

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Université Saâd Dahlab, Blida-1
Faculté de Technologie
Département des Énergies Renouvelables

Par BOULABIZA ILYES

AMRANI CHAREF EDDINE

Mémoire de Fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme Master en Energies Renouvelables option
Conversion Photovoltaïque

Thème :

ÉTUDE ET DIMENSIONNEMENT D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE CONNECTEE AU RESEAU (ON GRID)

Soutenu devant le jury composé de :

Monsieur DOMAZ.T	USDB	Président
Monsieur BOUZAKI. MM	USDB	Encadreur
Monsieur BENHMED.A	USDB	Examineur

Octobre 2020

Résumé en arabe

الهدف من هذه المذكرة هو دراسة، تحجيم، نمذجة ومحاكاة النظام الكهروضوئي المتصل بالشبكة. من أجل الحصول على فهم أفضل للمكونات الكهربائية لهذا النظام الذي يدعى أيضاً نظام (ON-GRID). لهذا الغرض، كرست دراستنا لتشغيل وأداء عاكس الشبكة الذي تم تكييفه بواسطة تحكم رقمي يضمن السعي للحصول على الطاقة القصوى التي يوفرها المولد الكهروضوئي (MPPT). لقد أنشأنا نموذجاً رياضياً يمكننا من حساب العناصر الرئيسية الأربعة لترتيب المنظومة مع إدخال القياسات الجوية للموقع وكذلك الاستهلاك اليومي لتغطية جميع احتياجات الطاقة ودرسنا التكلفة التقديرية لإبتدائية ذات سعة 6 كيلو وات. تظهر نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها تحت Matlab / Simulink أداء العاكس ودور التحكم MPPT في استخراج الطاقة القصوى للمولد الكهروضوئي.

الكلمات الرئيسية: التحجيم، النمذجة والمحاكاة، النظام الكهروضوئي المتصل بالشبكة (ON-GRID)، عاكس الشبكة، التحكم MPPT

Résumé

L'objectif de ce travail est l'étude, le dimensionnement, la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau. Afin d'avoir une meilleure compréhension des composants électrique de ce système appelé aussi un système on-grid. Pour cela, notre étude a été consacrée sur le fonctionnement et la performance de l'onduleur réseau qui est adapté par une commande numérique assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV (MPPT). Nous avons établi un modèle mathématique qui permet de dimensionner les éléments principaux de l'installation en introduisant les paramètres métrologiques du site ainsi que la consommation journalière pour couvrir tous les besoins énergétiques, et nous avons étudié le devis d'une école primaire de 6 KW.

Les résultats de simulation obtenus sous Matlab/Simulink montrent la performance du contrôle de l'onduleur et le rôle de la commande MPPT dans l'extraction de la puissance maximale du générateur photovoltaïque.

Mots clés : Dimensionnement, Modélisation et Simulation, Système photovoltaïque connecté au réseau (ON-GRID), Onduleur réseau, Commande MPPT

Abstract

The objective of this work is the study, dimensioning, modeling and simulation of a grid-connected photovoltaic system. In order to have a better understanding of the electrical components of this system also called an on-grid system.

For this purpose, our study has been devoted to the operation and performance of the grid inverter, which is adapted by a numerical control ensuring the tracking of the maximum power supplied by the PV generator (MPPT). We have established a mathematical model that allows us to dimension the main elements of the installation by introducing the metrological parameters of the site as well as the daily consumption to cover all the energy needs, and we have studied the quotation of a 6 KW elementary school.

The simulation results obtained under MATLAB/Simulink show the performance of the inverter control and the role of the MPPT control in extracting the maximum power from the photovoltaic generator.

Keywords: Dimensioning, Modeling and Simulation, Grid-connected Photovoltaic System (ON-GRID), Grid Inverter, MPPT Control

Dédicaces

*J'ai toujours voulu offrir quelque chose à mes parents en guise de reconnaissance pour avoir faits de moi l'homme que je suis aujourd'hui, Et voilà, l'occasion est venue ;
Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à ma mère Zakia*

À mon père Mounir, école de mon enfance, qui a été mon ombre durant toutes les années des études, et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger.

Que dieu les gardes et les protège.

À qui je dois de l'amour et la reconnaissance ;

À ma très chère sœur Kaouther.

À mes très chers frères Ibrahim, Taki.

À toute ma grande famille et à tous ceux qui me sont chers,

À mes amis Dyhia, Ayoub, Ibrahim, Brahem,

À mon binôme AMRANI Charaf Eddine

Et à tous mes amis et mes proches.

BOULABIZA ILYES

Je dédie ce modeste travail à :
A mes parents aucun hommage ne pourrait être à
la hauteur de l'amour Dont ils ne cessent de me
combler. Que dieu leur procure bonne santé et
longue vie.

A celui que j'aime beaucoup et qui m'a soutenue
tout au long de ce projet : IBRAHIM ALEM, SAMI
BELDJILLALI, SAHRAOUI ADNANE, OURABAH
AHMED.

A toute ma famille, et mes amis.

A mon binôme BOULABIZA ILYES et sa famille.

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin
pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.

AMRANI CHAREF EDDINE

Remerciements

Avant tout, nous remercions Dieu le tout puissant, qui nous a illuminés et qui nous a armés de force et de sagesse, ainsi que de bonne volonté pour achever notre modeste travail.

Ces petites lignes ne vont jamais exprimer à sa juste valeur nos remerciements,

Nous tenons tout d'abord à remercier notre encadreur Dr MM.BOUZAKI pour son assistance durant la période de la réalisation de ce travail.

Nous remercions tous les membres de jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

Nos remerciements vont aussi à tous ceux qui nous ont aidés à accomplir ce travail.

BOULABIZA. I et AMRANI. C

Nomenclature - Symboles-Acronymes

I_{cc} (I_{sc}) : Le courant de court-circuit (A)

V_{oc} : La tension de circuit ouvert (V)

N_s : Nombre de modules dans le panneau en série

N_{BP} : Nombre de modules dans le panneau en parallèle

P_{max} : La puissance maximale produite PV (W)

V_{max} : Tension qui correspond à la puissance maximale (V)

I_{max} : Courant qui correspond à la puissance maximale (A)

PV : Photovoltaïque

MPPT : Maximum Power Point Tracking

IGBT : Transistor Bipolaire à Grille Isolée (Insulated Gate Bipolar Transistor)

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsions

PWM : Pulse Width Modulation

P&O : Perturbation et Observation

DC : Courant Continu (Direct Current)

AC : Courant Alternatif (Alternatif Current)

T : Température

I_r : durée d'ensoleillement

STC : Conditions de Test Standard

NOCT : Température Nominale des Cellules

Sommaire

Dédicaces

Remerciements

Nomenclature - Symboles-Acronymes

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction Générale

Chapitre 1 : Introduction aux systèmes photovoltaïques

1.1. Introduction.....	1
1.2. L'effet photovoltaïque	1
1.3. La cellule photovoltaïque.....	2
1.3.1. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque.....	3
1.3.2. Influence de l'éclairement et la température sur les courbes $I = f(V)$	3
1.4. Les types des systèmes Photovoltaïques.....	5
1.4.1. Autonome / hors réseau	5
1.4.2. Couplée au réseau (Grid-tie).....	5
1.4.3. Couplée au réseau avec alimentation de secours (grid interactive).....	6
1.4.4. Repli sur le réseau.....	6
1.5. Conclusion	7

Chapitre 2 : Composition d'une installation

2.1. Introduction.....	8
2.2. Générateur photovoltaïque	8
2.3. Système de pose.....	9
2.3.1. Installation au sol.....	9
2.3.2. Intégration au bâti.....	10
2.3.3. Intégration sur le bâti.....	11
2.4. Onduleur réseau	12
2.4.1. Le principe de fonctionnement.....	13
2.4.2. La recherche du point de puissance maximal.....	14
2.4.3. La conversion DC/AC.....	16
2.4.4. Couplage découplage au réseau électrique	16
2.4.5. Les différents types d'onduleurs réseau.....	16
2.4.6. Choix et placement d'un onduleur.....	18
2.5. Système de protection électrique.....	19
2.5.1. Protection courant continu.....	19
2.5.2. Protection courant alternatif.....	20
2.5.3. La mise à la terre.....	22
2.6. Compteur électrique (smart meeter).....	22
2.6.1. Le compteur d'achat d'énergie.....	22

2.7. Câblage électrique.....	23
2.7.1. <i>Cable solaire</i>	23
2.7.2. <i>Conecteurs MC4</i>	24

Chapitre 3 : Dimensionnement d'une école ON-GRID

3.1. Introduction.....	25
3.2. Les étapes de dimensionnement.....	25
3.2.1. <i>Connaitre le site d'installation et ses caractéristiques</i>	25
3.3. Les calculs du système.....	27
3.4. Traitement d'un exemple.....	29
3.4.1. <i>Problématique</i>	29
3.4.2. <i>Le dimensionnement</i>	30
3.4.3. <i>Devis quantitatif & estimatif</i>	35
La durée du projet :.....	36
3.5. L'inspection et la remise du projet.....	36
3.5.1. <i>Les principaux appareils de mesure pour l'inspection</i>	36
3.5.2. <i>La remise du projet</i> :.....	38
3.6. Conclusion.....	38

Chapitre 4 : Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté aux réseaux

4.1. Introduction :.....	39
4.2. L'outil Matlab/Simulink.....	39
4.3. Système proposé.....	40
4.3.1. <i>Le champ PV</i> :.....	40
4.3.2. <i>Onduleur réseau</i>	41
4.3.3. <i>Réseau public et la charge</i> :.....	43
4.3.4. <i>Résultat de simulation du système</i> :.....	43
4.4. Conclusion :.....	44

Conclusion générale

Bibliographie et Webographie

Annexe A

Annexe B

Liste des figures

Figure 1- 1 : Représentation schématique d'une cellule solaire	2
Figure 1- 2 : Une cellule photovoltaïque.....	2
Figure 1- 3 : Caractéristique $I = f(V)$ d'une cellule photovoltaïque [I].....	3
Figure 1- 4 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$	4
Figure 1- 5 : L'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$	4
Figure 2-1 : Schéma de principe d'un système PV raccordé au réseau	9
Figure 2-2 : Système de pose au sol [II].....	9
Figure 2-3 : Installation intégrée au bâti [III].....	10
Figure 2-4 : Intégration sur le bâti.....	11
Figure 2-5 : Fixation toiture pour panneau solaire [III].....	12
Figure 2-6 : Caractéristique d'un onduleur réseau.....	13
Figure 2-7 : Un onduleur réseau.....	13
Figure 2-8 : Principe de fonctionnement d'un onduleur réseau.....	14
Figure 2-9 : Organigramme de l'algorithme MPPT de la perturbation & observation [7].....	15
Figure 2-10 : Micro-onduleur.....	17
Figure 2-11 : Onduleur central.....	18
Figure 2-12 : Principe de protection par coffre suivant UTE C15-712. [9].....	22
Figure 2-13 : Connecteur MC4 male et femelle.....	24
Figure 3-1 : Irradiation globale horizontale Algérie [V].....	25
Figure 3-2 : Le rayonnement solaire en ondes courtes quotidien moyen atteignant le sol en mètres carrés (ligne orange), avec bandes du 25e au 75e percentile et du 10e au 90e percentile.....	26
Figure 3-3 : La structure est en aluminium ou en alliage d'aluminium	29
Figure 3-4 : La température moyenne quotidienne maximale et minimale à Blida [VI].....	30
Figure 4-1 : Bibliothèque SIMULINK.....	40
Figure 4-2 : Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque connecté aux réseaux 6KW.....	40
Figure 4-3 : Champ PV.....	41
Figure 4-4 : Convertisseur DC-AC monophasé à pont complet.....	41
Figure 4-5 : Filtre LCL.....	41
Figure 4-6 : Contrôleur du convertisseur.....	42
Figure 4-7 : Paramètres du contrôleur	42
Figure 4-8 : Bloc du réseau public et la charge.....	43
Figure 4-9 : Résultat de la simulation du champ PV (Irradiation, V_{pv} , I_{pv}).....	43
Figure 4-10 : Résultat de la simulation du sorti de l'onduleur (V_{inv}).....	44

Liste des tableaux

Tableau 1 Tension de référence nomrale [10]	23
Tableau 2 Fiche technique connecteur MC4 [10].....	24
Tableau 3 Consommation des appareils.....	29
Tableau 4 puissance et énergie consommé par l'école	31
Tableau 5 Devis quantitatif & estimatif.....	35

Introduction Générale

À la différence des énergies fossiles, Les sources d'énergie photovoltaïque sont très propres et à ressource illimitée, ils jouent un rôle important dans la production d'électricité. Diverses sources renouvelables telles que l'énergie solaire, l'énergie éolienne et la géothermie sont exploitées pour la production d'électricité. L'énergie solaire est une bonne alternative à la production d'électricité en raison de sa disponibilité et de sa propreté, cette énergie est une combinaison des heures d'ensoleillement que nous recevons sur notre site et de la force de cette lumière. Cela varie en fonction de la période de l'année et de l'endroit où nous vivons. La combinaison d'heures et d'intensité de la lumière du soleil est appelée insolation solaire ou rayonnement solaire. Les systèmes photovoltaïques semblent bien s'imposer comme moyen de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Un tel système se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adaptent l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs, les principales applications du photovoltaïque se trouvent dans les systèmes connectés au réseau. Dans ce mémoire, on décrit les systèmes photovoltaïques existés et on a précisé l'analyse des systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique.

L'objectif de ce travail est de contribuer à une meilleure compréhension des composants électrique d'un système connectés au réseau (on-grid) et la performance de l'onduleur réseau adapté par une commande numérique (commande MPPT : perturbation et observation) assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque ainsi que le dimensionnement et le cout de toute une installation

Pour décrire cela, ce mémoire est présenté en quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre, on fait une généralité sur les systèmes photovoltaïques. On présente le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres. Ensuite on présente les types des systèmes existés.
- Dans le deuxième chapitre, on étudie les composants électriques d'un système photovoltaïque connectés au réseau et le fonctionnement de l'onduleur solaire adapté par une commande basée sur l'algorithme perturbation et observation, ainsi la performance du système.
- Dans le troisième chapitre, on étudie les étapes de dimensionnement de n'importe quel système photovoltaïque (on-grid). Ensuite on fait l'application à un projet d'une école primaire dans la ville de Blida ainsi que le cout, et on étudie les principaux appareils de mesure pour l'inspection avant la remise du projet.
- Dans chapitre quatre, on étudie une modélisation et une simulation par MATLAB SIMULINK de système PV connectés au réseau réalisé.

À la fin, on termine ce mémoire par une conclusion générale.

Chapitre 1 : Introduction aux systèmes photovoltaïques

1.1. Introduction

Les systèmes photovoltaïques sont conçus autour de la cellule photovoltaïque. Comme une cellule photovoltaïque typique produit moins de 3 watts à environ 0,5 volt dc, les cellules doivent être connectées en série et en parallèle pour produire suffisamment d'énergie pour les applications de forte puissance. Comme les panneaux photovoltaïques ne produisent de l'énergie que lorsqu'ils sont éclairés, les systèmes photovoltaïques utilisent souvent un mécanisme de stockage de l'énergie afin que l'énergie électrique captée puisse être mise à disposition ultérieurement. Le plus souvent, le mécanisme de stockage est constitué de batteries rechargeables, mais il est également possible d'utiliser des mécanismes de stockage plus exotiques. Si le système PV ne produit pas l'énergie adéquate, alors le système aura besoin d'un contrôleur pour faire fonctionner le système de secours. Il est également possible que le système photovoltaïque soit interconnecté au réseau électrique. De tels systèmes peuvent livrer l'énergie PV excédentaire au réseau ou utiliser le réseau comme système de secours en cas de production PV insuffisante. [1]

Pour comprendre le fonctionnement de cette énergie et en optimiser son utilisation, nous effectuons dans ce chapitre un bref rappel sur le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque et ses performances ainsi que les différentes configurations des systèmes Photovoltaïques existé.

1.2. L'effet photovoltaïque

Le principe de fonctionnement d'une installation solaire photovoltaïque est relativement simple : il s'agit de convertir le rayonnement du soleil en électricité.

Cette opération repose sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque. Ce mécanisme a été découvert en 1839 par Antoine Becquerel mais il n'a été expliqué que près d'un siècle plus tard par Albert Einstein, ce qui lui a valu le Prix Nobel de physique en 1921. De façon très schématique, l'effet photovoltaïque permet à certains matériaux d'émettre des électrons lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Une cellule photovoltaïque est constituée d'un de ces matériaux, généralement du silicium, et conçue de telle façon que les électrons émis soient récupérés pour former un courant électrique. Les cellules sont assemblées pour créer un courant suffisamment élevé pour être exploité, cet assemblage de cellules est appelé module photovoltaïque ou, plus souvent, panneau solaire. [2]

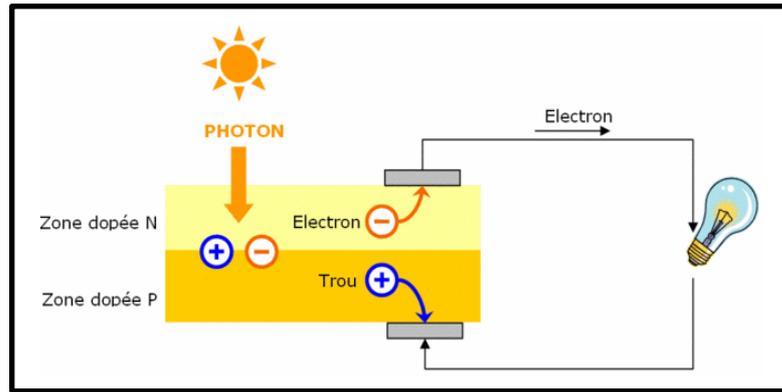


Figure 1- 1 : Représentation schématique d'une cellule solaire

1.3. La cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque, également dénommée cellule solaire, est un composant électronique qui, exposé à la lumière (photons), produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque. La puissance obtenue est proportionnelle à la puissance lumineuse incidente et dépend du rendement de la cellule. Celle-ci délivre une tension continue et un courant la traverse dès qu'elle est connectée à un circuit électrique (en général un onduleur, parfois une simple batterie).

Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium (Si) et plus rarement d'autres semi-conducteurs : séléniure de cuivre et séléniure d'indium ($\text{CuIn}(\text{Se})_2$ ou $\text{CuInGa}(\text{Se})_2$), tellure de cadmium (CdTe), etc. Elles se présentent généralement sous forme de fines plaques d'une dizaine de centimètres de côté.

Les cellules sont souvent réunies dans des modules solaires photovoltaïques ou panneaux solaires, en fonction de la puissance recherchée. [2]

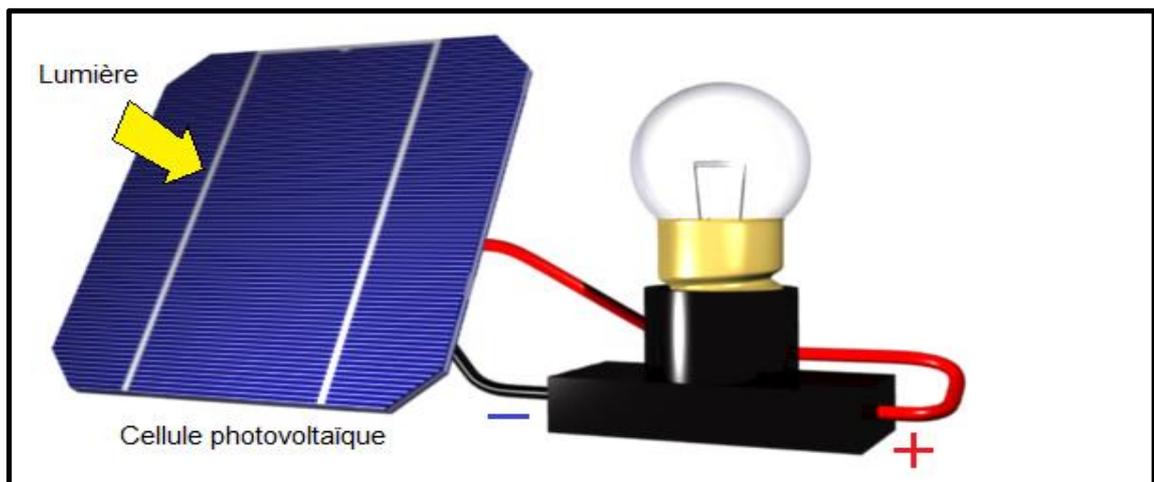


Figure 1- 2 : Une cellule photovoltaïque

1.3.1. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

Sous un éclairage donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension (I-V) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule. Trois grandeurs physiques définissent cette courbe :

- Tension à vide V_{oc} : Cette valeur représenterait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.
- Courant court-circuit $I_{cc}(I_{sc})$: Cette valeur représenterait le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.
- Point de puissance maximal MPP : (en anglais : maximum power point) obtenu pour une tension et un courant optimal : V_{opt} , I_{opt} (parfois appelés aussi V_{mp} , I_{mp}) [1].

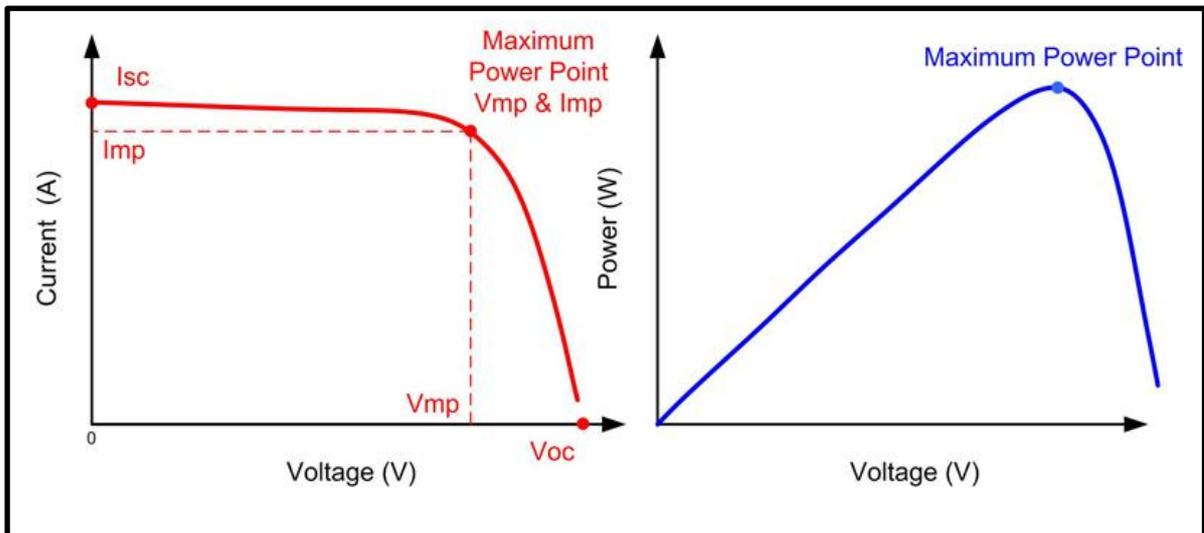


Figure 1- 3 : Caractéristique $I = f(V)$ d'une cellule photovoltaïque

1.3.2. Influence de l'éclairage et la température sur les courbes $I = f(V)$

Un module photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou en parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que : la puissance, le courant de court-circuit I_{cc} (I_{sc}) ou la tension en circuit ouvert V_{co} . Un générateur photovoltaïque est constitué d'un ou plusieurs modules PV en série et / ou en parallèle pour obtenir une puissance, un I_{cc} (I_{sc}) et un V_{co} désirés.

La figure (1-4) montre l'influence de l'éclairage sur la caractéristique $I = f(V)$. À une température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement. Car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairage alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique [3].

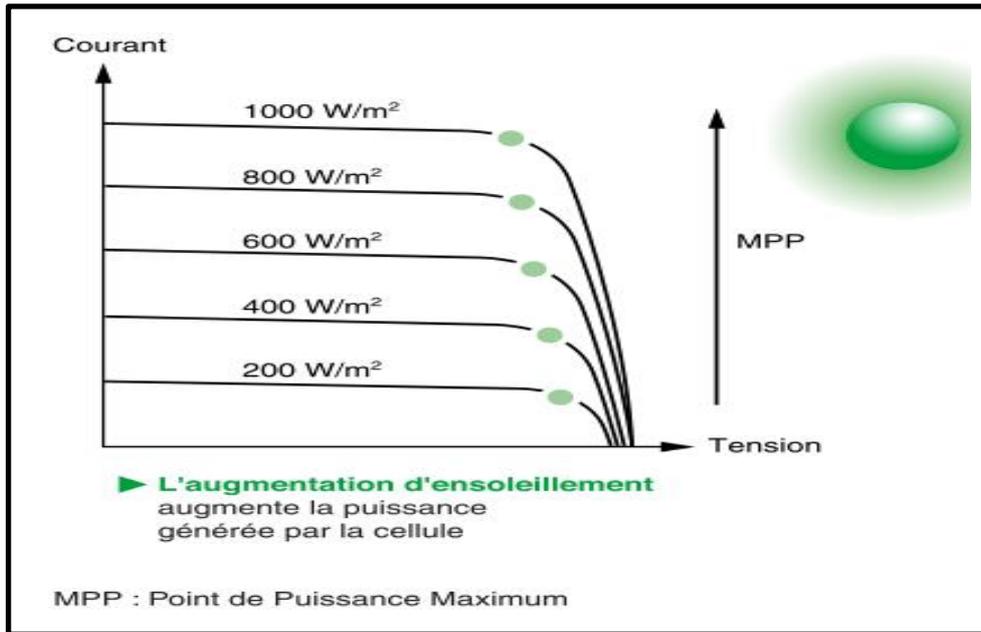


Figure 1- 4 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$

La figure (1-5) montre l'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$. Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique $I=f(V)$. Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influence négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution [3].

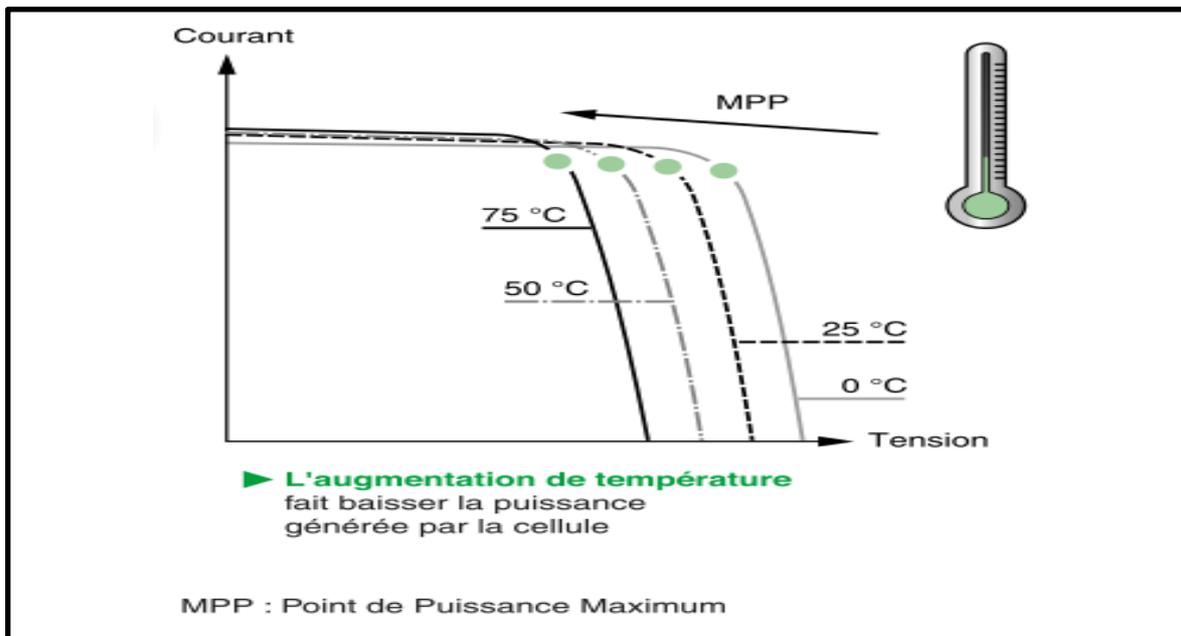


Figure 1- 5 : L'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$

1.4. Les types des systèmes Photovoltaïques

Il existe quatre configurations différentes parmi lesquelles nous pouvons choisir lors de la création d'une installation d'électricité solaire PV. Il s'agit des configurations suivantes : autonome (parfois appelée "hors réseau"), couplée au réseau (On grid), couplée au réseau avec alimentation de secours (également appelée "réseau interactif") et de repli du réseau [4]

1.4.1. Autonome / hors réseau

Dans le monde entier, les installations solaires photovoltaïques autonomes sont le type d'installation solaire le plus populaire. C'est pour cela que le solaire photovoltaïque a été créé à l'origine : pour fournir de l'énergie à un endroit où il n'y a pas d'autre source facilement disponible. Il s'agisse d'alimenter une lampe de poche, une calculatrice de poche ou une maison complète hors réseau, les systèmes autonomes fonctionnent fondamentalement de la même manière : le panneau solaire produit de l'électricité, l'énergie est stockée dans une batterie et ensuite utilisée selon les besoins. En général, les systèmes autonomes sont des systèmes relativement petits, avec une production d'énergie de pointe inférieure à un kilowatt. Presque tout le monde peut bénéficier d'un système solaire autonome pour quelque chose, même si c'est quelque chose d'aussi banal que de fournir une lumière extérieure quelque part. Même si nous prévoyons de faire quelque chose de beaucoup plus grand et de plus important, il est souvent judicieux de commencer par un système autonome très petit et simple.

Cependant, les gens choisissent maintenant de se rendre dans des endroits plus éloignés et de vivre entièrement "hors réseau", en utilisant l'énergie solaire pour fournir de l'électricité où qu'ils se trouvent. L'énergie solaire est utilisée pour fournir tout le confort de la maison, tout en offrant aux vacanciers la liberté de séjourner où ils veulent.

1.4.2. Couplée au réseau (Grid-tie)

Gagne en popularité en Europe et aux États-Unis. Cela est dû à la disponibilité de subventions pour réduire les coûts d'installation et à la possibilité de gagner de l'argent en revendant l'électricité aux compagnies d'électricité par le biais d'un tarif de rachat. Les systèmes de tarifs de rachat varient dans le monde entier et ne sont pas disponibles partout. Lorsqu'ils existent, notre compagnie d'électricité locale achète de l'électricité à des producteurs solaires à un tarif convenu par kilo watt-heure. Dans certains pays, ce prix a été fixé à un taux gonflé par le gouvernement afin d'encourager les gens à installer le système solaire. Dans d'autres pays et régions, le prix est fixé par les compagnies d'électricité elles-mêmes.

Dans un système de raccordement au réseau, notre maison fonctionne à l'énergie solaire pendant la journée. Tout surplus d'énergie que nous produisons est ensuite injecté dans le réseau. Le soir et la nuit, lorsque notre système d'énergie solaire ne produit pas d'électricité, nous achetons ensuite notre électricité aux compagnies d'électricité de la manière habituelle. L'avantage des installations solaires photovoltaïques raccordées au réseau est qu'elles réduisent notre dépendance à l'égard des grandes compagnies d'électricité et veiller à ce qu'une plus grande partie de notre électricité soit produite de manière efficace sur le plan environnemental. L'un des inconvénients de la plupart des systèmes de raccordement au réseau est qu'en cas de coupure de courant, l'énergie de notre installation solaire est également coupée. Le raccordement au réseau peut fonctionner particulièrement bien dans les climats chauds et ensoleillés, où les pics de demande d'électricité du réseau coïncident souvent avec l'ensoleillement, grâce à la forte demande d'énergie des unités de climatisation. Le système fonctionne également bien lorsque les propriétaires utilisent eux-mêmes la majeure partie de l'électricité.

1.4.3. Couplée au réseau avec alimentation de secours (grid interactive)

Grid-tie with power backup - également connu sous le nom de système interactif, c'est une installation Couplée au réseau avec un banc de batteries. Comme dans le cas du raccordement au réseau, le concept consiste à utiliser l'énergie de notre panneau solaire lorsque le soleil brille et à vendre le surplus aux compagnies d'électricité. Contrairement à un système de connexion au réseau standard, une banque de batteries permet de faire face aux coupures de courant afin que nous puissions continuer à utiliser l'énergie de notre système.

En général, nous installons des "circuits protégés" dans notre bâtiment qui continueront à recevoir du courant pendant une panne de courant. Cela permet de garantir que l'énergie essentielle reste disponible pour les feux de circulation, les régulateurs de réfrigération et de chauffage, par exemple, tandis que l'énergie de secours n'est pas gaspillée pour des éléments essentiels tels que les télévisions et les radios. S'il existe un risque de perte de l'alimentation principale pendant plusieurs jours, il est également possible de concevoir un système permettant d'intégrer d'autres générateurs d'électricité dans un système interactif. Cela permettrait à un système interactif de réseau de fonctionner comme une alimentation électrique ininterrompue très efficace pendant de longues périodes. Le coût d'un système de raccordement au réseau avec alimentation de secours est plus élevé qu'un système de raccordement au réseau standard, en raison du coût supplémentaire des batteries et des contrôleurs de batterie. En règle générale, l'alimentation de secours ajoute de 12 à 20 % aux coûts supplémentaires par rapport à un système de raccordement au réseau standard. Comme pour les systèmes de raccordement au réseau normaux, il est possible de revendre le surplus d'énergie aux sociétés de services publics en certains pays, nous permettant de tirer un revenu de notre système d'énergie solaire.

1.4.4. Repli sur le réseau

Le repli sur le réseau est un système moins connu qui a beaucoup de sens pour les petits systèmes d'énergie solaire domestique. Avec un système de repli sur le réseau, le panneau solaire produit de l'électricité qui, à son tour, charge un banc de batteries. L'énergie est prélevée de la batterie et passent par un onduleur pour alimenter un ou plusieurs circuits à partir du panneau de distribution de la maison. Lorsque les batteries sont à plat, le système revient automatiquement au réseau électrique. Le panneau solaire recharge alors les batteries et le système repasse à l'énergie solaire. Avec un système de repli sur le réseau, nous ne revendons pas l'électricité aux compagnies d'électricité. Toute l'électricité que nous produisons, nous l'utilisons nous-même. Cela signifie que certaines des subventions disponibles pour les installations solaires dans certains pays peut ne pas être disponible pour vous. Cela signifie également que vous ne pouvez pas bénéficier de la revente de votre électricité aux compagnies d'électricité. C'est pourquoi le repli sur le réseau est plus judicieux dans les pays où il n'existe pas de tarif de rachat, comme en Inde, ou comme l'Australie qui offrent des incitations financières pour les systèmes raccordés au réseau ou hors réseau. Les systèmes de repli sur réseau offrent la plupart des avantages d'un système interactif de réseau, avec l'avantage supplémentaire que nous utilisons notre propre énergie lorsque nous en avons besoin, plutôt que lorsque le soleil brille. Nous réduisons ainsi notre dépendance à l'égard des approvisionnements en électricité externes pendant les périodes de pointe, ce qui garantit que notre système présente un avantage global pour l'environnement.

En général : les systèmes autonomes et les petits systèmes de repli de réseau fonctionnent à basse tension, généralement entre 12 et 48 volts. Cela s'explique par le fait que les batteries sont des unités à basse tension et que la construction d'un système autonome à

basse tension est donc une approche simple, flexible et sûre. Les systèmes de raccordement au réseau sont généralement des installations plus importantes, qui produisent souvent plusieurs kilowatts d'électricité par heure. Comme l'électricité est requise sous forme de courant haute tension, il est plus efficace de connecter plusieurs systèmes solaires pour produire un circuit à haute tension, plutôt que d'utiliser un onduleur pour augmenter la tension. Ce courant continu à haute tension est ensuite converti en courant alternatif par un onduleur adapté. Les systèmes de connexion au réseau relient plusieurs panneaux photovoltaïques entre eux pour produire une tension de plusieurs centaines de volts avant de les relier à l'onduleur, ou bien ils ont un petit onduleur connecté à chaque panneau solaire pour créer une alimentation haute tension en courant alternatif à partir de chaque panneau. L'avantage de cette haute tension est l'efficacité. Il y a moins de pertes de puissance de faire passer de l'électricité à haute tension et à faible courant par les câbles du champ solaire.

Pour les systèmes autonomes basés sur des batteries, la basse tension est la meilleure solution, car les batteries ont tendance à mieux fonctionner en tant que réserves d'énergie à basse tension. Pour les systèmes reliés au réseau où l'énergie n'est pas stockée dans un banc de batteries, les systèmes à haute tension sont la meilleure solution. Aucune des deux approches n'est intrinsèquement "meilleure" : tout dépend du type de système que nous concevons.

1.5. Conclusion

On a étudié dans ce chapitre le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres. Ensuite on a présenté les types des systèmes PV existé donc on peut conclure que :

- L'énergie solaire peut être utilisé de différentes manières et pour de nombreuses applications différentes
- Les systèmes autonomes sont les plus simples et les plus faciles à comprendre. Ils ont tendance à être des systèmes relativement petits, fournissant de l'énergie là où aucune autre source d'énergie n'est facilement disponible
- Avec le raccordement au réseau, notre système d'énergie solaire produit de l'électricité qui est ensuite utilisée normalement. Tout excédent de production d'électricité est exporté vers le réseau
- Le système de raccordement au réseau avec alimentation de secours (également appelé réseau interactif) nous offre les avantages d'un système de raccordement au réseau, avec l'avantage supplémentaire que l'électricité reste disponible même si l'alimentation de notre région est coupée
- Les systèmes de repli du réseau ont plus de points communs avec les systèmes autonomes que les systèmes de raccordement au réseau. De par leur conception, ils sont très similaires aux systèmes autonomes

Chapitre 2 : Composition d'une installation

2.1. Introduction

Les systèmes connectés au réseau sont aujourd'hui prisent sérieusement pour compléter la génération conventionnelle d'énergie dans plusieurs pays industrialisés. Il y a certainement plusieurs projets de démonstrations connectés aux réseaux qui étudient cette possibilité. Bien qu'ils sont devenus viables dans le développement économique, la participation des Photovoltaïques dans la génération d'énergie de grande échelle est augmentée à cause des effets environnementaux défavorables des sources conventionnelles d'énergie.

Dans ce chapitre nous parlerons de tous les composants du système photovoltaïque connecté au réseau, en concentrant sur l'onduleur réseau, qui est l'élément important et de base de ce système sans oublier les systèmes de protection et les systèmes de pose des panneaux solaires au sol.

2.2. Générateur photovoltaïque

Dans la plupart des pays africains, rendre l'électricité disponible dans le milieu rural a toujours été un enjeu socio-économique important. Ce problème d'accès à l'électricité est incompatible avec un développement équilibré de ces pays et constitue un des facteurs favorisant l'exode rural. C'est donc un défi de mettre à la disposition des populations rurales une source d'énergie capable de stimuler l'activité économique et de conduire à une amélioration de leurs conditions de vie.

Toutefois, la satisfaction de la demande d'électricité des populations rurales par la liaison au réseau national se heurte à plusieurs difficultés : la faible densité et la dispersion de la population, la faiblesse des revenus, l'inexistence ou la faiblesse de structures collectives au niveau villageois. Aussi, il est nécessaire d'explorer de nouvelles solutions possibles pour assurer une électrification rationnelle du monde rural, par exemple l'exploitation du potentiel solaire abondant dont disposent ces pays.

L'énergie solaire photovoltaïque (PV), qui est la conversion directe de la lumière en électricité grâce à des cellules solaires, représente une alternative intéressante et bien adaptée à des besoins limités. Malgré sa facilité de mise en œuvre, son faible impact environnemental et le peu d'entretien qu'il nécessite, un système photovoltaïque n'est plus concurrentiel lorsque la demande augmente. Ainsi une étude assez rigoureuse est nécessaire pour faire le meilleur choix et le plus performant avec le moindre coût possible.

La performance d'un système PV dépend fortement des conditions météorologiques, telles que le rayonnement solaire, la température et la vitesse du vent. Pour fournir l'énergie continuellement durant toute l'année, un système PV doit donc être correctement dimensionné. [5]

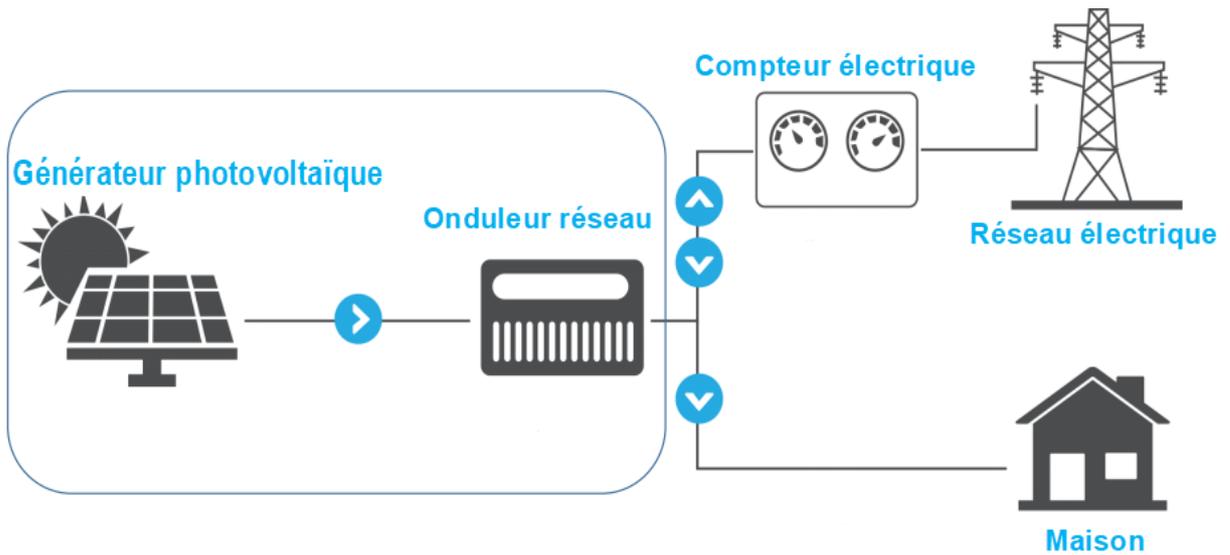


Figure 2-1 : Schéma de principe d'un système PV raccordé au réseau

2.3. Système de pose

Le système de pose permet de maintenir les modules photovoltaïques au sol ou sur une toiture.

2.3.1. Installation au sol

Le système permet l'installation sécurisée de panneaux au sol grâce à sa structure et pieds renforcés. Les rails ne sont pas compris dans la structure et doivent être ajoutés séparément.

La structure s'adapte à toutes sortes de panneaux photovoltaïques traditionnels avec cadre aluminium et permet l'installation de 2 panneaux à la verticale superposés.

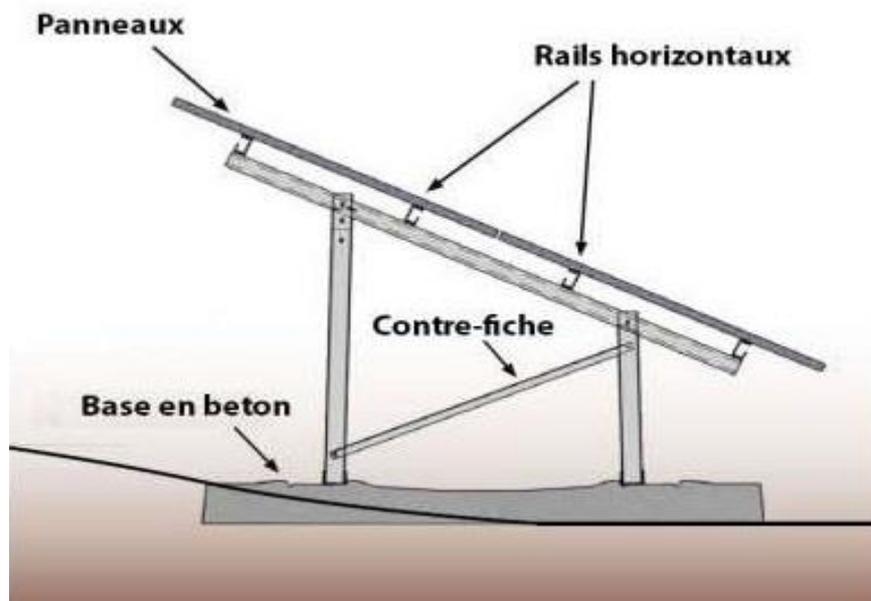


Figure 2-2 : Système de pose au sol [II]

Avantage :

- Réglage de l'angle d'inclinaison des panneaux : 15° ou 25°
- Design robuste et stabilité maximale
- S'adapte parfaitement à tout type de terrain et assure une base solide pour la fixation des panneaux
- Structure en acier
- Résiste aux chocs
- Simple à installer
- L'installation ne nécessite pas de forage

2.3.2. Intégration au bâti

L'intégration au bâti consiste à installer le générateur photovoltaïque sur la toiture en remplacement de la couverture. C'est le générateur photovoltaïque qui fait l'étanchéité de la toiture là où il est installé. En France, ce type de pose fait l'objet du meilleur tarif d'achat.

L'intégration au bâti est surtout utilisée pour les installations solaires destinées au rachat de la production électrique par le réseau car elle permet de bénéficier d'une prime de rachat au kWh.

C'est également une solution à envisager pour les propriétaires souhaitant isoler et/ou rénover leur toiture tout en produisant de l'énergie verte. Si telle est votre intention, vous devriez aussi considérer les tuiles solaires photovoltaïques pour produire votre propre électricité.

Notez néanmoins que les assurances sont souvent frileuses vis-à-vis de l'intégration au bâti qui, mal installée, peut occasionner des sinistres (dégâts des eaux et incendies). Sachez également que votre installateur doit pouvoir vous présenter une attestation d'assurance décennale, nécessaire à son activité. [III]



Figure 2-3 : Installation intégrée au bâti [III]

Avantages de l'intégration au bâti :

- Double solution énergétique : couverture et système de production d'électricité.
- Solution considérée comme plus esthétique que l'intégration en surimposition. [III]

2.3.3. Intégration sur le bâti

Dans le cas de l'intégration en surimposition, les modules photovoltaïques sont posés au-dessus de la toiture, sans se substituer au toit. On privilégie cette solution moins invasive pour les foyers en autoconsommation.

Notez que l'assurance décennale est aussi une obligation légale en autoconsommation solaire. Vérifiez également si l'installateur possède une certification QualiPV RGE, un gage de qualité dans le métier. Avant de signer, l'installateur doit être en mesure de vous remettre ces deux attestations [III]



Figure 2-4 : Intégration sur le bâti

La structure surimposée se compose de rails sur lesquels sont posés les panneaux solaires. En fonction du type de toiture, il existe deux types de fixation de rails :

Avec des crochets : un crochet est vissé directement dans la charpente, sous la tuile qu'on soulève.

Avec un tire-fond : on perce la tuile et on ajoute un joint d'isolation à l'endroit où passe la visse. [III]

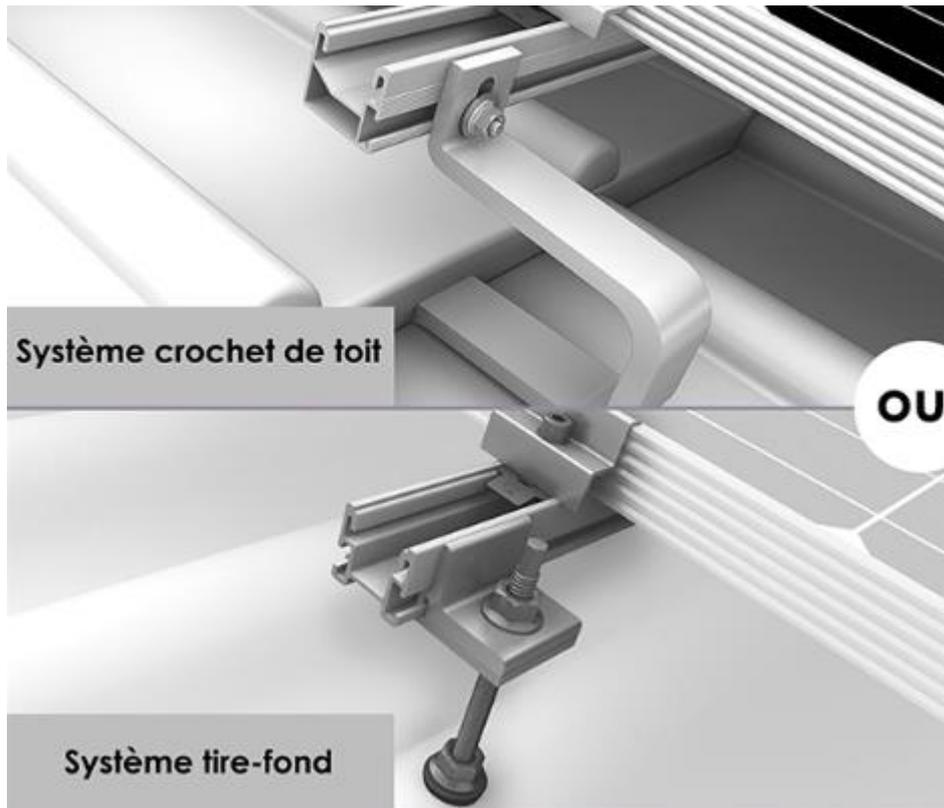


Figure 2-5 : Fixation toiture pour panneau solaire [III]

Avantages de l'intégration sur le bâti :

- Solution moins onéreuse (pas de surcoût lié à la dépose de la couverture existante).
- Solution plus simple d'installation (une journée en moyenne suffit).
- Solution adaptable à toutes les toitures (avec une pente de 8° minimum).
- N'occasionne aucun problème d'étanchéité
- Solution adaptable à toutes les toitures (avec une pente de 8° minimum).

Permet d'adapter l'inclinaison des modules photovoltaïques sur le toit pour optimiser leur rendement. [III]

2.4. Onduleur réseau

Comme pour un onduleur dans une installation photovoltaïque autonome, un onduleur réseau a pour principe de transformer une tension continue en une tension alternative, mais dans ce cas avec une fréquence et une valeur équivalentes à celle du réseau.

Les différences essentielles sont que l'onde sera obligatoirement sinusoïdale et que cette tension alternative qui va « charger » le réseau, devra se mettre en phase avec ce dernier et répondre à un ensemble de prescriptions et d'impératifs de sécurité plus contraignants. [6]

L'onduleur réseau est l'interface entre le champ PV et le réseau électrique. Il fonctionne uniquement en journée et seulement si la tension réseau est présente.

Il a des caractéristiques différentes d'un onduleur PV autonome.

- L'onduleur convertit le courant continu du champ PV en courant alternatif compatible avec le réseau électrique.
- Le courant produit est injecté sur réseau au fil du soleil. [6]

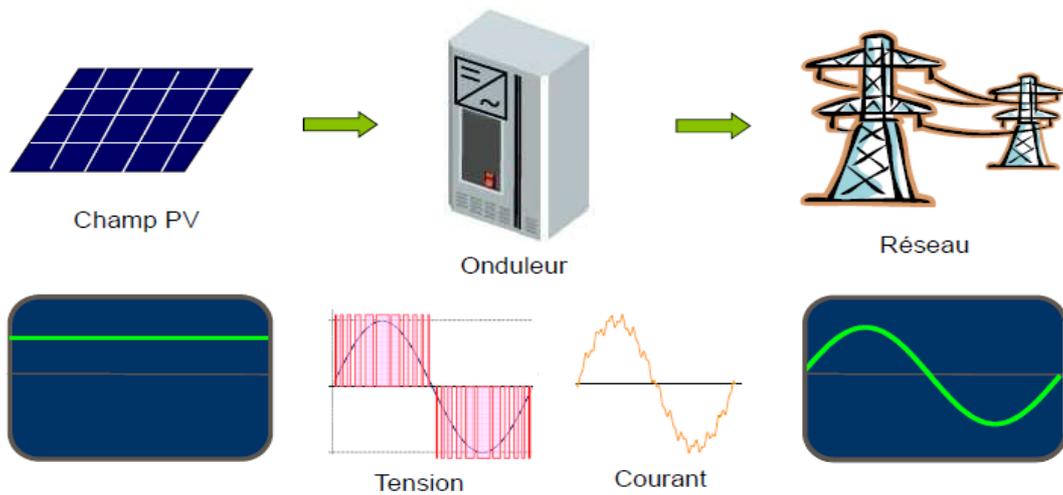


Figure 2-6 : Caractéristique d'un onduleur réseau

L'onduleur se présente sous la forme d'un boîtier métallique muni d'un radiateur ou d'un ventilateur. Il est placé sur un support vertical (comme un mur) ou dans une armoire électrique, dans un espace ventilé ou dehors, à l'abri et le plus près possible des modules photovoltaïques afin de limiter les pertes d'électricité en ligne. Il n'émet que peu de bruit (un léger ronronnement ou sifflement) et le champ électromagnétique est très faible, inférieur à celui d'une plaque à induction.



Figure 2-7 : Un onduleur réseau

2.4.1. Le principe de fonctionnement

L'onduleur réseau convertit le courant continu des modules photovoltaïques en courant alternatif identique à celui du réseau. Dans sa conversion, l'onduleur cherche à chaque instant le point maximal de fonction (MPP) en fonction des caractéristiques I/U du champ photovoltaïque (qui dépendent des conditions météorologiques (température, irradiation)).

L'onduleur réseau intègre 3 fonctions principales :

- Suivi du Pmax du champ PV
- Conversion du courant continu en courant alternative
- Couplage/découplage du réseau électrique [6]

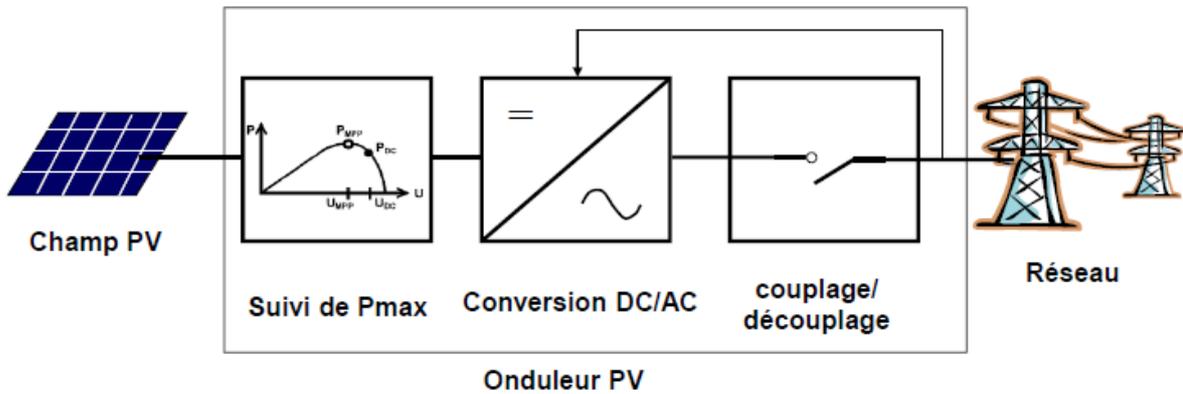


Figure 2-8 : Principe de fonctionnement d'un onduleur réseau

2.4.2. La recherche du point de puissance maximal

Le suivi du point de puissance maximale (MPP) d'un champ photovoltaïque est une étape essentielle d'un système PV.

Ainsi, de nombreuses méthodes MPPT ont été introduites et de nombreuses variantes de chaque méthode ont été proposées pour surmonter des inconvénients spécifiques. Le grand nombre de méthodes proposées peut rendre difficile la détermination la meilleure technique à adopter lors de la mise en œuvre d'un système PV. Les méthodes varient toutes en complexité, en nombre de capteurs requis, implémentation numérique ou analogique, vitesse de convergence, capacité de suivi et rentabilité.

De plus, le type d'application peut avoir un impact significatif sur la sélection de l'algorithme MPPT. [7]

Il existe de nombreux algorithmes et méthodes pour suivre le point de puissance maximale généré par les panneaux solaires, les plus populaires utilisées aujourd'hui sont :

- Méthode de perturbation et d'observation (P&O)
- Méthode de conductance incrémentielle (IC)
- Optimisation par essais de particules (PSO)
- Méthode de la tension constante (CV)
- Méthode de la température (T)
- Méthode de tension ouverte (OV)
- Méthode de tension (courant) de rétroaction
- Contrôle de logique floue (Fuzzy Logic Control)

- Méthode de perturbation et d'observation (P&O) :

L'algorithme P & O, comme illustré ci-dessous dans (Figure 2-7), fonctionne en augmentant ou en diminuant le terminal de la matrice tension, ou courant, à intervalles réguliers, puis en comparant la puissance de sortie PV avec celle de la précédente Point d'échantillonnage. Si la tension de fonctionnement du générateur photovoltaïque change et que la puissance augmente

($dP/dV_{PV} > 0$), le système de contrôle ajuste le point de fonctionnement du générateur photovoltaïque dans cette direction ; sinon le point de fonctionnement est déplacé dans la direction opposée. À chaque point de perturbation, l'algorithme continue de fonctionner de la même manière. Le principal avantage de cette approche est la simplicité de la technique. De plus, une connaissance préalable du PV les caractéristiques du panneau ne sont pas requises. Dans sa forme la plus simple, cette méthode présente généralement de bonnes performances à condition l'irradiation solaire ne varie pas trop rapidement. A l'état d'équilibre, le point de fonctionnement oscille autour du Tension MPP et fluctue généralement légèrement. Pour cette raison, la fréquence de perturbation doit être suffisamment basse. [7]

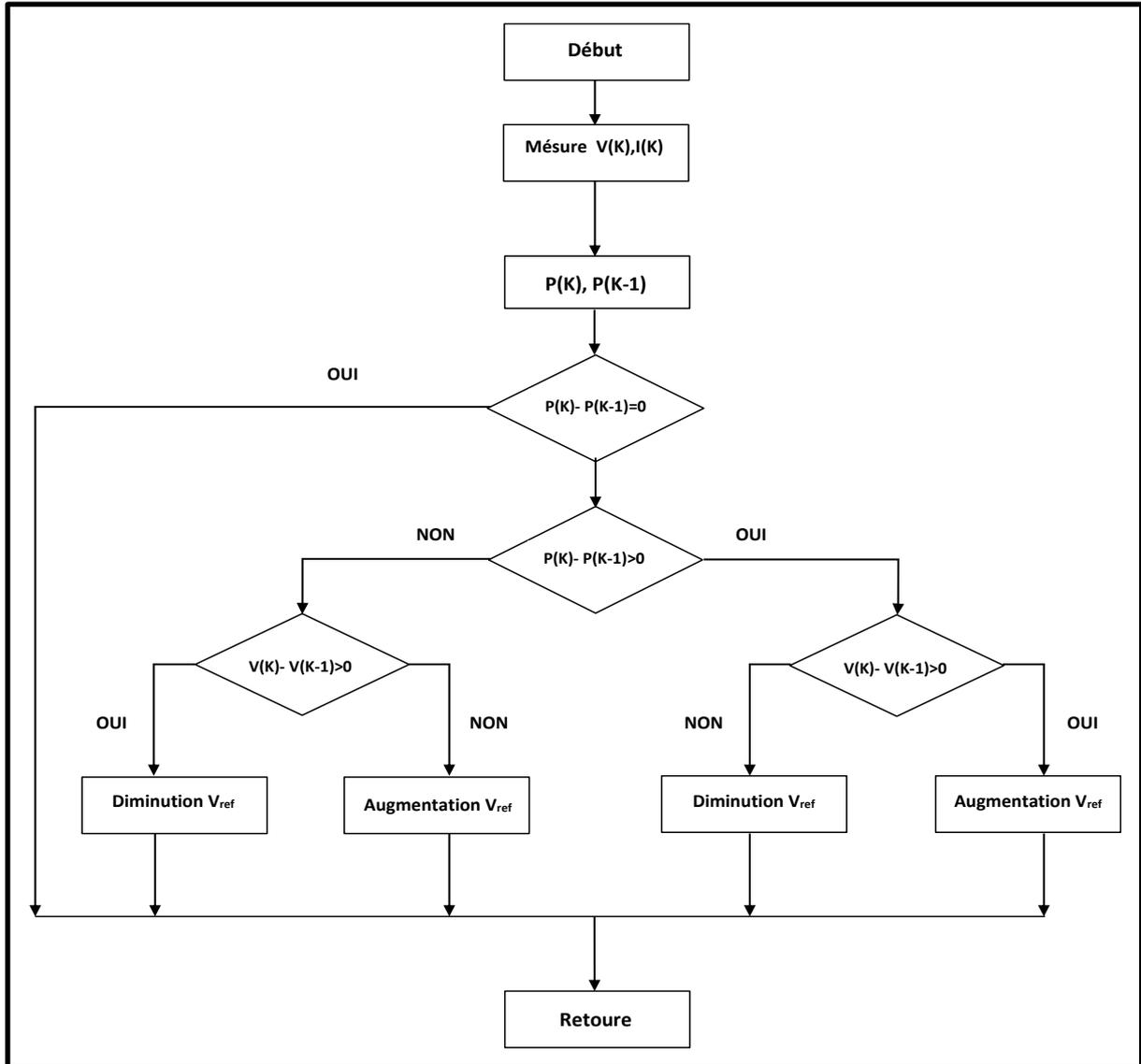


Figure 2-9 : Organigramme de l'algorithme MPPT de la perturbation & observation [7]

2.4.3. La conversion DC/AC

Les onduleurs sont des structures en pont constituées le plus souvent d'interrupteurs électroniques comme des IGBT (transistors de puissance). Dans le cas standard, par un jeu de commutation commandée de manière appropriée, le plus souvent par MLI, l'énergie électrique continue fournie est modulée afin d'obtenir un signal alternatif à la fréquence du réseau. [8]

2.4.4. Couplage découplage au réseau électrique

Condition de couplage au réseau électrique :

- Puissance et tension suffisantes en entrée d'onduleur (début de journée).
- Présence de tension du réseau électrique.
- Absence du défaut d'isolement au niveau du champ PV.

L'onduleur se synchronise sur le réseau électrique en :

- Tension
- Fréquence
- Phase

Le couplage s'effectue lorsque la synchronisation est effective (quelques dizaines de secondes).

Condition de découplage au réseau électrique :

- Puissance et tension insuffisantes en entrée d'onduleur (fin de journée).
- Absence de tension du réseau électrique (ou hors tolérance en tension et fréquence).
- Défaut d'isolement au niveau du champ PV (pour onduleur avec transfo). [6]

Certains onduleurs utilisent un transformateur pour isoler les panneaux solaires du réseau.

D'autres, possède un système de test en continu du courant délivré par les panneaux.

En cas de fuite, l'onduleur s'arrête pour éviter tout court-circuit entre les panneaux et le réseau.

Chaque onduleur utilise pour son fonctionnement interne, une certaine quantité d'énergie fournie, soit par les panneaux photovoltaïques, soit par le réseau ce qui contribue à influencer les pertes de rendement annuelles.

Pour la sécurité du système, les compagnies d'électricité exigent en général une surveillance de la tension et de la fréquence produites et une coupure très rapide en cas d'absence de réseau.

2.4.5. Les différents types d'onduleurs réseau

- Micro-onduleur

Dans le cas d'un kit solaire équipé de micro-onduleurs, chaque panneau est relié à un ou deux micro-onduleurs selon le type de micro-onduleur proposé. Il y a donc plusieurs micro-onduleurs. Les panneaux ne sont plus branchés en série mais ce sont les micro-onduleurs qui le sont. Chaque panneau étant connecté à son micro-onduleur.

- **L'avantage** : C'est la production garantie et optimisée. En effet, en cas de défaillance d'un panneau, les autres panneaux produisent toujours de manière optimale. Le fait d'avoir une production d'électricité répartie entre chaque panneau ou couple de panneaux permet d'assurer la production optimale de l'ensemble du système. La consommation finale du kit de 10 panneaux solaires peut donc ici être assurée à 90% de ses capacités, soit une perte de 10% de production. Par ailleurs,

les micro-onduleurs sont recommandés pour de petites installations car les onduleurs centraux les moins puissants commencent généralement à partir de 2000 Wc (8 panneaux). Les micro-onduleurs permettent également l'évolutivité de votre système, en effet, les micro-onduleurs vous permettent de rajouter des panneaux à votre installation à tout moment, sans avoir à redimensionner l'ensemble.

- **L'inconvénient** : C'est le prix, car on multiplie les micro-onduleurs par rapport au système de l'onduleur central. La technologie micro-onduleur étant également plus évoluée, le prix s'en fait ressentir. [IV]



Figure 2-10 : Micro-onduleur

- Onduleur string (chaîne)

D'une puissance de 1 kW à 50-60 kW, les onduleurs "string" sont bien adaptés à des installations qui présentent une configuration hétérogène : diverses inclinaisons et orientations, modules et strings de tailles différentes, modules à tolérance de fabrication élevés ou encore ombragés, il est préférable d'opter pour un concept décentralisé - c'est à dire utiliser plusieurs onduleurs. Rappelons qu'un onduleur recherche le meilleur point de la série de panneaux qu'il gère : un ensemble de modules branchés en série, on dit qu'ils appartiennent à un même « string ». Avec plusieurs onduleurs, on peut s'adapter aux différents points de fonctionnement des différents ensembles de modules du système. On branche alors un onduleur string avec une série de panneaux aux mêmes caractéristiques. Ajoutons que certains onduleurs "strings" ont plusieurs entrées MPP, ce qui accroît les possibilités de conception du système.

Les onduleurs string présentent également la possibilité de remplacer seulement un appareil en cas de besoin (panne, baisse de rendement...) réduisant ainsi l'indisponibilité. Notons également que l'offre d'onduleurs strings autorise une mise à jour du système (rétrofit) sans avoir à toucher à l'amont (champ photovoltaïque) et à l'aval (coffret électriques et raccordement).

Côté pratique, enfin, les onduleurs string sont plus petits que les onduleurs centraux aussi l'installation est-elle plus facile. [IV]

- Onduleur central

Dans le cas d'un kit solaire autoconsommation relié au réseau, l'onduleur central est branché en bout de la série de panneaux solaires. Il n'y a qu'un seul onduleur pour tous les panneaux.

- **L'avantage** : C'est le **prix**. Ce système d'installation avec onduleur unique limite forcément le coût global d'investissement en comparaison d'un système équipé d'un micro-onduleur pour deux panneaux.
- **L'inconvénient** : C'est la **production**. L'onduleur photovoltaïque central ne produit pas moins, mais en cas de défaillance d'un panneau, c'est toute la chaîne de panneaux qui en pâtit. En effet, le branchement en série répercute la défaillance technique éventuelle d'un panneau sur les autres panneaux de la même chaîne. Donc si c'est le premier panneau qui ne produit plus, le système global de la chaîne ne produit plus. La consommation finale du kit de 10 panneaux solaires (en une chaîne) peut n'être donc ici que de 10% de ses capacités, soit une **perte de 90% de production**.



Figure 2-11 : Onduleur central

2.4.6. Choix et placement d'un onduleur

L'onduleur est un organe primordial de l'installation qu'il ne faut pas négliger. La détermination de ses caractéristiques se fera naturellement en fonction du champ de capteur pris en charge.

Chaque onduleur possède en effet des plages de fonctionnement précises qui devront impérativement correspondre aux caractéristiques du courant continu généré par les modules.

Le choix et le dimensionnement de l'onduleur tiendront compte :

- De la puissance maximale possible générée par les modules (on utilise généralement la puissance crête (conditions STC) minorée de 5 à 15 %).

- Des tensions minimales et maximales (on utilise généralement comme tension maximale la tension générée en circuit ouvert (U_{oc}) à -10°C et comme tension basse, la tension à 70°C).
- L'intensité maximum du courant

Suivant la taille de l'installation, il peut être nécessaire de démultiplier le nombre d'onduleurs. En général, un deuxième onduleur peut être prévu à partir de 5 kWc. Cette limite découle également des prescriptions Synergides.

Une hétérogénéité (orientation, inclinaison, ombrage, utilisation de plusieurs types de modules, grande tolérance de fabrication sur la puissance des modules...) de l'installation peut aussi amener à opter pour plusieurs onduleurs. Plus l'installation est hétérogène, plus on aura intérêt en termes de performance à démultiplier les onduleurs (onduleur modulaire ou onduleur string). A l'inverse, pour une installation tout à fait homogène, il sera plus intéressant de limiter le nombre d'onduleurs (onduleur central). Il faudra suivant la situation trouver le bon compromis. Les onduleurs multistring évitent également de démultiplier si on a une hétérogénéité dans l'installation.

Le choix entre deux onduleurs correspondant à la configuration de l'installation peut être guidé par :

- Une comparaison des rendements européens.
- La maintenance nécessaire.
- La garantie de l'équipement.

L'emplacement de l'onduleur est aussi un facteur à prendre en compte lors de la conception d'un projet photovoltaïque.

Tout comme les cellules photovoltaïques, les composants électroniques internes de l'onduleur sont très sensibles aux hautes températures. Outre une chute de rendement, l'onduleur risque de se dégrader lors de fonctionnements continus à haute température. Certains onduleurs sont même équipés de refroidisseur actif (ventilateur). On comprendra donc ici tout l'intérêt de placer l'onduleur dans un local ventilé où la température est globalement contrôlée (attention aux combles sous toiture !).

Un onduleur fait aussi un certain bruit (généré soit par le transformateur et/ou par le ventilateur interne) qui peut parfois être gênant. Son poids (environ 10 kg/kW) peut aussi être un facteur déterminant pour le choix son emplacement.

2.5. Système de protection électrique

L'installation d'un système photovoltaïque est régie par des normes françaises et européennes en termes de sécurité électrique.

2.5.1. Protection courant continu

Une protection courant continu est exigée dans chaque installation d'un système photovoltaïque avec des coffres de type IP65 tel que : [9]

Protection des branches : La protection d'un champ photovoltaïque est réalisée à l'aide de fusible installé sur chaque branche. Il sera placé à la sortie de chaque branche parallèle et sera choisi en tenant compte de :

- La tension de fonctionnement d'un fusible doit être de 1,15 fois la tension à vide dans les conditions STC des modules raccordés en série : $1,15 \times V_{co} \times N_{ms}$
- Le calibre des fusibles doit être compris entre 1,5 et 2 fois le courant I_{cc} (STC) de chaque chaîne. ($1,5 \times I_{cc} \leq \text{calibre fusible} \leq 2 \times I_{cc}$). [9]



protection par coffre DC : Il est donc placé entre les modules photovoltaïques et l'onduleur. Il comporte un dispositif de coupure et de sectionnement général DC sur la liaison principale et le parafoudre. [9]

➤ Interrupteur de coupure/ sectionneur DC

Il sera placé juste à la sortie du générateur et servira entre autres d'isoler électriquement le champ PV afin de permettre des opérations de maintenance en sécurité. Il doit être dimensionné selon la règle suivante :

- Tension assignée du fusible $\geq 1,15 \times V_{co} \times N_{ms}$
- Intensité nominale $\geq 1,5 \times I_{cc} \times NBP$ [9]



➤ Le parafoudre

Le parafoudre permet de protéger contre les risques de surtensions éventuelles dans l'installation. Pour prévenir les surtensions dues à la foudre. [9]

2.5.2. Protection courant alternatif

Une protection courant alternatif est exigée en aval de l'onduleur. Il est donc placé entre l'onduleur et le réseau de distribution.

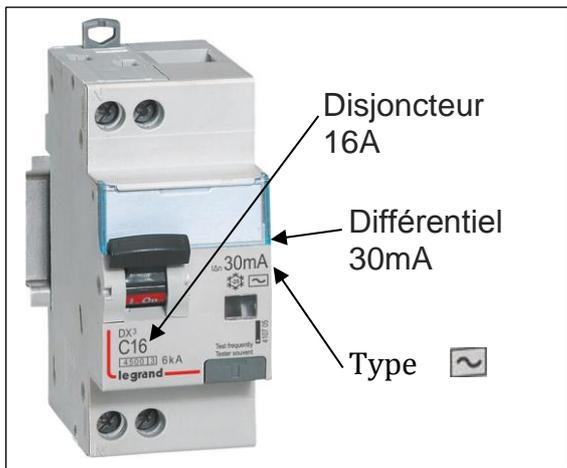
Le coffre AC comporte un dispositif de coupure et de sectionnement général AC sur la liaison principale, le parafoudre (chaque onduleur nécessite l'installation d'un disjoncteur différentiel). [9]



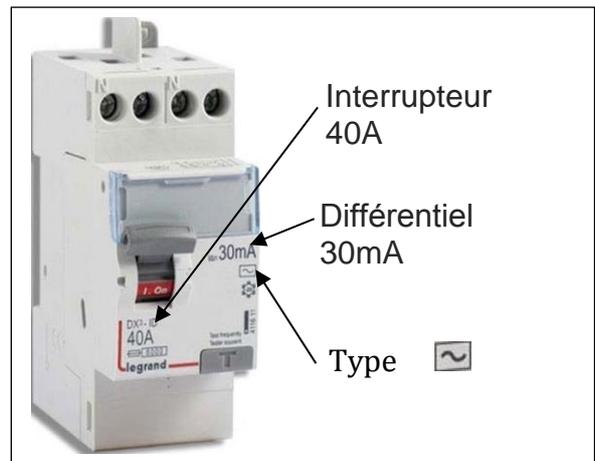
➤ Le disjoncteur/ interrupteur différentiel

Dans l'installation électrique, il y a deux éléments électriques qui sont des plus importants et qui participent parfaitement la protection contre les chocs électriques. Il s'agit du disjoncteur et de l'interrupteur. La fonction différentielle est conférée au disjoncteur que l'interrupteur, de plus le disjoncteur est plus utilisé pour de circuit séparé comme un tableau divisionnaire et l'interrupteur différentiel s'installe entre le disjoncteur général et les disjoncteurs divisionnaires. Il a pour rôle de détecter les fuites de courant et d'interrompre l'alimentation en cas d'un défaut de terre.

Le disjoncteur différentiel disjoncte et détecte les courts-circuits et les surcharges électriques, ce qui est nécessaire pour la protection courante alternatif dans un système photovoltaïque. [9]



Disjoncteur différentiel



Interrupteur différentiel

➤ Le parafoudre AC

Afin de protéger vos appareils des risques de surtensions liées aux orages et à la foudre le parafoudre AC monophasé doit être installer dans le coffre AC et la protection contre les risques de surtensions induites dans le circuit de la partie à tension alternative de l'installation est important ainsi que la partie à tension continue. [9]



2.5.3. La mise à la terre

La mise à la terre est une protection contre tout accident électrique éventuel sur une personne en contact avec un appareil présentant un défaut électrique et aussi une protection pour le matériel mis en place dans le système. On relie donc tout l'équipement électrique et les parties métalliques à la terre à l'aide d'un conducteur de faible résistance (5 ohms), de sorte que le courant électrique en défaut soit évacué dans la terre.

Le conducteur de terre qui assure la liaison entre la prise de terre et la barrette de mesure est de 16 mm² en cuivre isolé ou 25 mm² en cuivre nu. Le conducteur de terre qui assure la liaison entre la barrette de mesure et aux équipements est un câble en cuivre de couleur jaune-verte de 6 mm². [9]

La figure ci-dessous montre le principe de protection par coffre suivant l'union technique de l'électricité UTE C15-712

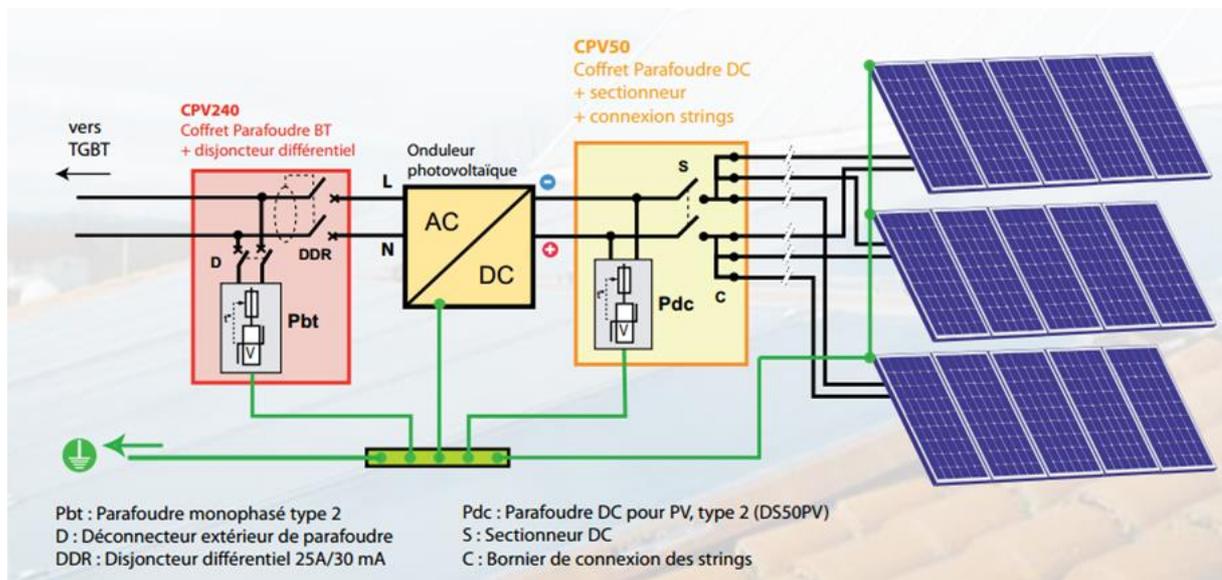


Figure 2-12 : Principe de protection par coffre suivant UTE C15-712. [9]

2.6. Compteur électrique (smart meeter)

Un particulier dont la maison possède des panneaux solaires photovoltaïques a la possibilité de revendre tout ou partie de sa production électrique à une entreprise de distribution.

Le compteur va calculer la quantité d'électricité produite et le prix fixé par le distributeur. Le compteur est directement branché au réseau et permet de réinjecter toute la production d'énergie dans le réseau.

Afin de déterminer la production d'électricité, il est nécessaire d'installer deux ou trois compteurs différents (compteur d'achat et compteur de vente). [10]

2.6.1. Le compteur d'achat d'énergie

Un compteur d'achat d'énergie électrique est un organe électrotechnique servant à mesurer la quantité d'énergie électrique consommée dans un lieu : habitation, industrie...etc.

Il est utilisé par les fournisseurs d'électricité (Sonalgaz) afin de facturer la consommation d'énergie au client.

À l'origine ces appareils étaient de conception électromécanique, ils sont remplacés dorénavant par des compteurs électroniques.

Les nouvelles versions de compteurs électriques sont des compteurs communicants appelés parfois compteurs intelligents. [10]

- **Erreur en pourcentage :** l'erreur en pourcentage est donnée par la formule suivante

$$\text{Erreur en pourcentage} = \frac{\text{énergie enregistrée par le comteur} - \text{énergie vraie}}{\text{énergie vraie}} \times 100$$

La valeur vraie ne pouvant pas être déterminée, on prend une valeur approchée avec une précision que l'on peut rattacher à un étalon agréé par le constructeur et par l'utilisateur, ou à un étalon national.

- Tensions de référence normales :

Tableau 1 Tension de référence normale [10]

Compteur	Valeur normales V	Valeur exceptionnelles V
A branchement direct	230/400	220/380 - 240/415
Alimentés par transformateur de tension	$100/\sqrt{3} - 110/\sqrt{3}$	$200/\sqrt{3}$

- Tarification :

De 17h00 -- 21h00 heures de pointes à 7.163 DA/kWh

De 06h00 -- 17h00 et de 21h00÷22h30 heures pleines à 1.911 DA/kWh

De 22h30 -- 06h00 heures creuses à 1.064DA/kWh. [10]

2.7. Câblage électrique

2.7.1. Cable solaire

Les câbles DC raccordent les modules entre eux pour former des strings, et branchent plusieurs strings en parallèle. Seuls des câbles dits « solaires » (double isolation, protection UV et ozone, etc.) peuvent être utilisés. Plus en détails, les câbles solaires utilisés à l'extérieur sur des toitures doivent être résistants aux UV et protégés contre l'action de l'ozone. Ils doivent aussi être certifiés pour fonctionner à températures de -20°C à 80°C. La prescription de température doit aussi être valable pour tout le matériel utilisé pour l'installation.

Les câbles principaux de CC doivent être dimensionnés et connectés en respectant certains critères essentiels pour des raisons de sécurité et d'efficacité énergétique :

- supporter une tension de 1,15 x la tension de circuit ouvert (isolation)

- adapter la capacité du câble au transport du courant DC et AC (section des câbles) et pertes ohmiques dues aux chutes de tension
- utiliser des connecteurs appropriés. [11]

La sécurité contre les surintensités en cas d'incident ou de court-circuit

Lorsque plusieurs strings sont raccordés en parallèle, il est nécessaire de protéger les conducteurs contre les surintensités à l'aide de fusibles sur les pôles + et -.

Ces fusibles de protection sont facultatifs dans le cas où les conducteurs auront été dimensionnés pour pouvoir supporter la surintensité maximale possible (courant de court circuit) et s'il n'y a pas plus de quatre strings connectées en parallèle. Dans ce cas, il faut vérifier que les modules peuvent supporter cette intensité dans le sens contraire (courant forcé à travers le module) sans les endommager de façon irréversible.

Par conséquent, les conducteurs principaux de CC devront toujours être dimensionnés pour la surintensité maximale possible fournie par plusieurs strings en parallèle de modules PV (c'est à dire l'ensemble des strings mis en parallèle). La section du câble sera donc la valeur supérieure standard la plus près de la valeur calculée. [11]

2.7.2. Connecteurs MC4

Les connecteurs MC4 pour le photovoltaïque servent au câblage en série et parallèle des panneaux solaires de manière rapide et sûre.

Ils ont choisis en fonction de la section des câbles mise en œuvre sur le central PV.



Figure 2-13 : Connecteur MC4 male et female

Tableau 2 Fiche technique connecteur MC4 [10]

Type	Connecteurs MC4 mâle et femelle		
Référence	M25400 / M25401	M25402 / M25403	M25406 / M25407
Section de câble	1,5 et 2,5 mm ²	4 et 6 mm ²	10 mm ²
Diamètre sur isolant	3 et 6 mm	3 et 6 mm	5,5 et 9 mm
Courant assigné max	17 A à 22,5 A	30 A	43 A
Tension du système max	1000 V		
Système de verrouillage	Snap-in		
Type de protection (connecté)	IP 67		
Catégorie de protection	II		
Température ambiante	- 40° C à + 90° C		
Poids	0,010 Kg		

Chapitre 3 : Dimensionnement d'une école ON-GRID

3.1. Introduction

Le dimensionnement d'une installation photovoltaïque sert à déterminer le nombre des panneaux solaire nécessaire pour couvrir les besoins énergétiques à tout instant ainsi que toutes les autres composent électriques, à partir des données d'ensoleillement du lieu. Ce qu'on va voir dans ce chapitre qui va présenter la procédure et les étapes pour effectuer un dimensionnement d'un système photovoltaïque raccordé au réseau, on va traiter un exemple d'une école primaire de 12 salles situé à Blida qui permettra d'appliquer des lois pour faire les calculs nécessaires de l'installation, ensuite on va déterminer le devis quantitatif de ce projet et enfin on va définir les étapes de préparation du système pour la remise du projet.

3.2. Les étapes de dimensionnement

3.2.1. Connaitre le site d'installation et ses caractéristiques

La production annuelle d'électricité dépend de plusieurs facteurs :

- L'ensoleillement annuel du site, qui peut être évalué assez précisément.
- L'orientation, sachant que le soleil a son point le plus haut au Sud dans l'hémisphère Nord, c'est la meilleure orientation pour les panneaux.
- L'inclinaison, qui est choisie en fonction de la hauteur du soleil pendant les mois ensoleillés pour une récupération optimale.

Irradiation

L'Algérie est parmi les pays les mieux dotés en ressources solaires au monde la figure 3-1 représente le taux journalier : annuels moyens de l'irradiation globale horizontale en Algérie

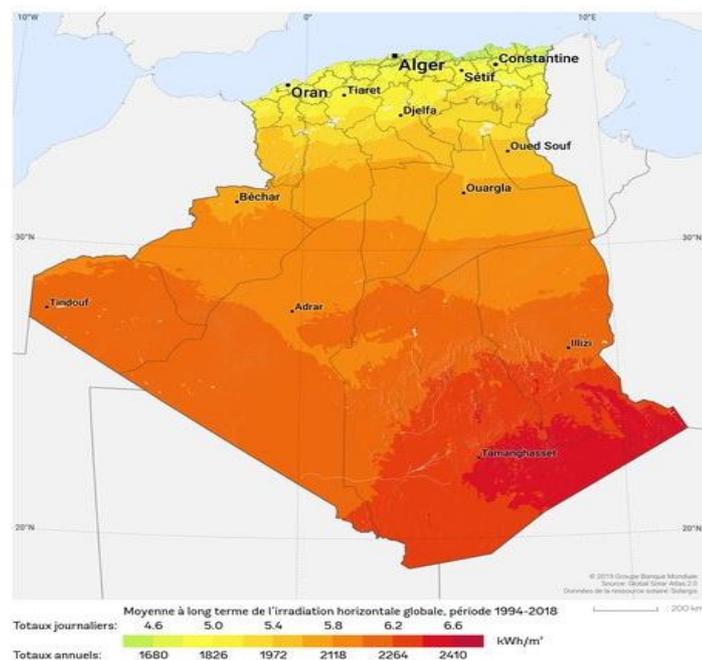


Figure 3-5 : Irradiation globale horizontale Algérie [V]

Rayonnement solaire

On prend la wilaya de blida comme un exemple : et donc les coordonnées géographiques pour Blida sont : 36,470° de latitude, 2,828° de longitude et 256 m d'altitude

La *période la plus lumineuse* de l'année dure 3,4 mois, du 7 mai au 19 août, avec un rayonnement solaire incident en ondes courtes par mètre carré supérieur à 6,8 kWh. Le jour le plus lumineux de l'année est le 28 juin, avec une moyenne de 7,9 kWh.

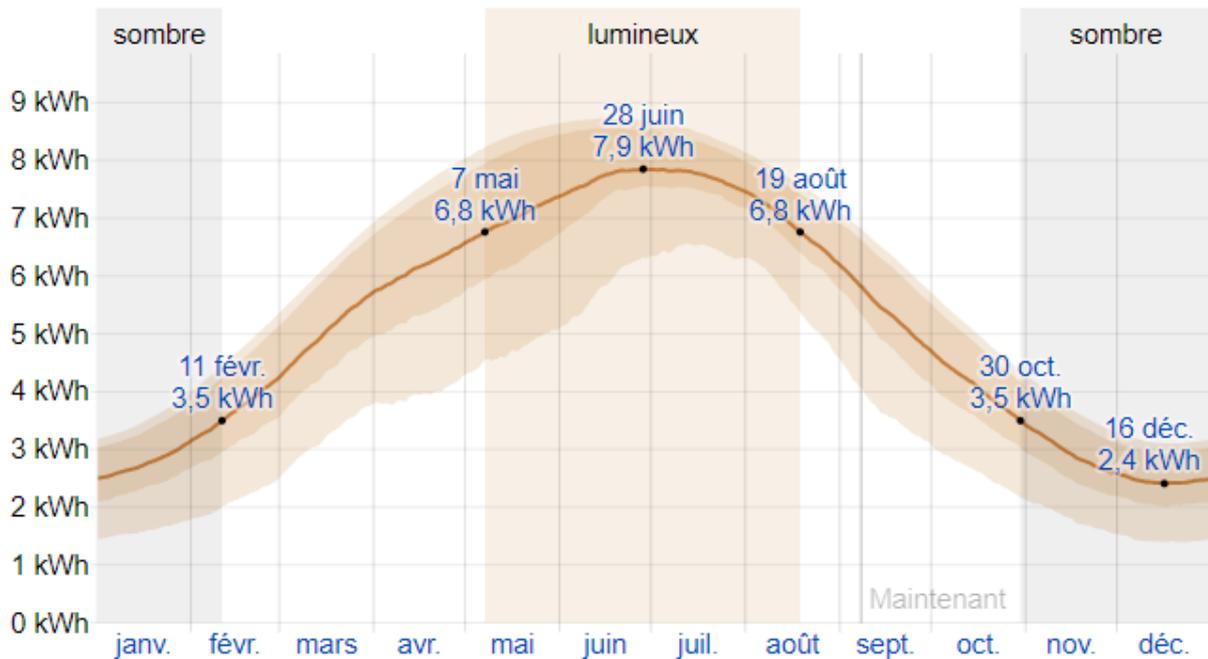


Figure 3-6 : Le rayonnement solaire en ondes courtes quotidien moyen atteignant le sol en mètres carrés (ligne orange), avec bandes du 25e au 75e percentile et du 10e au 90e percentile.

L'orientation et l'inclinaison des panneaux

Quand on a le choix, l'orientation idéale d'un capteur solaire obéit à une règle très simple à retenir : vers l'Equateur, ce qui donne [13]

Orientation vers le Sud dans l'hémisphère nord

Orientation vers le Nord dans l'hémisphère sud.

Comme nous sommes en Algérie qui se situe dans l'hémisphère nord et donc l'orientation des panneaux photovoltaïques est en plein sud

L'angle d'inclinaison des panneaux solaire à blida est de 32°

La déclinaison solaire

$$\delta = 23,45 \times \sin\left(2 \times \pi \times \frac{d + 284}{365}\right)$$

$$\delta = 23,45 \times \sin\left(2 \times \pi \times \frac{356 + 284}{365}\right) = 4,48^\circ$$

L'angle d'inclinaison = Latitude - δ

L'angle d'inclinaison = $36,470 - 4,48 = 31,988^\circ = 32^\circ$

3.3. Les calculs du système

➤ Calcule des besoins énergétiques

Appareils	Nombre	Puissance unitaire (W)	Durée d'utilisation quotidienne (h)	Puissance	Energie
Lampe	Nbr	P	h	W	Wh /j
PC	Nbr	P	h	W	Wh /j
Frigo	Nbr	P	h	W	Wh /j
.....	P	h	W	Wh /j
				P_{TOT} (W)	E_c (Wh /j)

Puissance (W) = Nombre d'appareil × Puissance unitaire

Energie (Wh/j) = Puissance × Durée d'utilisation quotidienne

$$P_{TOT}(W) = \sum \text{Puissance}$$

$$E_c = \sum \text{Energie}$$

Détermination du nombre d'onduleur et sa puissance correspondante :

Ça dépend de la fiche technique mais généralement le rondement d'un onduleur solaire et de $85\% < \eta_{ond} < 95\%$

Donc on calcule avec 90%

$$\frac{P_{TOT} \times 1,25}{\eta_a} = P(W) \quad 1,25 : \text{facteur de correction et de sécurité}$$

Et donc la puissance de l'onduleur doit être supérieure à la puissance calculée

Détermination du nombre des panneaux

Les panneaux doivent assurer la consommation d'une journée complète

$$\text{Puissance pour couvrir la consommation (W)} = \frac{E_c \times 1,25}{I_r}$$

I_r : durée d'ensoleillement (h)

1,25 : facteur de correction et de sécurité

D'après la fiche technique du panneau solaire on doit calculer la puissance de panneau dans les conditions météorologiques (voir Annex A)

La perte de la puissance (POWER LOSSES) C'est un paramètre qui montre la performance du panneau photovoltaïque dans les conditions météorologiques les plus proches de la réalité en termes de faible rayonnement et de température élevée.

Perte de puissance

$$= \text{coefficient température } (P_{max}) \times (\text{Température (NOCT)} - 25^\circ\text{C})$$

Exemple

De la fiche technique : Coefficient Température (P_{max}) = $-0,35\%/^\circ\text{C}$

Température (NOCT) = 41°C

$$\text{Perte de puissance} = -0,35 \times (41 - 25) = -5,6\%$$

Et donc la puissance du panneau de 390W dans les conditions météorologiques les plus proches de la réalité est :

$$P = \text{Puissance du panneau maximal} \times \frac{(100 - P_{loss})}{100}$$

$$P = 390 \times \frac{(100 - 5,6)}{100} = 368,16W$$

$$\text{Nombre de panneau} = \frac{\text{puissance pour couvrir la consommation}}{\text{Puissance d'un seul panneau}}$$

➤ La section des câbles

Pour calculer la section des câbles il faut tout d'abord savoir la distance entre les éléments du système (panneau et boîte jonction, boîte jonction et armoire DC, entre armoire DC et AC...). Après on applique la loi suivante :

$$S = \frac{2 \times L \times I \times \rho}{\varepsilon \times V} \text{ (mm}^2\text{)}$$

ρ : 0,0185

L : la longueur

V : Tension de champ PV

ε : 0,02

I : courant sortie de champ

➤ La mise à la terre

Le conducteur de terre qui assure la liaison entre la prise de terre et la barrette de mesure est de 16 mm² et la longueur de ce câble varie avec la distance entre les éléments du système

La mise à la terre de l'installation photovoltaïque ainsi que la protection contre les surintensités et éventuellement contre la foudre sont d'une importance capitale pour éviter tout défaut électrique qui pourrait entraîner des points chauds ou des arcs électriques

➤ Les éléments de protection électrique

Fusible, sectionneur DC, le parafoudre DC, le disjoncteur, le parafoudre AC

La méthode de calcul et présenté dans le chapitre 2

➤ La structure et l'endroit du champ PV

La visite de l'endroit du champ est obligatoire pour :

- Avoir une idée sur l'espace et assuré qu'il y a aucun obstacle (arbre, mur le haut bâtiment...)
- Faire les calculs de la surface là où le champ photovoltaïque doit être installé.
- Définir l'orientation et l'inclinaison ainsi que le système de pose des modules photovoltaïques (sol ou sur une toiture).

La structure :

La structure est en aluminium ou en alliage d'aluminium

Les boulons et écrous sont en acier inoxydable et qui résiste à toutes les conditions météorologiques

La base est en béton

Assuré la qualité des supports de montage des module PV



Figure 3-7 : La structure est en aluminium ou en alliage d'aluminium

3.4. Traitement d'un exemple

3.4.1. Problématique

On veut alimenter une école primaire de 12 salles qui se situe à Blida avec des panneaux solaires photovoltaïques afin de couvrir tous les besoins énergétiques seulement avec l'énergie solaire, elle contient des appareils qui sont mentionnés dans le tableau suivant :

Tableau 3 Consommation des appareils

Appareils	Nombre	Puissance unitaire (W)	Durée d'utilisation quotidienne (h)
LED salle	124	18	8
LED sanitaire, S-profs, restaurant	6+6+10	18	2
LES Poste d'agent	1	18	12
Hublot	30	15	1
Frigo (Administration)	1	300/24h	24
Frigo (Restaurant)	1	2000/24h	24
PC	2	150	8
Imprimante	1	150	1
Pompe d'eau	1	600	1

3.4.2. Le dimensionnement

On a fait le choix d'un système photovoltaïques connecté au réseau et donc le dimensionnement suivra les étapes suivantes :

➤ **L'orientation et l'inclinaison**

Blida se situe à 36,470° de latitude, donc l'angle d'inclinaison des panneaux solaire est de :
La déclinaison solaire

$$\delta = 23,45 \times \sin\left(2 \times \pi \times \frac{d + 284}{365}\right)$$

$$\delta = 23,45 \times \sin\left(2 \times \pi \times \frac{356 + 284}{365}\right) = 4,48^\circ$$

L'angle d'inclinaison = Latitude - δ

$$L'angle\ d'inclinaison = 36,470 - 4,48 = 31,988^\circ = 32^\circ$$

L'orientation est : **en plein sud**

➤ **Les conditions météorologiques à Blida**

À Blida, La saison très chaude dure 2,9 mois, du 18 juin au 14 septembre, avec une température quotidienne moyenne maximale supérieure à 30 °C. Le jour le plus chaud de l'année est le 4 août, avec une température moyenne maximale de 33 °C et minimale de 20 °C. La saison fraîche dure 4,0 mois, du 19 novembre au 19 mars, avec une température quotidienne moyenne maximale inférieure à 19 °C. Le jour le plus froid de l'année est le 19 janvier, avec une température moyenne minimale de 4 °C et maximale de 15 °C.

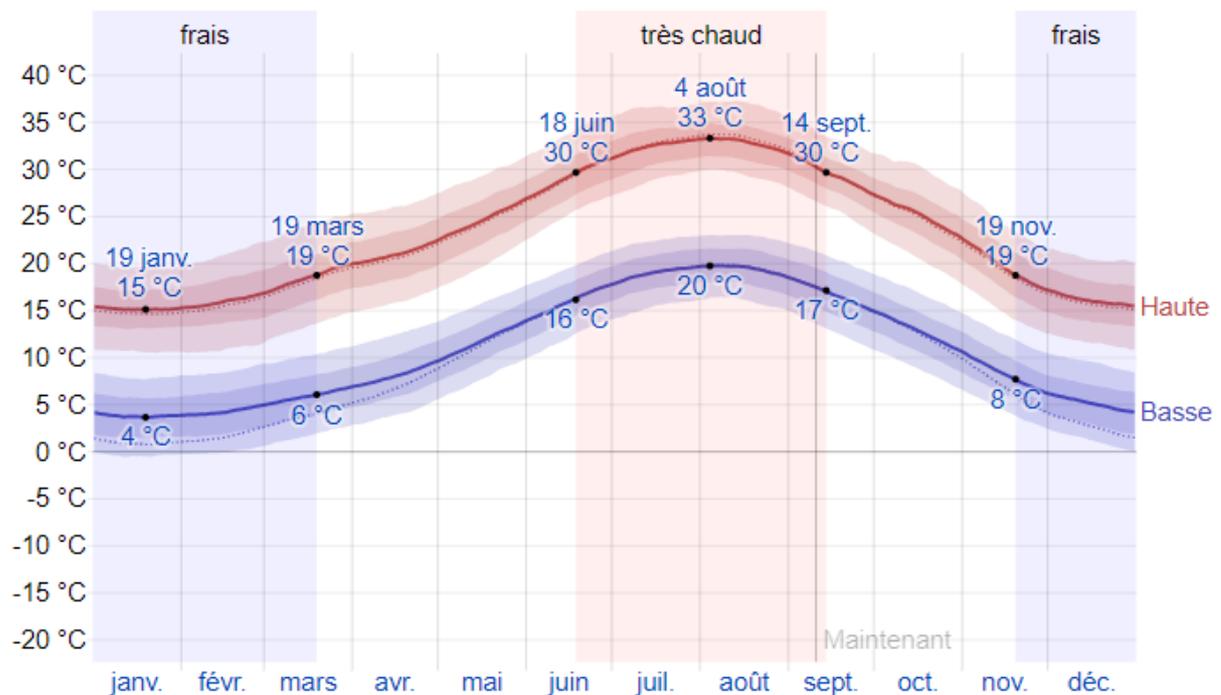


Figure 3-8 : La température moyenne quotidienne maximale et minimale à Blida [VI]

➤ Calcule des besoins énergétiques

Puissance (W) = Nombre d'appareil × Puissance unitaire

Exemple : Puissance des LED salles (W) = 124 × 18 = 2 232 W

Energie (Wh/j) = Puissance × Durée d'utilisation quotidienne

Exemple : Energie des LED salles (Wh/j) = 2232 × 8 = 17 856 Wh/j

$P_{TOT}(W) = \sum Puissance$ $E_c = \sum Energie$

Tableau 4 puissance et énergie consommé par l'école

Appareils	Nombre	Puissance unitaire(W)	Durée d'utilisation quotidienne (h)	Puissance	Energie
LED salle	124	18	8	2 232	17 856
LED sanitaire, S-profs, restaurant	6+6+10	18	2	396	792
LES Poste d'agent	1	18	12	18	216
Hublot	30	15	1	450	450
Frigo Administration	1	300/24h	24	12,5	300
Frigo Restaurant	1	2000/24h	24	83,33	2000
PC	2	150	8	300	2400
Imprimante	1	150	1	150	150
Pompe d'eau	1	600	1	600	600
				P _{TOT}	E _c
				4 241,83 W	24 764Wh /j

➤ Calcule de la puissance et le nombre d'onduleur

De la fiche technique de l'onduleur dans l'Annexe B :

Le rendement de l'onduleur est de $97\% < \eta_{ond} < 96,5\%$

Donc on calcule avec 96%

$$\frac{P_{TOT} \times 1,25}{0,96} = P(W) \quad \frac{4241,83 \times 1,25}{0,96} = 5\,523,21\,W$$

On choisit un onduleur sa puissance de sortie (AC) est supérieure à 5 523,21W qui est l'onduleur de 6000 W (De la fiche technique de l'onduleur Annexe B)

Output (AC)					
Rated power (at 230 V, 50 Hz)	3000 W	3680 W	4000 W	5000 W ¹⁾	6000 W
Max. apparent power AC	3000 VA	3680 VA	4000 VA	5000 VA ¹⁾	6000 W
Nominal AC voltage / range	220 V, 230 V, 240 V / 180 V to 280 V				
AC power frequency / range	50 Hz, 60 Hz / -5 Hz to +5 Hz				
Rated power frequency / rated grid voltage	50 Hz / 230 V				
Max. output current	16 A	16 A	22 A ²⁾	22 A ²⁾	26.1 A
Power factor at rated power	1				
Adjustable displacement power factor	0.8 overexcited to 0.8 underexcited				
Feed-in phases / connection phases	1 / 1				

Le nombre maximum et minimum des panneaux pouvant être connectés à l'onduleur

$$\begin{aligned} \text{taille maximale de la chaîne} &= \frac{\text{Tension DC maximum (onduleur)}}{\text{Tension à circuit ouvert(panneau)}} \\ &= \frac{\text{Tension DC maximum}}{V_{oc}} \\ &\quad \text{taille minimale de la chaîne} \\ &= \frac{\text{Plage de tension MPP (onduleur)}}{\text{Tension à puissance maximal(panneau)}} \\ &= \frac{\text{Plage de tension MPP}}{V_{max}} \end{aligned}$$

ELECTRICAL DATA (STC)

Peak Power Watts-P _{MAX} (Wp)*	390
Power Output Tolerance-P _{MAX} (W)	
Maximum Power Voltage-V _{MPP} (V)	40.0
Maximum Power Current-I _{MPP} (A)	9.75
Open Circuit Voltage-V _{oc} (V)	48.5
Short Circuit Current-I _{sc} (A)	10.30
Module Efficiency η _m (%)	19.0

taille maximale de la chaîne = $\frac{600}{48,5} = 12,37$ Alors 12

panneaux

taille minimale de la chaîne = $\frac{210}{40} = 5,25$ Alors 6

panneaux

➤ Détermination du nombre des panneaux

$$\text{Puissance pour couvrir la consommation (W)} = \frac{E_c \times 1,25}{I_r}$$

I_r : duré d'ensoleillement 6h/jour

1,25 : facteur de correction et de sécurité

$$\text{Puissance pour couvrir la consommation (W)} = \frac{24764 \times 1,25}{6} = 5\,159,166\,Wc$$

D'après la fiche technique du panneau solaire on doit calculer la puissance de panneau dans les conditions météorologiques

De la fiche technique du panneau photovoltaïque dans l'Annex A : Coefficient Température (P_{max})= -0,35%/°C

$$\text{Température (NOCT)}= 41^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Perte de puissance} = -0,35 \times (41 - 25) = -5,6\%$$

Donc la puissance du panneau de 390W dans les conditions météorologiques les plus proches de la réalité est :

$$P = \text{Puissance du panneau maximal} \times \frac{(100 - \text{perte de puissance})}{100}$$

$$P = 390 \times \frac{(100 - 5,6)}{100} = 368,16\text{W}$$

$$\text{Nombre de panneau} = \frac{\text{puissance pour couvrir la consommation}}{\text{Puissance d'un seul panneau}}$$

$$\text{Nombre de panneau} = \frac{5159,166}{368,16} = 14,01 \approx 14 \text{ panneaux}$$

Le montage sera

Au niveau de l'entrée A de l'onduleur (7 panneaux en série) en parallèle (avec 7 autres panneaux en série)

Vérification si on passe la plage de tension à l'entrée de l'onduleur

$$V_{\text{champ}} = 7 \times 48,5 = 339,5 \text{ V} < \text{Tension DC maximum (Max input voltage) } 600\text{V}$$

$$I_{\text{sc}} = I_{\text{cc}} = 10,30 \times 2 = 20,60 \text{ A} < \text{Courant DC de court-circuit maximum (Max DC short-circuit current input A) } 22\text{A}$$

input (DC)	5500 Wp	5500 Wp	7500 Wp	7500 Wp	9000 Wp
Max. generator power	5500 Wp	5500 Wp	7500 Wp	7500 Wp	9000 Wp
Max. input voltage			600 V		
MPP voltage range	110 V to 500 V	130 V to 500 V	140 V to 500 V	175 V to 500 V	210 V to 500 V
Rated input voltage			365 V		
Min. input voltage / initial input voltage			100 V / 125 V		
Max. input current input A / input B			15 A / 15 A		
Max. DC short-circuit current input A / input B			22 A / 22 A		
Number of independent MPP inputs / strings per MPP input			2 / A:2; B:2		

➤ La section des câbles

La longueur (L) dans les calculs correspondons à les deux câbles rouge et noir (le plus et le moins) exemple L= 10m c à dire que 10m câble rouge et 10m câble noir

Entre champ PV Boite de jonction

$$L = 10\text{m} \quad V = 48,5 \times 7 = 339,5 \text{ V} \quad I = 10,30 \text{ A}$$

$$\rho : 0,0185 \quad \varepsilon : 0,02$$

$$S = \frac{2 \times L \times I \times \rho}{\varepsilon \times V} \text{ (mm}^2\text{)} \quad S = \frac{2 \times 10 \times 10,30 \times 0,0185}{0,02 \times 339,5} = 0,5 \text{ mm}^2 = 4 \text{ mm}^2$$

Cable solaire 20 m de 4 mm² (20 m pour le champ complet) on a pris la section de 4 mm² pour éviter le surchauffement du câble en cas de surcharge

Entre boite de jonction et l'armoire DC

$$L = 30\text{m} \quad V = 48,5 \times 7 = 339,5 \text{ V} \quad I = 10,30 \times 2 = 20,60$$

A

$$\rho : 0,0185 \quad \varepsilon : 0,02$$

$$S = \frac{2 \times L \times I \times \rho}{\varepsilon \times V} \text{ (mm}^2\text{)} \quad S = \frac{2 \times 30 \times 20,60 \times 0,0185}{0,02 \times 339,5} = 3,36 \text{ mm}^2 = 4 \text{ mm}^2$$

Cable solaire 30 m de 6 mm² on a pris la section de 6 mm² pour éviter le surchauffement du câble en cas de surcharge

Entre l'armoire DC et l'onduleur

A l'entrée A

L= 2 m

V= 48,5 × 7 = 339,5 V

I= 10,30 × 2 = 20,60

A

ρ : 0,0185

ε : 0,02

$$S = \frac{2 \times 2 \times 20,60 \times 0,0185}{0,02 \times 339,5} = 0,224 = 0,5 \text{ mm}^2$$

Cable DC 2m de 4mm² on a pris la section de 4 mm² pour éviter le surchauffement du câble en cas de surcharge

Entre l'onduleur et l'armoire AC

L= 2 m

V= 220 V

I= 22 A

ρ : 0,0185

ε : 0,02

$$S = \frac{2 \times 2 \times 22 \times 0,0185}{0,02 \times 220} = 0,35 = 0,5 \text{ mm}^2$$

Entre l'armoire AC et compteur S= 0,5 mm²

Cable AC 6m de 2*2,5mm² on a pris la section de 2,5 mm² pour éviter le surchauffement du câble en cas de surcharge

Cable mise à la terre

10m section 25mm² pour les panneaux

10m section 10mm² pour les armoires

➤ Les éléments de protection électrique

Fusible pour les branches

La tension de fonctionnement d'un fusible est 1,15 x Vco x modules raccordés en série

1,15×48,5×7= 390,42 V

Le calibre des fusibles 1,5×Icc ≤ calibre fusible ≤ 2× Icc

1,5×10,30 ≤ calibre fusible ≤ 2× 10,30.

15,45 A ≤ calibre fusible ≤ 20,6 A

Nous choisirons un fusible de type gG de calibre **18 A** de taille et de tension maximale **400 VCC**.

Comme nous avons 2 branches, il nous faut 2 fusibles de 18 A avec 2 portes fusible

Sectionneur DC

Sectionneur (7 panneaux en série en parallèle avec 7 autres panneaux)

- Tension assignée du fusible ≥ 1,15 x Vco x Nms

Tension assignée du fusible ≥ 1,15×48,5×7= 390,42 V

- Intensité nominale ≥ 1,5 x Icc x NBP

Intensité nominale ≥ 1,5 x 10,30 x 2 = 30,9 A

Nous choisirons un interrupteur sectionneur de type SBN240 constitué de 2 pôles ; d'intensité nominale **32 A** ; et de tension maximale **400 Vcc**.

Parafoudre DC

Le parafoudre DC choisi est de type SPD-DCMZ-TYPV3 de :

Courant maximal : 40 kA

Tension maximale 1000 Vdc

Parafoudre AC

Le parafoudre AC choisi est de type SPD-ACMZ-TY4V de :

Courant maximal : 40 kA

$U_{CPV} = 320 \text{ V}$

Disjoncteur différentiel AC 6000/220V

Nombre de pôles : 1P+N

Calibre 32A

Tension : 220VAC

Conforme à la norme IEC61009

Compteur (Smart meeter)

Un compteur bidirectionnel Permet de contrôler la quantité d'énergie prélevée sur le réseau et celle qui est réinjectée dans le réseau grâce au système d'énergie solaire.

Remarque : On n'a pas utilisés des batteries car notre installation est déjà connectée au réseau public, donc, s'il y a un mauvais fonctionnement du système photovoltaïque (éclairage ou température) notre charge consomme l'énergie de ce réseau et donc on calcule la différence pour la facture. Pour cela on a utilisé un compteur de « production » et de « consommation ».

3.4.3. Devis quantitatif & estimatif

Tableau 5 Devis quantitatif & estimatif

N°	Désignation des travaux	Unité	Quantité	Montoant DA
1	F/P panneau photovoltaïque 390 W monocristallin y compri connecteur MC4	U	14	300 000
2	F/P de support en charpente métallique galvanisé supportant tous les panneaux photovoltaïque avec une inclinison 32°	U	14	105 000
3	F/P Onduleur solaire connecté au réseau 6000 (W) avec Smart meeter et toutes sujétions de bonne exécution	U	1	400 000
4	Socle de béton	U	8	10 000
5	F/P cable solaire de 4 mm ² (deux couleurs différent RN) y compri connecteur MC4 et toutes sujétions de bonne exécution	ML	25	12 000
6	F/P cable solaire de 6 mm ² (deux couleurs différent RN) y compri connecteur MC4 et toutes sujétions de bonne exécution	ML	37	27 000
7	F/P cable DC de 4 mm ² (deux couleurs	ML	4	2 000

	différent RN) y compri connecteur MC4 et toutes sujétions de bonne exécution			
8	F/P cable AC de 2x2,5 mm ² (deux couleurs différent RN) et toutes sujétions de bonne exécution	ML	8	4 000
9	F/P cable mise à la terre de 25 mm ² toutes sujétions de bonne exécution	ML	15	10 000
10	F/P cable mise à la terre de 10 mm ² toutes sujétions de bonne exécution	ML	15	8 000
11	F/P boite de jonction IP65 le coffret doit être muni : - 2 fusibles et porte fusible	U	1	8 000
12	F/P coffret DC le coffret doit être muni - 1 Fusible et porte fusible - 1 Parafoudre - 1 Interrupteur sectionneur	U	1	19 000
13	F/P coffret AC le coffret doit être muni - 1 Disjoncteur différentiel - 1 Parafoudre	U	1	8 700
14	F/P piquet de mise à la terre et toutes sujétions de bonne exécution	U	1	5 000
15	F/P Tube à LED avec réglette T8 18W	U	147	127 600
16	F/P hublot avec lampe LED 15W	U	30	24 000
F/P : Fourniture et Pose		TOTAL EN HT (hors taxe)		1 070 300
		TVA (19%)		203 357
		TOTAL EN TTC (Tous Taxe compris)		1 273 657

La durée du projet :

La durée du projet :

Pour finaliser le projet de cette installation photovoltaïque connecté au réseau il nous faut 20 jours au minimum

3jour pour l'installation et le reste des jours pour compléter la paprace des papiers et assurer l'achat et la livraison du materiel et produits néssésaire

3.5. L'inspection et la remise du projet

3.5.1. Les principaux appareils de mesure pour l'inspection

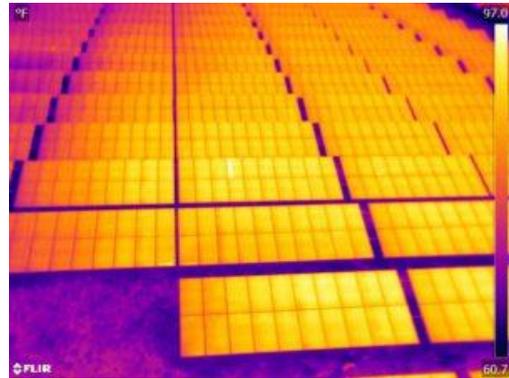
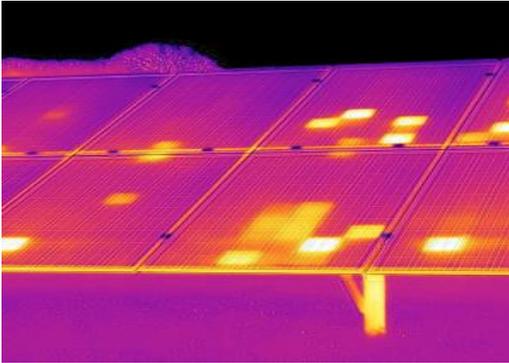
a- Mesure de terre et résistivité des sols

Cet appareil vérifie la résistance et assurer une bonne prise à la terre du système afin de s'assurer qu'il correspond aux codes applicables et aux exigences du projet



b- imageur thermique

L'utilisation de caméras d'imagerie thermique pour l'inspection des systèmes photovoltaïques permet une localisation rapide des défauts potentiels au sein de la cellule et du module, ainsi que la détection de possibles problèmes d'interconnexions électriques. Les inspections s'effectuent dans des conditions normales de fonctionnement et ne nécessitent aucun arrêt du système.[14]



c- Analyseur de la qualité de l'énergie

L'analyseur de qualité d'énergie est aussi en mesure de réaliser des mesures d'énergie ainsi que pour déterminer le facteur de puissance et l'angle de phase. Cela permet une analyse rapide des valeurs de mesure actuelles et vous donne une vision du courant, de la tension et de la puissance.



d- Compteur de courant et de tension :

Avec cet appareil, vous pouvez faire :

- * Contrôle en temps réel de la tension du groupe série à partir des panneaux photoélectriques
- * Inspection en temps réel des courants des panneaux PV après leur connexion.
- * Assurez-vous que les lignes de mise à la terre sont connectées aux panneaux et aux pièces du système



e- Scanner du système solaire (Kit de test solaire) :

Cet appareil effectue les vérifications suivantes :

- Inspection et livraison de systèmes photovoltaïques
- Vérification de la tension en circuit ouvert
- Vérification du court-circuit
- Examen d'isolement
- Contrôle de continuité.
- Vérifier la sortie du système
- mesure instantanée du rayonnement solaire.



3.5.2. La remise du projet :

Les étapes de préparation du système pour la remise du projet :

- 1 Terminez toutes les étapes d'installation.
- 2 Effectuez une inspection visuelle de tous les composants du système.
- 3 Effectuer des contrôles électriques pour s'assurer que toutes les pièces fonctionnent correctement

De par sa conception, y compris les contrôles de tension, diélectrique et continuité.

- 4 Vérifiez le fonctionnement de l'onduleur, son arrêt et le temps de réponse.
- 5 S'assurer que les plans exécutifs sont préparés et conformes à la réalité.

3.6. Conclusion

L'importance du dimensionnement des systèmes photovoltaïques est pratiquement évidente pour s'adapter aux conditions météorologiques spécifiques de chaque zone afin d'éviter le gaspillage des ressources économiques du pays dans des systèmes surdimensionnés ou à l'inverse dans des systèmes sous dimensionnés et abandonnés.

Dans ce chapitre nous avons présenté La méthode de dimensionnement pour un système photovoltaïque connecté au réseau ainsi que tous les étapes à faire pour le réussir, ensuite, après avoir définies les besoins et caractéristiques d'une école de 12 salles, ce qui nous permettra de faire des calculs avec des fiches techniques du panneau et onduleur on grid, nous avons trouvé des résultats bien définis pour avoir terminé et réalisé le projet de cette école de Blida. En dernier lieu nous avons décrit Les étapes de préparation du système pour la remise du projet.

Chapitre 4 : Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté aux réseaux

4.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons définir un modèle simple et applicable d'un système PV connecté aux réseaux. Ce modèle doit être modélisé de telle façon que tous les paramètres sont facilement calculés et en évitant le plus possible les équations complexes.

Ce système est compris un champ photovoltaïque (PV array), un convertisseur DC-AC monophasé en pont H (inverter), un système de contrôle du convertisseur DC-AC, Charge et réseau public (Load & Utility Grid).

Le contrôle de la puissance, ainsi que la modélisation et la simulation ont été effectués sous le logiciel MATLAB/Simulink (v2020).

4.2. L'outil Matlab/Simulink

MATLAB fait également partie d'un ensemble d'outils intégrés dédiés au traitement du Signal. En complément du noyau de calcul Matlab, l'environnement comprend des modules optionnels qui sont parfaitement intégrés à l'ensemble :

- Une vaste gamme de bibliothèques de fonctions spécialisées (Toolboxes).
- Simulink, un environnement puissant de modélisation basée sur les schémas-blocs et de simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires.
- Des bibliothèques de blocs Simulations spécialisés (Blocksets).
- D'autres modules dont un Compilateur, un générateur de code C, un accélérateur.

Un ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal : le DSP Workshop. SIMULINK est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques. Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal [13].

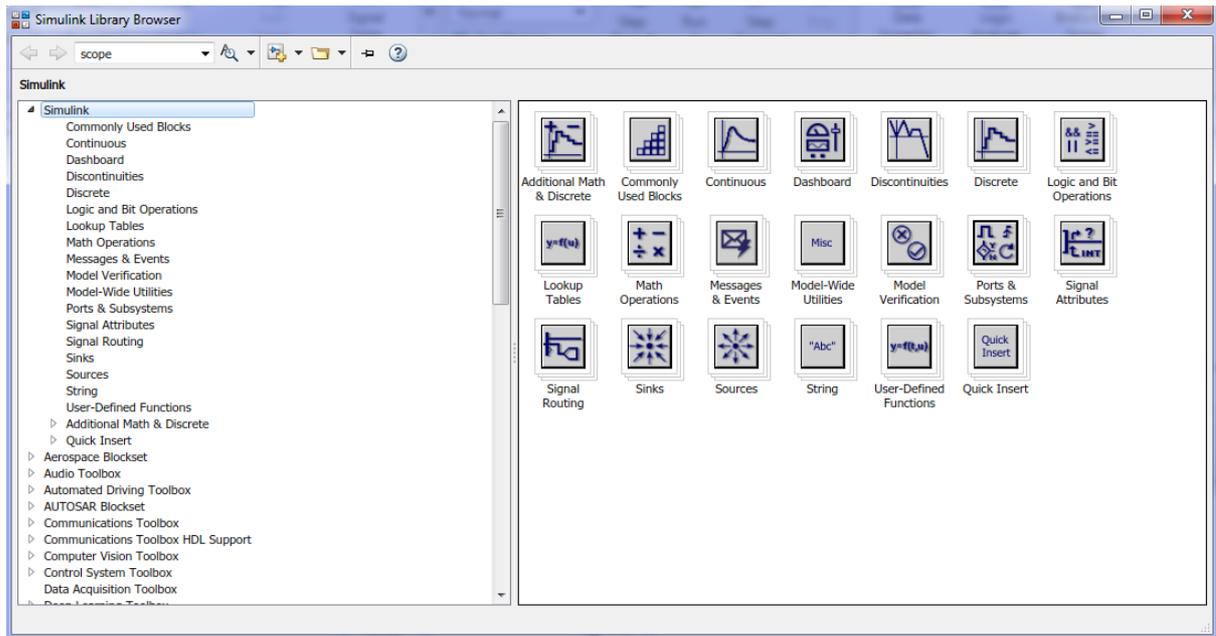


Figure 4-1 : Bibliothèque SIMULINK

4.3. Système proposé

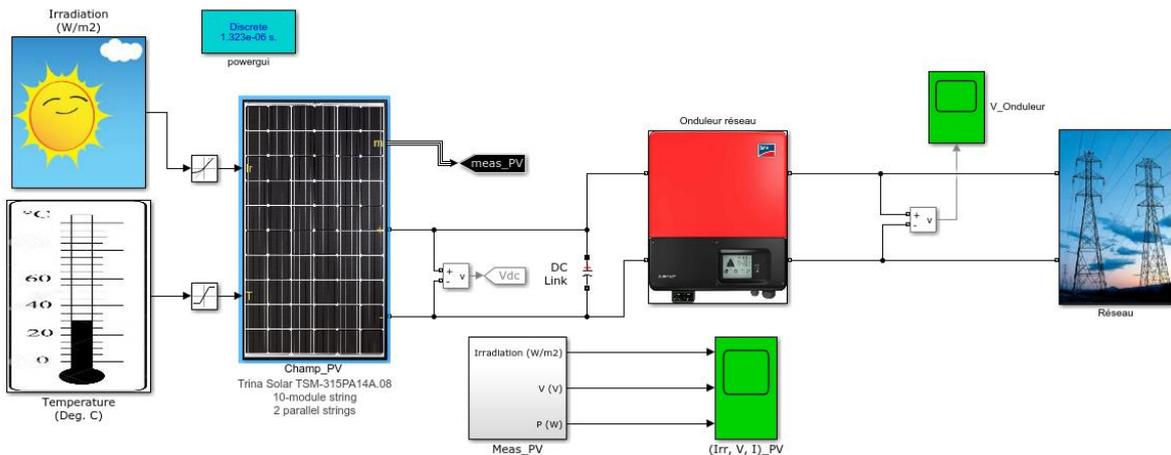


Figure 4-2 : Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque connecté aux réseaux 6KW

4.3.1. Le champ PV :

Le champ PV constitué de modules PV connectés en série et en parallèle. Le bloc du champ PV possède deux entrées qui permettent de fournir des données variables sur l'irradiation solaire (entrée Ir en W/m^2) et la température (entrée T en degrés C).

Dans notre exemple, l'installation photovoltaïque est constituée d'une chaîne de 20 modules Trina Solar TSM-315 connectés en série et en parallèle (10 en série et 2 en parallèle). À 25 degrés C et avec un rayonnement solaire de $1000 W/m^2$, la chaîne peut produire 6352 W.

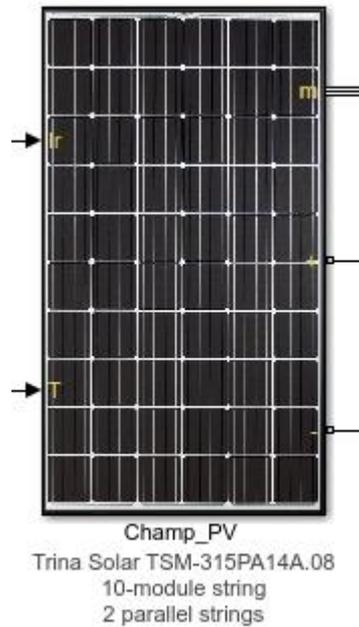


Figure 4-3 : *Champ PV*

4.3.2. Onduleur réseau

- Convertisseur DC/AC monophasé :

L'onduleur est modélisé à l'aide d'un module IGBT monophasé à pont complet commandé par PWM (H-bridge).

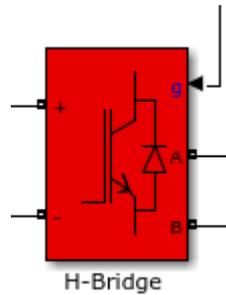


Figure 4-4 : *Convertisseur DC-AC monophasé à pont complet*

- Filtre LCL :

La topologie du filtre est la configuration classique LCL avec les inducteurs répartis de manière égale entre la ligne et les branches neutres.

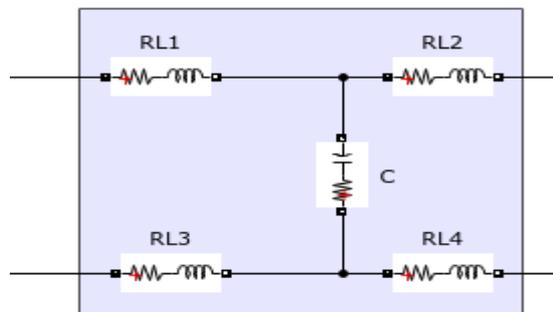


Figure 4-5 : *Filtre LCL*

- Contrôle de l'onduleur :

Le système de contrôle contient cinq grands sous-systèmes basés sur Simulink® :

Contrôleur MPPT : Le contrôleur MPPT (Maximum Power Point Tracking) est basé sur la technique "Perturb and Observe". Ce système MPPT fait varier automatiquement le signal de référence VDC du régulateur VDC de l'onduleur afin d'obtenir une tension continue qui extraira la puissance maximale de la chaîne PV.

Régulateur VDC : Déterminer la référence Id (courant actif) requise pour le régulateur de courant.

Régulateur de courant : Sur la base des références de courant Id et Iq (courant réactif), le régulateur détermine les tensions de référence requises pour l'onduleur. Dans notre exemple, la référence Iq est fixée à zéro.

PLL et mesures : Nécessaire pour la synchronisation et les mesures de tension/courant.

Générateur PWM : Utilise la méthode de modulation bipolaire PWM pour générer des signaux de tir vers les IGBT. Dans notre exemple, la fréquence porteuse du PWM est fixée à 3780 Hz (63*60).

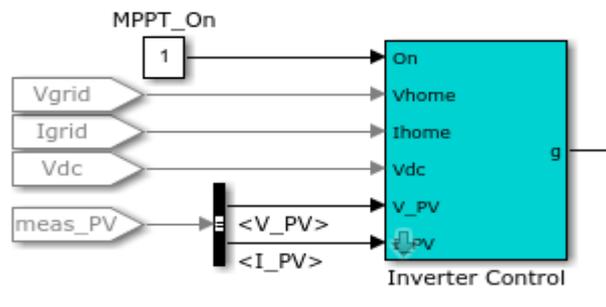


Figure 4-6 : Contrôleur du convertisseur

Parameters		
Nominal Values:		
Power (VA)	Frequency (Hz)	
6000	60	
Primary voltage (Vrms LL)	DC voltage (V)	
220	600	
MPPT Controller:		
Output increment (V)	Output limits [Upper Lower]	Output initial value (V)
0.003	[500 210]	365

Figure 4-7 : Paramètres du contrôleur

4.3.3. Réseau public et la charge :

Le réseau est modélisé en utilisant un transformateur typique monté sur un poteau et une source de courant alternatif idéale de 14,4 kVrms. L'enroulement secondaire de 220 V du transformateur est à prise centrale et le fil neutre central est mis à la terre par une petite résistance R_g . La charge résidentielle (10 kW / 4 kvar, 220 Vrms) est répartie de manière égale entre les deux bornes "chaudes" (110 V). (figure4-8)

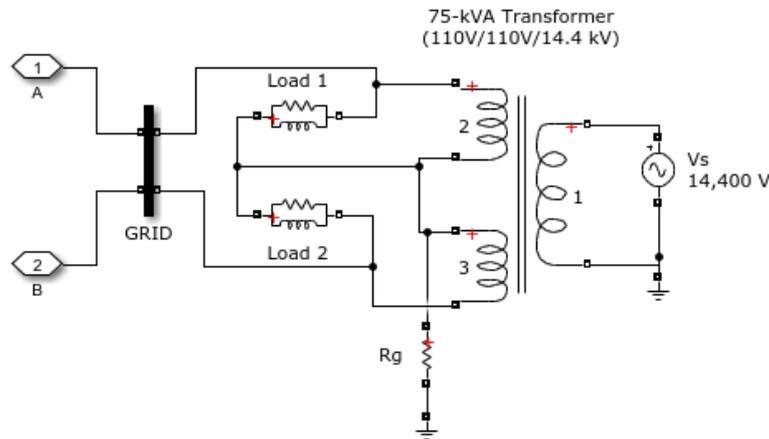


Figure 4-8 : Bloc du réseau public et la charge

4.3.4. Résultat de simulation du système :

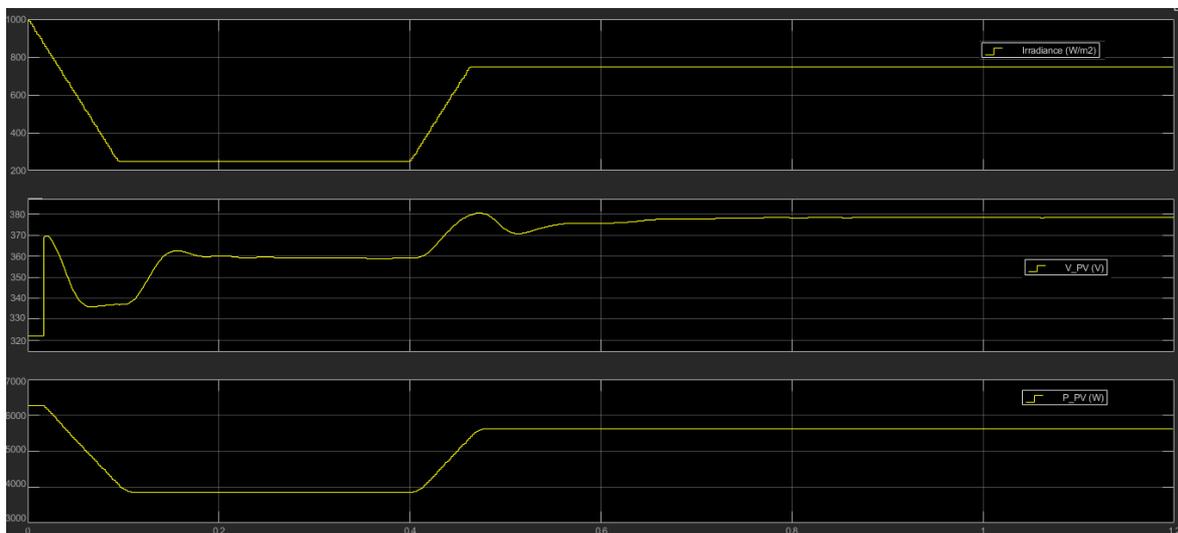


Figure 4-9 : Résultat de la simulation du champ PV (Irradiation, V_{pv} , P_{pv})

L'irradiation initiale d'entrée du modèle de réseau PV est de 250W/m² et la température de fonctionnement est de 25 degrés C. Lorsque $t=0,25$ sec, nous obtenons une tension PV (V_{PV}) de 360 V et la puissance extraite (P_{PV}) du réseau est de 3900 W. À $t=0,4$ sec, l'irradiation solaire passe rapidement de 250 W/m² à 750 W/m². En raison du fonctionnement du MPPT, le système de contrôle augmente la référence VDC à 379V afin d'extraire la puissance maximale de la chaîne PV (5560 W).

Ces valeurs correspondent bien aux valeurs attendues.

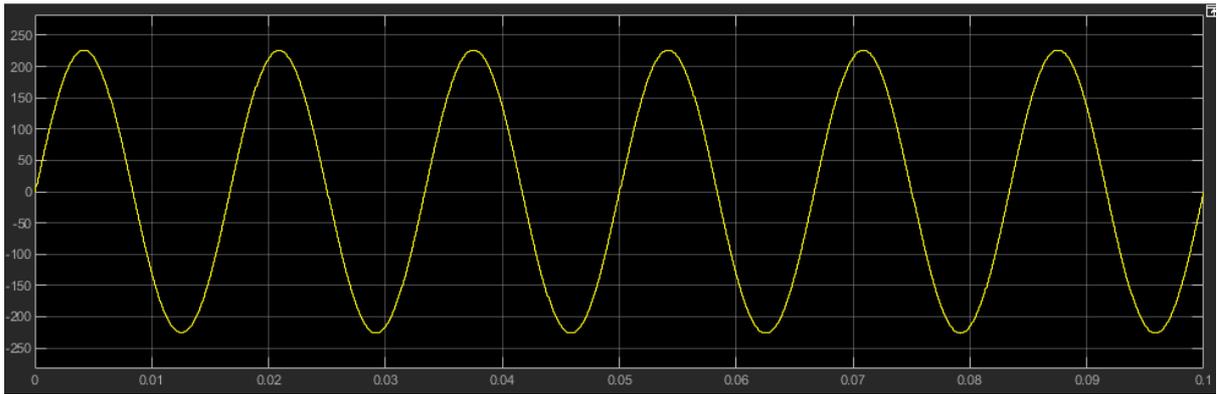


Figure 4-10 : *Résultat de la simulation du sorti de l'onduleur (Vinv)*

4.4. Conclusion :

- Matlab Simulink nous a beaucoup aidés dans la modélisation et la simulation de ce système, et surtout dans les résultats de la simulation.
- Actuellement, nous sommes satisfaits de ce simple exemple, mais nous travaillons à le développer et à le renforcer à l'avenir après avoir acquis plus d'expérience dans Simulink, si Dieu le veut, et le rendre très proche de la réalité.

Conclusion générale

Ce mémoire qu'on a présenté concerne le fonctionnement et le dimensionnement des composants électriques pour les systèmes photovoltaïques connecté au réseau électrique.

Dans un premier temps, on a donné des généralités sur les systèmes PV, principe de l'effet PV, cellule PV. Ainsi les quatre différentes configurations des synsystèmes photovoltaïques.

Dans un deuxième temps, on a décrit tous les composants électriques d'un système ON-GRID tel que le générateur, système de pose, les éléments de protection, et on a bien détaillé les types d'onduleurs réseau le fonctionnement et le mécanisme de la poursuite pour l'extraction de la puissance maximale basée sur l'algorithme perturbation et observation.

Ensuite, on a présenté la procédure et les étapes pour effectuer un dimensionnement d'un système photovoltaïque raccordé au réseau, on a traité l'exemple d'une école de 12 salles, on a déterminé le devis du projet et on a vu les mesures d'inspection avant la remise du projet.

Enfin, on a démontré tout le processus en utilisant Matlab/Simulink qui a englobé toute ces parties pour simuler un système photovoltaïque connecté au réseau. Les résultats obtenus lors de la simulation ont démontré que la commande MPPT « perturbation et observation » effectuent correctement leurs rôles.

Et donc Avec le raccordement au réseau, notre système produit de l'électricité qui est ensuite utilisée normalement. Tout excédent de production d'électricité est exporté sur le réseau

Bibliographie et Webographie

Bibliographique

- [1] Photovoltaic systems engineering / Roger Messenger, Jerry Ventre. SECOND EDITION
- [2] F. Chekired, « Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA », mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.
- [3] S. M. Ait-Cheikh, « Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques », Thèse de Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.
- [4] Michael Boxwell. Solar Electricity Handbook .2012 Edition
- [5] A. Ould Mohamed Yahya, A. Ould Mahmoud et I. Youm. Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque. Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11 N°3, 2008, 473 – 483
- [6] Onduleur réseau. Trans énergie. L'énergie du développement durable.
- [7] Cédric CABAL, « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électrique dédié à la conversion photovoltaïque », Thèse doctorat, Université Toulouse 3. 15 décembre 2008
- [8] Violaine Didier. « Les Onduleurs pour Systèmes Photovoltaïques Fonctionnement ». Rapport rédigé sous la direction de Bruno Gaidon. Aout 2007
- [9] Dr.MM.Bouzaki cours energies renouvelables photovoltaïque.USDB
- [10] Dr. Mohamed ZELLAGUI Maître de Conférences Université de Batna 2. Comptage et Compteurs Électrique. IFEG Centre de Formation Ain M'lila.
- [11] institut bruxellois pour la gestion de l'environnement. Module : photovoltaïque. Cours : DIMENSIONNEMENT D'UNE INSTALLATION PV.
- [12] Connecteurs MC4 fiche technique
- [13] : [Hamidi Aissa." Etude expérimentale d'un capteur photovoltaïque : Influence d'angle d'inclinaison". Mémoire de Licence énergétique. Université Mohamed Boudiaf de M'sila]

Webographie

[I] <<https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16696>>

[II] <https://www.wattneed.com/fr/syst%C3%A8mes-de-montage/1455-systeme-de-pose-au-sol-pour-panneaux-photovoltaiques-0712971128842.html>

[III] <https://www.libow.fr/blog-avis/blog/les-differents-types-de-pose-pour-les-panneaux-solaires/>

[IV]<https://www.monkitsolaire.fr/blog/onduleur-central-ou-micro-onduleur-que-choisir--n58>

[V]:<https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/Algeria>

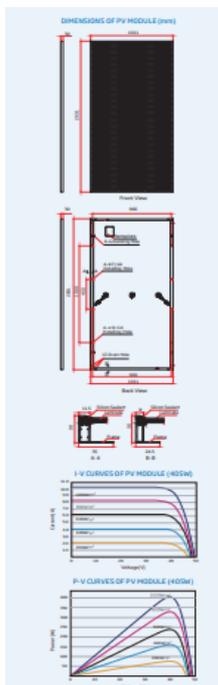
[VI]:<https://fr.weatherspark.com/y/47103/M%C3%A9t%C3%A9o-habituelle-%C3%A0-Blida-Alg%C3%A9rie#Sections-GrowingSeason>

Annexes

Annexe A

Les panneaux solaires :

Pour réussir le choix des panneaux solaires, techniquement il faut tout d'abord savoir les conditions météorologiques de la région ainsi que les technologies des cellules photovoltaïques disponible, faire des tests pour évaluer la qualité des panneaux et enfin l'analyse et la comparaison par la lecture des fiches techniques des panneaux solaire disponible dans le marché comme elle montre La figure suivante :



ELECTRICAL DATA (STC)						
Peak Power Watts-Pmax (Wp)*	390	395	400	405	410	415
Power Output Tolerance-Pmax (%)	0 +5					
Maximum Power Voltage-Vmp (V)	40.0	40.3	40.5	40.7	40.9	41.1
Maximum Power Current-Impp (A)	9.75	9.86	9.92	10.0	10.07	10.15
Open Circuit Voltage-Voc (V)	46.5	46.7	46.9	47.2	47.4	47.6
Short Circuit Current-Isc (A)	10.30	10.37	10.45	10.52	10.59	10.66
Module Efficiency η (%)	19.0	19.2	19.5	19.7	20.0	20.2

ELECTRICAL DATA (NOCT)						
Maximum Power-Pmax (Wp)	295	299	303	307	310	314
Maximum Power Voltage-Vmp (V)	37.7	37.9	38.1	38.3	38.5	38.7
Maximum Power Current-Impp (A)	7.83	7.89	7.95	8.01	8.06	8.12
Open Circuit Voltage-Voc (V)	45.8	46.0	46.2	46.5	46.6	46.8
Short Circuit Current-Isc (A)	8.29	8.35	8.41	8.47	8.52	8.58

MECHANICAL DATA	
Cell Configuration	Monocrystalline
Cell Dimension	144 cells (6 × 24)
Module Dimensions	2020 × 1013 × 30 mm (79.56 × 39.88 × 1.18 inches)
Weight	25.8 kg (57.3 lb)
Front Glass	2.0 mm (0.08 inches), High Transmission, AR Coated Heat Strengthened Glass
Encapsulant Material	EVA
Back Glass	2.0 mm (0.08 inches), Heat Strengthened Glass
Frame	30 mm (1.18 inches) Anodized Aluminium Alloy
J-Box	IP 68 rated
Cables	Photovoltaic Technology Cable 4.0mm ² (0.006 inches ²) Portrait: N 140mm (5.5113.22 inches) Landscape: N 140mm (5.5113.22 inches)
Connector	Tyco TS4

TEMPERATURE RATINGS		MAXIMUM RATINGS	
NIHDT (nominal Module Operating Temperature)	+45°C (113°F)	Operational Temperature	-40 ~ +85°C
Temperature Coefficient of Pmax	-0.20%/°C	Maximum System Voltage	1500V DC (60)
Temperature Coefficient of Voc	-0.25%/°C	Maximum DC (DC)	1500V DC (60)
Temperature Coefficient of Isc	0.04%/°C	Max Series Fuse Rating	25A

WARRANTY		PACKAGING CONFIGURATION	
12 year Product Workmanship Warranty		Modules per box	32 pieces
30 year Power Warranty		Modules per 40 container	704 pieces

Conditions de Test Standard (STC) :

- Masse d'air AM 1,5
- Irradiation 1000W/m²
- Température des cellules

25°C

Température Nominale des Cellules (NOCT) :

- Irradiation 800W/m²
- Masse d'air AM 1,5
- Vitesse du vent 1m/s
- Température ambiante

20°C

Fiche technique panneaux solaire 390-415W

➤ La lecture de la fiche technique

➤ Caractéristique Electrique (STC)

Puissance Maximal (Pmax)	390 Wp	395 Wp	400 Wp	405 Wp	410 Wp	415 Wp
Tension à Puissance Maximal (Vmax)	40 V	40,1 V	40,3 V	40,5 V	40,7 V	40,9 V
Courant à Puissance Maximum (Cmax)	9,75 A	9,86 A	9,92 A	10 A	10,07 A	10,15 A
Tension Circuit Ouvert (Voc)	48,5 V	48,7 V	49 V	49,2 V	49,4 V	49,6 V
Courant Circuit Court (Isc)	10,3 A	10,37 A	10,45 A	10,52 A	10,59 A	10,66 A
Efficacité Module	19 %	19,2 %	19,5 %	19,7 %	20 %	20,2 %
Tolérance de Puissance (+)	+5 %	+5 %	+5 %	+5 %	+5 %	+5 %

Tableau : caractéristique électrique en STC

On fait remarque aux toutes les caractéristiques électriques indiqué pour chaque module

➤ Caractéristique Electrique en NOCT

Puissance Maximal (Pmax)	295 Wp	299 Wp	303 Wp	307 Wp	310 Wp	314 Wp
Tension à Puissance Maximal (Vmax)	37,7 V	37,9 V	38,1 V	38,3 V	38,5 V	38,7 V
Courant à Puissance Maximum (Cmax)	7,83 A	7,89 A	7,95 A	8,01 A	8,06 A	8,12 A
Tension Circuit Ouvert (Voc)	45,8 V	46 V	46,3 V	46,5 V	46,6 V	46,8 V
Courant Circuit Court (Isc)	8,29 A	8,35 A	8,41 A	8,47 A	8,52 A	8,58 A

Tableau : caractéristique électrique en NOCT

La puissance maximale P_{max} en (NOCT) est généralement inférieure de la puissance P_{max} en (STC) de 70 à 75% pour le bon produit.

➤ **Caracteristiques Matériel**

Dimension Module	2031x1011x30 mm
Poids	26,8 kg
Type Cellule	Monocristalline
Numéro Cellule	144
Type de Verre	Tempéré, Traitement Anti-Reflet, Transparence Forte
Type d'encapsulation	EVA
type de Trame	Alliage Aluminium Anodisé
Protection Boîte de Jonction	IP 68
Section Transversable du Câble	4 mm ²
Longeur Câble	1400 mm

Tableau : caractéristique matériel

On mentionne de ce tableau : Le type des cellules, numéro cellule, dimension module, poids.

➤ **Caractéristique de Température**

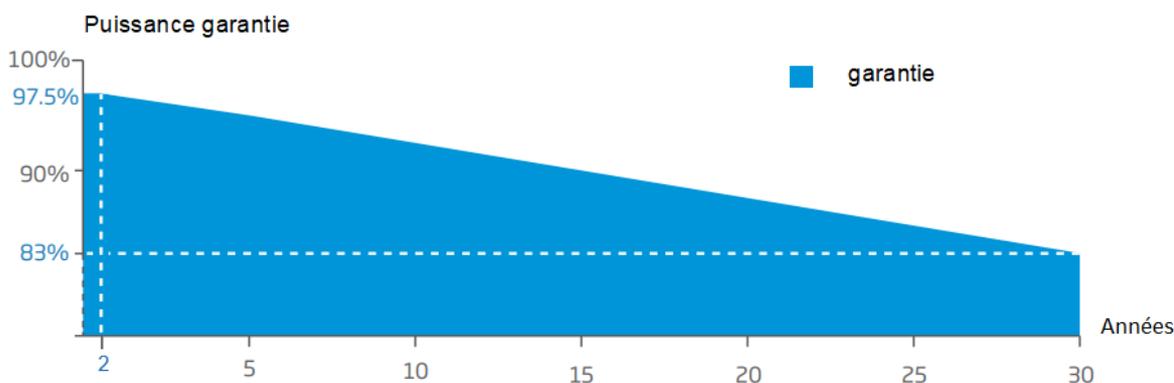
Température (NOCT)	41±3 °C
Gamme de Température	-40–85 °C
Coefficient Température (Pmax)	-0,35 %/°C
Coefficient Température (Voc)	-0,25 %/°C
Coefficient Température (Isc)	0,04 %/°C

➤ **Caractéristiques Maximum**

Tension Maximale du Système	1500 V
Caractéristiques Fusibles en Série	20 A

➤ **Caractéristiques Garantie (Warranty)**

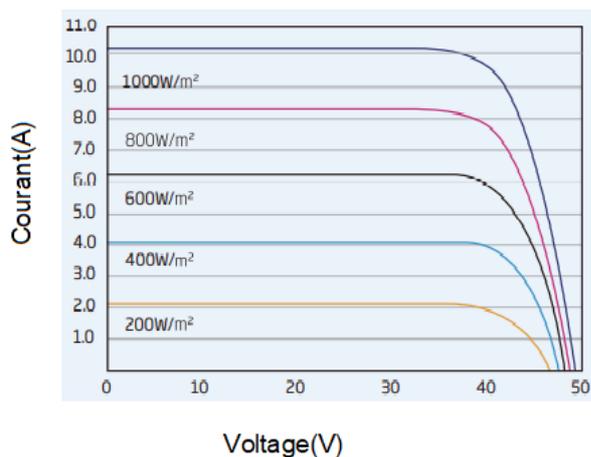
Garantie de 12 ans sur la fabrication du produit
Garantie de 30 ans sur l'alimentation électrique



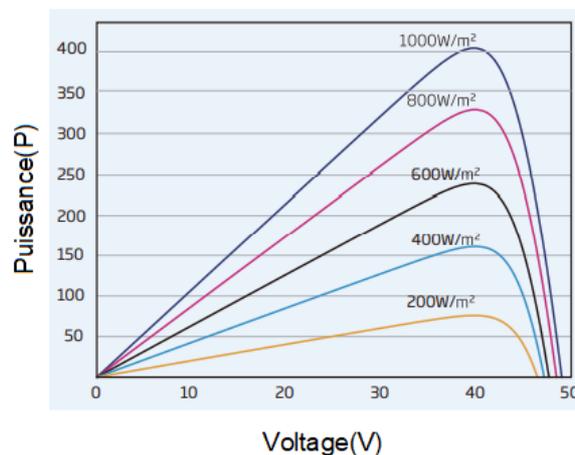
➤ Garantie de performance

Graphique de garantie de performance

La figure ci-dessus montre un graphique de la puissance garantie (%) en fonction du temps (Années). On remarque que la garantie de performance du panneau solaire, qui est de 97,5, descend jusqu'à 83% pendant 30 ans. Et donc de la 2^{ème} année à la 30^{ème} année, la baisse de puissance annuelle moyenne ne dépassera pas 0,5%. Le taux de dégradation est entre 0,3-0,7% chaque année pour le bon produit.



La courbe I-V du module PV (405W)



La courbe P-V du module PV (405W)

Les courbes I-V et P-V du module (405W)

Calcul de l'efficacité du module à partir de la fiche technique :

Efficacité de module PV

$$= \frac{\text{puissance du panneau (W)}}{\text{surface du panneau (m}^2\text{)} \times \text{Irradiation maximal (1000W/m}^2\text{)}} \times 100$$

Exemple

Puissance du panneau 390W et la surface = 2 053 341 mm²

L'irradiation = 1000W/m²

$$\text{Efficacité} = \frac{390}{2\,053\,341 \times 10^{-6} \times 1000} \times 100 = 18,9934$$

Efficacité=19%

Calcul du facteur de forme

C'est un indicateur qui indique l'efficacité du panneau photovoltaïque et sa valeur est compris entre 0 et 1 et plus que le nombre est élevé plus l'efficacité est élevée pour le panneau. Le facteur de forme ou Fill Factor est calculé avec l'équation suivante

$$\text{FF} = \frac{P_{max}}{P_T} = \frac{I_M \times V_M}{I_{sc} \times V_{oc}}$$

Exemple

Puissance maximale du panneau 390W

Courant court-circuit (I_{sc}) 10,3A et la tension à circuit ouvert (V_{oc}) 48,5V

$$\text{FF} = \frac{390}{10,3 \times 48,5} = 0,78$$

Calcul du coefficient de perte de puissance à cause de la chaleur pour le panneau photovoltaïque

La perte de la puissance (POWER LOSSES) C'est un paramètre qui montre la performance du panneau photovoltaïque dans les conditions météorologiques les plus proches de la réalité en termes de faible rayonnement et de température élevée.

Perte de puissance

$$= \text{coefficient température } (P_{max}) \times (\text{Température } (NOCT) - 25^\circ\text{C})$$

Exemple

De la fiche technique : Coefficient Température (P_{max})= -0,35%/°C

Température (NOCT)= 41°C

$$\text{Perte de puissance} = -0,35 \times (41 - 25) = -5,6\%$$

Et donc la puissance du panneau de 390W dans les conditions météorologiques les plus proches de la réalité est :

$$P = \text{Puissance du panneau maximal} \times \frac{(100 - P_{loss})}{100}$$

$$P = 390 \times \frac{(100 - 5,6)}{100} = 368,16\text{W}$$

Annexe B

Les onduleurs connectés aux réseaux (On grid) :

Comme on a vu avant il existe trois types pour les onduleurs connectés aux réseaux, le tableau suivant résume une comparaison entre les trois types à des critères différents :

	Micro-onduleur	Onduleur string	Onduleur central
Capacité du système	Pour chaque panneau	Jusqu'à 100KW	Plus de 250KW
Fonctionnement dans l'ombre	Haut	Bas	Bas
Fonctionnement si le type de panneau est différent	Haut	Bas	Bas
Fonctionnement lorsque les modules diffèrent en place d'installation	Haut	Bas	Bas
Control de fonctionnement de chaque panneau	Oui	Non	Non
Danger du feu et la haute tension	Non	Oui	Oui
Montage	Facile	Moyen	Difficile
Développement du système	Facile	Moyen	Difficile

Comparaison entre les 3 types des onduleurs réseaux

- Caractéristiques de l'onduleur

Input (DC)					
Max. generator power	5500 Wp	5500 Wp	7500 Wp	7500 Wp	9000 Wp
Max. input voltage	600 V				
MPP voltage range	110 V to 500 V	130 V to 500 V	140 V to 500 V	175 V to 500 V	210 V to 500 V
Rated input voltage	365 V				
Min. input voltage / initial input voltage	100 V / 125 V				
Max. input current input A / input B	15 A / 15 A				
Max. DC short-circuit current input A / input B	22 A / 22 A				
Number of independent MPP inputs / strings per MPP input	2 / A;2; B:2				
Output (AC)					
Rated power (at 230 V, 50 Hz)	3000 W	3680 W	4000 W	5000 W ⁽¹⁾	6000 W
Max. apparent power AC	3000 VA	3680 VA	4000 VA	5000 VA ⁽¹⁾	6000 W
Nominal AC voltage / range	220 V, 230 V, 240 V / 180 V to 280 V				
AC power frequency / range	50 Hz, 60 Hz / -5 Hz to +5 Hz				
Rated power frequency / rated grid voltage	50 Hz / 230 V				
Max. output current	16 A	16 A	22 A ⁽¹⁾	22 A ⁽¹⁾	26.1 A
Power factor at rated power	1				
Adjustable displacement power factor	0.8 overexcited to 0.8 underexcited				
Feed-in phases / connection phases	1 / 1				
Efficiency					
Max. efficiency / European Efficiency	97.0% / 96.4%	97.0% / 96.5%	97.0% / 96.5%	97.0% / 96.5%	97.0% / 96.6%
Protective devices					
Input-side disconnection point	●				
Ground fault monitoring / grid monitoring	● / ●				
DC reverse polarity protection / AC short circuit current capability / galvanically isolated	● / ● / -				
All-pole-sensitive residual-current monitoring unit	●				
Protection class (as per IEC 61140) / overvoltage category (according to IEC 60664-1)	I / III				

Fiche technique d'un onduleur solaire on grid

➤ Entrée DC (Input DC)

On fait remarque essentiellement à :

- Puissance DC maximum pour chaque modèle (Max generator power) 9000W
- Tension DC maximum pour chaque modèle (Max input voltage) 600V
- Plage de tension MPP(T) (MPP voltage range) 210V à 500V

➤ Sortie AC (output AC)

On fait remarque essentiellement à :

- Puissance AC maximum pour chaque modèle (Rated power at 230V 50H) 3680W
- Tension AC nominal pour chaque modèle (nominal AC voltage) 220V, 230V, 240V.
- Courant AC maximum (Max output current) 16A

➤ Efficacité

- Efficacité maximum (Max efficiency) 97%
- Efficacité européenne (European efficiency) 96,4%

La différence entre l'efficacité maximum et l'efficacité européenne : Efficacité européenne est une mesure pondérée de l'efficacité de l'onduleur en fonction de la quantité de charge différente pendant la journée et donc sa valeur est plus pratique. Par contre l'efficacité maximum s'agit d'une mesure de l'efficacité lorsqu'un onduleur fonctionne à sa capacité maximale nominale et cela ne peut se produire que sur des périodes très limitées de la journée

➤ Les dispositifs de protection (Protective devices)

- Point de déconnexion côté entrée
- Surveillance des défauts de terre / surveillance du réseau
- Protection contre l'inversion de polarité DC / capacité de courant de court-circuit AC.

General data	
Dimensions (W / H / D)	435 mm / 470 mm / 176 mm (17.1 inches / 18.5 inches / 6.9 inches)
Weight	17.5 kg (38.5 lb)
Operating temperature range	-25°C to +60°C (-13°F to +140°F)
Noise emission, typical	25 dB(A)
Self-consumption (at night)	5.0 W
Topology	Transformerless
Cooling method	Convection
Degree of protection (as per IEC 60529)	IP65
Climatic category (as per IEC 60721-3-4)	4K4H
Max. permissible value for relative humidity (non-condensing)	100%
Equipment	
DC connection / AC connection	SUNCLIX / AC connector
Display via smartphone, tablet, laptop	●
Interfaces: WLAN / Ethernet / RS485	● / ● / ●
Communication protocols	Modbus (SMA, Sunspec), Webconnect, SMA Data, TS4-R
Shade management: OptiTrac Global Peak / TS4-R	● / ○
Warranty: 5 / 10 / 15 years	● / ○ / ○
Certificates and approvals (more available upon request)	AS 4777.2, C10/11, CE, CEI 0-21, EN 50438, G59/3-4, G83/2-1, DIN EN 62109 / IEC 62109, NEN-EN50438, IEC-EN50438, NT_Ley20.571, ÖVE/ÖNORM E 8001-4-712 & TOR D4, PPDS, PPC, RD1699, TR3.2.1, UTE C15-712, VDE-AR-N 4105, VDE0126-1-1, VFR 2014
Certificates and approvals (planned)	DEWA, IEC 61727, IEC 62116, MEA, NBR16149, PEA, SI4777, TR3.2.2
Country availability of SMA Smart Connected	AU, AT, BE, CH, DE, ES, FR, IT, LU, NL, UK

La suite de la fiche technique d'un onduleur solaire on grid

- Données général (General Data)
 - Température d'utilisation (Operating temperature range) -25°C to +60°C (-13°F to +140°F)
 - Consommation propre durant la nuit (Self-consumption (at night)) 5.0 W
 - Méthode de refroidissement (Cooling method) Convection
 - Classe de protection (Degree of protection (as per IEC 60529)) IP65
- Equipment
 - Affichage (Display)via smartphone, tablet, laptop
 - Interface(Interfaces) WLAN / Ethernet / RS485
 - Garantie (Warranty) 5 ans
 - Certificats et agréments (Certificates and approvals).
- Meilleurs onduleurs solaires existants

Fronius	SolarEdge	SMA
Sungrow		Fimer (ABB)



Onduleurs solaires

Calcule le nombre des panneaux qui peuvent être connecté à l'onduleur :

- Le nombre minimum des panneaux pouvant être connectés à l'onduleur

$$\text{taille minimale de la chaîne} = \frac{\text{Plage de tension MPP (onduleur)}}{\text{Tension à puissance maximal(panneau)}} = \frac{\text{Plage de tension MPP}}{V_{\text{max}}}$$

- Le nombre maximum des panneaux pouvant être connectés à l'onduleur

$$\text{taille maximale de la chaîne} = \frac{\text{Tension DC maximum (onduleur)}}{\text{Tension à circuit ouvert(panneau)}} = \frac{\text{Tension DC maximum}}{V_{\text{oc}}}$$