



Mémoire de Master

Présenté au

Département : Génie Électrique

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electromecanique

Spécialité : Electromecanique

Réalisé par :

TIRIKI Adel.

Et

TIRIKI Karim.

Thème

Etude Et Dimensionnement Optimal D'une Installation Solaire Photovoltaïque.

Soutenu le: **06/11/2021**

Devant la commission composée de :

Mme. Yassa

Univ. Bouira

Président

Dr : M. Kharchi.

Univ. Bouira

Rapporteur

Dr: I. Gueriche

Univ. Bouira

Examineur

Dédicaces

Je tiens à dédier ce simple mémoire à :
Ma très chère mère et à mon cher père,
en témoignage et en gratitude de leurs dévouements,
de leur soutien permanent durant
toutes mes années d'études, leurs sacrifices
illimités, leurs réconfort morale, eux qui ont
consenti tant d'efforts pour mon éducation,
mon instruction et pour me voir atteindre
ce but, pour tout cela et pour ce qui
ne peut être dit, mes affections
sans limites.

Toutes les familles : TIRIKI.

Mes chers frères et ma sœur.

Mes amis d'enfance.

ADEL

Dédicace

J'ai le grand honneur de dédier ce modeste travail

À ceux qui m'ont fait de moi un homme

"À Ma mère "et "Mon père "qui m'ont aide et m'ont encouragé
beaucoup durant tous mes études.

À ma chère grand-mère et mon grand-père.

À mes sœurs et mes frères.

À tous mes camarades.

À toute ma famille.

À mon binôme ADEL

À tous mes amis et mes proches.

KARIM

REMERCIEMENTS

Nous remercions tout d'abord ALLAH le tout puissant qui nous a fourni l'aide et la confiance réaliser ce travail.

Tout non infini remerciement à notre promoteur Dr : M. KHERCHI pour son aide, ces conseils et ces remarques qui nous ont permis de présenter notre travail dans sa meilleur forme.

Nos remerciements s'adressent aussi, à tout le personelle de particulièrement messieurs : MELLAH HASSAN , SAHRAOUI HAMZA

Nous remercions également tous les enseignants qui ont contribués à notre formation durant notre cursus universitaire.

Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribués de prés ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail, trouvant ici l'expression de notre profonde gratitude et profonds respects.

RÉSUMÉ

Dans ce mémoire, nous avons étudié et dimensionné optimal D'une installation solaire photovoltaïques (PV) raccordés au réseau électrique à travers une étude comparative de différentes technologies de modules PV en fonction de différents paramètres du système. Nous avons étudié les performances d'un système solaire pour le site de Reghaia d'Alger, par un dimensionnement avec le logiciel PVSYST, en employant les données météorologiques du site. Il est clair que l'analyse économique des solutions photovoltaïques prend de plus en plus d'importance, elle est indispensable pour prendre des décisions d'investissement en toute connaissance de cause pour pouvoir quantifier la rentabilité de l'électricité photovoltaïque.

L'optimisation de l'orientation des modules et l'ajustement saisonnier des angles d'inclinaison ont montré un gain énergétique de plus de 65 MWh/an par rapport à une inclinaison fixe.

En identifiant les différentes pertes dans le système PV, nous déduisons que l'onduleur présente la contribution la plus importante. L'onduleur doit pouvoir fonctionner à sa puissance maximale même si le champ de panneaux peut fournir une puissance plus importante, d'où la nécessité d'opter pour une technologie offrant la meilleure efficacité annuelle possible de ce composant.

Mots clés : système photovoltaïque, cellule solaire, la rentabilité, dimensionnement, silicium, rendement, énergie électrique.

Table des Matières

Remerciements.....	I
Résumé.....	II
Table des Matières	III
Liste des Figures	IV
Liste des Tableaux	V
Listes des Acronymes et Symboles.....	VI
Introduction Générale	1
Chapitre 01 : Fondements des installations photovoltaïques	
1. Introduction.....	3
2. Energie lumineuse et la conversion photovoltaïque.....	3
2.1. La lumière sous toutes ses formes	3
2.1.1. Longueur d'onde (λ).....	3
2.1.2. Répartition spectrale des ondes électromagnétiques.....	4
2.1.3. Sources de lumière	4
2.1.3.1. Types de sources lumineuses	5
2.2. Le rayonnement solaire terrestre	6
2.2.1. Géométrie Terre-Soleil.....	6
2.2.1.1. Mouvements de terre	7
2.2.1.2. Trajectoire apparente du soleil	7
2.2.2. Caractéristique du rayonnement solaire	8
2.2.2.1. Energie renouvelable.....	8
2.2.2.2. Le rôle de l'atmosphère.....	8
2.2.2.3. Les composants rayonnement solaire	9
2.3. La conversion photovoltaïque	9
2.3.1. L'absorption de la lumière	9
2.3.2. Transfert d'énergie des photons aux charges électriques.....	10
2.3.3. La collecte des charges	10
3. description des équipements d'une installation PV connectées au réseau	12

3.1. Principe fonctionnement d'une installation photovoltaïque	12
3.2. Cellule photovoltaïque.....	13
3.2.1. Différents types de cellules photovoltaïques.....	13
3.3. Panneaux solaire.....	15
3.3.1. Panneau à 60 cellules de 156 mm.....	15
3.3.2. Panneau à 72 cellules de 125 mm.....	15
3.3.3. Panneau en couches minces de 85 W.....	15
3.4. Installation mécanique des panneaux.....	16
3.4.1. Structures support.....	16
3.4.2. Types de montages.....	16
3.5. Caractéristiques d'un module.....	18
3.6. Nettoyage de modules	19
3.6.1. But du nettoyage.....	19
3.6.2. Courbe de rendement avant et après nettoyage.....	19
3.7. Onduleurs	19
3.7.1. MPPT	20
3.7.2. Choix de l'ondeur	20
3.8. Les appareille de protections	22
3.8.1. Les appareils de protections côté courant continu.....	22
3.8.2. Les appareille de protections côté courant alternatif	22
4. Conclusion.....	23

Chapitre 02 : dimensionnement et conception d'une installation photovoltaïque

1. Dimensionnement d'une installation PV connectées au réseau.....	24
1.1. Données d'ensoleillement	24
1.2. Orientation des modules PV.....	24
1.3. Angle d'inclinaison des modules PV.....	25
1.4. Calcul de la puissance crête des panneaux PV	26
1.5. Calcul du nombre total des modules PV	26
1.6. Dimensionnement de l'ondeur	27
1.6.1. La compatibilité en tension (Tension maximale admissible)	27
1.6.2. La compatibilité en courant	28
1.6.3. La compatibilité en puissance	28
1.7. Dimensionnement du panneau photovoltaïque.....	28
1.7.1. Principes de dimensionnement et de positionnement du panneau.....	29
1.7.2. Dimensionnement sur le mois le moins ensoleillé.....	29

1.7.3. Dimensionnement sur le mois le plus ensoleillé.....	29
1.8. Montage et câblage.....	30
1.8.1. Orientation des panneaux solaires (cap sur le sud).....	30
1.8.2. Inclinaison du panneau solaire	30
1.8.3. Eviter l'ombrage	30
1.8.4. Câblage des panneaux solaires.....	31
2. Caractéristique d'un système PV connectées au réseau électrique.....	31
2.1. Réseaux électrique	31
2.2. Classification des générateurs photovoltaïques.....	32
a) Générateurs de petite taille (P=1 à 10 kW).....	32
b) Générateurs de taille moyenne (P=10 à 100 kW).....	32
c) Générateurs de grande taille (P ≥ 500 kW).....	32
2.3. Classification l'installation de générateurs photovoltaïques	32
a. Installations PV > 250 kVA raccordées sur le réseau HTA.....	32
b. Installations PV de 36 à 250 kVA raccordées sur le réseau BT ou HTA.....	32
c. Installations PV ≤ 36 kVA raccordées sur le réseau BT.....	32
2.4. Système PV connecté directement au réseau.....	33
a) Structure à convertisseur unique.....	33
b) Structure avec bus à basse tension alternative.....	33
3. rentabilité d'une installation PV connectées au réseau.....	34
3.1. Le rendement de panneaux solaire.....	34
3.1.1. La puissance de vos panneaux solaires.....	34
3.1.2. Les conditions optimales : L'orientation, l'inclinaison et l'ombrage.....	34
3.2. L'amortissement ou retour sur investissement	35
3.2.1. L'investissement : le coût d'une installation photovoltaïque	35
3.2.2. Le prix d'achat initial de votre installation photovoltaïque	35
3.2.3. Les coûts de fonctionnement	35
3.3. Les bénéfices de vos panneaux solaires.....	36
3.3.1. Économiser sur sa facture d'électricité	36
3.3.2. Le juste nombre de panneaux solaire	36
4. utilisation du logiciel PVSYST pour l'étude de l'installation solaire PV connectées au réseau	
...36	
4.1. Introduction	36
4.2. Inscription générale de ce système	36

	Page
4.2.1 principale	36
4.2.2. Fenêtre de Couple au réseau	38
4.2.3. Données climatiques	38
4.2.4. Données météorologiques	39
4.2.5. Orientation	39
4.2.6. Données de systèmes.....	40
4.2.7. Simulation	41
4.2.8. Les points forts de système PVSYST	42
5. conclusion	42
Chapitre 03 : Application des systemes PV dans la zone insustrielle de Réghaia	
1. Introduction.....	43
2. Conditions géographiques et météorologiques de site.....	43
3. Orientation des panneaux PV.....	44
4. Choix de générateur photovoltaïque et de l'onduleur.....	45
4.1. Branchement GPV et onduleur.....	47
4.2. Le choix de nombre de module en série.....	47
4.3. Facteur de dimensionnement.....	49
5. Résultats de simulation.....	49
6. Discussion économique.....	51
7. Conclusion	51
Conclusion Générale.....	52
Références	53

Liste de figures

Chapitre 01

Figure (1.1) : Définition de longueur d'onde(λ)	4
Figure (1.2) : décomposition de la lumière blanche par un prisme	4
Figure (1.3) : spectre continue, émis par une ampoule halogène	5
Figure (1.4) : spectre discontinue d'une lampe aux vapeurs de mercure	5
Figure (1.5) : spectre combiné d'un tube fluorescent de type «Warm witz »	6
Figure (1.6) : les trois principales raies d'émission du laser argon-ion	6
Figure (1.7) _ plan de l'écliptique : l'orbite terrestre et les saisons	7
Figure (1.8) : trajectoire de soleil	8
Figure (1.9) : réflexion, transmission et absorption	10
Figure (1.10) : dopage des semi-conducteur (dopage n et p)	11
Figure (1.11) : représentation schématique d'une jonction p-n	12
Figure (1.12) : représente un système PV connecté au réseau électrique	12
Figure (1.13) : Cellules solaires monocristallines	13
Figure (1.14) : Cellules solaires polycristallines	14
Figure (1.15) : Cellules solaires amorphes	14
Figure (1.16) : support partiel en bois	16
Figure (1.17) : Exemple de montage sur-imposé en terrasse	17
Figure (1.18) : Exemple de montage sur châssis	17
Figure (1.19) : Exemple de montage sur trackers	18
Figure (1.20) : Courbe de rendement	19
Figure (1.21) : rôle de l'onduleur	20
Figure (1.22) : MPPT	20

Chapitre 02

Figure (2.1) : Définition de l'orientation d'un panneau photovoltaïque	24
Figure (2.2) : Angle d'inclinaison des modules photovoltaïques	25
Figure (2.3) : Panneau solaire photovoltaïque	28
Figure (2.4) : ombrage des arbres	30
Figure (2.5) : exemple de câblage en série et en parallèle	31
Figure (2.6) : plusieurs modules PV en série vers un seul onduleur	33

Figure (2.7) : bus à basse tension alternative.....	34
Figure (2.8) : page principale.....	37
Figure (2.9) : couple au réseau.....	38
Figure (2.10) : carte interactive de PVSYST pour accéder aux données climatiques.....	38
Figure (2.11) : Paramètres climatique.....	39
Figure (2.12) : angle d'orientation.....	40
Figure (2.13) : configuration de système dans PVSYST.....	41
Figure (2.14) : simulation de système.....	42

Chapitre 03

Figure (3.1) : Choix de site de projet.....	43
Figure (3.2) : Données météorologique source PVGIS TMY.....	43
Figure (3.3) : trajectoire du soleil a Reghaia	44
Figure (3.4) : Configuration des paramètres de simulation.....	44
Figure (3.5) : Vue global de l'usine.....	45
Figure (3.6) : pertes dues à l'ombrage pour le 21 Décembre.....	45
Figure (3.7) : Caractéristique I(V) de générateur PV.....	46
Figure (3.8) : les paramètres à vérifiés pour un bon dimensionnement.....	48
Figure (3.9) : Vérifications de branchement GPV-Onduleur à l'aide de PVSYST.....	48
Figure (3.10) - simulation : diagramme des pertes annuelles.....	49
Figure (3.11) – simulation : énergie, indice de performance et productible.....	50

Liste des tableaux

Chapitre 01

Tableau (1.1) : Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques.....15

Tableau (1.2) : liste de quelques onduleurs photovoltaïques disponibles sur le marché.....21

Chapitre 02

Tableau (2.1) : Choix de l'inclinaison.....26

Chapitre 03

Tableau (3.1) : valeurs de la température et du rayonnement solaire.....50

Liste des Acronymes et Symboles

λ : longueur d'onde

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

P : Phosphore

B : Bore

PV : photovoltaïque.

GaAs : l'arséniure de gallium

CdTe : le tellure de cadmium

Pc : Puissance électrique

Vco : Tension aux bornes du module

Icc : Courant débité par un module

MPPT : maximum power point Tracking

AC : courant alternatif (alternative current)

DC : courant continu (direct current)

HTB : haut tension classe b

HTA : haut tension classe A

BT : basse tension

φ =latitude de lieu

N= Le nombre de jours

Pch : la puissance crête de champ PV.

Ir : Irradiation moyenne mensuelle

Ec : Energie consommée (Wh).

K : Le Coefficient correcteur.

Pch : puissance crête de l'installation

Pc : puissance crête unitaire

Vch : Tension de générateur PV

Vn : Tension nominal unitaire

N : Nombre maximum de modules PV en série

Ent : Partie entière de la fraction

Umax : Tension d'entrée maximale admissible

UCO : Tension à vide d'un module

G : rayonnement solaire (W/m^2)

T : température de la face arrière de module en °C

Vstc : est la valeur de la tension dans les conditions standards

I_{stc} : est la valeur de courant dans les conditions standards

T_{amb} : est la température ambiante à l'ombre

NOCT : est la température de fonctionnement normale de la cellule

DA : dinars algériennes

Introduction générale

Au niveau mondial, le marché des systèmes photovoltaïques connaît, depuis plus de **10 ans**, un taux de croissance très élevé, de l'ordre de **30 à 40%** par an [1]. Cette croissance exceptionnelle, due principalement aux systèmes photovoltaïques raccordés au réseau de distribution d'électricité, se traduit bien évidemment par des innovations technologiques et une baisse de coûts des modules photovoltaïques mais aussi à des efforts importants de recherche et développement dans le domaine de l'électronique de puissance.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules (PV) en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) [2].

Cette énergie produite sous forme continue, ce qui n'est pas adéquat dans le cas où on veut raccorder ce dernier avec le réseau de distribution. Pour cela il faut concevoir un système capable de transformer l'énergie continue en énergie alternatif, cette conversion se passe par le biais d'un onduleur commandé afin de contrôler l'amplitude, la fréquence et la phase du courant injecté dans le réseau.

Le développement rapide de l'énergie solaire est apparu progressivement sous forme d'installations de petites puissances raccordées au réseau à Basse Tension (BT) et de fermes solaires connectées directement au réseau à Moyenne Tension (HTA). [1]

Cependant, le raccordement des systèmes PV au réseau de distribution peut avoir quelques impacts sur les réseaux électriques : impacts sur le changement des flux de puissance (bidirectionnel), sur le plan de tension, sur le plan de protection, sur la qualité de l'énergie ou sur la planification du réseau... D'un autre côté, les caractéristiques, le fonctionnement et les perturbations sur les réseaux de distribution peuvent influencer le fonctionnement des systèmes PV.

Le but de ce travail est conception d'un système de conditionnement pour raccorder les systèmes photovoltaïques et le réseau électrique. La rédaction de notre mémoire se compose de trois chapitres :

- **Le chapitre 1** : présente une description générale des équipements pour les

Introduction générale

installations raccordées au réseau électrique.

- **Le chapitre 2** : présente un dimensionnement d'une installation PV raccordées au réseau, caractéristique d'un système PV connectées au réseau électrique, la rentabilité d'un système PV connectées au réseau et la description de logiciel PVSYST.
- **Le chapitre 3** : présenter une étude de dimensionnement d'une centrale PV connectée au réseau.

Chapitre 01 . Fondements des installations photovoltaïques

1. introduction sur installations solaires photovoltaïques

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancée sur le plan technologiques et industriel, en effet le silicium et l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique.

Pour définition le mot " photovoltaïque " vient de la grec " photo " qui signifie lumière et de "voltaïque" qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754 - 1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, alors le photovoltaïque signifie littérairement la lumière électricité[3,4].

2. Energie lumineuse et la conversion photovoltaïque

2.1.La lumière sous toutes ses formes

Quand on évoque la lumière en physique, une des premières grandeurs qui vient à l'esprit est sa vitesse, qui ne peut être égalée et encore moins dépassée. Rien ne peut aller plus vite que la lumière, et c'est sur ce postulat que repose la célèbre théorie de la relativité d'Einstein. Il à découvert que la matière (m) est énergie (E), et vice versa, et que ces grandeurs sont liées par la vitesse de la lumière au carré. C'est ce qu'exprime sa fameuse formule $E=mc^2$. Dans le vide, la vitesse de cette lumière C (pour célérité) est de 299 792 458 m/s, à peine plus d'une seconde pour parcourir la distance Terre-Lune¹.

Cette lumière apparaît donc à nos yeux comme un rayon se propageant en ligne droite, et obéissant à certaines lois, décrites par l'optique dite « géométrique » : réflexion sur une surface, réfraction (déviation du faisceau à l'entrée dans un milieu), focalisation par une lentille, diffusion sur une surface rugueuse... Tous ces phénomènes sont concernés quand il s'agit de capter la lumière dans une cellule photovoltaïque [5].

2.1.1. Longueur d'onde (λ)

La longueur d'onde est l'une des caractéristiques propres à chaque onde, quelle que soit sa nature. Elle se note à l'aide de la lettre grecque lambda : (λ), Elle représente la périodicité spatiale des oscillations, c'est-à-dire la distance entre deux maximas de l'oscillation, par exemple. La longueur d'onde est aussi la distance parcourue par l'onde pendant une période d'oscillation. Ainsi, elle est inversement proportionnelle à la fréquence et s'exprime en mètre [5].

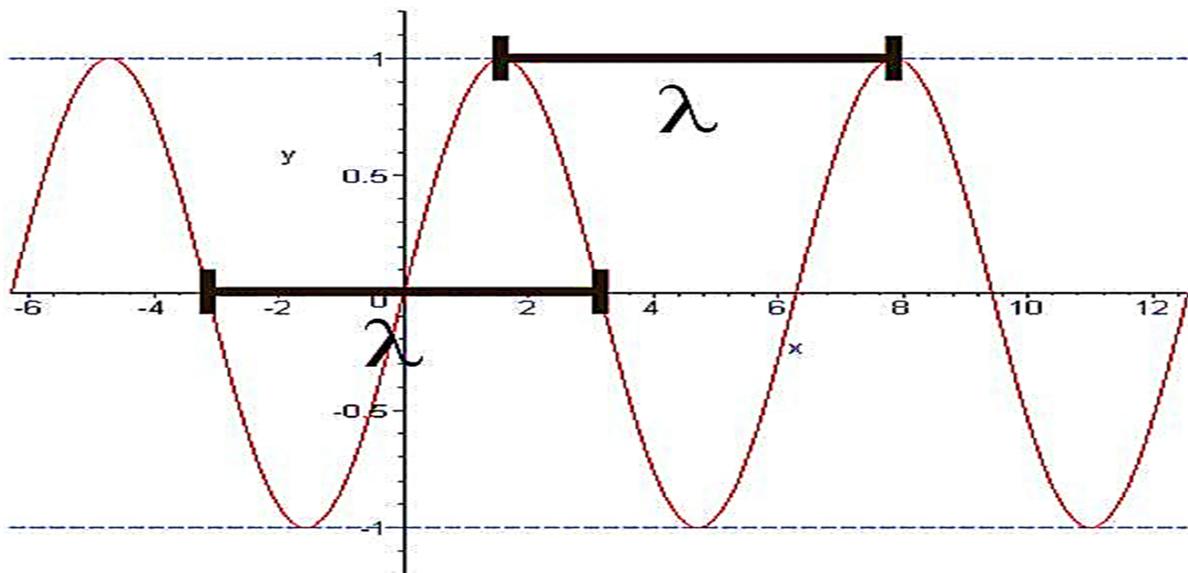


Figure (1.1) . Définition de longueur d'onde(λ).

2.1.2. Répartition spectrale des ondes électromagnétiques

On appelle répartition spectrale ou spectre la répartition des ondes d'une source lumineuse selon leur longueur d'onde. La lumière blanche, par exemple, est en fait composée de plusieurs couleurs, visibles par décomposition à travers un prisme, ou dans l'arc-en-ciel. Mais les ondes électromagnétiques ne se réduisent pas à la seule lumière visible, qui ne représente en réalité qu'une infime portion de tous les rayonnements électromagnétiques connus. Évidemment le terme de lumière est plutôt adapté à cette partie visible par l'homme, mais par extension, il est souvent appliqué à tout le spectre solaire qui va de l'ultraviolet proche (250 nm) au proche infrarouge (10 μm) [5].

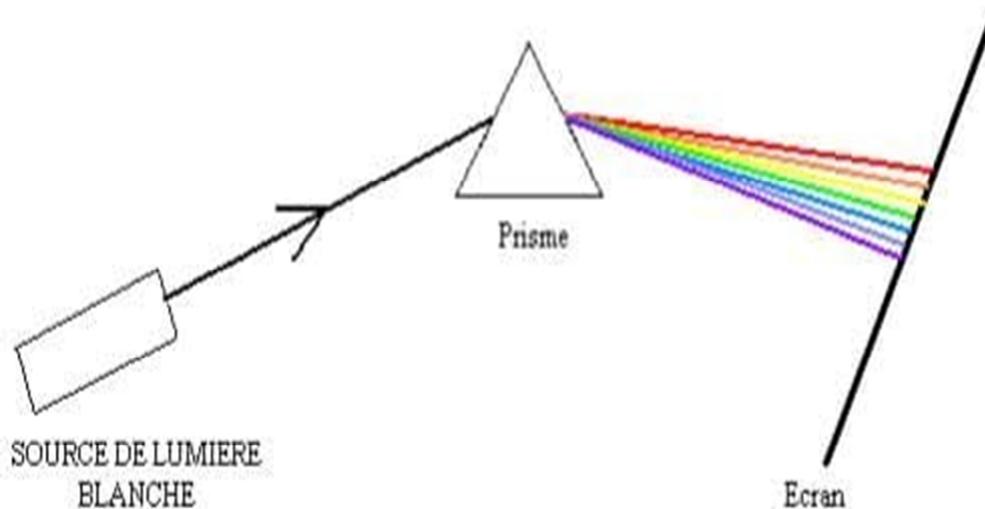


Figure (1.2) . décomposition de la lumière blanche par un prisme.

2.1.3. Sources de lumière

Intéressons-nous maintenant à ce qui produit de la lumière dans notre environnement. La lumière naturelle par excellence est bien entendu celle du Soleil, et de loin la plus énergétique. Les

Chapitre 01 . Fondements des installations photovoltaïques

dispositifs photo voltaïques et solaires thermiques ont par définition été développés pour convertir cette énergie d'origine solaire. Mais cette source de lumière n'est pas la seule, l'homme ayant, depuis la découverte du feu, inventé et fabriqué de multiples sources de lumière artificielle(le feu, les torches, bougies, lampes à huile ou à pétrole...) [2].

2.1.3.1. Types de sources lumineuses

Toutes ces sources lumineuses peuvent être classées en quatre catégories, d'après le type de spectre qu'elles émettent, c'est-à-dire selon la répartition de l'énergie lumineuse émise dans les différentes longueurs d'onde.

- **Spectre continu**

Dans un tel spectre, il y a émission d'énergie lumineuse de manière continue, à toutes les longueurs d'onde. Il s'agit essentiellement des sources dites thermiques, qui utilisent la chaleur comme source d'énergie. C'est le cas par exemple des ampoules à incandescence et halogènes, du Soleil ou d'une bougie.

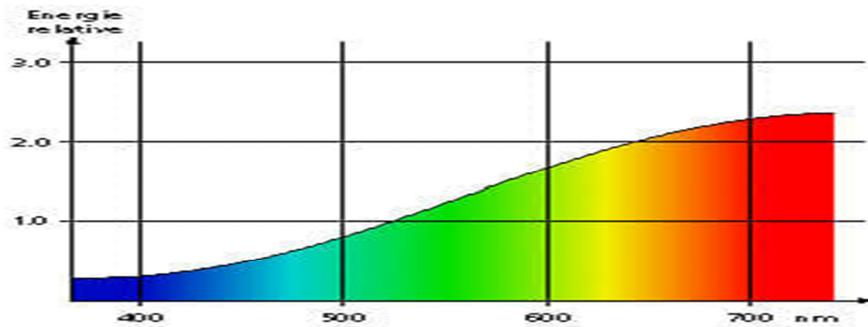
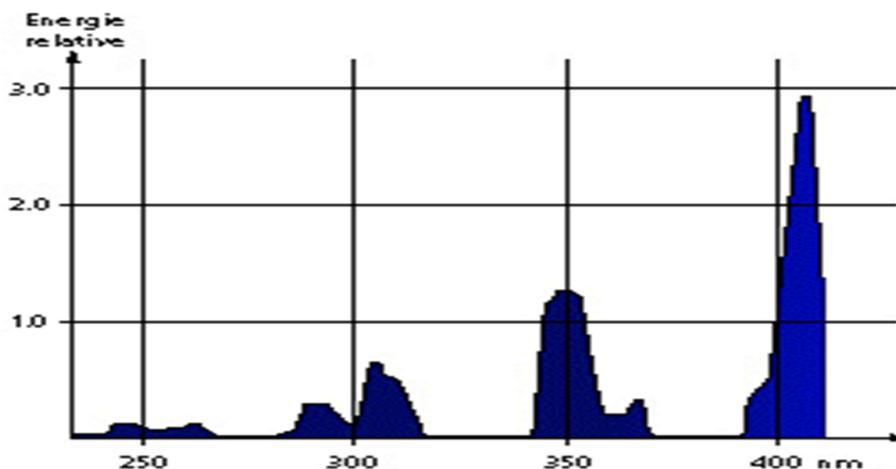


Figure (1.3) . spectre continue, émis par une ampoule halogène.

- **Spectre discontinu**

Ce type de spectre présente de nombreux trous, dans lesquels aucune énergie lumineuse n'est émise. Les sources utilisant une décharge électrique dans un gaz ionisé émettent généralement ce type de spectre discontinu.



Chapitre 01 . Fondements des installations photovoltaïques

Figure (1.4) . spectre discontinue d'une lampe aux vapeurs de mercure.

- **Spectre combine**

Il s'agit de la combinaison d'un spectre continu et d'un spectre discontinu. Ce type particulier est émis par des sources à décharge électrique modifiées, telles que les tubes fluorescents.

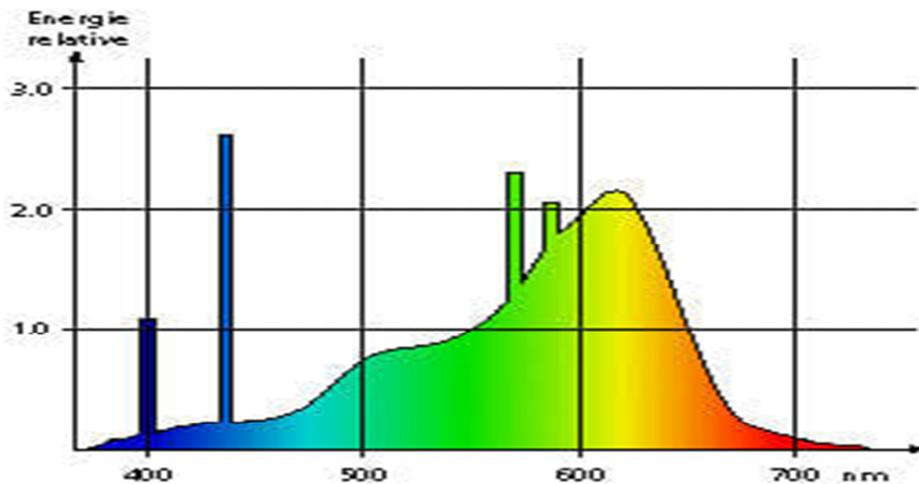


Figure (1.5) . spectre combiné d'un tube fluorescent de type «Warm witz ».

- **Spectre de raies**

Certaines sources lumineuses, comme les lasers ou les diodes laser, n'émettent que dans d'étroites bandes d'énergie. Associées à des filtres à bande passante étroite, ces sources deviennent pratiquement monochromatiques (d'une seule couleur, soit d'une seule longueur d'onde).

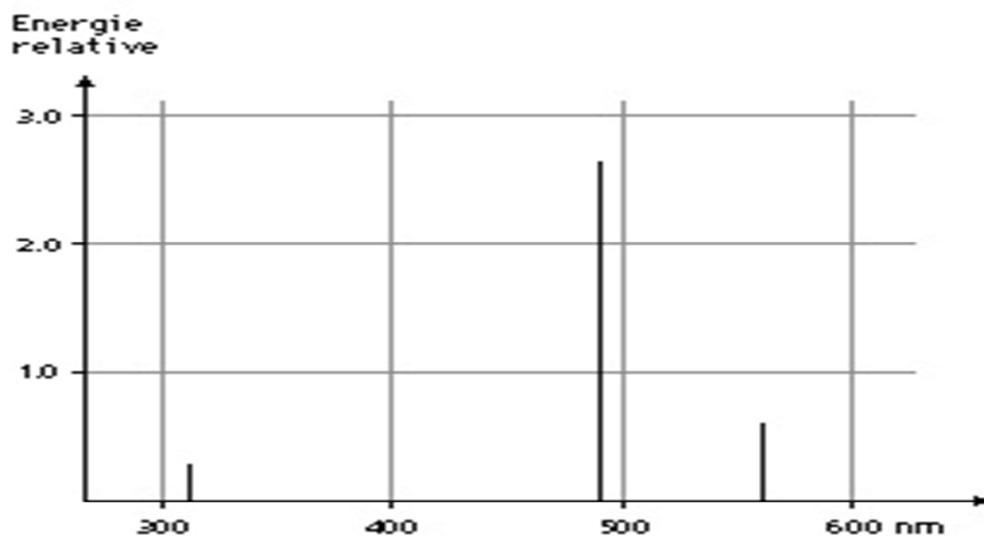


Figure (1.6) . les trois principales raies d'émission du laser argon-ion.

2.2. Le rayonnement solaire terrestre

Chapitre 01 . Fondements des installations photovoltaïques

2.2.1. Géométrie Terre-Soleil

Le Soleil est une étoile de forme pseudo-sphérique dont le diamètre atteint 1 391 000 km. Il est situé à une distance moyenne de 149 598 000 km de la Terre_ Composé de matière gazeuse, essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium, il est le siège de réactions de fusion nucléaire permanentes et sa température de cœur atteint 107 K) [2].

2.2.1.1. Mouvements de terre

La Terre décrit autour du Soleil une orbite qui occupe un foyer. En fait la distance qui les sépare varie de $\pm 1,69\%$ à la trajectoire légèrement elliptique dont le Soleil occupe l'un des foyers de l'année du fait de la légère excentricité de l'orbite terrestre ($e = 0,017$). Le plan de l'écliptique (plan de l'orbite terrestre). On appelle déclinaison l'angle formé par l'axe de rotation de la Terre sur elle-même est incliné de $23^{\circ} 27'$ par rapport au plan de l'axe Terre-Soleil avec le plan de l'équateur à un moment donné de l'année. La déclinaison vaut donc $+23^{\circ} 27'$ au solstice d'été, $-23^{\circ} 27'$ au solstice d'hiver, et est nulle aux équinoxes. Cette déclinaison est responsable des saisons, car dans l'hémisphère nord, les rayons nous parviennent avec un angle plus élevé sur l'horizon en été, et plus bas en hiver (c'est le contraire dans l'hémisphère sud). Elle explique aussi que les différences saisonnières soient plus marquées vers les hautes latitudes) [6].

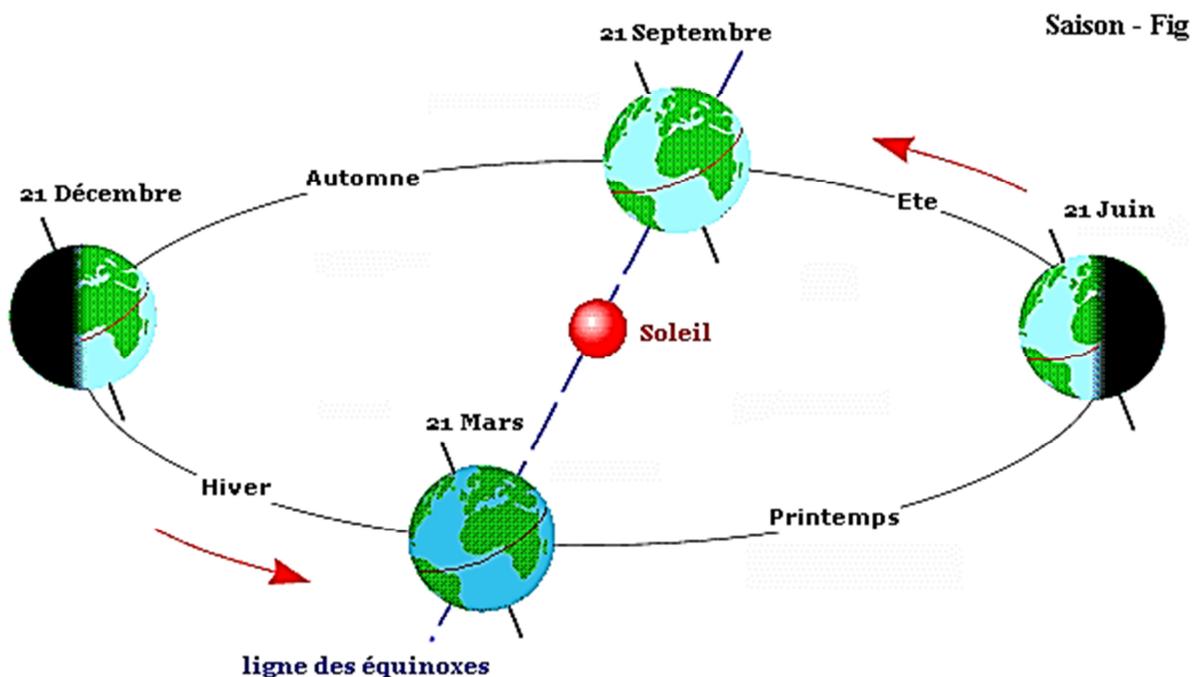


Figure (1.7) _ plan de l'écliptique . l'orbite terrestre et les saisons.

2.2.1.2. Trajectoire apparente du soleil

Pour un observateur situé sur la surface de la Terre, le Soleil décrit une trajectoire apparente qui dépend de la latitude et la longitude du lieu où il se trouve. Rappelons que la latitude est la distance

Chapitre 01 . Fondements des installations photovoltaïques

angulaire d'un point quelconque du globe par rapport à l'équateur (de 0 à 90° dans l'hémisphère nord). Quant à la longitude, c'est également un angle, donné par rapport au méridien de Greenwich (arc de cercle passant par les deux pôles et la ville de Greenwich en Angleterre) en se déplaçant vers l'est. La position du Soleil est définie par deux angles : sa hauteur angulaire h (l'angle entre la direction du Soleil et le plan horizontal du lieu) et son azimut α (l'angle entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le Soleil, compté négativement vers l'est) [6].

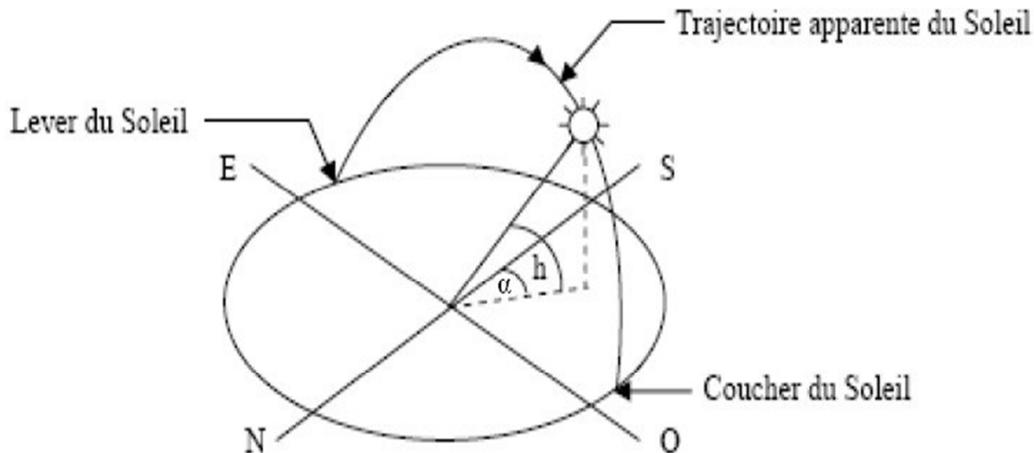


Figure (1.8) . trajectoire de soleil.

2.2.2. Caractéristique du rayonnement solaire

2.2.2.1. Energie renouvelable

L'énergie qui nous vient du Soleil représente la quasi-totalité de l'énergie disponible sur Terre. Bien entendu elle est d'abord disponible directement sous forme de lumière et de chaleur, mais elle est aussi à l'origine de la biomasse (photosynthèse). Du cycle de l'eau, des vents, des courants océaniques, et, sous forme stockée durant des millions d'années, de nos réserves de gaz, pétrole et charbon. Les seules ressources énergétiques non solaires sont la chaleur de la Terre (géothermie), les marées et l'énergie nucléaire. L'énergie du Soleil est produite par les réactions de fusion thermonucléaire : les noyaux d'hydrogène (protons) s'assemblent en noyaux d'hélium (deux protons + deux neutrons). Cette énergie est émise dans l'espace par la surface du Soleil, notamment sous forme d'ondes électromagnétiques dans le domaine visible, ultraviolet et infrarouge, donc beaucoup de lumière [7,8].

2.2.2.2. Le rôle de l'atmosphère

Cette énergie lumineuse dite « extra-terrestre », c'est-à-dire avant qu'elle ne pénètre dans l'atmosphère, a été évaluée avec précision par la NASA et a une valeur de 1 357 W/m². Il s'agit du rayonnement reçu, ou rayonnement solaire instantané, à un instant donné au-dessus de l'atmosphère terrestre, lors d'un événement normal (c'est-à-dire sur un plan perpendiculaire à la direction du Soleil). Cette valeur est appelée constante solaire, mais elle n'est pas due à de légères différences de distance entre la Terre et le soleil et l'activité solaire. Cette énergie qui descend en ligne droite vers

Chapitre 01 . Fondements des installations photovoltaïques

notre planète ne peut atteindre la Terre dans son intégralité car elle subit des transformations lors de son passage dans l'atmosphère : par absorption et diffusion. La fameuse couche d'ozone stratosphérique, dont le rôle de filtrage des rayons ultraviolets les plus agressifs est très important [5].

2.2.2.3. Les composants rayonnement solaire

Appelé le rayonnement électromagnétique émis par le soleil dans toutes les directions de l'espace, ce n'est que la manifestation externe des interactions nucléaires qui se produisent au cœur du soleil et de l'ensemble des interactions secondaires qu'elles génèrent dans son enveloppe[5] . Il constitue la quasi-totalité de l'énergie expulsée par le soleil. Il est composé de grains de lumière appelés photons :

- **Le rayonnement direct**

Est reçu du Soleil en ligne droite, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, le rayonnement direct forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs.

- **Le rayonnement diffus**

Est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières qui produisent cet « éclatement » des rayons du Soleil. Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques.

- **L'albédo**

Est la partie réfléchiée par le sol. Il dépend de l'environnement du site. La neige, par exemple, renvoie énormément de rayons lumineux alors qu'un asphalte n'en renvoie pratiquement aucun. Il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés.

2.3. La conversion photovoltaïque

Pour que l'énergie solaire soit convertie en énergie électrique, elle doit passer par plusieurs étapes, qui sont :

2.3.1. L'absorption de la lumière

Comme cela a été décrit plus haut, la lumière se compose de photons, « grains de lumière », chacun porteur d'une énergie dépendant de sa longueur d'onde (ou couleur du rayon). Ces photons peuvent pénétrer dans certaines matières, et même passer au travers : les objets qui apparaissent transparents à l'œil laissent passer la lumière visible [5].

Plus généralement, un rayon lumineux qui arrive sur un solide peut subir trois événements optiques :

☒ La réflexion : la lumière est renvoyée par la surface de l'objet ;

☒ La transmission : la lumière traverse l'objet ;

Chapitre 01 . Fondements des installations photovoltaïques

☑ L'absorption : la lumière pénètre dans l'objet et n'en ressort pas, l'énergie est restituée sous une autre forme.

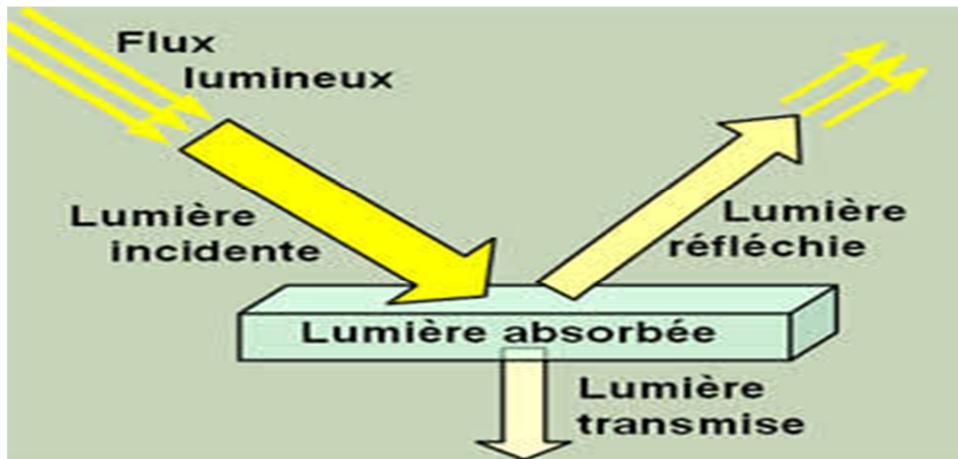


Figure (1.9) . réflexion, transmission et absorption.

2.3.2. Transfert d'énergie des photons aux charges électriques

Intéressons-nous maintenant à la lumière absorbée dans le matériau photovoltaïque et voyons comment son énergie est convertie en électricité.

Les charges élémentaires qui vont produire le courant électrique sous illumination sont des électrons, charges négatives élémentaires, contenus dans la matière semi conductrice. Tout solide est en effet constitué d'atomes que l'on peut décrire avec chacun un noyau (constitué de protons et de neutrons) et un ensemble d'électrons gravitant autour.

Les photons absorbés vont tout simplement transférer leur énergie aux électrons périphériques des atomes (les plus éloignés du noyau), leur permettant ainsi de se libérer de l'attraction de leur noyau. Ces électrons libérés sont susceptibles de produire un courant électrique si on les « attire » ensuite vers l'extérieur (ci-après sur la collecte des charges).

En régime permanent, l'électron libéré laisse un « trou » qui se traduit par une charge positive. Si cet électron est attiré au dehors, c'est l'électron d'un atome voisin qui va venir combler ce trou, laissant à nouveau un trou, lui-même comblé par un électron voisin et ainsi de suite. On génère ainsi une circulation de charges élémentaires, d'électrons dans un sens, et de trous dans l'autre sens, ce qui donne un courant électrique [5].

2.3.3. La collecte des charges

Pour que les charges de l'éclairage génèrent de l'énergie, les charges du matériau semi-conducteur doivent être extraites dans un circuit électrique. Sinon, ils se recombinent : électron, chargé négativement, équation du trou, « chargé positivement. Autrement dit, les électrons libérés reviendront à leur état initial au voisinage de leurs atomes : cela dégagera de l'énergie thermique (chaleur) mais pas d'énergie électrique. La charge est extraite au sein d'une jonction créée

Chapitre 01 . Fondements des installations photovoltaïques

volontairement dans un semi-conducteur. Le but est de générer un champ électrique à l'intérieur du matériau, entraînant des charges négatives d'un côté et des charges positives de l'autre [5].

Le dopage avec des semi-conducteurs purs va permettre d'apporter des charges en excès qui vont améliorer la conductivité du matériau. Il en existe deux types :

- **Silicium de type (n)**

En le dopant avec des atomes étrangers qui contiennent cinq électrons sur leur enveloppe externe, un électron pour chaque atome de phosphore ne pourra pas se lier au silicium correspondant, alors il y aura un excès de charges négatives dans le cristal. Ainsi, le matériau est susceptible d'être un «donneur» d'électrons, disponibles pour la conductivité électrique.

- **Silicium de type (P)**

Par symétrie, on peut aussi doper le silicium avec du bore, qui n'a que trois électrons par atome dans la bande de valence. Il en résulte l'apparition d'un excès de trous, et donc l'apparition de charges positives, puisqu'il manque un électron à chaque atome de bore pour compléter 4 électrons de silicium, le matériau étant à l'opposé du précédent « accepteur » d'électrons.

Matériau semi-conducteur dopé

- Comprend des impuretés ajoutées ayant 3 ou 5 électrons dans la couche externe (dopage p ou n)

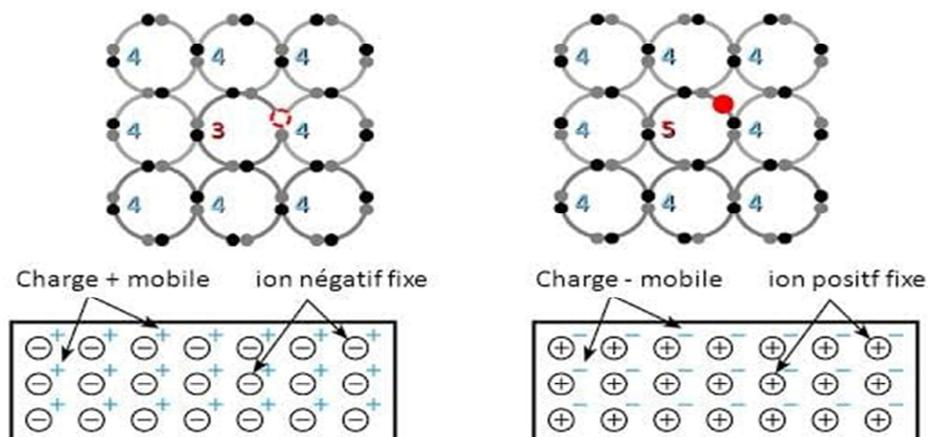


Figure (1.10) . dopage des semi-conducteur (dopage n et p).

- **Jonctions p-n**

La mise en contact de deux zones à dopages opposés dans un semi-conducteur constitue un élément fort connu : la diode. À l'interface où les concentrations d'atomes étrangers font passer le silicium du type p au type n apparaît une région appelée zone de charge d'espace qui provient de la tendance des électrons excédentaires de la couche n à vouloir passer du côté p où ils sont attirés par les trous.

Chapitre 01 . Fondements des installations photovoltaïques

Excédentaires et de la tendance des trous à vouloir passer du côté n par réciprocité. Cet échange de porteurs dans la zone de charge spatiale crée un champ électrique qui va contrebalancer l'échange de charges et rétablir l'équilibre.

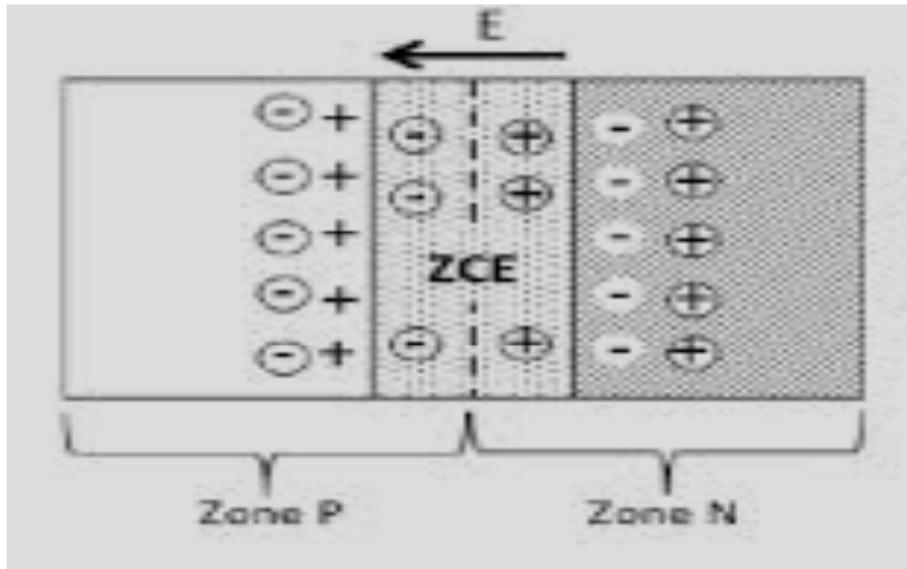


Figure (1.11) . représentation schématique d'une jonction p-n.

3. description des équipements d'une installation PV connectés au réseau

3.1. Principe fonctionnement d'une installation photovoltaïque

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

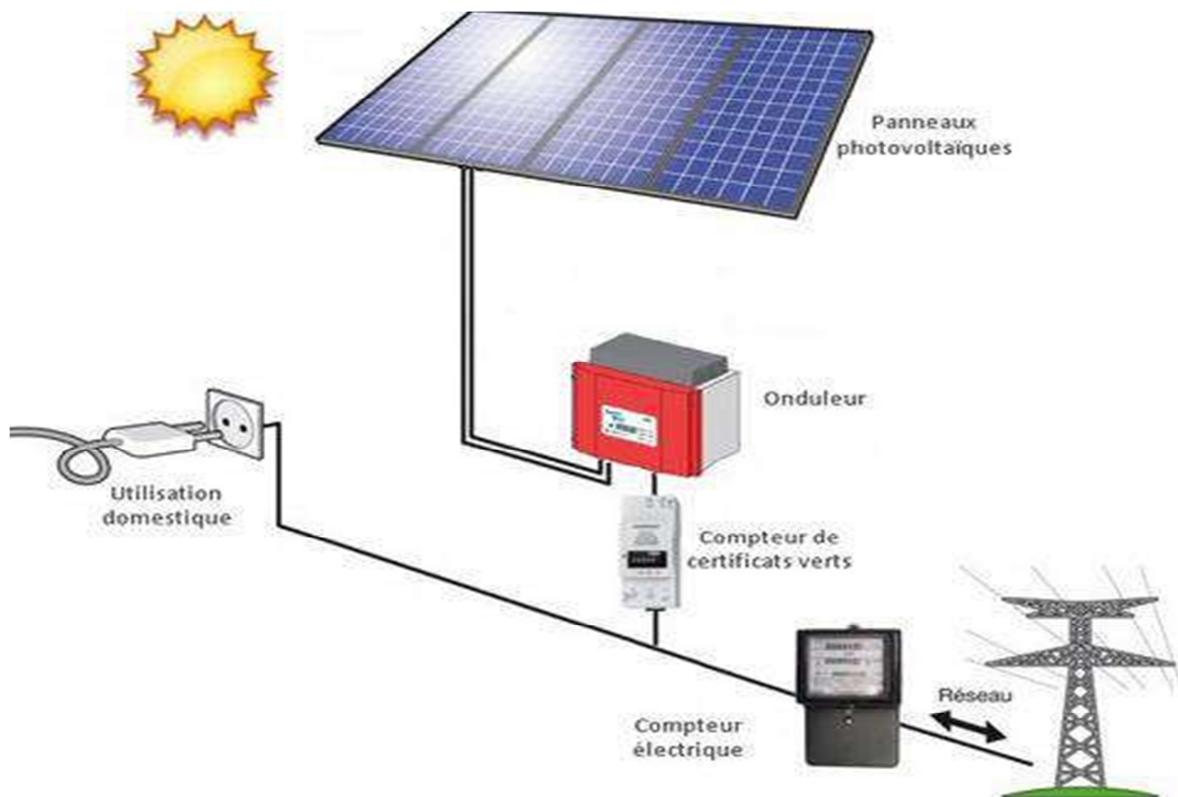


Figure (1.12) . représente un système PV connecté au réseau électrique.

Chapitre 01 . Fondements des installations photovoltaïques

3.2. Cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est le plus petit constituant de l'installation photovoltaïque. Elle est généralement constituée de silicium, un matériau semi-conducteur extrait de la silice contenue dans le sable. Son rôle est de transformer l'énergie solaire en électricité de type continu.

3.2.1. Différents types de cellules photovoltaïques

Il existe différents types de cellules solaires. Chaque type est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres. Actuellement, il existe trois principaux types de cellules, à savoir :

- **Les cellules au silicium monocristallin** : Ces cellules offrent le meilleur rendement parmi les panneaux solaires disponibles dans le commerce : entre 13 à 15%. Il faudra donc moins de cellules pour atteindre la puissance désirée, mais comme le silicium monocristallin est aussi le plus cher, son seul avantage est finalement d'utiliser une surface réduite : il faut environ 7m² pour obtenir 1 kilowatt-crête (kWc)[9].



Figure (1.13) . Cellules solaires monocristallines [9].

- **Les cellules au silicium polycristallin (ou multicristallin)** : Ces cellules ont en général un rendement compris entre 12 et 14%. Il faut environ 8 m² de cellules pour obtenir 1 kWc.

Ces cellules sont plus simples à fabriquer et moins chères que les cellules au silicium monocristallin. Les cellules polycristallines sont reconnaissables aux formes irrégulières des cristaux qui apparaissent nettement à l'œil nu [9].

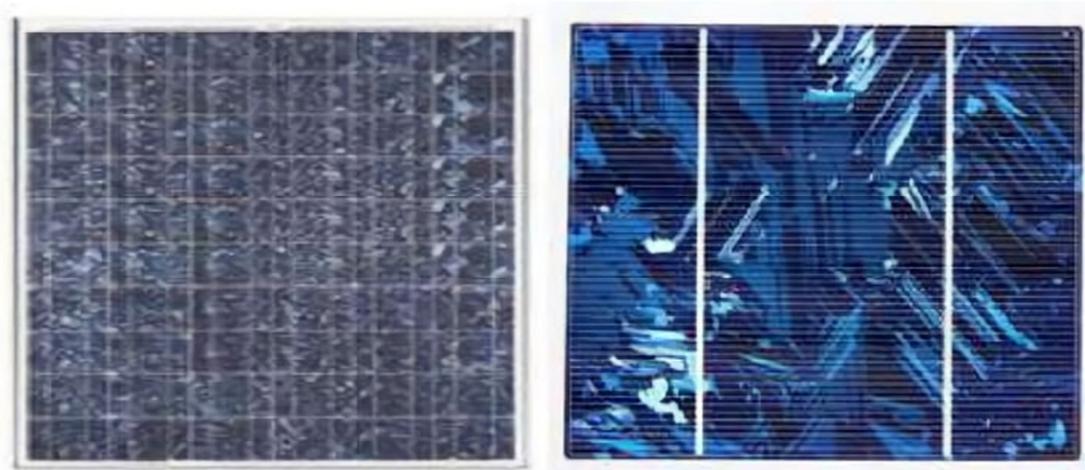


Figure (1.14) . Cellules solaires polycristallines [9].

• **Les cellules au silicium amorphe** : Ces cellules sont à couche mince, c'est-à-dire qu'elles sont fabriquées en déposant une fine couche de silicium sur un support (ou "substrat"), par exemple du verre. L'épaisseur de silicium utilisée est beaucoup plus faible que pour les cellules mono ou polycristallines qui sont réalisées à partir de tranches de silicium.

Ce type de cellule est donc moins cher et plus facile à fabriquer. Sa faible épaisseur permet de les utiliser pour créer des panneaux solaires souples. Cependant ces cellules ont des rendements limités (de l'ordre de 5 à 7%, soit environ 15 m² pour obtenir 1KWh) et sont donc réservées à des applications nécessitant peu de puissance. Les cellules au silicium amorphes sont beaucoup utilisées pour l'alimentation de petits appareils solaires (montre, calculatrice, ...) [9].



Figure (1.15) . Cellules solaires amorphes [9].

Grâce à la technologie des nouveaux matériaux tel que le tellure de cadmium (Cd Te), l'arséniure de gallium (Ga As) ainsi que le diséléniure de cuivre et d'indium (CIS) ont permis d'obtenir des photopiles ayant des rendements 38 % au laboratoire[10].

Chapitre 01 . Fondements des installations photovoltaïques

Type de cellules	Rendements des cellules (%)			Domaines d'application
	théorique	en labo.	disponible	
Silicium monocristallin	27	24.7	14-16	modules de grandes dimensions pour toits et façades, appareils de faibles puissances, espace (satellites)
Silicium poly cristallin	27	19.8	12-14	modules de grandes dimensions pour toits et façades, générateurs de toutes tailles (reliés réseau ou sites isolés)
Silicium amorphe	25	13	6-8	appareils de faible puissance, production d'énergie embarquée (calculatrice, montre.) modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)

Tableau (1.1) . Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques.

3.3. Panneaux solaire

Il se compose de trois types :

3.3.1. Panneau à 60 cellules de 156 mm

C'est le panneau utilisé dans la majorité des systèmes de puissance. Il comporte 10 x 6 cellules de 156 mm de côté. Ses dimensions typiques avec le cadre sont de 1,65 × 1 m. Dans la technologie polycristal, sa puissance est entre 220 et 250 W et en monocristal, on peut obtenir environ 10 W de plus.

3.3.2. Panneau à 72 cellules de 125 mm

C'est le deuxième panneau le plus courant et utilisé souvent sous forme de laminât et encadré spécialement pour l'intégration en toiture. Il est formé de 12 x 6 cellules de 125 mm de côté. Ses dimensions typiques avec le cadre sont de 1,6 x 0,8 m. Dans la technologie polycristal, sa puissance est entre 180 et 195 W et en monocristal, on peut obtenir environ 10 W de plus en technologie traditionnelle.

3.3.3. Panneau en couches minces de 85 W

Ce troisième exemple présente un panneau First Solar qui a présenté de t bonnes performances de production dans sa catégorie (les couches minces) Il est formé de 156 cellules en série et ses

Chapitre 01 . Fondements des installations photovoltaïques

dimensions typiques avec le cadre sont de 1,2 x 0,6 m. En technologie CdTe, sa puissance est de 80 à 90 W.

3.4. Installation mécanique des panneaux

3.4.1. Structures support

Les panneaux photovoltaïques étant toujours (ou presque) installés dehors, il faut que les supports soient résistants à la corrosion : on choisira donc de préférence des structures et visseries en acier inoxydable ou sinon en aluminium anodisé, si les cadres des panneaux sont eux-mêmes dans ce matériau. En effet la corrosion est un phénomène qui apparaît à la jonction de deux matériaux métalliques de potentiel électrochimiques différents : elle détruit progressivement le matériau dont le potentiel est le plus faible. Les panneaux photovoltaïques étant toujours (ou presque) installés dehors, il faut que les supports soient résistants à la corrosion : on choisira donc de préférence des structures et visseries en acier inoxydable ou sinon en aluminium anodisé, si les cadres des panneaux sont eux-mêmes dans ce matériau. En effet la corrosion est un phénomène qui apparaît à la jonction de deux matériaux métalliques de potentiel électrochimiques différents : elle détruit progressivement le matériau dont le potentiel est le plus faible [5].

La corrosion est évitée en peignant les pièces de support ou en utilisant des pieds en bois.



Figure (1.16) . support partiel en bois.

3.4.2. Types de montages

On rencontre principalement trois types d'installations mécaniques pour des systèmes photovoltaïques reliés au réseau :

Chapitre 01 . Fondements des installations photovoltaïques

- le montage sur-imposé en terrasse



Figure (1.17) . Exemple de montage sur-imposé en terrasse.

- le montage sur châssis

Une installation classique pour les panneaux photovoltaïques, elle s'emploie un peu partout dans les pays chauds où les toitures sont en terrasse, et au sol pour beaucoup d'applications techniques dès que la surface du champ photovoltaïque est importante, typiquement de 5 m² et plus. Le montage sur mât est plutôt réservé aux surfaces inférieures. Les châssis sont également indispensables sur terrain accidenté.



Figure (1.18) . Exemple de montage sur châssis.

- le montage sur trackers (ou suiveurs)

Peut être intéressant en pays chaud. Il s'agit d'un support mécanique motorisé qui suit la courbe du Soleil. Il est donc mieux adapté aux zones du globe où le ciel est le plus souvent clair et le rayonnement solaire majoritairement direct. Il existe des suiveurs à deux axes, le champ photovoltaïque étant toujours perpendiculaire aux rayons du Soleil, ou à cet un axe, celui-ci étant soit vertical, soit incliné.



Figure (1.19) . Exemple de montage sur trackers.

3.5. Caractéristiques d'un module

Les modules sont généralement des parallélépipèdes rectangles rigides minces (quelques Centimètres d'épaisseur), dont les caractéristiques suivantes :

- **La puissance de crête, P_c** : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans Les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m^2).
- **La caractéristique $I=f(V)$** : Courbe représentant le courant I débité par le module en Fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- **Tension à vide, V_{co}** : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, Pour un Eclairement " plein soleil ".
- **Courant de court-circuit, I_{cc}** : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ".
- **Point de fonctionnement optimum, $P_m (V_m, I_m)$** : Lorsque la puissance de crête est Maximum en plein soleil, $P_m = V_m \cdot I_m$
- **Rendement** : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation Incidente.
- **Facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que Peut avoir la cellule : $V_{co} \cdot I_{cc}$.

Chapitre 01 . Fondements des installations photovoltaïques

3.6. Nettoyage de modules .

Avec le temps, les panneaux solaires se salissent naturellement de poussière, pollen, particules fines, fientes d'oiseaux, etc...

Ces salissures empêchent la lumière de passer et peuvent diminuer la rentabilité jusqu'à 20% avec un nettoyage et un entretien régulier de votre installation, vous obtiendrez un rendement maximum de votre installation.

3.6.1. But du nettoyage

- Enlever les salissures obstruant la lumière
- Augmentation du rendement
- Retrouver un état propre et ainsi diminuer l'accumulation de saleté
- Prolongement de la durée de vie

3.6.2. Courbe de rendement avant et après nettoyage

Test de comparaison entre deux installations d'onduleurs similaires.

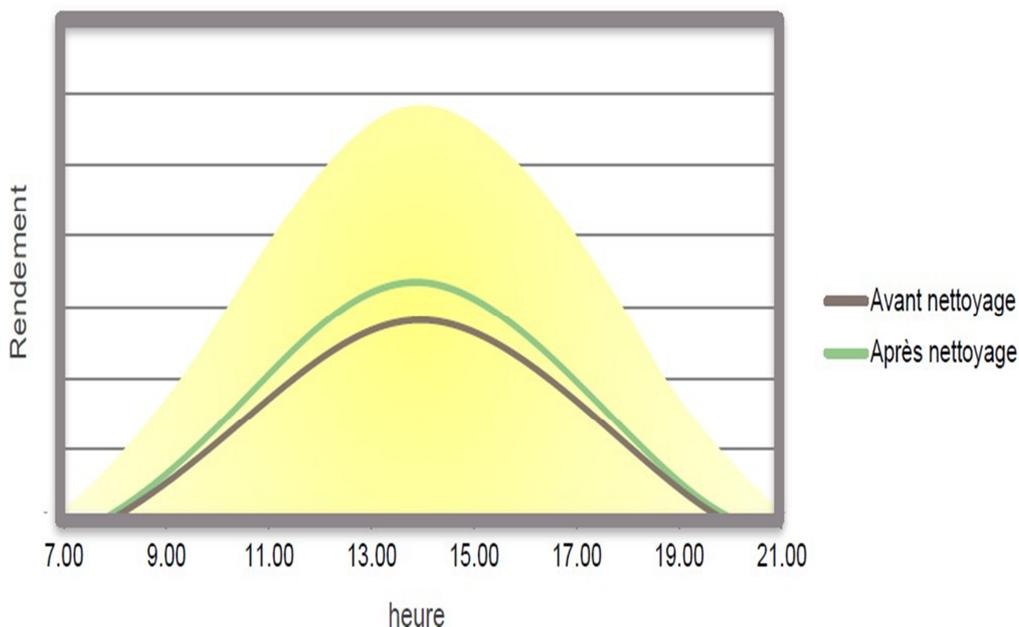


Figure (1.20) . Courbe de rendement.

3.7. Onduleurs

L'onduleur d'un système photovoltaïque connecté au réseau est chargé de transformer la tension continue du champ de panneaux en une tension alternative compatible avec le réseau. Si l'on observe la forme de la courbe courant-tension d'un panneau photovoltaïque, on retrouve les caractéristiques d'une cellule (multipliée en tension) où le courant varie de son niveau maximum (à tension nulle) et baisse jusqu'à 0 avec une tension maximale du panneau (V_0). Le point qui nous intéresse dans cette courbe est celui qui maximise la puissance, c'est-à-dire le produit courant x tension, P , qui apparaît au coude de la caractéristique. Pour que notre système fonctionne toujours à ce point, l'onduleur est équipé d'un MPPT[5].

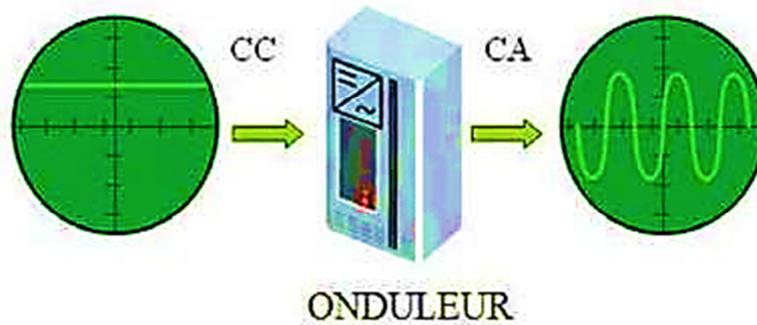


Figure (1.21) . rôle de l'onduleur.

3.7.1. MPPT

Le premier circuit qui relie le champ photovoltaïque à l'onduleur dispose d'un MPPT (Max Peak Power Tracker), soit un dispositif de recherche du point de puissance maximale. Ce circuit teste les variations de courant/tension produites par le champ photovoltaïque pour rester en permanence au coude de la caractéristique I/V, maximisant ainsi la puissance produite. Le MPPT incorpore un transformateur de tension DC/DC qui transforme la tension continue variable d'entrée en une tension interne continue mais fixe qui sera ensuite transformée en une ou trois tensions alternatives dans les onduleurs mono ou triphasés.

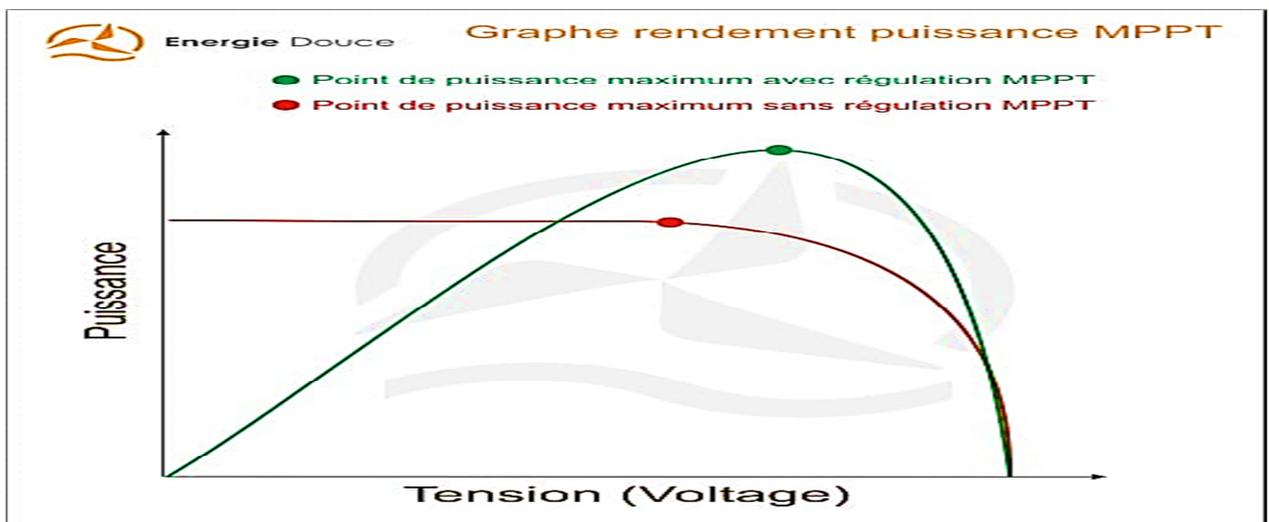


Figure (1.22) . MPPT.

3.7.2. Choix de l'onduleur

Les critères de compatibilité de l'onduleur avec le réseau sont :

- Caractéristiques en entrée (DC) :
 - Enclenchement et déclenchement automatiques avec un seuil d'irradiation faible.
 - Qualité et précision de la recherche du point de puissance maximale du champ PV (MPPT).

Chapitre 01 . Fondements des installations photovoltaïques

- Large plage de tension d'entrée (ex : 120 à 500 V).
- Protection en surtensions.
- Protection des personnes (ex : contrôle d'isolement DC).
- Caractéristiques en sortie (AC) :
 - Parfaite synchronisation avec le réseau.
 - Déphasage nul ou faible (facteur de puissance = 1).
 - Découplage automatique du réseau si hors tolérance en tension et fréquence.
 - Protection des personnes (ex : contrôle d'isolement AC).
- Caractéristiques en général :
 - Rendement élevé au niveau de puissance usuelle de l'installation (ex : 92% à 98%).
 - Faible consommation & niveau sonore.
 - Faibles perturbations électromagnétiques & taux d'harmoniques.
 - Bonne fiabilité.

Type	Fabricant	Vendeur	Technologie	Puissance AC	Transfo	Effic. max.	Tension d'entrée	Affich. mesures	Liaison PC
Onduleurs monophasés									
ECOVERTER 1000	Victron (Hollande)	Total-Energie	PWM + IGBT	1 kVA	HF	93 %	50 - 90 V	Non	Non
POLYCON 2200 S, 3300 S	Studer (CH)	Studer (fin 94)	IGBT et MOSFET	2.2 kVA 3.3 kVA	Sans	97 %	100 - 750 V !	Oui	RS232
PV WR 1800	SMA (D)	Holinger, FlachGlas	Thyristors+ IGBT	1.8 kVA	HF	89 %	80 - 130 V	Oui	PV-DATA
SI-3000	Photoelectric inc., (USA)	Fabrimex	MOSFET, IGBT	3 kVA	HF	91 %	40 - 60 V 48 V nom.	Oui	Non
Siemens 1.5 kW	Siemens (D)	Fabrimex		1.5 kVA	BF	89 %	90 V nom.		
SOLARMAX S	Sputnik Eng. (CH)	Tritec	PWM, IGBT	3.3 kVA	HF	95 %	400 - 750 V	Oui	RS232, Modem, soft
SOLCON 3300/3400 HE	Hardmeier (CH)	Hardmeier	PWM+ MOSFET	3.3 kVA 3.4 kVA	HF	92 % 91,3%	80 - 120 V 70 - 140 V	Oui	RS232, SOLTALK
Sunking 5000	SMA	Holinger	PWM, IGBT	5.0 kVA	HF	93 %	240 - 400 V	Oui	RS232, Modem, soft
TOPCLASS 2500 Grid II 4000 Grid II	ASP-(CH,D)	Fabrimex, Flachglas	PWM+ MOSFET	2.2 kVA 3.3 kVA	BF	93% 94,3%	48 - 100 V 72 - 145 V 72 - 145 V	Oui	RS232
Onduleurs triphasés									
AEG - Telefunken	AEG - Telefunken			12 ... 150 kVA	BF	89-92 %	420 V		
ECOPOWER	Invertomatic (CH)	Invertomatic	PWM + IGBT	15 kVA .. 100 kVA	BF (option)	95 %	± 380 V nom 1000 V max	Oui	Oui, Modem Surv. fabricant
POLYCON 10000 S ... 60000 S	Studer (CH)	Studer	PWM, IGBT et/ou MOSFET	10.. 60 kVA	Sans	97 %	100 - 750 V !	Oui	RS232
Siemens	Siemens (D)	Fabrimex		3 - 5 kVA 10-100 K	BF BF	88 % > 90 %	192 V nom. 400 V nom.		
SMA	SMA (D)	Holinger		10 ... 200 kVA	BF	> 90 %	300 V nom		RS232, Modem, soft
SOLARMAX 20	Sputnik Eng. (CH)	Tritec	PWM + IGBT	12 kVA à 100 kVA	HF	93 %	450 - 800 V 550 V nom.	Oui	RS232, Modem

Tableau (1.2) . liste de quelques onduleurs photovoltaïques disponibles sur le marché [11].

Chapitre 01 . Fondements des installations photovoltaïques

3.8. Les appareille de protections

3.8.1. Les appareils de protections côté courant continu

- **La protection contre les surintensités**

C'est la fonction anti-incendie

Si le nombre de chaînes photovoltaïques est supérieur à 2, il faut par défaut monter un disjoncteur ou un porte-fusible en série avec chaque string. En effet, dans le cas d'un court-circuit d'une chaîne, les autres chaînes débiteront dans ce court-circuit. Là encore ces composants doivent avoir la capacité à couper des courants de court-circuit, sous des tensions V DC élevées.

- **L'interrupteur sectionneur**

C'est un organe de coupure

Entre les panneaux et l'onduleur, doit être installé un interrupteur, de préférence consigna blé, capable de couper le courant de court-circuit des panneaux. Cet organe est absolument nécessaire de façon à pouvoir isoler la source de tension DC de l'onduleur avant toute intervention sur l'installation.

- **Le parafoudre côté continu**

C'est une assurance contre les destructions

La tenue en tension des panneaux solaires et de l'onduleur n'étant pas infinie, ceci nécessite la mise en place d'un parafoudre qui limite ainsi les surtensions. Le schéma du parafoudre doit être soigneusement étudié (car les protections classiques en AC sont inadaptées) ainsi que la déconnexion thermique en cas de fin de vie en court-circuit afin d'éviter les incendies. ABB propose des parafoudres débrosés les 670 V DC et 1000 V DC avec ou sans télésignalisation.

3.8.2. Les appareille de protections côté courant alternatif

- **Le disjoncteur de sortie de l'onduleur**

C'est la protection des personnes

La protection contre les contacts indirects doit être assurée par dispositif différentiel. Pour les locaux d'habitation, la protection doit être assurée par dispositif différentiel de sensibilité inférieure ou égale à 30 mA à immunité renforcée.

- **Le parafoudre côté alternatif**

C'est une assurance contre les destructions

C'est la protection contre les surtensions en provenance du réseau ou de la terre en mode commun et différentiel dans le contexte français du régime TT imposé par EDF. Il doit être dimensionné en fonction du niveau céramique du lieu, et de l'environnement physique alentour. Il sera monophasé ou triphasé et de type 1 ou de type 2 selon le cas.

Chapitre 01 . Fondements des installations photovoltaïques

- **Injection de l'énergie sur réseau HT**

C'est transformer et distribuer l'énergie HT

Principalement dans le cas des centrales au sol, l'énergie électrique fournie par le générateur PV est injectée sur le réseau électrique HT. Transformateurs élévateurs 410 V / 30 kV et cellules de distribution HT sont nécessaires pour assurer cette fonction.

4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté tous les éléments qui composent les plates-formes pour les profils PV.

Nous avons également fourni les bases de base pour comprendre le sujet En général, nous avons fourni une explication du principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques, des panneaux solaires, de l'installation mécanique des panneaux, ensuite les différente d'assemblage des générateurs.

Ainsi, nous avons expliqué les principales caractéristiques des cellules photovoltaïques. Chaque appareil de la centrale photovoltaïque joue un rôle actif et essentiel dans la production d'énergie électrique (panneaux photovoltaïques, protection par disjoncteur contre le court-circuit, paratonnerres, dispositifs de sectionnement permettant de déconnecter le réseau et les circuits de charge). L'amélioration de la production d'électricité passe aussi par le nettoyage des panneaux photovoltaïques.

Tous ces dispositifs sont complémentaires les uns des autres, tout défaut ou déficience des dispositifs entraîne une diminution de la production d'énergie solaire.

Chapitre 02 . dimensionnement et conception d'une installation photovoltaïque

1. Dimensionnement d'une installation PV connectées au réseau

1.1. Données d'ensoleillement

Les données d'ensoleillement pour une région déterminée sont généralement disponibles mois par mois⁶ dans les atlas solaires et correspondent à l'irradiation globale quotidienne moyenne sur un plan horizontal. Les unités sont exprimées soit en cal/cm² ou Langley⁷, soit en kWh/m² sachant que les valeurs de l'ensoleillement sont évidemment fonction de la latitude mais aussi des conditions climatiques locales et des masques naturels ou artificiels. Pour déterminer l'énergie incidente heure par heure et mois par mois sur le plan des panneaux, on effectue le calcul à partir des données d'ensoleillement sur un plan horizontal⁸ et de l'inclinaison donnée aux panneaux solaires. Si les panneaux doivent rester fixes, l'inclinaison et l'orientation optimales sont déterminées en fonction de la saisonnalité de la demande, de l'irradiation [5].

1.2. Orientation des modules PV

La position des modules photovoltaïques par rapport au soleil influe directement sur leur production énergétique. Il est très important de bien les placer pour les utiliser au maximum de leur possibilité.

On appelle orientation le point cardinal vers le quel est tournée la face active du panneau (sud, nord, sud-ouest,...).

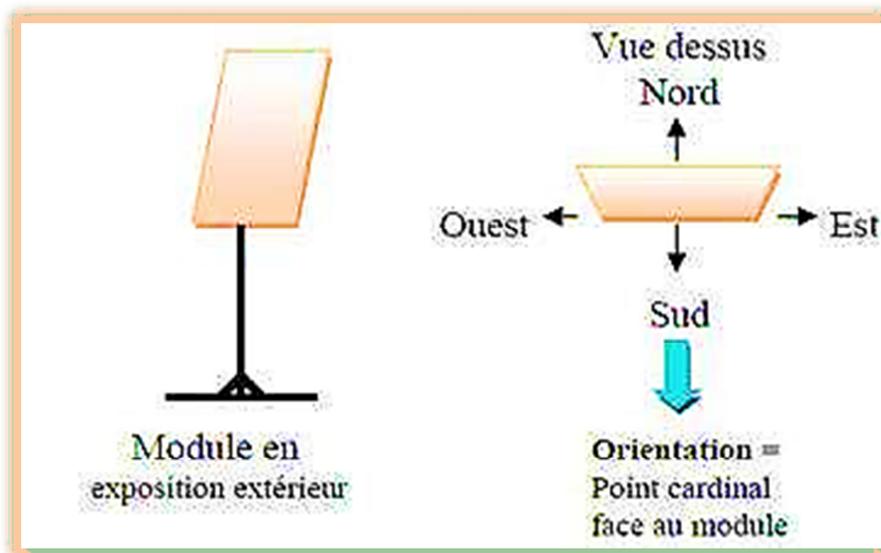


Figure (2.1) . Définition de l'orientation d'un panneau photovoltaïque.

Les panneaux sont toujours orientés vers l'équateur :

- Orientation vers le sud dans l'hémisphère Nord.
- Orientation vers le nord dans l'hémisphère Sud.

Chapitre 02 . dimensionnement et conception d'une installation photovoltaïque

1.3. Angle d'inclinaison des modules PV

L'angle d'inclinaison correspond à l'angle formé par le plan du module solaire par rapport à l'horizontale.

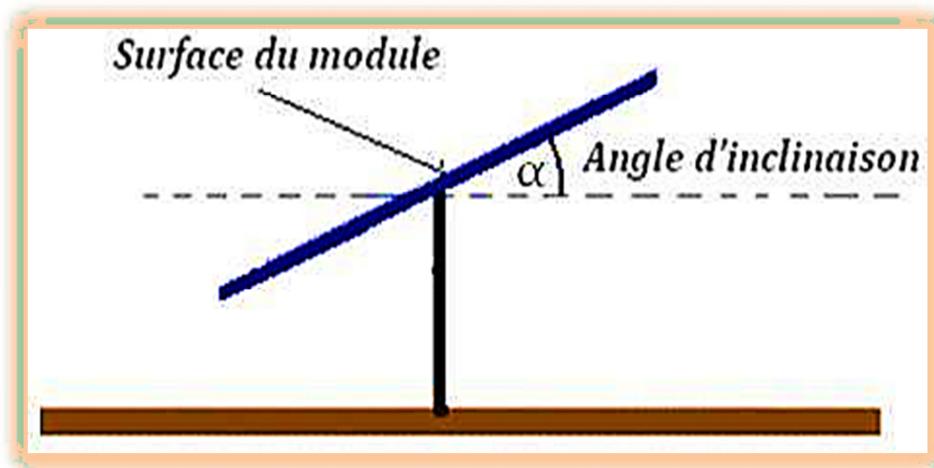


Figure (2.2) . Angle d'inclinaison des modules photovoltaïques.

Elle se comporte en degrés pour que les modules produisent un maximum d'énergie, il faut que les surfaces soient perpendiculaires aux rayons solaires, or le soleil d'une saison à l'autre n'a pas la même inclinaison ; selon les saisons, à midi, il est plus au moins plus haut dans le ciel. On doit donc incliner les modules pour qu'ils soient face au soleil.

L'inclinaison(i) des panneaux est donnée par la relation suivante :

$$i = \varphi - \sin^{-1}\left[0.4 \times \sin\left(360 \times \frac{N}{365}\right)\right]$$

Avec :

φ =latitude de lieu

N = Le nombre de jours entre l'équinoxe de printemps (21 mars de chaque année) et le jour considéré, (de signe négatif vers la saison froide).

On peut concevoir de trois façons de collecter l'énergie solaire à l'aide des panneaux Photovoltaïques.

- La première méthode consiste à orienter ce dernier perpendiculairement aux rayons solaires à l'aide d'un système de poursuite automatique du soleil.
- Une idée serait de changer manuellement l'orientation des panneaux à chaque saison, vers une direction où l'intensité du rayonnement sera maximale. Cette façon d'utiliser des panneaux solaires nécessite l'intervention du personnel à des moments précis de l'année.
- La manière la plus élégante de se servir des panneaux solaires avec une orientation Une fois pour toute, vers une direction pour laquelle l'énergie totale collectée dans l'année est maximale(en tenant compte de l'écart entre le maximum et le minimum

Chapitre 02 . dimensionnement et conception d'une installation photovoltaïque

d'énergie reçu par les modules).

- Un autre type de choix de l'inclinaison est d'utiliser le tableau (2.1) ci- dessous, qui indique la relation entre la latitude et l'inclinaison des panneaux solaire.

Latitude (φ)	Inclinaison (α)
$\varphi < 10^\circ$	$\alpha = 10^\circ$
$10^\circ < \varphi < 30^\circ$	$\alpha = \varphi$
$30^\circ < \varphi < 40^\circ$	$\alpha = \varphi + 10^\circ$
$\varphi > 40^\circ$	$\alpha = \varphi + 15^\circ$

Tableau (2.1) . Choix de l'inclinaison.

1.4. Calcul de la puissance crête des panneaux PV

La puissance d'un module photovoltaïque est exprimée en Watt-crête. Le nombre de Watt-crête d'un panneau solaire correspond au nombre de Watt que ce panneau fournit lorsqu'il est utilisé dans des conditions standards.

La puissance crête total de champ photovoltaïque, dépend de l'irradiation quotidienne du lieu d'utilisation, elle donnée par :

$$Pch = \frac{Ec}{K \times Ir}$$

Avec :

Pch : la puissance crête de champ PV.

Ir : Irradiation moyenne mensuelle reçue par le capteur photovoltaïque correspondant au moins le plus défavorable (Wh/m².j).

Ec : Energie consommée (Wh).

K : Le Coefficient correcteur.

1.5. Calcul du nombre total des modules PV

- Le nombre des modules photovoltaïques est calculé en fonction des caractéristiques du module choisi et de la puissance crête du générateur par l'équation suivante :

$$Nm = \frac{Pch}{Pc}$$

Avec :

Pch : puissance crête de l'installation

Chapitre 02 . dimensionnement et conception d'une installation photovoltaïque

Pc : puissance crête unitaire

• Le nombre de modules connectés en série est égale à :

$$Nm, s = \frac{Vch}{Vn}$$

Avec :

Vch : Tension de générateur PV

Vn : Tension nominal unitaire

• Le nombre de modules connectés en parallèle est égale à :

$$Nm, p = \frac{Nm}{Nm, s}$$

1.6. Dimensionnement de l'onduleur

Au sein d'un système PV, l'onduleur occupe une place importante, il permet la transformation du Courant continu délivré par les panneaux en courant alternatif compatible avec les paramètres du réseau de distribution.

Le dimensionnement des onduleurs repose sur trois critères :

- La comptabilité en tension
- La compatibilité en courant
- La compatibilité en puissance

1.6.1. La compatibilité en tension (Tension maximale admissible)

Un onduleur est caractérisé par une tension d'entrée maximale admissible U_{max} . Si la tension délivrée par les modules PV est supérieure à U_{max} , l'onduleur choisi risque d'être endommagé. Ce dépassement est, par ailleurs, la seule cause d'endommagement définitif de l'onduleur.

La valeur de U_{max} permet de déterminer le nombre maximum de modules en série pour une branche. Cela dépend de la tension délivrée par les modules PV. Dans le calcul d'un dimensionnement, on considère que la tension délivrée par un module est sa tension à vide notée UCO. La formule suivante permet de déterminer le nombre maximum de modules PV en série si et seulement si l'onduleur est branché directement avec la sortie du PV :

$$N = Ent\left(\frac{U_{max}}{1.15 \times UCO}\right)$$

Avec :

N : Nombre maximum de modules PV en série

Ent : Partie entière de la fraction

U_{max} : Tension d'entrée maximale admissible

Chapitre 02 . dimensionnement et conception d'une installation photovoltaïque

UCO : Tension à vide d'un module

1,15 : Coefficient de sécurité imposé par la norme UTE C15-712

1.6.2. La compatibilité en courant

Un onduleur est caractérisé par un courant maximal admissible en entrée. Le courant débité par le groupe PV ne devra pas dépasser la valeur du courant maximal admissible I_{max} par l'onduleur. Lors du dimensionnement, le courant délivré par la chaîne PV est égale au courant de court-circuit des modules PV, noté I_{cc} et indiqué sur la fiche technique des modules PV, il détermine le nombre des branche de module en parallèle.

1.6.3. La compatibilité en puissance

Les onduleurs sont également caractérisés par une puissance maximale admissible. Il faut veiller à ce que la puissance du groupe PV ne dépasse pas la puissance maximale admissible en entrée. Étant donné que la puissance délivrée par le groupe PV varie en fonction de la luminosité et de la température, on prendra en compte la puissance crête des modules pour le calcul de dimensionnement. Il faudra alors s'assurer que la somme des puissances crêtes de tous les modules du groupe PV (P_{ch}) soit inférieure à la puissance maximale admissible par l'onduleur (P_o). Idéalement, la puissance délivrée par le groupe PV doit être sensiblement égale à la puissance maximale admissible de l'onduleur. La détermination de la configuration « Champ photovoltaïque/onduleur » permet de proposer pour chaque puissance considérée, une installation qui valorise au mieux sa production énergétique. Il est en effet important de respecter la relation admettant le fait que la puissance d'onduleur soit comprise entre [0.7 fois et 1.2 fois] la puissance crête du champ.

$$0.7 < \frac{P_o}{P_{ch}} < 1.2$$

Avec :

P_o : la puissance maximale de l'onduleur

P_{ch} : la puissance crête de champ PV

1.7. Dimensionnement du panneau photovoltaïque



Chapitre 02 . dimensionnement et conception d'une installation photovoltaïque

Figure (2.3) . Panneau solaire photovoltaïque.

La détermination de puissance crête installée présente un intérêt tout particulier, compte tenu du coût du watt-crête.

Généralement, la variation de l'énergie fournie par un panneau photovoltaïque d'inclinaison donnée, ne suit pas celle des besoins en énergie d'une system.

Si on fixe la puissance crête pour satisfaire au mieux les besoins d'un mois donné, on obtient généralement un déficit ou un excédent pour d'autre mois.

Sur quelle période faut-il s'efforcer d'égaliser les besoins et les apports ? Une inclinaison égale à la latitude du lieu permet de capter une quantité d'énergie annuelle maximale, mais :

- Une partie de cette énergie risque d'être inutile ; l'énergie est chère à stocker.
- Le panneau risque d'être trop cher.

Une inclinaison forte (plus proche de la vertical : latitude du lieu + 20° par exemple) favorise la captation de l'énergie solaire en hiver (quand le soleil est bas).

1.7.1. Principes de dimensionnement et de positionnement du panneau

Les deux principes extrêmes illustrent les raisonnements employés pour confronter :

- L'énergie que le panneau doit fournir.
- L'énergie que le panneau peut fournir à partir de l'ensoleillement.

1.7.2. Dimensionnement sur le mois le moins ensoleillé

Une solution simple est sûr consiste à choisir une puissance crête tel que pendant le mois le moins ensoleillé, l'énergie fournie par le panneau satisfasse les besoins, avec une inclinaison voisine de la latitude du lieu.

C'est la solution généralement adopté par les sociétés commercialisant et installant des systèmes photovoltaïque [12].

Elle conduit, malheureusement à un gaspillage important d'énergie pendant les autres périodes, et spécialement pour la période la plus ensoleillée.

Pour réduire ce gaspillage, et donc économiser sur la puissance crête du panneau, il est possible :

- De favoriser l'exposition du panneau pendant la saison la moins ensoleillée en choisissant une inclinaison supérieure de 10 à 20° (15° en général) à la latitude du site.

1.7.3. Dimensionnement sur le mois le plus ensoleillé

La puissance crête est suffisante pour satisfaire les besoins pendant le mois le plus ensoleillé .

Un tel dimensionnement implique le recours à une source d'énergie complémentaire. Dans un système à deux sources, il faut alors favoriser l'utilisation de l'énergie solaire pendant les mois plus ensoleillé et donc, choisir une faible inclinaison des modules (α =la

Chapitre 02 . dimensionnement et conception d'une installation photovoltaïque

latitude -10° à 20°). Ce dimensionnement trouve sa limite dans le coût de l'énergie complémentaire[12].

Un calcul de coût (investissement, fonctionnement) permet de décider de la solution optimale entre :

- Petit panneau peu incliné et source complémentaire très sollicitée.
- Panneau plus important et plus incliné et source complémentaire moins sollicitée.

1.8. Montage et câblage

Avant de brancher vos panneaux solaires, assurons-nous que leur installation est optimale. Pour ce faire et obtenir un bon rendement à la hauteur de nos exigences, nous suivons les étapes suivantes.

1.8.1. Orientation des panneaux solaires (cap sur le sud)

Pour un rendement optimal, on mise sur un max d'ensoleillement. Alors très logiquement, On installe ses panneaux si les versants de la maison sont orientés sur le côté sud est, sud ou sud-ouest – dans la mesure du possible.

1.8.2. Inclinaison du panneau solaire

A cette étape, nous inclinons les panneaux solaires à 30 degrés, avec une précision extrême. Dans ce mode, les appareils captent la lumière du soleil dans les meilleures conditions.

1.8.3. Eviter l'ombrage

Plus il y a d'ombre, moins il y a de soleil, et l'une des raisons de l'ombre sont les arbres des bâtiments voisins et la cheminée de la maison. Cela entraîne une diminution de la production d'énergie solaire. L'installation doit être prise en compte.



Chapitre 02 . dimensionnement et conception d'une installation photovoltaïque

Figure (2.4) . ombrage des arbres.

1.8.4. Câblage des panneaux solaires

Il y a deux types de câblage en série ou câblage en parallèle :

- Le branchement de panneau solaire en série permet d'additionner les tensions. Pour brancher votre panneau solaire en série, on connecte la borne + du panneau solaire à la borne - et inversement.
- Le branchement de panneau solaire en parallèle permet d'additionner les intensités. Pour brancher votre panneau solaire en parallèle, connectez les bornes + ensemble et les bornes - ensemble.
- Pour une puissance suffisante, on opte pour un branchement de panneau solaire mixte, en série et en parallèle.

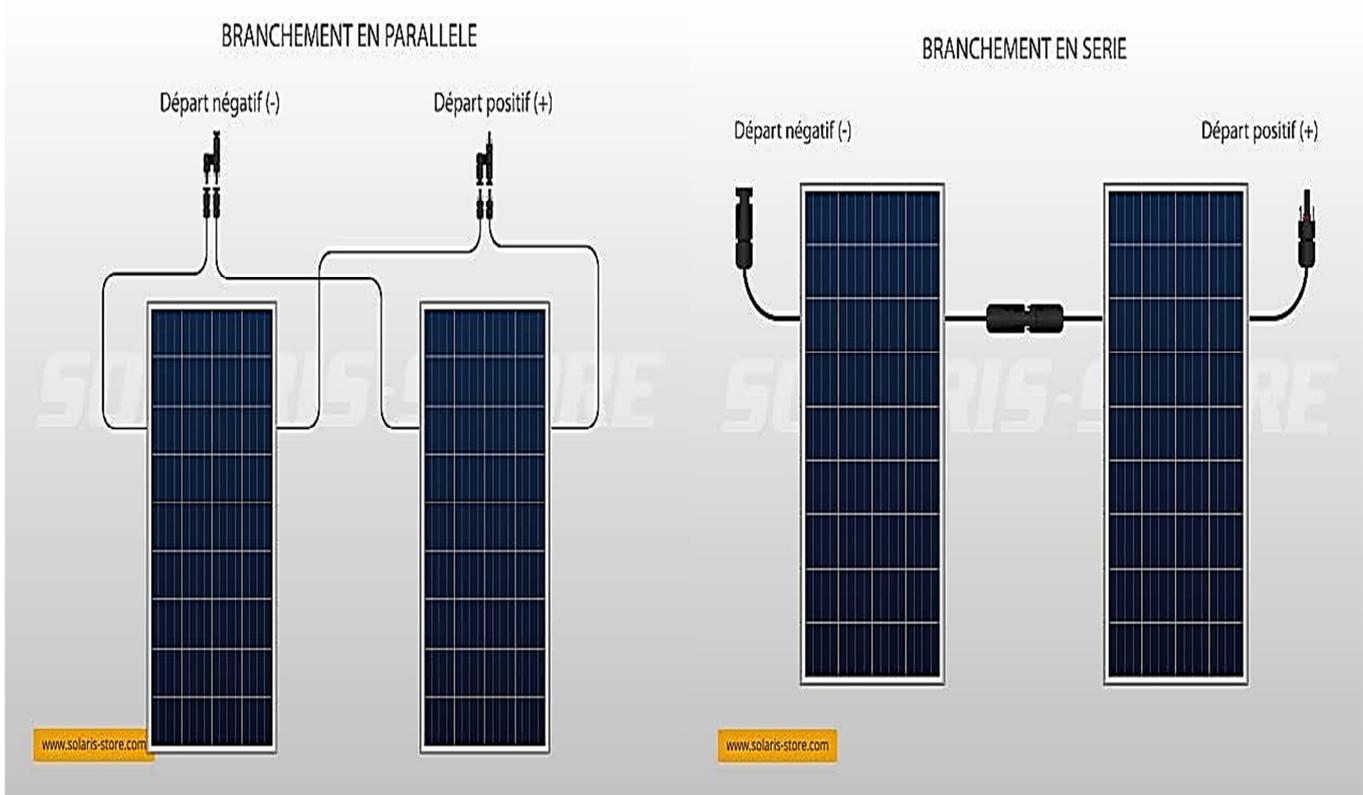


Figure (2.5) . exemple de câblage en série et en parallèle.

2. Caractéristique d'un système PV connectées au réseau électrique

2.1. Réseaux électrique

Le système électrique est un ensemble d'installations électriquement connectées qui assure, via le réseau, le transfert de l'énergie électrique, des producteurs aux consommateurs. Le réseau électrique se compose d'un ensemble d'ouvrages de production, de transport et de distribution de l'énergie électrique. Pour assurer sa stabilité, une bonne surveillance et un

Chapitre 02 . dimensionnement et conception d'une installation photovoltaïque

contrôle en temps réel de son fonctionnement est nécessaire.

Pour transporter l'énergie électrique depuis les centrales de production jusqu'aux centres de consommation on utilise des lignes aériennes à haute tension HTB (33KV et 400KV) et à très haute tension super (400kv), les quelles peuvent assurer la mise en commun des centrales de plusieurs régions et échanger de l'énergie électrique entre elles grâce aux postes d'interconnexion.

2.2. Classification des générateurs photovoltaïques [13] [14]

- En fonction de leur taille, on peut classer les générateurs photovoltaïques de la manière suivante.

a) Générateurs de petite taille (P=1 à 10 kW)

- Pour des applications sur les toits de maisons individuelles ou d'institutions publiques telles que les écoles, parkings,... Elles se connectent au réseau basse tension.

b) Générateurs de taille moyenne (P=10 à 100 kW)

- Ce type de système peut se trouver installé et intégré sur un édifice, sur un toit ou une façade. Il peut être connecté à la basse ou à la moyenne tension du réseau de distribution électrique selon sa taille.

c) Générateurs de grande taille (P ≥ 500 kW)

- Ce sont des systèmes centralisés et sont des propriétés de compagnies d'électricité. On peut également classer ces systèmes selon qu'ils soient munis de batteries de stockage ou non.

2.3. Classification l'installation de générateurs photovoltaïques

a. Installations PV > 250 kVA raccordées sur le réseau HTA

Se rapprochent des demandes éoliennes et nécessitent les mêmes aménagements (création de départ dédié, mutation de transformateur dans les postes sources).

b. Installations PV de 36 à 250 kVA raccordées sur le réseau BT ou HTA

Le lieu de l'installation conditionne les contraintes réseau à lever. Plus la production est électriquement éloignée de la consommation plus l'intégration du site est complexe et coûteuse.

Pour raccorder ces installations, le réseau doit subir d'importantes évolutions (accroissement de la section du câble voire changement de nature du câble).

c. Installations PV ≤ 36 kVA raccordées sur le réseau BT

Installations liées à l'habitat et proches de la consommation. L'intégration de ces installations n'est pas problématique tant qu'il n'y a pas de surproduction locale.

Le déploiement de ces installations dans les centres urbains (qui sont peu équipés en PV et

Chapitre 02 . dimensionnement et conception d'une installation photovoltaïque

en présence d'importants consommateurs) peut être une voie à étudier pour favoriser l'intégration et le déploiement.

2.4. Système PV connecté directement au réseau [15] [16]

a) Structure à convertisseur unique

Le dispositif présenté par la figure est le plus simple, car il comporte le moins de composants possibles modules photovoltaïque en série pour obtenir une tension continue suffisamment grande. Cette solution est une alternative à un hacheur élévateur de tension. La tension continue obtenue alimente directement un onduleur central, qui fournit la tension sinusoïdale désirée (230). Il pourrait être avantageux d'insérer un transformateur pour isoler le système photovoltaïque des réseaux.

L'inconvénient majeur de ce dispositif est l'arrêt total et immédiat de la production de la production d'énergie lors d'un problème survenant en amont de l'onduleur. de plus, le contrôle du point de puissance maximum de la puissance voisin, car toutes les cellules ne délivrent pas le même courant en raison de leurs différences de structure interne et d'ensoleillement.

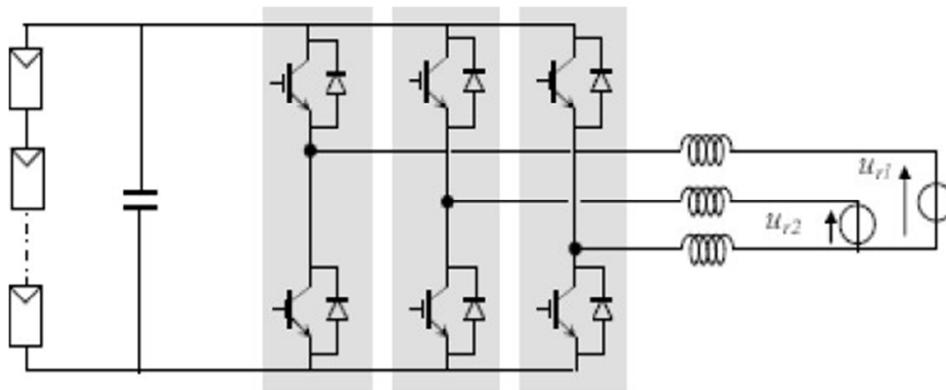


Figure (2.6) . plusieurs modules PV en série vers un seul onduleur

b) Structure avec bus à basse tension alternative

La figure montre un onduleur associé à un circuit de commande qui est directement connecté au module photovoltaïque. La tension en sortie de ce dernier est transformée en une tension alternative de fréquence 50Hz. Cette tension est transportée grâce à un bus alternatif (220V- 50Hz, exemple de schéma) vers un transformateur central qui l'élève au niveau désiré. Le faible niveau de tension dans le bus est l'avantage majeur de ce type de montage, puis qu'il assure la sécurité des personnels. Cependant, la distance entre le transformateur et le module doit être faible à cause du courant important qui traverse les câbles et qui génère des pertes joules. Il ya un compromis à faire au niveau de la tension du bus alternatif. D'une part, il faut que sa valeur crête soit inférieure à celle délivrée par les modules (même avec un faible ensoleillement).d'autre part, une tension faible dans ce bus diminue le rendement.

Chapitre 02 . dimensionnement et conception d'une installation photovoltaïque

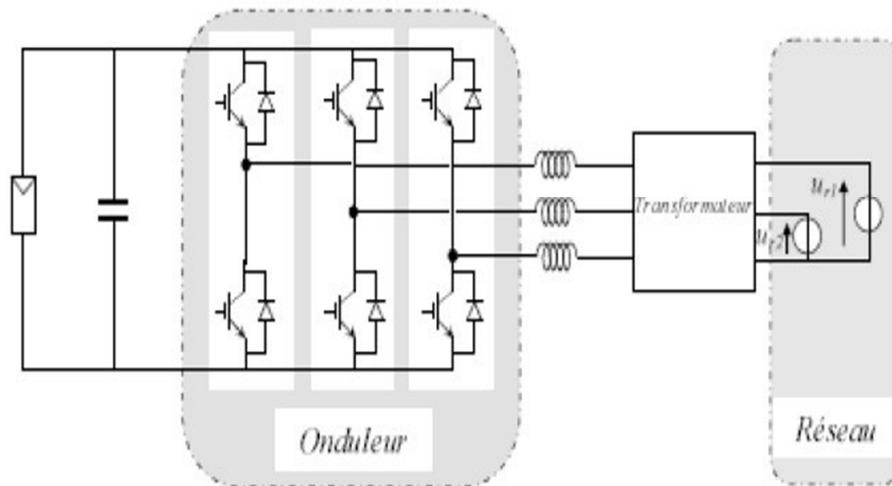


Figure (2.7) . bus à basse tension alternative.

3. rentabilité d'une installation PV connectées au réseau

C'est un calcul après combien de temps l'installation solaire s'amortira, mais aussi un calcul du montant que nous gagnons [17].

Les moyens de définir votre rentabilité photovoltaïque, soit :

- Estimer le rendement des panneaux solaires.
- Définir votre temps de retour sur investissement.
- Calculer les bénéfices de votre installation photovoltaïque.

3.1. Le rendement de panneaux solaire

Pour calculer la rentabilité d'un investissement photovoltaïque, nous devons estimer au plus juste la productivité de nos panneaux solaires. Pour cela, il faut prendre en compte deux variables : la puissance de l'installation solaire et les conditions d'ensoleillement de celle-ci.

3.1.1. La puissance de vos panneaux solaires

La puissance totale de votre installation solaire s'exprime en kilowatt-crête (kWc). Elle indique la quantité maximale que votre installation photovoltaïque est capable de fournir dans des conditions de laboratoire, sur la base suivante : 1 kWc produit entre 900 à 1400 kWh / an selon la région et l'exposition.

Il est à noter que, même dans les meilleures conditions d'ensoleillement, un panneau solaire ne fournira jamais exactement la totalité de sa puissance nominale. En outre, un panneau solaire ne produit pas d'électricité pendant la nuit mais modestement par temps maussade. C'est pourquoi l'estimation de la production photovoltaïque doit être lissée sur l'année pour obtenir le résultat le plus proche de la réalité.

3.1.2. Les conditions optimales : L'orientation, l'inclinaison et l'ombrage

L'orientation, l'inclinaison et l'ombrage des panneaux solaires sont des facteurs à ne pas négliger pour un bon ensoleillement : plus le panneau reçoit de soleil, plus il produit de l'électricité.

Chapitre 02 . dimensionnement et conception d'une installation photovoltaïque

- **L'ombrage** : C'est le critère le plus important puisque la privation de luminosité entraîne la baisse de la production. C'est pourquoi les zones d'ombrages doivent être identifiées et l'installation optimisée en conséquence.
- **L'orientation** : Le soleil se levant à l'Est et se couchant à l'Ouest, l'orientation idéale est évidemment plein sud pour bénéficier du soleil toute la journée. Mais l'Est, le Sud-Est, le Sud-Ouest ou encore l'Ouest sont aussi à étudier car si l'exposition est plus courte mais plus intense, elle sera également intéressante !
- **L'inclinaison** : Les rayons du soleil devraient heurter les panneaux solaires de façon perpendiculaires pour un rendement optimal. Mais puisque la position du soleil change selon les saisons et que votre toiture est elle-même déjà inclinée (à des degrés d'inclinaison différents selon la région et si habitation ou bâtiment) rien ne sert de viser l'inclinaison absolue : celle de votre toiture est généralement suffisante.

3.2. L'amortissement ou retour sur investissement

3.2.1. L'investissement : le coût d'une installation photovoltaïque

Aux débuts du photovoltaïque, les panneaux solaires coûtaient très (trop) cher. Mais en 10 ans, le prix a chuté de plus de 80 % ! Ce qui a favorisé le développement de nouvelles technologies de production et de fonctionnement qui permettent d'affirmer que le photovoltaïque est aujourd'hui rentable.

La question du coût d'une installation photovoltaïque repose sur trois points : le prix d'achat initial, les aides qui viennent l'alléger et les possibles charges liées à l'entretien et au fonctionnement.

3.2.2. Le prix d'achat initial de votre installation photovoltaïque

Il dépend de la puissance crête des panneaux. Les prix sont dégressifs – le tarif au kWc baisse quand la puissance augmente. Dans le cadre d'une prestation clé en main (démarches administratives préalables, matériel, pose, raccordement et mise en service incluse) vous pouvez vous baser sur une fourchette de :

- 1440 000 à 1760 000 DA pour une puissance de 3 kWc
- 2400 000 à 2720 000 DA pour une puissance de 6 kWc
- 2880 000 à 3200 000 DA pour une puissance de 9 kWc
- 4480 000 à 5120 000 DA pour une puissance de 36 kWc

3.2.3. Les coûts de fonctionnement

Les frais à provisionner ne sont pas toujours explicites sur les offres. Lorsque vous réalisez une étude Terre Solaire, ils sont non seulement mentionnés mais aussi provisionnés dans un tableau d'amortissement afin d'éviter les mauvaises surprises. Parce que c'est aussi ça, être militant !

Chapitre 02 . dimensionnement et conception d'une installation photovoltaïque

En dehors du prix d'achat des panneaux solaires, voici les coûts à provisionner dans votre étude de rentabilité :

- **L'entretien**

Le coût est limité, mais la surveillance des panneaux et de l'onduleur est nécessaire ! La pluie débarrassera les salissures si l'inclinaison est de 15° au moins. Si leur inclinaison est plus faible ou en cas de pollution localisée, rien n'empêche de faire réaliser un nettoyage.

- **Le remplacement de l'onduleur**

Cet appareil indispensable qui permet de transformer le courant continu en courant alternatif est le seul composant électronique pouvant rencontrer une panne dans la dizaine d'années à venir.

Ces frais sont automatiquement pris en compte et imputés aux bénéfices sur 25 ans dans le cadre d'une étude personnelle à Terre Solaire. Cela réduit les bénéfices déclarés.

3.3. Les bénéfices de vos panneaux solaires

3.3.1. Économiser sur sa facture d'électricité

En choisissant une installation en autoconsommation, nous réduisons considérablement le besoin de notre propre générateur car il consomme notre électricité photovoltaïque et cela entraîne une réduction de la facture d'énergie capillaire, et le surplus de la production solaire peut aussi être vendu.

3.3.2. Le juste nombre de panneaux solaire

Le nombre de panneaux solaires que nous installons est soumis à des influences dues à la fixation du prix des installations, une contradiction qui aura un impact évident sur la rentabilité, il ne faut donc pas installer trop ou trop peu de solaires panneaux.

4. utilisation du logiciel PVSYST pour l'étude de l'installation solaire PV connectées au réseau

4.1. Introduction

Le programme PVsyst est un logiciel de simulation de système photovoltaïques, il conçu pour être utilisé par les architectes, les ingénieurs et les chercheurs, mais c'est aussi un outil pédagogique très utile. Il inclut une aide contextuelle approfondie, qui explique en détail la procédure et les modèles utilisés et offre une approche ergonomique avec guide dans le développement d'un projet. PVsyst permet d'importer des données météo d'une dizaine de sources différentes ainsi que des données personnelles.

4.2. Inscription générale de ce système

4.2.1 Page principale

Chapitre 02 . dimensionnement et conception d'une installation photovoltaïque

Lorsque vous ouvrez ce programme, nous trouvons la page principale, à partir de laquelle vous pouvez sélectionner et choisir le projet qui est sur le point de démarrer. Il y a plusieurs fenêtres, dont les plus importantes sont :

- Couple au réseau :

Cette installation raccordée au réseau dont l'électricité produite est injectée dans le réseau collectif (EDF ou autre).

- isole avec batteries :

Cette installation autonome destinées à alimenter un appareil sans fil, ou un site isole, non raccorde au secteur. On trouve tout le système sur batterie : électrification rurale en site isole, chalet...

- base de données : il contient trois catégories :

1. Base de données météo :

- a) données météo principale.
- b) afficher et comparer des fichiers météo.
- c) importation de données météo.

2. base de données composants :

- a) composants principaux.
- b) composants réseau.
- c) composants système isole.
- d) composants pompage.

3. bases de données diverses :

- a) données financières et logistique.

Chapitre 02 . dimensionnement et conception d'une installation photovoltaïque

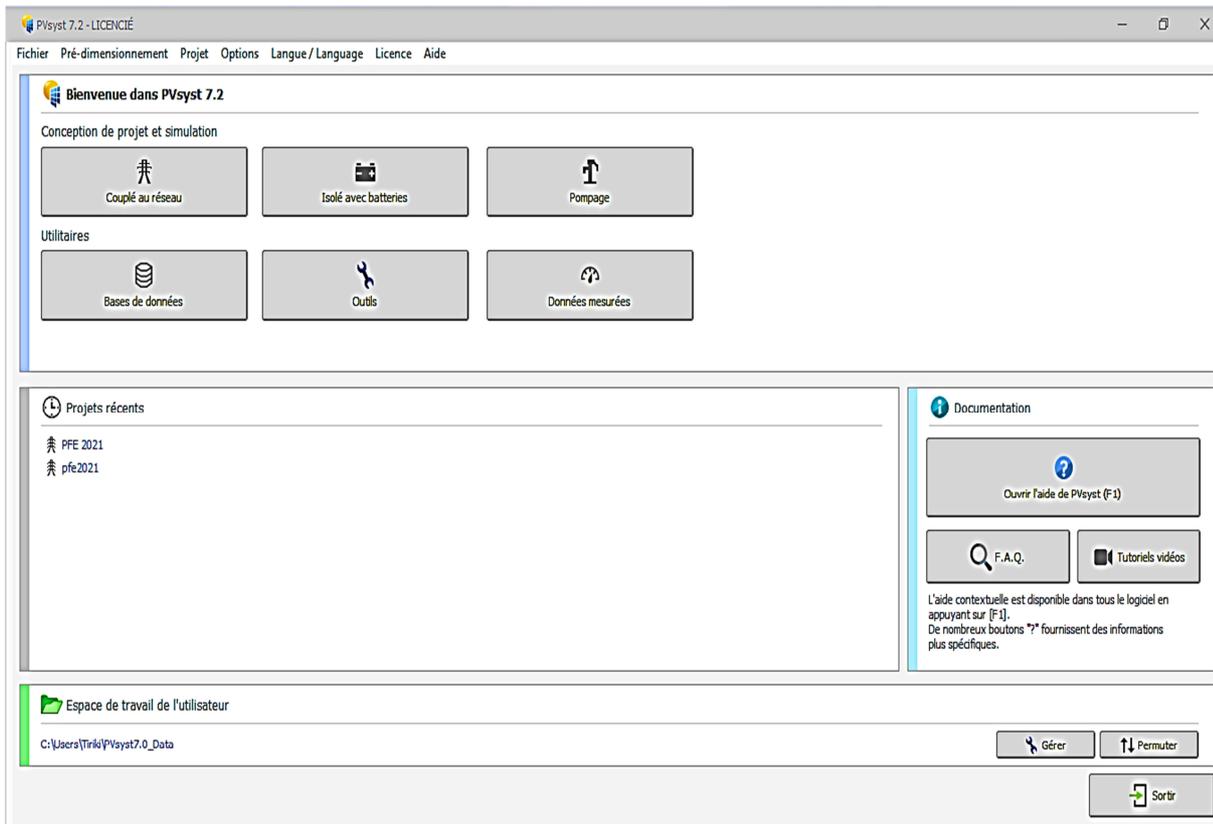
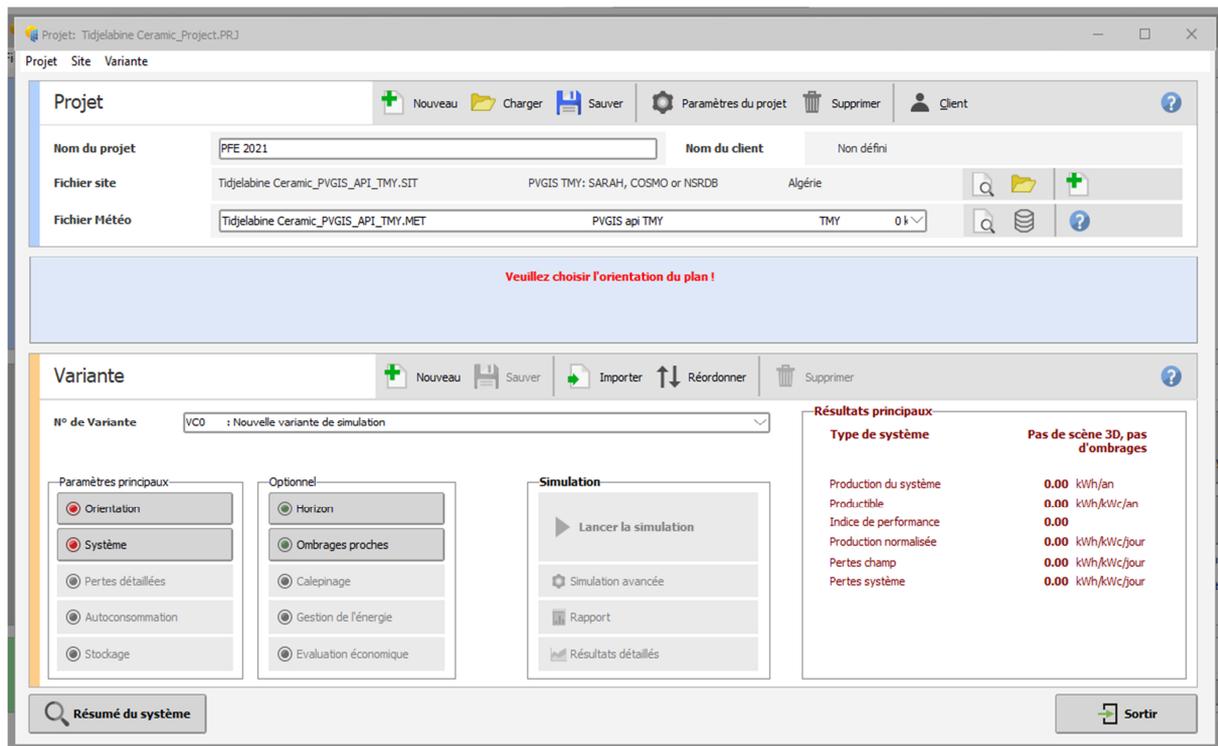


Figure (2.8) . page principale

4.2.2. Fenêtre de Couple au réseau

Lorsque vous choisissez cette fenêtre, vous devez saisir toutes les informations relatives à ce projet, dont la plus importante est : (nom de projet, fichiers site, fichiers météo...), et lorsque vous avez terminé de saisir les informations, nous disons de les enregistrer.



Chapitre 02 . dimensionnement et conception d'une installation photovoltaïque

Figure (2.9) . couple au réseau.

4.2.3. Données climatiques

Dans cette fenêtre, l'emplacement dans lequel le projet sera situé est déterminé à l'aide de Google Earth.

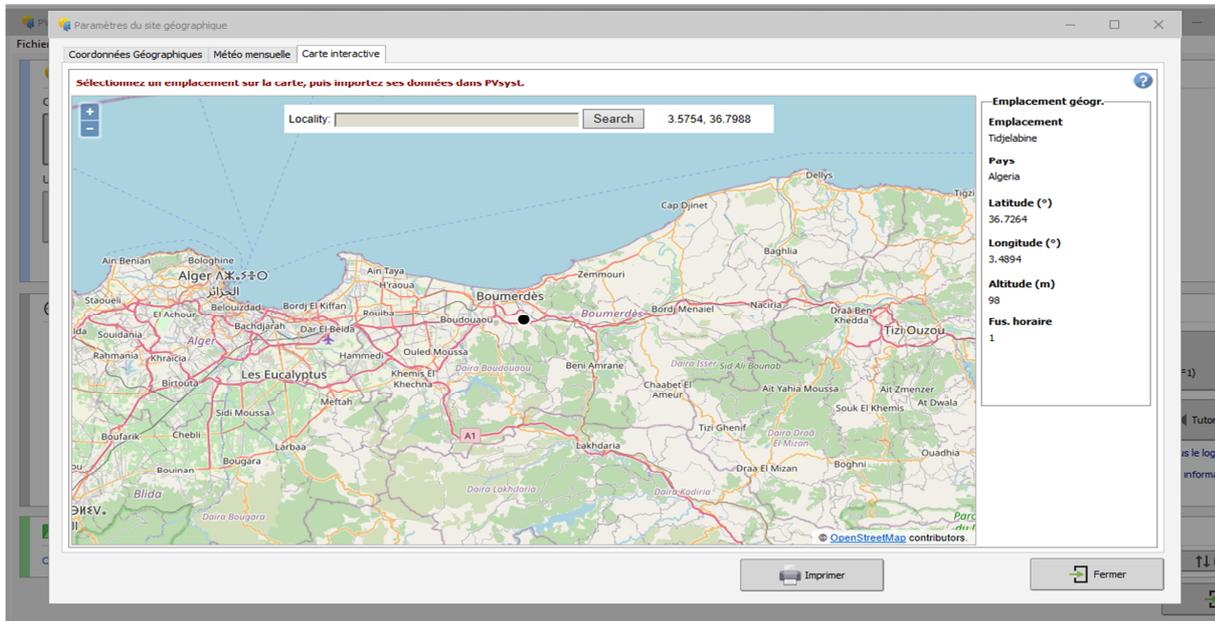


Figure (2.10) . carte interactive de PVSYSST pour accéder aux données climatiques.

4.2.4. Données météorologiques

Ces données résument les caractéristiques climatiques (l'irradiation et la température) du site, Il est conseillé de définir soigneusement la source des données :

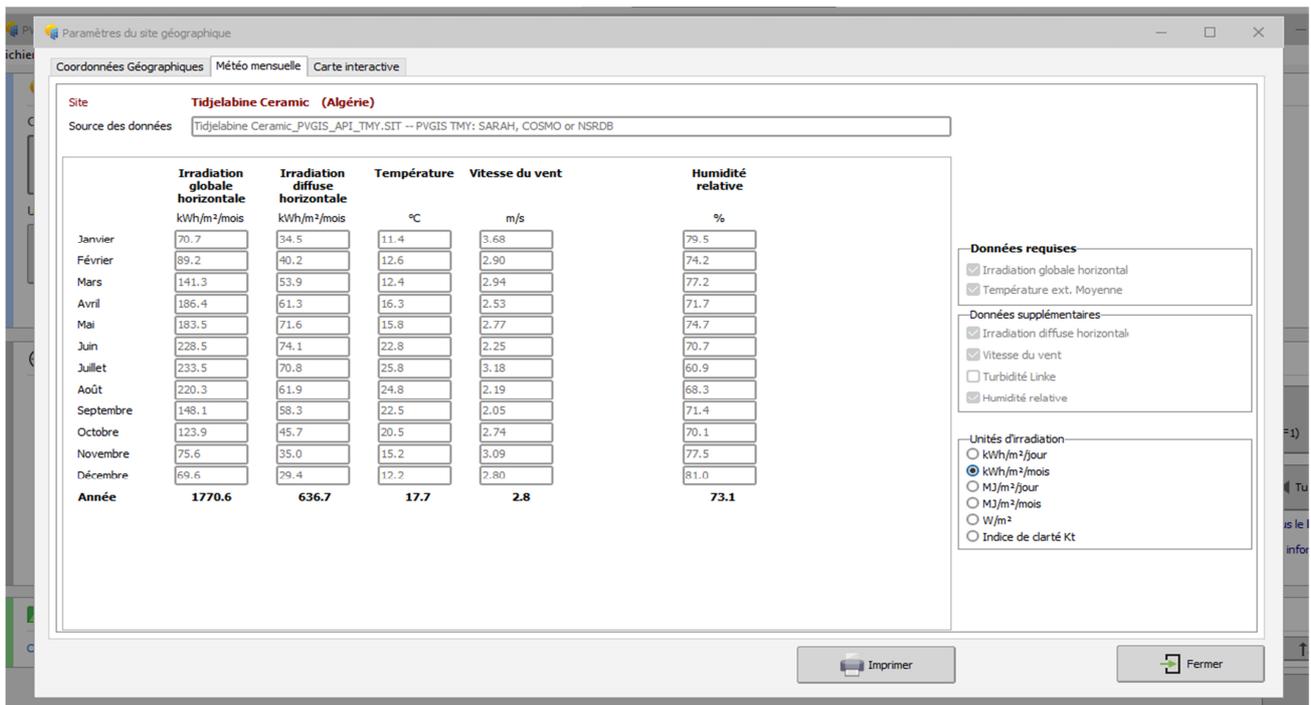


Figure (2.11) . Paramètres climatique.

Chapitre 02 . dimensionnement et conception d'une installation photovoltaïque

4.2.5. Orientation

Tout comme dans la section préliminaire design, on choisira ici l'orientation (inclinaison et azimut du panneau). Néanmoins ici on pourra choisir entre différents types d'ajustement en plus de ceux déjà vus :

- Un panneau fixe,
- Un panneau possédant deux inclinaisons : une pour l'hiver et une pour l'été,
- Un panneau suivant le soleil sur les deux axes, il faudra alors déterminer les butées,
- Un panneau qui change seulement son azimut sur un axe incliné, on réglerait aussi les butées,
- Un panneau qui change seulement son inclinaison, on choisirait l'azimut et les butées,
- Deux panneaux avec des positions et des tailles différentes, ou plusieurs panneaux posés sur le sol ou contre un mur.

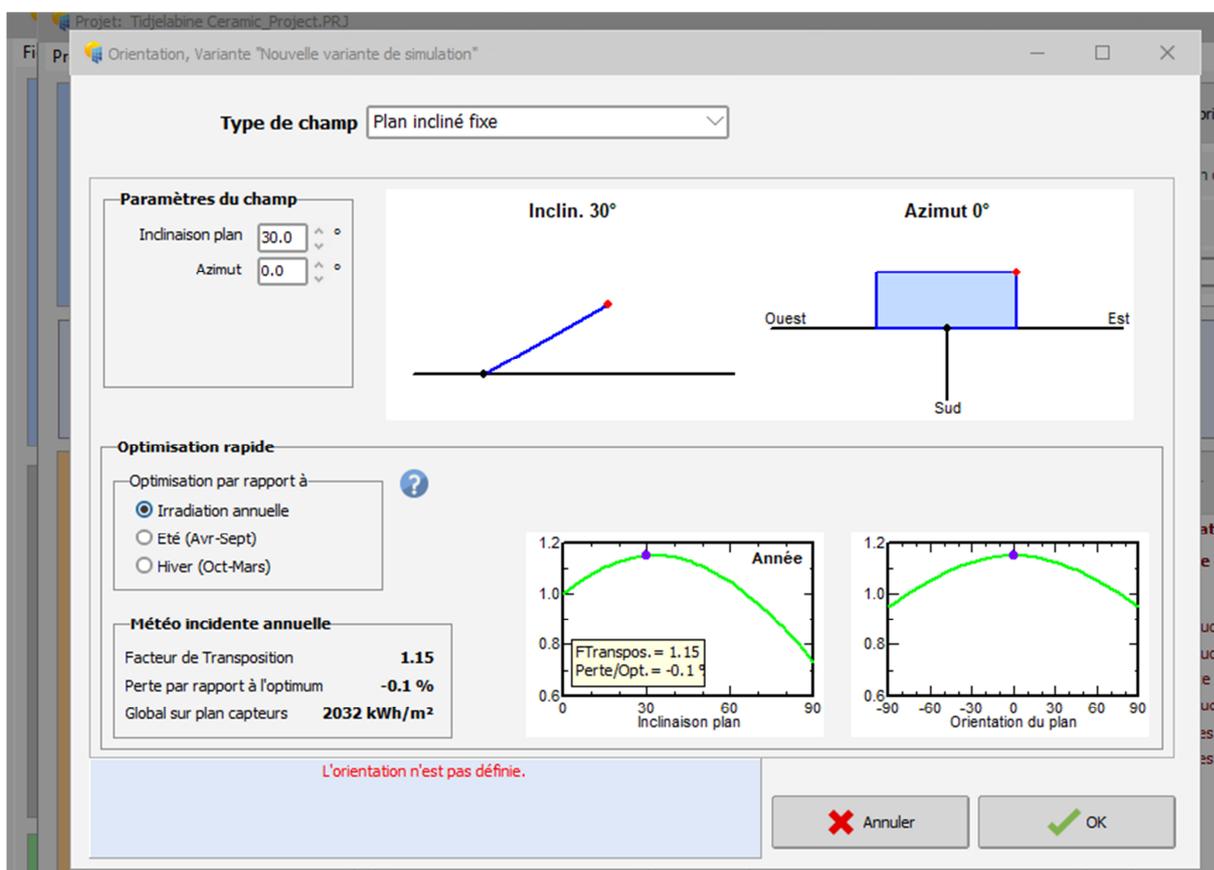


Figure (2.12) . angle d'orientation.

4.2.6. Données de systèmes

Contrairement au mode « préliminaire design », les données systèmes seront ici concrètes. Il faut donc les informations précises sur l'onduleur et les panneaux photovoltaïques. Pour le connecté réseau, cette étape est divisée en cinq sous parties : le choix de l'onduleur "inventer", le choix du module photovoltaïque "select modules" le schéma de câblage des modules "modules

Chapitre 02 . dimensionnement et conception d'une installation photovoltaïque

array", le calcul des pertes et l'expression du besoin. Il faut donc :

- Entrer le nombre de champs (si plusieurs onduleurs ou plusieurs types de panneaux) dans le cadre en haut à droite
- Entrer facultativement la puissance désirée nominale de l'installation ou la surface voulue dans le cadre bleu "precizing help".
- Choisir son onduleur : il y a possibilité de restreindre la liste en choisissant ceux encore en vente "Available Now".
- Choisir ses panneaux : cela fonctionne de la même manière.

Rentrer le nombre de String (String = ensemble de panneaux en séries) et le nombre de panneaux par string. Si une valeur a été entrée dans le cadre bleu "precizing help", le programme calculera tout seul une solution de câblage.

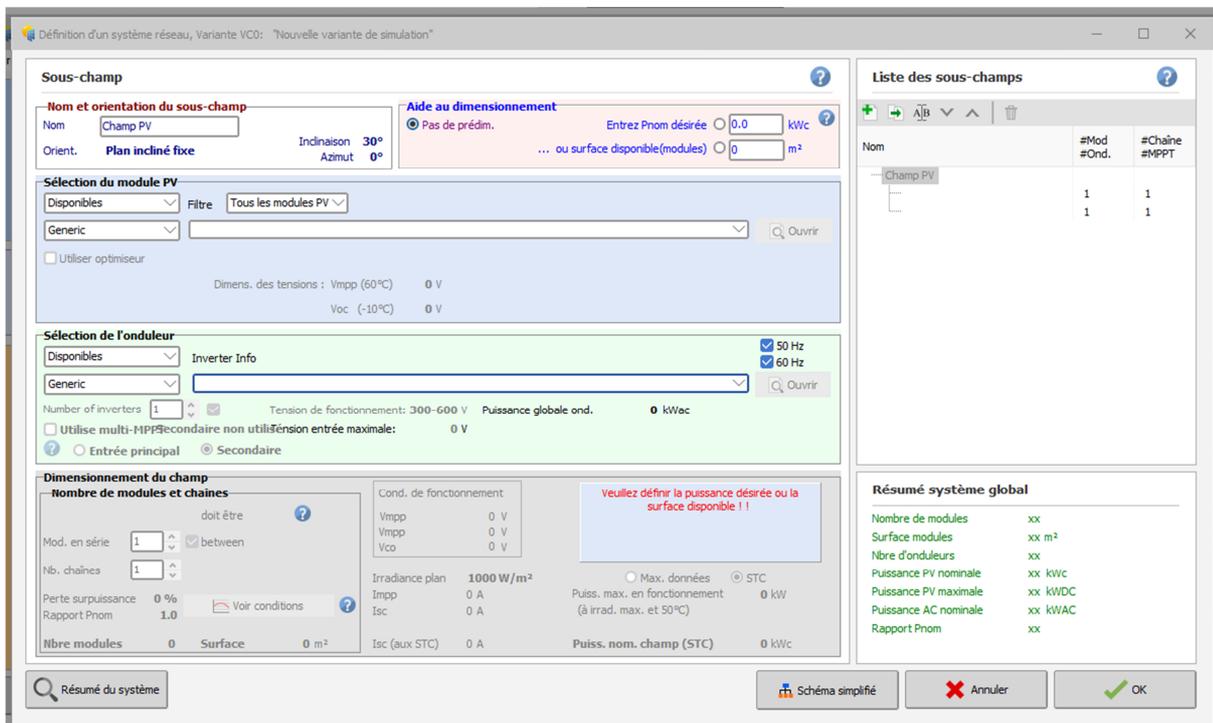


Figure (2.13) . configuration de système dans PVSYS

4.2.7. Simulation

Une fois que tous les paramètres sont correctement entrés, le bouton "simulation" n'apparaît plus grisé. Dans la fenêtre qui s'ouvre, avant de lancer la simulation, on peut choisir les données qui seront écrites dans un fichier PDF à la fin de la simulation. Pour choisir ces variables, cliquer sur "output file". On peut aussi choisir d'afficher n'importe quel type de graphe avec le bouton "spécial graphes".

Chapitre 02 . dimensionnement et conception d'une installation photovoltaïque

Après la simulation, cliquer sur "résulte" pour accéder à toutes les données principales, et à d'autres que vous pouvez définir : graphes, graphes personnalisés, tableau personnalisés, données économique et le rapport au format PDF en appuyant sur "report.

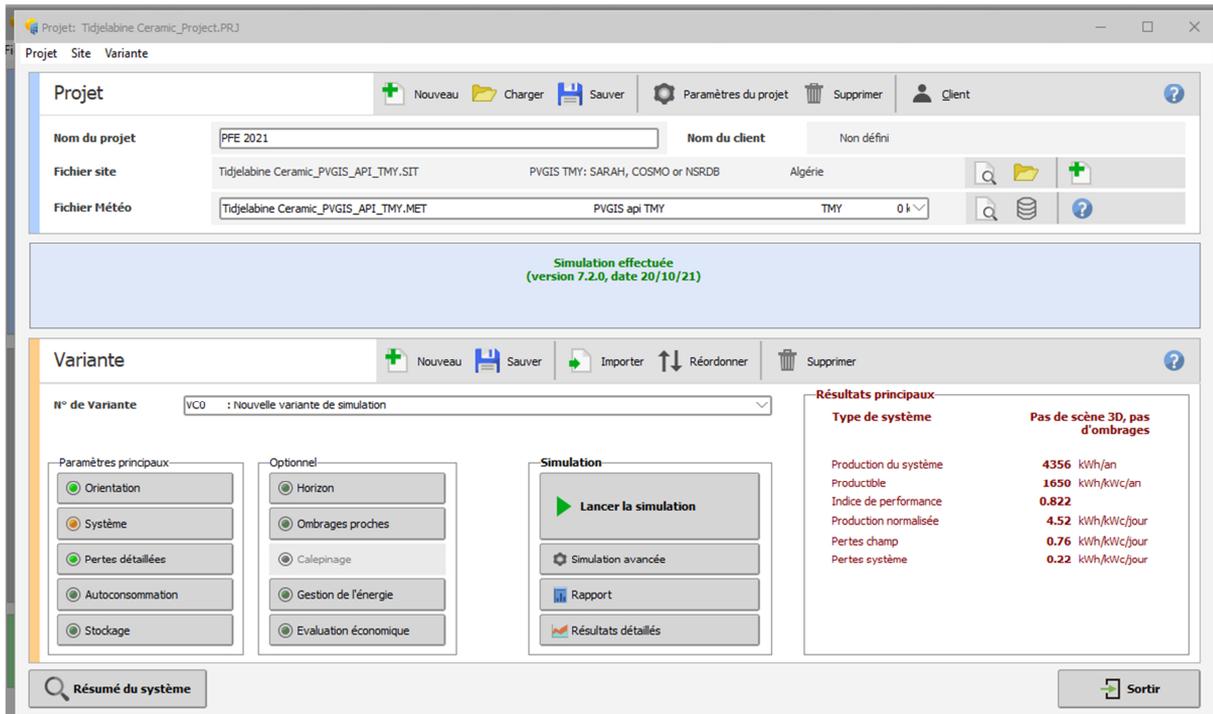


Figure (2.14) . simulation de système

4.2.8. Les points forts de système PVSYS

- gestion des parafoudres, sur les parties DC et AC.
- Banque technique de matériels : choix des modules PV, onduleurs, parafoudres, protections de circuits... parmi un grand nombre de fabricants, constamment actualisées et contrôlées.
- Possibilité de mettre en bibliothèque des éléments de circuits composent.
- Garantie de la conformité de vos installations.
- Permet de dimensionner aussi bien les petites installations (installations à puissance limitée) que les centrales de production d'énergie électrique ($\geq 250\text{kVA}$).

5. conclusion

Les systèmes photovoltaïques permettent d'exploiter l'énergie du soleil à diverses fins. Ils sont très fiables et constituent une source non polluante d'électricité qui peut convenir à toute une gamme d'applications. Le dimensionnement d'un générateur PV a pour but de déterminer l'optimum technico- économique entre la puissance crête du champ de panneaux solaires et la capacité de batterie associée à partir des besoins électriques de l'utilisateur d'une part et des données d'ensoleillement du site d'autre part. . Les systèmes PV raccordés au réseau sont simples d'exploitation, car aucune maintenance n'est nécessaire.

Chapitre 02 . dimensionnement et conception d'une installation photovoltaïque

Pour démarrer ce projet, les ingénieurs et les spécialistes utilisent un programme PVSYST qui facilite le processus de calcul et d'analyse de toutes les conditions et données pour mener à bien le projet et sa réussite.

Chapitre 03 . Application des systemes PV dans la zone insuindustrielle de Réghaia

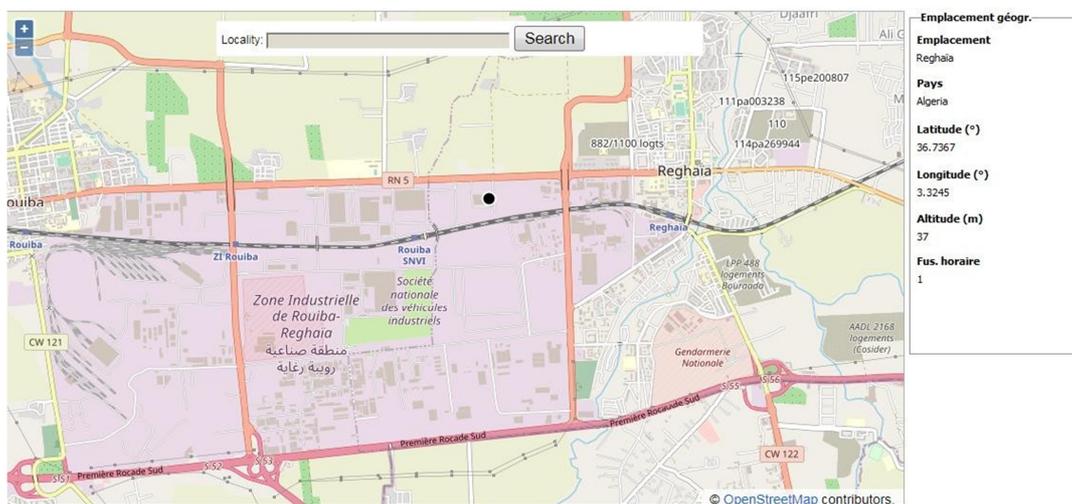
1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter une étude de dimensionnement d'une centrale PV connectée au réseau installée sur un toit incliné orienté est-ouest d'un bâtiment de production des produits détergents situé dans la zone industrielle de Réghaia.

Toutes les étapes de conception et de dimensionnement sont faites à l'aide de logiciel PVSYST très reconnu dans ce domaine.

2. Conditions géographiques et météorologiques de site

A l'aide de logiciel PVSYST nous pouvons télécharger les bases de données météorologiques (gisement solaire, température, vitesse de vent ...) à partir de plusieurs sources : PVGIS, METEONORME, NASA par un simple choix de site d'installation sur la



carte géographique de Google Earth comme présenter sur la figure suivante :

Figure (3.1) . Choix de site de projet.

Figure (3.2) . Données météorologique source PVGIS TMY.

Site: **Reghaia (Algérie)**
 Source des données: PVGIS TMY: SARAH, COSMO or NSRDB

	Irradiation globale horizontale kWh/m ² /mois	Irradiation diffuse horizontale kWh/m ² /mois	Température °C	Vitesse du vent m/s	Humidité relative %
Janvier	66.9	31.2	11.4	3.80	82.0
Février	101.8	35.8	11.1	3.29	73.6
Mars	147.3	52.4	13.3	2.94	77.1
Avril	190.9	61.5	16.9	2.70	71.7
Mai	188.7	70.4	16.3	2.83	74.7
Juin	230.6	73.1	23.0	2.25	70.7
Juillet	237.6	71.4	26.4	2.19	65.8
Août	220.7	61.1	24.9	2.27	68.3
Septembre	153.7	53.8	23.0	2.20	71.4
Octobre	130.7	43.3	21.6	2.12	71.5
Novembre	69.5	35.7	15.4	3.33	79.7
Décembre	67.0	27.5	15.1	3.58	75.0
Année	1805.4	617.2	18.2	2.8	73.5

Données requises
 Irradiation globale horizontale
 Température ext. Moyenne

Données supplémentaires
 Irradiation diffuse horizontale
 Vitesse du vent
 Turbidité Linke
 Humidité relative

Unités d'irradiation
 kWh/m²/jour
 kWh/m²/mois
 MJ/m²/jour
 MJ/m²/mois
 W/m²
 Indice de clarté KT

Chapitre 03 . Application des systemes PV dans la zone insuistrielle de Réghaia

La trajectoire de soleil donné par le logiciel PVSYST est présentée sur la figure suivante :

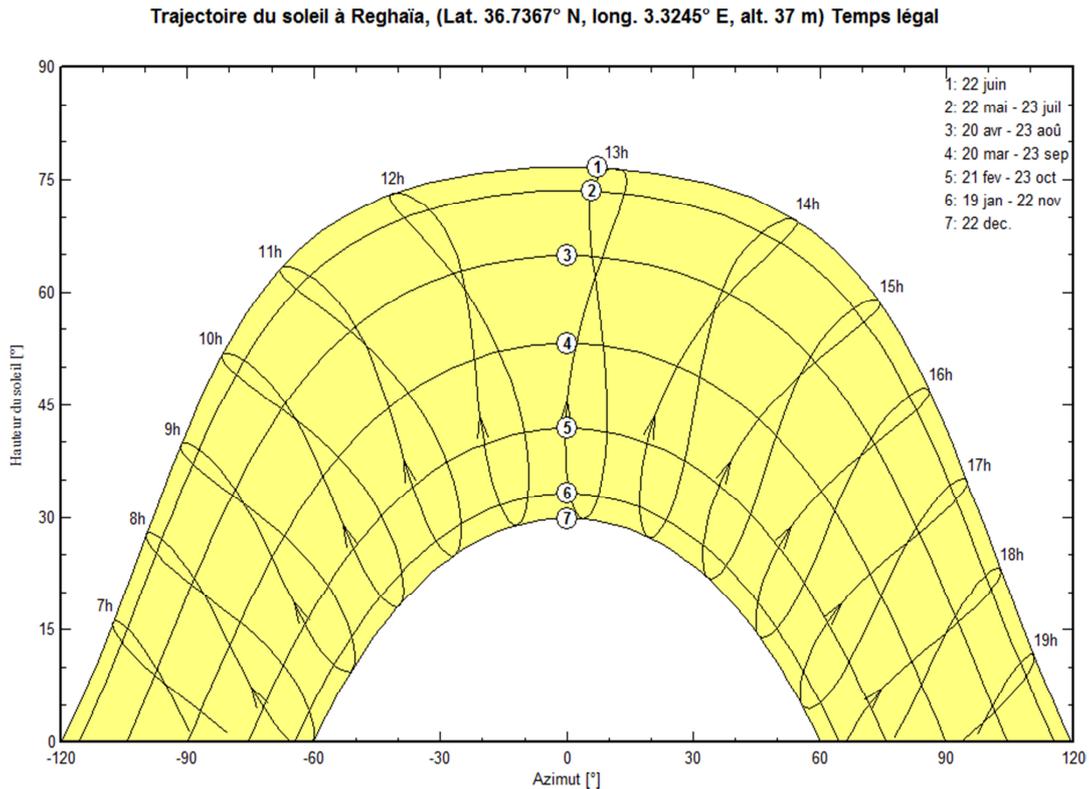


Figure (3.3) . trajectoire du soleil a Reghaia .

Pour le dimensionnement on va prendre en considération les valeurs des températures ambiantes minimale et maximale de la région sous l’ombre, dans notre cas on va prendre :

Tmin= -10°C

Paramètres dépendants du site

Températures de réf. pour conception du champ selon les voltages d'entrée de l'onduleur	Température basse pour limite de Voltage Absolu	<input type="text" value="-10"/>	°C	<input checked="" type="checkbox"/> Défaut
	Température de fonctionnement en hiver pour VmppMax	<input type="text" value="20"/>	°C	<input checked="" type="checkbox"/>
	Température de fonctionnement habituelle sous 1000 W/m²	<input type="text" value="50"/>	°C	<input checked="" type="checkbox"/>
	Température de fonctionnement en été pour VmppMin	<input type="text" value="60"/>	°C	<input checked="" type="checkbox"/>

Tmax= 60°C

Figure (3.4) . Configuration des paramètres de simulation.

3. Orientation des panneaux PV

Les modules PV seront installés sur un toit incliné EST-OUEST avec un angle d’inclinaison de 10°.

Nous avons réalisé la vue en 3D pour les études de l’ombrage et pour savoir la puissance maximale que peut supporter le toit.

La figure suivante présente la vue en trois dimensionnement de bâtiment de production qui

Chapitre 03 . Application des systemes PV dans la zone insuatrielle de Réghaia va supporter le générateur PV.

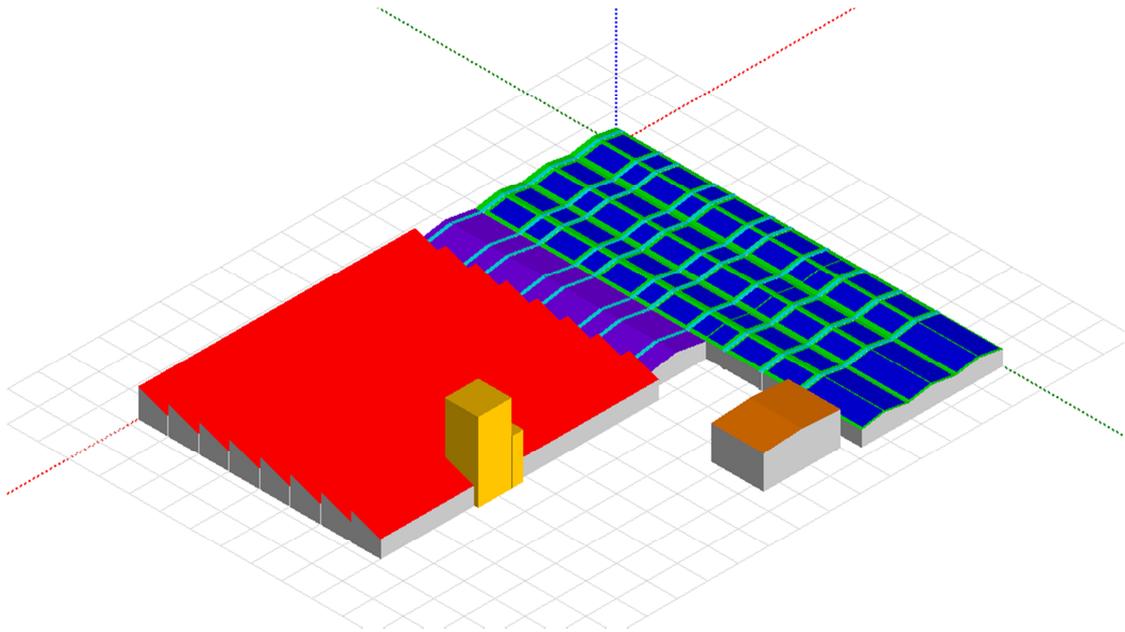


Figure (3.5) . Vue global de l'usine.

Le bloc en verre représente le lieu de notre intérêt ; nous avons essayé de faire un remplissage complet avec des modules photovoltaïques pour avoir le maximum de production possible.

Les pertes dues à l'ombrage pendant le mois le plus défavorable, décembre ne dépasse pas les 1.5% comme illustrer dans la figure suivante :

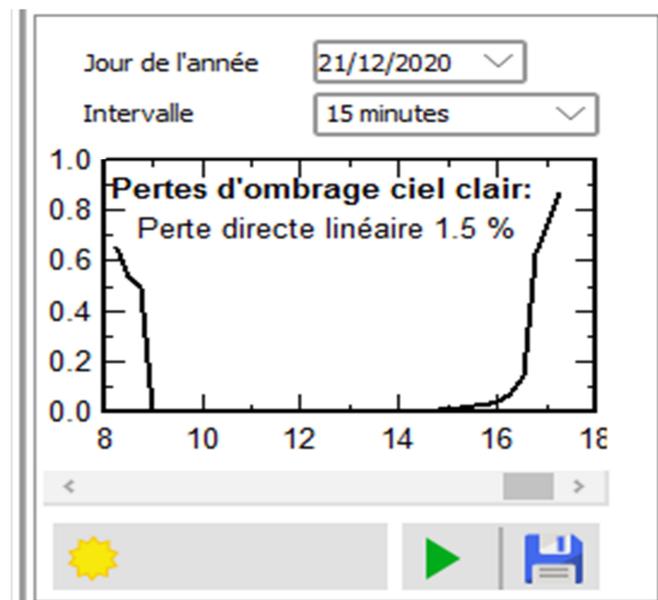


Figure (3.6) . pertes dues à l'ombrage pour le 21 Décembre.

4. Choix de générateur photovoltaïque et de l'onduleur

Le nombre de modules de 585Wc que nous arrivons à placer sur le ce toit est de 1326 modules

Chapitre 03 . Application des systemes PV dans la zone insuatrielle de Réghaia

Occupant une surface totale de 3625 m² ce qui représente une puissance globale de 776 kWc ; les fiches techniques des équipements sont insérées en annexes.

Un générateur PV est constitué des séries (chaines) de modules PV raccordées en parallèle pour augmenter le courant de système ; chaque chaine est la mise en série des modules PV pour augmenter la tension de système.

Si n est le nombre de modules en série et si m est le nombre de chaines en parallèle, la courbe I(V) de générateur complet est comme suit en multipliant les tensions par n et les courants par m :

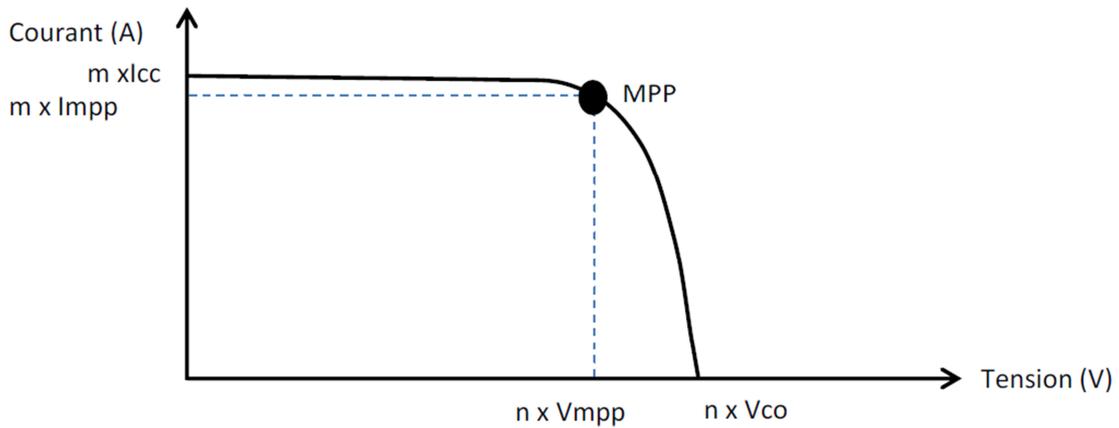


Figure (3.7) . Caractéristique I(V) de générateur PV.

Pour des conditions météorologiques différentes des conditions standardisons doit recalculer les nouveaux paramètres de la courbe I(V) utilisant les coefficients de variation de courant et de la tension par rapport à la température spécifiées par le fabricant dans la fiche techniques des modules PV.

$$V(G, T) = V_{stc} (1 + \alpha(T - T_{ref}))$$

$$I(G, T) = \frac{G}{G_{ref}} (I_{stc} (1 + \beta(T - T_{ref})))$$

Tel que :

- G : rayonnement solaire (W/m²)
- T : température de la face arrière de module en °C
- G_{ref} : 1000 W/m²
- T_{ref} : 25 °C
- V(G, T) est la valeur de la tension dans les conditions G et T
- V_{stc} est la valeur de la tension dans les conditions standards
- I(G, T) est la valeur de courant dans les conditions G et T
- I_{stc} est la valeur de courant dans les conditions standards

Chapitre 03 . Application des systemes PV dans la zone insustrielle de Réghaia

- α : coefficient de variation de la tension par rapport à la température \square °C, il est toujours négatif
- β : coefficient de variation de courant par rapport à la température \square °C, il est toujours positive

Pour calculer la température de module PV en utilisant la température ambiante on peut Utiliser la formule suivante :

$$T_{cellule} = T_{amb} + \frac{G}{800} (NOCT - 20)$$

Tel que :

- $T_{cellule}$ est la température en face arrière d module PV
- T_{amb} est la température ambiante à l'ombre
- NOCT est la température de fonctionnent normale de la cellule, elle est mesure sous les conditions $800W/m^2$ et $20^{\circ}C$ ambiante ; le fabricant de module doit fournir cet information.

4.1. Branchement GPV et onduleur

Nous avons choisi un onduleur de 50 kW ac qui a trois entrée MPPT comme unité de base pour le projet ; en totalité nous avons utilisé 13 onduleurs ce qui donne une puissance totale de 650kWac.

Afin de brancher le GPV et l'onduleur il faut prendre en considération les points suivants :

- Tous les strings arrivant sur un même onduleur (une même entrée MPPT) doivent être Identiques (nombre de modules, orientation)
- Ne jamais brancher l'entrée de plusieurs onduleurs en parallèle.
- Obligatoire : Coupe-circuit bipolaire à l'entrée de l'onduleur.

4.2. Le choix de nombre de module en série

Pour faire un bon choix de nombre de modules en série il faut prendre en considération trois valeurs de température :

- Température minimale des modules
- Température maximale des modules
- Température moyenne des modules en hiver

Ces trois valeurs peuvent être calculées à partir des températures ambiantes.

On trace les courbes I(V) pour ces trois valeurs de température sur le graphe des tensions de l'onduleur et on fait les vérifications nécessaires comme illustré sur la figure suivante :

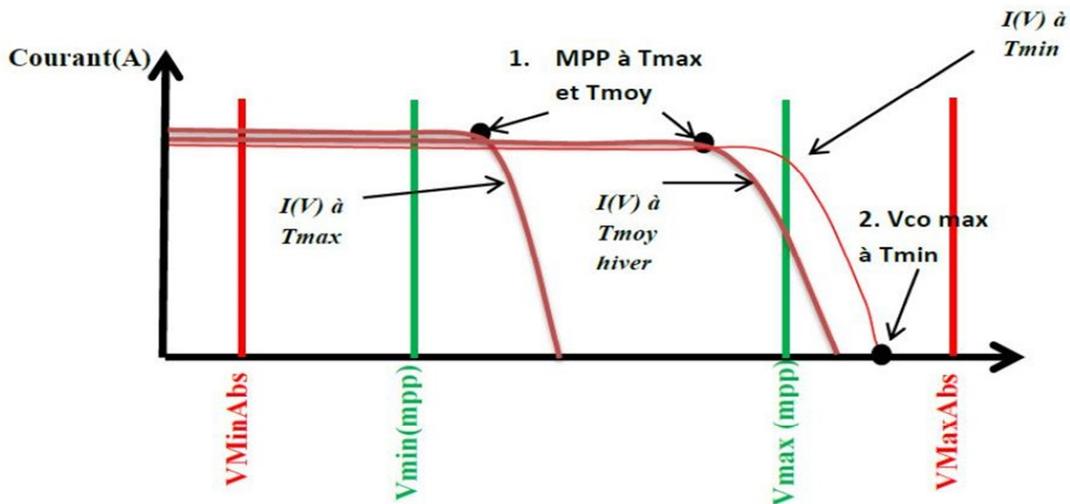


Figure (3.8) . les paramètres à vérifier pour un bon dimensionnement.

Pour faire un branchement GPV-Onduleur sans problèmes il faut que :

1. Les deux points de puissance maximales à Tmax et Tmoy hiver sont à l'intérieure de la plage de fonctionnement optimale de l'onduleur
2. La valeur de Vco à Tmin qui représente la valeur maximale de GPV doit être inférieure à la tension VmaxAbs de l'onduleur.
3. Cette procédure nous permis de faire le bon choix de nombre de modules en série. Avec le logiciel PVSYST nous pouvez faire automatiquement ces vérifications :

Chapitre 03 . Application des systemes PV dans la zone insuatrielle de Réghaia

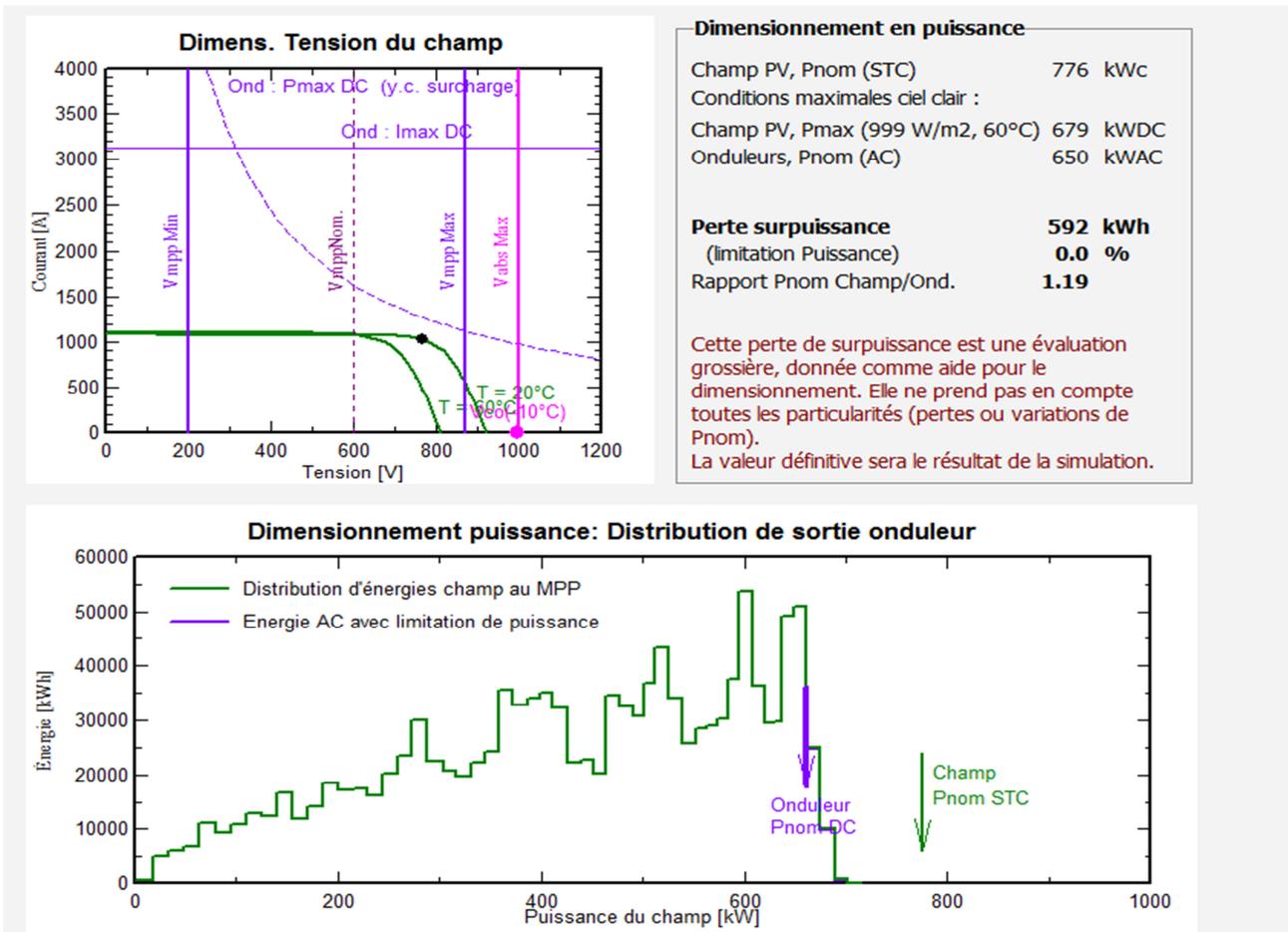


Figure (3.9) . Vérifications de branchement GPV-Onduleur à l'aide de PVSYST

4.3. Facteur de dimensionnement

Le facteur de dimensionnement est la relation entre la puissance nominale de l'onduleur et la puissance crête de générateur photovoltaïque GPV on le note FD.

$$FD = \frac{Pc}{Pnom}$$

Ce paramètre peut être choisi entre 0.8 et 1.2 selon différentes conditions et contraintes.

Dans notre cas nous avons pris un facteur de 1.19 ; le logiciel PVSYST nous assure une perte de surpuissance de 0%.

5. Résultats de simulation

Le diagramme final de simulation nous donne les performances énergétiques de la centrale.

Chapitre 03 . Application des systemes PV dans la zone insuatrielle de Réghaia

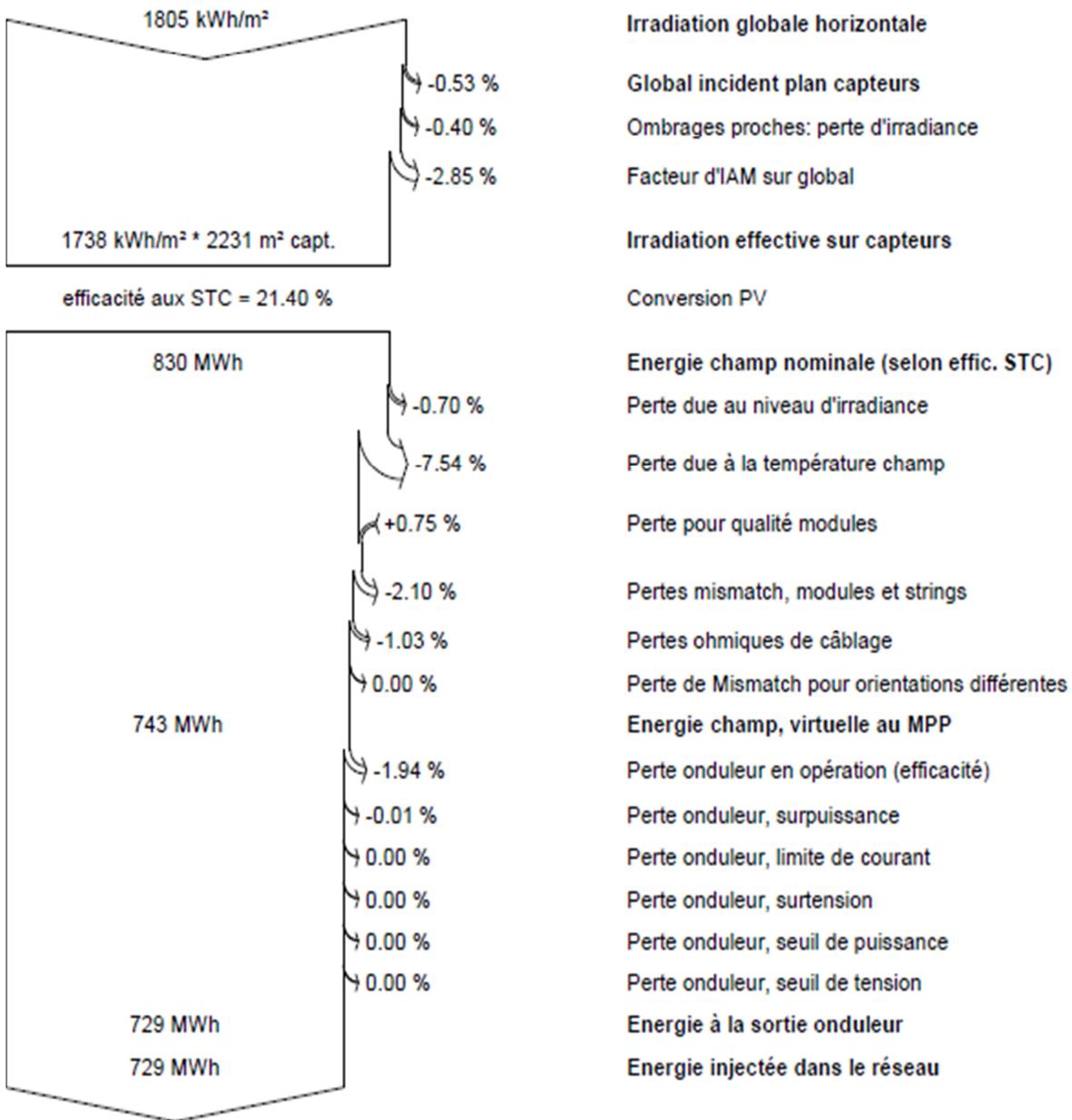


Figure (3.10) - simulation . diagramme des pertes annuelles.

La production annuelle de la centrale est de 729 MWh.

Les détails mensuels sont présentés par le tableau suivant :

Chapitre 03 . Application des systemes PV dans la zone insuatrielle de Réghaia

Bilans et résultats principaux

	GlobHor	DiffHor	T_Amb	GlobInc	GlobEff	EArray	E_Grid	PR
	kWh/m ²	kWh/m ²	°C	kWh/m ²	kWh/m ²	MWh	MWh	ratio
Janvier	66.9	31.22	11.39	66.5	62.1	28.42	27.69	0.872
Février	101.8	35.85	11.06	101.5	96.6	43.57	42.64	0.880
Mars	147.3	52.40	13.30	146.6	141.3	62.28	61.05	0.873
Avril	190.9	61.51	16.88	189.8	184.9	79.50	78.05	0.862
Mai	188.7	70.39	16.32	187.6	182.9	78.53	77.02	0.860
Juin	230.6	73.06	23.04	229.1	224.3	93.41	91.77	0.839
Juillet	237.6	71.36	26.40	236.1	231.2	95.11	93.46	0.829
Août	220.7	61.12	24.91	219.4	214.4	88.89	87.34	0.834
Septembre	153.7	53.83	22.98	153.0	148.4	62.99	61.78	0.846
Octobre	130.7	43.35	21.56	130.1	124.6	53.61	52.56	0.846
Novembre	69.5	35.70	15.43	69.3	65.1	29.24	28.49	0.862
Décembre	67.0	27.46	15.14	66.8	61.8	27.81	27.09	0.850
Année	1805.3	617.26	18.24	1795.8	1737.6	743.36	728.95	0.850

Légendes

GlobHor Irradiation globale horizontale
 DiffHor Irradiation diffuse horizontale
 T_Amb Température ambiante
 GlobInc Global incident plan capteurs
 GlobEff Global "effectif", corr. pour IAM et ombrages

EArray Energie effective sortie champ
 E_Grid Energie injectée dans le réseau
 PR Indice de performance

Résultats principaux

Production du système

Energie produite 728.9 MWh/an

Productible 1527 kWh/kWc/an

Indice de performance (PR) 85.03 %

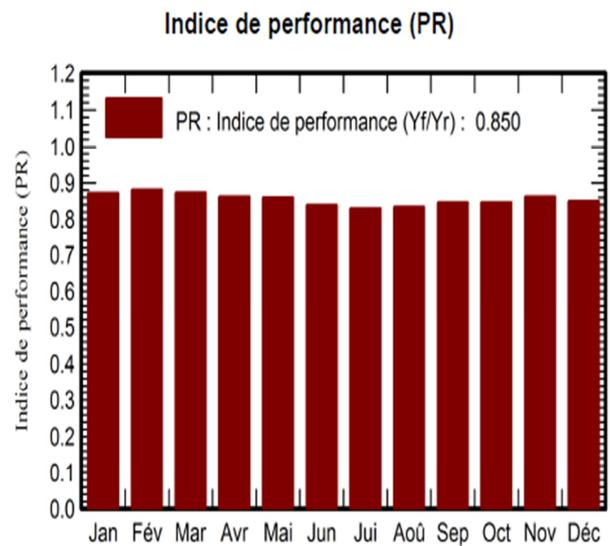
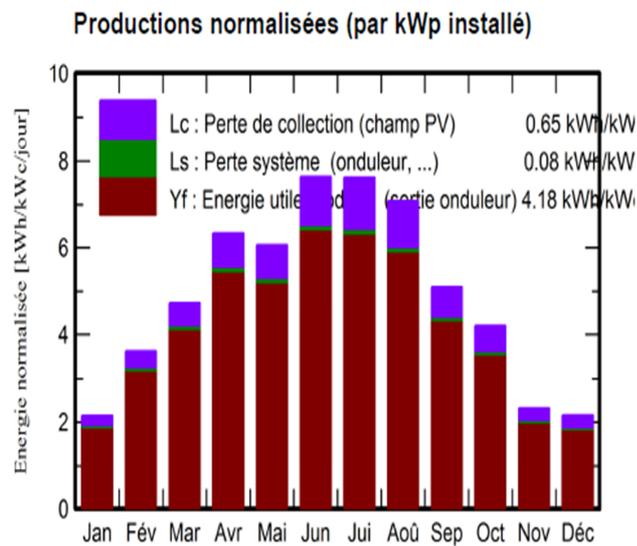


Tableau (3.1) . valeurs de la température et du rayonnement solaire.

Figure (3.11) – simulation . énergie, indice de performance et productible.

6. Discussion économique

Chapitre 03 . Application des systemes PV dans la zone insustrielle de Réghaia

Le coût estimé en Algérie suivant les prix en DA est environ 140 DA /Wc ce qui donne un coût total de cette centrale de : 108640000 DA : Cent huit millions six cent quarante mille dinars algérien ; et un prix de kWh produit de 5.96 DA/kWh.

En comparant avec le tarif appliqué par Sonelgaz pour un client HTA qui est égal à 1.9376 DA / kWh, nous pouvons constater que le photovoltaïque en Algérie reste toujours loin d'être rentable avec l'existence de la subvention d'état de coût de l'électricité.

7. Conclusion

La réalisation d'une centrale photovoltaïque doit répondre aux exigences suivantes :

- Une orientation des champs PV vers le sud avec un angle incident maximale.
- Un choix de modules PV de meilleurs qualité.
- Un dimensionnement optimal.
- Une protection adaptée.
- Etude des pertes détaillées et des performances énergétique de système.

L'utilisation de logiciel PVSYST facilite et accélérer la réalisation des études nécessaires.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons présenté une contribution à l'optimisation des systèmes photovoltaïques (PV) raccordés au réseau électrique. Le développement photovoltaïque futur passe nécessairement par une maximisation de la production électrique avec des systèmes de conversion plus optimisés. Dans ce contexte, nos travaux sont orientés sur une optimisation de l'énergie électrique produite par le système PV en confrontant différentes technologies de modules PV et en optimisant différents paramètres cruciaux à savoir l'orientation et l'inclinaison des modules. Nous avons étudié les performances du système PV pour le site reghaia d'Alger à travers un dimensionnement en utilisant le logiciel PVSYST, en employant les données météorologiques du site.

Les travaux de contribution de ce mémoire ont donné les apports suivants :

- L'étude d'une installation photovoltaïque raccordée au réseau pour le site reghaia d'Alger en employant les données météorologiques locales du site.
- Evaluation de la production électrique des systèmes PV par une comparaison entre les technologies les plus commercialisées sur le marché.
- Discussion de l'effet de quelques paramètres comme l'orientation et l'inclinaison des modules PV sur les performances du système PV en réseau électrique et évaluation de l'apport énergétique résultant.

Comme perspective, il serait intéressant d'établir une méthodologie d'optimisation de la production électrique des systèmes PV en tenant compte de l'impact de la température qui est un paramètre crucial en constant changement.

Référence

- [1] Meddour Youcef « Etude de raccordement d'un système photovoltaïque aux réseaux électrique » Mémoire de magister, Université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 2012
- [2] A. Labouret, P. Cumunel, and J.-Paul B.B. Faraggi, "Cellules solaires Les bases de l'énergie," *Dunod ; Paris ; (2010)*.
- [3] C. Bernard « station solaire autonome pour l'alimentation station pompage » l'archive Ouverte pluridisciplinaire HAL 2006].
- [4] A. Hammidat Hadj arab et M.T BOUKADOUM « performance et cout des systèmes de pompage PV en ALGERIE » (2005).
- [5] Livre de Anne Labouret, Michel Villon ,5^{eme} édition « installations photovoltaïques "Conception et dimensionnement d'installations raccordées au réseau"»
- [6] Alain Ricaud Jan « Le gisement solaire et transferts Energétiques » mémoire de Master énergies renouvelables université de Cergy-pontoise 2011
- [7] Document d'application technique no10 installation photovoltaïque «ABB SACE».
- [8] THÈSE DE DOCTORAT «Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies» de Thomas Mambrini ; en 2014
- [9] Philippe Guibert : «TP Energie Solaire » Université pierre et marie curie : Master Energétique et Environnement.
- [10] N.HOUCINE ; Etude de gestion d'une mini-centrale solaire et mise au point d'un dispositif automatique de mesures, contrôle et régulation de l'énergie électrique. Thèse de Doctorat.Université de la science et de la technologie d'Oran Mohammed Boudiaf, Juin 2016.
- [11] PACER. Centrale photovoltaïque, Guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets, 1996.
- [12] Brahim (MEM), "Situation des énergies renouvelables en Algérie". Conférence sur la maîtrise de l'énergie et de l'environnement dans un contexte d'économie de marche, 2001, Hôtel Sheraton, Alger, Algérie.
- [13] F. Bouctouche cherfa mémoire de magister, école nationale polytechnique El-Harrach « Étude et réalisation d'une centrale photovoltaïque connectée au réseau de distribution électrique BT » 2004.
- [14] Aboub hania « commande d'un onduleur neuf niveaux, destiné aux fortes puissances PV » Université hadj Lakhdar- Batna, 2014.
- [15] MEHDI MERAD-BOUDIA « injection de l'électricité production par les énergies renouvelables dans le réseau électrique » mémoire de magister école doctorale université Abou berkr Belkaid, Tlemcen, 2010.

Référence

[16] Y. Pankow, « étude de l'intégration de la production décentralisé dans un réseau basse tension ». Thèse de l'école nationale supérieure d'art et métiers, décembre 2004.

[17] Document, TERRE SOLAIRE, « Rentabilité des panneaux solaire en 2021 », Ministère de Ressources Naturelles, France 20-09-2021 par FLORIANE.