

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

UNIVERSITE MOUHAMMED BOUDIAF-M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

FILIERE : ELECTROTECHNIQUE

SPECIALITE : ENERGIES RENOUVLABLES EN ELECTROTECHNIQUE



**Mémoire présentée pour l'obtention du diplôme du Master Académique**

**Par : Bourenane Marwan et Arioua Abderrahim**

Mémoire dirigée par : Mr Aissa Chouder

**Intitule**

ETUDE DES PERFORMANCES D'UN CENTRALE PHOTOVOLTAIQUE

(AIN EL MELH)

**Soutenu devant le jury composé de :**

**Encadreur :** Mr Chouder Aissa

.....	Université .....	Président
.....	Université .....	Rapporteur
.....	Université .....	Examineur

**Année universitaire : 2021 /2022**

## Remerciement

Avant tous, nous voulons remercier le bon dieu tout puissant de nous avoir donné la force et la volonté de compléter ce mémoire et pour son aide qu'il m'a donnée durant mes années d'étude.

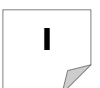
Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon directeur, Monsieur '**Chouder Aissa**', je le remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé tout au long de la période qu'a pris cette étude, ainsi qu'au président et membres du jury qui ont fait l'honneur d'accepter, d'examiner et d'évaluer notre travail.

J'adresse mes sincères remerciements à toutes les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidées mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et de répondre à mes questions durant mes recherches.

Je voudrais également remercier les enseignants du département du génie électrique de l'université Mohammed Boudiaf à M'sila.

Je tiens à remercier vivement les membres de nos deux familles, qui nous ont toujours encouragés et soutenus, sans oublier mes amis qui ont été toujours là pour moi, leur soutien inconditionnel et leur encouragement ont été d'une grande aide.

Enfin, nous remercions, tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire, nous leur exprimons à tous notre profonde reconnaissance.



## Dédicace

Je dédie ce modeste travail a :

A mes parents, ma fierté et mon bonheur, qui toujours me soutenue et qui contribue efficacement aux réussites. 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 mes chères sœurs spécialement 'YAKIN', pour leur soutien moral tout au long de ma vie, sans oubliez mes grands-pères et mes grands-mères.

A toutes mes amis et mes camarades du groupe "Energies Renouvelables Master 2".

A mon binôme Arioua Rahim, ainsi qu'à sa famille.

A toute la famille **BOURENANE** et **KHATIR**

Et à tous ceux qui m'ont aimé et me souhaitent le bonheur et la réussite, je vous dis Merci.

Marwan



## Dédicace

A mes très chers parents qu'ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui et qui ont veillé de guider mes pas durant toute ma vie par leurs aides, Que dieu vous protège.

A mes frères et ma sœur.

A tous mes amis, à mon binôme Bourenane Marwan et sa famille.

A tous le promo 'énergies renouvelables master 2 '

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

Rahim



## Résumé

La demande d'électricité dans le monde ne cesse d'augmenter, ce qui a entraîné une augmentation des problèmes, notamment : le problème des coûts et de la pollution de l'environnement.

Par conséquent, il convient de rechercher d'autres sources de production d'électricité, dont l'une des plus importantes est l'énergie solaire.

De nombreuses centrales solaires dans le monde visent à produire autant d'électricité que possible et à l'injecter dans le réseau et à améliorer l'efficacité de son système, mais il existe certains obstacles à cela.

Donc, pour connaître l'efficacité et l'efficience de ces centrales PV et les améliorer, et pour éviter ces obstacles, il est nécessaire de suivre et d'analyser certains indices d'évaluation et du paramètre qui déterminent les rendements du système.

Ce travail vise à simuler un système solaire photovoltaïque connecté au réseau à l'aide de PVSYST, et le plus important est de calculer, surveiller et analyser divers indicateurs d'évaluation du système et les paramètres de performances tels que les rendements et les pertes, et de connaître l'impact de facteurs externes tels que la météo sur le travail du système et la production d'énergie électrique.

---

**Mots clés :** Système PV, Energie photovoltaïque, injection au réseau, réseau de distribution.

---

## Abstract

The demand for electricity in the world is constantly increasing, which has led to an increase in problems, including : the problem of cost and environmental pollution. Therefore, other sources of electricity generation should be sought, one of the most important of which is solar energy.

Many solar power plants in the world aim to produce as much electricity as possible and inject it into the grid and improve the efficiency of their systems, but there are some obstacles to this.

Therefore, in order to determine the effectiveness and efficiency of these PV plants and improve them, and to avoid these obstacles, it is necessary to monitor and analyze some evaluation indexes and the parameter that determine the yields of the system.

This work aims to simulate a grid-connected solar PV system using PVSYST, and the most important thing is to calculate, monitor and analyze various system evaluation indicators and performance parameters such as yields and losses, and to know the impact of external factors such as weather on the work of the system and the production of electrical energy

## ملخص

الطلب على الطاقة الكهربائية في العالم في تزايد مستمر، وهذا ما نتج عنه زيادة في المشاكل ايضا أبرزها: مشكل التكلفة والتلوث البيئي.

لهذا وجب البحث عن مصادر بديلة لانتاج الطاقة الكهربائية، واحد أبرز هذه المصادر هي الطاقة الشمسية. العديد من محطات الطاقة الشمسية في العالم تهدف الى انتاج أكبر قدر ممكن من الطاقة الكهربائية وحقنها بالشبكة وتحسين كفاءة نظامها، لكن وجود بعض العوائق يحول دون ذلك.

لهذا لمعرفة فعالية وكفاءة هذه المحطات الشمسية الضوئية وتحسينها، وتجنب هذه العوائق، وجب متابعة وتحليل بعض العوامل والمعايير التي تحدد مردود وعمل النظام.

يهدف هذا العمل إلى محاكاة نظام ضوئي شمسي متصل بالشبكة باستخدام برنامج (PVSYST)، وأهم شيء هو حساب ومراقبة وتحليل مختلف مؤشرات تقييم النظام ومعاملات الاداء مثل: الكفاءة والانتاجية والخسائر، ومعرفة تأثير العوامل الخارجية كالطقس على عمل النظام ونتاج الطاقة الكهربائية.

---

الكلمات المفتاحية: الطاقات المتجددة، النظام الكهروضوئي، الدمج في الشبكة، شبكة توزيع الكهرباء.

---

## Table de matières

Remerciement.....	I
Dédicace.....	II
Dédicace.....	III
<b>Résumé.....</b>	<b>IV</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>V</b>
<b>ملخص.....</b>	<b>VI</b>
<b>Table de matières.....</b>	<b>VII</b>
<b>Liste des figures.....</b>	<b>XI</b>
<b>Liste des tableaux.....</b>	<b>XIII</b>
<b>Liste des Symboles et Abréviations.....</b>	<b>XIV</b>
<b>Introduction générale.....</b>	<b>I</b>
<b>Chapitre 1 : État de l'Art sur les énergies renouvelable et Principe de l'effet photovoltaïque.....</b>	<b>4</b>
<b>1 Introduction.....</b>	<b>4</b>
<b>1.1 Les énergies renouvelables.....</b>	<b>4</b>
<b>1.2 Les différents types.....</b>	<b>5</b>
1.2.1 L'énergie solaire.....	5
1.2.2 L'énergie hydraulique.....	6
1.2.3 L'Energie éolienne.....	7
1.2.4 L'Energie géothermique.....	8
1.2.5 La biomasse.....	9
<b>1.3 Les avantages et les inconvénients des énergies renouvelables.....</b>	<b>10</b>
1.3.1 Les avantages.....	10
1.3.2 Les inconvénients.....	10
<b>1.4 L'Energie solaire.....</b>	<b>10</b>
1.4.1 Le soleil.....	10
<b>1.4.1.1 Repérage du soleil dans le ciel.....</b>	<b>11</b>
<b>1.4.1.1.1 La longitude.....</b>	<b>11</b>
<b>1.4.1.1.2 La latitude.....</b>	<b>11</b>
<b>1.4.1.1.3 Déclinaison du soleil.....</b>	<b>12</b>
<b>1.4.1.1.4 L'angle horaire.....</b>	<b>12</b>
1.4.2 Rayonnement solaire.....	13
<b>1.4.2.1 Composants de rayonnement solaire.....</b>	<b>13</b>
<b>1.4.2.2 Disponibilité de l'énergie solaire en un lieu donnée.....</b>	<b>14</b>

<b>1.5</b>	<b>Conversion PV (l'effet photovoltaïque)</b> .....	14
1.5.1	Structure d'une cellule solaire.....	15
1.5.2	Principe de fonctionnement .....	15
1.5.3	Le rendement d'une cellule photovoltaïque .....	16
1.5.4	Les différents types de cellules photovoltaïque.....	16
1.5.4.1	<b>Les cellules au silicium cristallin</b> .....	16
1.5.4.2	<b>Les cellules en couches minces</b> .....	17
1.5.4.3	<b>Les cellules organiques</b> .....	18
<b>1.6</b>	<b>Le générateur photovoltaïque et ses performances</b> .....	18
1.6.1	Caractéristique courant-tension.....	18
1.6.2	Groupement des cellules en série.....	20
1.6.1	Groupement des cellules en parallèle .....	20
<b>1.7</b>	<b>Conclusion</b> .....	20
<b>Chapitre 2 : Les systèmes photovoltaïques et les paramètres de performance</b> .....		22
<b>2</b>	<b>Les Système photovoltaïques et les paramètres de performances</b> .....	22
<b>2.1</b>	<b>Introduction</b> .....	22
<b>2.2</b>	<b>Systèmes photovoltaïques</b> .....	22
2.2.1	Définition .....	22
2.2.2	Types de systèmes PV .....	22
2.2.2.1	<b>Système PV autonome</b> .....	22
2.2.2.1.1	<b>Les systèmes au fil du soleil</b> .....	23
2.2.2.1.2	<b>Les systèmes avec stockage</b> .....	24
2.2.2.2	<b>Système PV raccorde au réseau</b> .....	24
2.2.2.2.1	<b>Système PV raccorde au réseau avec injection totale</b> .....	25
2.2.2.2.1.1	<b>Sans stockage</b> .....	25
2.2.2.2.1.2	<b>Avec stockage</b> .....	26
2.2.2.2.2	<b>Systèmes PV raccordés au réseau avec autoconsommation</b> .....	26
2.2.2.2.2.1	<b>Autoconsommation sans stockage</b> .....	26
2.2.2.2.2.2	<b>Autoconsommation avec stockage</b> .....	27
<b>2.3</b>	<b>Les éléments constitutifs d'un système photovoltaïque raccordé au réseau et leurs topologies de champs</b> .....	28
2.3.1	Hacheur (convertisseur DC/DC).....	28
2.3.1.1	<b>Topologie avec un Hacheur Rangé</b> .....	28
2.3.1.2	<b>Topologie avec un Hacheur Modulaire Parallèle</b> .....	29
2.3.1.3	<b>Topologie avec un hacheur modulaire série</b> .....	30
2.3.2	Onduleur (convertisseur DC/AC).....	30
2.3.2.1	<b>Onduleur central</b> .....	31

2.3.2.2	<b>Onduleur rangée</b> .....	31
2.3.2.3	<b>Onduleur modulaire</b> .....	32
2.3.2.4	<b>La commande MPPT</b> .....	34
2.3.2.4.1	<b>Principe de fonctionnement</b> .....	34
2.3.2.4.2	<b>Type du méthode MPPT</b> .....	35
2.4	<b>Avantages et inconvénients du système raccorde au réseau</b> .....	35
2.4.1	Avantages.....	35
2.4.2	Inconvénients.....	36
2.5	<b>Les paramètres de performances du système photovoltaïques</b> .....	36
2.5.1	Rendements spécifiques.....	36
2.5.1.1	<b>Rendement du réseau (YA) :</b> .....	36
2.5.1.2	<b>Rendement de référence (YR)</b> .....	36
2.5.1.3	<b>Rendement final PV (YF)</b> .....	37
2.5.1.4	<b>Rendement du champ PV (<math>\eta_A</math>)</b> .....	37
2.5.1.5	<b>Rendement de l'onduleur photovoltaïque (<math>\eta_{inv}</math>)</b> .....	37
2.5.1.6	<b>Rendement du système PV (<math>\eta_{sys}</math>) :</b> .....	37
2.5.1.7	<b>Facteur de capacité (CF) :</b> .....	38
2.5.1.8	<b>Rapport de rendement (PR)</b> .....	38
2.5.2	Les pertes.....	38
2.5.2.1	<b>Perte de système (LS)</b> .....	38
2.5.2.2	<b>Perte de capture de réseau (LC)</b> .....	38
2.5.2.3	<b>Perte de capture thermique (LCT)</b> .....	39
2.5.2.4	<b>Perte de capture divers (LCM)</b> .....	39
2.6	<b>Conclusion</b> .....	39
<b>Chapitre 3 : Analyse des performances d'une centrale électrique raccorde au réseau Cas d'étude (résultat et discussion)</b> .....		
3	<b>Analyse des performances d'une centrale électrique raccorde au réseau</b> .....	40
3.1	<b>Introduction</b> .....	40
3.2	<b>Simulation d'un système PV raccorde au réseau avec le logiciel PVSYST</b> .....	41
3.2.1	Présentation du projet.....	41
3.2.1.1	<b>Site</b> .....	41
3.2.1.2	<b>Cordonne géographiques du site Ain el Melh</b> .....	42
3.2.2	Réalisation du projet.....	42
3.2.2.1	<b>Choix d'orientation du panneau</b> .....	42
3.2.2.2	<b>Dimensionnement d'un système réseaux :</b> .....	44
3.2.3	Caractéristiques de Module PV.....	45
3.2.4	Les caractéristiques techniques du module PV.....	46

3.2.5	Caractéristique de l'onduleur.....	47
3.2.6	Diagramme des pertes .....	47
3.2.7	Energie de sortie du système PV .....	49
3.2.8	Facteurs de production normalisés .....	49
3.2.9	Indice de performance (PR) .....	50
<b>3.3</b>	<b>Résultats et discussion .....</b>	<b>51</b>
3.3.1	Valeurs mensuelles du paramètre du système.....	51
3.3.2	Analyse du données météorologiques.....	51
3.3.3	Analyse du Rendements.....	53
3.3.4	Analyse du Rapport de rendement et facteur de capacite.....	54
3.3.5	Analyse du Rendement de champs, d'onduleur et du système .....	55
3.3.6	Analyse des pertes.....	56
<b>3.4</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>56</b>
	<b>Conclusion générale.....</b>	<b>57</b>
	<b>Bibliographie.....</b>	<b>59</b>

## Liste des figures

Figure 1-1 Les énergies renouvelables .....	5
Figure 1-2 l'énergie solaire .....	6
Figure 1-3 Production d'électricité par énergie Hydraulique .....	7
Figure 1-4 La conversion de l'Energie mécanique en électricité .....	8
Figure 1-5 Géothermie basse énergie	Figure 1-6 Géothermie haute énergie ....
Figure 1-7 fonctionnement d'une centrale biomasse .....	9
Figure 1-8 Schéma de longitude.....	11
Figure 1-9 Schéma de longitude.....	12
Figure 1-10 Schéma de déclinaison du soleil.....	12
Figure 1-11 Schéma de l'angle horaire .....	13
Figure 1-12 Composants du rayonnement solaire .....	14
Figure 1-13 Principe de fonctionnement de cellule.....	15
Figure 1-14 cellules au silicium cristalline.....	17
Figure 1-15 cellules en couches minces.....	17
Figure 1-16 cellules organiques.....	18
Figure 1-17 Courbe caractéristique courant-tension.....	19
Figure 1-18 Groupement des cellules en série .....	20
Figure 1-19 Groupement des cellules en parallèle .....	20
Figure 2-1 Schéma principe d'un système PV autonome avec stockage.....	23
Figure 2-2 schéma d'un principe d'un système PV autonome sans stockage (pompage au fil du soleil).....	24
Figure 2-3 système PV raccorde au réseau.....	25
Figure 2-4 système PV à injection totale sans stockage.....	25
Figure 2-5 système PV à injection totale avec stockage .....	26
Figure 2-6 système PV autoconsommation sans stockage .....	27
Figure 2-7 système PV autoconsommation avec stockage.....	27
Figure 2-8 La topologie « Hacheur rangée ».....	29
Figure 2-9 La topologie « hacheur modulaire parallèle ».....	29
Figure 2-10 La topologie « hacheur modulaire série » .....	30
Figure 2-11 Topologie onduleur central.....	31
Figure 2-12 Topologie Onduleur rangée .....	32
Figure 2-13 Topologie Onduleur modulaire.....	33
Figure 2-14 Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.....	34
Figure 2-15 Principe du fonctionnement d'une MPPT .....	35
Figure 3-1 coordonnées géographique et météorologique du site AIN EL MELH par PVGIS..	42
Figure 3-2 Etapes de simulation d'un système photovoltaïque.....	43
Figure 3-3 Choix d'orientation du panneau.....	44
Figure 3-4 Choix du paramètre du module et de l'onduleur.....	45
Figure 3-5 caractéristiques de module PV.....	46
Figure 3-6 Courbes de caractéristiques du module PV.....	46
Figure 3-7 Caractéristique de l'onduleur.....	47
Figure 3-8 Diagramme de perte .....	48
Figure 3-9 Courbe d'énergie injectée au réseau.....	49
Figure 3-10 Histogramme des pertes et d'énergie utile produite.....	50
Figure 3-11 Histogramme de ratio de performance .....	50
Figure 3-12 Évolution de la température de cellule $T_c$ et de l'irradiation solaire $H_t$ .....	52
Figure 3-13 Variation moyenne mensuelle du température $T_a$ et $T_c$ .....	53

<b>Figure 3-14 Valeurs mensuelle du rendements YF, YR et YA .....</b>	<b>53</b>
<b>Figure 3-15 valeur mensuelle de facteur d'utilisation de capacite et de rapport de performance .....</b>	<b>54</b>
<b>Figure 3-16 Variation moyenne mensuelle des rendements de champs, d'onduleur et du système .....</b>	<b>55</b>
<b>Figure 3-17 Valeurs moyennes mensuelles de rendement final, pertes de systèmes et pertes de capture.....</b>	<b>56</b>

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1 Comparaison entre les trois topologies.....</b>	<b>34</b>
<b>Tableau 2 valeurs mensuelles du paramètre du système .....</b>	<b>51</b>

## Liste des Symboles et Abréviations

**2001/77/CE** : Directive définit la prise en compte, dans le réseau, de l'électricité produite à partir de sources renouvelables.

$\lambda$  : longitude.

$\varphi$  : latitude.

$\delta$  : déclinaison solaire.

$\omega$  : angle horaire.

**Si** : le silicium (matériau semi-conducteurs).

**Ge** : le germanium (matériau semi-conducteurs).

**GaAs** : arséniure de gallium (matériau semi-conducteurs).

**BV** : bande de valence.

**e** : électron.

**DDP** : différence de potentiel.

**CIGS** : (Cuivre/indium/gallium/sélénium).

**W** : watt. (Unité de mesure de puissance).

**KWh** : kilowattheure. (Unité de mesure de travail et d'Energie)

**MWh** : méga watt heure. 1MWh=1000KWh.

**U<sub>0</sub>** : tension à vide.

**U<sub>max</sub>** : tension maximale.

**I<sub>max</sub>** : courant maximale.

**DC** : tension/courant continu.

**AC** : tension/courant alternatif.

**DC/DC** : Hacheur(continu-continu)

**DC/AC** : Onduleur(continu-alternatif)

$\alpha$  : rapport cyclique du convertisseur statique.

**I<sub>c</sub>** : courant de court-circuit.

**V<sub>max</sub>** : la tension maximale du module.

**P** : puissance.

**P<sub>c</sub>** : puissance crête.

**MPP** : maximum power point.

**MPPT** : maximum power point Tracking

**GPV** : générateur photovoltaïque.

**PV** : photovoltaïque.

**Cs** : convertisseur statique.

**HT** : haute tension.

**P<sub>0</sub>** : puissance nominale.

**G<sub>0</sub>** : gisement solaire.

**EDC/EA** : l'énergie totale générée par les rangées PV.

**EAC** : l'énergie totale générée par le système PV.

**Aa** : surface globale du champ photovoltaïque.

**YA** : rendement du champ photovoltaïque.

**YR** : rendement de référence.

**YF** : rendement finale.

**η<sub>A</sub>** : rendement de champ photovoltaïque.

**η<sub>inv</sub>** : rendement de l'onduleur photovoltaïque.

**η<sub>sys</sub>** : rendement du système photovoltaïque.

**CF** : facteur de capacité.

**PR** : rapport de rendement.

**Ls** : perte de système.

**Lc** : perte de capture réseau.

**LCT** : perte de capture thermique.

**LCM** : perte de capture divers.

**PVGIS** : (Photovoltaic Geographical Information System)

**GlobInc** : irradiation incidente.

**GlobHor** : irradiation horizontale.

**Ht** : l'irradiation solaire.

**Tc** : température de cellule.

**Ta** : température ambiante.

## Introduction générale

De nos jours, la croissance démographique et l'effet du développement économique cause une forte consommation de l'énergie électrique au monde, et de plus en plus cette Energie devienne un grand problème due à plusieurs raisons : le cout très élevé des principales sources de production d'électricité (pétrole et gaz) et surtout l'impact négatif des déchets des centrales dues à la combustion des ressources fossiles sur l'environnement.

Cela à pousser à penser a des autres sources pour produire l'énergie électrique, qui est les énergies renouvelables, et plus précisément l'énergie solaire et l'énergie éolienne, ces énergies offrent un énorme avantage car ce sont des énergies gratuits, inépuisables et propre.

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables les plus utilisées et le plus abouti à la production de l'électricité d'origine renouvelable. Elle se base sur la conversion directe du rayonnement solaire en électricité [l'effet photovoltaïque], grâce à des modules [ou panneaux] solaires photovoltaïques, ces panneaux on a la capacite de transformer les photons en électron. Ces modules rassemblent, dans un cadre métallique, plusieurs cellules photovoltaïques reliées entre elles afin d'additionner leurs puissances de production d'énergie électrique.

Cette énergie produite par l'effet photovoltaïque résulte de la conversion directe -dans un semi-conducteur- d'un photon en électron. Le module photovoltaïque convertit donc sur place et très simplement l'énergie solaire qu'il reçoit en courant électrique continu. Ce courant électrique continu est ensuite converti en courant électrique alternatif.

Et L'Algérie est probablement le pays Africain et Méditerranéen disposant du potentiel d'énergie renouvelable le plus important à l'échelle régionale, de même que les capacités les plus appropriées au développement et à l'exploitation de ce potentiel. Un potentiel énergétique lié à plusieurs types de sources, mais dont l'énergie solaire demeure la plus importante en disponibilité et puissance et, sans doute aussi, la plus compétitive à développer à l'avenir sous diverses formes

L'Algérie est en effet l'un des plus importants gisements d'énergie solaire au monde avec une durée d'insolation de 2.000 à 3.900 heures par an, et une irradiation journalière de 3.000 à 6.000 Wh/M2, soit l'équivalent de 10 fois la consommation mondiale, est pour

ça Le gouvernement prévoit le lancement de plusieurs projets solaires photovoltaïques d'une capacité totale d'environ 800 MWc d'ici 2020. D'autres projets d'une capacité de 200 MWc par an devraient être réalisés sur la période 2021-2030, actuellement on compte 23 centrales photovoltaïques sur le territoire national. Parmi ces centrales photovoltaïques on distingue la centrale photovoltaïque de Ain El Melh wilaya de Msila Algérie.

La centrale solaire photovoltaïque de la commune d'Ain El Melh, située dans la wilaya de M'sila, a été mise en service le 26 septembre 2017 en présence du ministre de l'Energie, Mustapha Guitouni. Cette centrale, d'une capacité de production de 20 mégawatts d'électricité d'origine renouvelable, représente la première centrale du genre dans la capitale du Hodna. L'investissement lié à la réalisation de cette centrale solaire photovoltaïque est estimé à près de 30 M EUR.

Dans ce contexte, l'objectif de notre travail est de simuler la centrale solaire photovoltaïque de Ain el Melh à l'aide de logiciel PVSYST, et plus précisément de suivre et d'évaluer la performance du système photovoltaïque à travers l'analyse des différents paramètres d'efficacité et de rendement pendant une année.

La mémoire est organisée comme suit :

Le premier chapitre contient un état de l'Art sur les énergies renouvelables, leurs différents types et leurs avantages et inconvénients. On va expliquer aussi le principe de l'effet photovoltaïque, les différents types de cellules PV. Concluons ce chapitre en parlant sur le générateur photovoltaïque et ses caractéristiques.

Dans le deuxième chapitre nous allons présenter en premier lieu le système photovoltaïque , ses deux types(autonome et connecte au réseau ) , les éléments qui le composent et les différents topologies de champs du système raccorde au réseau .la deuxième partie de ce chapitre est concernant les différents paramètres du système photovoltaïque tels que les rendements : final, de référence et du champs , les différents pertes(pertes du système ,de capture de réseau ,de capture divers et de capture thermique) , le facteur de capacite et le rapport de rendement .

Le dernier chapitre présente les résultats de simulation du central PV couple au réseau avec le logiciel PVSYST, le résultat mensuel du calcul de paramètres des systèmes et leurs systèmes analysons les courbes du donnees systèmes rendement, du facteur de

capacité, du rapport de rendement, et d'efficacité d'onduleur, du champ et du système photovoltaïque.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale.

# **Chapitre 1 : État de l'Art sur les énergies renouvelable et Principe de l'effet photovoltaïque**

## 1 Introduction

Ce chapitre présente un état de l'Art sur les énergies renouvelables, on va parler sur les différents types des énergies renouvelables, quelques avantages et inconvénient, et nous allons parler précisément sur l'Energie solaire, principe d'effet photovoltaïque et sur les cellules photovoltaïques.

### 1.1 Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont des énergies inépuisables. Fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la Terre, les chutes d'eau, les marées ou encore la croissance des végétaux, leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes. Actuellement sous-exploitées par rapport à leur potentiel, seuls 15 % de la consommation mondiale d'électricité est couverte par les énergies renouvelables.

Pourtant, l'emploi de ces énergies présente des intérêts non négligeables, lié en particulier à la diminution de la dépendance aux énergies fossiles et particulièrement au pétrole et également à la réduction de l'impact environnemental lié aux émissions de gaz à effet de serre.

Un emploi plus répandu des énergies renouvelables afin de réduire les rejets de gaz carbonique dans l'atmosphère permettrait de respecter les accords du Protocole de Kyoto et, également pour les pays de l'Union Européenne, de respecter la directive 2001/77/CE relative à la promotion de l'électricité produite à partir de source énergétique renouvelables sur le marché intérieur de l'électricité.

Ce rapport, au-delà de la définition des différentes énergies employables à des fins de production électrique Et/ou de chaleur, fait état cependant de retards particulièrement importants au sein de l'Union Européenne et notamment en Italie, pays dans lequel les termes du Livre Blanc (qui définit les objectifs d'utilisation des énergies renouvelables dans chaque pays) sont bien loin d'être atteints. [1]



Figure 1-1 Les énergies renouvelables

## 1.2 Les différents types

### 1.2.1 L'énergie solaire

L'énergie solaire est une source d'énergie qui est dépendante du soleil. Cela signifie que la matière première est le soleil.

Elle se place dans la catégorie des énergies renouvelables puisqu'on la considère comme inépuisable. On dit aussi que c'est une énergie 100% verte car sa production n'émet pas directement de CO<sub>2</sub>. Grâce à cette énergie, il est possible de produire de l'électricité. Elle sera captée par des panneaux solaires ou des centrales thermiques. Ces installations captent les rayons produits par le soleil. Elles convertissent ensuite l'énergie du soleil en électricité. Plus précisément, le principe est de transformer l'énergie portée par les photons dans la lumière, en électricité. C'est là que rentre en jeu la cellule photovoltaïque : lorsqu'elle est exposée à la lumière, elle absorbe l'énergie des photons lumineux. Ces derniers génèrent un courant électrique continu qui sera converti en courant alternatif à l'aide d'un onduleur. Cette électricité produite peut être immédiatement employée pour faire fonctionner vos appareils ou vous éclairer.[2]

On peut distinguer deux types d'énergie solaire : solaire photovoltaïque et solaire thermique.

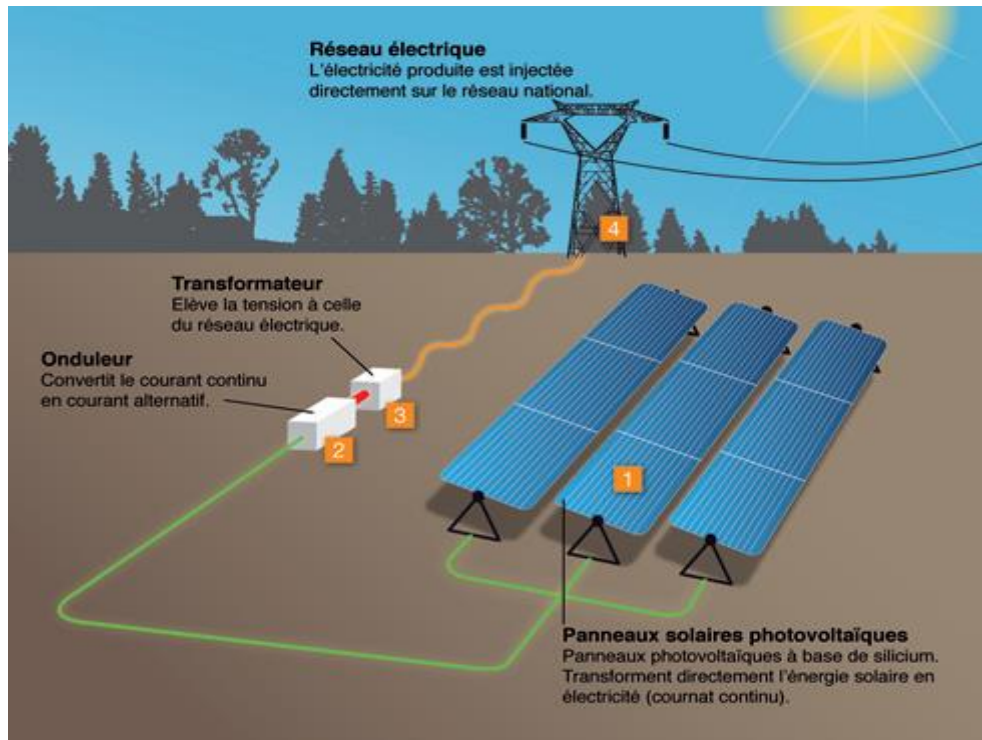


Figure 1-2 l'énergie solaire

### 1.2.2 L'énergie hydraulique

L'énergie hydraulique utilise la force cinétique des déplacements de l'eau sous toutes ses formes (chutes d'eau, courants des rivières et autres cours d'eau) pour produire de l'énergie. Ce processus est une manifestation indirecte de l'énergie solaire et de la force de gravité de la Lune dans le cycle de vie de l'eau : l'énergie solaire provoque des vapeurs d'eau des océans et des mers, qui se transforment en nuages et sont poussés au gré du vent pour se transformer en pluie et neige qui viennent alimenter les lacs, rivières, mers et océans. Ainsi, c'est la conjonction de plusieurs sources d'énergies renouvelables qui participent indirectement à la production d'énergie hydraulique.

Les centrales hydrauliques d'aujourd'hui sont construites à capter la force de l'eau pour faire tourner une turbine, qui elle-même entraîne un générateur électrique produisant de l'électricité injectable sur le réseau.[3]

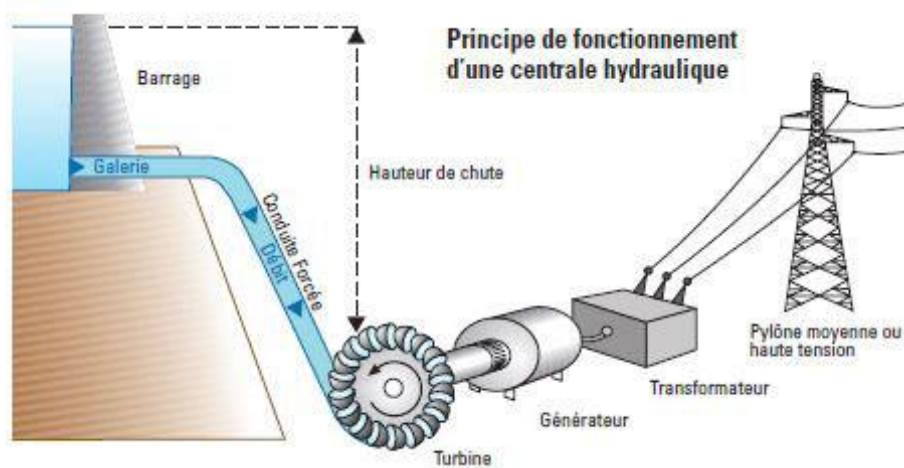


Figure 1-3 Production d'électricité par énergie Hydraulique

### 1.2.3 L'Énergie éolienne

L'énergie éolienne est une source d'énergie qui dépend du vent et est une forme indirecte de l'énergie calorifique du soleil. Le soleil chauffe inégalement la Terre, ce qui crée des zones de températures et de pression atmosphérique différentes tout autour du globe. De ces différences de pression naissent des mouvements d'air, appelés vent. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité dans des éoliennes, appelées aussi aérogénérateurs, grâce à la force du vent. [4]

Une éolienne produit de l'électricité grâce au vent qui met en mouvement un rotor, permettant sa transformation en énergie mécanique. La vitesse de rotation de l'arbre entraîné par le mouvement des pales est accélérée par un multiplicateur. Cette énergie mécanique est ensuite transmise au générateur.[5]

L'énergie électrique ainsi produite peut être distribuée sur le réseau électrique grâce à un transformateur.

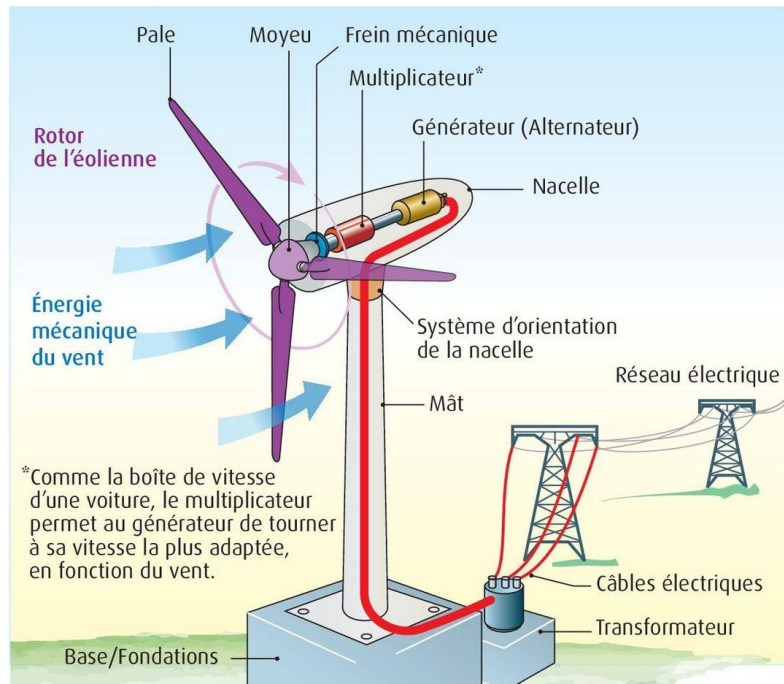


Figure 1-4 La conversion de l'Energie mécanique en électricité

#### 1.2.4 L'Energie géothermique

La chaleur naturellement présente dans le sous-sol de notre planète représente une formidable source d'énergie. Plus on creuse profondément, plus on atteint des températures élevées. La géothermie utilise cette chaleur pour le chauffage et la production d'électricité.[6]

Selon le type de ressources géothermique, son potentiel, sa température et sa profondeur, le mode d'utilisation peut être très différent. Si l'on dispose d'un réservoir géothermique à plus de 100 °C, on préfère convertir cette abondante énergie thermique en électricité. Au contraire si la température de source est nettement inférieure à 100 °C, est un usage thermique direct qui en sera fait, est à dire principalement pour des applications de chauffage.[7] On distingue trois grands types de géothermie, différenciables selon la profondeur, la température ou encore l'utilisation de la ressource de chaleur : la géothermie de très faible à faible énergie (température inférieure à 90 °C), la géothermie de moyenne énergie (température supérieure à 90 °C) et la géothermie de haute énergie (température supérieure à 120 °C).

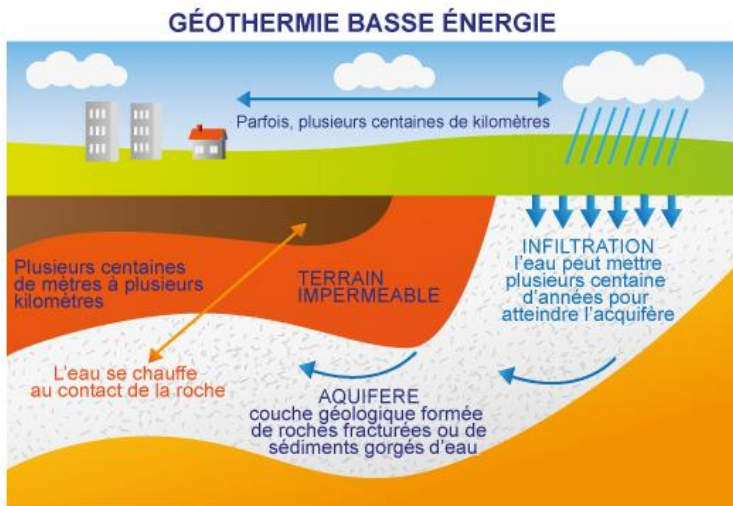


Figure 1-5 Géothermie basse énergie

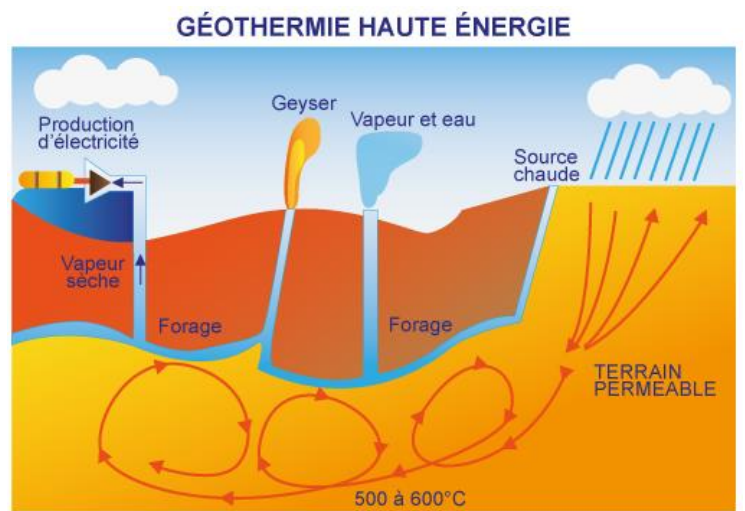


Figure 1-6 Géothermie haute énergie

### 1.2.5 La biomasse

La biomasse désigne l'ensemble des matières organiques d'origines végétales ou animales pouvant se transformer en Energie.

Grâce à la photosynthèse, les plantes utilisent l'énergie solaire pour capturer le gaz carbonique et le stocker sous forme d'hydrates de carbone, tout en assurant leur croissance.

Les principales formes de l'énergie de biomasse sont : les biocarburants pour le transport (produits essentiellement à partir de céréales, de sucre, d'oléagineux et d'huiles usagées) ; le chauffage domestique (alimenté au bois) ; et la combustion de bois et de déchets dans des centrales produisant de l'électricité, de la chaleur ou les deux.[8]

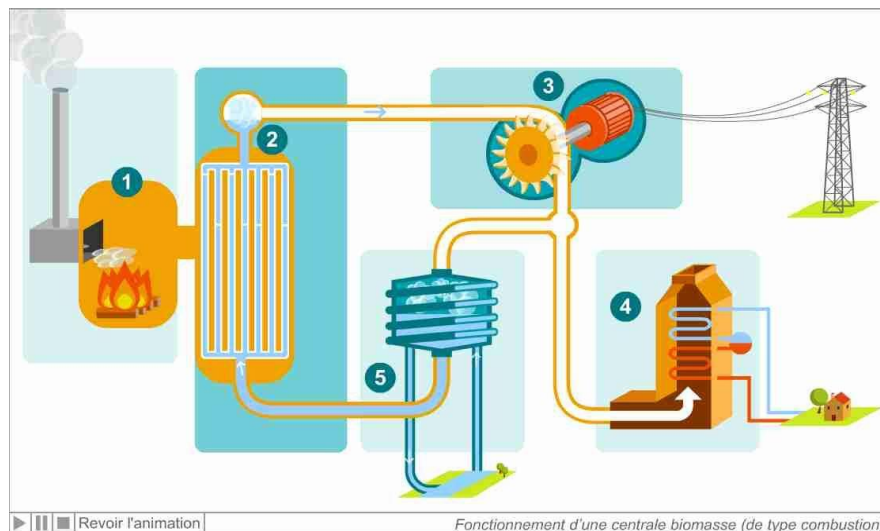


Figure 1-7 fonctionnement d'une centrale biomasse

## 1.3 Les avantages et les inconvénients des énergies renouvelables

### 1.3.1 Les avantages

Les avantages des énergies renouvelables sont nombreux, car ces dernières sont en général propres, sûres et surtout, elles existent en quantité illimitée (contrairement aux énergies fossiles), On cite quelques avantages :

- Des énergies propres : peu de déchets, elles génèrent également peu de déchets, et ces déchets sont parfois recyclables.
- Des énergies gratuites : puisqu'elles sont issues de notre environnement, ces énergies sont gratuites.
- Des énergies inépuisables : le soleil, l'air, l'eau et la géothermie existent en quantité infinie dans l'environnement. [9]

### 1.3.2 Les inconvénients

Malgré les nombreux avantages des énergies renouvelables, ça ne veut pas dire qu'elle n'a aucun des inconvénients, voici quelques exemples :

- Leur disponibilité dépend du climat.
- Un coût d'investissement et d'installation élevés.
- Les systèmes éoliens émettent un bruit, l'Énergie biomasse n'est pas illimitée et les barrages hydroélectriques influent négativement sur la faune.[10]

## 1.4 L'Énergie solaire

Le Soleil représente une source d'énergie inépuisable et présente partout sur Terre, à l'exception de la zone polaire, qui en est privée jusqu'à six mois par an, donc le soleil est tout en tout.[11]

### 1.4.1 Le soleil

Le soleil est une étoile sous forme pseudo physique de masse de  $1.99 \cdot 10^{30}$  (333000 fois de la terre) et de rayon  $r_s = 696000 \text{ km}$  résultant de la condensation d'un nuage interstellaire sous l'effet de la gravité. Ce type de nuage est essentiellement composé d' $\text{H}_2$ (80%), d'He (19%) et le reste (1%) étant un mélange de plus de 100 éléments lourds.

Toute l'énergie du soleil provient des réactions thermonucléaires qui s'y produisent.

#### 1.4.1.1 Repérage du soleil dans le ciel

L'altitude du soleil est une donnée de base pour au moins deux raisons :

- Cette intervention très explicite dans le calcul des apports énergétiques.
- L'implantation à un endroit donné nécessite des recherches par milieu bâti ou naturel.

##### 1.4.1.1.1 La longitude

La longitude  $\lambda$  est une coordonnée géographique définit le positionnement est/ouest d'un point, il sert à déterminer la position d'un point sur le globe terrestre. On ajoute signe de + sur les sites situés à l'est.[12] Aussi est l'angle formé entre le plan méridien d'un lieu et le plan méridien de Greenwich (origine du méridien, 0 degré de longitude). Elle varie de +180 degrés ouest à -180 degrés est.

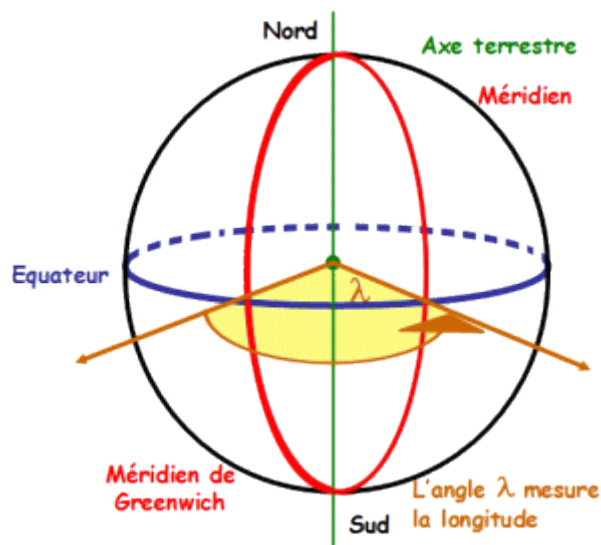


Figure 1-8 Schéma de longitude

##### 1.4.1.1.2 La latitude

La latitude  $\varphi$  peut déterminer tout point relatif à équatorial.[13] Elle varie de + 90 degrés vers le pôle Nord à - 90 degrés vers le pôle Sud.

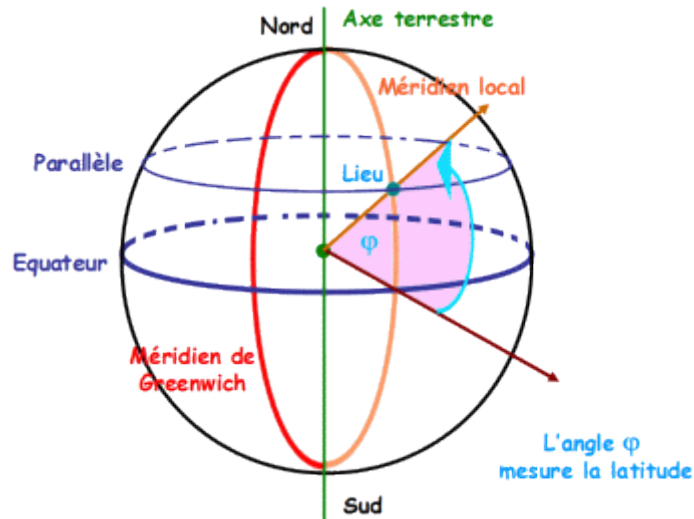


Figure 1-9 Schéma de longitude

#### 1.4.1.1.3 Déclinaison du soleil

La direction du soleil et le plan équatorial terrestre forme un angle on l'appelle la déclinaison solaire  $\delta$ , cette déclinaison varie d'une manière sinusoïdale pendant l'année, elle prend une valeur maximale ( $23.27'$ ) le 22 juin et une valeur minimale ( $-23.27'$ ) le 21 décembre.[13]

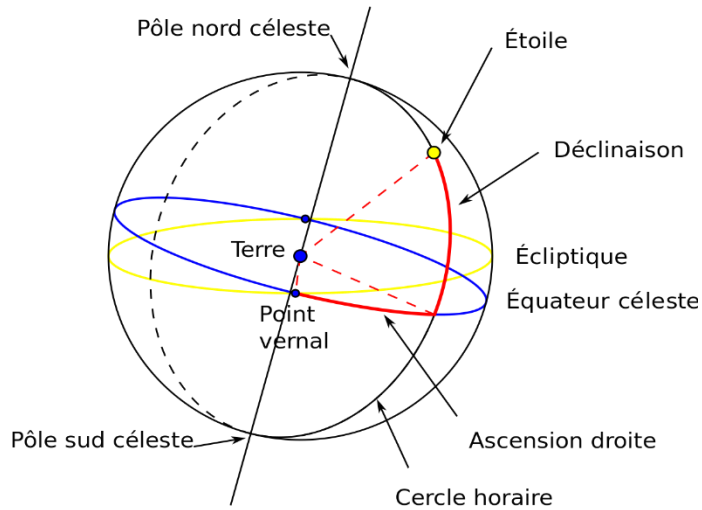


Figure 1-10 Schéma de déclinaison du soleil

#### 1.4.1.1.4 L'angle horaire

La rotation diurne de la terre autour de son axe détermine l'angle horaire du soleil  $\omega$ , A chaque instant, il est plus commode de calculer le temps en degrés plutôt qu'en heures. Unité Les mesures sont des angles horaires (24 heures représentent  $360^\circ$  heures). L'angle horaire est mesuré à partir du midi solaire, s'il est positif avant midi, il est Négatif si c'est

après midi.

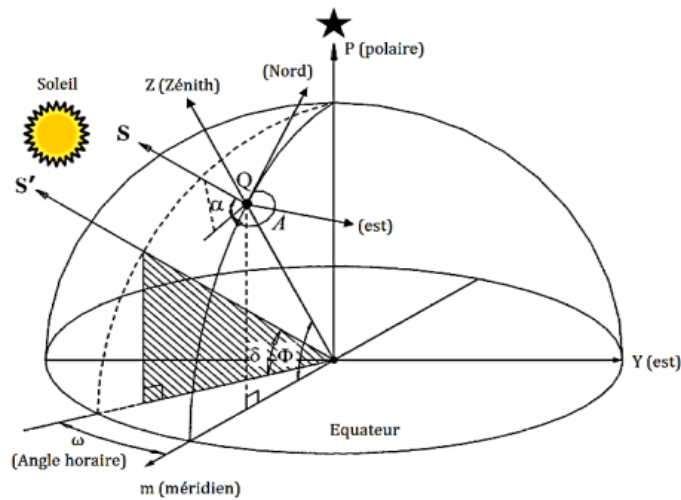


Figure 1-11 Schéma de l'angle horaire

## 1.4.2 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire désigne l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le Soleil. Il se compose donc d'ultraviolets, de la lumière visible, mais également d'ondes radio en plus de rayons cosmiques.[12]

### 1.4.2.1 Composants de rayonnement solaire

- Rayonnement directe : il provient directement du disque solaire sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs.
- Rayonnement diffus : il est dû aux effets de dispersion des composants de l'atmosphère
- Rayonnement réfléchi (ou albedo) : est le rayonnement réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface, cet albedo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige)

## Rayonnement Global =

Rayonnement direct + Rayonnement diffus + Rayonnement réfléchi \*

\*(albédo x rayonnement total horizontal)

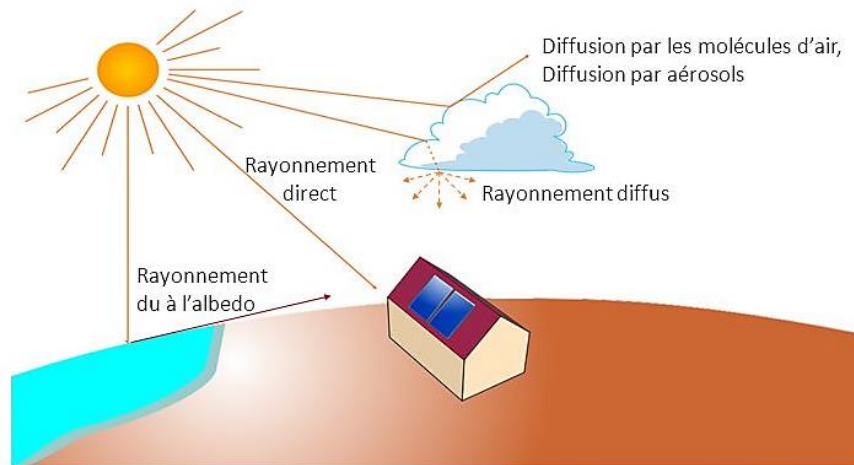


Figure 1-12 Composants du rayonnement solaire

### 1.4.2.2 Disponibilité de l'énergie solaire en un lieu donnée

Le rayonnement solaire dépend fortement de nombreux paramètres :

- La latitude du site (éloignement par rapport à l'Equateur)
- La saison (inclinaison relative de la terre par rapport au soleil qui change au cours de l'année)
- L'heure de la journée (angles variables du soleil dans le ciel)
- Les conditions météo et atmosphériques (pollution, nuages, nébulosité.) [14]

## 1.5 Conversion PV (l'effet photovoltaïque)

La conversion de l'Energie des radiations optiques en Energie électrique est un phénomène physique connu sous le nom "EFFET PHOTOVOLTAÏQUE". Lorsque la lumière du soleil tombe sur certains matériaux appelés SEMI CONDUCTEURS (Si, Ge, Ga, As), les photons qui le construisent sont capables de transférer leurs énergies aux électrons de la bande de valence (BV) pour rompre la liaison covalente qui les tient aux autres atomes. Pour chaque liaison rompue il va y avoir un électron libre qui circule dans le matériau.

L'absence d'un électron  $e^-$  en une liaison rompue est appelée trou (charge positive) qui peut aussi se déplacer librement dans le matériau.

Le mouvement des  $e^-$  et des  $e^+$  en sens opposés génère un courant électrique qui peut circuler à travers un circuit extérieur. Pour séparer les  $e^-$  et les  $e^+$  on utilise un champ électrique (ou une DDP) afin d'éviter la recombinaison des  $e^-$  et  $e^+$ . [15]

### 1.5.1 Structure d'une cellule solaire

Une cellule solaire (PV) est un dispositif qui permet de transformer l'Energie solaire en Energie électrique, cette transformation est basée sur trois mécanismes intimement liés et simultanés :

- Absorption des photons de lumière par le matériau constituant le dispositif.
- Création des paires électron/trou ( $e^-$  et  $e^+$ ) dans le matériau semi-conducteur.
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

Dans les cellules solaires conventionnelles le champ électrique est obtenu par l'union de deux régions d'un cristal semi-conducteur.

La mise en contact de deux zones à dopages opposés dans un semi-conducteur constitue un élément fort connu : diode. [15]

### 1.5.2 Principe de fonctionnement

Lorsqu'une cellule solaire connectée à une charge externe (résistance pure) est illuminée une DDP apparaît aux bornes de ladite charge externe et un courant qui sort du circuit extérieur par le pôle + et retourne à la cellule par le pôle -.

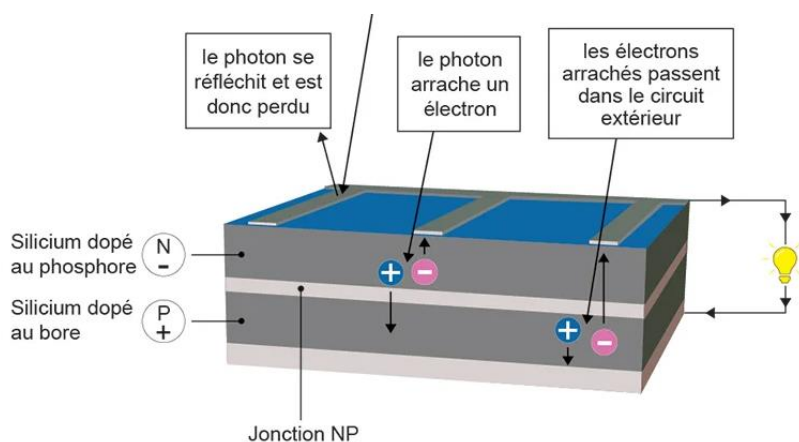


Figure 1-13 Principe de fonctionnement de cellule

### 1.5.3 Le rendement d'une cellule photovoltaïque

Le rendement est le rapport entre la puissance électrique produite et la puissance optique tombant sur la cellule. Pour le définir, des cellules assemblées en modules puis en panneaux ont été calibrées en les plaçant sur un simulateur solaire reproduisant les conditions optimales : ensoleillement avec 1 000 W de lumière par mètre carré, une température ambiante de 25°C. L'électricité produite est appelée puissance de crête et correspond au pourcentage d'énergie solaire reçue. Si un panneau de 1 mètre carré produit 200 W d'électricité, son rendement sera de 20 %. L'efficacité de telles cellules ne peut pas dépasser une limite théorique d'environ 33 %, connue sous le nom de « limite de Shockley-Queisser ».

En conditions réelles, la quantité d'électricité produite par la batterie (appelée « capacité productible ») sera calculée en fonction de son efficacité, de l'ensoleillement moyen de la zone au cours d'une année et des conditions d'installation. L'énergie solaire incidente passe de 1 MWh/m<sup>2</sup>/an en région parisienne à environ 1,7 dans le sud de la France et près de 3 fois dans le désert du Sahara. Ainsi, un panneau avec un rendement de 15 % produirait 150 kWh/m<sup>2</sup>/an en région parisienne et 450 kWh au Sahara.[16]

### 1.5.4 Les différents types de cellules photovoltaïque

Les cellules sont réparties en trois familles principales. Elles sont produites à partir de silicium, mais les méthodes de fabrication leur confèrent des propriétés très différentes, surtout en termes de productivité.

#### 1.5.4.1 Les cellules au silicium cristallin

Le silicium est dérivé de la silice, dont l'une des formes est le quartz, très abondant dans le sable. Les cellules au silicium représentent plus de 95 % du marché et les produits commerciaux ont des rendements moyens compris entre 16,5 % et 22 %, selon leur technologie. Par traitement à froid, le silicium est formé de plusieurs cristaux (polycristallins). Il est facile à produire et peut atteindre un taux de rendement de plus de 22 % en laboratoire. Le silicium fondu peut être reconstitué en gros cristaux (monocristallins) et le rendement en laboratoire atteint 26,6 %.[16]

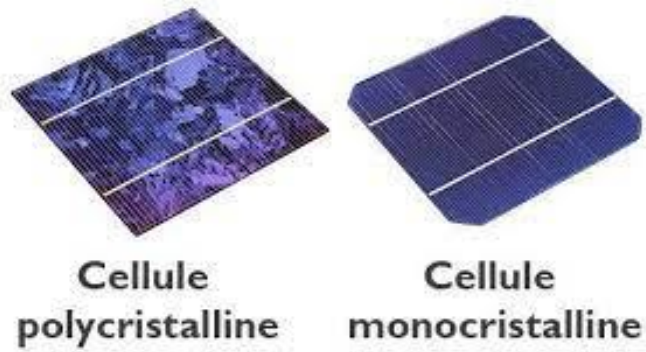


Figure 1-14 cellules au silicium cristalline

#### 1.5.4.2 Les cellules en couches minces

Au lieu de découper le silicium en tranches minces d'environ 200 microns, les matériaux semi-conducteurs peuvent être déposés en couches de quelques microns d'épaisseur sur un substrat, tel que du verre ou du plastique. Le tellurure de cadmium ou CIGS (cuivre/indium/gallium/sélénium) peut être utilisé. Les rendements de laboratoire sont proches de ceux du silicium (respectivement 22,1% et 23,3%). Si le silicium est sous forme "amorphe" (non cristalline), il peut également être utilisé en couches minces. C'est une technique que les petites calculatrices rencontrent depuis longtemps, mais avec des performances moindres.[16]

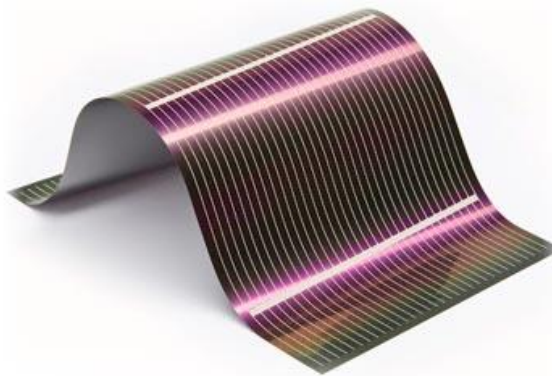


Figure 1-15 cellules en couches minces

### 1.5.4.3 Les cellules organiques

Basés sur des molécules ou des polymères issus de la chimie organique et non plus sur des semi-conducteurs minéraux comme les précédents, ils commencent à avoir des applications. Leurs rendements sont faibles et la stabilité à long terme n'est pas Adéquat mais ces cellules pourraient avoir un coût de production très faible. Il existe également des cellules pigmentaires photosensibles inspirées de la photosynthèse végétale appelées cellules à colorants.[16]

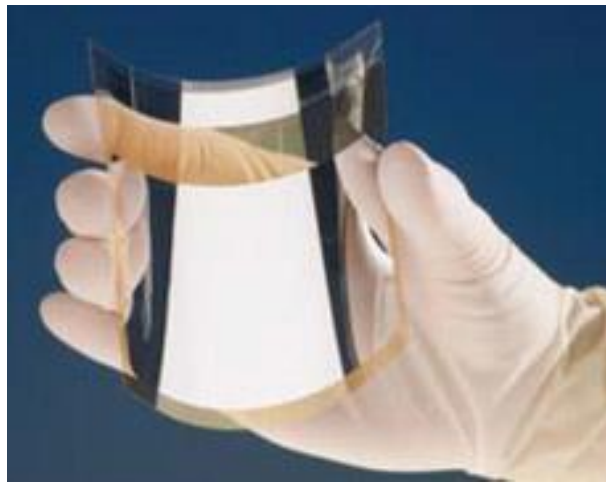


Figure 1-16 cellules organiques

## 1.6 Le générateur photovoltaïque et ses performances

Un générateur ou module photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou en parallèle afin d'obtenir les caractéristiques électriques souhaitées telles que puissance, courant de court-circuit ou tension à vide. [17]

### 1.6.1 Caractéristique courant-tension

La figure ci-dessous représente la courbe  $I=f(v)$  d'un panneau dans des conditions d'irradiation et de température constantes :

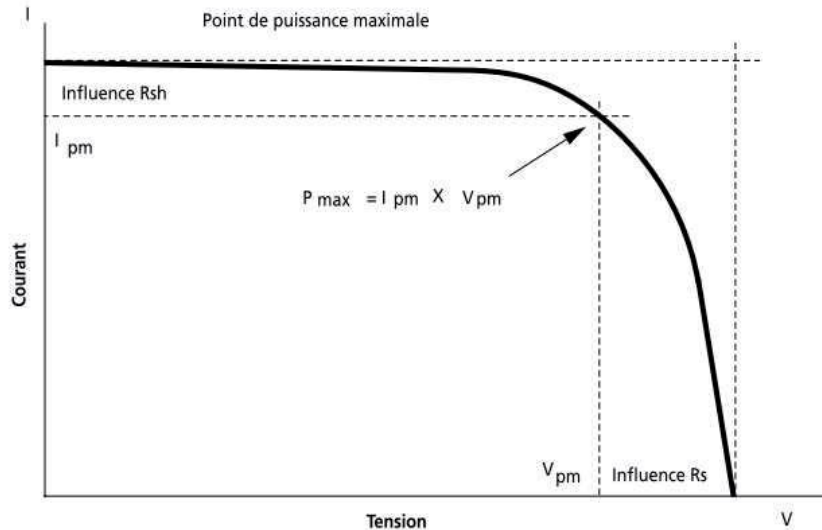


Figure 1-17 Courbe caractéristique courant-tension

La caractéristique électrique d'un générateur photovoltaïque est généralement représentée par une courbe courant-tension. La tension de cellule est portée sur l'axe horizontal, le courant sur l'axe vertical. Quelques observations peuvent être faites :

- Lorsqu'il n'y a pas de courant de la cellule photovoltaïque, on voit en abscisse la tension à vide  $U_0$ , dépendant d'abord de la température de la cellule puis du rayonnement reçu à ce moment-là.
- Si vous court-circuitez les bornes d'une cellule ou d'un module, vous obtenez la valeur du courant de court-circuit  $I_c$  sur l'axe vertical.
- Entre les états de fonctionnement à vide et en court-circuit, il existe une série d'états de charge, pour lesquels les valeurs de courant et la tension varient selon les courbes de la caractéristique. Lorsque la cellule photovoltaïque est connectée à une charge telle que la tension est au point  $U_{max}$  et le courant au point  $I_{max}$  la puissance sera maximale :  $P = U_{max} \times I_{max}$ .
- Si le rayonnement diminue, le courant disponible diminue également. La relation entre le courant de court-circuit et le rayonnement est pratiquement linéaire.
- Si la température des cellules photovoltaïques diminue, la tension à vide augmente. La caractéristique courant-tension se déplace vers la droite et la quantité d'énergie disponible augmente. Il est donc important de s'assurer lors du montage que l'arrière des modules photovoltaïques sont bien ventilés. [18]

### 1.6.2 Groupement des cellules en série

Par association sérielle (appelée "String"), les cellules sont traversées par les même courant et la tension résultante est la somme des tensions générées par chaque cellule.[19]

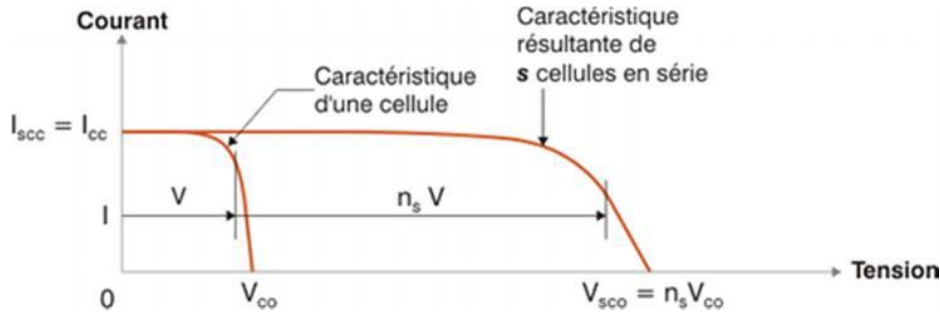


Figure 1-18 Groupement des cellules en série

### 1.6.1 Groupement des cellules en parallèle

Par association en parallèle, les cellules sont soumises aux mêmes tensions et le courant résultant correspond à la somme des courants générés par chacune des cellules.[19]

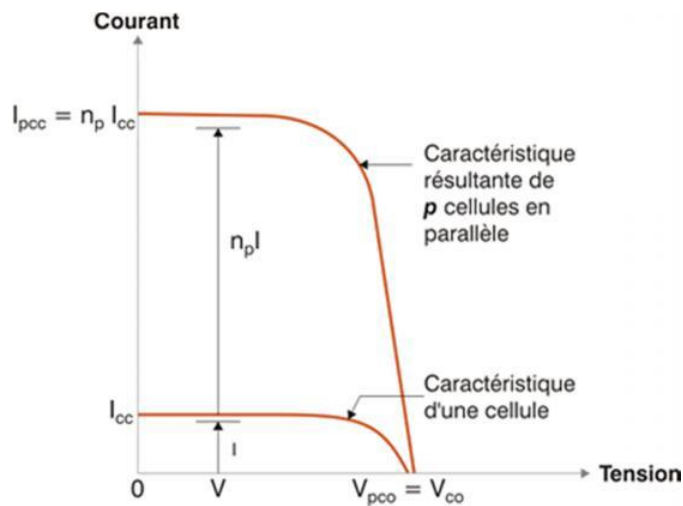


Figure 1-19 Groupement des cellules en parallèle

## 1.7 Conclusion

Les énergies renouvelables représentent une bonne source durable de production d'électricité, en particulier l'énergie solaire qui est toujours disponible, pure et propre sans oublier qu'elle est aussi la source d'autres énergies renouvelables.

Dans ce chapitre on a parlé sur les différents énergies renouvelables leurs avantages et leurs inconvénients, aussi on a décrit le principe de l'effet photovoltaïque, les différents types de cellules photovoltaïques et les méthodes de groupement des cellules.

## **Chapitre 2 : Les systèmes photovoltaïques et les paramètres de performance**

## 2 Les Systèmes photovoltaïques et les paramètres de performances

### 2.1 Introduction

Nous savons tous que le rayonnement solaire incident sur les panneaux photovoltaïques produit un courant électrique et la nature de ce courant est continue. Et vu que les charges et les réseaux de distribution fonctionnent en courant alternatif on doit convertir ce courant continue en alternatif à l'aide des dispositifs de transformation (onduleur). Sans oublier qu'on utilise d'autres composants pour contrôler et distribuer cette énergie Cette produite énergie est utilisée soit directement pour alimenter des charges, soit est injecte sur le réseau. On va parler dans ce chapitre sur les différents types de system PV, les composants d'un système PV et leur caractéristique et topologie du champs et dernièrement sur les paramètres de la performance d'un systèmes photovoltaïques.

### 2.2 Systèmes photovoltaïques

#### 2.2.1 Définition

La production d'électricité nécessite quelques composants ; un champs PV, un conditionnement de puissance-soit par un régulateur seul, un convertisseur seul ou bien avec un convertisseur et régulateur- un système de stockage et bien sur la charge.

#### 2.2.2 Types de systèmes PV

On distingue de types de classification du system photovoltaïques

- Système PV autonome
- Système PV raccorde au réseau

##### 2.2.2.1 Système PV autonome

On définit un système autonome par l'indépendance totale d'autres source d'énergie et du réseau électrique, ce système est déterminé aussi part la charge passive On utilise ce type de système beaucoup plus sur les sites isolés ou les besoins énergétiques sont faibles, et parfois et utilise dans quelques systèmes de surveillances à distance. Le système autonome exige des moyens de stockage pour assurer la disponibilité et d'énergie et le

fonctionnement du système surtout pendant l'absence de source principale(l'ensoleillement).

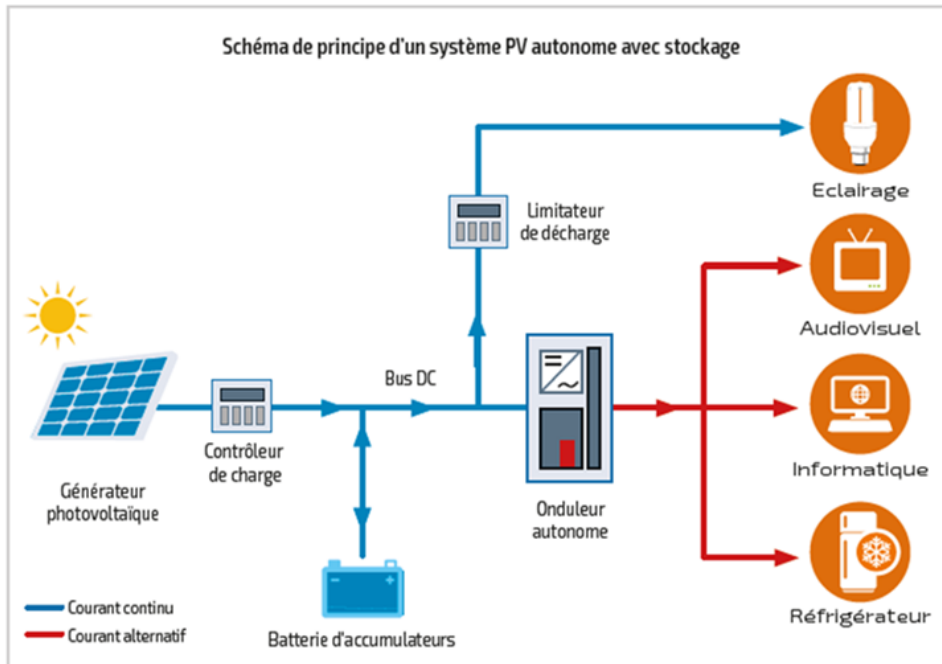


Figure 2-1 Schéma principe d'un système PV autonome avec stockage

Il existe deux types de système autonome

- Les systèmes au fil du soleil
- Les systèmes avec stockage

#### 2.2.2.1.1 Les systèmes au fil du soleil

Fonctionnement au fil du soleil implique un couplage direct sans stockage, et cela signifie une puissance variable et non stable pendant la journée.

Ce système fonctionne avec les deux types de courant (courant alternatif ou continu) donc on le classe selon la nature de charge à alimenter.

Le principal problème de ce système est causé par l'absence de soleil et cela implique l'interruption d'alimentation.

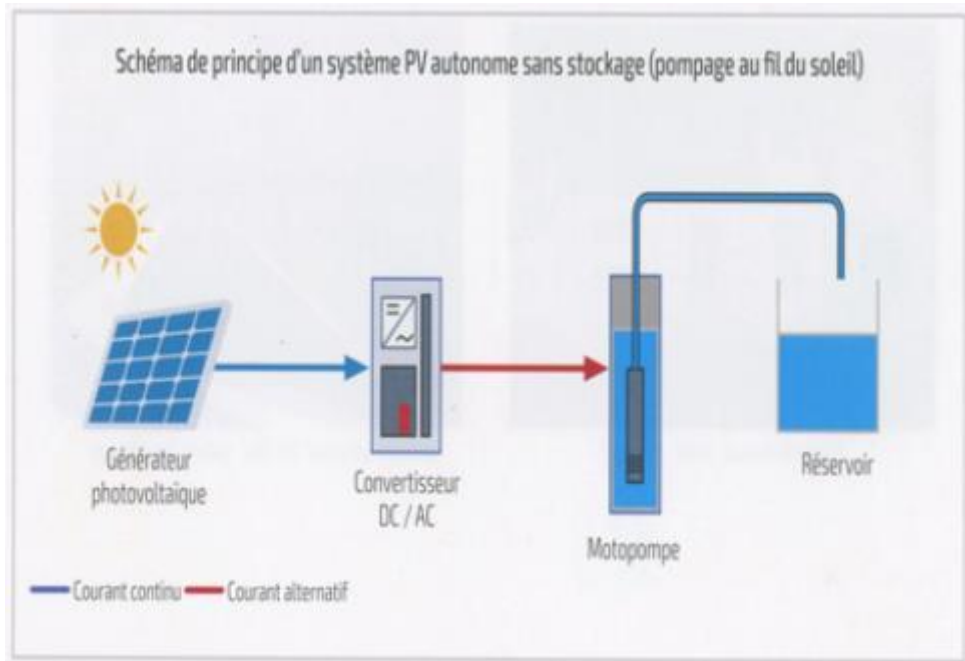


Figure 2-2 schéma d'un principe d'un système PV autonome sans stockage (pompage au fil du soleil)

#### 2.2.2.1.2 Les systèmes avec stockage

C'est évident que ça dépend du stockage, ce système agit comme une source secondaire d'énergie pendant l'absence partielle ou totale de l'ensoleillement (l'ensoleillement faible...) Un exemple très connu de ce système : les maisons dans les sites isolées.

#### 2.2.2.2 Système PV raccorde au réseau

Dans le cas de ce système le générateur PV injecte sa puissance dans le réseau électrique à l'aide d'un onduleur donc le réseau est considéré comme une charge soit totale ou partielle.

Cette électricité doit être transformée en courant alternatif par un onduleur pour qu'il soit adapté avec le courant de réseau électrique. [20]

L'un des bénéfices de ce système est réduit le besoin de l'augmentation de la capacité des lignes de transport et distribution. [21]

Deux compteurs d'énergie sont nécessaires : un compteur comptabilise l'énergie achetée au fournisseur d'énergie et un autre compteur mesure l'énergie renvoyée sur le réseau électrique lorsque la production dépasse la consommation.

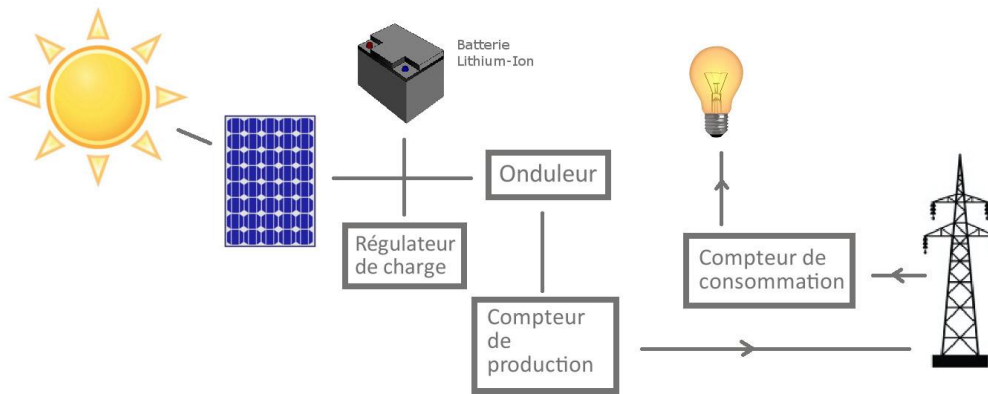


Figure 2-3 système PV raccorde au réseau

Il existe deux classes du système raccorde au réseau

- Système PV raccorde au réseau avec injection totale
- Système PV raccorde au réseau avec autoconsommation

#### 2.2.2.2.1 Système PV raccorde au réseau avec injection totale

Deux configurations sont possibles, sans ou avec stockage

##### 2.2.2.2.1.1 Sans stockage

Le courant continue produit par le générateur photovoltaïque ça sera transformé par l'onduleur en un courant alternatif pour qu'il soit compatible avec les caractéristiques du réseau de distribution, donc dans ce cas toute la production énergétique de la station solaire sera injectée sur le réseau [22]

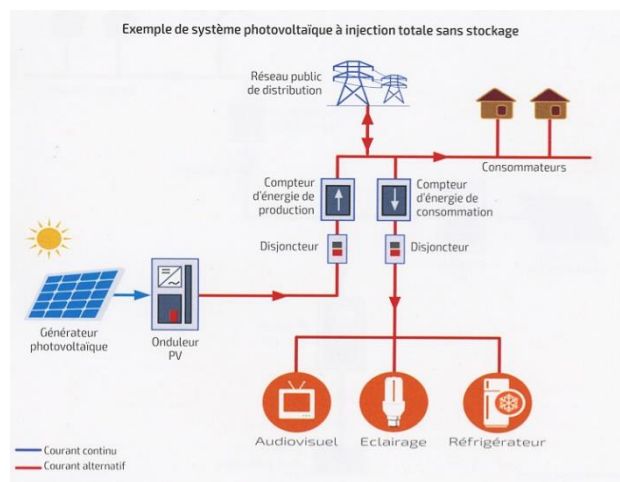


Figure 2-4 système PV à injection totale sans stockage

### 2.2.2.2.1.2 Avec stockage

Même principe de fonctionnement (sans stockage), mais on a ajoutée seulement des dispositifs de stockage (des accumulateurs) à la centrale.

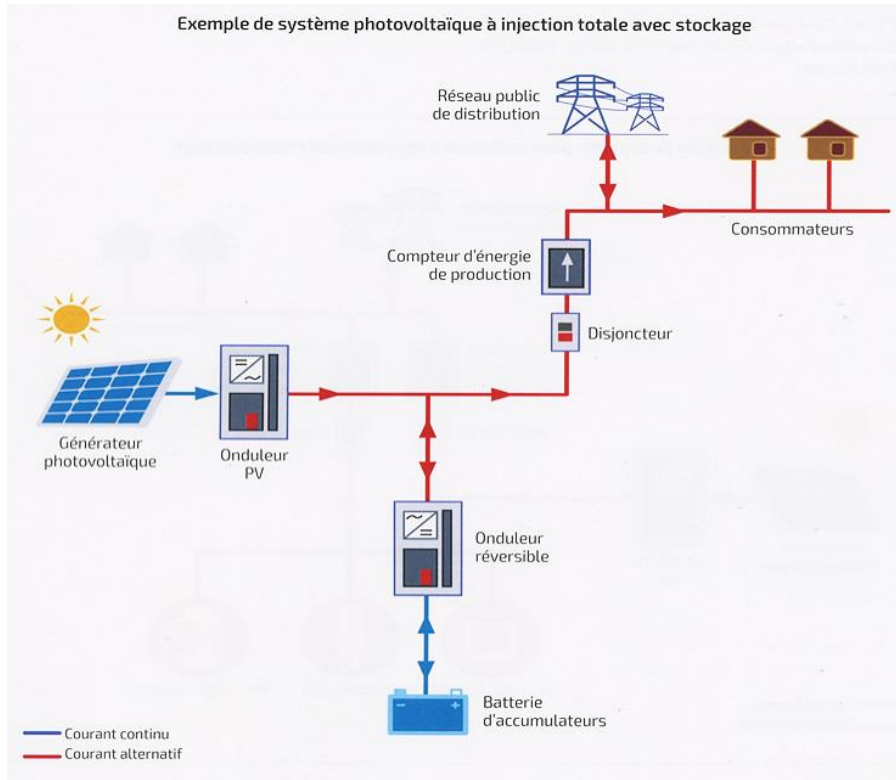


Figure 2-5 système PV à injection totale avec stockage

### 2.2.2.2.2 Systèmes PV raccordés au réseau avec autoconsommation

Il existe aussi deux configurations : avec et sans stockage.

#### 2.2.2.2.2.1 Autoconsommation sans stockage

Le cycle de production de l'énergie électrique est le même toujours mais cette fois il est connecte directement avec le consommateur, c'est à dire ce dernier utilise la puissance génère par le système PV pour ses besoins quotidiens. Cette installation exige deux compteurs, un compteur d'injection mesurent l'énergie injecte sur le réseau et un compteur de soutirage mesurent l'énergie soutire au réseau

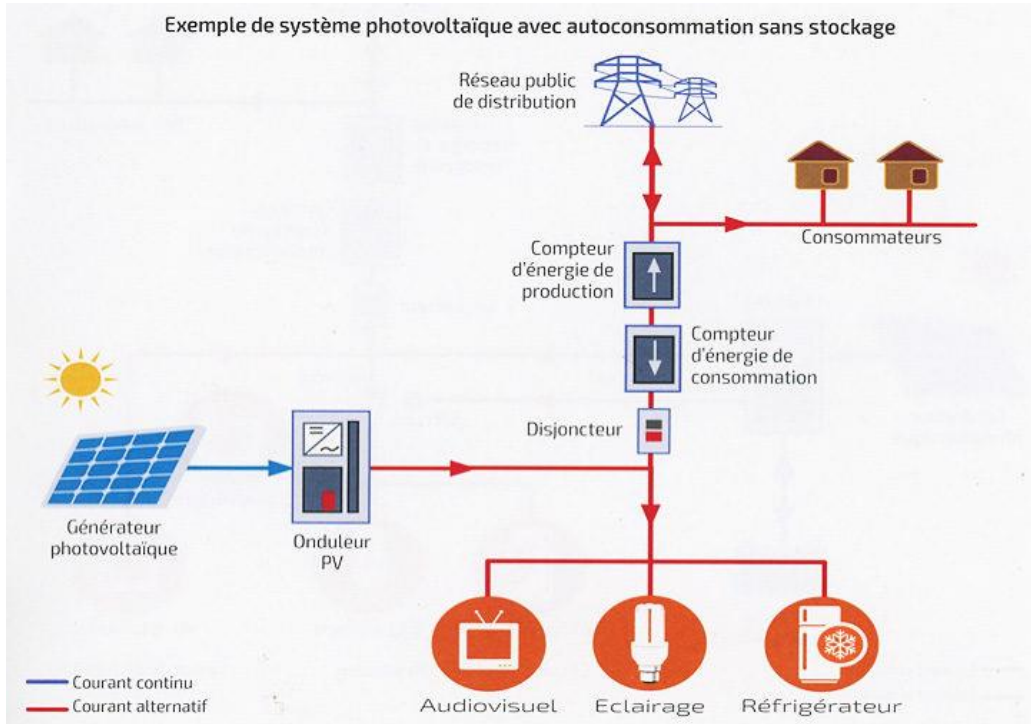


Figure 2-6 système PV autoconsommation sans stockage

### 2.2.2.2.2 Autoconsommation avec stockage

Les mêmes paramètres précédents de système, en ajoute des accumulateurs pour stocker l'énergie produite pendant la journée, et pour permet de l'utiliser pendant la nuit.

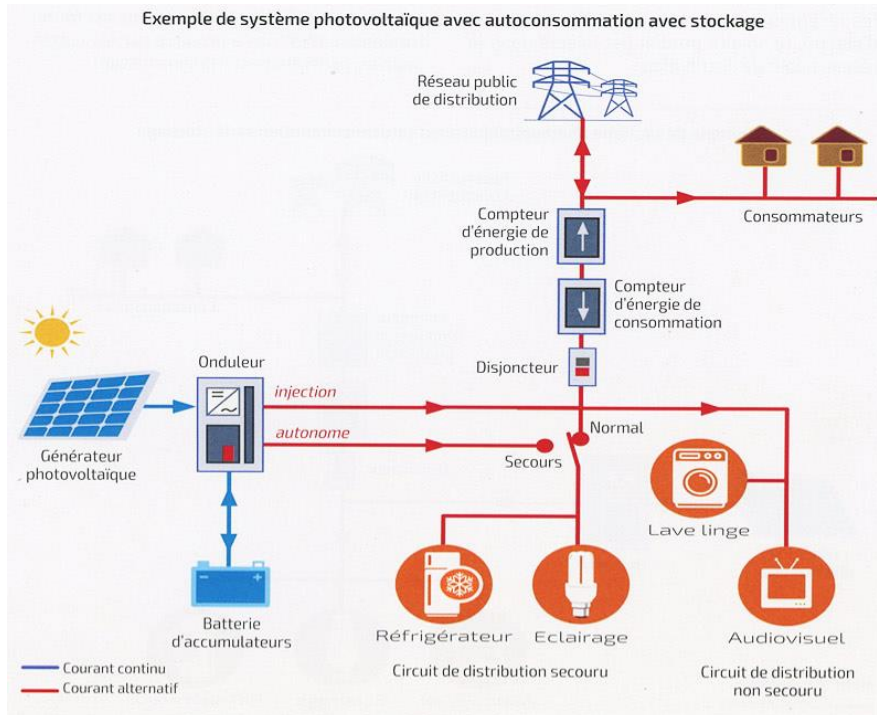


Figure 2-7 système PV autoconsommation avec stockage

## 2.3 Les éléments constitutifs d'un système photovoltaïque raccordé au réseau et leurs topologies de champs

Les principaux composants d'un système PV seront les suivants :

- Les panneaux photovoltaïques (avec structure de support)
- Les transformateurs
- Régulateur de charge
- Les réseaux de câbles

### 2.3.1 Hacheur (convertisseur DC/DC)

Hacheur constitue une partie assez importante de la chaîne de conversion. Ce dernier est un dispositif d'électronique de puissance, constitué d'un interrupteur à ouverture commandée en parallèle avec le récepteur et d'un interrupteur à fermeture et ouverture spontanée entre la source et le récepteur. Son rôle est de modifier la valeur de tension d'entrée d'un système pour qu'il soit adapté à une valeur de tension de sortie désirée.

Il existe trois différents types d'hacheur : hacheur Buck, hacheur boost et hacheur Buck-boost, et aussi y a des différentes topologies et architectures de champs PV permettant la connexion au réseau de distribution. [23]

#### 2.3.1.1 Topologie avec un Hacheur Rangé

La fiabilité du système et le rendement de la chaîne de conversion peuvent être améliorés si on utilise plusieurs étages de conversion et en séparant au même temps les fonctions de l'onduleur. Cette idée est souvent considérée et présentée en tant qu'une solution intermédiaire entre l'onduleur 'centrale' et l'onduleur 'rangé'.

Le convertisseur 'multi-string' ou bien hacheur rangé utilise un hacheur à la fin de la chaîne du système PV. [24]

La combinaison entre la gestion par onduleur central et la gestion par strings donnent ce qu'on appelle la gestion multi string. Le principe de cette gestion repose sur plusieurs convertisseurs DC-DC modulables connectés à un onduleur central via un bus continu, ce bus permet d'intégrer facilement un élément de stockage. [25]

Le nombre d'interactions entre le réseau et l'installation PV diminue par l'utilisation d'un seul onduleur en tant qu'une interface avec le réseau. La technologie MPPT se fait pour chaque chaîne (string) cela empêche l'influence des modules entre eux. La défaillance possible de l'onduleur empêche la continuité du service. Les coûts peuvent être réduits parce que chaque hacheur n'a pas besoin d'intégrer les fonctions de mesure et

de surveillance de la tension et du courant du réseau contrairement à l'onduleur rangée, La commande et le contrôle de la partie AC et la détection courant DC sont laissés au réseau. [23]

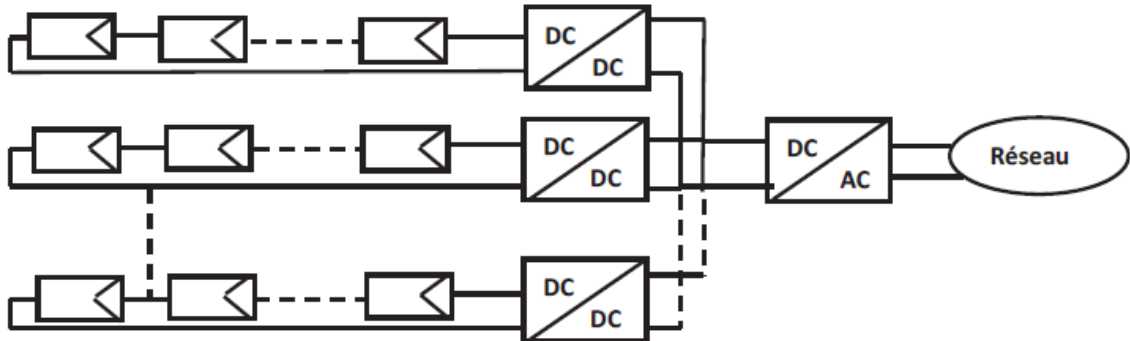


Figure 2-8 La topologie « Hacheur rangée »

### 2.3.1.2 Topologie avec un Hacheur Modulaire Parallèle

Dans cette topologie hacheur est connecté directement à la sortie du module PV pas avec une chaîne de modules PV. Cette technologie avancée ajoute à toutes les autres fonctionnalités et avantages du hacher 'rangé' la possibilité d'augmentation du niveau de discrétisation du MPPT, et chaque module PV fonctionne avec son MPPT. Cette importante discrétisation permet de détecter plus rapidement les défauts.

Le plus grand désavantage de cette structure est le grand rapport d'élévation entre la tension de sortie du module PV et la tension nécessaire à l'injection sur le réseau de distribution, ceci limite l'efficacité et le rendement de le hacheur et pénalise cette topologie. [24]

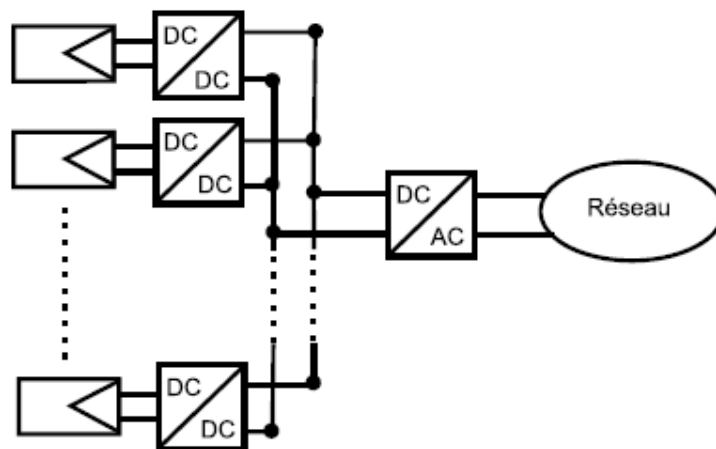


Figure 2-9 La topologie « hacheur modulaire parallèle »

### 2.3.1.3 Topologie avec un hacheur modulaire série

La mise en série des sorties de l'hacheur est considérée comme une solution pour diminuer le rapport d'élévation des hacheurs nécessaires dans la topologie 'hacheur modulaire parallèle', plus le nombre d'hacheur en série est augmenté, plus le rapport d'élévation diminue. Cette technologie est connue sous le nom Hacheur modulaire série. Il garde tous les avantages de la topologie précédente et permet ainsi d'augmenter le rendement. [24]

Cette structure reste faible surtout dans les cas où l'éclairement et la température sur les surfaces des modules PV sont différents, cela du négativement sur le système (dégradation de la performance du générateur).[23]

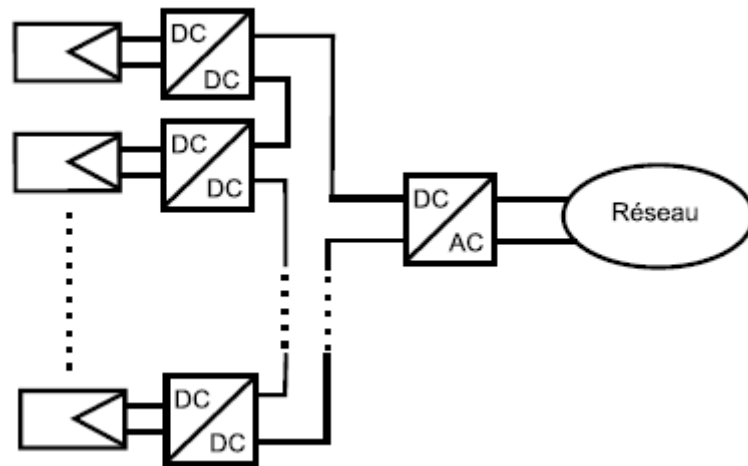


Figure 2-10 La topologie « hacheur modulaire série »

### 2.3.2 Onduleur (convertisseur DC/AC)

Est un dispositif qui permet de transformer l'énergie électrique de type continue en alternatif. Il existe deux types de d'onduleur : onduleur de tension et onduleur de courant selon la nature de la source d'entrée.

Dans la plupart des systèmes industrielles dans le monde. La technologie des onduleurs de tension est la plus courante et utilisée.[26]

L'onduleur couple au réseau adapte le courant produit par les modules PV à la fréquence et la tension du fréquence couplage doit être surveillé car il peut y avoir des perturbations et des interruptions, ceci permettre d'interrompre l'injection sur le réseau immédiatement, sans aucun risque sur lui. [23]

### 2.3.2.1 Onduleur central

Dans ce cas, des chaînes(strings) de modules photovoltaïques sont couplée en parallèle avec des diodes anti-retours pour la protection, le tout avec un seul onduleur qui joue le rôle d'un connecteur entre le champ PV et le réseau électrique. Cette ancienne et classique technologie est utilisée généralement dans les installations de grandes puissances.

Cet onduleur a le rôle de convertir la tension continue à une tension alternative compatible avec le réseau électrique et au même temps d'examiner la présence du réseau pour autoriser l'injection du courant. [25]

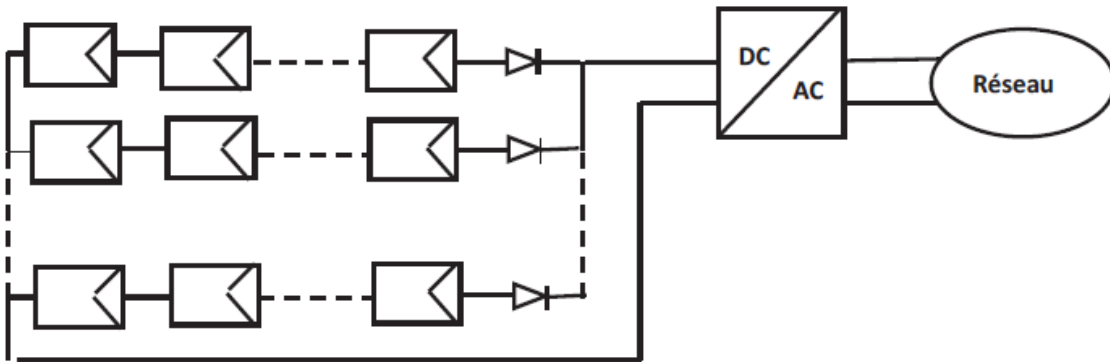


Figure 2-11 Topologie onduleur central

Parmi les avantages de la topologie 'onduleur central' on note :

Le faible coût d'investissement et la maintenance simple, la simplicité de montage (l'utilisation d'un seul onduleur connecte au champs PV) ce qui donne un élevée rendement de conversion de tension.

Malgré ses avantages, ce modèle présente de nombreux inconvénients

- Pertes de conversion solaire (un seul MPPT pour un ensemble de modules)
- Pertes et risques électriques dans le câblage DC
- Aucune évolutivité
- Aucune continuité de service en cas de panne de l'onduleur

### 2.3.2.2 Onduleur rangée

La technologie 'onduleur rangée' est la plus utilisée actuellement, il a le même principe que l'onduleur central mais cette fois chaque chaîne de module PV est reliée avec un onduleur et chaque chaîne peut fonctionner avec un MPPT individuel, ces onduleurs sont

connectés parallèlement avec le réseau électrique. Cette topologie réduit les pertes due aux effets d'ombrages et les problèmes d'adaptations. [25]

Le MPPT de chaque onduleur permet d'améliorer le contrôle de puissance disponible par la chaîne du module PV, aussi en cas d'une panne d'un onduleur string le système d'installation ne s'arrête pas complètement est les autres onduleurs peuvent alimenter le réseau électrique. [24]

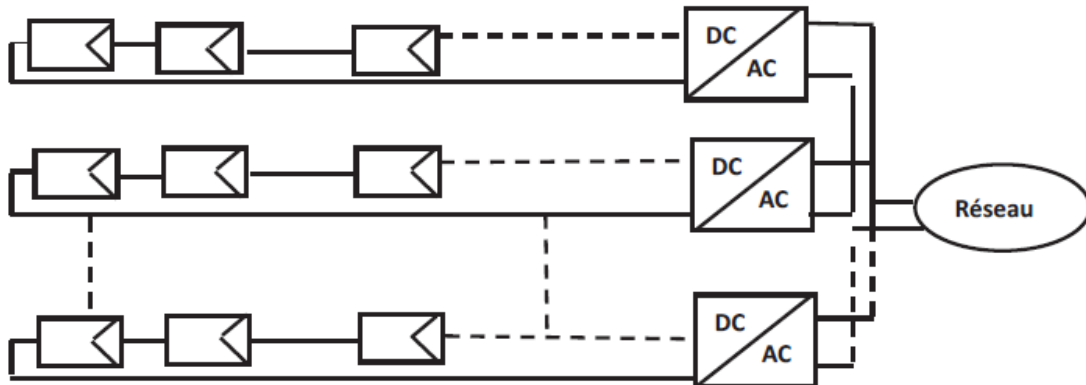


Figure 2-12 Topologie Onduleur rangée

Malgré ces bonnes qualités, mais le cout d'installation du système reste élevé par rapport à l'onduleur central à cause de l'utilisation des plusieurs onduleurs.

### 2.3.2.3 Onduleur modulaire

Dans cette technologie, chaque module photovoltaïque fonctionne avec son propre onduleur, et cela limite toutes les pertes causées par la différence de puissance entre chaque module PV, et au même temps permet à chaque module d'optimiser son fonctionnement (puissance extraite).

Malgré tout ça cette technologie donne un rendement inférieur à celui de l'onduleur string étant donné la grande différence des tensions entre le générateur photovoltaïque et la charge, aussi un cout de câblages supplémentaires pour les onduleurs intégrée aux panneaux solaires. [25][27]

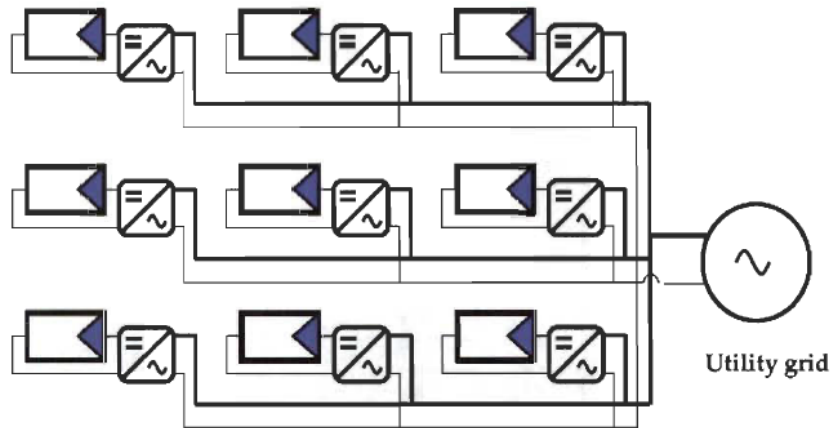


Figure 2-13 Topologie Onduleur modulaire

On résume les avantages et les inconvénients de chaque technologie dans ce tableau

Topologie	Avantages	Inconvénients	Puissance
Central	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Facile à surveiller.</li> <li>- Facile à maintenir.</li> <li>- Faible coût en raison de L'onduleur central.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pertes CC dans câbles de haute tension.</li> <li>- Pertes de puissance dues à la centralisation MPPT et le décalage dans les modules PV.</li> <li>- Faible fiabilité.</li> <li>- Configuration pas flexible.</li> </ul>	Jusqu'à Plusieurs Mégawatts
Rangée	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Réduction des pertes d'énergie qui en résultent de l'ombrage partiel.</li> <li>-Les pertes dans les diodes de string sont éliminées.</li> <li>- Bonne fiabilité</li> <li>- Configuration flexible</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coût plus élevé par rapport au central.</li> <li>- Utilise pour les faibles puissances.</li> </ul>	3-5 kW / Rangée(string)
Modulaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aucune perte due à l'ombrage partiel.</li> <li>- Aucune perte de décalage entre les modules.</li> <li>- Facile à détecter le défaut des modules.</li> <li>- Configuration flexible et extensible.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Coût élevé.</li> <li>- Remplacement de l'onduleur en cas de défaut pas facile.</li> <li>- Durée de vie des composants électroniques réduite à cause des thermiques additionnelles.</li> </ul>	Jusqu'à 500W

Tableau 1 Comparaison entre les trois topologies.

### 2.3.2.4 La commande MPPT

La quantité d'énergie produite par chaque cellule dépend du rayonnement solaire et de la température, et vu que ces deux paramètres sont variés au cours de la journée donc il est nécessaire de détecter le point où le générateur photovoltaïque transforme le maximum de puissance vers le réseau électrique. [28]

Le MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un mécanisme permet de détecter et suivi le point maximal de la puissance extraite, spécialement destinées pour les générateurs électriques non linéaires.

Les différents types de la commande MPPT sont classes à partir de leur méthode d'implémentation, et plutôt selon les paramètres d'entrée de la commande. [29]

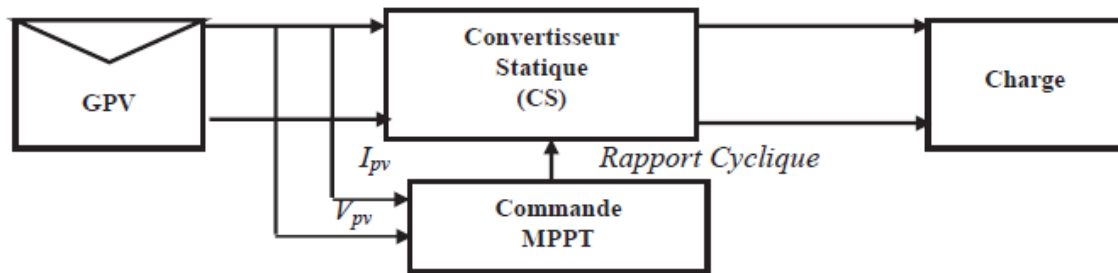


Figure 2-14 Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.

#### 2.3.2.4.1 Principe de fonctionnement

La chaîne d'alimentation d'un GPV où bien d'une charge DC est alimentée par le générateur Via un convertisseur statique (CS) contrôlé par MPPT (Maximum Power Point Tracking), cette méthode sert à modifier les valeurs du rapport cyclique ( $\alpha$ ) du CS de sorte que la puissance fournie par le GPV soit la puissance maximale disponible à ses bornes. [25]

Le MPP doit être localisé par un algorithme de poursuite, car la position exacte du MPP dans la caractéristique  $I(V)$  du module n'est pas connue, et change toujours en fonction de l'irradiation.

On Recherche du point de puissance maximum en comparant un point Puissance ( $P_2$ ) mesurée à l'instant  $[t]$  avec un autre point de puissance ( $P_1$ ) mesuré à l'instant temps  $[t-1]$ .

- Si  $P_1 < P_2$ , la dérivée de la puissance sera positive, ce qui signifie que nous nous rapprochons du point de puissance maximal, mais il n'est pas encore atteint.
- Si  $P_1 > P_2$ , la dérivée de la puissance sera négative, ce qui signifie que nous avons

dépassé le point de puissance maximale.

- Si la dérivée de la puissance est nulle, donc le point de puissance maximale est atteint.[29]

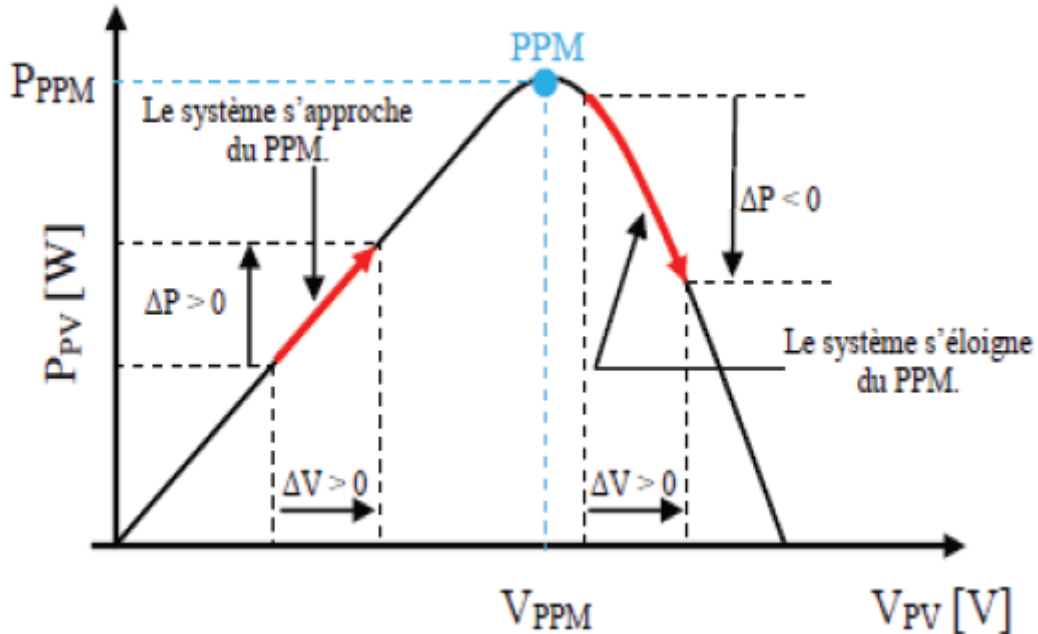


Figure 2-15 Principe du fonctionnement d'une MPPT

#### 2.3.2.4.2 Type du méthode MPPT

Il existe plusieurs méthodes et techniques pour suivre le point de puissance maximale, le choix d'algorithme ou de la technologie dépend de la complexité temporelle de l'algorithme elle-même de détecter et suivi le point de puissance max.

Les plus populaires de ces techniques sont :

- Perturbe et Observe (méthode d'escalade).
- Méthode de la conductance incrémentielle.
- Courant de court-circuit fractionné.
- Tension de circuit ouvert fractionnaire.
- Réseaux de neurones.
- La logique floue

### 2.4 Avantages et inconvénients du système raccorde au réseau

#### 2.4.1 Avantages

- Les systèmes connectés au réseau n'ont pas besoin de stockage d'énergie.
- Pas de gaspillage – toute l'énergie extraire est livré au réseau.

- On peut satisfaire à une partie ou à la totalité de ses besoins. [28]

#### 2.4.2 Inconvénients

- Un cout élevé pour les KWh livrés au réseaux (plus cher celui de l'énergie traditionnelle).
- Les contraintes électriques imposées par les sociétés d'électricité peuvent être rigoureuses, et les onduleurs synchrones doivent répondre aux exigences techniques des compagnies de production et de transport d'énergie.
- La consommation risque de redevenir relativement "invisible", et on pourrait retomber dans le piège de la consommation irréfléchie.

### 2.5 Les paramètres de performances du système photovoltaïques

#### 2.5.1 Rendements spécifiques

Le rendement d'une installation photovoltaïque dépend principalement de l'énergie de rayonnement HT arrivant au générateur. La durée d'observation choisie est généralement d'un an, mais parfois d'un mois ou bien une journée. [30]

##### 2.5.1.1 Rendement du réseau (YA) :

Le rendement de champ photovoltaïque est défini comme le rapport entre l'énergie totale générée EDC (kWh) par les rangées PV pour une période définie (jour, mois ou année) et la puissance nominale  $P_0$  (kWc) des rangées sous les conditions standard (STC : irradiation : 1000 W/m et 25°C température ambiante et spectre de référence AM 1.5-G).

$$YA = \frac{EDC}{P_0} \quad (2-1)$$

EDC est la puissance de sortie totale en courant continu des réseaux PV (kWh) et la puissance de sortie nominale du système PV. [26]

##### 2.5.1.2 Rendement de référence (YR)

Rendement de référence est le rapport entre la quantité totale de rayonnement solaire HT (kWh/m<sup>2</sup>) arrivant à la surface des panneaux solaires PV et la quantité de rayonnement de référence  $G_0$  (1kW/m<sup>2</sup>). Ce paramètre représente le nombre d'heures durant lesquelles l'éclairement est égal à celui de référence,  $Y_r$  définit la ressource solaire pour le système PV.[31]

$$YR = \frac{HT}{G_0} \quad (2-2)$$

Le rendement de référence YR donne le nombre d'heures de pleine charge solaire au niveau du générateur par an. [30]

### 2.5.1.3 Rendement final PV (YF)

Le Rendement final correspond à l'énergie totale produite par le système PV, EAC (kWh) par rapport à la puissance nominale installée  $P_0$  (kWc). Cette quantité représente le nombre d'heures pendant lesquelles le champ PV devrait fonctionner à sa puissance nominale.

$$YF = \frac{EAC}{P_0} \quad (2-3)$$

### 2.5.1.4 Rendement du champ PV ( $\eta_A$ )

Rendement du champ PV est le rapport de l'énergie totale générée par les rangées PV (EDC) au produit de la quantité d'irradiation sur le plan des panneaux et de la surface globale du champ photo- voltaïque.

$$\eta_A = \left( \frac{EA}{Aa*HT} \right) * 100 \quad (2-4)$$

### 2.5.1.5 Rendement de l'onduleur photovoltaïque ( $\eta_{inv}$ )

$\eta_{inv}$  est le rapport de l'énergie totale générée par le système PV à l'énergie totale générée par les rangées photovoltaïques.

$$\eta_A = \left( \frac{PAC}{PDC} \right) * 100 \quad (2-5)$$

### 2.5.1.6 Rendement du système PV ( $\eta_{sys}$ ) :

Le Rendement du système PV est le rapport de l'énergie totale générée par le système PV (EAC) au produit de la quantité d'irradiation sur le plan des panneaux et de la surface globale du champ photovoltaïque.

$$\eta_{sys} = \left( \frac{EAC}{Aa*HT} \right) * 100 \quad (2-6)$$

### 2.5.1.7 Facteur de capacité (CF) :

Le facteur de capacité implique une relation entre la production réelle annuelle d'énergie électrique et l'énergie électrique qui pourrait être produite si la centrale solaire photovoltaïque fonctionnait avec sa puissance totale installée (nominale) 24 h par jour sur un an, la capacité de la centrale solaire photovoltaïque pour un an est calculée par équation.

$$CUF = \left( \frac{YF}{24*30} \right) * 100 \quad (2-7)$$

### 2.5.1.8 Rapport de rendement (PR)

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

$$PR = \left( \frac{YF}{YR} \right) * 100 \quad (2-8)$$

## 2.5.2 Les pertes

### 2.5.2.1 Perte de système (LS)

Les pertes du système (LS) sont dues aux pertes par conversion des onduleurs (courant continu courant alternatif) et elles sont définies par la différence entre le rendement du champ PV (YA) et le rendement final YF.

$$Ls = YA - YF \quad (2-9)$$

### 2.5.2.2 Perte de capture de réseau (LC)

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

$$Lc = YR - YA \quad (2-10)$$

### **2.5.2.3 Perte de capture thermique (LCT)**

Se produit principalement lorsque le module PV fonctionne au-delà de 25 °C.

$$LCT = YR - YT \quad (2-11)$$

### **2.5.2.4 Perte de capture divers (LCM)**

Ces types de pertes se produisent en raison du câblage et câbles, pertes de diodes, ombrage, pertes dues à désadaptation des modules, salissures et maximum pertes de point de puissance (MPPT).

$$LCM = LC - YCT \quad (2-12)$$

## **2.6 Conclusion**

On a donné dans ce chapitre un aperçu du système photovoltaïques.

La 1 ère partie parle de la définition du système photovoltaïques, ces composants, ses deux principaux types (système autonomes et système raccorde au réseau) et leurs caractéristiques, aussi on parle un peu sur les principaux éléments constitutifs d'un système photovoltaïque les topologies du champ utilisée. Finissons par parler sur les avantages et les inconvénients du système PV raccorde au réseau.

Dans la 2 -ème partie on a décrit les paramètres qui caractérise le système photovoltaïque tels que les rendements du module, rendement du système, les pertes...etc..

# **Chapitre 3 : Analyse des performances d'une centrale électrique r  corde au réseau Cas d'étude (résultat et discussion)**

### 3 Analyse des performances d'une centrale électrique raccordée au réseau

#### 3.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'analyser et évaluer les résultats et les performances du centrale photovoltaïque située à Ain el Melh Msila.

La centrale du Ain el Melh a 4004 modules photovoltaïques de Yingli Solar de type « 250 WP/25V si-poly » la marque « YL250P-29b » (depuis 2015-manufacturer 2015), et deux onduleur de 500 KW, de marque « Sungrow SG500MX depuis 2012 » avec une fréquence de 50HZ, a un voltage d'intervalle de « 460-850V »

La 1 ère partie du chapitre est concernant la simulation d'un système photovoltaïque avec le logiciel PVSYST en choisissant le site géographique du central, les données géothermiques de la région, le type et le nombre des modules utilisées dans le central et leur surface, et le type d'onduleur. Cette simulation nous permet de voir et d'analyser les caractéristiques des modules photovoltaïques, de l'onduleur et quelques paramètres du système tels que les pertes, l'énergie produite par le système le rapport de performances ... etc.

Dans la 2 -ème partie, on a simulé des données réelles du central photovoltaïque de Ain El Melh obtenu du 1 er janvier jusqu'à 31 décembre 2019, et on a évalué avec ses données les différents paramètres de performances du système, parmi lesquels le rendement final, le rendement de référence, rendement du champ, facteur de puissance, rapport de rendement, les pertes de capteurs du générateur, les pertes du système, les pertes thermiques, l'efficacité du module photovoltaïque et du système.

## 3.2 Simulation d'un système PV rattaché au réseau avec le logiciel

### PVSYST

PV SYST est un logiciel de dimensionnement de panneaux solaires, qui permet d'obtenir diverses informations telles que la production d'énergie, les coûts d'irradiation et d'installation, la surface nécessaire ou la production d'énergie annuelle. Le mode avancé permet d'obtenir plus d'informations pour une étude très complète.

Le logiciel comprend principalement deux modes de fonctionnement. Le premier est également une application de redimensionnement assez simple à apprendre et à utiliser pour les débutants. La seconde permet une recherche plus approfondie et la prise en compte d'un plus grand nombre de paramètres. De plus, il calcule en fonction du matériau béton, contrairement au premier mode, il calcule pour des cas très généraux.

#### 3.2.1 Présentation du projet

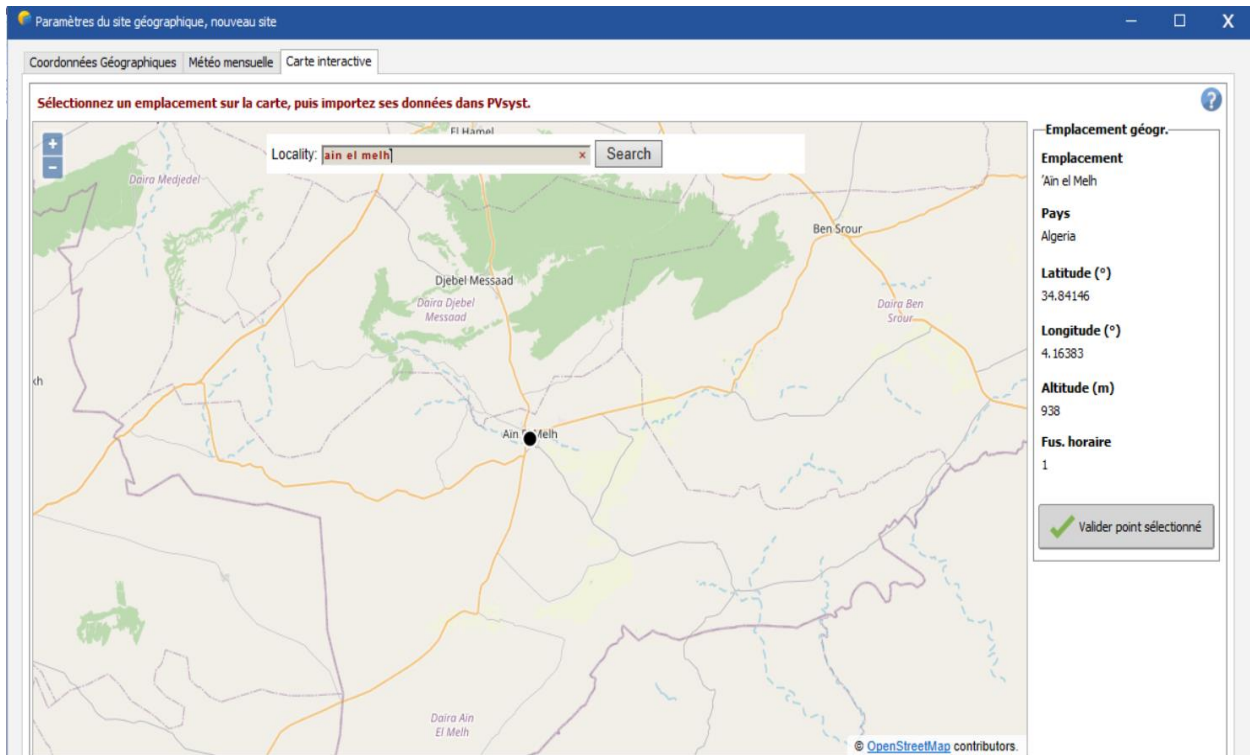
Dans notre projet, nous avons présenté une installation PV injectée dans le réseau pour alimenter le site AIN EL MELH wilaya Msila, simulé par le logiciel PVSYST

Les données météorologiques ont été obtenues directement par le site « meteonorm »

##### 3.2.1.1 Site

On a obtenu les coordonnées géographiques et météorologiques du site AIN EL MELH Wilaya de M'sila avec le PVGIS.

PVGIS (Système d'Information Géographique Photovoltaïque) fournit un accès en ligne aux données de rayonnement solaire et de température et aux outils d'évaluation des performances PV pour n'importe quel endroit en Europe et en Afrique et dans la plupart de l'Asie.



### 3.2.1.2 Cordonne géographiques du site Ain el Melh

Tout point sur la surface de la Terre est identifié par ses coordonnées géographiques de longitude et de latitude et son altitude. La longitude correspond à l'angle formé par deux plans méridiens (passant par les axes polaires), l'un comme origine ( $0^\circ$  méridien de Greenwich) et l'autre déterminé par la position considérée. La latitude donne la position du point par rapport à l'équateur. L'altitude désigne la hauteur géométrique verticale entre un point et le niveau de la mer.

Pour Ain el Melh la longitude est de  $4.16383^\circ$  est, la latitude est  $34.84146^\circ$  nord, et une altitude de 938 m, le fuseau horaire est (1+GMT).

## 3.2.2 Réalisation du projet

### 3.2.2.1 Choix d'orientation du panneau

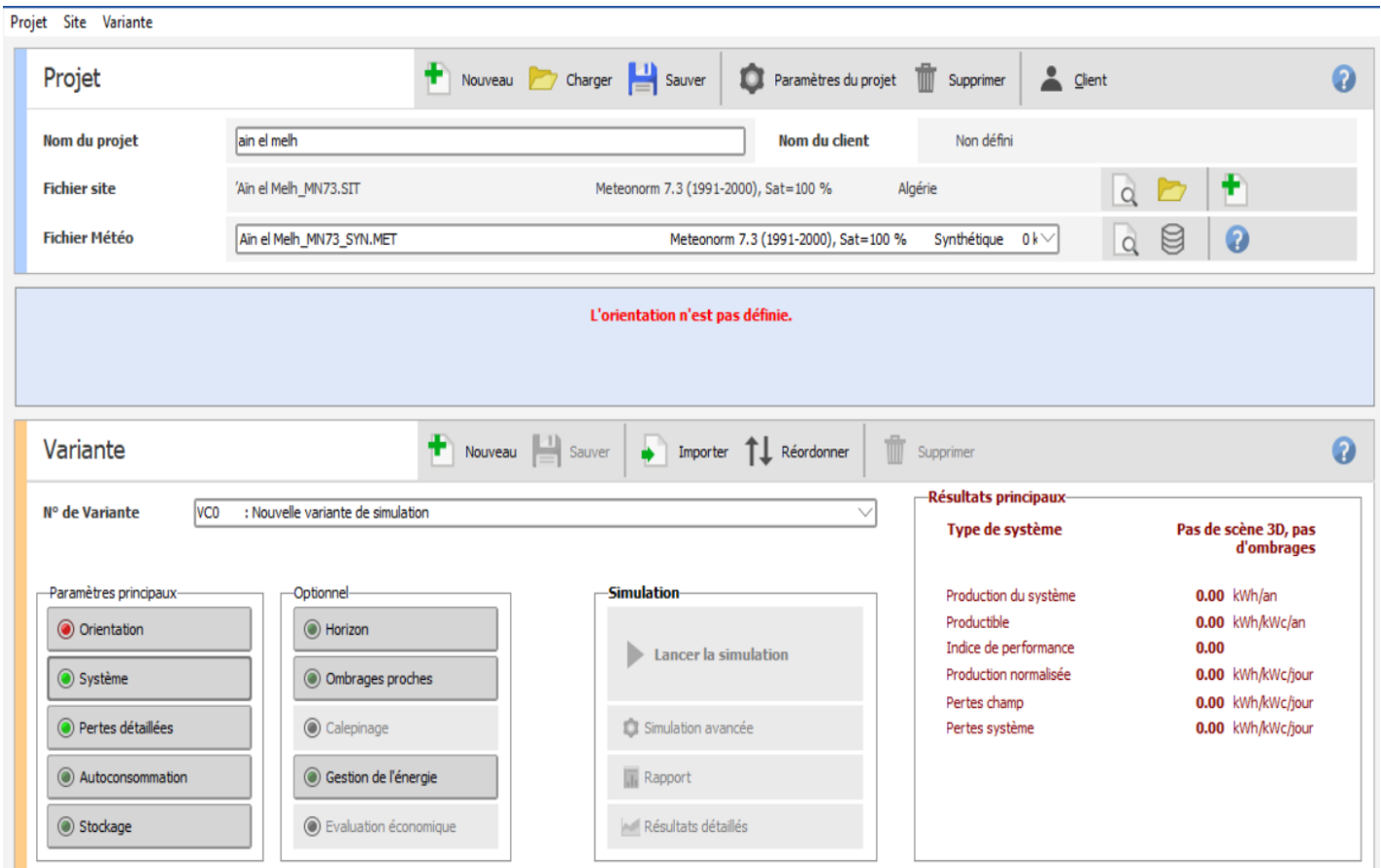


Figure 3-2 Etapes de simulation d'un système photovoltaïque

L'angle des panneaux solaires est déterminé par rapport à la surface de la Terre et leur position pour l'Est, l'Ouest et le Sud avec le respect du Facteur de transposition, perte par rapport à l'optimum et Global sur capteurs

On a choisi un plan incliné fixe avec une inclinaison  $34^\circ$  (par rapport le plan horizontale) comme le montre la figure (1-8) qui est la meilleure inclinaison donnée par PVSYSY, avec l'orientation du panneau (inclinaison et azimuth) et l'amélioration par rapport annuelle, et ignorant toutes les pertes. Le facteur de transposition est défini comme le rapport de l'irradiation incidente (GlobInc) sur le plan, à l'irradiation horizontale (GlobHor). Autrement dit, pour notre système  $FT = 1,18$ , ce que vous obtenez lorsque vous inclinez le plan du collecteur.

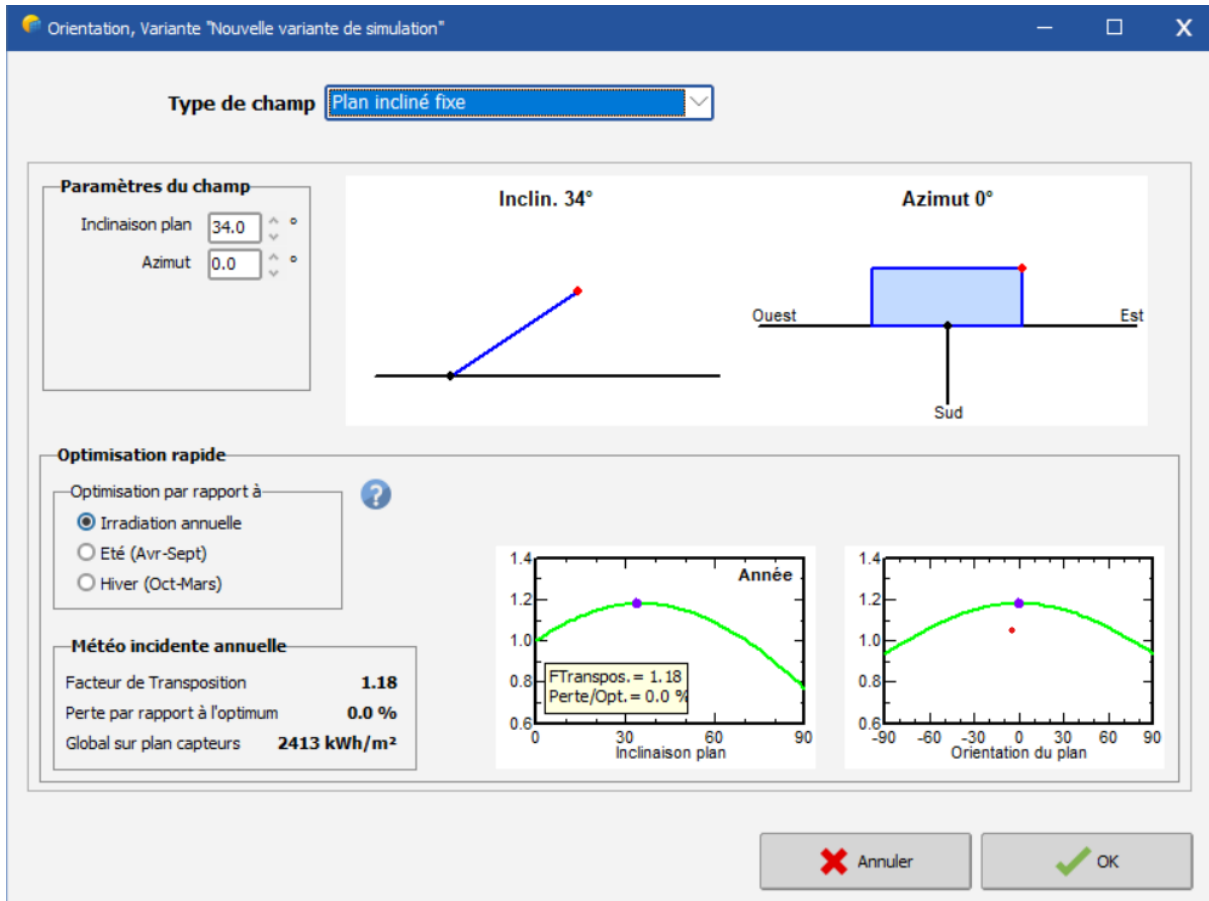


Figure 3-3 Choix d'orientation du panneau

### 3.2.2.2 Dimensionnement d'un système réseaux :

Le dimensionnement du système PV avec PVSYSST contient quelques étapes :

- On peut inclure la puissance nominale désirée ou bien la surface disponible
- Choix du module PV dans la base de données
- Choix de l'onduleur dans la base de données

On a déterminé les paramètres techniques des modules PV et du convertisseur pour injecter le générateur PV au réseau électrique avec une puissance estimée de 500 KWC, et une surface de 3247 m<sup>2</sup>.

Nous avons choisi des modules photovoltaïques de Yingli Solar de type « 250 WP/25V si-poly » la marque « YL250P-29b » (depuis 2015-manufacturer 2015), et un onduleur de 500 KW, de marque « Sungrow SG500MX depuis 2012 » avec une fréquence de 50HZ, a un voltage d'intervalle de « 460-850V »

PVSYSST proposera notamment une configuration de modules/systèmes pour

permettre les premières simulations préliminaires. Le logiciel contient un système de codes d'erreur ou d'avertissement colorés, et en cas d'incohérences, d'erreurs ou d'avertissements, nous en serons informés dans la fenêtre appropriée.

The screenshot shows a software interface for configuring a PV system. It is divided into several sections:

- Sous-champ:**
  - Nom et orientation du sous-champ:** Nom: Champ PV; Orient.: Plan incliné fixe; Inclinaison: 30°; Azimut: 0°.
  - Aide au dimensionnement:** Options for 'Pas de prédim.' and 'Redimens.'; 'Entrez Pnom désirée' set to 500.0 kWc; 'ou surface disponible(modules)' set to 3247 m².
- Sélection du module PV:**
  - Disponibles: Tous les modules PV; Nbre modules maximum: 2000.
  - Yingli Solar: 250 Wp 25V Si-poly YL250P-29b Depuis 2015; Ouvrir button.
  - Utiliser optimiseur:
  - Dimens. des tensions: Vmpp (60°C) 25.6 V; Vco (-10°C) 42.1 V.
- Sélection de l'onduleur:**
  - Disponibles: Tension de sortie 315 V Tri 50Hz; 50 Hz selected, 60 Hz unselected.
  - Sungrow: 500 kW 460 - 850 V TL 50/60 Hz SG500MX Depuis 2012; Ouvrir button.
  - Nbre d'onduleurs: 1; Tension de fonctionnement: 460-850 V; Puissance globale ond.: 500 kWac.
  - Tension entrée maximale: 1000 V; Onduleur "string" avec 8 entrées.
- Dimensionnement du champ:**
  - Nombre de modules et chaînes:** Mod. en série: 20 (entre 18 et 23); Nb. chaînes: 100 (seule possibilité 100).
  - Perte surpuissance: 0.0%; Rapport Pnom: 1.00; Voir conditions button.
  - Cond. de fonctionnement:** Vmpp (60°C) 513 V; Vmpp (20°C) 616 V; Vco (-10°C) 841 V.
  - Irradiance plan: 1000 W/m²; Max. données selected, STC unselected.
  - Imp (STC) 828 A; Isc (STC) 884 A; Puiss. max. en fonctionnement (à 1000 W/m² et 50°C) 446 kW.
  - Isc (aux STC) 884 A; Puiss. nom. champ (STC) 500 kWc.
  - Summary:** Nbre modules: 2000; Surface: 3247 m².

Figure 3-4 Choix du paramètre du module et de l'onduleur

### 3.2.3 Caractéristiques de Module PV

Concernant les modules photovoltaïques, la Figure "II.11" donne les caractéristiques techniques des modules photovoltaïques triphasés en termes de température ambiante et de rayonnement solaire. Il est à noter que la puissance produite par ce module est proportionnelle à la valeur du rayonnement solaire par opposition aux valeurs des températures ambiantes du site. La même pour la tension et le courant du panneau.

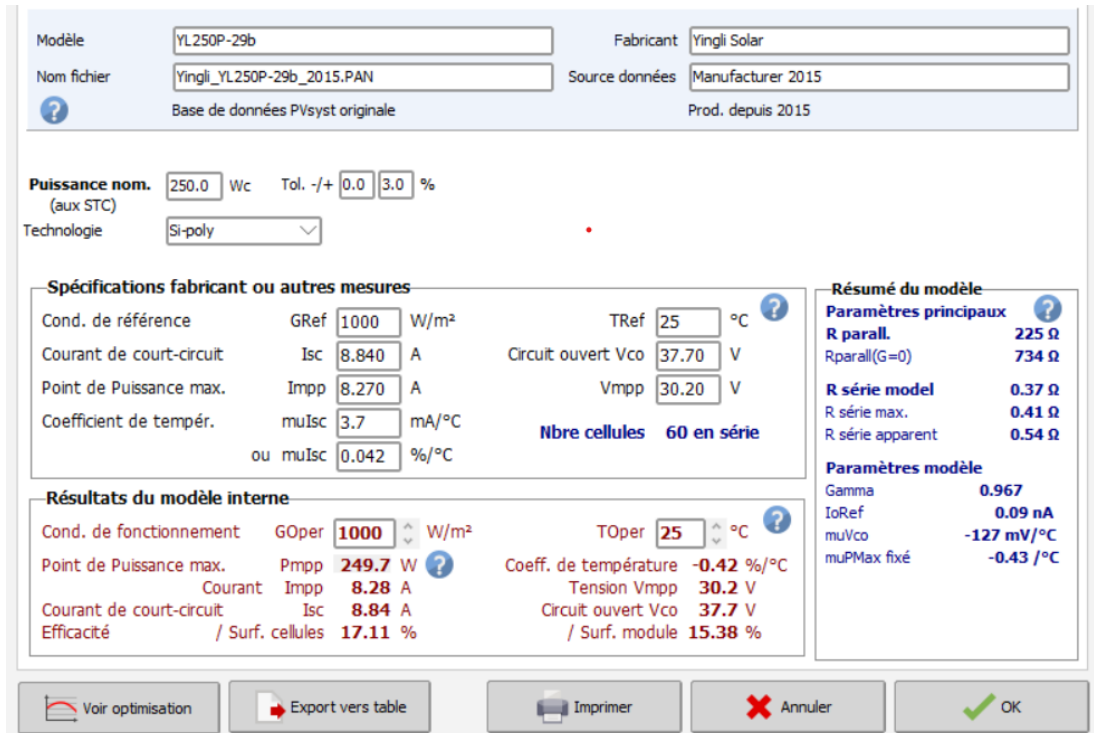


Figure 3-5 caractéristiques de module PV

### 3.2.4 Les caractéristiques techniques du module PV

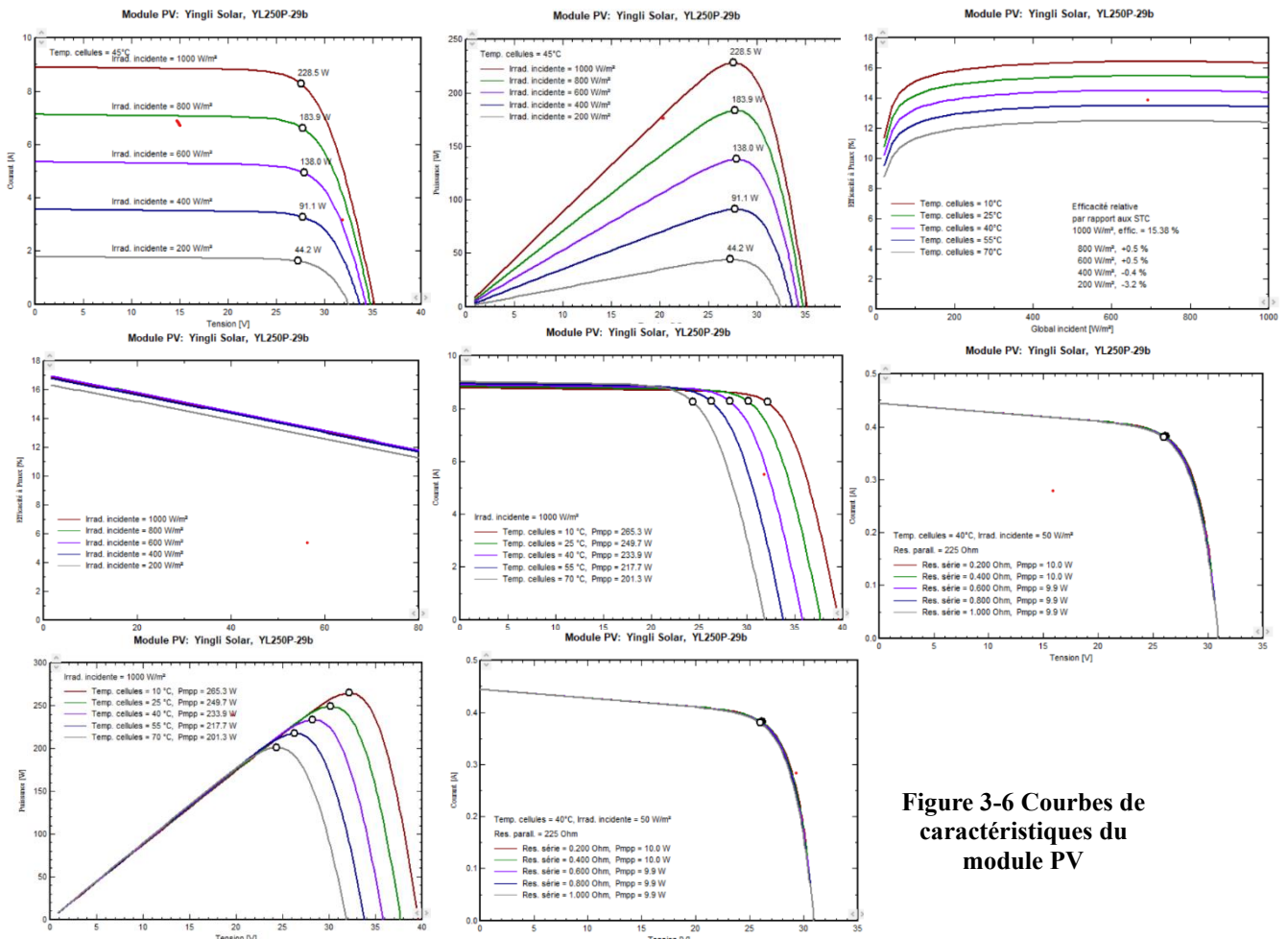


Figure 3-6 Courbes de caractéristiques du module PV

### 3.2.5 Caractéristique de l'onduleur

L'onduleur sélectionné pour le réseau "SG500MX, depuis 2015" peut distinguer les paramètres indiqués sur la figure suivant

The screenshot shows the 'Paramètres principaux' (Main parameters) tab. The model is 'SG500MX' and the manufacturer is 'Sungrow'. The file name is 'Sungrow\_SG500MX.OND' and the data source is 'Manufacturer 2016'. The base of data is 'Base de données PVsyst originale' and production started in 2012.

**Entrée (DC, Champ PV)**

- Tension MPP minimale: 460 V
- Tension min. pour PNom: N/A V
- Courant d'entrée maximum: N/A A
- Tension MPP nominale: N/A V
- Tension MPP maximale: 850 V
- Tension PV max. absolue: 1000 V
- Puissance seuil: 2475 W (Défaut)
- Spécification contractuelle, sans réelle signification physique: Obligatoire
- Puissance PV nominale: 507 kW
- Puissance PV maximale: 600 kW
- Courant PV maximum: 1220 A

**Sortie (Réseau AC)**

- Fréquence: 50 Hz, 60 Hz (checked)
- Monophasé:
- Triphasé:
- Biphasé:
- Tension du réseau: 315 V
- Puissance AC nominale: 500 kW
- Puissance AC maximale: 550 kW
- Courant AC nominal: 917 A (checked)
- Courant AC maximum: 1008 A (checked)

**Efficacité**

- Efficacité maximale: 99.00 %
- Efficacité EURO: 98.70 %
- Efficacité définie pour 3 tensions:

Figure 3-7 Caractéristique de l'onduleur

### 3.2.6 Diagramme des pertes

Cette figure représente l'ensemble des pertes du système PV annuelle. Où Commence lorsque le rayonnement solaire pénètre dans les panneaux photovoltaïques et continue vers le réseau alimenté par l'énergie générée par le système. On trouve que l'irradiation globale horizontale est égale 2045KWh/m<sup>2</sup>. Le système augmentera de +10,6 % sur globale incident plant capteurs, Puis il perdre -1.88% de facteur d'IAM sur global. La puissance devient représentée par le rayonnement solaire isotrope À 2351 kWh/m \* 3247 m<sup>2</sup> (surface des panneaux), nous connaissons le rendement des panneaux photovoltaïques est de -15.38%, alors l'énergie champ nominale est égale à 1174 MW, qui perd une énergie significative de 10.66% à cause de la température du champ, avec des pertes pour qualité module de +0.75%, en plus on a -1,3 de dégradation induite par la lumière, -2.1 % des pertes

mismatch et -1.25 % des pertes ohmiques de câblage. Quand l'énergie est égale à 1008 MW, elle sera connectée à l'onduleur, qui a aussi des pertes (pertes onduleur en opération -1.17% et pertes onduleur seuil de puissance -0.01%). L'onduleur produit 996 MWh qui est connecté au réseau électrique.

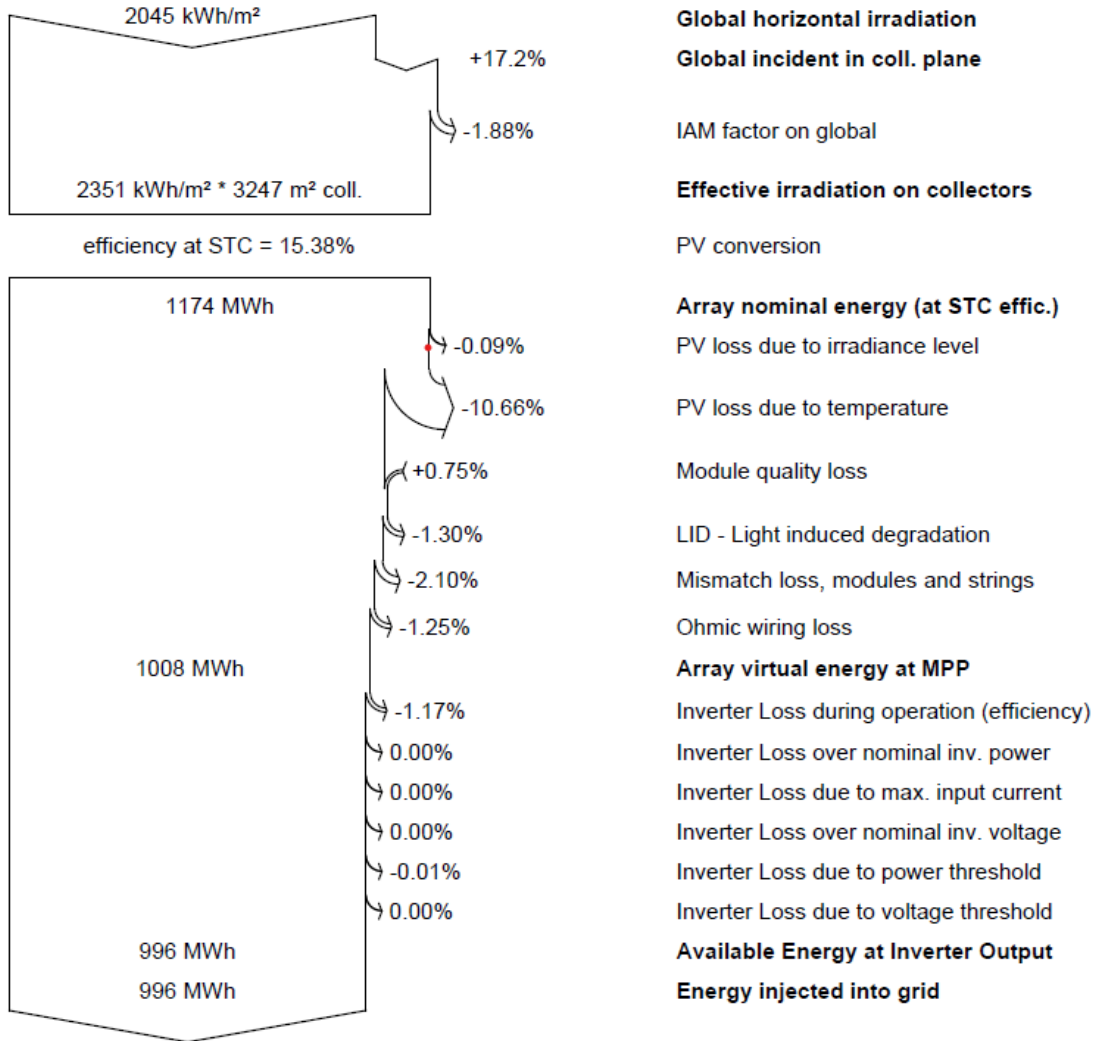


Figure 3-8 Diagramme de perte

### 3.2.7 Energie de sortie du système PV

On présente dans cette figure l'évolution d'Energie injecte au réseau au cours de temps (un an)

Pendant le mois du janvier l'énergie injectée a des valeurs entre 2800 KW et 3100 KW, après il atteints des valeurs élevées près de 3500 KW du mois de février jusqu'à mois du mai, puis il diminuer pendant toute l'été à cause de température élevé qui affecte sur le rendement du panneau.

Ces valeurs remontent ensuite progressivement pendant les derniers mois de l'année, et il stabilise à des valeurs entre 2800 KW et 3100 KW, cela est dû à la basse température et les vents froids. Donc il évident que l'énergie est affectée par la température et le climat.

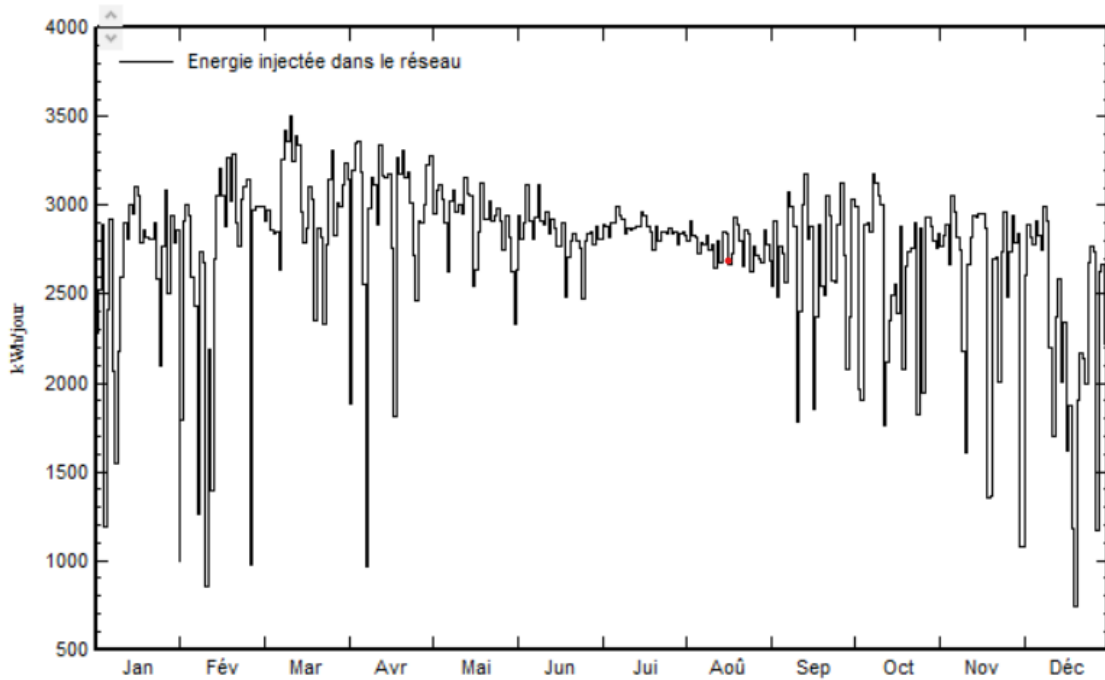


Figure 3-9 Courbe d'énergie injectée au réseau

### 3.2.8 Facteurs de production normalisés

Le schéma suivant (figure 3.17) nous montre l'évolution du facteur de perte de collecte (LC) et les pertes du système (LS) et l'énergie utile produite (Yf) tout au long de l'année.

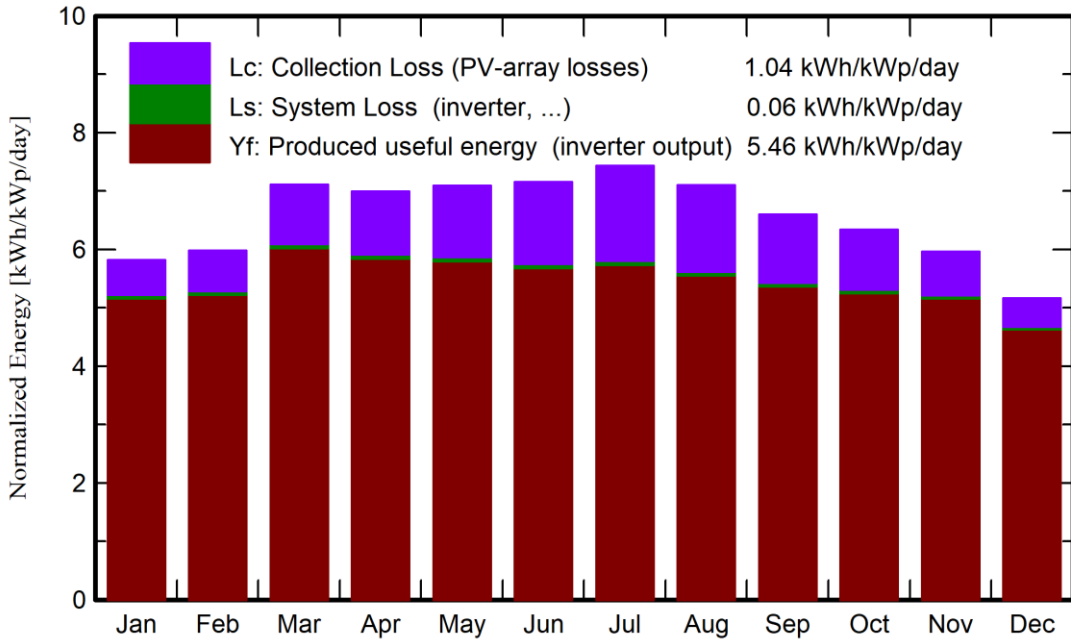


Figure 3-10 Histogramme des pertes et d'énergie utile produite

### 3.2.9 Indice de performance (PR)

Cette figure (3.18) représente le ratio de performance PR indique l'effet global des pertes sur la production d'énergie des rangées d'un système PV

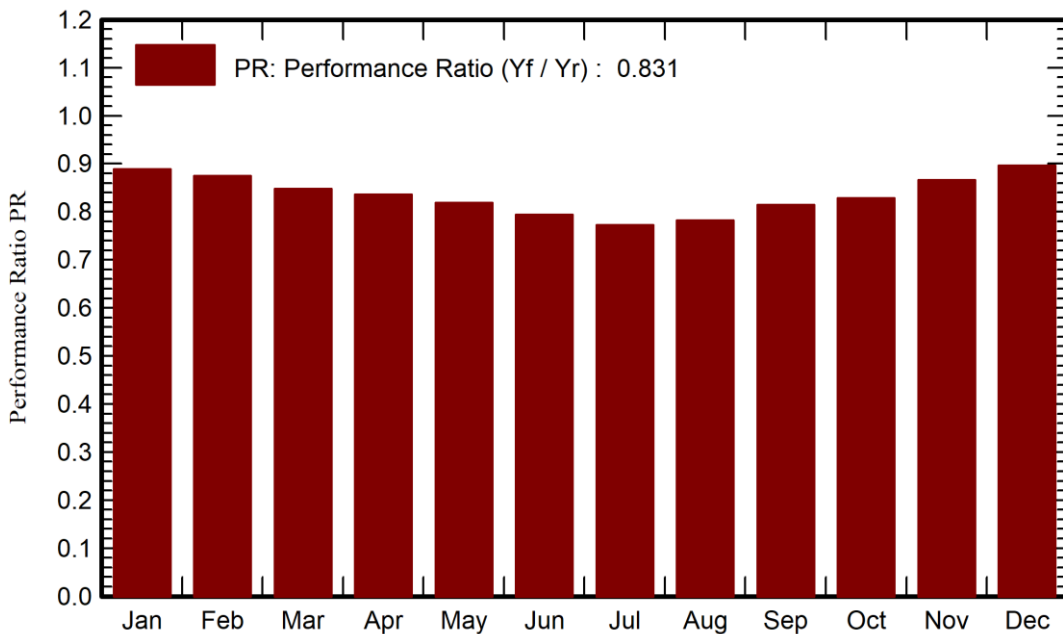


Figure 3-11 Histogramme de ratio de performance

### 3.3 Résultats et discussion

On a utilisé les données météorologiques et les données d'onduleur obtenues du 1 janvier jusqu'au 31 décembre 2019 pour calculer et analyser les paramètres de performances du système photovoltaïque.

Le tableau suivant montre les valeurs mensuelles du différent paramètre du système (rendement, pertes, facteur de capacité, ratio de performance, efficacité).

#### 3.3.1 Valeurs mensuelles du paramètre du système

	YA(h/Jour)	YF (h/ Jour)	YR (h/ Jour)	$\eta A$ (%)	$\eta_{inv}$ (%)	$\eta_{sys}$ (%)	CUF (%)	PR (%)	Ls (h/ Jour)	Lc (h/ Jour)
Jan	4,6	4,49	5,9	11,9	96,95	11,53	18,72	76,08	0,11	1,3
Feb	5,8	4,72	7,47	11,85	97,57	11,56	19,7	63,25	1,08	1,67
Mar	5,37	5,24	7,02	11,67	96,65	11,27	21,83	74,58	0,13	1,22
Apr	6,04	5,89	8,35	11,06	98,2	10,86	24,56	70,54	0,15	2,98
May	5,9	5,76	8,25	10,91	97,62	10,65	24,01	69,83	0,14	2,21
Jun	6,08	5,94	8,93	10,39	97,65	10,14	24,76	66,5	0,14	2,85
Jul	5,88	5,74	8,13	11,04	97,65	10,78	23,94	70,61	0,14	2,25
Aug	5,28	5,16	7,53	10,7	97,66	10,44	21,5	68,5	0,12	2,25
Sept	5,04	4,93	6,91	11,14	97,65	10,87	20,57	71,42	0,11	1,87
Oct	5,3	5,17	7,19	11,24	96,85	10,88	21,56	71,95	0,13	1,89
Nov	4,29	4,22	5,52	11,96	97,8	11,69	17,61	76,57	0,07	1,23
Dec	4,02	3,93	5,09	12,07	97,65	11,78	16,39	77,17	0,09	1,07
Moyenne	5,3	5,09	7,19	11,32	97,49	11,03	21,69	71,41	0,20	1,89

Tableau 2 valeurs mensuelles du paramètre du système

#### 3.3.2 Analyse des données météorologiques

La productivité des modules PV est affectée par les conditions environnementales difficiles du désert comme la température, irradiation solaire, vitesse de vent. Plusieurs facteurs doivent être pris en compte pour garantir la performance et la qualité de système PV.

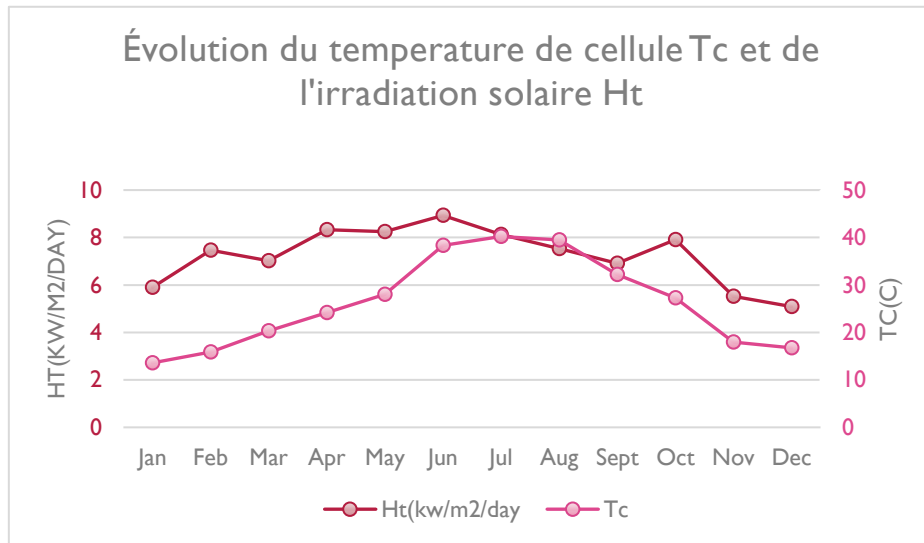


Figure 3-12 Évolution de la température de cellule Tc et de l'irradiation solaire Ht

La figure 3.3.1-1 montrent l'évolution l'irradiation solaire (l'irradiation solaire totale quotidienne moyenne mensuelle), et de la température de cellule, l'irradiation solaire atteint une valeur maximale estimée de 8.93kW/m2/jour en mois de juin, et une valeur minimale de 5.09 kW/m2/jour en mois de décembre.

La température de cellule augmente au fil des mois, jusqu'à une valeur maximale de 40°C en juillet, après qu'il diminue progressivement.

On remarque que la température de cellule est affectée par l'augmentation de l'irradiation solaire et cela impacte négativement sur la production d'énergie

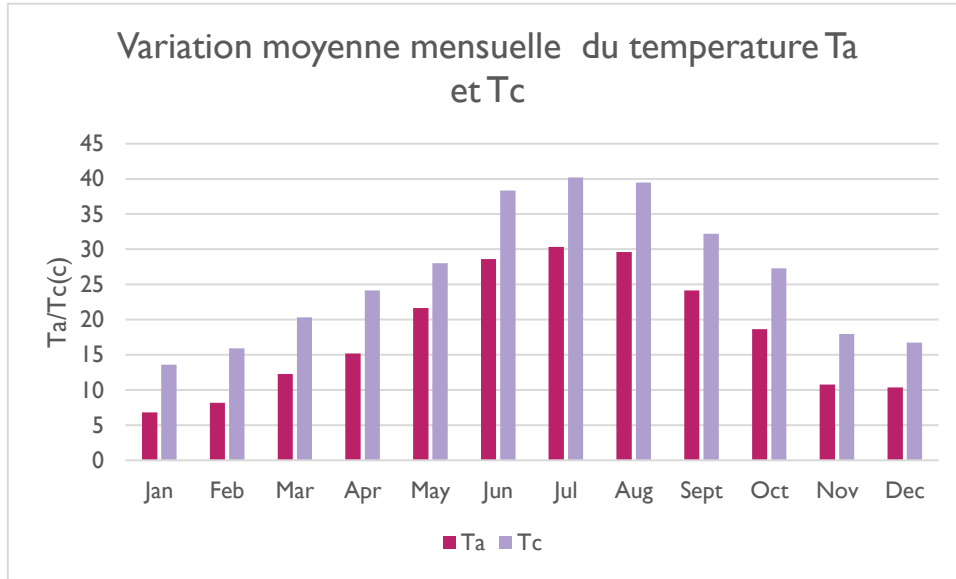


Figure 3-13 Variation moyenne mensuelle du température Ta et Tc

La figure 3.3.1-2 représente la variation mensuelle moyenne de la température ambiante  $T_a$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) et la température de cellule ( $^{\circ}\text{C}$ ), les deux paramètres augmentent en parallèle. La valeur mensuelle moyenne maximale de la température ambiante est  $30^{\circ}\text{C}$  en mois de juillet, et sa valeur minimale est  $6^{\circ}\text{C}$  en janvier. La température de cellule augmente aussi respectivement et atteint une valeur maximale de  $40^{\circ}\text{C}$

### 3.3.3 Analyse du Rendements

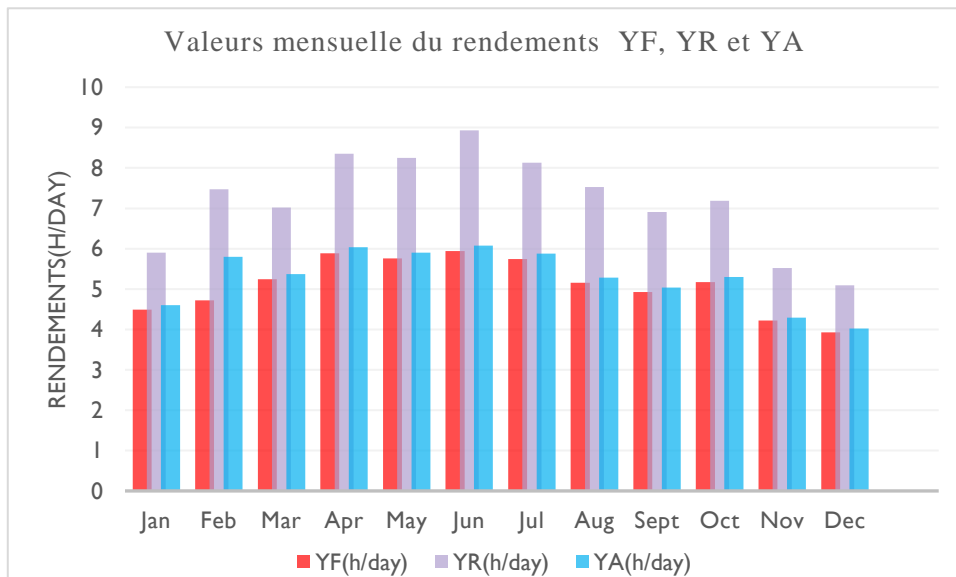


Figure 3-14 Valeurs mensuelle du rendements YF, YR et YA

Dans cette figure (3.3.3-1) on a représenté les trois rendements (YF, YR, YA), on remarque que les trois rendements varient d'une même façon pendant toute l'année.

Le rendement final prend une valeur max de 5.94(h/jour) au mois de juin et une valeur minimale au mois de décembre estimée de 3.93(h/ jour).

Le rendement de référence augmente dans l'intervalle de 4.49(h/ jour) jusqu'à 5.94(h/ jour)

Aussi une valeur max de 6.08(h/ jour) en rendement du champ obtenu aussi en mois de juin, et une valeur minimale 4.02(h/ jour) en décembre.

Il est évident que les trois rendements prennent leurs valeurs max en été.

### 3.3.4 Analyse du Rapport de rendement et facteur de capacité

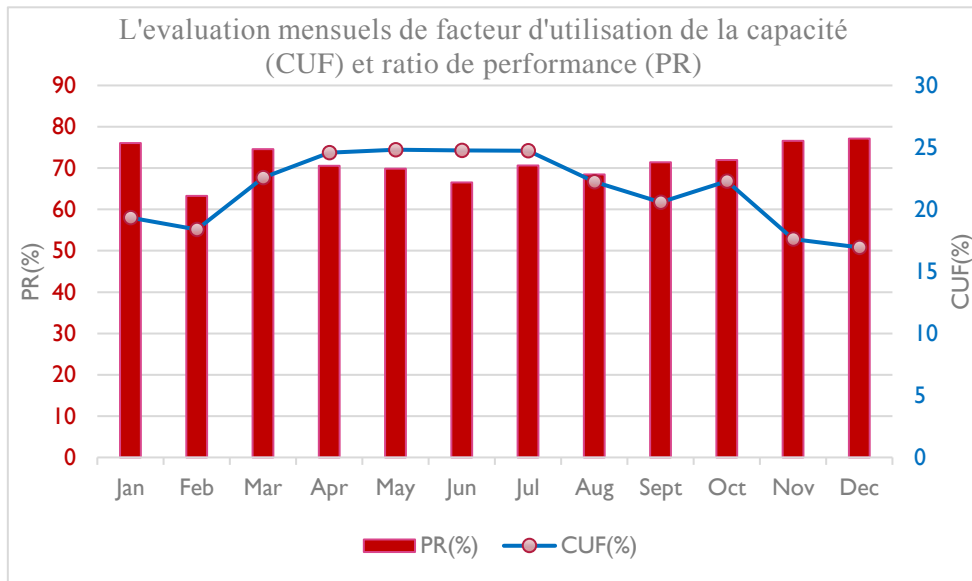


Figure 3-15 valeur mensuelle de facteur d'utilisation de capacité et de rapport de performance

Le rapport de performance est présenté dans la figure (3.3.4-1), il varie d'une valeur minimale de 63.25% obtenue en mois de février jusqu'à une valeur maximale de 76.57% en décembre.

On parle de ratio de performance pour mesurer la bonne performance d'une installation lors de la mise en fonctionnement, il exprime et indique l'efficacité de la centrale en conversion d'énergie solaire en électricité.

Le deuxième paramètre c'est le facteur de capacité il varie de 16.39% jusqu'à 24.76 %, ces valeurs ont été obtenues au cours du mois de décembre et juin respectivement.

### 3.3.5 Analyse du Rendement de champs, d'onduleur et du système

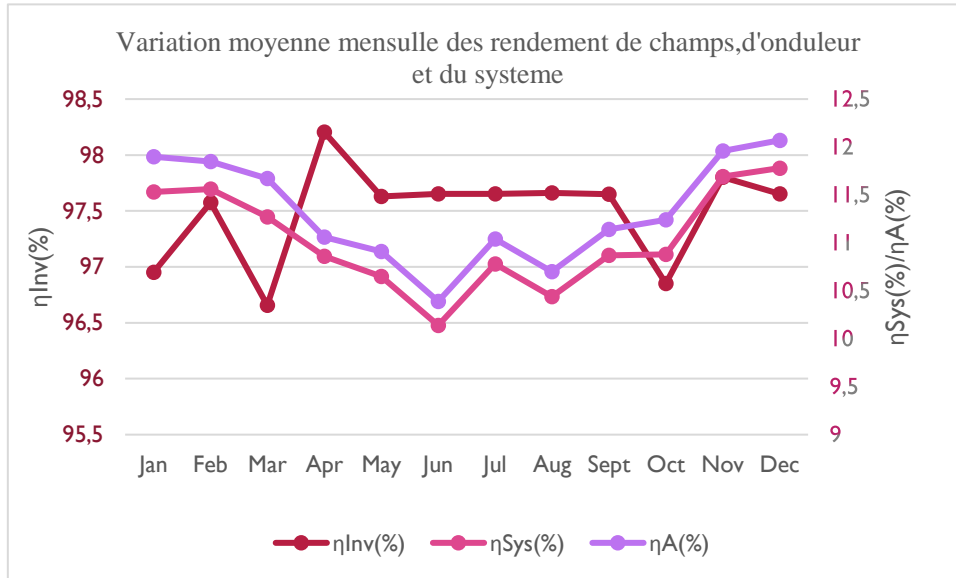


Figure 3-16 Variation moyenne mensuelle des rendements de champs, d'onduleur et du système

La valeur minimale du rendement du champ a été observée en été à cause de la température élevée cette valeur est obtenue en juin (10.39%), après il augmente jusqu'à il atteint une valeur maximale de 12.07% en printemps en mois du décembre due à la basse température, Une valeur maximale de 11.67% en printemps, et 11.9% en hiver.

Le rendement de l'onduleur photovoltaïque est affecté par deux paramètres la température ambiante et l'irradiation solaire. Une valeur maximale du rendement de l'onduleur de 98.20% a été observée en mois d'avril, et une valeur minimale estimée à 96.96% en mars. En été la valeur maximale du rendement était 97.66%, et en printemps il était de 97.8%.

Le rendement du système dépend du rendement de champs et d'onduleur, il atteint une valeur maximale si ces deux derniers sont maximaux.

Ce rendement atteint une valeur maximale de 11.78% en mois de décembre à cause d'un rendement du champ élevé, et 10.14% comme une valeur minimale en mois de juin.

Au printemps et à l'automne les valeurs étaient respectivement de 11.27% et 11.96%.

### 3.3.6 Analyse des pertes

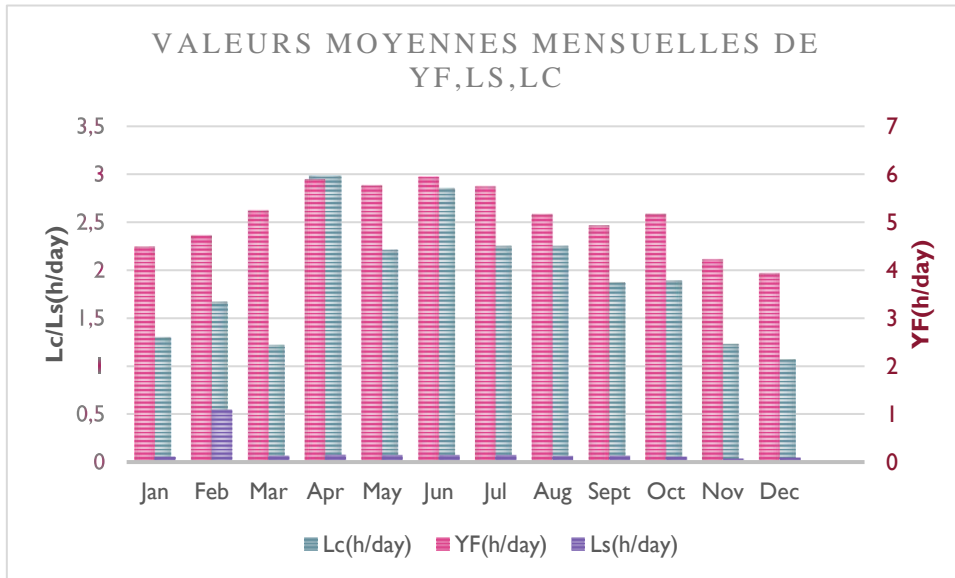


Figure 3-17 Valeurs moyennes mensuelles de rendement final, pertes de systèmes et pertes de capture

Cette figure représente les changements des valeurs mensuelles du rendement finale, pertes de système et de la perte de capture, les pertes système (Ls) change du 0.07h/jour jusqu'à 1.08 h/jours pendant toute l'année, les pertes de capture (Lc) prend des valeurs maximales due à la température élevée de cellule, et ils augmentent en parallèle. La baisse de température de cellules en hiver nous donne des valeurs minimales du Lc.

Les pertes Lc sont divisées en deux parties : Lct (perte de capture thermiques) qui est affecté par la variation de la température de la cellule, et Lcm (perte de captures divers), qui est affecté par les l'ombrage (pertes d'ombrage) et les pertes du câblage et diode.

### 3.4 Conclusion

La partie plus importante de notre travail est ce chapitre-là, il a nous permet d'analyser et d'évaluer le système photovoltaïque du central de Ain el Melh, en évaluant les différents paramètres de performances du système : rendement du module, rendement du système, rapport de performance, les pertes ....

L'évaluation des valeurs moyennes mensuelles de chaque paramètre du système PV nous aidions à l'étudier bien, et à connaître toutes les causes qui peut affecter sur ces performances et bien sur le rendement du tous le système PV.

### Conclusion générale

L'objectif générale de notre travail est la simulation d'une centrale photovoltaïque connectée au réseau électrique (Centrale PV du Ain el Melh) en utilisant le logiciel PVSYS, afin de calculer et d'analyser les différents paramètres de performances du système PV tels que : les pertes, les rendements et l'efficacité du système.

Nous avons présenté en premier lieu les différents types des énergies renouvelables, leurs avantages et leurs inconvénients. On a précisé sur la principale source des différentes formes des énergies renouvelables qui est le soleil, et sur l'Energie solaire photovoltaïque en décrivant le principe de l'effet photovoltaïque, la structure de cellules et leur caractéristique.

Le deuxième chapitre exprime les deux types des systèmes PV (système PV autonome et système PV rattaché au réseau), ses principaux composants : convertisseur (DC-DC) et ses différentes topologies de champs, l'onduleur de tension (DC-AC) et aussi ses différentes topologies de champs, la technologie MPPT et leur méthodes. La dernière partie de chapitre parle sur les différents paramètres de performance du système.

Nous avons conclu ce travail avec l'analyse et l'évaluation des différents paramètres de performances du système PV sur une période de 12 mois (du 1 janvier jusqu'à 31 décembre 2019). D'abord on a simulé le système PV rattaché au réseau avec le logiciel PVSYS, après on a calculé les différents rendements (rendement final, de référence, de champ, d'onduleur, de module et rendement du système), les pertes tels que : les pertes de système et de capture réseau, et aussi le facteur de capacité et le rapport de rendement. Les différentes courbes de ces derniers paramètres ont été évaluées et analysées pour comprendre le comportement du système, et de détecter les causes qui peuvent affecter négativement sur le rendement du système.

Ces résultats montrent que le système PV est affecté par ces paramètres : l'irradiation solaire, la température et le vent.

La température a un effet délétère sur le fonctionnement de panneau, quand la température de cellule augmente, le courant aussi augmente par contre la tension diminue, ceci entraîne une diminution de la puissance maximale disponible et bien sûr affecte sur le fonctionnement du module et d'onduleur. La température élevée et cause

par l'augmentation d'irradiation solaire, et les vents peuvent soulager la température élevée

Donc le rendement du module et de l'onduleur sont affectés par la température et l'irradiation solaire et le rendement du système dépend de ces deux rendements.

## Bibliographie

- [1] M. Jaouen et C. Racault, « Les énergies renouvelables Etat des lieux et perspectives en Italie », p. 31.
- [2] « Energie solaire : définition et différents types d'exploitation - Opéra Energie ». <https://opera-energie.com/energie-solaire/> (consulté le 9 juin 2022).
- [3] « Energie hydraulique : sa définition, ses avantages et inconvénients ». <https://selectra.info/energie/guides/environnement/hydraulique> (consulté le 9 juin 2022).
- [4] « Qu'est-ce que l'énergie éolienne ? | EDF FR », 9 février 2022. <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/qu-est-ce-que-l-energie-eolienne> (consulté le 9 juin 2022).
- [5] « Le fonctionnement d'une éolienne - Journal de l'éolien - Tout sur l'éolien ». <http://www.journal-eolien.org/tout-sur-l-eolien/le-fonctionnement-d-une-eolienne/> (consulté le 9 juin 2022).
- [6] « L'énergie géothermique - Les explorateurs de l'énergie ». <https://www.explorateurs-energie.ch/les-9-energies/lenergie-geothermique/> (consulté le 9 juin 2022).
- [7] V. François-D, « L'Energie Géothermique et les pompes à chaleur : grand potentiel et multiple application. », in *Les cahiers de l'énergie*, p. 56-60.
- [8] « Biomasse - Définition ». [https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire\\_environnement/definition/biomasse.php4](https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/biomasse.php4) (consulté le 9 juin 2022).
- [9] N. Nehala et mohamedabdenmour Guedouar, « Thème : Les énergies renouvelables énergie éolienne », p. 53.
- [10] « Énergies renouvelables : quels avantages et inconvénients ? », 14 décembre 2018. <https://blog.exacompare.fr/energie-renouvelable/avantages-et-inconvenients-des-energies-renouvelables/> (consulté le 15 juin 2022).
- [11] Futura, « Définition | Énergie solaire | Futura Planète », *Futura*. <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/energie-renouvelable-energie-solaire-6679/> (consulté le 15 juin 2022).
- [12] « Définition | Rayonnement solaire | Futura Planète ». <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/climatologie-rayonnement-solaire-l3785/> (consulté le 9 juin 2022).
- [13] R. Alain, « Gisement-solaire\_Alain Ricaud\_Jan-2011 », Université de CERGY-PONTOISE.
- [14] Energie Trans, Éd., « GISEMENT SOLAIRE », p. 34.
- [15] Saigaa, « chapitre I Conversion Photovoltaïque (PV) Partie I. », Université de M'sila, Polycopié de cours.

- [16] « La cellule photovoltaïque : comment ça marche ? », *Planète Énergies*. <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/la-cellule-photovoltaique-comment-ca-marche> (consulté le 9 juin 2022).
- [17] Schweiz, Éd., *Générateurs photovoltaïques : principes de base, technique de montage et injection dans le réseau*. Berne, 1992.
- [18] K. Abraham, N. Edgar Guy, et W. Boaz, *Energie solaire pour le développement de télécommunication*. Allemagne : éditions universitaires européennes, 2012.
- [19] BOUNADJA Youcef, MEHTOUGUI Badreddin, et A. Tahri, « Méthodologie d'évaluation des systèmes photovoltaïques », 2013, doi : 10.13140/RG.2.2.29781.14563.
- [20] « Chapitre2\_Systeme\_Photovoltaique-Partiel.pdf », in *Notes de cours, Azoui, Master Energies renouvelables*,
- [21] S. SARRI et D. LALILI, « Commande en MPPT d'une chaîne photovoltaïque à base d'un hacheur multiniveaux », Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel, Jijel, 2020.
- [22] G. Moine, « Article167\_Moine\_Gerard\_PV\_filiere\_competitive.pdf », *L'électrification solaire photovoltaïque*. Encyclopédie de l'énergie, avril 2018, p. 10.
- [23] G. Sabah et S. Yasmine, « Simulation d'une Central PV connecté au réseau électrique par deux logiciels « PVSYSY » et « HOMER Pro » », p. 134, 2019.
- [24] S. Vighetti, « Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion », p. 185.
- [25] Y. BENDRIS et F. BELAHBIB, « ETUDE COMPARATIVE DES DIFFÉRENTES ARCHITECTURES DE CONVERTISSEURS STATIQUES DÉDIÉS AU PHOTOVOLTAÏQUE », Abderrahmane Mira de Bejaia, Bejaia, 2013.
- [26] R. NAIRI et M. O. RABHI, « Analyse et simulation de performance d'un central photovoltaïque raccordé au réseau.pdf », Projet fin d'étude Master, Ahmed Draya d'ADRAR, Adrar, 2020.
- [27] A. BENAÏSSA, « Techniques d'optimisation et contrôle de puissance », Université Ziane Achour de Djelfa, Polycopié de cours.
- [28] X. Jiang, « ÉTUDE COMPARATIVE DE STRUCTURES DE CONVERTISSEURS POUR LES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES CONNECTÉS À UN RÉSEAU ÉLECTRIQUE MOYENNE TENSION », p. 110.
- [29] M. Hacid et L. Kaci, « Caractérisation et commande d'un système photovoltaïque. », MOULOUD MAMMERRI DE TIZI-OUZOU, Tizi-Ouzou, 2021.
- [30] K. Mertens, *Photovoltaics : Fundamentals, Technology and practice*, Second Edition. Hoboken, NJ Chichester, West Sussex : Wiley, 2019.
- [31] H. Daher, « SUIVI EXPERIMENTAL DES PERFORMANCES D'UNE CENTRALE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE A DJIBOUTI », p. 7.

