés avec des cellules solaires dans une bouche de ventilation pour caravane ou bateau. [9]

##### **IV.5.4 Ordinateurs :**

La recharge des ordinateurs portables nécessite généralement des tensions de 15 à 20V, ce qui implique l'utilisation d'un convertisseur DC/DC approprié.

#### **V. Type d'installation photovoltaïque :**

Les principales catégories de systèmes photovoltaïques comprennent les suivantes :

- Les systèmes photovoltaïques autonomes, également appelés "stand Alone"
- Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique, souvent désignés sous le terme "grid connected".

En outre, l'évolution de ces types d'installations a introduit deux nouveaux systèmes photovoltaïques : le système de stockage connecté au réseau et l'innovant plug&play.

## V.1 Système photovoltaïque autonome :

Le système solaire autonome est un type d'installation photovoltaïque qui fonctionne de manière indépendante du réseau électrique national. Il est connecté à un système de stockage d'énergie, généralement des batteries, qui stockent l'électricité produite par l'installation pour être utilisée lorsque nécessaire par les utilisateurs.



**Figure (I.12) :** *Système photovoltaïque autonome (éléments caractéristiques)*

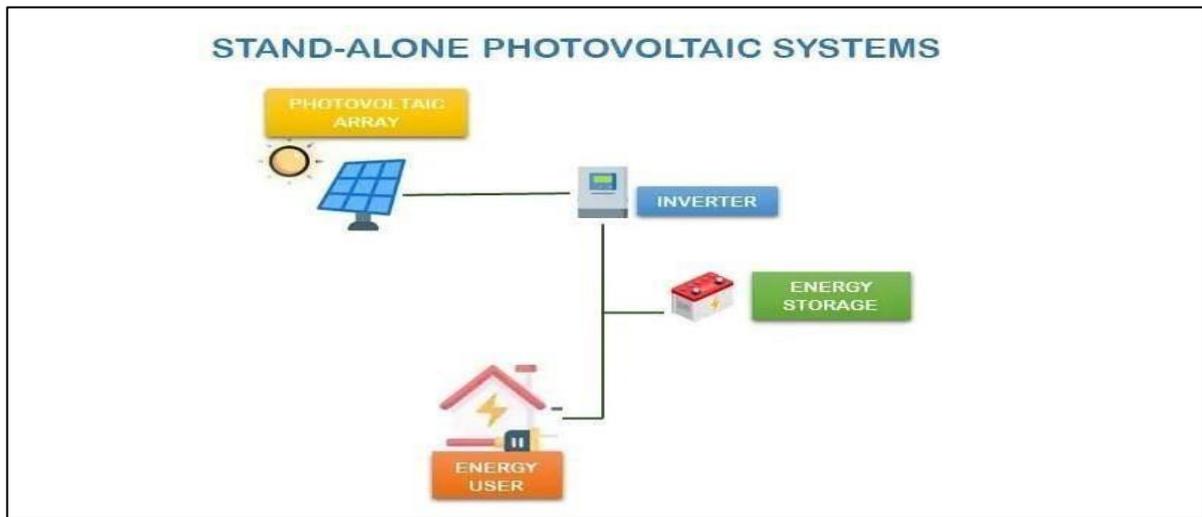
Les éléments typiques d'un système autonome sont les suivants :

- Champ photovoltaïque
- Onduleur
- Accumulateur
- Régulateur de charge.

### V.1.1 Fonctionnement d'une installation photovoltaïque autonome :

Dans une installation photovoltaïque autonome, les panneaux solaires captent l'énergie solaire incidente et la transforment en courant continu. Cette électricité est ensuite convertie en courant alternatif par l'onduleur. L'utilisateur peut alors consommer cette énergie immédiatement ou la stocker dans des batteries pour une utilisation ultérieure. Lorsque nécessaire, l'énergie stockée est prélevée des batteries. Pour garantir l'efficacité de ce processus de charge et de décharge des batteries, un régulateur de charge est intégré pour contrôler et ajuster le flux d'énergie. Ainsi, l'installation photovoltaïque autonome

Assure une utilisation efficace de l'énergie solaire, permettant une alimentation continue et fiable même en l'absence de réseau électrique.



**Figure (I.13) :** *Système photovoltaïque autonome*

### V.1.2 Les avantages :

Avec la baisse des coûts des composants et la popularisation de la technologie lithium, les installations photovoltaïques autonomes deviennent de plus en plus compétitives par rapport aux systèmes alimentés par des combustibles fossiles. Ces systèmes offrent plusieurs avantages tant pour l'environnement que pour les utilisateurs :

- Réduction totale des émissions : Les utilisateurs consomment l'électricité produite sans émettre de gaz polluants, ce qui contribue à la préservation de l'environnement.
- Stabilité des coûts énergétiques : Contrairement aux fluctuations des prix de l'énergie liées au marché du pétrole et du gaz, le coût de l'énergie reste constant pendant toute la durée de vie de l'installation photovoltaïque autonome.
- Flexibilité accrue : Ces installations sont hautement adaptables, tant au niveau de leur capacité à évoluer que de l'extension possible du système de stockage électrique, offrant ainsi une solution évolutive et adaptable aux besoins changeants des utilisateurs.

## V.2 Système photovoltaïque résidentiel raccordé au réseau :

Le système photovoltaïque couplé au réseau, également connu sous le nom de grid-connected, est un système solaire qui est interconnecté au réseau électrique national. Dans ce type d'installation, le réseau électrique devient essentiellement un réservoir de stockage infini. Lorsque l'installation produit de l'énergie à partir de sources renouvelables et que l'utilisateur n'en consomme pas la totalité, l'excédent est injecté dans le réseau. À l'inverse, lorsque l'installation ne produit pas d'électricité, comme pendant la nuit, l'électricité est prélevée sur le réseau pour répondre aux besoins de l'utilisateur.

### GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

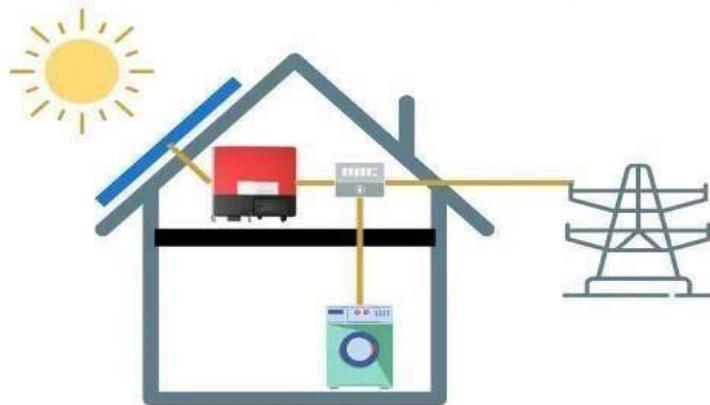


Figure (I.14) : système photovoltaïque grid-connected

L'installation photovoltaïque grid-connected se compose de plusieurs éléments :

- Panneau solaire
- Onduleur
- Compteur de production
- Compteur d'échange

### V.2.1 Fonctionnement d'un système photovoltaïque grid-connected :

Le fonctionnement d'une installation grid-connected repose sur les étapes suivantes : Le générateur photovoltaïque capte le rayonnement solaire, puis l'onduleur transforme l'énergie continue en énergie alternative. Cette électricité produite est utilisée instantanément si l'utilisateur en a besoin ou bien elle est injectée dans le réseau électrique.

En cas de besoin, l'énergie peut également être prélevée du réseau. Ce système est caractérisé par l'utilisation de deux compteurs distincts : le compteur de production enregistre l'énergie produite et consommée directement par l'utilisateur, tandis que le compteur d'échange enregistre l'énergie consommée par l'utilisateur et prélevée sur le réseau.

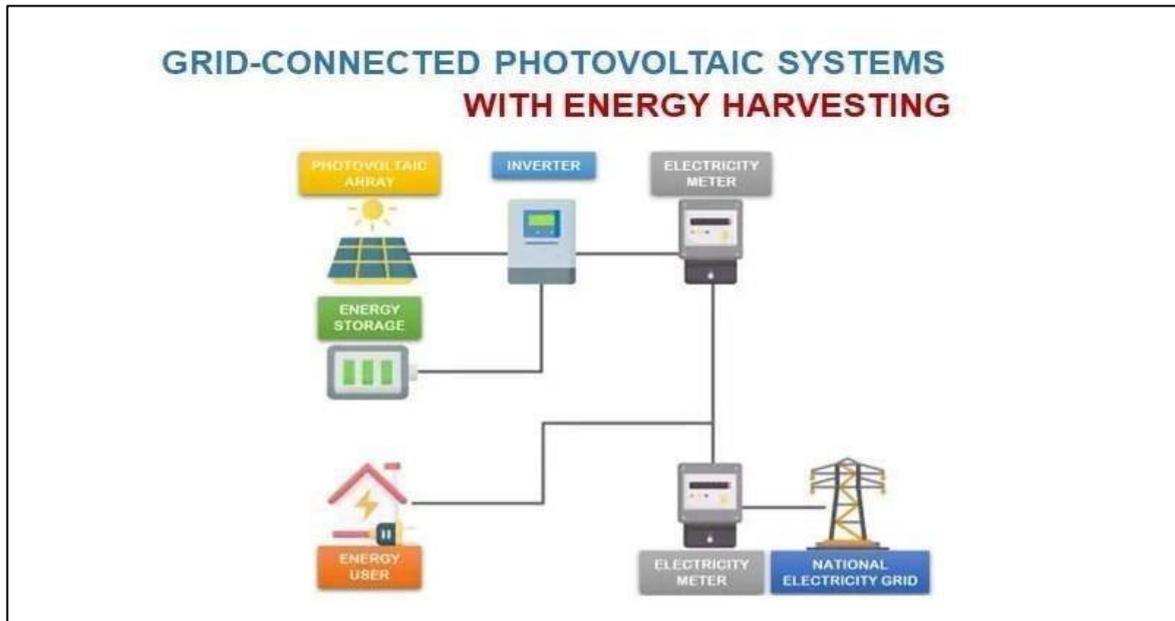


Figure (I.15) : fonctionnement Système photovoltaïque grid-connected..

### V.2.2 Les avantages :

L'installation d'un système photovoltaïque connecté au réseau peut être bénéfique à la fois sur le plan économique et environnemental. Les avantages clés incluent :

- Diminution des dépenses liées aux factures énergétiques.
- Réduction des émissions polluantes.
- Capacité à valoriser l'énergie produite en la revendant ou en la monétisant de différentes manières.

### V.3. Systèmes avec stockage d'énergie électrique « Storage » connecté au réseau électrique :

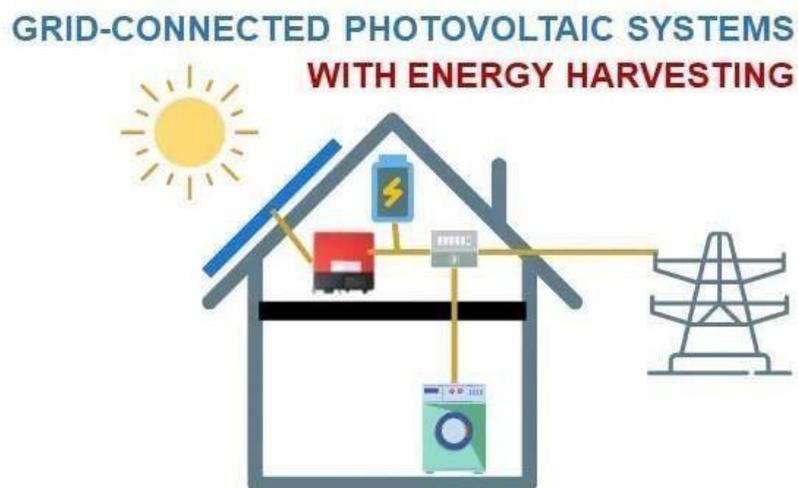
Parmi les types de systèmes photovoltaïques, le plus courant aujourd'hui est le modèle Avec stockage d'énergie électrique, connecté au réseau électrique. Il s'agit d'un système innovant dans lequel l'énergie produite est d'abord stockée dans les Systèmes de

Storage (ou de stockage) et, une fois que la capacité des batteries est atteinte, l'énergie résiduelle est injectée dans le réseau électrique national. Pour cette caractéristique,

Il est également appelé système photovoltaïque hybride.

Une installation photovoltaïque « Storage » connectée au réseau électrique se compose de :

- Panneau solaire.
- Batteries lithium-ion
- Onduleur
- Compteur de production
- Compteur d'échange.



**Figure (I.16) :** Composant du système avec Storage connecté au réseau

Les principales caractéristiques à prendre en compte dans un système de stockage photovoltaïque domestique sont les suivantes :

- La puissance du système de stockage, c'est-à-dire la capacité de stockage de l'électricité.
- La durée de vie de la batterie au lithium.
- L'activité de l'onduleur.

### GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS WITH ENERGY HARVESTING

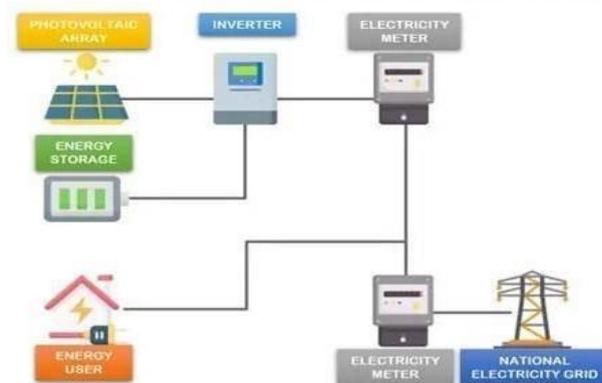
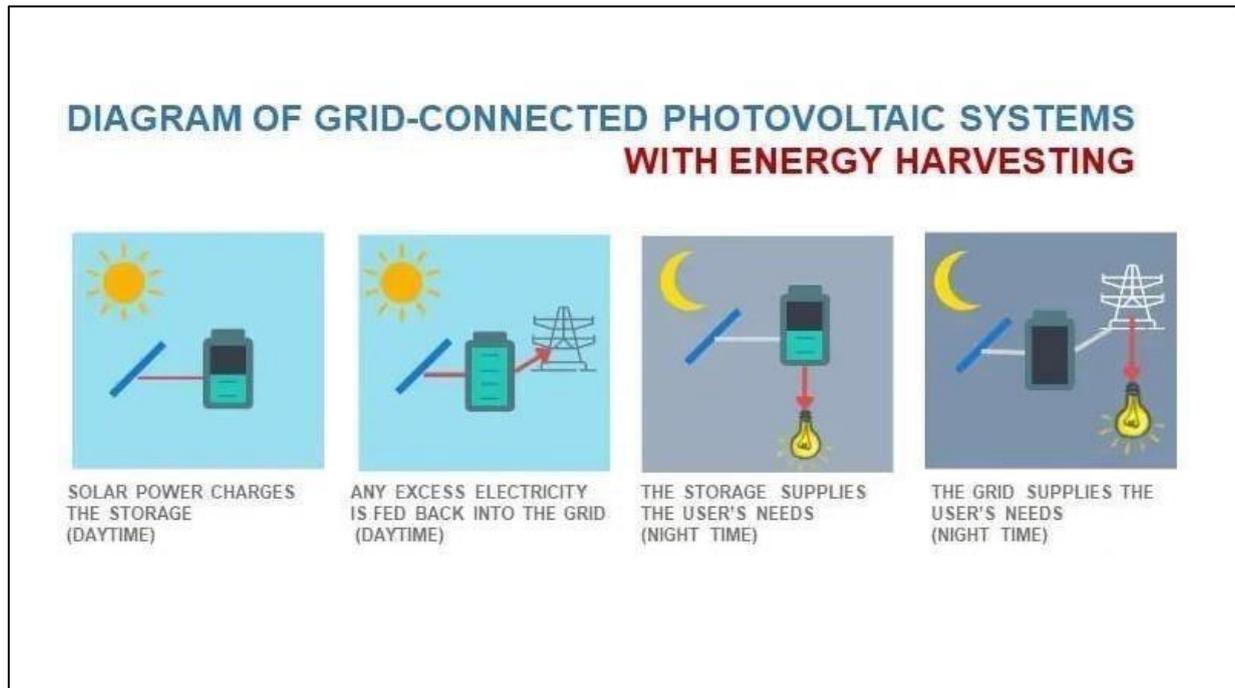


Figure (I.17) : Système photovoltaïque avec Storage connecté au réseau.

#### V.3.1 Fonctionnement des systèmes photovoltaïques hybrides :

Les systèmes photovoltaïques hybrides, également connus sous le nom de systèmes "Storage" connectés au réseau, opèrent selon le schéma suivant : Pendant la journée, les panneaux solaires photovoltaïques chargent les batteries de stockage avec l'énergie produite. Une fois que les batteries atteignent leur capacité maximale, tout excès d'énergie non consommée est injecté dans le réseau électrique. Pendant les heures de faible luminosité, comme le soir ou la nuit, l'énergie est fournie par les batteries de stockage, permettant un fonctionnement autonome par rapport au réseau électrique. Lorsque les batteries se vident et que le stockage est épuisé, le système bascule automatiquement vers l'alimentation provenant du réseau électrique, assurant ainsi un approvisionnement continu et sans interruption du système électrique domestique.



**Figure (I.18) :** *Installation avec stockage connecté au réseau.*

Un système de stockage "Storage" fonctionne en continu pour répondre aux besoins d'alimentation électrique de secours en cas de panne de courant, assurant ainsi une autonomie élevée de 90 à 100% et une certaine indépendance vis-à-vis du réseau électrique pour les bâtiments publics et privés. Il est préférable d'évaluer attentivement le type et le modèle d'installation à mettre en place, notamment en simulant la configuration d'une installation connectée au réseau à l'aide d'un logiciel de conception photovoltaïque facilitant ainsi la conception de diverses installations photovoltaïques connectées au réseau électrique.

#### **V.4. Systèmes photovoltaïques plug &Play :**

Le système photovoltaïque plug and Play, également connu sous le nom de plug-in, est une micro-installation solaire innovante d'une puissance inférieure à 350 W conçue pour être installée sur des balcons, des fenêtres ou dans les jardins. Typiquement, une installation Solaire plug and Play se compose d'un module photovoltaïque, qui est le panneau solaire lui-même, pouvant être fabriqué avec des cellules photovoltaïques monocristallines ou Polycristallines. Il inclut également un micro-onduleur et d'autres accessoires nécessaires

Pour convertir le courant continu produit par le panneau en courant alternatif utilisable. De plus, il est équipé d'un cadre de support et de supports de fixation et d'ancrage pour faciliter son installation sur les balcons, les terrasses, les jardins ou les murs extérieurs de la maison.

#### PLUG AND PLAY PHOTOVOLTAIC SYSTEMS



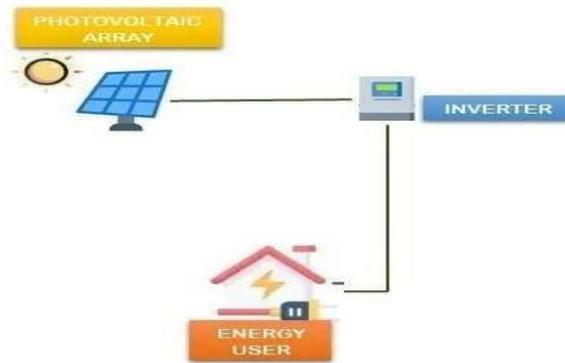
**Figure (I.19) :** *Système photovoltaïque plug&play (éléments caractéristiques)*

#### **V.4.1 Fonctionnement un système photovoltaïque plug & play :**

Un système photovoltaïque "plug and Play" permet de produire de l'énergie verte et renouvelable en se connectant simplement à une prise de courant domestique. Voici comment fonctionne ce système :

- Les panneaux solaires sont installés à l'extérieur de la maison, idéalement orientés vers le sud pour capter un maximum de rayonnement solaire.
- L'onduleur transforme l'énergie solaire captée en électricité utilisable.
- En branchant la fiche de sortie de l'onduleur directement dans une prise électrique à proximité de l'installation, l'énergie produite est consommée instantanément, permettant une autoconsommation immédiate.

### PLUG AND PLAY PHOTOVOLTAIC SYSTEMS



**Figure (I.20) :** *Fonctionnement Système photovoltaïque plug&play*

#### V.4.2 Les avantages d'un système photovoltaïque plug & Play :

Le photovoltaïque plug and Play est une installation accessible à tous, offrant de nombreux avantages :

- Polyvalence d'installation : peut être installé sur divers endroits tels que balcons, terrasses, toits, murs extérieurs, clôtures, ou jardins, avec différents supports de fixation.
- Simplicité de montage : ne nécessite pas d'autorisations spéciales pour la connexion.
- Économies sur la facture d'électricité d'environ 20%.
- Durabilité environnementale.
- Efficacité énergétique.

De plus, la durée de vie moyenne d'un panneau plug and Play est de 15 à 25 ans, ce qui en fait une solution rentable permettant de récupérer son coût en quelques années. [10]

## VI. Optimisation des pertes des installations photovoltaïque :

### VI.1- pertes des installations PV :

#### 1. Pertes par ombrage :

L'environnement d'un module solaire peut inclure des arbres, montagnes, murs, bâtiments, etc. Il peut provoquer des ombrages sur le module ce qui affecte directement l'énergie collectée.

## 2. Pertes par température :

Dès que la température passe au-delà de 25°C, le rendement des panneaux diminue d'environ 0,4 % par degré supplémentaire.

## 3. Pertes par Les chutes ohmiques :

Se caractérisent par les chutes de tensions dues au passage du courant dans un conducteur de matériau et de section donnés.

## 4. Les pertes dues à l'encrassement :

La perte par encrassement est définie comme la perte d'énergie due à l'accumulation de saleté, de poussière et de contaminants organiques/inorganiques sur les panneaux PV.

## 5. Les pertes spectrales :

Les panneaux photovoltaïques sont spectralement sélectifs, la variation du spectre solaire affecte le courant généré par ceux-ci.

## 6. Les pertes per rendement

## 7. Autres (LID. IAM)

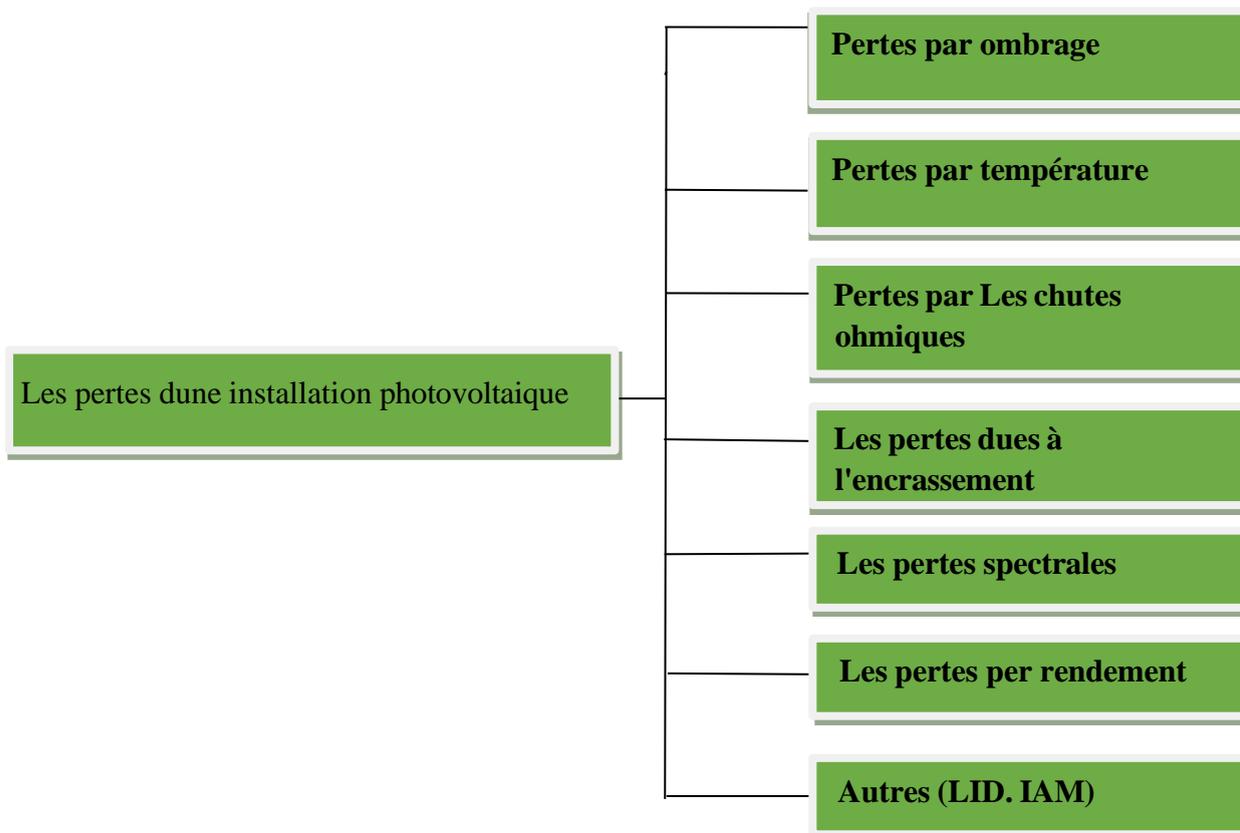


Figure (I.21) : pertes des installations PV.

### VI.1.1 Pertes par ombrage :

Une ombre signifie qu'un masque empêche l'arrivée de photons sur les cellules photovoltaïques. Si une cellule est à l'ombre, sa production de courant est dégradée. Les cellules photovoltaïques d'un panneau solaire sont connectées en série. La cellule qui produit le moins impose son courant à toutes les cellules du panneau. [11]



Figure (I.22) : Pertes par ombrage.

#### - Solution Pertes par ombrage :

On pourra utiliser la règle des  $18^\circ$ . Cette règle consiste à interdire la pose de modules dans une zone dont le périmètre correspond à 3 fois ( $\tan 18^\circ$ ) la hauteur de l'obstacle autour de celui-ci

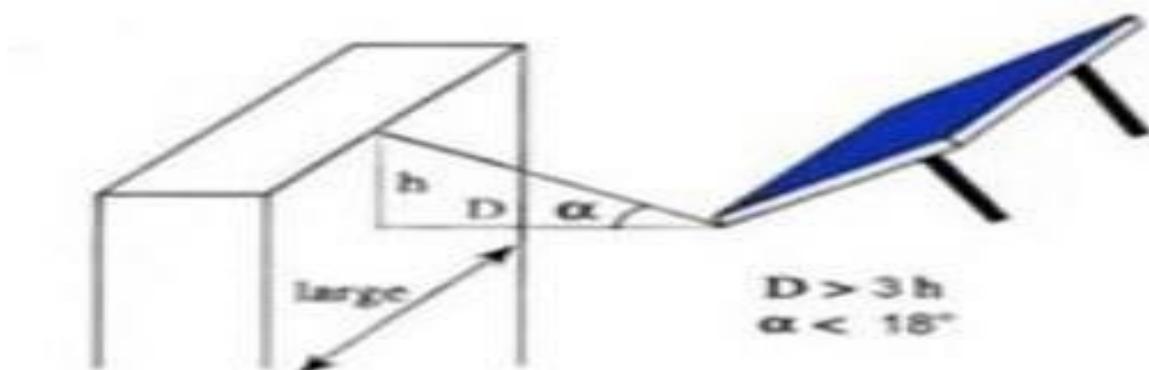


Figure (I.23) : règle des  $18^\circ$ .

### VI.1.2 Pertes par température :

La température a un effet délétère sur le fonctionnement des panneaux photovoltaïques. Quand la température des cellules s'élève, la puissance et la tension du panneau solaire s'abaissent, et le courant (intensité) augmente légèrement. L'effet de la température extérieure sur le module photovoltaïque a un impact sur son rendement.

Le coefficient de température d'un panneau photovoltaïque permet de le mesurer. [12]

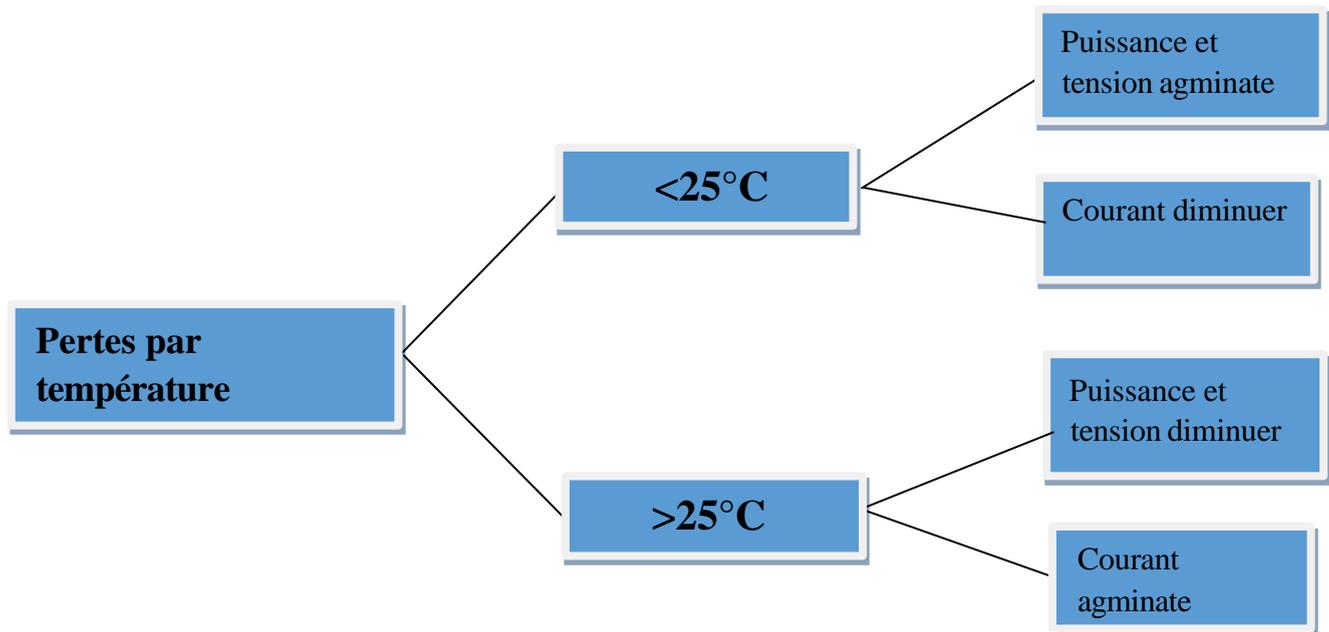
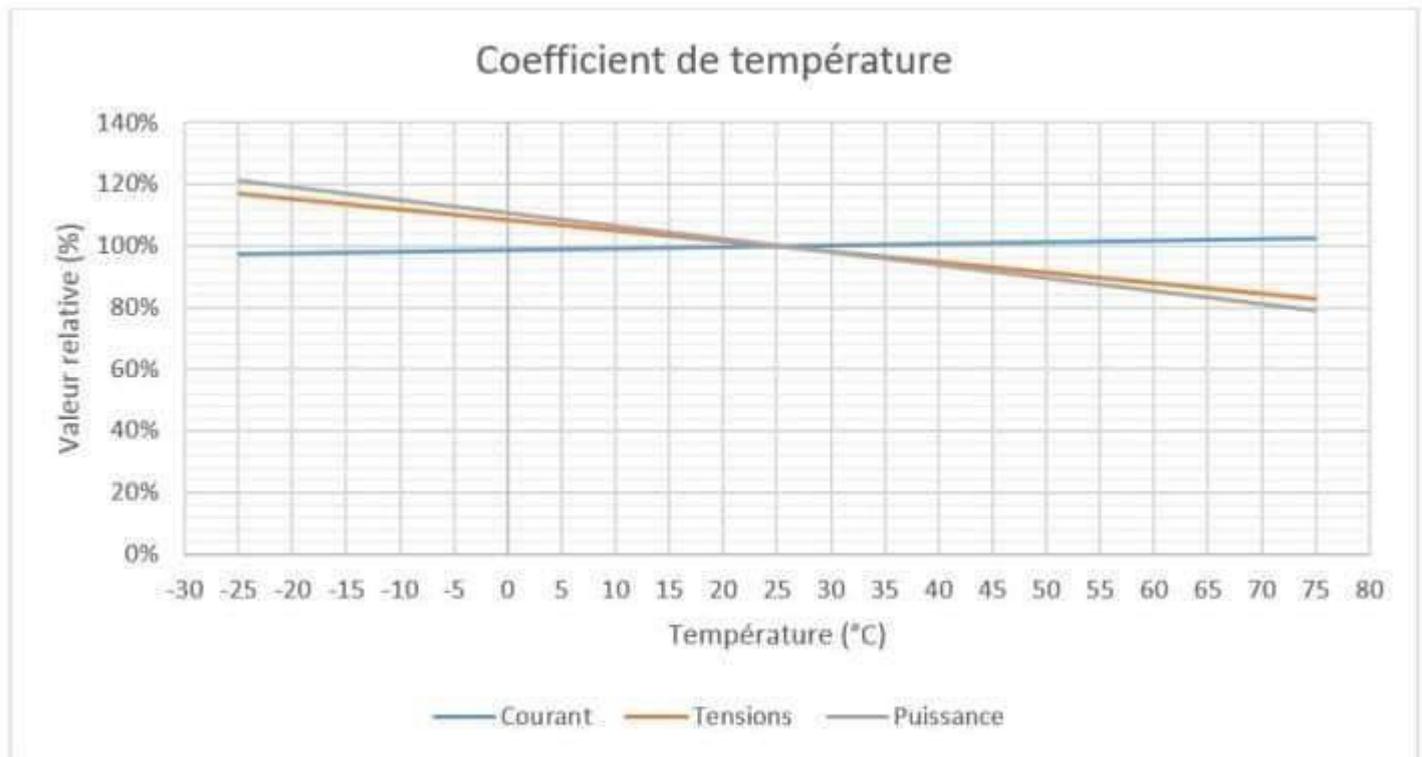


Figure (I.24) : Pertes par température

Les 3 types de coefficient de température d'un panneau solaire

- Coefficient de température de courant de court-circuit ( $I_{sc}$ ).
- Coefficient de température de tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ ).
- Coefficient de température au point maximal de puissance ( $P_m$ ).

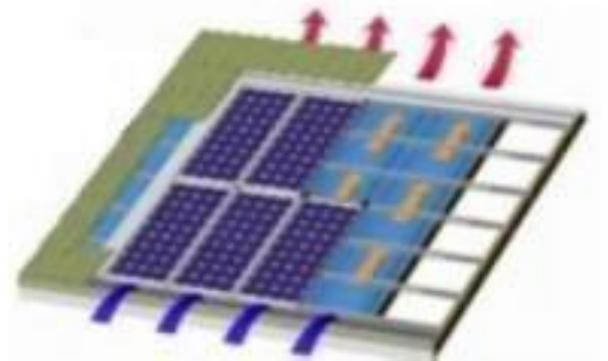
Chacune des valeurs (courant, tension et puissance) varie d'un certain pourcentage à chaque changement de température des cellules. [12]



**Figure (I.25) :** *coefficient de température.*

À une température du panneau solaire de 75°C, la puissance est de 79.5% de la puissance Nominale (inscrite sur la plaque constructrice ou dans la spécification). La tension 84% et le courant 102.5%.

- Solution Pertes par température :



Laisser 5 à 10 cm entre le  
toit et les panneaux



Figures (L.26) : Solutions Pertes par température

-Circulation de l'air :

Laisser un espace de 5 cm entre le toit et les panneaux permet une meilleure circulation de l'air. Cette ventilation naturelle aide à dissiper la chaleur accumulée par les panneaux solaires, réduisant ainsi leur température de fonctionnement. Les panneaux solaires peuvent perdre de l'efficacité lorsqu'ils chauffent excessivement. Un meilleur flux d'air contribue à maintenir une température plus basse et donc à améliorer leur performance.

**VI.1.3 Pertes par chutes ohmiques :**

$$R = \rho \cdot L / S$$

$$V_A - V_B = \rho \cdot I \cdot L$$

R : Résistance

$\rho$  : résistivité

S : Section

L : Longueur

V : tension

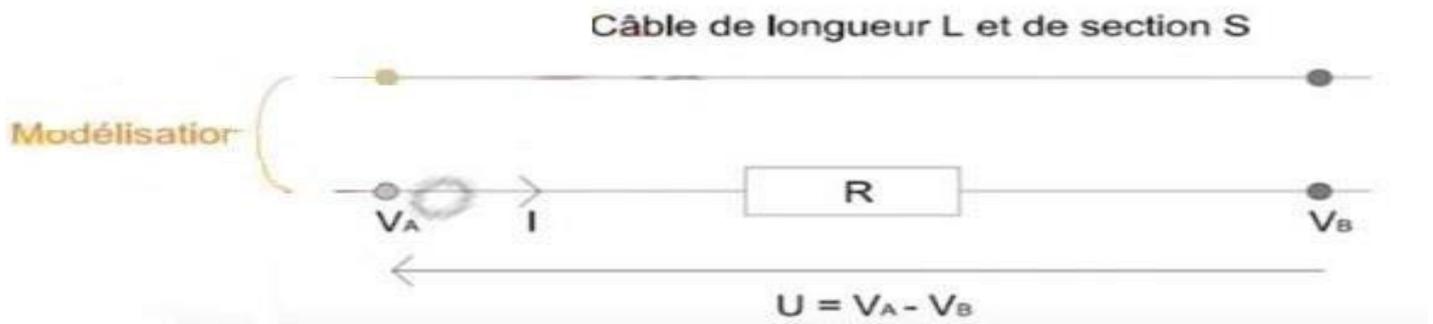


Figure (I .27) : mesure chutes de tension.

Alors que la norme NF C15-100 accepte des chutes de tension dans les câbles de 3% pour des installations de consommation en basse tension, que ce soit du côté modules (courant continu) ou en aval de l'onduleur (courant alternatif). Cette valeur est d'ailleurs adoptée par le guide UTE C15-712-1.

$$\frac{V_A - V_B}{V_A} < 0.03$$

#### - Solution Pertes par chutes ohmiques :

- Augmenter la section du câble.
- Réduire les distances plus possibles.
- Minimiser l'intensité du courant et augmenter la tension.

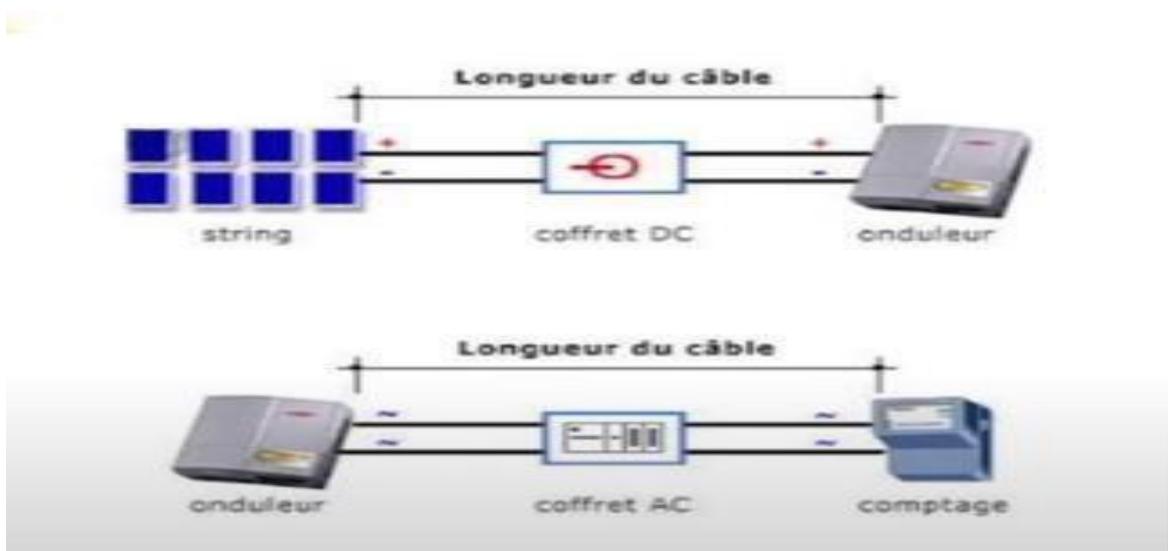


Figure (I.28) : Solution Pertes par chutes ohmiques.

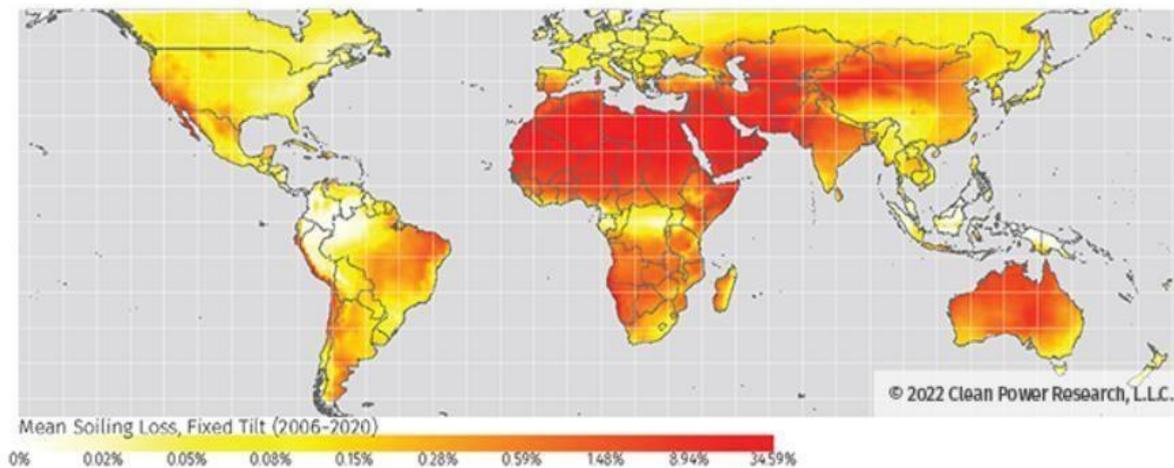
### VI.1.4 Pertes dues à l'encrassement :

Les pertes dues à l'encrassement des systèmes photovoltaïques peuvent augmenter le coût lissé de l'électricité (LCOE) des centrales solaires jusqu'à un cent par kWh, selon le site du projet. Le LCOE moyen de la production d'énergie solaire devant baisser à 1-5 cents/kWh au niveau mondial d'ici 2050, le risque de pertes dues à l'encrassement devient de plus en plus important.

La perte par encrassement est définie comme la perte d'énergie due à l'accumulation de saleté, de poussière et de contaminants organiques/inorganiques sur les panneaux PV. L'encrassement des modules peut augmenter le LCOE des centrales solaires de deux manières : d'abord, en réduisant la puissance de sortie disponible. Ensuite, en augmentant l'incertitude des performances PV et le risque financier. [13]



**Figure (I.29) :** *La pollution sur les panneaux solaires*



**Figure (I.30) :** Perte moyenne annuelle de salissures (2006-2020) ; système PV à inclinaison Fixe

## Solution des pertes dues à l'encrassement :

### Nettoyage bisannuelle :

- **Fréquence :** Deux fois par an.
- **Objectif :** Offrir un entretien plus fréquent dans les régions où les panneaux sont plus susceptibles de se salir rapidement, comme dans les zones très poussiéreuses, industrielles, ou agricoles.
- **Méthodes :** Les mêmes méthodes que pour le nettoyage annuel, mais effectuées deux fois dans l'année pour garantir que la performance des panneaux n'est pas compromise par une accumulation excessive de saletés.

### Nettoyage annuelle :

- **Fréquence :** Une fois par an.
- **Objectif :** Éliminer la poussière, la saleté, les feuilles, et autres débris qui peuvent s'accumuler sur les panneaux et réduire leur efficacité.
- **Méthodes :**
  - **Nettoyage à l'eau :** Utilisation d'eau, souvent déminéralisée, pour éviter les dépôts minéraux.
  - **Nettoyage à la brosse :** Utilisation de brosses non abrasives pour frotter la surface des panneaux.

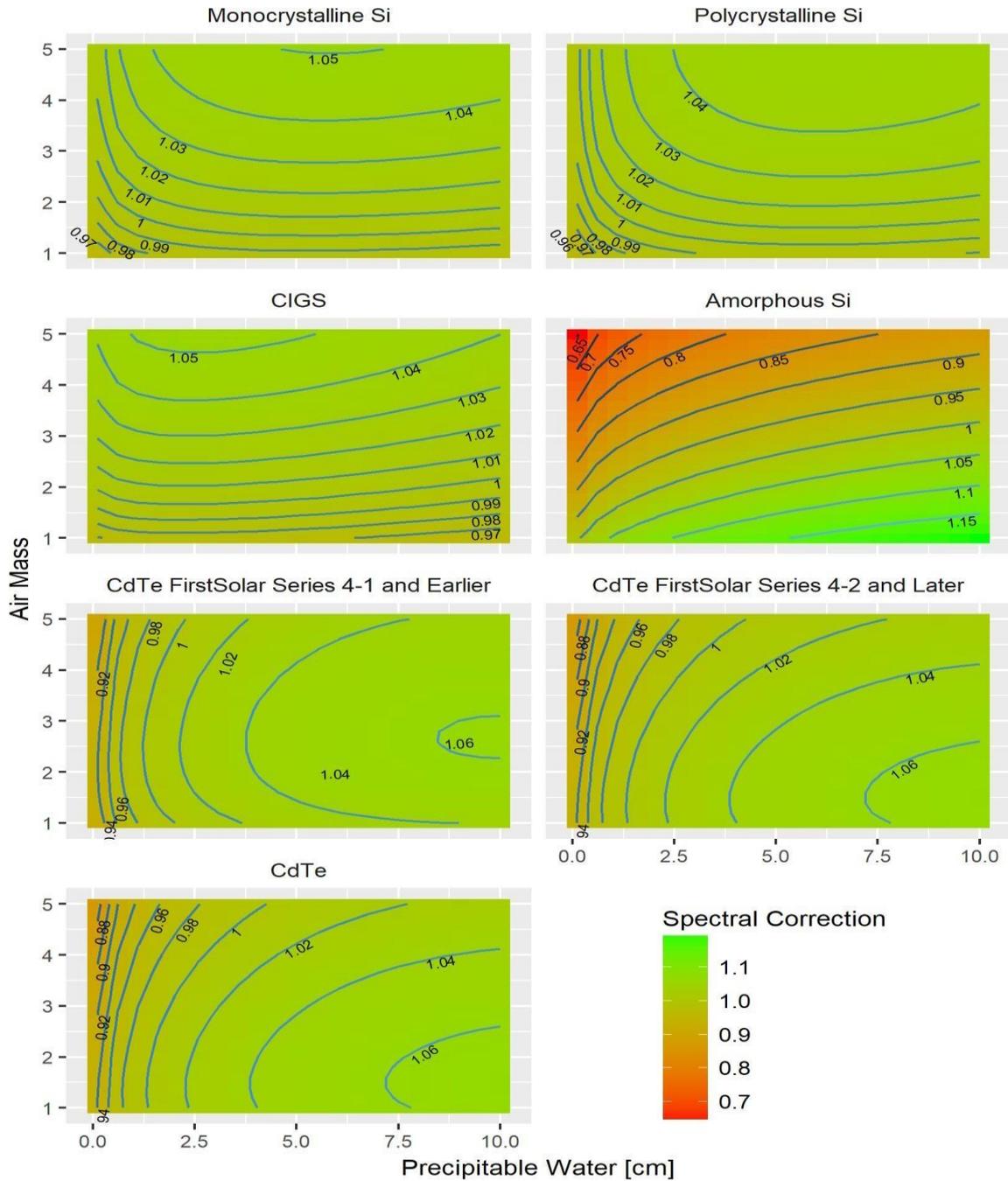
**Nettoyage automatisé :** Systèmes automatisés de lavage pour grandes installations.



**Figure (I.31) :** *Nettoyage des panneaux photovoltaïques.*

### VI.1.5 Pertes spectrales :

Les pertes spectrales dépendent de la teneur en eau de l'atmosphère, des aérosols et de la distance de déplacement de la lumière, exprimée en masse d'air (AM). [14]



**Figure (I.32) :** les facteurs de correction pour les différents ensembles de coefficients pour une gamme de masses d'air de 1 à 5 et une gamme d'eau précipitable de 0 cm à 10 cm.

### VI.1.6 Autres pertes :

- L'effet d'incidence
- Pertes mis match
- Mis match lié à la tolérance de fabrication
- Vieillessement des panneaux
- Rendement des panneaux, onduleurs. [15]

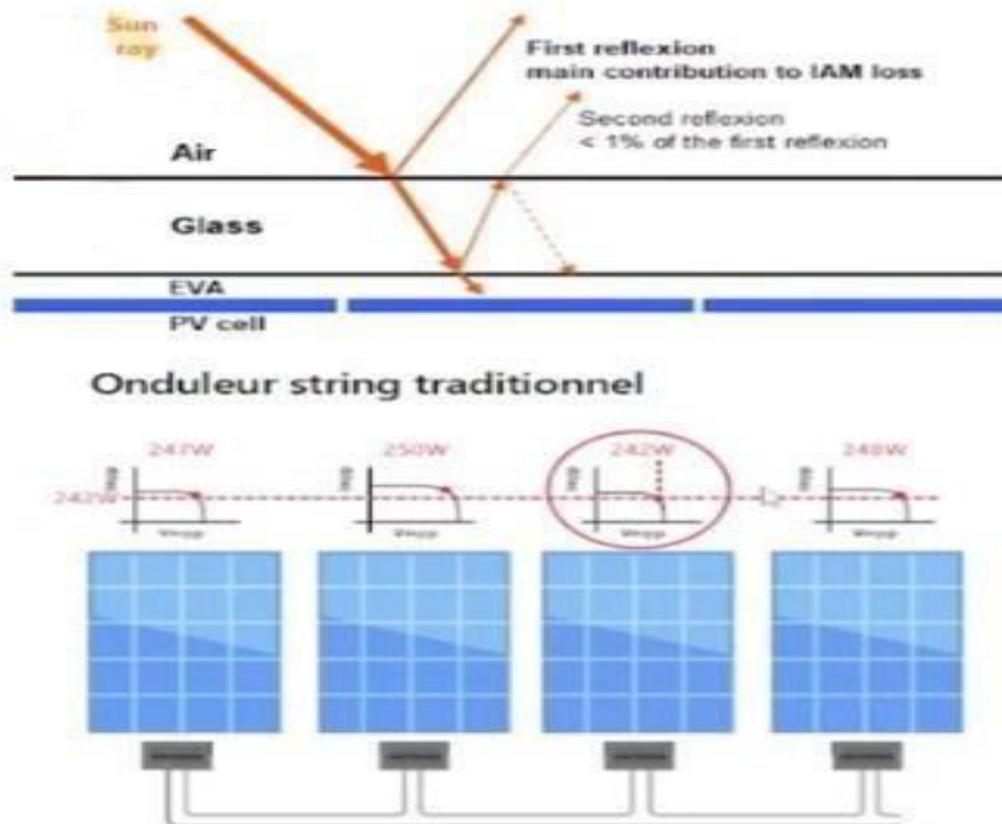


Figure (I.33) : Pertes mis match et L'effet d'incidence

VII. Dimensionnement d'une installation photovoltaïque :

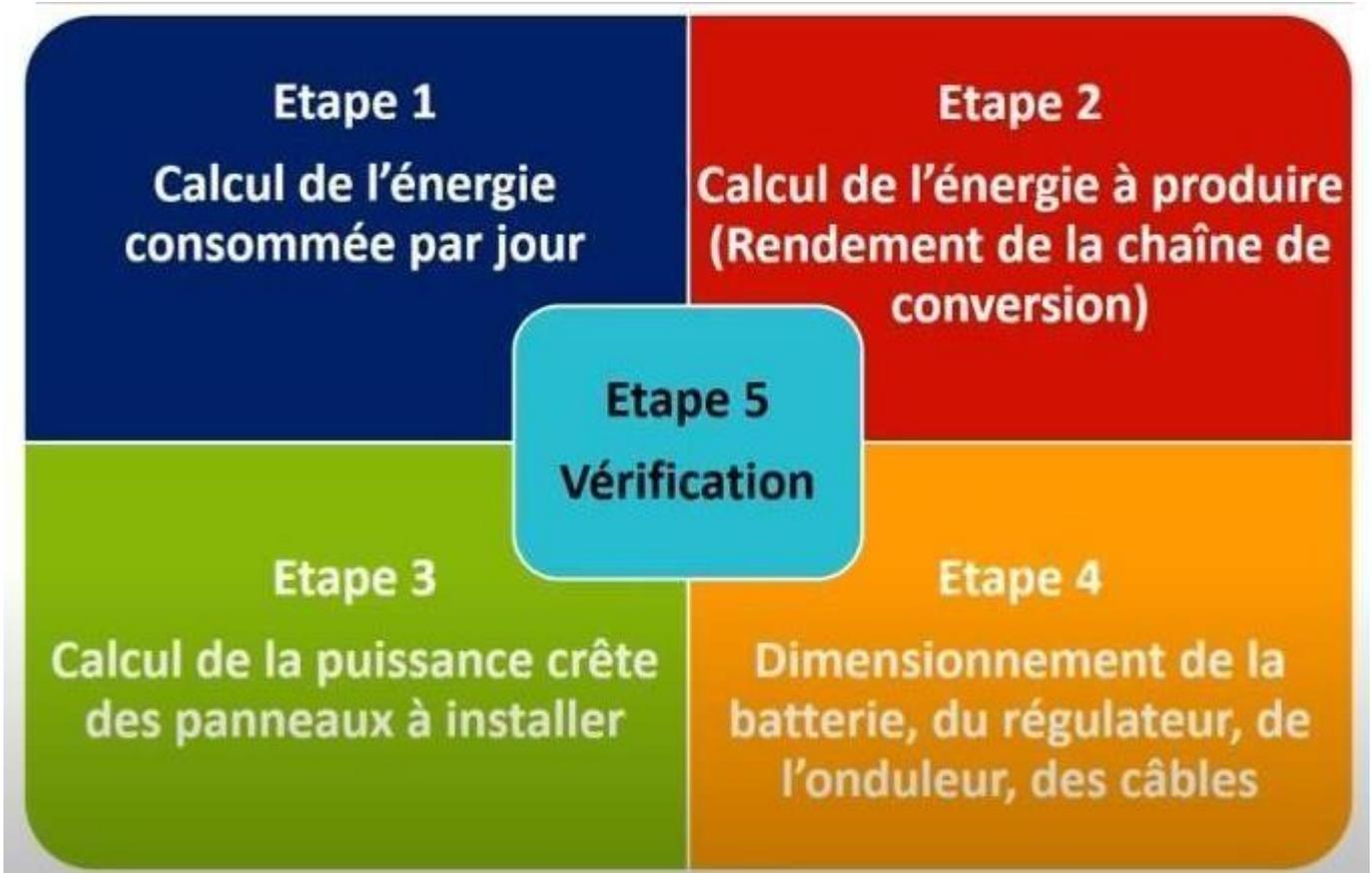


Figure (I.34) : Procédure de dimensionnement d'une installation photovoltaïque.

VII.1 Calcul de l'Energie consommée par jour :

1<sup>ère</sup> méthode : lecture de la facture

► Détail de ma facture								
<b>Abonnement d'électricité (HT)</b>						Prix par mois	<b>15,96 €</b>	
Offre classique du 02/11/2019 au 01/01/2020						7,98	15,96 €	
<b>Consommation d'électricité (HT)</b>		Index début de période	Index fin de période	Différence	Conso (kWh)	Prix du kWh	<b>21,42 €</b>	
Période du 02/09/19 au 01/11/19		Relevé Enedis	Relevé Enedis					
Base		1623	1861	238	238	0,0900	21,42 €	
<b>Services, prestations et frais annexes (HT)</b>							<b>0,00 €</b>	
E-services (E-facture, E-relevé, Espace Client)							OFFERTS	
<b>Taxes locales et contributions (HT, identiques pour l'ensemble des fournisseurs)</b>						Conso (kWh)	€ HT par kWh	<b>10,62 €</b>
Contribution au Service Public de l'Electricité (CSPE)						238	0,0225	5,36 €
Contribution Tarifaire d'Acheminement (CTA)								2,95 €
Taxes sur la Consommation Finale d'Electricité (TCFE)								2,31 €
<b>TVA (identique pour l'ensemble des fournisseurs)</b>							<b>6,86 €</b>	
TVA à 5,5%							1,04 €	
TVA à 20%							5,82 €	
<b>TOTAL TTC</b>							<b>54,86 €</b>	

Sur cette période, on obtient une consommation journalière d'environ 4 kWh.

Figure (I.35) : méthode lecture de la facture.

## 2<sup>ème</sup> méthode : relevé informatique – Linky

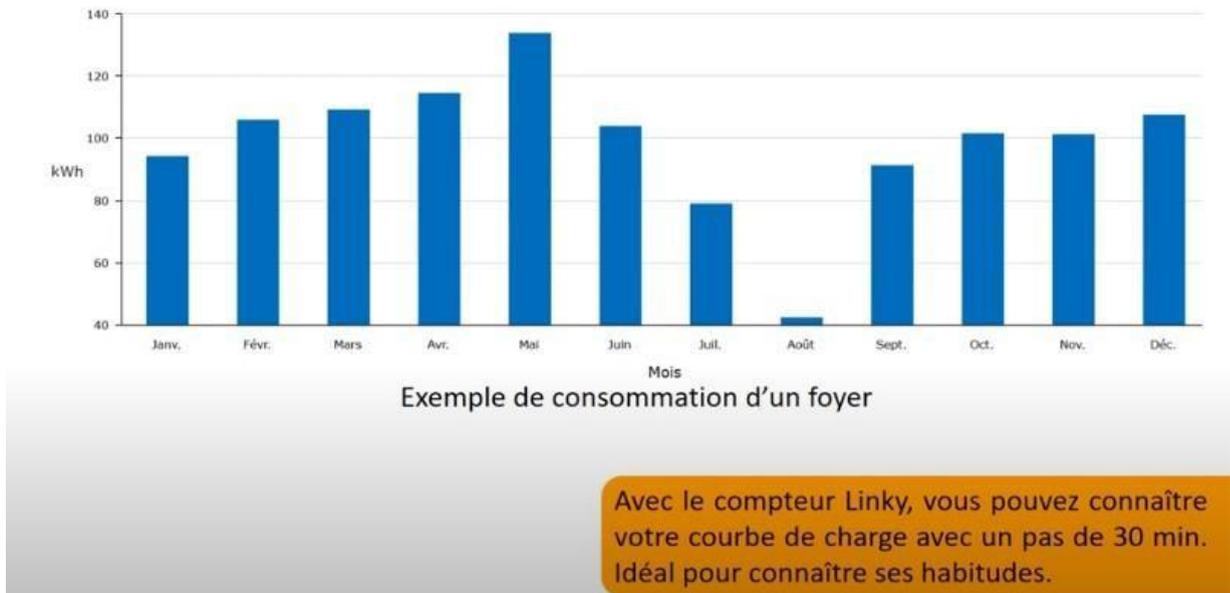


Figure (I.36) : relevé informatique.

### 3<sup>ème</sup> méthode : estimation de la consommation

Nous pouvons connaître la consommation journalière en estimant la valeur de l'énergie totale consommée par tous les récepteurs électriques de l'installation.  $E$  (Wh. J1)  
 $= P(W) \times t(h)$

On précise que la dénomination « par jour » signifie à chaque fois « par Tranche de 24h ».

#### Exemple :

Soit un cabanon disposant d'un petit réfrigérateur consommant 23Wh à l'heure et d'une lampe LED de 5W fonctionnant 5h/j. Quelle est la consommation journalière du cabanon ?

$$E = P_{LED} \times T_{LED} + P_{frigo} \times t_{frigo} \quad E = 5 \times 5 + 23 \times 24 = 577 \text{ Wh. j-1}$$

Un réfrigérateur ne fonctionne pas en continu. Il ne faut donc pas prendre la puissance indiquée sur l'article puis la multiplier par 24. On peut utiliser un Wattmètre pour mesurer sa consommation. [16]

### Et si on ne connaît pas le temps de fonctionnement de l'appareil ?

L'ADEME met à disposition des estimations de consommation :

Équipement	Consommation d'énergie en kWh/an
Smartphone	2 – 7
Tablette	5 – 15
Ecran	20 – 100
Ordinateur portable	30 – 100
Ordinateur fixe	120 – 250
Box (internet + TV)	150 – 300
téléviseur	55 - 145
Aspirateur traineau	30 – 60
10 ampoules (equiv. 60W)	70 - 450

Figure (I.37) : tableau consommation d'énergie des équipements.

## VII.2 Calcul de l'énergie à produire (Prise en compte du rendement de la chaîne de conversion) :

### a. Rendement de la chaîne de conversion :

On considère que l'énergie à produire dépend de la charge  $E_c$  (énergie journalière consommée) et du coefficient de correction  $k$ .

$$E_p = E_c/k$$

**NB** : L'énergie produite  $E_p$  est toujours supérieure à l'énergie consommée  $E_c$ . Le coefficient  $k$  prend en compte :

- L'incertitude météorologique
- L'inclinaison non corrigée des modules suivant la saison
- Le point de fonctionnement des modules (rarement optimal et peut être aggravé par le vieillissement et la poussière sur les modules)
- Le rendement des cycles de charge et de décharge de la batterie
- Le rendement de l'onduleur et du régulateur de charge
- Les pertes dans les câbles et la connexion [17]

### VII.3 Calcul de la puissance crête des panneaux à installer et leur nombre :

#### a. Calcul de la puissance crête d'installation :

La puissance crête à installer dépend de  $E_p$  et du nombre d'heures d'ensoleillement  $N_e$ .

$$P_c = E_p / N_e$$

Correspond au rapport entre l'irradiation solaire  $I_r$  (Wh/m<sup>2</sup>) et l'irradiance (W/m<sup>2</sup>). L'irradiance sera considérée dans les conditions standards (1000W/m<sup>2</sup>) car les panneaux photovoltaïques sont caractérisés dans ces mêmes conditions ( $W_c$ ). On obtient ainsi :

$$N_e = I_r / 1000 \Rightarrow P_c = E_p / I_r * 1000$$

#### b. Nombre de modules à installer :

Ce nombre dépend de la puissance crête à installer  $P_c$  en watt-crête et de la puissance crête unitaire  $P_{cunit}$  du modèle de panneau choisi en watt-crête. Ainsi

Nous aurons :

$$N_{bre} = P_c / P_{cunit}$$

**Rappel :** Deux modules photovoltaïques identiques en série permettent de multiplier la tension par deux et deux modules photovoltaïques identiques en parallèle permettent de multiplier par deux le courant. [18]

### VII.4 Dimensionnement de la batterie, du régulateur, de l'onduleur, des câbles :

#### a. Dimensionnement de la batterie :

Calcul de la capacité

Le calcul de la capacité  $C$  en Ah du parc batterie dépend de plusieurs données :

- $N_a$ , le nombre de jours d'autonomie.
- $E_c$ , l'énergie totale consommée en Wh/jour
- $D$ , la profondeur de décharge maximale admissible de la batterie
- $U$ , la tension en volts sous laquelle est installée le parc de batteries (12, 24, 36, 48V, etc.).

Ainsi nous aurons comme formule :

$$C = N_a * E_c / D * U$$

**b. Dimensionnement de régulateur :**

Critères à respecter :

V sortie (MMPT) = V bat

P sortis > P (installation) - pour ne pas dégrader la production

Isc max (Installation) < I<sub>max</sub> (MPPT)

Voc max (Installation) < V<sub>max</sub> (MPPT)

Ainsi on en déduit le nombre maximal de modules photovoltaïques en

Série et en parallèle :

$$I_{\text{max}} (\text{MPPT}) / I_{\text{SCPV}}$$

Nb en parallèle = I<sub>max</sub> (MPPT) / I<sub>SCpv</sub>

Nb en série = V<sub>max</sub> (MPPT) / V<sub>OCpv</sub>

**c. Dimensionnement de l'onduler :**

Critères à respecter :

P sortie > P consommée On cherchera donc la puissance maximale de l'habitation (quand tous les objets consomment)

La tension du système doit être comprise dans la plage de tension d'entrée de l'onduleur.

**d. Dimensionnement des câbles DC :**

Pourquoi bien dimensionner les câbles ?

- Eviter une chute de tension trop importante

La chute de tension maximale autorisée dans la partie courant continu de l'installation est de 3 % d'après UTE C 15-712-1.

- Limiter les pertes par effet Joule

Calcul de la section d'un câble :

$$S = P \times L \times 1,25 \times I_{\text{max}} / \epsilon \times V$$

P : est la résistivité du câble en.m

L ; est la longueur du câble en m

I<sub>max</sub> : est le courant maximale que traverse le câble en

A ε : est la chute de tension en %

V : est la tension maximale au départ du câble en V [19]

**VII.5 Vérification du dimensionnement :**

La dernière étape, la vérification, consiste à s'assurer que le système photovoltaïque conçu répond à toutes les spécifications requises et fonctionne correctement. Cela inclut la confirmation que la production d'énergie correspond aux besoins calculés, que tous les composants (panneaux, batteries, régulateurs, onduleurs et câbles) sont correctement dimensionnés et compatibles, et que le système fonctionne efficacement dans les conditions prévues. La vérification garantit la fiabilité, la sécurité et les performances de l'installation.

[20]

### **VIII. Conclusion :**

En conclusion, le système photovoltaïque est une technologie innovante qui convertit la lumière du soleil en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. Ce chapitre a détaillé les composants essentiels tels que les panneaux solaires, les batteries, les régulateurs, les onduleurs et les câbles, qui ensemble capturent, convertissent, stockent et distribuent l'énergie solaire. Nous avons introduit l'énergie solaire photovoltaïque et son fonctionnement, en mettant en avant le rôle du silicium. L'effet photovoltaïque et son optimisation par l'orientation, l'inclinaison et la température ont été expliqués. Les différents types de cellules photovoltaïques – monocristallines, polycristallines et amorphes – ont été comparés. Les composants essentiels et l'optimisation des pertes ont été traités pour assurer l'efficacité et la fiabilité des installations. Enfin, le dimensionnement du système a été abordé, notamment l'optimisation de la production d'énergie et la garantie de la fiabilité du système en ajustant la capacité des composants en fonction de la demande énergétique.

**Chapitre 2 :**

**Systeme de Supervision des**

**Installations Photovoltaïques**

## I. Introduction :

Avec l'augmentation de la dépendance mondiale aux sources d'énergie renouvelables, la maintenance préventive des installations photovoltaïques devient indispensable pour assurer leur performance optimale.

Ce chapitre explore en profondeur les technologies qui sous-tendent les systèmes de supervision pour la maintenance préventive des installations photovoltaïques. Nous examinerons les différents composants de ces systèmes, les architectures possibles, et les stratégies de surveillance. L'objectif est de démontrer comment ces systèmes contribuent à l'optimisation de la performance des installations photovoltaïques, en identifiant les meilleures pratiques et les approches innovantes qui peuvent être adoptées pour anticiper les problèmes avant qu'ils ne se manifestent. Enfin, nous discuterons des avantages et des défis associés à la mise en œuvre de ces systèmes de supervision, en mettant en lumière leur rôle important dans la pérennisation de l'énergie solaire comme pilier de notre futur mix énergétique.

## II. Systèmes de Supervision :

### II.1 Définition :

Le système de supervision photovoltaïque, aussi appelé « le **monitoring photovoltaïque** » permet de suivre, en temps réel et à distance, la production électrique et le bon fonctionnement d'une installation solaire grâce à des indicateurs précis. Au cours de la vie des panneaux solaires, des aléas peuvent se produire et affecter la production d'électricité (panne du matériel, casse ou fissure sur le panneau solaire, présence d'ombre suite à la pousse des arbres, etc.). Il peut aussi arriver que la production électrique baisse sans en comprendre les raisons. [21]

Grâce au monitoring d'une installation photovoltaïque, on sait, en temps réel, des éventuelles pannes pour pouvoir agir rapidement et limiter la perte d'énergie électrique. De plus, on supervise et analyse simplement le retour sur investissement à l'aide du suivi de production.

Les systèmes de supervision des installations photovoltaïques sont conçus pour intégrer des technologies telles que des capteurs, des dispositifs de mesure, des contrôleurs, et des logiciels spécialisés. Ces systèmes collectent en continu des données opérationnelles et environnementales, permettant une surveillance et une gestion efficaces de la performance des installations.

### II.2 Objectifs Principaux :

**a. Maximiser l'Efficiace Énergétique** : Ces systèmes ajustent les opérations pour optimiser le rendement énergétique en surveillant les performances des panneaux solaires et en identifiant les inefficacités.

**b. Prévention des Défaillances** : Les technologies intégrées détectent les anomalies et les signes de dégradation, permettant des interventions avant que des défaillances majeures ne se produisent.

**c. Maintenance Prédicative** : En exploitant les données historiques et en temps réel, la maintenance prédictive devient possible, réduisant les coûts et améliorant l'efficacité par rapport aux méthodes traditionnelles basées sur le temps ou la réaction.

**d. Amélioration de la Sécurité** : La surveillance constante aide à identifier et à résoudre rapidement les problèmes de sécurité potentiels, contribuant ainsi à une exploitation plus sûre des installations photovoltaïques.

**e. Optimisation des Coûts Opérationnels** : En minimisant les interruptions et en prolongeant la durée de vie de l'équipement, les systèmes de supervision permettent une réduction significative des coûts opérationnels.



**Figure (II.1)** : *Quelques techniques de supervision des installations photovoltaïques*

### III. Composants des Systèmes de Supervision :

Les systèmes de supervision pour les installations photovoltaïques comprennent plusieurs composants essentiels qui travaillent ensemble pour surveiller, contrôler, et optimiser le rendement énergétique de l'installation. Chacun de ces composants joue un rôle crucial dans la maintenance préventive et la gestion de l'installation.

#### III.1 Capteurs et Instruments de Mesure :

Les capteurs sont des éléments essentiels dans les systèmes de supervision photovoltaïques. Ils collectent des données environnementales et de performance en temps réel, qui sont nécessaires pour le monitoring et l'analyse des performances du système. Ils peuvent être installés sur un panneau solaire individuel ou sur un système entier. Ils fournissent des informations précises sur le rendement des panneaux solaires et peuvent identifier les problèmes potentiels avant qu'ils ne deviennent plus graves. Les capteurs sont très précis et peuvent fournir des informations précises sur le rendement, le courant et la tension des panneaux solaires. Ces informations peuvent être utilisées pour ajuster le système pour atteindre une meilleure performance et un meilleur rendement.

Les types de capteurs couramment utilisés incluent :

##### III.1.1 Capteur d'irradiance solaire :

Les deux outils les plus populaires utilisés par l'industrie photovoltaïque (PV) pour mesurer l'irradiance sont les pyranomètres à thermopile et les capteurs d'irradiance solaire à cellule de référence calibrée.



**Figure (II.2) :** *Le pyranomètre.*

Le capteur d'irradiance solaire à cellule de référence est la meilleure solution pour la surveillance des centrales solaires photovoltaïques car il s'agit d'une miniature de panneaux photovoltaïques. Il convertit les photons incidents en électrons grâce à l'effet photovoltaïque, puis ces électrons génèrent un courant électrique mesurable, tout comme les panneaux PV. [22]



Figure (II.3) : capteur d'irradiance solaire à cellule de référence.

	<b>Capteur d'irradiance solaire à cellule de référence</b>	<b>Pyranomètre à thermopile</b>
<b>Réponse Spectrale</b>	Le capteur d'irradiance solaire à cellule de référence mesure uniquement la partie spectrale que la cellule solaire peut convertir en électricité.	Le pyranomètre mesure toute la gamme spectrale du soleil.
<b>Le coût</b>	Solution économique mais robuste et fiable pour mesurer les niveaux d'irradiation solaire	Solution coûteuse pour le système de surveillance PV.
<b>Normes Internationales d'Etalonnage</b>	-Toutes les normes IEC 904 -Il existe une norme spéciale (CEI 61724-1) pour le contrôle et la surveillance du système PV	La norme ISO 9060.
<b>Contrôle du système PV</b>	Le capteur d'irradiance solaire à cellule de référence est un bon choix pour contrôler le système PV car. il a pratiquement le même comportement physique que les modules PV.	Un comportement physique totalement différent du système PV. Qui peut être problématique pour la mesure et le contrôle de la performance des systèmes PV.
<b>Temps de Réponse</b>	Millisecondes, il correspond à la réponse du PV.	Lentement, ça prend jusqu'à 30 secondes

<b>Réponse à la Température</b>	Similaire au système PV, la réponse linéaire de la température permet des corrections	Conçu pour minimiser la sensibilité à la température. Non corrigé pour l'effet de la température.
---------------------------------	---	---

**Tableau (II.1) :** comparaison entre les caractéristiques du pyranomètre et du capteur d'irradiance solaire a cellule de référence.

### III.1.2 Capteur de température :

Il surveille la température des panneaux solaires, car la performance photovoltaïque peut être affectée négativement par la chaleur excessive. Le plus utilisé est le CS241DM qui mesure la température de surface, à l'arrière d'un panneau solaire, dont les caractéristiques sont conçues pour l'évaluation des performances des panneaux photovoltaïques (PV) bifaciaux et l'encrassement. La tête de la sonde a été redessinée pour faciliter l'installation. Les performances de mesure ont été améliorées grâce à une empreinte plus petite, optimisée pour réduire l'ombrage à l'arrière du module et éliminer le refroidissement de surface. [23-27]



**Figure (II.4) :** le capteur CS241DM de température

### III.1.3 Capteurs de vent ou anémomètre :

L'anémomètre est le dispositif qui contrôle et informe de la vitesse du vent. C'est un élément indispensable pour détecter de possibles incidences sur les plaques photovoltaïques et, en outre, il fonctionne comme élément de contrôle et de sécurité pour assurer la protection des trackers devant de fortes rafales de vent. [26]

Les anémomètres servent à envoyer un signal en cas de vent excessif afin de mettre les systèmes de protection solaire dans la position protégée (repliée). Afin de pouvoir remplir cette tâche, le positionnement de l'anémomètre doit être déterminée de telle sorte que l'anémomètre soit exposé exactement aux mêmes conditions de vent que celles qui prévalent sur les systèmes de protection solaire. Par ailleurs, il suffit de connaître la conversion de la vitesse et de la direction du vent sur l'anémomètre en vitesse du vent sur le système de protection solaire pour commander le système de protection solaire. Les anémomètres sont très souvent utilisés en combinaison avec un capteur solaire. [24]



Figure (II.5) : Anémomètre

### III.1.4 Voltmètres et ampèremètres :

Les voltmètres et ampèremètres jouent un rôle important en tant que capteurs. Le voltmètre mesure la tension électrique aux différents points de l'installation, ce qui est essentiel pour assurer que les panneaux solaires fonctionnent à leur tension optimale. L'ampèremètre, de son côté, mesure le courant circulant dans les circuits, ce qui aide à évaluer la puissance produite et à détecter tout problème de performance comme une baisse de courant inhabituelle. [28]

Ces mesures permettent de surveiller continuellement l'état et la performance des panneaux solaires, facilitant la détection précoce des défaillances ou des anomalies. Par exemple, une baisse inattendue de la tension ou du courant peut indiquer un panneau endommagé ou un problème avec les connexions électriques. Les données fournies par ces capteurs sont souvent utilisées pour alimenter des systèmes de gestion de l'énergie, qui analysent les informations en temps réel et optimisent l'efficacité de l'installation en ajustant les charges ou en planifiant la maintenance préventive. [25]

Ces capteurs permettent de détecter les défaillances potentielles, comme les points chauds sur les panneaux ou les anomalies dans la production d'énergie, qui pourraient indiquer un problème comme un ombrage ou une dégradation des composants

### III.2 Les contrôleurs :

Le contrôleur est au cœur du système de supervision. Il orchestre la manière dont l'installation réagit aux conditions environnementales et opérationnelles en temps réel. Ce contrôleur peut inclure des dispositifs tels que les contrôleurs de charge, les contrôleurs MPPT (Maximum Power Point Tracking), les contrôleurs de délestage. Il est responsable de réguler les flux d'énergie, d'optimiser la production d'énergie solaire, de protéger les batteries, de surveiller les performances du système et de détecter les anomalies ou les dysfonctionnements, il assure le bon fonctionnement, la sécurité et l'efficacité des systèmes solaires en surveillant et en contrôlant divers aspects de la production et de la distribution de l'énergie solaire. [29]

Il reçoit des données continues des capteurs qui surveillent divers paramètres tels que l'irradiance solaire, la température des panneaux, la production d'énergie, et plus. En utilisant ces informations, il exécute des algorithmes préprogrammés pour ajuster les opérations des panneaux photovoltaïques et d'autres équipements associés comme les onduleurs et les batteries.

#### III.2.1 Contrôleur de Charge :

Le contrôleur de charge ou « Le régulateur de charge solaire » est un appareil qui fonctionne comme un système de protection pour batteries solaires et les charges dans les systèmes solaires photovoltaïques. Il se présente sous la forme d'un boîtier électronique raccordé à notre système de production d'électricité photovoltaïque. Sans ce dispositif, en raison de l'instabilité de la sortie du panneau solaire, la tension pourrait dépasser les valeurs autorisées pour les charges ou la batterie, causant potentiellement des dommages à l'un d'entre eux. Alors il permet de surveiller les spécifications de la batterie. Grâce à ces informations, on peut facilement connaître l'état de charge des batteries et même détecter s'il y a une anomalie. [30]



Figure (II.6) : le contrôleur de charge

Via des diodes lumineuses ou un écran digital, le régulateur solaire affiche en permanence l'état de fonctionnement du dispositif photovoltaïque ainsi que l'état de charge de la batterie.

Tandis que la batterie permet le stockage et l'utilisation différée du surplus de production solaire, le régulateur solaire a, quant à lui, pour fonction d'en contrôler la charge, de la stabiliser et d'en limiter la décharge.

Concrètement, il optimise l'alimentation en électricité en régulant la tension (V) et l'intensité du courant (A) à la sortie des capteurs photovoltaïques, afin d'éviter les surtensions ainsi que les surcharges ou décharges trop importantes. (Ces dernières pouvant endommager la batterie). En d'autres termes, le régulateur solaire permet de maintenir la charge de la batterie solaire dans les limites adéquates pour une utilisation pérenne : en effet, pour qu'une batterie dure le plus longtemps possible, il est essentiel de veiller à ce que son niveau de charge ne soit pas inférieur à 40 % et, à l'inverse, n'excède pas 95 %. [31]

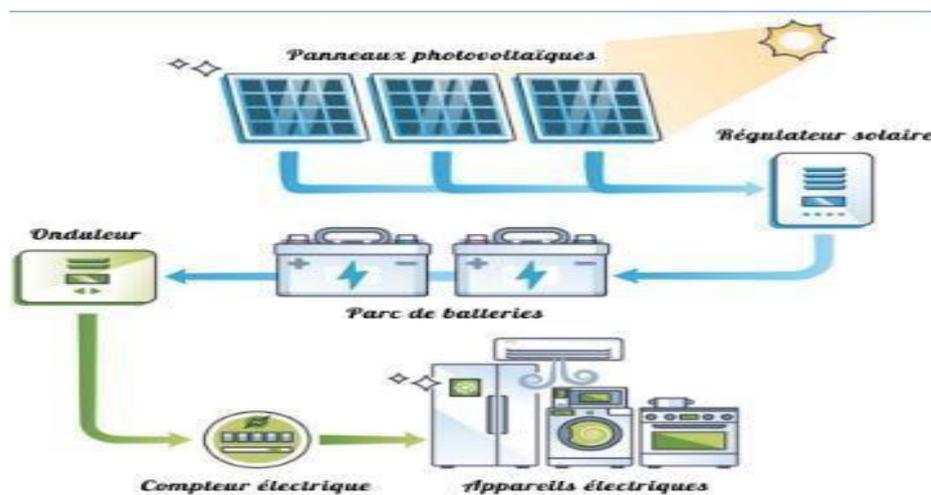


Figure (II.7) : l'emplacement de régulateur de charge dans une installation photovoltaïque

### III.2.1.1 Compensation de température :

Certains contrôleurs de charge solaires modernes incluent un système de compensation de température de la tension de la batterie. Étant donné que la tension idéale pour une batterie varie lorsque la température augmente de  $25^{\circ}\text{C}$ , le contrôleur de charge solaire peut mesurer la différence de température et compenser en conséquence. Selon l'appareil, le contrôleur de charge peut compenser  $-3\text{ mV}/^{\circ}\text{C}/\text{élément}$ ,  $-4\text{ mV}/^{\circ}\text{C}/\text{élément}$  ou  $-5\text{ mV}/^{\circ}\text{C}/\text{élément}$ .

### III.2.1.2 Protection contre les courants inverses :

Les systèmes PV avec des batteries dépourvues de contrôleur de charge solaire auraient régulièrement des courants inverses, en particulier la nuit. Cela se produit lorsque la tension des batteries est supérieure à celle des panneaux solaires, ce qui se produit principalement pendant la nuit lorsque les modules ne produisent pas d'électricité. En d'autres termes, avoir des courants inverses sur un système PV signifie que les batteries se déchargeraient pour « charger » les panneaux, ce qui n'aurait aucun sens.

L'installation de ce dispositif protège le système contre ce phénomène, prolongez la durée de vie des panneaux et conservez une charge optimale des batteries. Certains panneaux sont conçus pour résister à de petits courants inverses, mais dans des circonstances normales, ils pourraient être dangereux pour eux. [30]

### **III.2.1.3 Les technologies de contrôleur de charge :**

- Régulation tout ou rien (TOR) par coupure électromécanique constituent la première génération de régulateurs. Ils ne permettent que le passage de 0 % ou 100 % de l'énergie produite vers la batterie. Si ces appareils ne sont plus commercialisés aujourd'hui, on en trouve encore en service au sein de centrales photovoltaïques existantes.

- Régulation MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) avec deux types de couplage sur la batterie, sont plus perfectionnés.

#### **III.2.1.3.1 Le régulateur PWM (*Pulse Width Modulation*) : couplage direct**

Il s'agit de la première génération de régulateurs MLI, dont le régulateur solaire PWM tire d'ailleurs le nom (*pulse width modulation* signifiant en français « modulation de largeur d'impulsion »).

Cet appareil est couplé directement à la batterie. Son principe est le suivant : il récupère le courant produit par le champ solaire et le transmet à la batterie sous la forme d'impulsions de fréquences et de longueurs variables, ce qui permet de réguler le courant de charge avec précision, en fonction de l'état de charge.

Le contrôleur de charge PWM est doté d'un interrupteur fonctionnant par modulation de largeur d'impulsion ainsi que d'un système anti-retour. L'interrupteur est ouvert en permanence jusqu'à ce que la batterie de stockage atteigne la tension de charge d'absorption. Ensuite, lorsque la batterie est chargée et que sa tension atteint le seuil de régulation fixé, l'interrupteur MLI s'ouvre et se ferme à une fréquence fixe (plusieurs centaines de fois par seconde) afin de maintenir l'injection d'un courant moyen, pour un niveau de charge optimal.

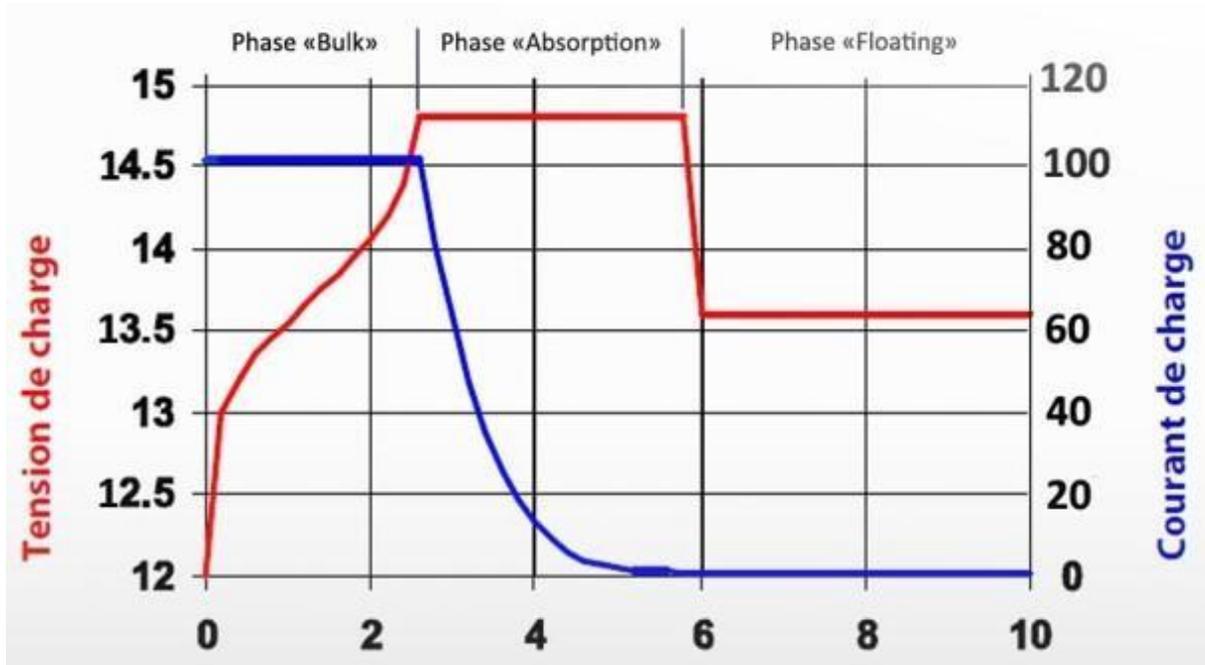


Figure (II.8) : courbes de charge de régulateur pwm

-Concrètement, la charge de la batterie s'effectue généralement en trois phases :

La phase Bulk (également appelée phase Boost) est celle de la charge rapide et dure jusqu'à ce que la batterie ait atteint 75 % de ses capacités

Elle est suivie de la phase Absorption, pendant laquelle la batterie se charge plus lentement, jusqu'à atteindre sa valeur maximale préconisée

Enfin, la phase Float (ou Floating) est celle du maintien de charge. [31]

Les contrôleurs de charge solaire PWM sont assez bon marché et idéal pour les systèmes photovoltaïques à petite échelle. En effet, il fonctionne exclusivement avec panneaux solaires 36 ou 72 cellules, soit 12 V (volts) ou 24 V. Étant donné que ces contrôleurs de charge fonctionnent à une efficacité de 75 à 80 %, ils peuvent produire des pertes de puissance de 25 à 20 % dans le système. [26]

**III.2.1.3.2 Le régulateur MPPT (Maximum Power Point Tracking) :** couplage direct par adaptateur d'impédance.

Le régulateur MPPT est le plus perfectionné des régulateurs solaires. Il est recommandé, notamment, pour les installations photovoltaïques composées d'un parc de batteries.

Il intègre un convertisseur DC-DC (dispositif qui convertit le niveau de tension d'un courant continu) afin de maximiser la puissance de sortie d'un panneau solaire. Il faut noter que ce

convertisseur est employé comme abaisseur de tension, par conséquent, la tension en point de puissance maximale du champ solaire doit toujours être supérieure à la tension batterie. [32]

Pour comprendre l'intérêt d'un régulateur MPPT, il faut savoir que la tension et le courant d'un panneau photovoltaïque changent continuellement tout au long de la journée, en fonction du degré d'ensoleillement. L'appareil balaie la tension du panneau afin de trouver le « point idéal », c'est-à-dire la combinaison optimale de tension et de courant, et générer ainsi la plus grande puissance. Cet ajustement permanent lui permet de conduire davantage de courant jusqu'à la batterie et donc d'être plus efficace qu'un régulateur PWM, notamment en période de faible ensoleillement : on estime qu'il génère jusqu'à 30 % de production d'électricité supplémentaire, pour les modèles MPPT les plus haut de gamme. [32]

-Le régulateur MPPT fonctionne avec tout type de panneau solaire, dès lors que les seuils de tolérance de tension (V) et de courant nominal (A) du régulateur sont respectés.

Régulateur solaire PWM	Régulateur solaire MPPT
<ul style="list-style-type: none"> <li>-Technologie simple.</li> <li>-Une fonction principale : réguler la charge de la batterie solaire.</li> <li>-Couplage direct du champ solaire sur la batterie.</li> <li>-Avec un régulateur PWM, la tension nominale du champ solaire ne peut dépasser la tension de la batterie.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Technologie avancée.</li> <li>-Régule la charge de la batterie et optimise la production d'électricité (entre 5 % et 30 % de gain selon le degré d'ensoleillement et le modèle de régulateur).</li> <li>-Couplage indirect, charge de la batterie via un convertisseur de tension.</li> <li>-Avec un régulateur MPPT. La tension nominale du champ solaire peut dépasser la tension de la batterie, puisque le régulateur intègre un convertisseur.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Adapté aux petites installations solaires, d'une puissance totale inférieure à 200 Wc (watts crête). Idéal pour des applications simples (éclairage, utilisation de petits appareils électriques, camping, etc.)</li> <li>- Compatible uniquement avec les panneaux photovoltaïques 36 ou 72 cellules</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Adapté à tout type d'installations solaires et notamment à celles d'une puissance totale supérieure à 200 Wc.</li> <li>-Compatible avec tout type de panneaux photovoltaïques.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>-Faible coût à l'achat (premiers prix inférieurs à 50 €).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Coût plus élevé (jusqu'à 1200 € pour les modèles haut de gamme), mais meilleur rendement, notamment en hiver et dans les régions faiblement ensoleillées.</li> </ul>

**Tableau (II.2) :** comparaison entre les régulateurs solaires MPPT et PWM.

### III.3 Systèmes de communication :

Les systèmes de communication assurent une surveillance efficace, une gestion optimale et une maintenance proactive des installations photovoltaïques. Ils permettent la transmission des données de performance, de production et de fonctionnement entre les différents composants du système, tels que les capteurs, les onduleurs, les contrôleurs de charge, les enregistreurs de données et les systèmes de télésurveillance. Elles sont omniprésentes dans les installations solaires actuelles, qu'elles soient isolées ou raccordées au réseau électrique. On peut également prendre le contrôle à distance et modifier la plupart des paramètres de l'installation solaire. Les technologies de communication impliquées peuvent être divisées en deux catégories principales : les réseaux filaires et les réseaux sans fil, chacun ayant ses propres protocoles spécifiques. [24]

#### **Réseaux Filaires :**

(Ethernet, RS-485) : utilisés pour leur fiabilité et leur capacité à transmettre de grandes quantités de données rapidement.

#### **Réseaux Sans Fil :**

(Wi-Fi, GSM, LoRa) : adaptés pour les sites isolés ou difficiles d'accès.

### III.4 Logiciels de Supervision :

N'importe quelle installation photovoltaïque doit relier à un logiciel de supervision. Ce logiciel est étroitement lié à des unités de contrôle pour analyser et interpréter les données collectées.

Les logiciels fournissent des informations sur la performance de l'installation PV, la production d'énergie, les pertes de puissance... etc. Ils permettent de détecter des dysfonctionnements, de prévoir la production d'énergie et de planifier l'utilisation de l'énergie. Les logiciels peuvent également être utilisés pour optimiser la performance de l'installation PV en fonction des conditions météorologiques et de l'utilisation de l'énergie.

Ils permettent :

- La visualisation en temps réel des performances.
- L'analyse des tendances à long terme pour identifier les besoins de maintenance.
- La détection avancée des anomalies grâce à des algorithmes de machine learning.
- La production de rapports et d'alertes qui informent les techniciens des problèmes potentiels ou des tâches de maintenance nécessaires.

Plusieurs logiciels spécialisés sont disponibles, chacun offrant des fonctionnalités uniques pour surveiller, analyser et prévoir les problèmes avant qu'ils n'affectent l'efficacité globale du système. Voici quelques-uns des logiciels les plus utilisés :



### III.4.2 Pv System :

PvSyst est orienté vers la simulation et l'analyse de systèmes photovoltaïques. Il permet de modéliser des installations pour prédire leur production et analyser les données historiques pour identifier les écarts entre les performances prévues et réelles. Parmi ses caractéristiques il est Très précis dans ses prédictions, et largement utilisé par les professionnels pour a planification et la validation de projets photovoltaïques. [34]

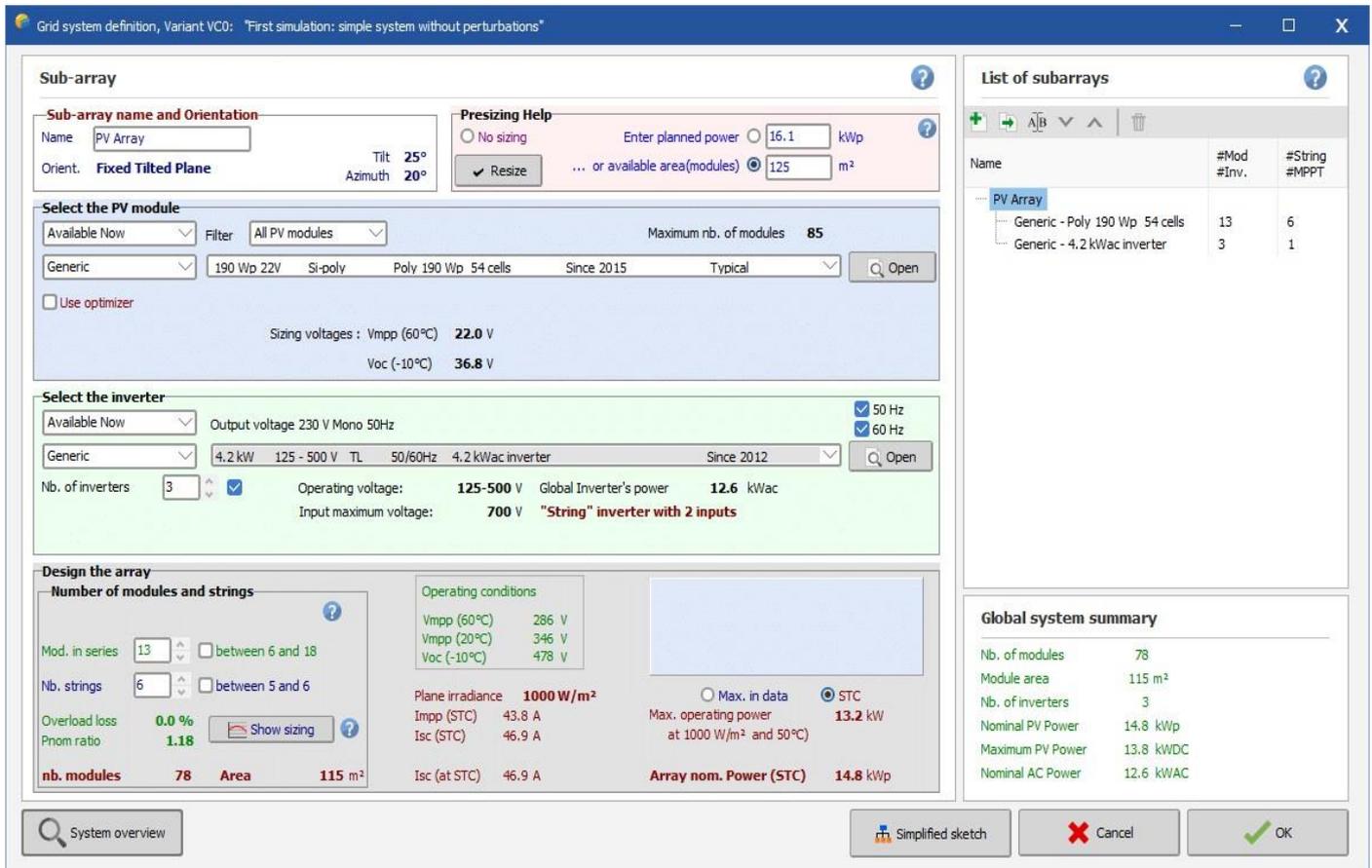


Figure (II.10) : simulation en PV System.

### III.4.3 SMA Sunny Portal :

Sunny Portal de SMA offre une surveillance à distance et en temps réel des installations photovoltaïques. Il fournit des analyses détaillées de la production d'énergie, des notifications en cas de défaillance, et des recommandations pour l'optimisation. Il est Facile à utiliser, parfait pour les gestionnaires de plusieurs installations, et compatible avec les équipements SMA. [35]

	ÉCRAN - VISUALISATION SUR PLACE	AJUSTER LES PARAMÈTRES	SUNNY PORTAL - SURVEILLANCE EN LIGNE	COMMUNICATION EXTERNE AVEC MODBUS
<b>TIGO TS4-R</b>	WEBUI* OF TIGO SMART APP	WEBUI* OF TIGO SMART APP		-
<b>SUNNY BOY 1.5/2.0/2.5</b>	WEBUI ou	WEBUI ou	ou  ou	ou
<b>SUNNY BOY 3.0/3.6/4.0/5.0</b>	WEBUI ou	WEBUI ou	ou  ou	ou
<b>SUNNY TRIPOWER 3.0/4.0/5.0/6.0</b>	WEBUI ou	WEBUI ou	ou  ou	ou
<b>SUNNY TRIPOWER 8.0/10.0</b>	WEBUI ou	WEBUI ou	ou  ou	ou
<b>SUNNY TRIPOWER CORE1 (50KW)</b>	WEBUI ou	WEBUI ou  ou	ou	ou
<b>SUNNY TRIPOWER 60 + INVERTER MANAGER</b>	LCD	LCS TOOL ETHERNET	ETHERNET	ETHERNET
<b>SUNNY HIGHPOWER PEAK1 + INVERTER MANAGER</b>	LCD	LCS TOOL ETHERNET	ETHERNET	ETHERNET

WEBCONNECT	Gestion d'ombrage avec OptiTrac Global Peak
WLAN	
Appareil de communication : Sunny Home Manager 2.0	
Appareil de communication : Data Manager M	
Appareil de communication (requis uniquement en cas d'utilisation de la fonction surveillance ou coupure) *: la communication pour les fonctions surveillance et coupure est intégrée, installer seulement le Gateway	

Figure (II.11) : logiciel SUNNY PORTAL.

Ces logiciels permettent non seulement de surveiller et d'analyser en temps réel la performance des installations photovoltaïques, mais aussi de prédire et de prévenir les problèmes avant qu'ils ne surviennent, assurant ainsi une gestion plus efficace et une plus grande durabilité des systèmes.

### III.5 Interfaces utilisateur :

À travers l'IU, les utilisateurs peuvent non seulement observer mais aussi interagir avec le système PV. Ils peuvent ajuster les paramètres, configurer des alertes, et optimiser la performance selon les conditions observées et les prévisions. Cela inclut la gestion de la charge, les ajustements de l'orientation des panneaux solaires (si applicable), et la mise en œuvre de stratégies d'efficacité énergétique.

L'interface utilisateur dans un système de supervision PV n'est pas juste un affichage passif des données ; elle est une plateforme dynamique qui englobe la surveillance, le contrôle, l'analyse, et la gestion proactive de l'installation photovoltaïque. Elle est essentielle pour maximiser l'efficacité et la durabilité de l'exploitation solaire, rendant la technologie plus accessible et utilisable pour tous les intervenants.

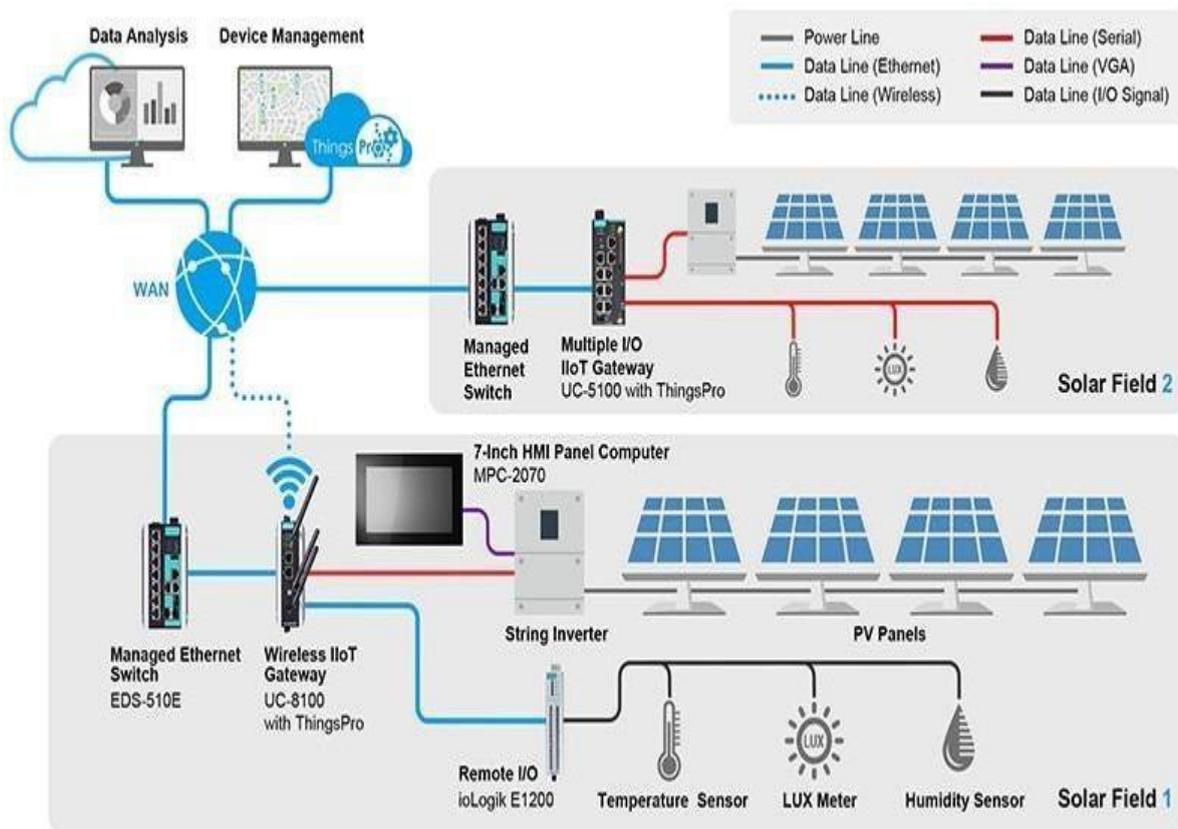


Figure (II.12) : système de supervision d'une installation PV.

## IV. Câblage des composants :

Le choix du câblage entre les différents composants d'un système de supervision pour une installation photovoltaïque dépend de plusieurs facteurs, notamment la nature des signaux transmis, la distance entre les composants, et l'environnement dans lequel le câblage est installé. Voici les principaux types de câbles utilisés et :

### IV.1 Câbles de données :

Pour connecter les capteurs, les contrôleurs, et autres dispositifs de communication :

**IV.1.1 Câbles coaxiaux :** Composés d'un conducteur central en cuivre, entouré d'un isolant, d'une tresse ou d'un blindage métallique, et d'une couverture externe, ils sont utilisés pour des signaux de fréquence élevée. Ils sont résistants aux interférences électromagnétiques et sont souvent utilisés pour les signaux de données analogiques. Bonne protection contre les interférences électromagnétiques et les bruits de fond. [36]



Figure (II.13) : câbles coaxiaux.

**IV.1.2 Câbles à paires torsadées (UTP (Unshielded Twisted Pair) et STP (Shielded Twisted Pair)):**

**UTP (Unshielded Twisted Pair) :** Fils de cuivre torsadés par paires sans blindage supplémentaire, communément utilisé pour les réseaux informatiques (Ethernet). Moins coûteux mais susceptible aux interférences.

**STP (Shielded Twisted Pair) :** Similaire à l'UTP mais avec un blindage autour de chaque paire de fils ou autour de toutes les paires., Utilisé dans les environnements où les interférences électromagnétiques, et offre une meilleure protection contre les interférences électromagnétiques.

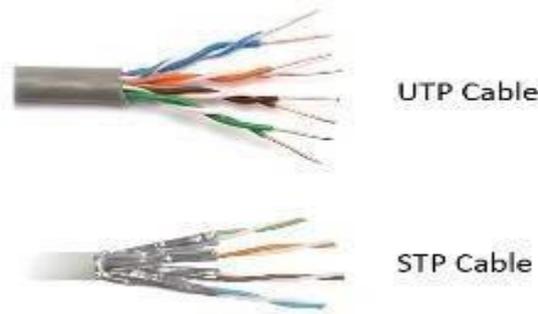


Figure (II.14) : câble STP et UTP.

**IV.1.3 Fibre optique :** Cœurs en verre ou en plastique qui conduisent la lumière, entourés d'une gaine protectrice, Idéal pour les transmissions sur de longues distances et les environnements avec des niveaux élevés d'interférences électromagnétiques, Elle transmet les données sous forme de lumière, ce qui la rend très rapide.

#### IV.2 Câbles d'alimentation :

Fournissent l'électricité nécessaire au fonctionnement des capteurs, des contrôleurs et d'autres composants du système. Ils doivent être choisis en fonction de la charge électrique et des conditions environnementales :

**VI.2.1 Câbles électriques standard :** ils sont Conducteurs en cuivre ou en aluminium, isolés par des matériaux comme le PVC, le caoutchouc, ou le polyéthylène. Ils Transporter l'énergie électrique du point de distribution vers les dispositifs. La taille du câble dépend de la charge électrique (ampérage) et de la longueur du câble. Il doit respecter le code électrique local pour assurer la sécurité et l'efficacité. [36]

Dans les zones où les câbles peuvent être exposés à des dommages mécaniques, utilisez des conduits ou des câbles armés, des câbles avec une résistance aux UV et aux intempéries.



Figure (II.15) : câbles armés.

-Le choix correctement les câbles de données et d'alimentation et en les installant correctement, vous garantissez non seulement le bon fonctionnement de votre système de supervision photovoltaïque, mais aussi sa sécurité et sa longévité.

## **V. Architecture de système de supervision :**

Quels que soient la taille et l'usage d'une installation PV, le système de monitoring a pour objectif principal de suivre l'énergie PV produite, d'évaluer la performance du système PV, de détecter les dérives ou les dysfonctionnements et d'avertir immédiatement en cas de défaut. Les architectures et exigences de monitoring sont présentées dans cette section. [37]

### **V.1 Installations PV pour bâtiments commerciaux et industriels :**

Dans les installations PV pour exportation vers le réseau, le système de monitoring fournit :

- La mesure de l'énergie PV produite et le calcul de son intérêt économique sur une base quotidienne et mensuelle
- L'évaluation de la performance du système PV (détection de la diminution du rapport de performance et identification des causes potentielles, par exemple température, accumulation de saletés ou de poussière sur la surface des panneaux PV, discordance et pertes dues aux conducteurs, état et fonctionnement des onduleurs).

L'architecture de monitoring est basée sur un enregistreur de données, équipé généralement d'un port série RS232/485 pour communiquer avec les onduleurs, et utilisant Modbus ou un protocole propriétaire. L'acquisition de données est basée sur un taux de polling à faible vitesse, toutes les 10 minutes en moyenne. Les données peuvent être stockées localement dans l'enregistreur pendant une courte période de temps, ou envoyées vers un serveur externe qui pourra stocker ces données pendant des années. L'enregistreur peut également être équipé d'entrées auxiliaires, telles que des entrées analogiques chargées de surveiller les capteurs d'irradiance et de température, une entrée logique chargée de surveiller l'état d'un équipement et/ou une entrée d'impulsion pour se raccorder à un compteur d'énergie. [37]

Une fois que les données sont recueillies localement, le système envoie les données de sortie et alerte dès qu'elles sont générées sur un système de télésurveillance où des applications basées sur le cloud, des outils d'analyse ou des services peuvent être fournis en complément.

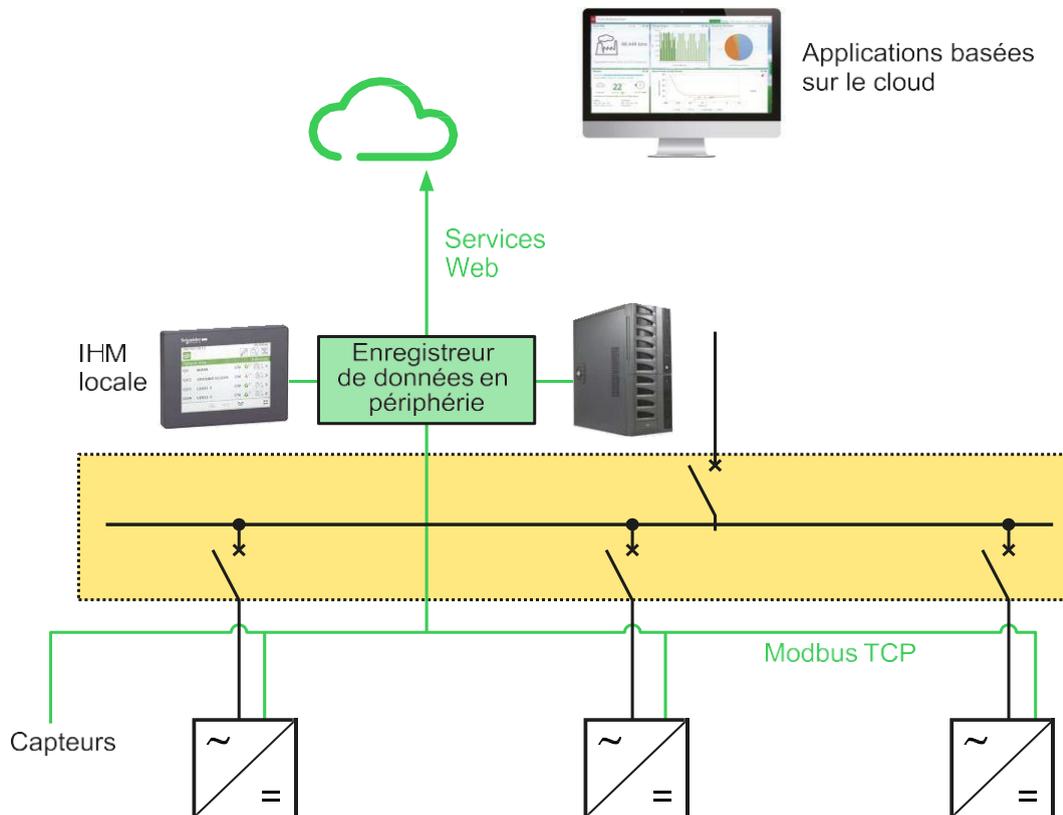


Figure (II.16) : Système de monitoring pour les installations PV commerciales.

### V.1.1 Exigences pour l'autoconsommation :

Dans le cas de l'autoconsommation, l'énergie PV produite est consommée par les charges du bâtiment. La production PV excédentaire (si elle existe) est généralement injectée dans le réseau. Pour comprendre comment utiliser et optimiser l'énergie, certains indicateurs clés de performance doivent être suivis, parmi lesquels :

- Pourcentage d'utilisation de la production PV (autoconsommation par rapport à exportation vers le réseau)
- Rapport d'autoconsommation
- Rapport d'autoproduction
- Analyse des tendances de la production PV par rapport à la consommation du bâtiment.

Le système de monitoring doit consolider les données provenant de la production PV et de la consommation du bâtiment. Il peut prendre la forme d'un système de gestion de bâtiment ou d'un système de gestion énergétique dédié, intégrant le monitoring de la production PV. [37]

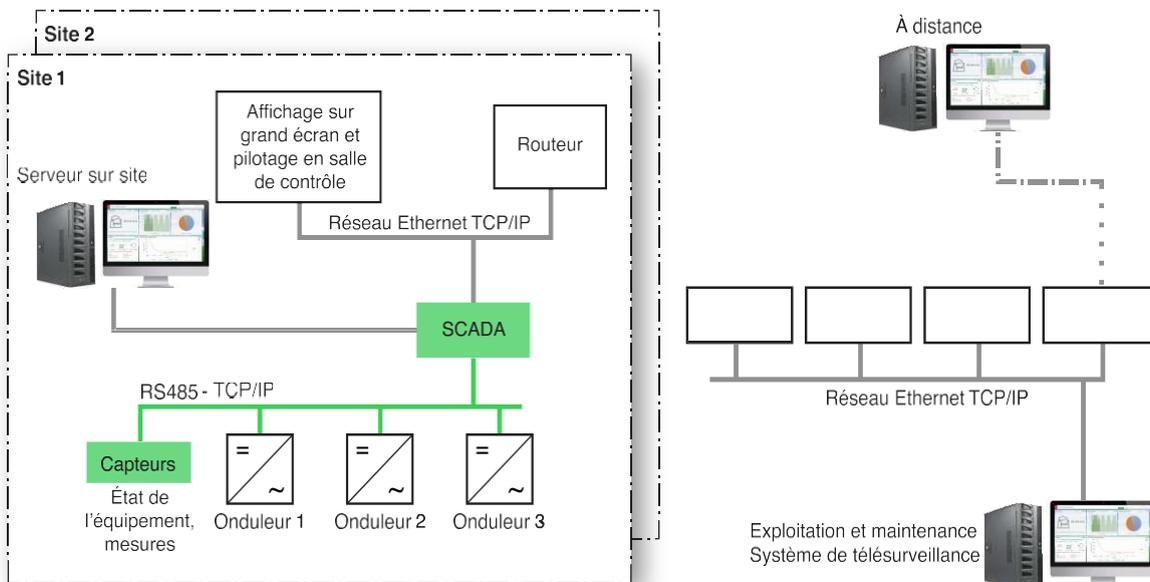
## V.2 Installations à grande échelle :

Les systèmes pour installations à grande échelle, de 500 kWc et plus, sont capables de monitorer la totalité de l'installation, de l'entrée de chaîne au point de connexion au réseau.

Ces systèmes sont basés sur un système SCADA (Supervision Control And Data Acquisition), permettant le monitoring multi-sites, les mesures CC et CA, le contrôle à distance des équipements motorisés, les alarmes intelligentes, la génération de rapports, l'indication de performance et d'autres fonctions comme l'analyse en profondeur. [37]

Ces systèmes incluent également d'autres équipements pour exploiter le site plus efficacement, comme une station météo (thermomètres, pluviomètres et anémomètres), des capteurs d'irradiance, un contrôleur de site qui communique avec l'opérateur du réseau pour adapter la production du site aux variations du réseau (tension, facteur de puissance) et des compteurs spécifiques tels que des compteurs de consommation (RGM) proches du point de connexion.

Ces systèmes SCADA peuvent être locaux et/ou distants, avec des capacités de redondance et un traitement de données très performant.



**Figure (II.17) :** système de télésurveillance utilisé dans des installations à grande échelle.

Ce type d'installation est le plus souvent couvert par un contrat d'entretien pour les interventions et la maintenance et, dans de nombreux cas, assorti d'objectifs de performance pouvant inclure la production, le rapport de performance ou la disponibilité. [37]

### **V.3 Installations à petite échelle :**

Cette architecture de monitoring à petite échelle est conçue pour surveiller et contrôler les performances de production et la qualité de fonctionnement des panneaux photovoltaïques ainsi que des onduleurs. Elle est généralement basée sur des systèmes électroniques de faible coût et peu complexes, tels que des cartes Arduino, qui permettent de collecter et d'analyser les données de production des systèmes solaires photovoltaïques. Ces systèmes de monitoring offrent la possibilité de détecter les éventuelles anomalies de fonctionnement qui peuvent survenir, ce qui permet de prendre des mesures pour les corriger et maximiser l'efficacité de l'installation. Les données collectées sont généralement affichées sous forme de tableaux ou de figures instantanées ou récapitulatifs journaliers, mensuels ou annuels, ce qui permet aux utilisateurs de suivre les performances de leur installation photovoltaïque et de prendre des décisions éclairées pour améliorer sa performance.

## **VI. Les technologies de système de supervision :**

Les installations photovoltaïques ont une infrastructure très complexe comprenant des panneaux, des capteurs, des onduleurs, des compteurs d'énergie et des calculateurs. La maintenance au niveau du sol de ces dispositifs est extrêmement difficile. En utilisant les technologies les systèmes SCADA modernes, l'IoT (internet des objets), l'intelligence artificielle... s'avèrent nécessaires pour assurer le rendement et la performance optimale d'une centrale photovoltaïque à travers la détection rapide et précise des problèmes et les raisons de leur apparition. [37]

### **VI.1 Système SCADA :**

Les systèmes SCADA sont essentiels pour toute une série de structures industrielles. Ces systèmes permettent aux organisations de contrôler des actifs de tailles différentes, ainsi que des usines entières. Avec un SCADA, on peut facilement obtenir des informations opérationnelles, contrôler les processus et prendre des décisions fondées sur des données claires.

SCADA est l'acronyme de « Supervisory Control And Data Acquisition ». En effet, le SCADA est un système de surveillance et de contrôle qui permet de gérer en temps réel et à tout moment un grand nombre de données de mesure. De plus, le système enregistre certaines données programmées dans une base de données. [39-40]

Un SCADA est généralement fourni sous forme de logiciel combiné à des éléments matériels, tels que des automates programmables industriels (API) et des unités terminales distantes (RTU), des protocoles de communication, des serveurs de données pour l'archivage et l'alimentation des interfaces homme-machine (IHM). L'acquisition des données commence avec les API et RTU, qui communiquent avec l'équipement d'un centre de production, on trouve les capteurs d'une installation. Les données recueillies à partir de l'équipement sont ensuite envoyées au niveau supérieur, à une salle de contrôle, où des opérateurs peuvent

superviser les contrôles des API et des RTU à l'aide d'interfaces homme-machine (IHM). Les IHM sont un composant essentiel des systèmes SCADA. Il s'agit des écrans que les opérateurs utilisent pour communiquer avec le système SCADA. [39-40]

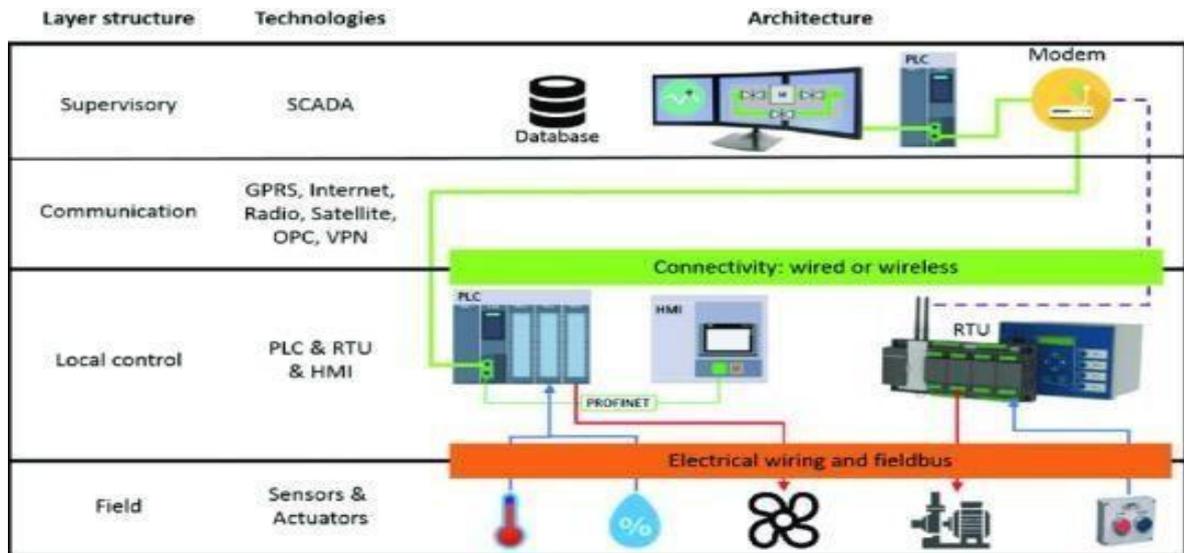


Figure (II.18) : les composantes d'un système SCADA.

### VI.1.1 Intégration des systèmes SCADA :

Dans le cadre industriel, l'implémentation d'un système SCADA est primordiale pour une gestion optimisée et une surveillance continue des installations photovoltaïques. Ce système débute par l'intégration de capteurs industriels qui collectent des données critiques comme la tension électrique, le courant de charge, la température opérationnelle des panneaux et la puissance électrique produite. Ces données sont acheminées vers un contrôleur programmable (PLC) qui les analyse en continu pour en extraire des métriques précises. Au cœur du système se trouve le logiciel SCADA, Il reçoit les données traitées de l'API. Il offre une interface utilisateur robuste permettant la visualisation dynamique des performances de l'installation, l'élaboration de bilans énergétiques détaillés, et la configuration de systèmes d'alerte pour intervenir efficacement lors de déviations par rapport aux normes opérationnelles établies. Le logiciel permet également la manipulation directe ou automatique des paramètres de fonctionnement pour s'adapter aux conditions variables. L'utilisation du système SCADA dans les installations photovoltaïques industrielles assure non seulement une réactivité immédiate aux anomalies, réduisant ainsi les downtimes, mais également une optimisation de la production d'énergie, essentielle pour maximiser le rendement et la rentabilité de l'investissement énergétique. [41]



fil sur des plateformes cloud, qui va permettre de stocker davantage de data et de les sauvegarder. Par conséquent, elles peuvent être analysées et enrichies pour en tirer pleinement parti. Ces plateformes de gestion et de visualisation de données sont de nouvelles solutions IoT qui permettent aux régions, aux entreprises et même aux utilisateurs d'analyser les données et de tirer des conclusions afin qu'ils puissent s'adapter aux pratiques et comportements. [42]



Figure (II.20) : principe de l'IoT

## VI.2.2 Fonctionnement de l'IoT :

Les dispositifs de surveillance de l'énergie solaire basés sur la technologie IoT sont conçus pour recueillir des données en temps réel à partir de capteurs installés dans le système d'énergie solaire, analyser ces données et générer des informations qui permettent d'améliorer les performances et l'efficacité de notre installation solaire. Le processus se déroule : [43]

- Les dispositifs de surveillance de l'énergie solaire IoT utilisent des capteurs pour collecter des données à partir de différentes parties de système d'énergie solaire. Ces capteurs peuvent mesurer des paramètres tels que l'irradiation solaire, la température du panneau, la tension de la batterie et le courant.
- Une fois les données collectées par les capteurs, elles sont transmises au dispositif IoT via des protocoles de communication tels que Wi-Fi, Bluetooth ou des réseaux cellulaires. L'appareil IoT sert de passerelle pour transmettre les données à un serveur en nuage.
- Le dispositif IoT envoie ensuite les données collectées par les capteurs à un serveur en nuage, où elles sont stockées et analysées. Le serveur en nuage peut utiliser diverses techniques d'analyse des données, telles que des algorithmes d'apprentissage automatique, pour générer des informations à partir des données.

- L'interface utilisateur affiche les données et les informations générées par le système. Il peut s'agir d'un tableau de bord en ligne, d'une application mobile ou d'alertes par courriel. L'interface utilisateur permet de surveiller et de gérer le système à distance.

Les données collectées et analysées par le dispositif de surveillance de l'énergie solaire IoT peuvent être utilisées pour optimiser les performances du système d'énergie solaire. Par exemple, les données peuvent être utilisées pour ajuster la production d'énergie en fonction des conditions actuelles, identifier et résoudre les problèmes avant qu'ils ne causent des dommages, et améliorer l'efficacité du système d'énergie solaire.

Les informations générées par le système peuvent être utilisées pour optimiser les performances et l'efficacité du système d'énergie solaire, ce qui permet de réduire les coûts et d'augmenter la production d'énergie. [43]

### VI.3 L'intelligence artificielle :

Il existe de nombreuses utilisations possibles de l'intelligence artificielle dans l'industrie pour la supervision. En voici quelques-unes qui sont actuellement utiles :

#### VI.3.1 Robot de nettoyage IA autonome pour les panneaux solaires :

Les installations photovoltaïques sont principalement implantées dans des régions arides où l'énergie solaire est abondante. La faible pluviométrie dans ces zones pose un défi majeur en matière de nettoyage des panneaux solaires. Notamment après des tempêtes de sable qui peuvent les recouvrir, réduisant ainsi leur efficacité énergétique.

C'est là que les robots boostés à l'IA interviennent. Ces appareils, conçus spécifiquement pour le nettoyage des installations de grande envergure, peuvent être contrôlés à distance. De plus, ils peuvent être programmés pour fonctionner de manière autonome et se déplacer librement. Ils peuvent également charger eux-mêmes leur batterie, sans nécessiter d'intervention humaine. [44]



Figure (II.21) : un robot place sur le panneau solaire.

### VI.3.2 Trackers solaires automatisés par l'intelligence artificielle :

De nouvelles solutions photovoltaïques intelligentes, pilotées par l'intelligence artificielle, présentent un certain nombre de caractéristiques destinées à favoriser la parité des réseaux. Les trackers intelligents et les modules bifaciaux sont soutenus par des algorithmes d'intelligence artificielle, tandis que les technologies de diagnostic par IA facilitent l'exploitation et la maintenance automatisées des projets photovoltaïques.

Les algorithmes traditionnels sont abandonnés au profit de trackers intelligents et de modules PV bifaciaux équipés d'algorithmes d'IA. Cette transition vise à maximiser les rendements énergétiques en intégrant le contrôle du tracker, l'alimentation électrique et la communication.

[44]



Figure (II.22) : un tracker solaire.

### VI.3.3 L'intégration des drones de surveillance :

Des drones équipés de caméras infrarouges et thermique peuvent inspecter les centrales photovoltaïques et générer des centaines d'images. Une fois traitées, ces images peuvent servir à détecter avec une précision de 90 % les problèmes des panneaux, à évaluer la performance de la centrale ainsi qu'à la géolocaliser. Les drones peuvent accéder à des zones difficiles d'accès, telles que des toits ou des champs solaires, ce qui facilite l'inspection et la maintenance. [45]

Grâce à l'architecture en nuage d'Oracle, l'apprentissage profond (réseaux de neurones à convolution) et des processeurs graphiques NVIDIA fonctionnant avec l'infrastructure en nuage d'Oracle, il est possible d'analyser rapidement d'énormes quantités d'images présentant des défauts de la centrale. De plus, un tableau de bord présente l'information à propos des problèmes de panneaux, de performance et de géolocalisation afin de rendre l'énergie renouvelable plus efficace grâce à l'intelligence artificielle. [45]



**Figure (II.23) :** *drone thermique.*

## **VII. Stratégies de surveillance :**

Les stratégies de surveillance assurent le bon fonctionnement et la performance d'une installation photovoltaïque. Elles consistent en différentes approches de surveillance pour détecter les éventuels problèmes et les défaillances. Les stratégies de surveillance permettent de collecter des données en temps réel sur les performances de l'installation et d'identifier toute déviation par rapport aux paramètres préétablis. Cela permet de prendre des mesures correctives rapidement et de minimiser les pertes de production. De plus, les stratégies de surveillance aident à évaluer l'efficacité des composants de l'installation, tels que les panneaux solaires, les onduleurs et les câbles, et à prévenir les pannes potentielles. [46]

Parmi les stratégies de surveillance on trouve :

### **VII.1 Surveillance en temps réel :**

La surveillance en temps réel est une stratégie continue qui permet de surveiller l'installation photovoltaïque en temps réel. Elle implique l'utilisation de capteurs et de systèmes de monitoring qui collectent des données instantanées sur la production d'énergie, la tension, le courant et la température de l'installation. Ces données sont ensuite analysées en temps réel pour détecter toute anomalie ou défaillance. La surveillance en temps réel permet une réactivité immédiate aux problèmes et une intervention rapide pour minimiser les perturbations. Elle offre également la possibilité de suivre et d'évaluer les performances de l'installation en temps réel, ce qui permet de prendre des décisions éclairées pour optimiser la production d'énergie. [47]

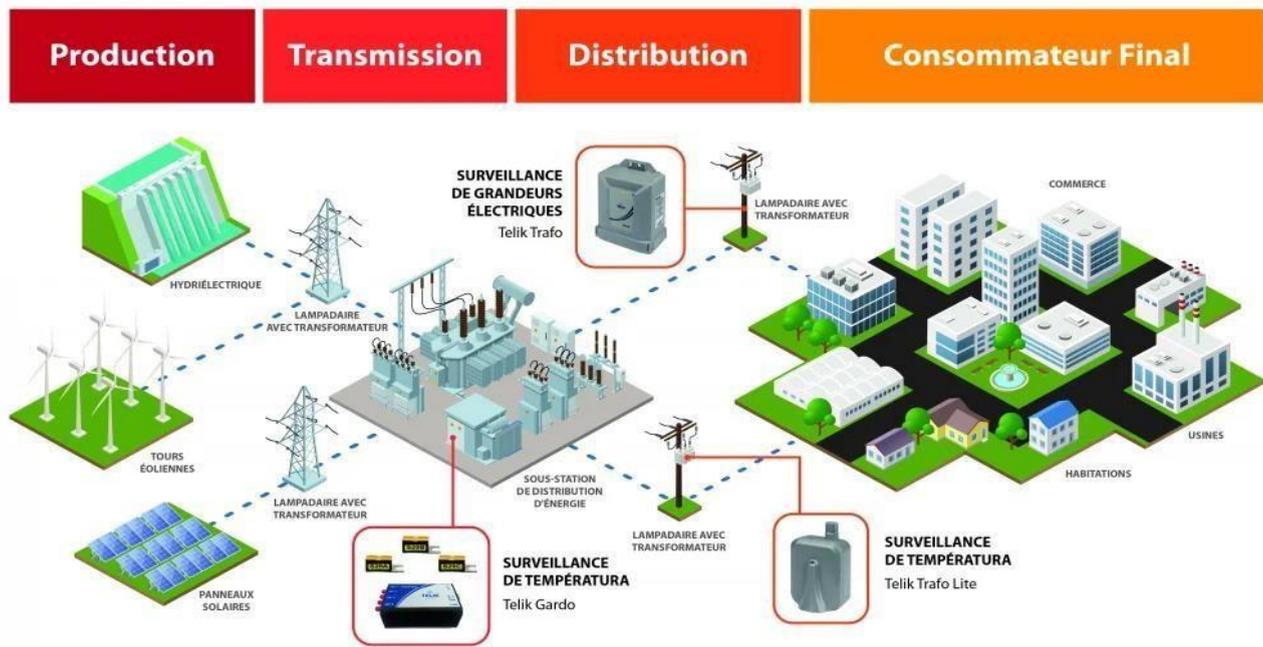


Figure (II.24) : *Surveillance en temps réel*

## VII.2 Surveillance périodique :

Cette stratégie consiste à effectuer des contrôles réguliers de l'installation photovoltaïque à des intervalles prédéfinis. Ces contrôles peuvent inclure des inspections visuelles, des tests de performance et des relevés de données. La surveillance périodique permet de détecter les problèmes potentiels et de prévenir les défaillances avant qu'elles ne deviennent critiques. Bien qu'elle ne soit pas aussi réactive que la surveillance en temps réel, elle offre l'avantage d'un suivi régulier de l'état de l'installation et d'une planification efficace des activités de maintenance. Cela permet de réduire les coûts de maintenance et d'optimiser la durée de vie des composants de l'installation. [48]

## VII.3 Surveillance basée sur les alarmes :

Elle base sur les alarmes repose sur le déclenchement d'alarmes en cas de dépassement de seuils prédéfinis. Des capteurs sont utilisés pour mesurer les paramètres clés de l'installation et déclencher des alarmes en cas de divergence par rapport aux valeurs normales. Ces alarmes peuvent être visuelles, sonores ou être signalées par des notifications automatiques. La surveillance basée sur les alarmes permet une détection rapide des problèmes et une intervention immédiate. Elle permet également une réduction du temps de rétablissement après une défaillance, car elle alerte rapidement le personnel d'exploitation ou le service de maintenance. Cependant, cette stratégie peut générer un grand nombre de fausses alarmes, ce qui nécessite une analyse et une gestion adéquates pour éviter les interruptions inutiles. [49]

**Conclusion :**

Ce chapitre a mis en lumière l'importance de choisir des solutions adaptées aux spécificités de chaque installation, et souligne que l'efficacité de la supervision dépend non seulement de la technologie elle-même mais aussi de la compétence des opérateurs et de la qualité des données collectées. Ainsi, la formation continue des professionnels et l'amélioration continue des systèmes de supervision sont essentielles pour réaliser pleinement le potentiel des installations photovoltaïques. Alors que le secteur évolue, l'adoption de ces pratiques et technologies innovantes sera déterminante pour le développement durable et la rentabilité à long terme des investissements dans le solaire photovoltaïque.

## **Chapitre 3 :**

# **La maintenance préventive des installations photovoltaïques**

## **I. Introduction :**

La maintenance des systèmes de supervision est un sujet majeur dans le domaine de la gestion des équipements et des infrastructures. Cette intégration vise à faciliter la surveillance et la maintenance des systèmes en les regroupant au sein d'une plateforme unique. En utilisant des technologies avancées telles que l'internet des objets (IoT) et l'intelligence artificielle (IA), les systèmes de supervision peuvent fournir des informations en temps réel sur l'état des équipements, détecter les pannes potentielles et optimiser les opérations de maintenance. Cette introduction fournit un aperçu général de l'importance de l'intégration de maintenance et présente les objectifs, les avantages et les méthodes associés à ce concept. [50-51]

Ce chapitre examine les différentes techniques de maintenance applicables aux installations photovoltaïques, avec un accent particulier sur la maintenance préventive et son intégration dans les systèmes de supervision.

## **II. La maintenance :**

### **II.1 Définition de maintenance :**

Selon l'AFNOR (ASSOCIATION FRANÇAISE DE LA NORMALISATION) par la norme NF X 60-010, 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. Bien maintenir, c'est assurer l'ensemble de ces opérations au coût optimal. [52]

La maintenance regroupe ainsi les actions de dépannage et de réparation, de réglage, de révision, de contrôle et de vérification des équipements matériels (machines, véhicules, objets manufacturés,...etc.) ou même immatériels (logiciels).

Un service de maintenance peut également être amené à participer à des études d'amélioration du processus industriel, et doit, comme d'autres services de l'entreprise, prendre en considération de nombreuses contraintes comme la qualité, la sécurité, l'environnement, le coût, etc



**Figure (III.1) :** *maintenance d'une installation photovoltaïque*

## **II.2 Rôle de maintenance :**

En bref, le rôle de la maintenance est de mettre en œuvre le fameux proverbe « mieux vaut prévenir que guérir ». Son objectif est d'optimiser des systèmes et des machines souvent complexes afin de garantir une bonne qualité des produits ou services fabriqués tout en assurant un fonctionnement efficace. Cela implique une gamme d'activités réalisées par des techniciens et ingénieurs professionnels de maintenance industrielle qui conçoivent, installent et entretiennent des systèmes complexes. [53]

## **II.3 Objectifs de maintenance :**

Le principal but de la maintenance est d'assurer le bon fonctionnement des matériels de production. Il est lié d'une manière explicite à l'évolution de la technologie avec l'apparition des nouvelles techniques de gestion. De ce fait, il faut toujours penser à une longueur d'avance. De plus, cela permet de garantir la réduction des coûts de production pour des raisons concurrentielles. Il faut dire que la recherche constante de nouvelles performances dans les différents systèmes de production priorise la maintenance industrielle. Cela permet d'assurer la garantie d'une meilleure qualité en matière de produits conçus et les services à rendre aux clients. [54]

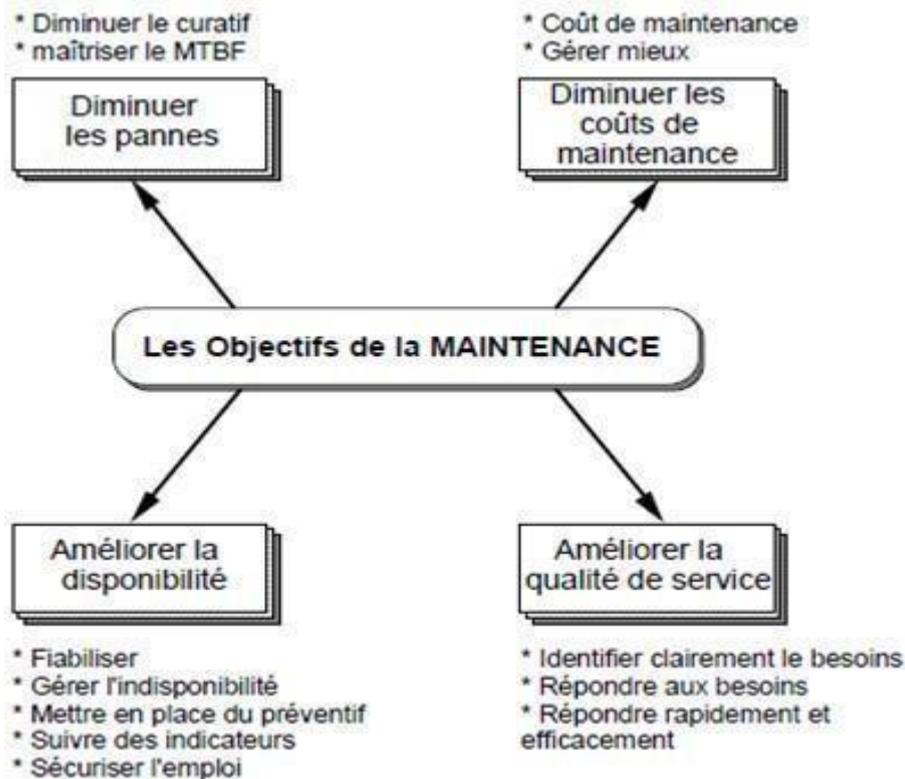


Figure (III.2) : Les objectifs de la maintenance

## II.4 Les différents types de maintenance :

Il existe différents types de maintenance, déclinés en deux familles :

### II.4.1 Maintenance corrective :

Selon AFNOR (norme X 60-010) : « Maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise ».

La maintenance corrective correspond à une opération engagée suite à une panne, un sinistre ou un aléa. Elle a pour objectif de remettre en fonctionnement les machines par un dépannage, une réparation ou le remplacement de pièces défectueuses. [55]

On distingue deux types de maintenance corrective :

#### II.4.1.1 Maintenance palliative :

La maintenance palliative correspond au dépannage. Elle consiste à remettre provisoirement une machine ou un outil en état, dans l'attente de sa réparation. La maintenance palliative permet d'éviter l'arrêt totale de production, on parle alors de reprise de production en mode « dégradé ». [56]

#### II.4.1.2 Maintenance curative :

La maintenance curative répare les causes et conséquences de la panne. Contrairement à la maintenance palliative, il s'agit d'une action en profondeur qui agit sur

le long terme, souvent en remplaçant la pièce défectueuse par une neuve. L'équipement reprend alors une production normale. [56]

#### **II.4.2 Maintenance préventive :**

C'est une maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien. Les maintenances préventives servent à entretenir le système, afin de le maintenir en bon état de fonctionnement, et sont mises en œuvre avant que le système soit en état de panne. [57]

Trois stratégies de maintenances préventives peuvent être mise en œuvre :

##### **II.4.2.1 La maintenance systématique :**

« Maintenance préventive exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage mai sans contrôle préalable de l'état du bien ». Bien que simple à mettre en œuvre, cette politique de maintenance n'est pas très intéressante car elle se base sur l'hypothèse que le temps moyen de bon fonctionnement est constant, ce qui n'est pas forcément le cas en réalité. [52]

##### **II.4.2.2 La maintenance prévisionnelle :**

« Maintenance préventive exécutée selon un calendrier préétabli ou selon un nombre défini d'unités d'usage ». Ce type de maintenance se base sur l'estimation du temps de fonctionnement correct du système, qui peut être établie par l'analyse de différentes mesures sur le système. [52]

##### **II.4.2.3 La maintenance conditionnelle :**

« Maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découlent ». Cette politique de maintenance se base sur l'évolution de paramètres qui décrivent l'état du système, comme par exemple son état de dégradation. [52]

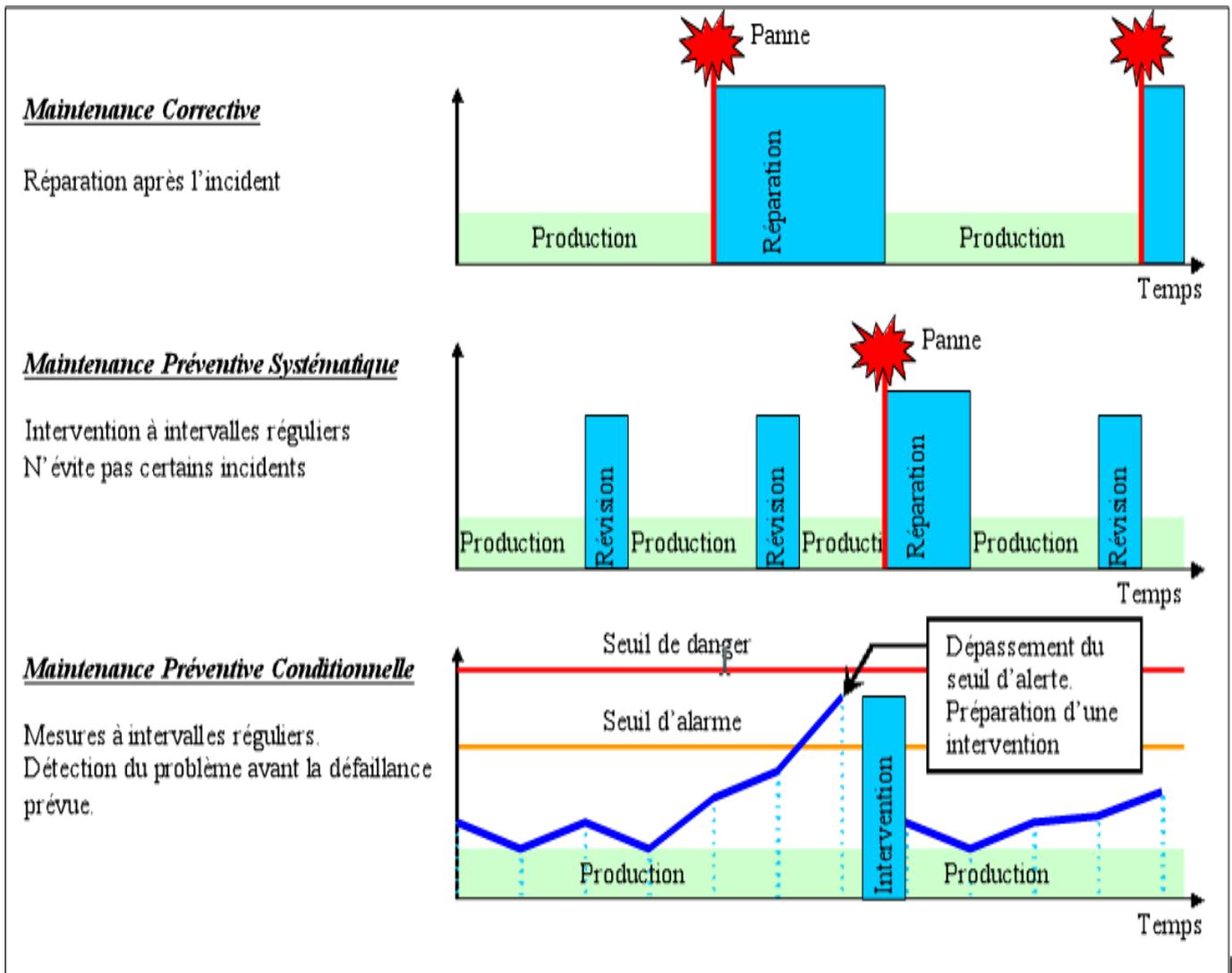
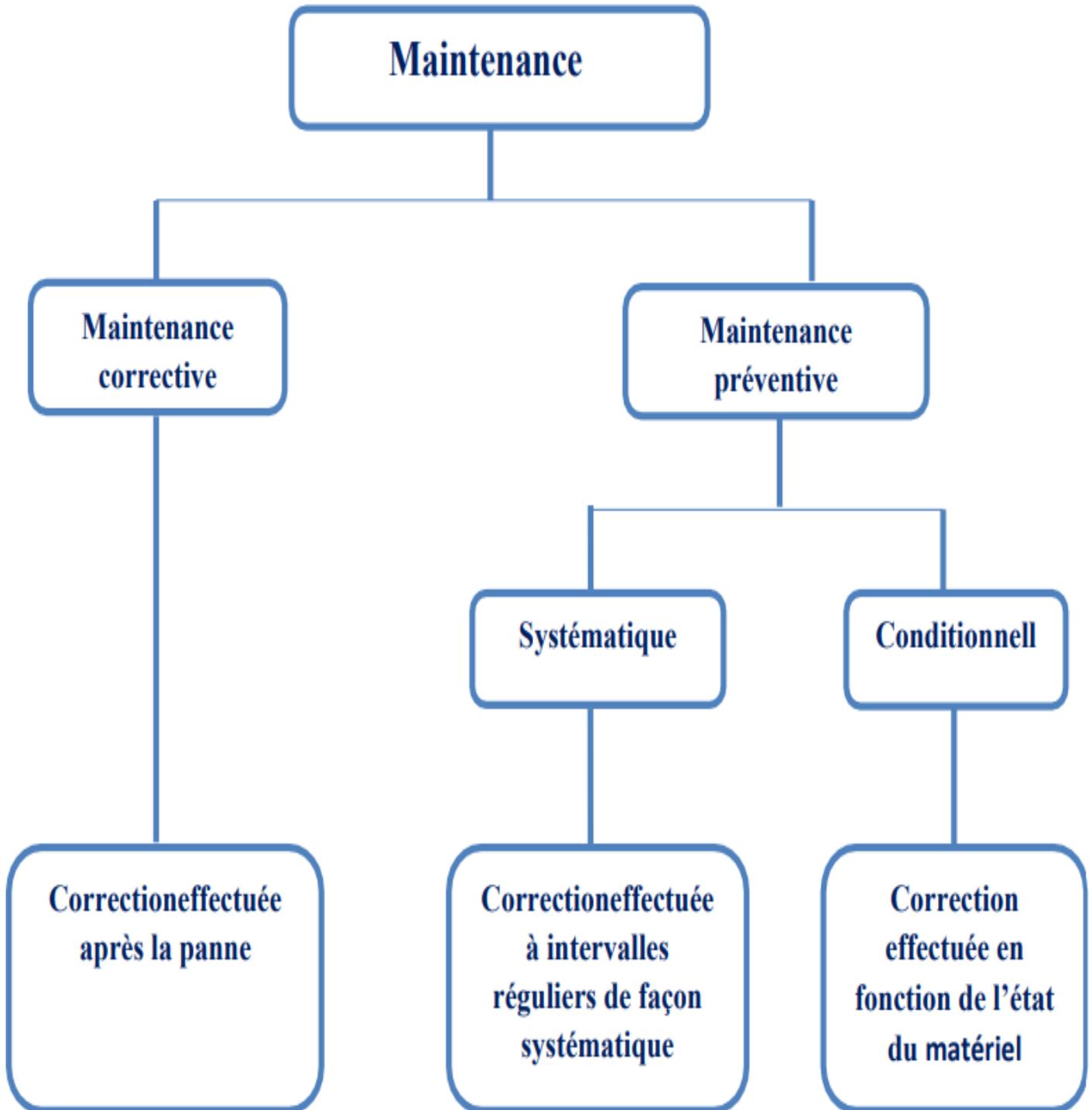


Figure (III.3) : comparaison entre les types de maintenance.

**II.5 Organigramme de politique 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 la politique de maintenance choisie :



**Figure (III.4) :** Organigramme de politique de maintenance.

### **III. La maintenance photovoltaïque :**

Lorsqu'on parle de maintenance photovoltaïque, on fait référence à l'ensemble des actions et vérifications techniques visant à garantir le bon fonctionnement et l'efficacité des installations solaires (toiture, sol, ombrière photovoltaïque). Cela inclut des activités régulières d'inspection, de vérification des systèmes électriques et d'analyse de la performance pour identifier et résoudre les problèmes avant qu'ils ne deviennent critiques. [58]

Elle se divise en deux catégories principales : la maintenance préventive et la maintenance corrective. La maintenance corrective intervient en réponse à des pannes ou des dysfonctionnements identifiés, nécessitant des réparations ou des remplacements de composants défectueux. Par contre la maintenance préventive inclut des inspections régulières, le nettoyage des panneaux pour éliminer la poussière et les débris, et la vérification des connexions électriques pour prévenir les pannes. Elle permet de détecter et de résoudre les problèmes avant qu'ils n'affectent gravement la production d'énergie. [58]

### **IV. La maintenance préventive des installations photovoltaïques :**

La maintenance préventive est un pilier fondamental pour assurer la durabilité et l'efficacité d'une installation photovoltaïque. Cette méthode nécessite une supervision du système solaire et la possibilité de programmer des visites d'entretien annuelles. [59]

La supervision implique la surveillance constante des performances du système photovoltaïque, la collecte de données en temps réel et l'analyse approfondie pour garantir une production d'énergie maximale. Grâce à des outils de pointe, les superviseurs peuvent détecter rapidement les problèmes potentiels, minimiser les temps d'arrêt et optimiser le rendement.

Une autre dimension essentielle de la maintenance préventive est la possibilité de programmer des visites annuelles planifiées. Ces visites sont l'occasion de vérifier l'état global du système, de nettoyer les panneaux solaires pour éliminer la saleté et les débris, et de s'assurer que tous les composants fonctionnent correctement. Cette approche contribue à maximiser la production d'énergie et à garantir la longévité de votre installation solaire. [59]

**IV.1 La planification dans le système de supervision :**

Cette planification nécessite une approche structurée pour garantir l'efficacité et la durabilité du système. Voici les étapes essentielles pour élaborer un plan de maintenance préventive :

**IV.1.1 Évaluation Initiale et Analyse des Besoins :**

C'est la première étape pour planifier une maintenance préventive efficace. Cette étape implique un inventaire complet des composants du système PV, y compris les panneaux solaires, les onduleurs, le câblage, les structures de montage, et les dispositifs de surveillance. Il est également essentiel de collecter toute la documentation technique pertinente et de cartographier l'emplacement des composants. L'analyse des conditions environnementales, telles que l'ensoleillement, la température, les précipitations, la poussière, la pollution, et les risques naturels comme les vents et les tempêtes, permet de comprendre l'impact de ces facteurs sur le système PV. En outre, l'évaluation des performances passées et actuelles du système, incluant l'historique des pannes et des réparations, aide à identifier les vulnérabilités. Enfin, il est préférable d'assurer que l'installation est conforme aux normes et réglementations pertinentes, incluant les exigences de certifications et d'inspections périodiques. Cette analyse approfondie est indispensable pour concevoir un plan de maintenance préventive adapté et efficace, garantissant la performance optimale et la durabilité du système PV.

Choix de la ville :  Prendre en compte un masque :

Inclinaison du plan :  Orientation du plan :  Albédo du sol :

Besoin moyen en énergie électrique par jour :  kWh

Nombre de jours d'autonomie :  Rendement des batteries :

Investissement initial de l'installation PV (total  ou par W crête  ) :  €/W

Taux de subventions à l'investissement initial :  %

Rendement de conversion énergétique module PV vers l'utilisation :

Coût de la maintenance annuelle en % de l'investissement initial :

Coût de l'électricité substituée (d'un groupe groupe électrogène par ex) :  €/kWh

Taux d'inflation sur le coût de l'énergie substituée :

Coût d'actualisation de l'argent :  Durée de vie de l'installation :

Capacité nécessaire en batteries :

Calcul de la production électrique, moyenne par jour  ou cumulée

	jan	fév	mars	avr	mai	juin	juil	août	sep	oct	nov	déc	année
Besoin Oui/Non	<input type="text" value="0"/>	-											
IGP (kWh/m <sup>2</sup> )	1.48	1.97	3.66	4.63	5.33	5.35	5.28	4.54	3.36	2.93	1.74	1.19	3.46

Mois le plus défavorable à prendre en compte pour le calcul de la puissance crête : **décembre**

Puissance crête mini calculée :  Puissance crête choisie :  kW,

	jan	fév	mars	avr	mai	juin	juil	août	sep	oct	nov	déc	année
Prod réelle (kWh)	1.9	2.5	4.6	5.8	6.7	6.7	6.7	5.7	4.2	3.7	2.2	1.5	4.4
Prod utile (kWh)	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	-

Figure (III.5) : Dimensionnement photovoltaïque en Site isolé.

Cette photo représente un outil de dimensionnement pour une installation photovoltaïque. à Brest, configurée avec une inclinaison de 35 degrés et une orientation plein sud pour maximiser l'exposition solaire. L'objectif est de couvrir un besoin énergétique moyen de 1.4 kWh par jour, avec une autonomie de 6 jours grâce à des batteries ayant un rendement de 90%. L'investissement initial est de 10 €/W, subventionné à 90%, et le rendement de conversion des panneaux est de 70%. Le coût de maintenance annuel est estimé à 3% de l'investissement initial, et le coût de l'électricité substituée par le système est de 0.15 €/kWh sans inflation prévue. La durée de vie de l'installation est de 20 ans, avec un taux d'actualisation de 3% pour évaluer les coûts et bénéfices futurs.

Le système nécessite une capacité de batterie de 9.33 kWh pour assurer l'autonomie requise. La puissance crête minimale à installer est de 1.682 kW, mais une puissance de 1.8 kW a été choisie pour garantir une marge de sécurité. Le tableau mensuel montre la production énergétique estimée, tenant compte des variations saisonnières, avec une production annuelle totale de 1473.94 kWh. Cette configuration assure que l'installation photovoltaïque peut couvrir les besoins énergétiques avec une marge suffisante pour les périodes moins ensoleillées.

**IV.1.2 Élaborer un Calendrier de Maintenance :**

Consiste à élaborer un calendrier de maintenance. Ce calendrier détermine la fréquence des différentes activités de maintenance en fonction des besoins spécifiques de l'installation. Les activités courantes incluent le nettoyage régulier des panneaux solaires pour enlever la poussière et les débris, les inspections visuelles des composants pour détecter les signes de détérioration, les vérifications des connexions électriques pour s'assurer qu'elles sont sécurisées et intactes, ainsi que les tests électriques et la thermographie infrarouge pour identifier les anomalies thermiques et les problèmes de performance. La fréquence de ces activités doit être adaptée aux conditions environnementales locales et aux caractéristiques de l'installation. Par exemple, dans les environnements poussiéreux, le nettoyage des panneaux pourrait être nécessaire chaque mois, tandis que dans d'autres régions, un nettoyage trimestriel peut suffire. Le calendrier de maintenance doit également tenir compte de la saisonnalité, ajustant les interventions pour anticiper les périodes de forte et de faible production d'énergie. En planifiant ces activités de manière structurée, il est possible de maximiser l'efficacité et la durée de vie du système PV tout en minimisant les interruptions et les coûts de réparation.

Activité	Fréquence
Nettoyage des panneaux solaires	Trimestriel
Inspection visuelle	Semestriel
Vérification des connexions	Semestriel
Tests électriques	Annuel
Thermographie infrarouge	Annuel
Vérification des onduleurs	Semestriel
Mise à jour du firmware	Annuel ou selon besoin

*Tableau III.1 : Exemple de Calendrier de Maintenance Préventive pour une Installation PV.*

#### IV.1.3 Mise en Œuvre des Procédures de Maintenance :

Cela implique de développer des procédures claires et détaillées pour chaque type de maintenance, telles que le nettoyage des panneaux, les inspections visuelles, les vérifications des connexions électriques, et les tests de performance. C'est recommandé de former les techniciens de maintenance pour qu'ils suivent ces procédures de manière cohérente et utilisent les outils de diagnostic et de réparation appropriés. Assurer la disponibilité et le bon état des outils et équipements nécessaires est également essentiel pour l'efficacité des interventions. Les procédures standardisées doivent inclure des étapes spécifiques et des critères d'évaluation pour garantir que chaque tâche est effectuée correctement et de manière sécurisée. Cette étape garantit que la maintenance préventive est exécutée systématiquement et efficacement, ce qui contribue à maximiser la performance et la longévité de l'installation photovoltaïque. [60]

#### IV.1.4 Surveillance et Suivi en Temps Réel :

Cela nécessite l'implémentation de systèmes de surveillance à distance qui permettent de surveiller en permanence les performances du système photovoltaïque et de repérer rapidement toute anomalie. Il est possible d'inclure dans ces systèmes des capteurs permettant de mesurer la production d'énergie, les températures des panneaux et l'état des onduleurs, ainsi que des logiciels de gestion permettant d'analyser ces données et de repérer les tendances ou les problèmes potentiels. Il est essentiel de mettre en place des alertes automatiques afin de signaler aux techniciens de maintenance les besoins d'intervention immédiate ou les éventuelles défaillances. L'utilisation du suivi en temps réel permet aussi d'ajuster les intervalles de maintenance en fonction des conditions réelles de fonctionnement et de l'état du système, au lieu de se contenter d'un calendrier déterminé. La mise en place de ces outils de surveillance et de suivi permet de résoudre rapidement les problèmes, de garantir une performance optimale du système et de prolonger la durée de vie des éléments de l'installation photovoltaïque. [61]



Figure (III.6) : Suivi des données de production.

## V. Technique de maintenance préventive :

On a dit que la maintenance préventive est une visite technique périodique qui va permettre de s'assurer du bon état de fonctionnement de l'ensemble de la centrale. Elle consiste à des opérations de contrôle, d'entretien, et de remplacement des éléments la constituant. Elle garantit le niveau de production d'électricité attendu de l'installation photovoltaïque tout au long de sa durée de vie.

Par principe, la maintenance préventive s'effectue annuellement au printemps, afin que l'installation soit parfaitement opérationnelle pour la saison de grande production. Celle-ci peut être moins fréquente pour les installations de petite puissance, surtout si elles sont suivies par un système de supervision. Par contre, elle est fortement recommandée pour les installations photovoltaïques supérieures à 36 kWc et elle devient nécessaire pour les installations de plus de 100 kWc. [62]

Voici quelques techniques qui permet d'anticiper de futurs dysfonctionnements et augmenter la durée de vie de notre installation :

### V.1 Inspection Visuelle Régulière :

La maintenance préventive devrait idéalement commencer par une inspection visuelle complète de l'installation et devra être fréquemment répétée. Elle rassemble plusieurs opérations à effectuer régulièrement, sur une moyenne d'un an. Ces procédures servent à contrôler l'état général de la centrale solaire, Elle consiste à vérifier l'intégrité physique des panneaux solaires en recherchant des fissures, des décolorations et des délaminations. Par exemple, il est conseillé d'inspecter les modules depuis le sol à raison d'une fois par an. Ce suivi est nécessaire pour détecter d'éventuelles souillures ou brisures des modules. Il est à rappeler également que les modules sales captent moins les rayonnements impactant sur le rendement des panneaux. [63]



**Figure (III.7) :** Détection de points chauds par thermographie



**Figure (III.8) :** Contrôler les connexions à la terre

De plus, l'état des câbles doit être contrôlé pour détecter des signes d'usure ou de corrosion, et s'assurer que l'isolation est intacte. Les connecteurs électriques doivent être inspectés pour garantir que les connexions sont bien serrées et propres, évitant ainsi les arcs électriques et les pertes de contact.

L'inspection visuelle d'une installation effectuée au moins deux fois par an, et après tout événement météorologique extrême comme des tempêtes ou des chutes de neige importantes.

### V.2 Nettoyage des Panneaux :

Les panneaux photovoltaïques sont le cœur du système. Leur contact quotidien avec les phénomènes naturels telle la pluie, la poussière ou les animaux, peut empêcher leur bon fonctionnement. Le nettoyage des modules permet de supprimer la crasse et de retrouver le niveau de production d'électricité d'origine. La fréquence de nettoyage est très variable selon les installations photovoltaïques. Elle dépend de l'environnement et de l'inclinaison du système. En règle générale, on nettoie le générateur photovoltaïque au printemps, en prévision des jours les plus ensoleillés. Ils font prendre en compte aussi les salissures

saisonniers comme la tombée des feuilles en automne ou encore les vents de sables du Sahara.



**Figure (III.9) :** Salissure à la surface des modules.

Il est recommandé d'utiliser de l'eau déminéralisée et des brosses non abrasives pour éviter d'endommager la surface des panneaux. Les produits chimiques agressifs doivent être évités car ils peuvent corroder les matériaux et réduire la durée de vie des panneaux. Pour les installations dans des environnements particulièrement poussiéreux ou pollués, un nettoyage plus fréquent peut être nécessaire. Une attention particulière doit être portée à la sécurité lors du nettoyage, en particulier pour les systèmes installés sur les toits ou dans des endroits difficiles d'accès. [64]

### V.3 Vérification des Onduleurs :

Cette vérification implique détecter les dommages physiques, la surchauffe ou la corrosion, ainsi qu'une vérification des connexions et du câblage. Des contrôles des paramètres électriques, tels que les tensions, les courants et la fréquence de sortie, assurent le bon fonctionnement de l'onduleur. L'analyse des performances, y compris le rendement de conversion et les données historiques, permet de détecter toute dégradation. Des tests fonctionnels vérifient les fonctions de démarrage, d'arrêt et les différents modes de fonctionnement de l'onduleur. [65]

Les raisons qui peuvent causer une panne de votre onduleur sont variées. Il se peut qu'il y ait un souci avec la connexion électrique, une surtension ou tout simplement une dégradation due à l'âge de votre installation photovoltaïque. Des événements météorologiques tels que la grêle, les vents forts ou les orages peuvent également affecter la production et causer une panne.

La surveillance à distance, via des systèmes de monitoring et des logiciels de diagnostic, permet de suivre les performances en temps réel et de recevoir des alertes en cas de dysfonctionnement. Intégrée dans le plan de maintenance préventive, cette technique inclut des vérifications régulières, une documentation détaillée et la formation du personnel, garantissant ainsi la fiabilité et l'efficacité du système photovoltaïque.



Figure (III.10) : Entretien d'un onduleur photovoltaïque.

#### V.4 Batteries :

Seuls très peu de détails doivent être respectés pour la maintenance préventive des batteries :

- Remplissez d'eau, à la fin de la charge.
- Maintenez la batterie propre et sec.
- Rechargez la batterie immédiatement après la décharge.
- Ne pas décharger une batterie exhaustive (plus de 80%).
- Ne pas surcharger la batterie (charge maximale facteur 1.2).
- Température de la batterie ne doit pas dépasser 55 C.

#### V.5 Tests électriques :

Ces tests garantissant la fiabilité et l'efficacité du système. Le test d'isolation vérifie que les câbles et les composants ne présentent pas de fuites de courant, ce qui prévient les courts-circuits et les risques d'électrocution. Le test de continuité s'assure que les circuits sont complets et sans coupures, permettant un flux de courant ininterrompu. Le test de polarité confirme que les connexions sont correctes, évitant les dommages potentiels aux composants. La mesure de la tension et du courant vérifie que les modules et les onduleurs fonctionnent dans les plages spécifiées, détectant ainsi les défaillances potentielles. Le test de fonctionnement de l'onduleur s'assure que le courant continu est correctement converti en courant alternatif, même en cas de fluctuations ou de pannes simulées. Enfin, la thermographie infrarouge détecte les points chauds invisibles à l'œil nu, révélant les connexions lâches et les surcharges.[66] Elles consistent à :

- Manœuvrer les protections AC et contrôler le découplage de l'onduleur.
- Manœuvrer les protections DC.
- Vérifier la continuité des liaisons équipotentielles.
- Mesurer des tensions de branche DC.
- Tester les dispositifs d'arrêt d'urgence.
- Vérifier l'état de la signalétique sur les équipements électriques.

- Relever les index de comptage.
- Vérifier le fonctionnement des panneaux didactiques (données en adéquation avec la Production).



Figure (III.11) : inspection de l'armoire électrique.

## VI. Le logiciel GMAO Photovoltaïque :

Dans le secteur dynamique de l'énergie solaire, la gestion optimale de la maintenance des installations est cruciale pour garantir leur performance et leur durabilité. Un logiciel de GMAO (Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur) dédié au photovoltaïque, se distingue en offrant une solution complète et innovante pour la maintenance des panneaux solaires.

La GMAO s'agit d'un système de gestion de maintenance assistée par ordinateur. Comme son nom l'indique, ce programme nous permet d'automatiser et de centraliser les informations liées à nos actifs et ainsi nous aider à réaliser de la maintenance préventive, régulière, et d'autres tâches quotidiennes. Grâce à ce service, nous évitons stress ou moments de panique lors de la survenue de problèmes qui n'auraient pas été anticipés. La GMAO est un atout majeur qui vous permettra de faire des économies sur le long terme. Une bonne maintenance permet une durabilité des actifs et évite un rachat coûteux de matériel. [63]

La gestion de la maintenance assistée par ordinateur (GMAO) revêt une importance capitale dans le secteur des panneaux solaires, offrant des avantages concrets qui améliorent à la fois la performance et la durabilité de ces installations.

- **Traçabilité améliorée :** Imaginez que on n'a pas un fabricant de panneaux solaires. Grâce à la GMAO, nous pouvons suivre chaque composant, depuis sa fabrication jusqu'à sa mise au rebut. Cela signifie que nous savons exactement d'où proviennent

les matériaux de nos panneaux et comment ils ont été utilisés. Lorsqu'un panneau atteint la fin de sa vie utile, la GMAO vous permet de savoir quels composants peuvent être recyclés, contribuant ainsi à réduire notre empreinte environnementale.

- **Maintenance optimisée** : En tant qu'exploitant d'installations solaires, nous souhaitons éviter les interruptions coûteuses de la production d'énergie. La GMAO nous permet de surveiller en temps réel chaque composant de panneaux solaires. Par exemple, si un onduleur montre des signes de dysfonctionnement, la GMAO peut déclencher automatiquement une intervention de maintenance préventive pour éviter une panne complète, assurant ainsi un fonctionnement continu de vos installations.
- **Gestion efficace des stocks** : Il est important d'avoir les pièces de rechange nécessaires en cas de problème. La GMAO Nous aide à gérer nos stocks de manière efficace. Par exemple, elle peut nous alerter lorsque le niveau de stock d'un composant critique devient bas, nous permettons ainsi de le réapprovisionner à temps pour éviter tout arrêt non planifié de vos opérations.
- **Optimisation des processus** : Grâce aux données fournies par la GMAO, on peut analyser les performances de nos équipements sur une période donnée. Par exemple, si on remarque que certains panneaux solaires ont une tendance à se dégrader plus rapidement que d'autres, on peut ajuster nos processus de maintenance pour prolonger leur durée de vie et maximiser leur efficacité.

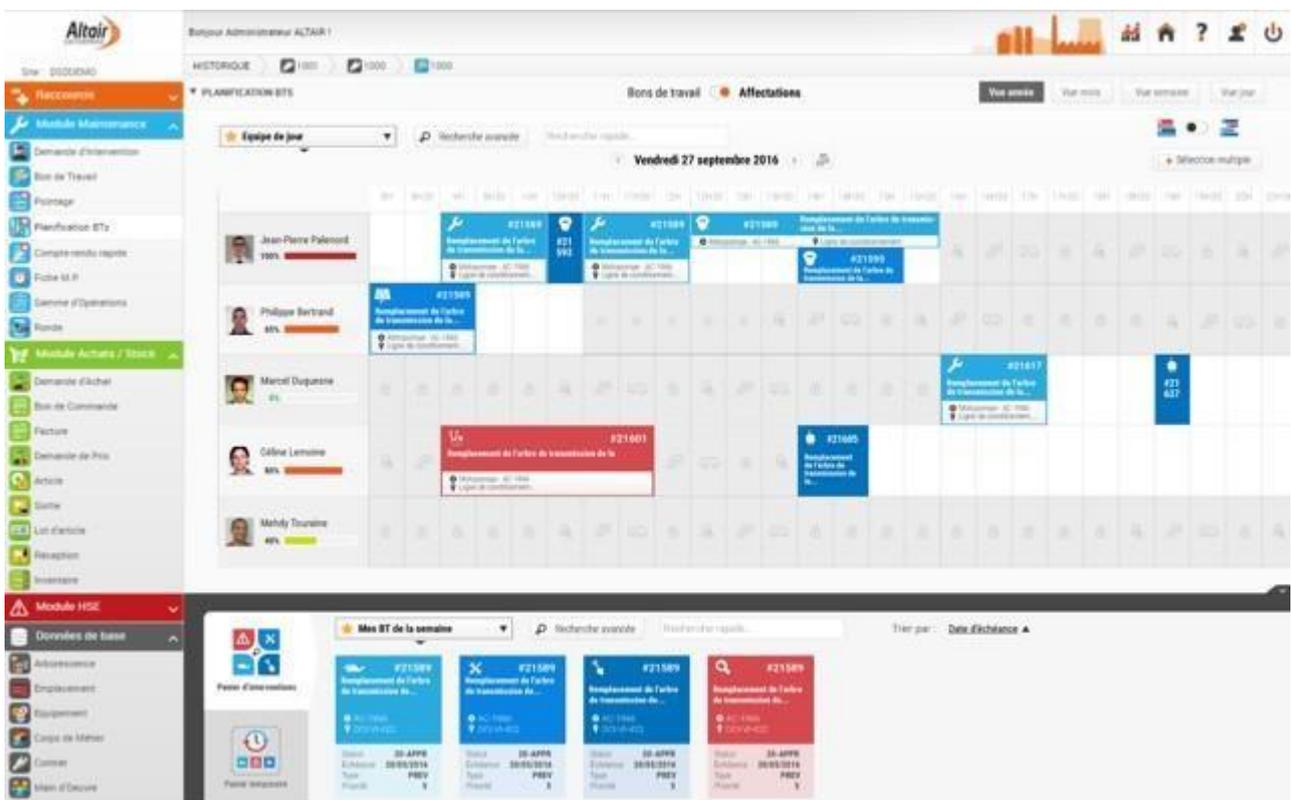


Figure (III.12) : interface GMAO photovoltaïque.

Cette interface de GMAO (Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur) pour installations photovoltaïques permet de gérer efficacement la planification, le suivi et l'analyse des interventions de maintenance. À gauche, un menu de navigation offre des modules pour la demande d'intervention, l'achat, la planification et la gestion des stocks. La partie centrale affiche le planning des techniciens pour une journée spécifique, avec des tâches codées par couleur selon leur statut (programmées, urgentes). En bas, une vue d'ensemble montre les tâches de la semaine, également codées par couleur. En haut, des outils et filtres permettent de naviguer entre les dates, rechercher des interventions et accéder à des graphiques de performance. Les détails des interventions, incluant la description, la priorité, le technicien assigné et le statut, sont affichés lorsqu'une tâche est sélectionnée. Des boutons de contrôle en haut à droite permettent d'ajouter des interventions, accéder aux paramètres, obtenir de l'aide et se déconnecter. Cette interface optimise la gestion de la maintenance des systèmes photovoltaïques, en minimisant les temps d'arrêt et en améliorant l'efficacité opérationnelle.

### **VI.1 Utilisation de GMAO pour réduire consommation d'énergie :**

La GMAO est un outil incontournable pour atteindre ses objectifs en matière de consommation d'énergie. Elle permet de réduire la consommation d'énergie de 5 façons différentes :

#### **VI.1.1 Mettre en place une stratégie de maintenance préventive**

La mise en œuvre de plans de maintenance préventive permet de maintenir les équipements et machines dans les meilleures conditions de fonctionnement, ce qui limite leur consommation d'énergie et les coûts associés. En utilisant une GMAO performante et ergonomique, les équipes de maintenance peuvent plus facilement élaborer une stratégie de maintenance préventive en déterminant les meilleures méthodes de maintenance. La possibilité d'automatiser la programmation, les ordres de travail et les notifications sont, par exemple, très utiles.

#### **VI.1.2 Créer des ordres de travail numériques et automatisés :**

L'utilisation d'une bonne GMAO permet d'automatiser les ordres de travail pour rappeler aux techniciens de maintenance les tâches à effectuer, par exemple pour mettre un équipement en mode économie d'énergie ou régler au plus près un système de climatisation, ce qui contribue à réduire la facture énergétique. L'utilisation de checklists, afin de garantir une réalisation exhaustive des procédures de maintenance, est également utile en ce sens.

#### **VI.1.3 Améliorer la gestion des stocks de pièces détachées :**

Une gestion des stocks optimisée permet d'éviter de gaspiller de l'énergie et de réduire les coûts. Pour ce faire, il est nécessaire de recueillir et d'analyser efficacement les données de maintenance, pour permettre aux équipes de maintenance de maîtriser au mieux les besoins en pièces détachées, leur permettant ainsi de toujours disposer des pièces nécessaires au bon

entretien des machines tout en évitant le surplus de stock, coûteux en énergie.

#### **VI.1.4 Utiliser la fonction analytique pour rendre les plans de maintenance plus efficaces :**

Grâce aux fonctionnalités avancées des nouvelles GMAO, il est possible de réaliser des analyses poussées des tâches de maintenance afin d'identifier celles qui consomment le plus d'énergie. Celles-ci peuvent alors être programmées aux heures creuses, afin de réaliser des économies sur les coûts en énergie.

#### **VI.1.5 Collecter des données précises et utiles :**

En recueillant des données précises et pertinentes sur le fonctionnement des machines et équipements, les responsables de maintenance peuvent identifier les tendances problématiques sur certains actifs, notamment en termes de consommation d'énergie, et les corriger avant qu'elles ne s'aggravent. La solution la plus avancée pour collecter la meilleure donnée possible est d'installer des capteurs IoT sur les machines afin de mesurer, par exemple, leurs vibrations ou leur consommation d'énergie.

Assimilation de la GMAO dans la gestion des panneaux solaires représente une approche proactive et complète. Elle vise à garantir leur bon fonctionnement et leur durabilité sur le long terme. Cette démarche contribue activement à accélérer la transition vers une énergie plus propre et renouvelable, tout en renforçant la rentabilité et la responsabilité environnementale des entreprises du secteur solaire.

## VII. Intégration de la maintenance préventive dans le système de supervision :

Les installations photovoltaïques sont constamment soumises à des agents extérieurs et à des changements de température qui affectent à la fois les panneaux et les connexions électriques qui les composent. Pour toutes ces raisons, il est important d'avoir un bon entretien. La réalisation d'une maintenance préventive est obligatoire pour la durabilité et la qualité de l'entretien des installations photovoltaïques. Il s'agit avant tout de mettre en avant les problèmes potentiels. Cette maintenance nous permettra d'optimiser la production, de prolonger la durée de vie de l'installation, de minimiser les risques de pannes ou d'incidents et, surtout, de pouvoir contrôler la fiabilité et la sécurité de la production. Afin de réaliser une bonne opération, certaines tâches devront être effectuées.

Par contre, La surveillance est vitale et très efficace. Étant donné qu'elles sont liées à la production des installations photovoltaïques, les pannes peuvent être identifiées grâce à cet outil. Grâce à différents portails de surveillance en ligne, selon le type d'onduleur utilisé, les installations sont également surveillées pour vérifier les performances de l'installation en temps réel (puissance, énergie...) et permet de recevoir les alarmes qui peuvent se produire dans l'installation. De nombreux programmes de surveillance permettent même d'effectuer une certaine maintenance à distance. Cela permet de réduire les coûts et garantit à nos clients une réponse presque automatique.

Cette intégration est un levier puissant pour améliorer la gestion et l'efficacité des installations photovoltaïques. En combinant des technologies avancées de collecte et d'analyse de données avec des stratégies de maintenance préventive pour planifier et effectuer des interventions, il est possible de garantir un fonctionnement optimal, une durée de vie prolongée des équipements et une réduction significative des coûts opérationnel

### VII.1 Avantages de l'Intégration de la Maintenance Préventive :

- Détecter les risques de panne et intervenir rapidement.
- Optimiser la performance et la rentabilité de l'installation dans le temps.
- Garantir la longévité maximale des équipements.
- Assurer leur conformité électrique.
- Réduction des Coûts.

### **VIII. Conclusion :**

La maintenance photovoltaïque est la clé pour garantir une performance optimale d'une installation solaire. En suivant les étapes et les techniques mentionnées régulièrement, on maximise la production d'énergie, prolonger la durée de vie du système et réduire les coûts de maintenance.

## **Conclusion générale :**

L'énergie solaire photovoltaïque est devenue une solution importante dans le contexte de la transformation énergétique mondiale. Cet article souligne l'importance de la supervision et de la maintenance proactive des installations photovoltaïques pour garantir leur performance et leur durabilité optimales.

Le premier chapitre détaille les éléments d'un système photovoltaïque, expliquant le fonctionnement des cellules photovoltaïques, leur composition et les différents types d'installation. Nous mettons en évidence les avantages et les inconvénients de chaque type de cellule photovoltaïque, ainsi que les composants clés d'un système photovoltaïque tels que les générateurs, les onduleurs et les batteries. Comprendre ces éléments est essentiel pour optimiser la conception et l'installation de systèmes photovoltaïques afin de maximiser l'efficacité énergétique.

Dans le deuxième chapitre, nous avons exploré en profondeur les systèmes de supervision destinée à la maintenance préventive des installations photovoltaïques. Nous analysons les technologies et les stratégies de surveillance, en identifiant l'importance des capteurs, des contrôleurs et des logiciels de surveillance. Ces systèmes permettent une maintenance réglementaire, contribuant à prévenir les pannes et à améliorer la sécurité et l'efficacité énergétique des installations. En identifiant les meilleures pratiques et les approches innovantes, ce chapitre montre comment la réglementation technique peut contribuer à la durabilité des installations photovoltaïques.

Le chapitre 3 traite les techniques de maintenance, en se concentrant sur les objectifs de la maintenance préventive et son intégration avec les systèmes de surveillance. Nous discutons de différentes stratégies de maintenance et de leur planification, en montrant l'importance d'anticiper les problèmes pour éviter les interruptions de service et prolonger la durée de vie de notre installation. L'intégration de la maintenance préventive dans les systèmes de surveillance optimise non seulement les performances, mais réduit également les coûts d'exploitation à long terme.

De notre point de vue, l'intégration des systèmes de supervision et de maintenance préventive dans les installations photovoltaïques représente un défi technique en même temps une opportunité stratégique. Les bénéfices économiques et environnementaux sont indéniables, mais ils nécessitent une prise de conscience et un engagement fort de la part des décideurs et des investisseurs. En adoptant une approche proactive, nous pouvons non seulement améliorer les performances des installations, mais aussi contribuer à la transition énergétique vers un avenir plus durable et résilient. Ce mémoire espère apporter une contribution significative à la recherche et au développement des systèmes de supervision des cellules photovoltaïques, et inspirer de nouvelles innovations dans ce domaine vital pour l'avenir de notre planète.

Notre conviction est que l'avenir de l'énergie solaire repose sur notre capacité à intégrer ces technologies de supervision et de maintenance de manière systématique et cohérente. Nous croyons fermement que l'innovation technologique, combinée à une gestion proactive et à

une vision à long terme, est la clé pour maximiser le potentiel de l'énergie photovoltaïque et garantir un approvisionnement énergétique durable pour les générations futures.

## Références bibliographiques :

- [1] Larbi, M. (2018). Etude d'un système photovoltaïque.
- [2] <https://www.etudier.com/dissertations/l'%C3%89nergie-Solaire/523301.html>
- [3] <https://fr.scribd.com/document/468552104/chap1>
- [4] <https://www.planeteenergies.com/fr/media/article/cellule-photovoltaique-comment-ca-marche>
- [5] Mémoire de Fin d'Etude de MASTER : Dimensionnement d'un système
- [6] Photovoltaïque autonome, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 2020/2021
- [7] <https://www.ef4.be/fr/pv/composants-dun-systeme/effet-photovoltaque.html>
- [8] <https://123dok.net/article/syst%C3%A8mephotovolta%C3%AFqued%C3%A9fauts-d%C3%A9tection-localisation-d%C3%A9fauts-syst%C3%A8me-pv.zpn16wd>
- [9] Mémoire de Fin d'Etude de MASTER : Dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 2020/2021
- [10] Mémoire de Fin d'Etude de MASTER : Dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 2020/2021
- [11] <https://biblus.accasoftware.com/fr/les-differents-types-de-systemes-photovoltaiques-caracteristiques-et-avantages/>
- [12] [https://www.linkedin.com/posts/ismail-nasri-661006192\\_renewableenergy-solarpanels-cleanenergy-activity-7071058343808626688-hYhE?trk=public\\_profile\\_share\\_view](https://www.linkedin.com/posts/ismail-nasri-661006192_renewableenergy-solarpanels-cleanenergy-activity-7071058343808626688-hYhE?trk=public_profile_share_view)

- [13] <https://www.jade-technologie.com/coefficient-de-temperature-panneau-photovoltaique/>
- [14] <https://www.solaranywhere.com/fr/2022/estimate-pv-soiling-losses-with-solaranywhere/>
- [15] Photovoltaic System Energy Consumption Calculation." Solar Energy International, 2023
- [16] Understanding Your Electric Bill." Energy.gov, 2022.
- [17] Estimating Household Electricity Consumption." Energy Saving Trust,
- [18] Sizing Solar Panels: Peak Power and Irradiation." Solar Power World, 2023.
- [19] [Dimensionnement des batteries, régulateurs et câbles pour les systèmes photovoltaïques.](#)
- [20] [Dimensionnement des onduleurs pour systèmes photovoltaïques.](#)
- [21] <https://www.123elec.com/tout-savoir-sur-monitoring-photovoltaique>
- [22] <https://www.sevensensor.com/fr/etude-comparative-des-pyranometres-et-des-capteurs-dirradiance-solaire-a-cellule-de-reference>
- [23] <https://www.campbellsci.fr/cs241>
- [24] [https://docs.circutor.com/docs/CT\\_SolPhotoSCADA\\_FR.pdf](https://docs.circutor.com/docs/CT_SolPhotoSCADA_FR.pdf)
- [25] <https://azaneo.com/comment-tester-un-panneau-solaire/>
- [26] Monitoring Technologies for Solar PV Systems by Mekhilef et al. (2021)
- [27] Impact of Various Parameters on PV Performance by Shruti et al. (2015)
- [28] Design and Control of PV Systems by Bahgat et al. (2016)
- [29] [Mise en place d'un système général de supervision et de contrôle. Récupéré de \[http://documentation.2ieedu.org/cdi2ie/opac\\\_css/doc\\\_num.php?explnum\\\_id=1220\]\(http://documentation.2ieedu.org/cdi2ie/opac\_css/doc\_num.php?explnum\_id=1220\)](#)
- [30] Steven Kwok(2023). Contrôleurs de charge solaire : différents types et comment les choisir Récupéré de <https://solarbuy.com/fr/solar-101/solar-charge-controllers/>

- [31] Aurélie Hubert (2023). TOUT SAVOIR SUR LE RÉGULATEUR SOLAIRE
- [32] <https://www.solaris-store.com/content/44-principe-de-fonctionnement-d-un-regulateur-solaire>
- [33] <https://www.solarwinds.com/>
- [34] <https://www.pvsyst.com/>
- [35] <https://www.sunnyportal.com/Documents/SPortalWebcon-BA-fr-13.pdf>
- [36] <https://sungoldsolar.com/fr/solar-cables-and-solar-wires/>
- [37] [https://fr.electricalinstallation.org/Supervision\\_des\\_installations\\_photovoltaiques](https://fr.electricalinstallation.org/Supervision_des_installations_photovoltaiques)
- [38] <https://iresen.org/pv-scada/>
- [39] D.Telecom.SCADA Tutorial: A fast Introduction to SCADA Fundamentals and Implementation. 8 Août 2011.
- [40] Michel, D.SNCC SCADA MES Vecteurs d'intégration. 6 juin 2013
- [41] Adil Benmekki 7 juillet 2021. Introduction à l' IoT : comment fonctionne l'Internet des objets ?
- [42] <https://www.ovhcloud.com/fr/learn/what-is-iot/>
- [43] <https://www.matellio.com/blog/iot-based-solar-power-monitoring-system-development-with-benefits/>
- [44] <https://takoussane.com/lintelligence-artificielle-dans-l-energie-solaire/>
- [45] <https://www.cgi.com/fr/article/energies-services-publics/utiliser-intelligence-artificielle-inspecter-centrales-photovoltaiques>
- [46] C Ibrahim Omar - 2023 - theses.fr. Modélisation, optimisation et gestion d'énergie d'une centrale hybride à énergie renouvelable.

- [47] M El Hajj Khalil - 2022 - depositum.uqat.ca. Conception et développement d'un analyseur inertiel pour la détection de défaillance des rails d'un élévateur minier..  
uqat.ca
- [48] A BELHEZIEL, M MOUFFOK - 2023 - dspace.univ-tiaret.dz. Diagnostic de défaut d'un four électrique par la méthode de l'arbre de défaillance. univ-tiaret.dz
- [49] R Faye - 2024 - rivieresdusud.uasz.sn. Conception et Implémentation d'un Système Automatique de Détection, d'Analyse et d'Alerte en Temps Réel d'Incendie en Ville.  
uasz.sn
- [50] S Maréna - 2022 - rivieresdusud.uasz.sn. Sécurité et Supervision de réseaux.  
uasz.sn
- [51] L SIMON, P RAUFFET, C GUERIN, J LASSALLE - researchgate.net. ÉPIQUE 2021 Exploiter la méthode CWA pour le design écologique d'une interface de maintenance 4.0. researchgate.net
- [52] Cours Master.Maintenance.pdf.
- [53] <https://roots-industrie.com/le-role-de-la-maintenance-dans-le-secteur-industriel/>
- [54] <https://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2018/02/memoire-finale-MAHFOUD-BRAHIM.pdf>
- [55] Zhu, G., Gelders, L., & Pintelon, L. (2002). Object/objective-oriented maintenance management. Journal of quality in maintenance engineering.
- [56] <https://www.tribofilm.fr/les-differents-types-de-maintenance/>
- [57] <https://www.appvizer.fr/magazine/operations/gestion-maintenance/les-types-de-maintenance>

- [58] <https://www.idex.fr/le-blog/la-maintenance-photovoltaique-en-entreprise-assurer-la-rentabilite-de-votre-investissement>
- [59] <https://www.solargie.com/maintenance-et-supervision>
- [60] <https://www.photovoltaique.info/fr/exploiter-une-installation/exploitation-technique/entretien-et-maintenance/>
- [61] <https://photovoltaique-energie.fr/monitoring.html>
- [62] <http://fr.solarpedia.net/>
- [63] <https://www.colibri.solar/actualites/lentretien-dune-exploitation-photovoltaique/>
- [64] Institut de Veille Sanitaire - Note de synthèse relative à la problématique des vents de sable en provenance des déserts
- [65] <https://actualites.belgique-photovoltaique.com/maintenance-onduleur/>
- [66] Fragkiadakis, Ioannis. "Photovoltaic systems". Zeta Publications, 2007.
- [63] <https://www.technic-soft.fr/logiciels-metiers/gmao-photovoltaique-sav/>