

République Algérienne Démocratique et Populaire
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE

SCIENTIFIQUE

CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED – NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES

DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Énergies Renouvelables

Option : Énergies Renouvelables en Électrotechnique

Intitulé :

DIMENSIONNEMENT D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE
RACCORDER AU RÉSEAU POUR SUBVENIR AUX BESOINS EN
ÉLECTRICITÉ DE LA BIBLIOTHÈQUE TECHNIQUE DU CENTRE
UNIVERSITAIRE SALHI AHMED NAAMA

Présenté par :

- Bouregaa Soulef
- MorsoOuahiba

Soutenu le : 10/09/2020.....Devant le Jury :

M.TAIBI IBRAHIM

MCB

Centre Universitaire Naâma Président

M.BRAHIMI MOHAMED

MCB

Centre Universitaire Naâma Encadreur

M.BENMOHAMED FAYCEL **MCB**

Centre Universitaire Naâma Examineur

Remerciement

Nous adressons nos plus sincères sentiments de reconnaissance et de remerciement envers ALLAH, le clément et le miséricordieux, lequel nous a accordé la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Nous remercions vivement en premier lieu notre encadreur Monsieur **M.BRAHIMI**, qui par sa compétence, ses encouragements, ses critiques constructives et son soutien moral a su m'informer, me conseiller, et me rendre de plus en plus autonome pour bien réaliser ce travail.

Nos remerciements vont également à mademoiselle **K. AISSEOUI** et tous les employés de la bibliothèque scientifique et aussi Monsieur **Y. YAHYAOU** **directeur** adjoint pour le développement et la prospective

Nos remercies également les membres de **jury** d'avoir accepté de juger ce modeste travail.

Dédicace

Avec toute mon affection, ma profonde reconnaissance, Je dédie ce mémoire :

- ✓ A mes très chers parents, mon ange G.K et mon cher époux Salim, pour leurs sacrifices, leurs patiences, leurs amours, leurs soutiens qu'ALLAH me les garde.
- ✓ A mes chers frères Akram et hatem et mes sœur Djoumana et Ikramet mes petits anges Mouad et Mariam.
- ✓ A mes grand parent que dieu protège.
- ✓ A ma petite famille BENDADA pour l'amour et le respect qu'ils m'ont toujours raccordé.
- ✓ A mon binôme Ouahiba. pour la sœur agréable qu'elle restera pour moi et sa famille.
- ✓ A tous mes enseignants depuis le primaire jusqu'à maintenant spécialement Mr Ibrahim M et Mr khasama M.
- ✓ A tous mes collègues de promotion électrotechnique, énergie renouvelables 2019 _2020, je vous souhaite le courage et le succès dans votre vie.
- ✓ Ainsi qu'à toutes les personnes que je connais de près ou de loin.

B. Soulef

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

- ✚ La première personne qui a partagé ma joie et mon chagrin à mon frère, dont j'étais fier A **Boudjemaa** puisse Dieu le rendre heureux comme il m'a rendu heureuse. Paix à son âme que dieu l'accueille dans son vaste paradis .
- ✚ Mes chers parents symbole de tendresse profonde et permanente, de sacrifice et d'amour éternel, que ALLAH les protège pour moi et leur accordent une bonne santé et une longue vie.
- ✚ Mes chers frères pour leur soutien moral et leurs sacrifices tout au long de mes études
- ✚ Ma sœur **SALIMA**.
- ✚ **Soulef Bourgaa** ma meilleure amie avant d'être binôme et à toute sa famille.
- ✚ Ma cousine **FATIMA**.
- ✚ Mes chères copines : **Ikram, Somia, Houda et Touta**.
- ✚ Mes enseignants depuis mon enfance.

A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aime

W Morso

Résumé

L'énergie photovoltaïque connaît actuellement un fort développement. Après être restée pendant de longues années un moyen de production anecdotique (site isolé) le photovoltaïque devient aujourd'hui une source d'énergie connectée au réseau, en compétition avec les conventionnelles.

Cette énergie est obtenue par la transformation directe de la lumière du soleil en électricité au moyen d'un système photovoltaïque. Pour trouver le dimensionnement de ce système doit connaître les données suivantes : l'emplacement de la région et l'optimum inclinaison des panneaux solaires et la durée d'insolation journalier et la quantité de la consommation d'électricité dans cet habitat connecté au réseau électrique. Afin d'assurer le besoin journalier en énergie électrique de la bibliothèque technique du centre universitaire Salhi Ahmed Naama qui égale 863960 [Wh/j] nous avons choisis le module PV model LG 400W 36V Si-mono Et l'onduleur SMA.

Pour faciliter l'accès aux dimensions du système nous avons utilisé un logiciel de simulation PVSYST qui répond correctement aux choix des composants constituant notre installation, plusieurs résultats sont obtenus avec meilleures perspectives

Après la simulation il donne un résumé global de l'installation qui contient nombre des 270 modules installés 18 modules en série et 15 en parallèle et 05 onduleurs

Mots-clés : Rayonnement solaire, cellules solaires, panneaux solaire, centrales photovoltaïques connectées au réseau, dimensionnement, réseau électrique, Onduleurs

ملخص

تشهد الطاقة الكهروضوئية حاليا تطورا قويا. بعد البقاء لسنوات عديدة، تصبح وسائل الإنتاج القصصية (الموقع المعزول) يتم الحصول على هذه الطاقة عن طريق التحول الضوئية اليوم مصدرا للطاقة المتصلة بالشبكة، في منافسة مع تلك التقليدية المباشرة لأشعة الشمس إلى كهرباء عن طريق نظام كهروضوئي. للعثور على تحجيم هذا النظام يجب أن تعرف البيانات التالية: موقع المنطقة والميل الأمثل للألواح الشمسية ومدة التشمس اليومي وكمية استهلاك الكهرباء في هذا الموطن المتصل بشبكة الكهرباء. من أجل ضمان الحاجة اليومية في الطاقة الكهربائية للمكتبة التقنية لمركز الجامعة صالحى احمد النعمان والتي تساوي 863960 واط ومنه اخترنا نموذج الوحدة الكهروضوئية الأنسب من الشركة لاجي الذي يستجيب بشكل صحيح لخيارات المكونات التي تشكل لتسهيل الوصول إلى أبعاد النظام استخدمنا برنامج محاكاة PVSYST تركيبنا، يتم الحصول على العديد من النتائج مع وجهات نظر أفضل. بعد المحاكاة به يعطينا ملخصا شاملا للتثبيت الذي يحتوي على عدد من الواح الشمسية عددها 270 وحدة 18 لوح على التسلسل و 15 لوح على توازي و 05 من العاكسون الكلمات الرئيسية: الإشعاع الشمسي، الخلايا الشمسية، الألواح الشمسية، محطات الطاقة الكهروضوئية المتصلة بالشبكة التحجيم، شبكة الطاقة، العاكسون.

Abstract

Photovoltaic energy is currently experiencing a strong development. After remaining for many years, an anecdotal means of production (isolated site) photovoltaic today becomes a source of energy connected to the grid, in competition with conventional ones.

This energy is obtained by the direct transformation of sunlight into electricity by means of a photovoltaic system. To find the sizing of this system must know the following data: the location of the region and the optimum inclination of the solar panels and the duration of daily insolation and the amount of electricity consumption in this habitat connected to the power grid. In order to ensure the Daily need in electrical energy of the Technical Library of the University Center Salhi Ahmed Naama which equals 863960 [Wh/d] we chose the PV module model LG 400W 36v Si-mono and the SMA inverter.

To facilitate access to the dimensions of the system we used a PVSYST simulation software that responds correctly to the choices of the components constituting our installation, several results are obtained with better perspectives

After the simulation, it gives an overall summary of the installation, which contains number of the 270 modules installed 18 modules in series and 15 in parallel and 05 inverters

Keywords: solar radiation, solar cells, solar panels, grid-connected photovoltaic power plants, sizing, power grid, inverters

ACRONYMES ET SYMBOLES

I_c : Rayonnement solaire
 I_0 : Constante solaire
 N_j : numéro du jour
 L : La longitude
 Z : L'altitude
 Φ : La latitude
 I_{psc} : Le courant de court-circuit de np cellules en parallèle.
 I_{ssc} : Le courant de court-circuit de n_s cellules en série.
 V_{poc} : La somme des tensions en circuit ouvert de np cellules en parallèle
 V_{soc} : La somme des tensions en circuit ouvert de n_s cellules en sérié.
 np : Nombre des cellules en parallèle.
 n_s : Nombre des cellules en série.
 δ : La déclinaison
 I_r : Irradiation du mois le plus défavorable
 P_{pv} : Puissance crête du champ photovoltaïque
 E_c : Energie consommée
 cp : Coefficient correcteur
 P_{pv} : Puissance crête de l'installation
 P_u : Puissance crête unitaire
 V_{pv} : Tension du générateur PV.
 V_u : Tension nominale unitaire
 $E_{bat}(t)$: Energie stockée dans la batterie à une heure t .
 $E_{bat}(t - t)$: Energie stockée dans la batterie à l'heure précédente.
 σ : Taux horaire d'autodécharge.
 $E_s(t)$: Energie produite par la source(Wh).
 $E_l(t)$: Energie demandée par la charge à une date t (Wh) ond
 η_{ond} : Rendement de l'onduleur
 T_u : Température diurne
 E_{cj} : L'énergie totale moyenne nécessaire chaque jour
 t_j : Temps de fonctionnement.
 N_j : Nombre des équipements.
 ρ : Résistivité du câble ($\rho = 0.017$ ohm mm²/m pour le cuivre)
 I : Intensité du courant électrique L : Longueur du câble électrique
 e : Chute de la tension (3-5%)
 V : Tension du système PV
PV : Photovoltaïque.
GPV : Générateur photovoltaïque.
 KW_c : Kilowatt crête.
TSL : Temps Standard Local.
TSV : Temps Solaire Vrai.
TSM : Temps Solaire moyenne
TU : Temps universel
DC= CC : Courant Continu.
AC=CA : Courant alternatif.
STC : Conditions de tests standard 'Standard Test Conditions'.
MPP : Point de fonctionnement optimal 'Maximum Power Point'.
MPPT : Suiveur/Algorithme du Point de fonctionnement optimal.
 T : la température absolue
ES : Éclairement de la surface du soleil.

E_0 : Éclairement en dehors de l'atmosphère terrestre, appelée constante solaire.
 η_{STC} : Le rendement de la cellule photovoltaïque.
 P_m : La puissance produite par le générateur PV.
 E_{STC} : L'éclairement absorbé par la cellule.
 $S_{cellule}$: La surface de la cellule [m^2].
 E : L'éclairement absorbé par la cellule.
 $E_{réf}$: L'éclairement de référence (1000 w/m^2).
 V_{th} : La tension thermique.
 q : La charge de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$).
 V_{pv} : La tension de sortie d'un panneau photovoltaïque.
 $VOC=VCO$: Tension du circuit ouvert.
 NS : Nombres des cellules en sérier.
 NP : Nombres des cellules en parallèle.
 η : Rendement.
 $V_{mpp} = V_m$: Tension d'un module PV au point de puissance maximale [V].
 $I_{mpp} = I_m$: Courant d'un module PV au point de puissance maximale [A].
 E : Ensoleillement [W/m^2].
 T : Température de la jonction des cellules PV [$^{\circ}\text{K}$].
 $I_{sc} = I_{cc}$: Courant de court-circuit d'une cellule ou d'un module solaire [A].
 VCO : Tension en circuit ouvert d'un module solaire [V].
 FP : Facteur de puissance
 W : L'angle horaire
 a : L'azimut solaire
 h : Hauteur
 FF : facture de forme
 T_a : température ambiant
 I_r : irradiation journalière

SOMMAIRE

Introduction générale.	1
Chapitre 1 : Conversion photovoltaïque	
I.1 Introduction.	3
I.2 historique d'énergie photovoltaïque.	3
I.3 Rayonnement solaire.	5
I.3.1 Le soleil.	5
I.3.2. La constante solaire.	5
I.3.3. Aspects géométriques du rayonnement solaire.	5
I.3.4. Mouvements de la terre.	6
I.3.5 La sphère céleste	6
I.4. Les coordonnées célestes.	7
I.4.1. Les coordonnées géographiques.	7
I.4.2. Les coordonnées horaires.	8
I.4.3. Les coordonnées horizontales.	9
I.5. Les temps solaires.	10
I.5.1. Le Temps Solaire Vrai (T.S.V).	10
I.5.2. Le Temps Solaire Moyen (T.S.M).	10
I.5.3. Le Temps Universel (T.U).	11
I.5.4. Le Temps Légal (T.L).	11
I.5.5. le Temps Civil.	11
I.6. Le gisement solaire	11
I.7. Extraction de puissance maximale.	13
I.8. Physique des semi-conducteurs.	14
I.8.1. Les semi-conducteurs.	14
I.8.2. Les semi-conducteurs purs ou intrinsèques.	14
I.8.3 Les semi-conducteurs dopés ou extrinsèques.	16
I.8.3.1 Dopage des semi-conducteurs.	16
I.8.4 Différents types de dopage.	16
I.8.4.1 Semi-conducteur dopé N.	16
I.8.4.2 Semi-conducteur dopé P.	18
I.8.5 La jonction PN.	19
I.9 Fonctionnement de la cellule photovoltaïque.	19
I.9.1 Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.	19
I.10 Module PV.	22
I.10.1 Association en série.	22
I.10.2 Association en parallèle.	23
I.10.3 Association hybride (en série et en parallèle).	23
I.11 La conversion photovoltaïque.	24
I.11.1 Rendement et facteur de forme.	24
I.12 Notion de puissance crête et de température d'utilisation.	25
I.12.1 Puissance STC.	25
I.12.2 Puissance NOCT.	25
I.13. Configurations des systèmes photovoltaïque.	25

I.13.1 Les systèmes autonomes.	25
I.13.1.1 Système autonomes avec batterie.	26
I.13.1.2 Système autonome sans batterie (alimentation direct).	27
I.13.1.3 le pompage solaire « au fil du soleil ».	27
I.14 Différentes technologies de cellules solaires.	28
I.14.1 Technologies de la première génération à base de silicium cristallin.	29
I.14.2 Technologie de la deuxième génération à base de couche-mince.	29
I.14.3 Technologie de la troisième génération « Les cellules organiques ».	29
I.14.3.1 Cellule multi-jonction.	29
I.15 Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque.	31
I.16 Conclusion.	32
Chapitre II : Dimensionnement et Stratégie de fonctionnement system raccorde au réseau	
II.1 Introduction	33
II.2 Objectif général	33
II.3 Réseau électrique	33
II.4. Générateurs photovoltaïques Dans Les Constructions	34
II.4.1. Toit solaire	34
II.4.2. Fonctionnement	34
II.4.3 Rôle du toit solaire	35
II.4.4 Système PV intégrées aux bâtiments	35
II.4.4.1 avantage de système PVIB	36
II.4.4.2 Application principale les systèmes PVIB	36
II.4.5. Quantité d'électricité produite	37
II.5 Les systèmes PV connectés au réseau sans batterie de stockage	38
II.6 Convertisseurs DC/AC couplés au réseau	39
II.7 Matériel	40
II.8 Dimensionnement d'installation PV	40
II.8.1 Paramètres d'entrée intervenants dans le dimensionnement	41
II.8.1.1 Paramètres relatifs au système PV	41
II.8.1.2 Paramètres relatifs au site d'installation	41
II.8.1.3 Paramètres concernant le module PV	42
II.8.1.4 Paramètres concernant l'onduleur	42
II.8.1.5 Paramètres concernant la charge	42
II.9 Méthode de dimensionnement	42
II.9.1 Méthode de la probabilité d'erreur dans la consommation	42
II.9.2 Méthode du mois le plus défavorable	42
II.9.3 Méthode de la moyenne annuelle	43
II.9.4 Méthode LPSP	44
II.9.5 Méthode des heures équivalentes	44
II.9.6 Méthode utilisabilité solaire	45
II.9.7 Méthode simplifiée	45
II.10 Constitutions de système	47
II.10.1 Générateur photovoltaïque	47
II.10.2 Onduleurs	48
II.10.3 Les Conducteurs	48

II.11 Choix de composant	48
II.11.1 Choix de générateur photovoltaïque	48
II.12 Etude technique et bilan de puissance et énergétique	48
II.12.1 Fiche technique d'un Panneau solaire	49
II.12.2 Fiche technique d'onduleur.	50
II.13 Bilan de puissance et énergétique	50
II.14 Dimensionnements d'un système PV par la méthode simplifiée	54
II.14.1 Energie total de consommée	54
II.14.2 Puissance crête de l'installation de un champ photovoltaïque	54
II.14.3 Calcul du nombre des panneaux photovoltaïque	54
II.15 Avantages et inconvénients de système connecte au réseau	55
II.10 Conclusion	55
Chapitre III: Application des données et résultats de simulation	
III.1 Introduction	56
III.2 Présentation de logiciel de simulation PVSYST	56
III.3 Caractéristiques de la zone de Naama	57
III.3.1 Trajectoire du soleil	57
III.3.2 Collecte de données	58
III.3.2.1 présentation du site	58
III.3.2.2 Les coordonnées géographiques de Naama Algérie	59
III.3.2.3 Données météorologiques	59
III.4 Profils de charge de la bibliothèque technique	61
III.4.1 Structure de la bibliothèque technique de CUN SALHI AHMED NAAMA	61
III.5 Influence de la température et de l'éclairement	62
III.6 Orientation des modules PV	64
III.7 Schéma de l'installation PV raccorde au réseau	65
III.8 Résultats de simulation	65
III.8.1 Besoins électriques	65
III.8.2 Simulation des équipements énergétiques	67
III.8.2.1 Modules et onduleurs	67
III.8.2.2 Branchement de PPV	68
III.9 Rapport de simulation	69
III.10 Résulta de discussion	73
III.11 Conclusion	73
Conclusion générale	74

Liste de figures

Chapitre I

Figure I.01. Structure en Bandes d'énergie pour les isolants, les semi-conducteurs et conducteurs	06
Figure I.02. (a) Atome de Silicium (b) Cristal de Silicium	07
Figure I.03. Silicium dopé au phosphore (a) à $T = 0$ °K et, (b) à $T \neq 0$ °K	08
Figure I.04. La représentation simplifiée d'un semi-conducteur type N	09
Figure I.05. Silicium dopé au Bore (a) à $T = 0$ K et, à (b) $T \neq 0$ K	10
Figure I.06. La représentation simplifiée d'un semi-conducteur type P	12
Figure I.07. Niveau d'énergie (a) pour un dopage de type N, et (b) pour un dopage de type P	15
Figure I.08. Jonction P-N	15
Figure I.09. Principe du fonctionnement de la cellule photovoltaïque	17
Figure I.10. Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque	17
Figure I.11. Module photovoltaïque	18
Figure I.12. Caractéristique d'un groupement en série de n_s cellules identiques	18
Figure I.13. Caractéristique d'un groupement en parallèle de n_p cellules identiques	19
Figure I.14. Schématisation du mouvement de la terre autour du soleil	19
Figure I.15. La sphère céleste	20
Figure I.16. Les coordonnées géographiques	21
Figure I.17. Les coordonnées horaires	22
Figure I.18. Coordonnées horizontales	22
Figure I.19. Ensoleillement global annuel dans le monde KWh/m ² /an	23
Figure I.20. Systèmes photovoltaïques autonomes avec stockage par batterie	26
Figure I.21. Systèmes photovoltaïques autonomes sans stockage par batterie	27
Figure I.22. Système de pompage «au fil soleil»	28

Chapitre II

Figure II.01. Types de positions possibles pour un toit solaire	37
Figure II.02. Système PV connecté au réseau sans batterie de stockage	39
Figure II.03. Configuration des différentes variétés en onduleurs	40
Figure II.04. De la cellule au champ GPV	47

Chapitre III

Figure.III.1. Interface de logiciel PVSYST	56
Figure.III.2. Etapes de simulation avec PVSYST.	57
Figure III.3. Trajectoire de Naama	58
Figure.III.4. Localisation de la wilaya de Naama	59
Figure.III.5. Evolution de la caractéristique I(V) (a) et P(V) (b) en fonction de l'irradiation.	61
Figure.III.6. Structure de bibliothèque CUN RDC	62
Figure.III.7. Structure de bibliothèque CUN 1 ^{er} niveau	63

Figure.III.8.Evolution de la caractéristique I(V) (a) et P(V) (b) pour différentes températures.	63
Figure III.9.Orientation et inclinaison du système PV.	64
Figure.III.10.Schéma de l'installation PV raccorde au réseau.	65
Figure.III.11. Définition d'un module PV.	65
Figure.III.12. Définition d'un Onduleur pour le réseau.	66
Figure.III.13. Conductions de dimensionnement Champ/ Onduleur.	67
Figure.III.14.Ensemble du système.	68
Figure.III.15. Paramètres de la simulation	69
Figure.III.16. résultats principaux de la simulation.	70
Figure.III.17. Graphiques spéciaux de la simulation	71
Figure.III.18. Diagramme des pertes de la simulation.	72

Liste de tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques	12
Tableau I.2 : Performances des différentes technologies des cellules photovoltaïques	30

Chapitre II

Tableau II.01.Fiche technique de panneau solaire	49
Tableau II.02.Fiche technique de l'onduleur	50
Tableau II.03.Estimation de l'énergie journalière consommée par jour.	50

Chapitre III

Tableau III.1.Les coordonnées géographiques de la wilaya de Naama	56
Tableau III.2.Valeurs de l'irradiation globale journalière moyenne	60

Introduction générale

Introduction général

Introduction général

L'exploitation d'énergies non renouvelable limitées et épuisables dans le temps poussent les pays développés et émergents à se retenir vers des énergies propres et l'énergie récupérable tels que le solaire, la géothermie, la biomasse et l'énergie éolienne.

Les systèmes photovoltaïques produisent L'énergie électrique qui remplace l'énergie fossile, elle est considérée comme solution efficace pour le problème de l'énergie.

Vu sa position géographique, l'Algérie dispose d'un potentiel en termes des ressources énergétiques renouvelables considérable.

L'optimisation des systèmes photovoltaïques est basée sur des critères de dimensionnement par des méthodes analytiques et de logiciel. Pour cela on peut poser la question suivante : quelles sont les différentes méthodes de dimensionnement d'un système photovoltaïque ?

L'objectif de ce travail est de savoir les différentes méthodes analytiques avec la simulation par logiciel PVSYST

Ce mémoire est traité dans trois chapitres :

Le premier chapitre commence par une définition de l'énergie solaire et une explication de principe de l'effet photovoltaïque ainsi que les différentes technologies des cellules photovoltaïques et par suite nous présentons le potentiel solaire en Algérie.

Dans le deuxième chapitre nous allons procéder au dimensionnement du système Photovoltaïque intégré au réseau par une méthode simplifiée.

C'est l'ensemble des opérations nécessaires, une fois connue la consommation de l'installation, pour déterminer les dimensions optimales du générateur photovoltaïque, du système d'accumulation et capable de garantir cette consommation, quand les panneaux est alimenté (conditions optimal).

Le raccordement de cette installation PV avec le réseau électrique triphasé (230 V / 400V) il est comme une solution (panneaux PV ne fonctionne pas).

Et dans autre part comme nous le savons déjà l'électricité est très difficile à stocker, donc il est nécessaire à tout instant d'équilibrer le réseau en assurant est égale à la consommation.

Dans le quel on a fait un bilan de puissance et énergétique de les besoins électrique de la

Bibliothèque technique du centre universitaire Salhi Ahmed Naama.

Introduction général

Dans le troisième chapitre nous allons procéder une étude sur le système photovoltaïque on se basant essentiellement sur le système PV raccordée au réseau, avec la modélisation et la simulation par logiciel PVSYST et présentation des résultats.

On a obtient un rapport de simulation par le PVSYST.

Enfin, nous terminons ce mémoire par une conclusion qui résume notre étude.

Chapitre I

Conversion photovoltaïque

1.1 Introduction

Le soleil, une énergie renouvelable énorme et inépuisable, rayonne sur la terre avec une puissance de 16×10^{15} KWh/m² par an dans toutes les longueurs d'ondes du spectre de la lumière visible. Cette énergie renouvelable est une préoccupation mondiale et d'actualité surtout si elle est exploitée dans la conversion de l'énergie solaire en électricité, qui est l'un des enjeux de la politique énergétique de notre siècle. [1]

L'énergie Photovoltaïque connaît actuellement un fort développement dans le monde, vue son caractère écologique, elle apparaît comme une source importante telle que la quantité d'énergie solaire qui arrive à la surface de la terre dans un jour est dix fois plus grande que celle consommée. [2, 3]

Dans le premier chapitre, nous allons voir quelques notions de base sur l'énergie ainsi que le gisement solaires en Algérie et une description générale des systèmes photovoltaïques.

Dans ce chapitre on va s'intéresser au rayonnement solaire, et son application dans le domaine photovoltaïque. Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs processus de fabrication, ainsi que leurs caractéristiques principales ainsi que les paramètres limitant.

I.2 Historique d'énergie photovoltaïque

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites. Elles se sont poursuivies avec les balises en mer et l'équipement de sites isolés dans tous les pays du monde, en utilisant les batteries pour stocker l'énergie électrique pendant les heures sans soleil.

1839 : le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.

1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

1954 : trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

1958 : une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

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

1983 : la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie.

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux Etats-Unis en **1954** par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs.

Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé. [4]

Entre 1990 et 1995 : Markus Real, met en avant l'idée qu'il serait beaucoup plus économique que chaque particulier ait ses propres panneaux solaires. Il arrive à prouver son idée en faisant installer des panneaux solaires sur 333 toits à Zurich. Son opération est un succès et depuis plusieurs gouvernements financent des plans énergétiques pour inciter leurs citoyens à installer des panneaux solaires sur leur toit. On peut penser notamment au 1000-Dächer-Programm (**de**) en Allemagne. [5]

En 2009 : la production énergétique mondiale due au photovoltaïque est de 10,66 GW. Les cellules solaires majoritairement produites sont celles à base de silicium mono et poly cristallin avec un coût de production de 1,5 \$ par watt mais des progrès sont également faits dans le domaine des cellules solaires à couche mince qui coûtent 0,76 \$ par watt et atteignent un rendement d'environ 20 %. [6]

En 2013 : on parvient à avoir des rendements de presque 9 % avec des cellules organiques à base de polymère. Mais la difficulté de production de ces matériaux entraîne la recherche dans le solaire vers la possibilité de construire des cellules solaires à partir de molécules organiques simples. C'est ce que parviennent à faire les chercheurs de l'Institut Moltech-Anjou en réalisant une cellule solaire à base d'une molécule dont la synthèse présente d'excellents rendements en masse et dont la conversion en électricité atteint les 4 %. [7]

En France : l'appel d'offres pour installations solaires sur bâtiments lancé en 2016 se conclut en 2018 par un prix moyen de l'électricité produite à 76,8 €/MWh voire 72,2 €/MWh pour les grandes installations. [8] Ce prix moyen peut baisser à 52,2 €/MWh avec des installations au sol. [9]

I.3 Rayonnement solaire

Le rayonnement arrivant au sol dépend de la réflectance de la surface terrestre et des effets de l'atmosphère qui interviennent dans le double trajet (soleil-terre et terre-satellite) que fait le rayonnement à travers l'atmosphère. Pour connaître l'énergie reçue à un site donné, il est nécessaire de repérer ce site sur la surface terrestre, de connaître la position et la trajectoire du soleil dans la voûte céleste et les mouvements de la terre autour du soleil.

I.3.1 Le soleil

Le soleil est une sphère gazeuse composée presque totalement d'hydrogène. Son diamètre est de 1391000 km (100 fois celui de la terre), sa masse est de l'ordre de 2.1027 tonnes [10]. Toute l'énergie du soleil provient des réactions thermo – nucléaires qui s'y produisent. Elles transforment à chaque seconde 564,106 tonnes d'hydrogène en 560,106 tonnes d'hélium, la différence (4 millions de tonnes) est dissipée sous forme d'énergie ($E = mc^2$), ce qui représente une énergie totale de 36.1022 KW. La terre étant à une distance de 150.106 km du soleil, elle reçoit approximativement une énergie de 1,8.1014 KW [10].

I.3.2. La constante solaire

La valeur du rayonnement solaire " I_c ", reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (soit à environ 80 Km d'altitude) varie au cours de l'année avec la distance Terre/Soleil. Sa valeur moyenne " I_0 " appelée constante solaire est de l'ordre de 1354 W.m⁻². En première approximation, on peut calculer la valeur de " I_c " en fonction du numéro du jour de l'année " n_j " par la relation suivante [11] :

$$I_c = I_0 [1 + 0.033 \times \cos (0.984 \times n_j)] \quad (\text{I.1})$$

I.3.3.Aspects géométriques du rayonnement solaire

Dans le but ultérieur de calculer le flux reçu par un plan incliné placé à la surface de la terre et orienté dans une direction fixée, notre intérêt va porter dans ce qui suit sur les aspects géométriques du rayonnement solaire intercepté par la terre. La connaissance de ce flux est la base du dimensionnement de tout système solaire [12].

I.3.4. Mouvements de la terre

La trajectoire de la terre autour du soleil est une ellipse dont le soleil est l'un des foyers. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique. [12,13] L'excentricité de cette ellipse est faible ce qui fait que la distance Terre/ Soleil ne varie que de $\pm 1,7\%$ par rapport à la distance moyenne qui est de $149\,675\,106\text{ km}$ [13]. La terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles et passant par le centre de la terre appelé l'équateur. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique en fait l'équateur et l'écliptique font entre eux un angle appelé inclinaison de l'ordre de $23^{\circ}27'$. [12]

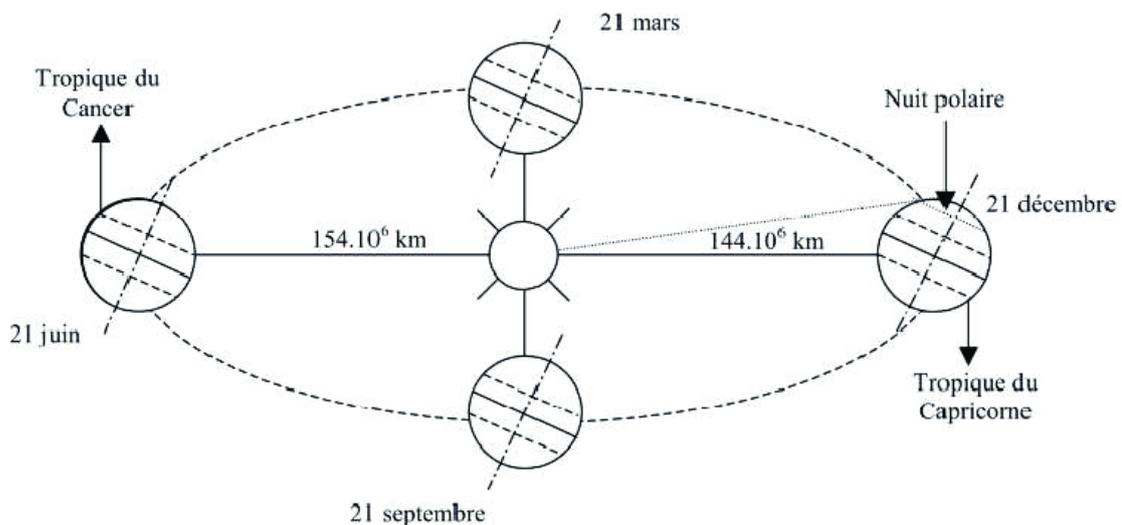


Figure I.01. Schématisation du mouvement de la terre autour du soleil.

I.3.5. La sphère céleste

La sphère céleste est une sphère imaginaire d'un diamètre immense, qui admet pour centre la terre, et pour rayon la distance (terre – soleil). On considère que tous les objets visibles dans le ciel se trouvent sur la surface de la sphère céleste. On peut résumer les différentes Caractéristiques sur la sphère elle-même comme c'est indiqué sur la figure (**figure I.3**). [14]

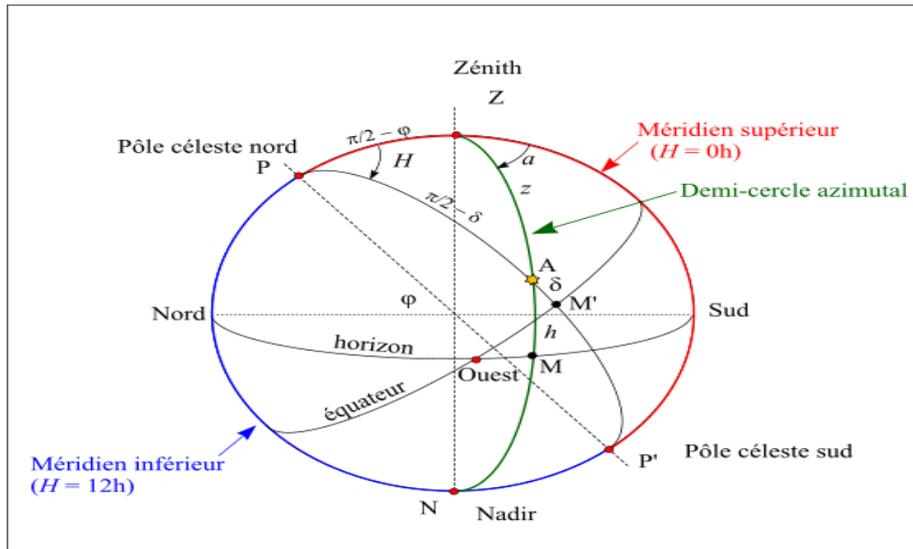


Figure I.02. La sphère céleste.

La direction des objets peut être quantifiée de façon précise à l'aide d'un système de coordonnées célestes.

I.4. Les coordonnées célestes

I.4.1. Les coordonnées géographiques [15]

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre (figure I.4)

La longitude (L)

C'est l'éloignement par rapport au méridien de Greenwich, mesuré en degré. Elle est comptée positivement vers l'est et négativement vers l'ouest, à partir du méridien Greenwich.

La latitude (Φ)

C'est l'éloignement d'un point sur la surface de la terre par rapport à l'équateur, mesuré en degré (mesurée à partir du centre de la terre), permettent de repérer la distance angulaire d'un point quelconque à l'équateur. Elle varie de 0° à 90° dans l'hémisphère nord et de 0° à -90° dans l'hémisphère sud.

L'altitude (Z)

C'est l'altitude d'un point correspondant à la distance verticale entre ce point et une surface de référence théorique (le niveau de la mer = 0), elle est exprimée en mètre.

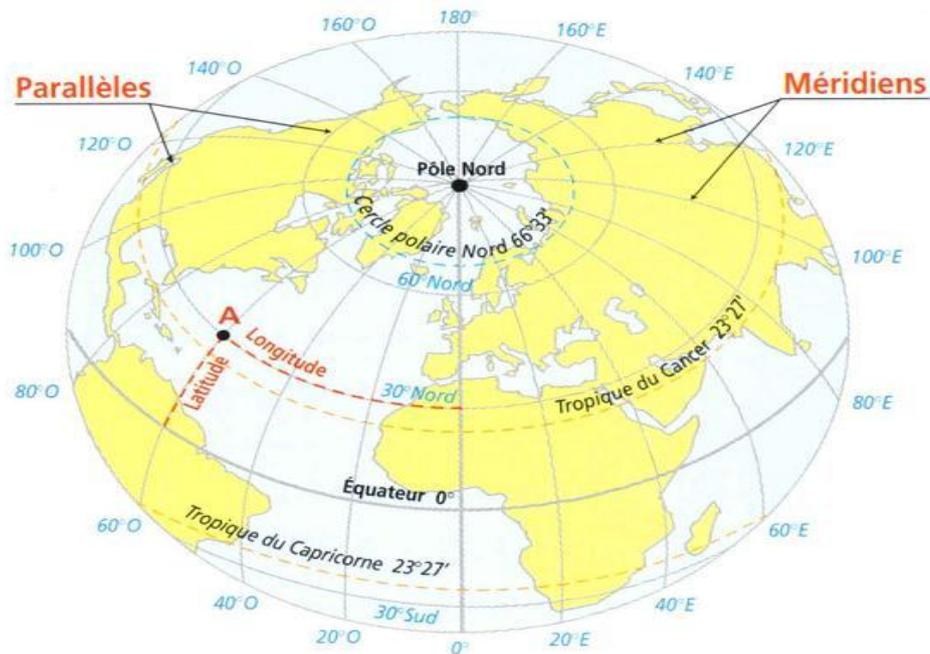


Figure.I.03. Les coordonnées géographiques.

I.4.2. Les coordonnées horaires

La déclinaison (δ)

C'est l'angle fait par le plan de l'équateur avec celui de l'écliptique. Elle varie au cours de l'année de $+23^{\circ}27'$ à $-23^{\circ}27'$ et détermine l'inégalité des durées des jours. Elle s'obtient à partir de la formule suivante [13] :

$$\delta = 23.45 \sin [(284 + nj \div 365) \times 360][\text{Degré}] \quad (\text{I.2})$$

Où : nj : Le numéro du jour dans l'année compté à partir du 1er Janvier.

L'angle horaire (ω)

Il est déterminé par la rotation régulière de la terre autour de son axe. Il est compté Positivement dans le sens rétrograde de 0° à 360° (figure I.05).

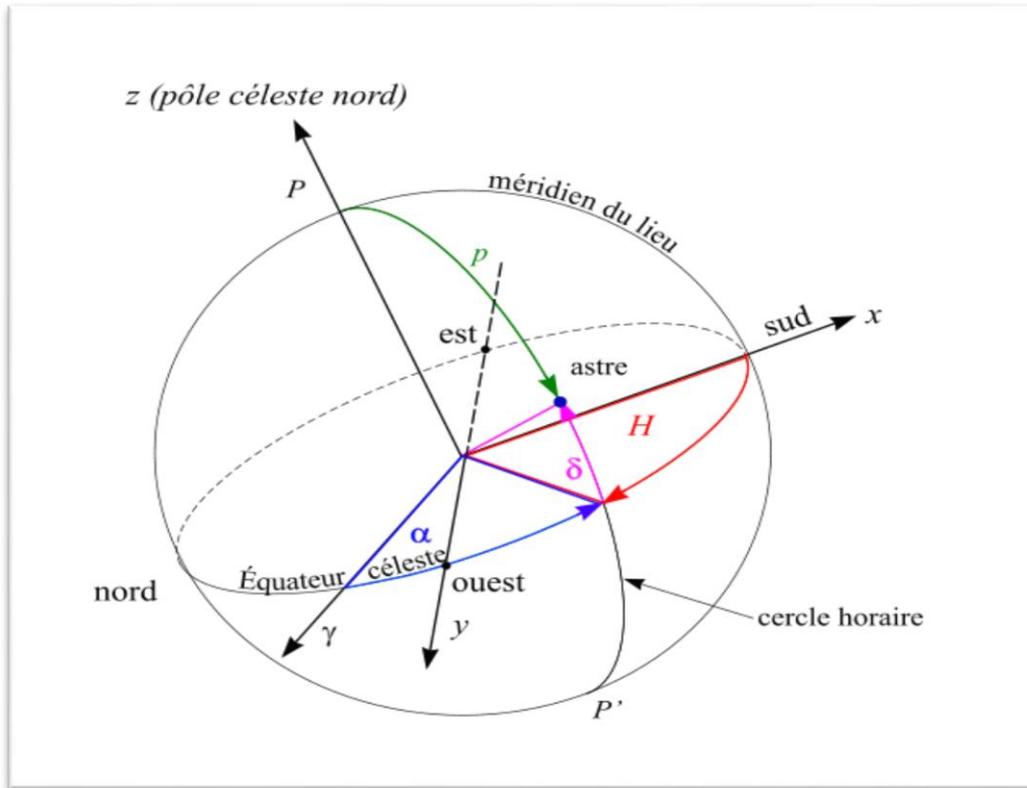


Figure I.04. Les coordonnées horaires.

I.4.3. Les coordonnées horizontales

Le repérage du soleil se fait par l'intermédiaire de deux angles :

L'azimut solaire(a)

Est l'angle mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre entre le point cardinal Sud (dans l'hémisphère nord) ou Nord (dans l'hémisphère sud) et la projection sur le plan horizontal local de la droite reliant la terre au soleil. Il est compté de 0° à 360° d'ouest en est, ou de 0° à 180° à partir du sud vers l'ouest. [14]

Note : l'azimut solaire est négatif le matin (direction Est), nul ou égal à 180° à midi et positif l'après-midi (direction Ouest), sur tout le globe. Il diffère de l'azimut géographique, lequel est toujours mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre à partir du Nord, indépendamment de l'hémisphère du point d'observation.

La hauteur (h)

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection. Il est compté de 0° à 90° vers le zénith et de 0° à -90° vers le nadir, On appelle quelquefois distance zénithale le complément de l'angle h : $z + h = 90^\circ$ (figure I.5).

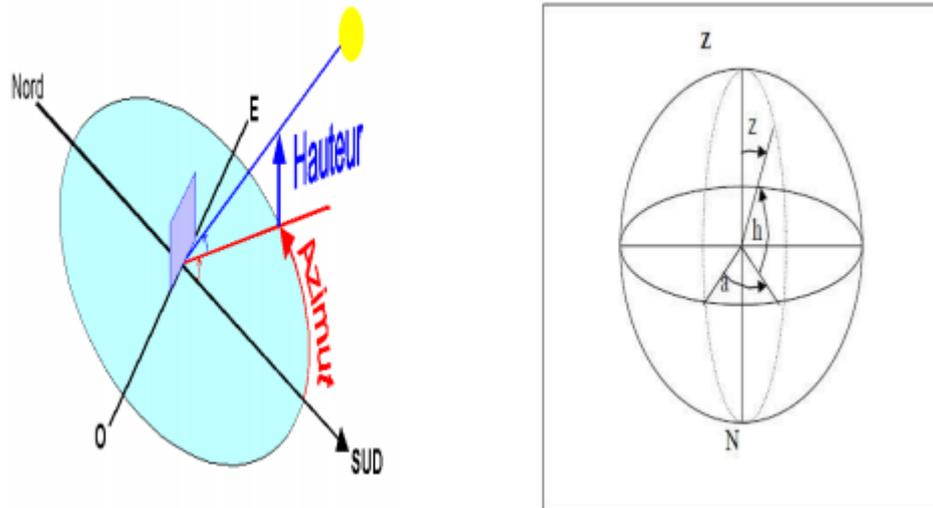


Figure I.05 Coordonnées horizontales.

I.5. Les temps solaires

I.5.1. Le Temps Solaire Vrai (T.S.V)

Le temps solaire vrai, en un instant et un lieu donné, est l'angle horaire du soleil w . Il est donné sous la forme suivante [16] :

$$TSV = (12 + w) \div 15 \quad (\text{I.3})$$

w : En degré.

Si $w = 0$, $TSV = 12h.00$

Si $w < 0$, la matinée.

Si $w > 0$, l'après – midi.

I.5.2. Le Temps Solaire Moyen (T.S.M)

Il est appelé parfois temps locale (TSM), Il est donné par la relation [15] :

$$Et = TSV - TSM \quad (\text{I.4})$$

Avec : Et : l'équation du temps, qui corrige le T.S.V par rapport au T.S.M.

$$Et = 9.87 \sin (2N) - 7.53 \cos (N) - 1.5 \sin (N) [min] \quad (\text{I.5})$$

$$\text{Ou : } N = (nj - 81) \times (360 \div 365) \quad (\text{I.6})$$

Où nj ; est le numéro du jour dans l'année.

I.5.3. Le Temps Universel (T.U)

C'est le temps civil moyen du méridien de Greenwich (méridien origine) appelé encore GMT (Greenwich mean Time) [14] :

$$TU = TSM - \left(\frac{L}{15}\right) \quad (\text{I.7})$$

Où : L : est la longitude.

$L > 0$; pour les villes situées à l'Est de Greenwich.

$L < 0$; pour les villes situées à l'Ouest de Greenwich.

$TU = TSM$; pour le méridien de Greenwich.

I.5.4. Le Temps Légal (T.L)

C'est le temps officiel d'un état, il est donné par [16] :

$$TL = TU + \Delta H \quad (\text{I.8})$$

Où : ΔH : le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré.

$\Delta H = 1$ heure pour l'Algérie.

I.5.5. le Temps Civil

Représente le temps qui a pour origine minuit [14].

I.6. Le gisement solaire

La connaissance du gisement solaire d'un site donné est primordiale pour la confection et dimensionnement d'un système énergétique solaire, en effet le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire dans un lieu au cours d'une période donnée grâce aux stations météorologiques, son évolution peut se faire à partir des données de l'irradiation solaire globale. Elle est utilisée pour simuler le fonctionnement probable d'un système énergétique solaire et donc d'effectuer son dimensionnement le plus exact possible compte tenu des demandes en énergie à satisfaire. [17]

Les pays du sud de la méditerranée notamment l'Algérie disposent d'un des gisements solaires les plus élevés au monde comme le montre la figure ci-dessous :

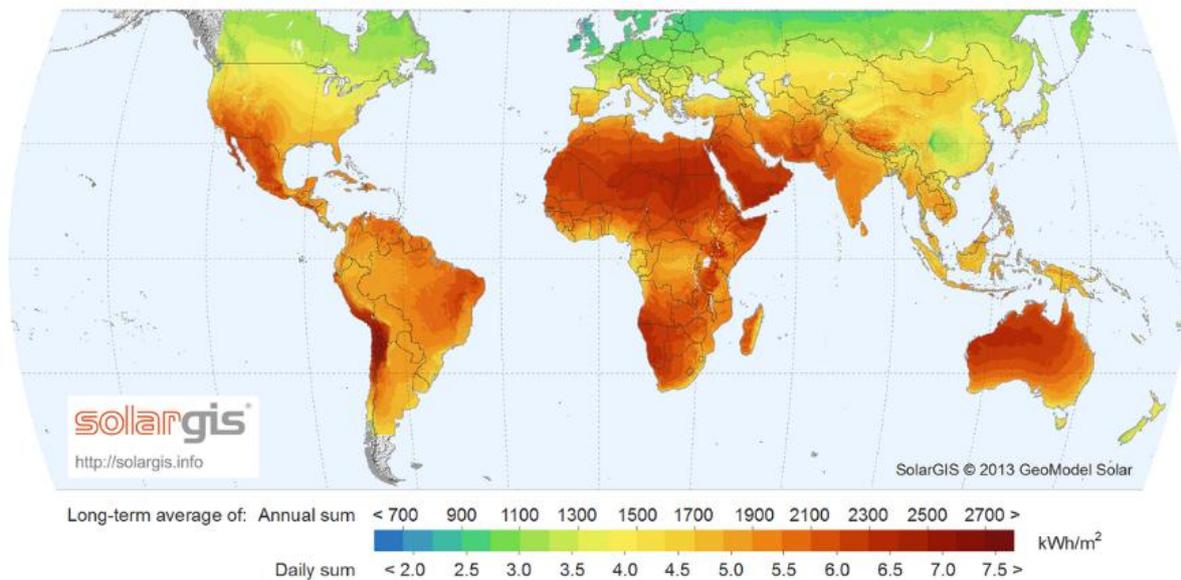


Figure I.06. Ensoleillement global annuel dans le monde KWh/m² /an.

L’Algérie est un pays potentiellement intéressant pour l’exploitation de l’énergie solaire, de par sa situation géographique il dispose d’un gisement solaire très important compte tenu des valeurs de la durée d’insolation enregistrée sur la quasi-totalité du territoire national dépassant les 2000 heures annuellement et pouvant atteindre les 3900 heures sur les hauts plateaux du Sahara. Par conséquent, la quantité d’énergie reçue au sol quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l’ordre de 5 KW/h sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 KWh/m² au nord et 2263 KWh/m² au sud du pays [18]

La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau I.5 selon l’ensoleillement reçu annuellement [18] :

Régions	Région côtières	Haute plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

Tableau I.1. Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques.

I.7. La conversion photovoltaïque

La conversion photovoltaïque aujourd'hui largement utilisée peut être simplement définie comme la transformation de l'énergie des photons en énergie électrique grâce au processus d'absorption de la lumière par la matière. Lorsqu'un photon est absorbé par le matériau, il passe une partie de son énergie par collision à un électron l'arrachant littéralement de la matière. Ce dernier étant précédemment à un niveau d'énergie inférieur où il était dans un état stable passe alors vers un niveau d'énergie supérieur, créant un déséquilibre électrique au sein de la matière se traduisant par une paire électron-trou, de même énergie électrique. Généralement, la paire électron-trou revient rapidement à l'équilibre en transformant son énergie électrique en énergie thermique. [19]

L'énergie produite par l'absorption d'un photon dans un matériau se traduit du point de vue électrique par la création d'une paire électron-trou. Cette réaction entraîne une différence de répartition des charges créant ainsi une différence de potentiel électrique, c'est l'effet photovoltaïque. Le fait d'avoir associé deux types de matériaux pour créer une jonction permet de pouvoir récupérer les charges avant que ces dernières ne se soient recombinées dans le matériau qui redevient alors neutre. La présence de la jonction PN permet ainsi de maintenir une circulation de courant jusqu'à ses bornes. Le nombre de photons par unité de longueur d'onde est une donnée à connaître pour les applications photovoltaïques pour estimer l'énergie totale disponible. La longueur d'onde correspondant au maximum de photons est de l'ordre de 650-670nm.

La plupart des cellules photovoltaïques utilisent des semi-conducteurs pour récolter les paires électron-trou créées par la collision des photons dans le matériau. Cependant, selon le matériau utilisé, le nombre de photons utiles (qui peuvent être absorbés) diffère. En effet, chaque matériau possède son propre gap énergétique (bande d'énergie interdite).

Tout photon possédant une énergie inférieure à ce gap et arrivant à la surface du matériau n'aura pas assez d'énergie pour arracher un électron au matériau même s'il entre en collision avec un. Le courant produit par un capteur PV est donc beaucoup plus faible que la quantité de photons arrivant sur le matériau car plusieurs conditions doivent être réunies pour que réellement l'énergie d'un photon se traduise en courant (compatibilité du matériau avec les longueurs d'ondes du spectre solaire, énergie des photons à leur arrivée sur le matériau, probabilité de rencontre d'un photon avec un électron, incidence du rayonnement, épaisseur du matériau,...). De plus, un autre compromis doit être fait par le concepteur de capteurs PV. Si le gap du matériau est grand, peu de photons auront assez d'énergie pour créer du courant mais aux bornes de la cellule, la tension en circuit ouvert sera grande et facilitera d'autant plus

l'exploitation de l'énergie électrique. A l'inverse, un matériau avec un faible gap absorbe plus de photons mais présente une tension plus faible à ses bornes. Ce compromis a été quantifié par Shockley et Quessier [20].

Ainsi par exemple, avec un seul matériau, le rendement de conversion maximal théorique est de 31% pour un gap énergétique d'environ 1.4eV. Par comparaison, le gap du silicium qui est aujourd'hui le matériau le plus utilisé pour constituer des cellules dans les capteurs PV terrestres, n'est pas très loin de cet optimum avec 1.12eV. Ainsi, le maximum théorique pour une simple jonction Si est d'environ 29%. La différence de potentiel présente aux bornes d'une jonction PN soumise à un éclairage est également mesurable entre les bornes de la cellule PV. Typiquement, la tension maximale d'une cellule (PN) est d'environ 0.5 à 0.8V. Elle peut être directement mesurée à ses bornes sans charge (circuit ouvert). Cette tension est nommée tension de circuit ouvert (V_{oc}). Lorsque les bornes d'une cellule sont court-circuitées, on peut mesurer le courant maximal produit par la cellule PV et on le nomme communément courant de court-circuit (I_{cc}). [21]

I.8. Physique des semi-conducteurs

I.8.1 Les semi-conducteurs

Cette classe de matériaux se situe entre les métaux (conducteurs) et les isolants (non conducteurs). La résistivité des semi-conducteurs varie de 10^{-3} à 10^{+4} .cm.

Les électrons libres et les trous mobiles sont les porteurs de charges responsables de la conductivité électrique. Un semi-conducteur peut être soit intrinsèque (pur) ou extrinsèque (dopé) par des impuretés. [22]

Semi-conducteur intrinsèque : la résistivité du silicium pur est de l'ordre de 10^3 . cm.

Semi-conducteur extrinsèque : la résistivité du silicium dopé par le Bore ou le Phosphore est de l'ordre de 10^{-2} .cm.

Le dopage du silicium permet d'atteindre le taux d'un atome de Bore (B) ou de phosphore (P) pour 10^5 atomes de silicium [22]. Pour un isolant la zone interdite (énergie de gap) est large par contre pour un conducteur les deux bandes se chevauchent, et on trouve pour les semi-conducteurs l'énergie de gap se situe entre les isolants et les semi-conducteurs.

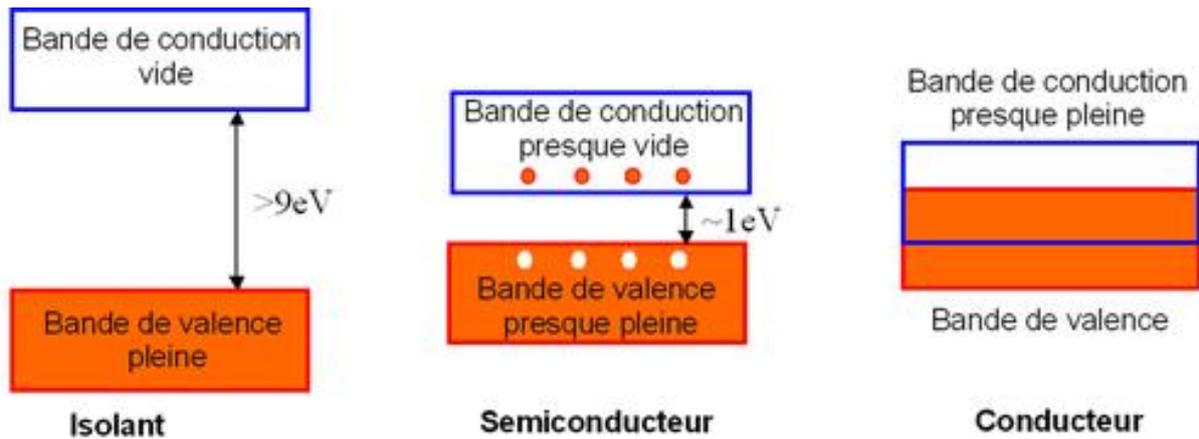


Figure I.07. Structure en Bandes d'énergie pour les isolants, les semi-conducteurs et les conducteurs.

I.8.2 Les semi-conducteurs purs ou intrinsèques

Un semi-conducteur dit intrinsèque est un matériau idéal ne possédant ni défaut physique ni défaut chimique. [23] Le monocristal du silicium possède une structure de type tétraédrique c'est à dire que chaque atome est entouré symétriquement de 4 atomes. [24]

Lorsque le corps est parfaitement pur, il est qualifié d'intrinsèque.

Exemples : Silicium (Si), Germanium (Ge), Sélénium (Se)

Le Silicium est un atome tétravalent : Il possède 4 électrons de valence qui vont se Mettre

En commun avec d'autres atomes de Silicium pour avoir la forme cristalline (FigureI.08).

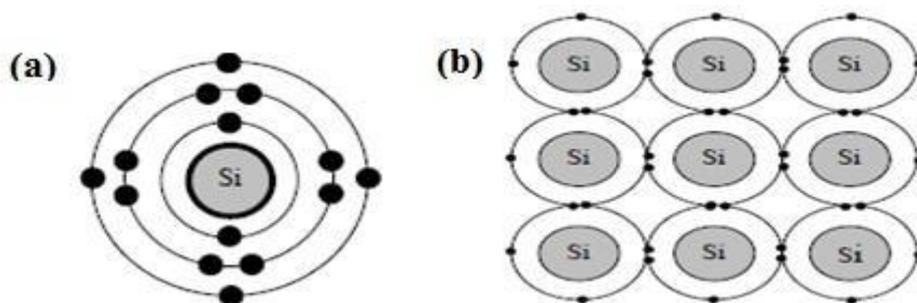


Figure I.08. (a) Atome de Silicium (b) Cristal de Silicium.

On qualifie le silicium d'intrinsèque lorsqu'il ne présente pas d'impuretés dopantes. Un tel silicium est en pratique impossible à obtenir. Dans un silicium intrinsèque, il existe autant de trous que d'électrons libres susceptibles de participer à la conduction, mais leur densité n_i est très faible à température ambiante si bien que la résistivité (ρ) théorique du matériau est de $3.2 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$. [24]

I.8.3 Les semi-conducteurs dopés ou extrinsèques

I.8.3.1 Dopage des semi-conducteurs

Le dopage est l'introduction dans un semi-conducteur intrinsèque de très faible quantité d'un corps étranger appelé dopeur. Pour les semi-conducteurs usuels (Si, Ge), les dopeurs utilisés sont :

- soit des éléments pentavalents : ayant 5 électrons périphériques.

Exemples : l'Arsenic (As), l'Antimoine (Sb), le Phosphore (P),...

- soit des éléments trivalents : ayant 3 électrons périphériques.

Exemples : le Bore (B), le Gallium (Ga), l'Indium (In),...

Après le dopage, le semi-conducteur n'est plus intrinsèque mais extrinsèque

I.8.4 Différents types de dopage

Les semi-conducteurs intrinsèques n'ont pas une grande utilité en tant que tels ; ils servent de base aux semi-conducteurs dopés : on y rajoute des impuretés pour modifier leur comportement. Il existe deux types de semi-conducteurs extrinsèques : [23]

I.8.4.1 Semi-conducteur dopé N

Un semi-conducteur de type N est un semi-conducteur intrinsèque, dans lequel on introduit des impuretés qui possèdent 5 électrons sur leur couche externe (Phosphore ou Arsenic...). Les impuretés sont appelées des donneurs parce qu'elles donnent un électron à la bande de conduction.

La Figure I.09 présente schématiquement des liaisons électroniques pour le silicium dopé avec du phosphore.

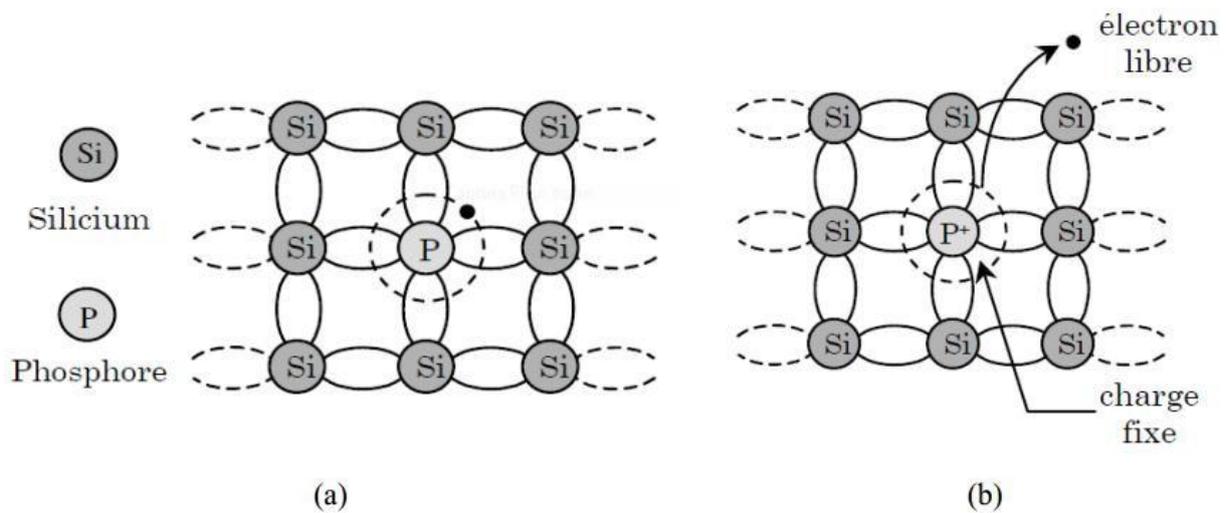


Figure I.09. Silicium dopé au phosphore (a) à $T = 0 \text{ }^\circ\text{K}$ et, (b) à $T \neq 0 \text{ }^\circ\text{K}$.

Quatre électrons d'atome de silicium voisins sont mis en commun avec quatre électrons de l'atome donneur. Le cinquième électron est faiblement lié à l'impureté. Une très faible énergie due à une température supérieure au zéro Kelvin est suffisante pour le libérer et le déplacer dans la bande de conduction pour qu'il se trouve libre. [25, 26] L'atome de phosphore a perdu sa neutralité et est devenu un ion positif (charge fixe). Ainsi, il y a apparition d'un niveau d'énergie dans la bande interdite E_D , situé au-dessous de la bande de conduction

(**Figure I.13a**)). À température ambiante, la quasi-totalité des atomes donneurs est ionisée. Si N_D correspond à la concentration des atomes donneurs, on obtient $n = N_D$ électrons libres. Dans un semi-conducteur de type N, les électrons sont majoritaires, les trous sont minoritaires, et la conduction est assurée par les électrons.

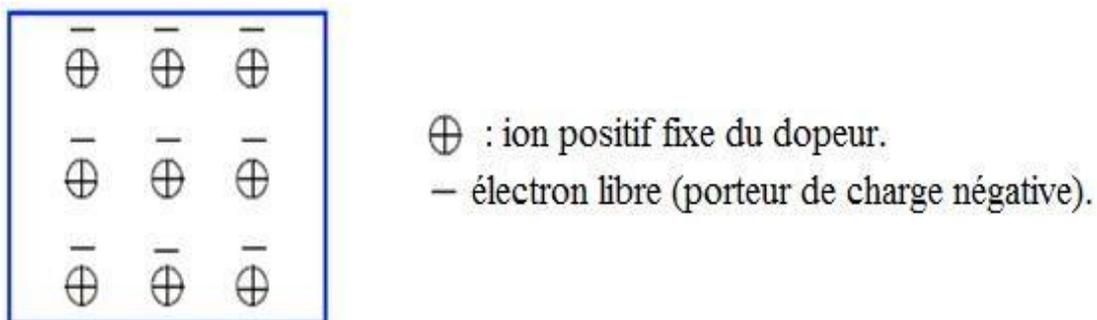


Figure I.10. La représentation simplifiée d'un semi-conducteur type N.

I.8.4.2 Semi-conducteur dopé P

Un semi-conducteur de type P est un semi-conducteur intrinsèque, dans lequel on introduit des impuretés, qui possèdent trois électrons sur leur couche externe (Bore, Indium,...).

Ces impuretés sont appelées des accepteurs parce qu'elles acceptent un électron de la bande de conduction afin de réaliser une liaison avec le cristal semi-conducteur. (La Figure I.12) présente schématiquement des liaisons électroniques pour le semi-conducteur silicium dopé P par du Bore. L'atome dopant a perdu sa neutralité et est devenu alors un ion fixe négatif par capture d'un électron. Ce phénomène correspond à l'apparition d'un niveau d'énergie E_A dans la bande de gap, au-dessus de la bande de valence. La quasi-totalité des atomes accepteurs est ionisée à la température ambiante (Figure I.13(b)). Si N_A correspond à la concentration des atomes accepteurs, donc on obtient $p = N_A$ trous libres. Dans un semi-conducteur de type P, les trous sont les majoritaires, les électrons sont les minoritaires, et la conduction est assurée par les trous. [23]

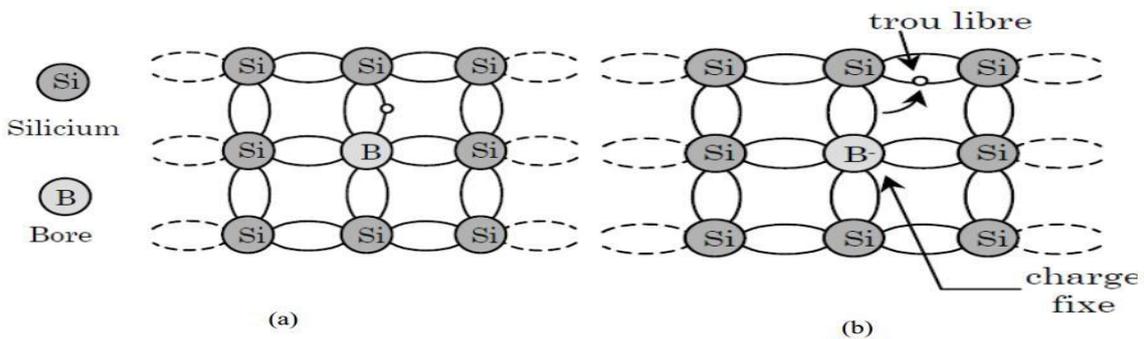


Figure I.11. Silicium dopé au Bore (a) à $T = 0$ K et, à (b) $T \neq 0$ K

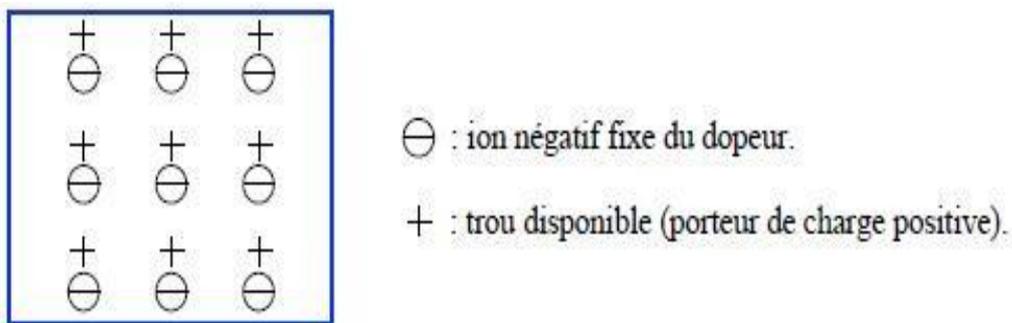


Figure I.12. La représentation simplifiée d'un semi-conducteur type P.

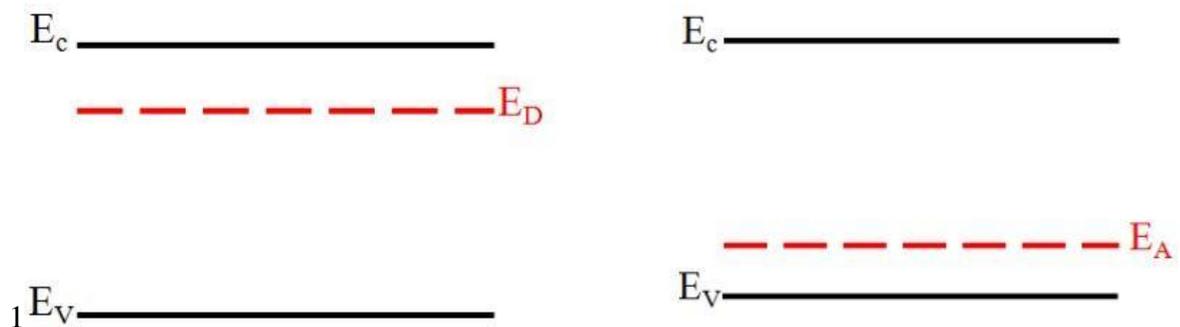


Figure I.13. Niveau d'énergie (a) pour un dopage de type N, et (b) pour un dopage de type P.

I.8.5 La jonction PN

Une jonction P-N est créée en juxtaposant un semi-conducteur de typé N (les électrons sont majoritaires) et un Semi-conducteur de typé P (les trous sont majoritaires).

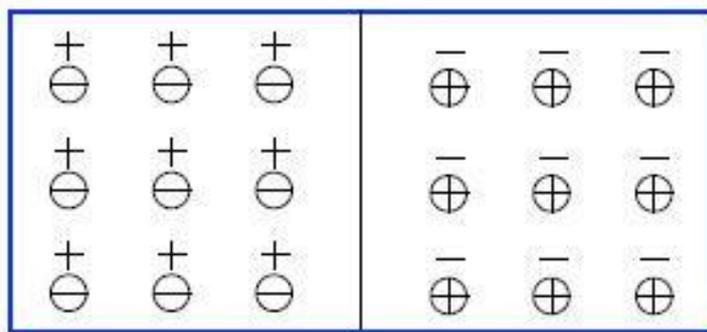


Figure I.14. Jonction P-N

I.9 Fonctionnement de la cellule photovoltaïque

La cellule PV est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique.

Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés du rayonnement et celles des semi-conducteurs. [27]

Une jonction PN est créée par la mise en contact d'un semi-conducteur dopé N (Donneurs d'électron) et d'un semi-conducteur dopé P (composée de trous). L'interface entre ces deux régions s'appelle une jonction.

Pour réaliser des cellules photovoltaïques, il existe trois configurations de jonctions :

- Une jonction PN (homo-jonction, les deux régions sont constituées d'un même matériau semi-conducteur, du silicium dans la majorité des cas)
- Une hétérojonction (jonction entre deux semi-conducteurs différents)
- Une jonction métal-semi-conducteur.

Dans ces trois configurations, les phénomènes physiques intervenant dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques sont similaires. [28]

Lorsque la surface libre de la cellule est éclairée les photons d'énergies supérieures à la largeur de la bande interdite E_g peuvent exciter des paires électron-trou dans les régions quasi neutres P et N.

Les électrons et les trous créés respectivement dans les régions P et N diffusent et atteignent la zone de charge d'espace, accélérée par le champ électrique interne, ils traversent la zone de transition.

La région N reçoit des électrons et se charge négativement ; la région P accepte des trous et se charge positivement. Si on relie les côtés de la jonction à une charge, un courant I la parcourt et une différence de potentiel apparaît. [4]

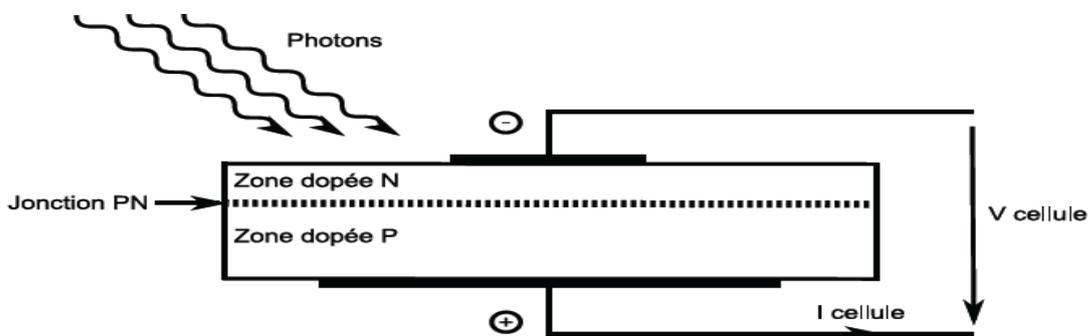


Figure I.15. Principe du fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

I.9.1 Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque

La courbe caractéristique d'une cellule PV représente la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension aux bornes de la cellule PV depuis le court-circuit (tension nulle correspondant au maximum de courant produit) jusqu'au circuit ouvert (courant nul pour une tension maximale aux bornes de la cellule).

Cette courbe est établie dans des conditions ambiantes de fonctionnement données (répartition du rayonnement donnée, rayonnement donné, cellule PV a une température donnée, air ambiant Circulant à une vitesse donnée).

En effet, le fonctionnement des cellules photovoltaïques dépend des conditions d'ensoleillement et de température à la surface de la cellule. Ainsi, chaque courbe courant-tension correspond à des conditions spécifiques de fonctionnement. [29]

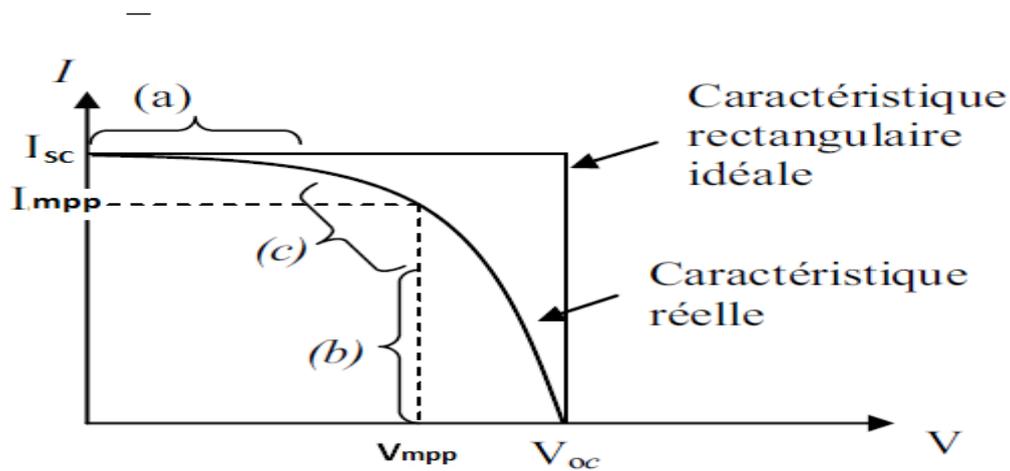


Figure I.16. Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.

V_{oc} : Tension à circuit ouvert.

I_{sc} : Courant à court-circuit.

V_{mpp} : La tension au point maximum de puissance.

I_{mpp} : Le courant au point maximum de puissance.

La caractéristique se divise en trois parties :

La zone (a) où la cellule se comporte comme un générateur de courant I_{sc} proportionnel à l'éclairement.

La zone (b) où la cellule se comporte comme un générateur de tension V_{oc} .

La zone (c) où l'impédance interne du générateur varie rapidement.

I.10 Module PV

Un générateur photovoltaïque ou module est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou en parallèle afin d'obtenir des performances électriques désirées tels que la puissance, le courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert. [30]

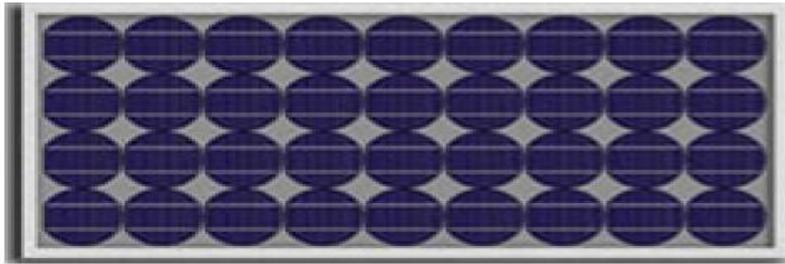


Figure I.17. Module photovoltaïque.

Architecture classique d'un module photovoltaïque

I.10.1 Association en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. [27] La caractéristique d'un groupement de n_s cellules PV identiques est présentée sur la Figure suivante.

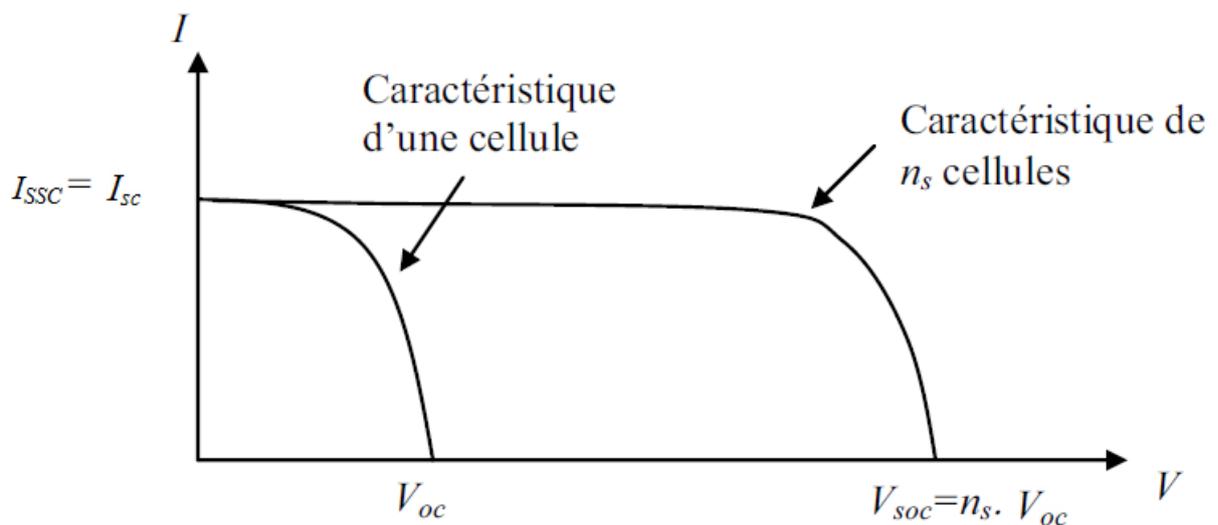


Figure I.18. Caractéristique d'un groupement en série de n_s cellules identiques.

Avec $V_{soc} = n_s \times V_{oc}$; $I_{ssc} = I_{sc}$ (I.9)

V_{soc} : La somme des tensions en circuit ouvert de n_s cellules en série.

I_{ssc} : Le courant de court-circuit de n_s cellules en série.

I.10.2 Association en parallèle

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante de groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée. [4]

Avec :

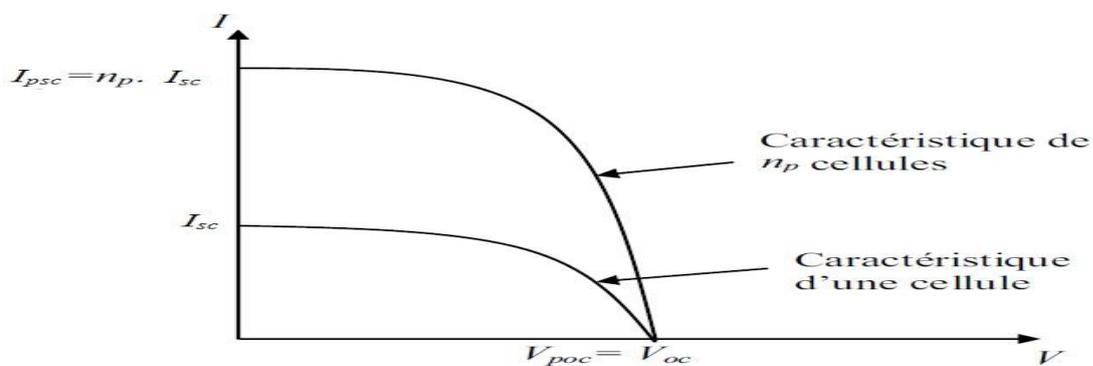


Figure I.19. Caractéristique d'un groupement en parallèle de n_p cellules identiques.

Avec : $V_{poc} = V_{oc}$; $I_{psc} = n_p \times I_{sc}$ (I.10).

V_{poc} : La somme des tensions en circuit ouvert de n_p cellules en parallèle.

I_{psc} : Le courant de court-circuit de n_p cellules en parallèle.

I.10.3 Association hybride (en série et en parallèle)

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit total et de la tension à vide totale sont données par les relations [3] :

$$I_{tsc} = n_p \times I_{sc} = n_s \times V_{oc} \quad (I.11).$$

Avec :

n_p : Nombre des cellules en parallèle.

n_s : Nombre des cellules en série.

I.11 Extraction de puissance maximale

Pour une cellule PV, nous pouvons définir le courant de court-circuit I_{sc} et la tension à vide V_{oc} . Le courant I_{sc} correspond à la valeur du courant débité lorsque la cellule est court-circuitée alors que V_{oc} est la tension à ses bornes en l'absence de charge.

Si nous traçons la courbe de puissance P (avec $I \times V \in [0, I_{sc}] \times [0, V_{oc}]$), nous obtenons un point de fonctionnement P_{mpp} pour la puissance est maximale. [27]

Dans les applications photovoltaïques, la livraison de la totalité de la puissance disponible au niveau du générateur PV est une volonté très forte. La présence de convertisseurs (DC/DC ou/et DC/AC) permet la mise en place d'algorithmes de recherche de point de puissance maximal (en anglais : Maximal Power Point Tracker, MPPT). [28]

I.11.1 Rendement et facteur de forme

I.11.1.1 Rendement

Nous pouvons définir le rendement d'une cellule photovoltaïque comme le quotient de la puissance maximale et de la puissance lumineuse reçue par la cellule. Cette puissance lumineuse correspond au produit de l'aire de la cellule par l'ensoleillement.

$$\eta = P_{mpp} \div (A_c \times E) \quad (\text{I.12})$$

Ce rendement varie généralement entre 8 à 13% pour le silicium monocristallin, entre 7 à 11% pour le poly-cristallin et entre 4 et 9% pour la cellule au silicium amorphe. [4-31]

I.11.1.2 Facteur de forme

C'est un facteur de performance des cellules solaires ; plus il s'approche de l'unité, plus les cellules sont meilleures. Il compare la puissance maximale délivrée (P_{MPP}) au produit de court-circuit (I_{sc}) et de la tension à circuit- ouvert (V_{oc}). [32]

$$FF = P_{mpp} \times V_{oc} \times I_{sc} = V_{mp} \times I_{mpp} \div (V_{oc} \times I_{sc}) = \eta \times A_c \times G \div (V_{oc} \times I_{sc}) \quad (\text{I.13})$$

I.12 Notion de puissance crête et de température d'utilisation

I.12.1 Puissance STC

La puissance crête (STC) d'un module photovoltaïque s'exprime en Watt-crête : c'est la puissance qu'il peut fournir s'il est fermé sur sa charge optimale et soumis à l'ensoleillement de 1 000 W/m² alors que la température des cellules est de 25°C.

I.12.2 Puissance NOCT

La température d'utilisation de cellule (TUC en français et NOCT en anglais), est la température qu'atteint une cellule encapsulée dans un module soumis à l'ensoleillement de 800W/m², à une température ambiante de 20 °C, une inclinaison de 45 ° et avec un vent de 1 m/s dans les conditions de circuit ouvert.

En première approximation, la température d'une cellule photovoltaïque est directement proportionnelle à l'ensoleillement et peut être obtenue par la formule empirique suivante :

$$T_c = T_a + Noct - 20 G \quad (\text{I.14})$$

La puissance NOCT (TUC) d'un module photovoltaïque s'exprime en Watt : c'est la puissance qu'il peut fournir s'il est fermé sur sa charge optimale et soumis à l'ensoleillement de 800 W / m², alors que la température ambiante est de 20°C, son inclinaison de 45 °, ses deux faces libres, un vent de face de 1 m/s dans les conditions de circuit ouvert. [33]

I.13. Configurations les systèmes photovoltaïque [30]

On rencontre généralement trois types de systèmes photovoltaïques, les systèmes autonomes, les systèmes hybrides et les systèmes connectés à un réseau. Les deux premiers sont indépendants du système de distribution d'électricité, en les retrouvant souvent dans les régions éloignées

I.13.1 Les systèmes autonomes

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie.

Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau.

Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes ont les possibilités de Couplage direct à une charge adaptée ou couplage avec adaptateur d'impédance MPPT

(Maximum Power Point Trac-King), fonctionnement au fil du soleil ou avec stockage d'énergie électrique.

Le couplage direct implique un fonctionnement au fil du soleil, donc à puissance essentiellement variable au cours de la journée. Les charges typiques à courant continu qui peuvent satisfaire le critère (tension constante à puissance variable) sont les accumulateurs électrochimiques. Les charges alternatives sont les pompes à eau, c'est le pompage au fil du soleil, le stockage est néanmoins présent sous la forme d'eau emmagasinée (dans un réservoir). Dans la plus part des cas une adaptation d'impédance doit être réalisée en insérant entre le générateur et sa charge électrique un dispositif électronique qui permet de forcer le système à fonctionner à sa puissance maximale. [31]

I.13.1.1 Système autonomes avec batterie

C'est la configuration la plus courante des systèmes photovoltaïques autonomes que les anglophones appellent « stand-Alone systems ». L'ensemble est le plus souvent en courant continu (DC),

Ce qui est préférable car plus simple (quoique nécessitant des câblages plus importants). Mais dès qu'on touche à l'habitat, il y a souvent des appareils en courant alternatif (AC) à alimenter. Tous simplement parce qu'ils n'existent pas en continu. [31]

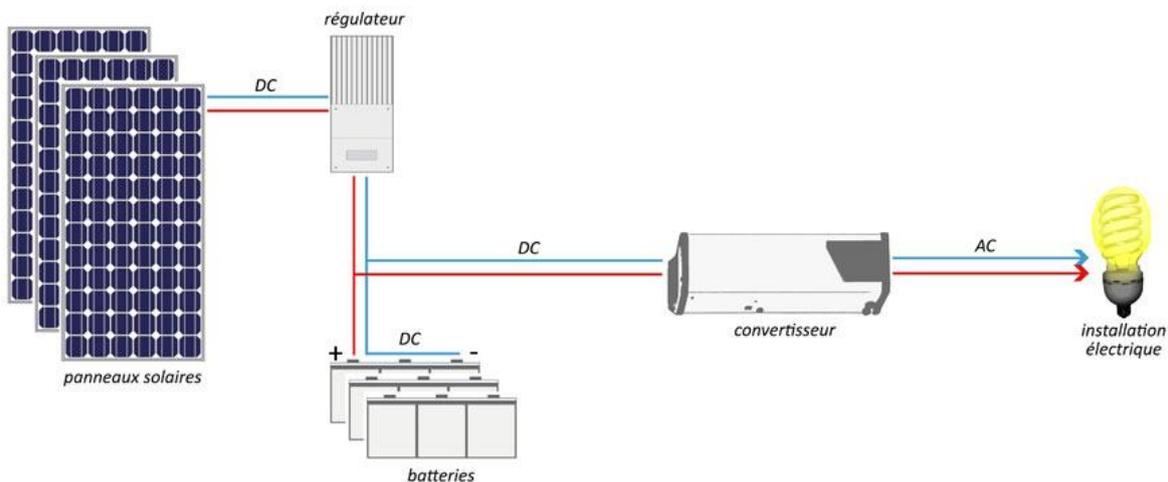


Figure I.20. Systèmes photovoltaïques autonomes avec stockage par batterie.

I.13.1.2 Système autonome sans batterie (alimentation direct)

Dans ce cas, les fonctions se réduisent à produire et fournir. L'appareil alimenté ne fonctionnera qu'en présence de lumière, et dès que l'éclairement est suffisant pour atteindre la puissance demandée.

C'est intéressant pour toutes les applications que n'ont pas besoin de fonctionner dans l'obscurité, et pour lesquelles le besoin en énergie coïncide avec la présence de lumière. S'il y a de la lumière, ça fonctionne, sinon, ça s'arrête.

Mais il faut calculer le panneau ou la cellule solaire de sorte qu'il ait assez de puissance pour alimenter l'appareil à l'éclairement le plus faible rencontré, et c'est souvent contraignant puisque par le fait, on ne profite pas toujours des éclaircissements plus élevés : pas de stockage, donc pas de récupération de surplus d'énergie solaire. [31]

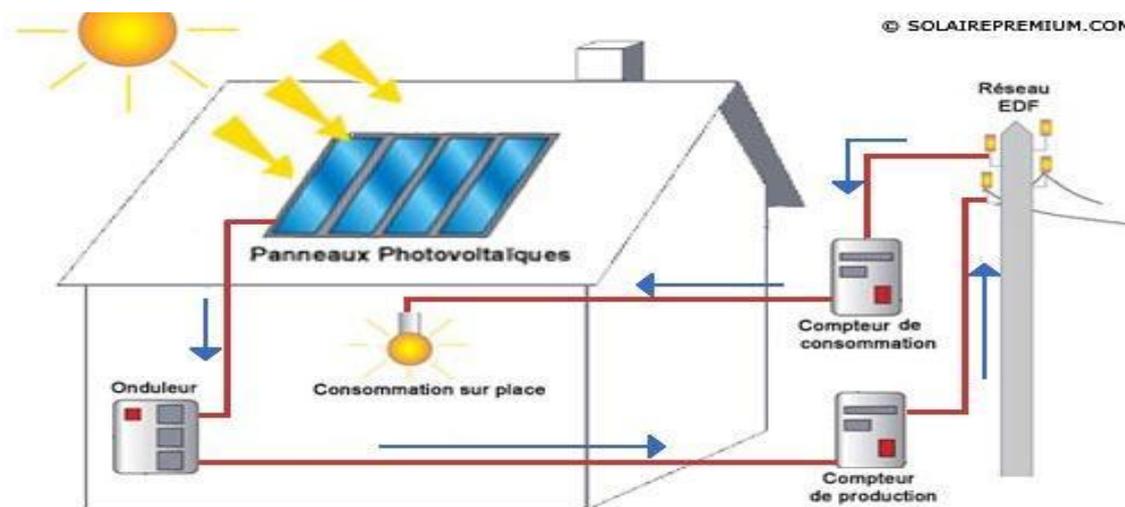


Figure I.21. Systèmes photovoltaïques autonomes sans stockage par batterie.

I.13.1.3 le pompage solaire « au fil du soleil »

Il s'agit de stocker de l'eau dans un réservoir. La pompe solaire est branchée directement sur les panneaux solaires par l'intermédiaire d'un régulateur ou d'une transformation. On place ensuite un réservoir en hauteur pour recevoir l'eau pompée le débit d'arrivée d'eau dans le réservoir est variable, directement fonction du rayonnement solaire,

d'où l'expression « au fil de soleil ». Il existe un stockage dans ce cas, mais de type hydraulique. Quant à l'utilisation, elle pourra se faire à n'importe quel moment, en tirant de le réservoir. [31]

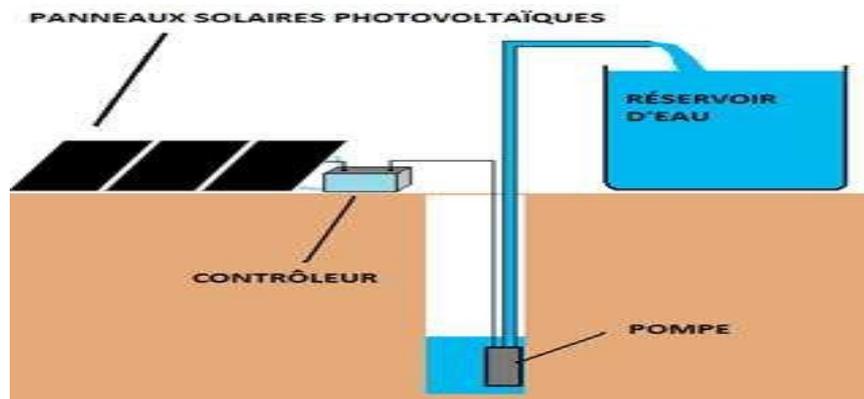


Figure I.22. Système de pompage « au fil soleil ».

I.14 Différentes technologies de cellules solaires

Une grande variété de cellules photovoltaïques existe et peut être partagée en trois grandes familles selon les technologies utilisées. La première génération existe depuis plusieurs dizaines d'années, elle offre de loin le meilleur rendement pour un rapport qualité/prix assez satisfaisant.

La deuxième génération, récemment apparue regroupe les technologies dites « couches minces », leurs rendements sont encore inférieurs à celui des cellules cristallines mais tendent à s'améliorer pour un coût inférieur. La dernière et troisième génération, celle des cellules organiques est en cours de développement et vise de hauts rendements avec des coûts de production de plus en plus bas. [34]

On peut distinguer trois générations de matériaux photovoltaïques :

Technologies de la première génération : Les matériaux solides cristallisés.

Technologies de la deuxième génération : Les couches minces solides.

Technologie de la troisième génération : Les cellules organiques.

I.14.1 Technologies de la première génération à base de silicium cristallin

Considérée comme la technologie photovoltaïque la plus efficace et la plus dominante la première génération comprend le monocristallin et le poly cristallin.

Le silicium monocristallin reste encore plus cher que le silicium poly cristallin mais permet d'obtenir un rendement plus élevé, avec près de 19.8% contre 24.7% de rendement en laboratoire. [35-36]

I.14.2 Technologie de la deuxième génération à base de couche-mince

Les premiers essais de couches minces remontent au milieu du XXème siècle avec de fins dépôts sur cristaux massifs puis finalement des structures complètement à base de couches minces. [37] Ces technologies reposent sur des matériaux possédant un fort coefficient d'absorption du spectre solaire, et promettent un avenir prometteur vu leurs croissance importante ces dernières années.

La deuxième génération comprend Le tellure de Cadmium (*CdTe*) et les cellules Amorphe

I.14.3 Technologie de la troisième génération « Les cellules organiques »

Apparues dans les années 1990, les cellules organiques font aujourd'hui l'objet d'un sujet d'étude très actif en laboratoire, ce sont des cellules photovoltaïques dont, au moins, la couche active est constituée de molécules organiques.

Il en existe principalement deux types : les cellules photovoltaïques organiques moléculaires et les cellules photovoltaïques organiques en polymères. [34]

I.14.3.1 Cellule multi-jonction

Des cellules ayant une grande efficacité ont été développées pour des applications spatiales. Les cellules multi-jonctions sont constituées de plusieurs couches minces.

Chaque type de semi-conducteur est caractérisé par une longueur d'onde maximale au-delà de laquelle il est incapable de convertir le photon en énergie électrique. D'un autre côté, en deçà de cette longueur d'onde, le surplus d'énergie véhiculé par le photon est perdu.

D'où l'intérêt de choisir des matériaux avec des longueurs aussi proches les unes des autres que possible, de manière à ce qu'une majorité du spectre solaire soit absorbé, ce qui génère un maximum d'électricité à partir du flux solaire.

	Technologies	Rendement	Avantage	Inconvénient	Durée de vie
1 ^{er} génération	Silicium Mono-cristallin	14-17 %	Bon rendement pour une cellule	Coût élevé, perte de matière première en cours de fabrication	35 ans
	Silicium poly cristallin	12-15%	Bon rendement pour un module	Coût élevé, perte de matière première en cours de fabrication	35 ans
2 ^{ème} génération	Silicium Amorphe	6-10%	Facile à fabriquer	Mauvais rendement	<10 ans
	Cdte	8-11%	Absorbe 90% des photons incidents	Cadmium très polluant	Non évaluée
	CIS/CIG	10-12%	Energie de gap ajustable 99% des photons absorbés	Manque de matière première	5 ans
3 ^{ème} génération	Cellules organiques	10%	Faible coût de fabrication, Flexible	Rendement encore trop bas Faible	actuellement

Tableau I.2 : Performances des différentes technologies des cellules photovoltaïques. [34]

I.15 Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque [37]**I.15.1 Avantage Les avantages de l'électricité solaire photovoltaïque sont multiples**

- La production de cette électricité renouvelable est propre, n'est pas toxique.
- Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.
- L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains pour sa petite relative taille, et son opération silencieuse.
- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.
- Modulaires, ses composants se prêtent à une utilisation innovante et esthétique en matière d'intégration architecturale (implantés sur ou en éléments de toiture ou de façade, sous forme de brise-soleil, en verrière...).
- L'électricité solaire photovoltaïque a pour qualité sa fiabilité, la durée de vie des capteurs supérieure à 25 ans, son autonomie, son faible impact sur l'environnement.
- Technologie encore émergente, son coût lui permet d'être souvent compétitive par rapport aux solutions classiques dans les sites éloignés du réseau électrique ne demandant pas de très grosse quantité d'électricité fournie, ou dans des sites urbains lorsqu'elle évite des coûts de raccordement au réseau électrique public .
- Le coût de fonctionnement des panneaux photovoltaïques est très faible, car leur entretien est très réduit, et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Les systèmes photovoltaïques sont fiables : aucune pièce employée n'est en mouvement. Les matériaux utilisés (silicium, verre, aluminium), résistent aux conditions météorologiques extrêmes.

I.15.2 Inconvénients

- Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.
- Le coût d'investissement des panneaux photovoltaïques et des capteurs est élevé.
- S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible.
- Le rendement électrique diminue avec le temps (20 % de moins au bout de 20 ans).
- Pollution à la fabrication.

I.16 Conclusion

Le présent chapitre est consacré à la présentation d'un aperçu sur la production d'énergie électrique d'origine photovoltaïque et quelques notions préliminaires sur le rayonnement solaire nécessaire pour la compréhension du photovoltaïque aussi des notions sur la technologie de modules PV et configurations de système photovoltaïque.

Finalement, nous avons écrit les avantages et les inconvénients d'énergie PV.

Chapitre II

*Dimensionnement et Stratégie de
fonctionnement système PV
connecté au réseau*

II.1 Introduction

Le champ photovoltaïque est couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur courant continu- courant alternatif (CC-CA).

Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires à moins que l'on veuille une forme autonome d'énergie pendant les pannes d'électricité. [31]

L'énergie produite est consommée sur place le surplus étant injecté dans le réseau, qui alimente La bibliothèque scientifique pendant les jours sans soleil

Tout système nécessite un dimensionnement avant son installation ; Le dimensionnement est un aspect fondamental de la conception du système. C'est l'ensemble des opérations nécessaires, une fois connue la consommation de l'installation, pour déterminer les dimensions optimales du générateur photovoltaïque, du système d'accumulation et capable de garantir cette consommation. Dans cette partie il ya deux paramètres particulièrement importants : Connaitre le rayonnement incident sur le système et déterminer avec précision la consommation. Certes, il est facile de calcule approximativement qui permettent de déterminer les dimensions des panneaux pour pouvoir couvrir les besoins en consommation d'une localité concrète [38]

Dans ce chapitre nous avons présenté les déférentes méthodes de dimensionnement d'un système raccordé au réseau.

II.2 Objectif général

L'objectif de notre travail est faire la conception et les dimensionnent d'une installation PV raccordé au réseau pour alimenter la bibliothèque technique de centre universitaire SALHI AHMED NAAMA et réalisée par Logiciel PVSYST

II.3 Le réseau électrique

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures énergétiques plus ou moins disponibles permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs d'électricité. Il est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans des postes électriques. Les postes électriques permettent de répartir l'électricité et de la faire passer d'une tension à l'autre grâce aux transformateurs. Un réseau électrique doit aussi assurer la gestion dynamique de

l'ensemble production - transport - consommation, mettant en œuvre des réglages ayant pour but d'assurer la stabilité de l'ensemble.

Il représente le réseau électrique de distribution publique d'amplitude $V_r = 220 \text{ V}$ et de fréquence $f = 50 \text{ Hz}$. [39]

II.4 Générateurs photovoltaïques Dans Les Constructions

L'alimentation en électricité d'un site éloigné du réseau électrique par un câble est une opération coûteuse, lorsque les besoins en énergie sont relativement faibles. A cause de ce problème il apparaît un nouveau modèle qui est probablement basé sur une décentralisation poussée du système électrique, où la production et la consommation seront à proximité l'une de l'autre. Plusieurs arguments plaident en faveur de cette hypothèse :

La réduction des pertes en ligne, la limitation des lignes à très haute tension, inesthétique et à la pollution électrique mal maîtrisée, la libération du marché d'électricité qui offrira de nouvelles possibilités de ventes et d'achats libre d'électricité, comme la plupart des autres biens et aussi il n'y a pas de coût de vendre de la région et de la préparation du site.[40]

Dans ce contexte, il est fort probable que la production d'électricité photovoltaïque par petites unités dispersées et raccordés au réseau de distribution aura un rôle important à jouer.

En effet la meilleure façon de produire sur site les modestes quantités nécessaires au consommateur est de convertir l'énergie solaire en électricité grâce à de simples capteurs fixés sur son toit, son mur sa façade. L'installation étant reliée au réseau, celui-ci absorbe le surplus d'énergie fournie, ou apporte le complément. Il est possible aussi d'augmenter sa production, en raccordant de nouveaux panneaux. [41, 42]

II.4.1 Toit solaire

Un toit solaire photovoltaïque raccordé au réseau est un générateur photovoltaïque installé chez l'utilisateur, et qui est raccordé au réseau de distribution de la compagnie électrique par l'intermédiaire de l'installation électrique intérieure. Il est composé d'un ou plusieurs champs des panneaux produisant du courant continu. Ce courant est ensuite transformé par un ou plusieurs onduleurs en courant alternatif compatible avec les exigences de qualité, de fiabilité et de sécurité du réseau .[43,44]

II.4.2 Fonctionnement

Le courant produit est utilisé par le ou les appareils électriques en service les plus proches, évitant ainsi d'acheter de l'électricité au réseau. Si la production est plus élevée que la consommation de l'instant, l'électricité excédentaire est injectée dans le réseau. Inversement lorsque la consommation dépasse la production (nuit, ciel couvert,

brouillard), le courant est comme d'habitude acheté au réseau. Le passage d'une situation à l'autre se fait d'une manière entièrement automatique. Donc le principe de fonctionnement de ces installations est très simple : [43 ,44 ,45]

- Les panneaux produiront idéalement plus ou moins la quantité d'électricité requise par les habitants de la maison.
- Lorsque l'énergie générée par les panneaux est inférieure à la consommation, l'énergie supplémentaire est fournie par le réseau et est enregistré par le compteur. Le réseau remplace la batterie en quelque sorte.
- Lorsque les panneaux produisent un excédent, lors d'une absence des occupants, par exemple, l'énergie "en trop" est mise à la disposition des autres utilisateurs, et le compteur marchera "à l'envers". Mais dans la plupart des cas, ce sera un deuxième compteur qui enregistrera l'opération dans l'autre sens. Le propriétaire des panneaux se fait rembourser sa contribution au réseau.

II.4.3 Rôle du toit solaire

A couvrir tout ou la partie de la consommation électrique du bâtiment sur lequel il est installé. en pratique, la production solaire réduira la facture d'électricité et remplacera une partie de l'énergie « sale » issue de combustibles fossiles ou nucléaires par une énergie propre et respectueuse de l'environnement, améliorant ainsi, même modestement, la qualité écologique du courant au niveau du consommateur mais aussi au niveau de la compagnie d'électricité. Un toit solaire peut apporter une aide précieuse pour améliorer la qualité du courant fourni par la compagnie locale dans les zones reculées où la grande longueur des câbles électriques occasionne fréquemment des baisses de tensions et de coupures. [46]

II.4.4 Système PV intégrées aux bâtiments

Les installations photovoltaïques intégrées aux bâtiments (PVIB) sont des produits ou des systèmes de production d'énergie solaire qui sont intégrés de façon transparente dans l'enveloppe du bâtiment, composant une partie du bâtiment comme un toit, une façade ou des fenêtres. Les systèmes PVIB sont des composantes intégrales des enveloppes de bâtiments et convertissent l'énergie solaire en électricité tout en remplissant des fonctions d'enveloppe de bâtiment comme : [47]

- la protection contre les intempéries (impermeabilité, pare-soleil) ;

- l'isolation thermique ;
- la protection antibruit ;
- l'éclairage de jour ;
- la sécurité

II.4.4.1 Avantages des systèmes PVIB

Les avantages des systèmes PVIB sont nombreux. Les systèmes PVIB produisent de l'électricité propre sur le site sans nécessiter plus d'espace de terrain, mais ils peuvent aussi avoir un effet sur la consommation d'énergie d'un bâtiment en utilisant la lumière du jour et en réduisant les charges de refroidissement. Les systèmes PVIB peuvent donc contribuer à l'énergie nette nulle des bâtiments. En transformant les toits et les façades en producteurs d'énergie, les systèmes PVIB sont les seuls matériaux de construction offrant un rendement des investissements. De plus, les utilisations diverses des systèmes PVIB offrent beaucoup de possibilités d'embellissement des bâtiments pour les architectes et les concepteurs de bâtiments. Aussi, les propriétaires de bâtiments profitent de factures d'électricité réduites et d'une image « verte » et « novatrice ».[47]

II.4.4.2 Application principale pour les systèmes PVIB

Les systèmes PVIB peuvent être installés pendant la phase de construction d'un bâtiment ou dans le cadre de rénovations d'un bâtiment existant et de remplacement des composantes de l'enveloppe. L'environnement de bâtiment permet l'intégration des systèmes PVIB de plusieurs manières. [48]



a) : la pose en toiture terrasse



b) : a pose par-dessus-la couverture classique



c) : la pose en couverture intégrée



d) : la pose en façade intégrée

Figure II.1. Types de positions possibles pour un toit solaire

II.4.5 Quantité d'électricité produite

La production annuelle d'électricité d'un toit solaire peut être calculée avec une marge d'erreur inférieure à 10%. Elle dépend :

- De l'ensoleillement annuel du site, qui peut être évalué aussi précisément pour presque tous les sites en Europe et même dans le monde entier.

- ❖ Types des positions possibles pour le toit solaire
- D'un facteur de correction calculé à partir de l'écart d'orientation par rapport au sud, de l'inclinaison des panneaux par rapport à l'horizontale et le cas échéant, des ombrages relevés sur le site.

La puissance crête d'un toit solaire donnée en Wc ou KWc , mesure la puissance théorique maximale que ce toit peut produire dans des conditions standards d'ensoleillement. [47]

II.5 Les systèmes PV connectés au réseau sans batterie de stockage

Ces systèmes sont ainsi conçus pour fonctionner en parallèle et en interconnexion avec le réseau public d'électricité (figure II.2). Le principal composant de ce type de système est l'onduleur. Il convertit la puissance continue (DC) obtenue à partir des modules PV en puissance alternative en respectant les conditions de qualité de la tension et de la puissance exigées par le réseau, avec une possibilité d'arrêt automatique quand le réseau n'est pas en fonctionnement. Une interface bidirectionnelle est placée entre la sortie alternative du système PV et le réseau constitué par un panneau de distribution. Cela permet de produire une puissance alternative à partir du système PV soit en alimentant directement toutes les charges électriques, soit en injectant surplus d'électricité (PV) dans le réseau lorsque les besoins sont plus importants. La nuit ou par faible ensoleillement durant les périodes où les besoins des consommateurs sont supérieurs à la production (PV), le réseau fournit l'appoint nécessaire, l'équilibre énergétique peut être ainsi obtenue. Lorsque le réseau est à l'arrêt, le système (PV) est automatiquement coupé et déconnecté du réseau à partir du panneau de distribution. Ce facteur de sécurité supplémentaire est exigé pour s'assurer que la centrale (PV) est coupée du réseau lorsque celui-ci est hors service pour raison de maintenance ou autre (cette fonction est appelée îlotage ou islanding) [48]. La maintenance des (CPCR) fonctionnant sans batterie, est particulièrement facile : Elle se résume à la vérification de l'état de propreté des modules (PV)

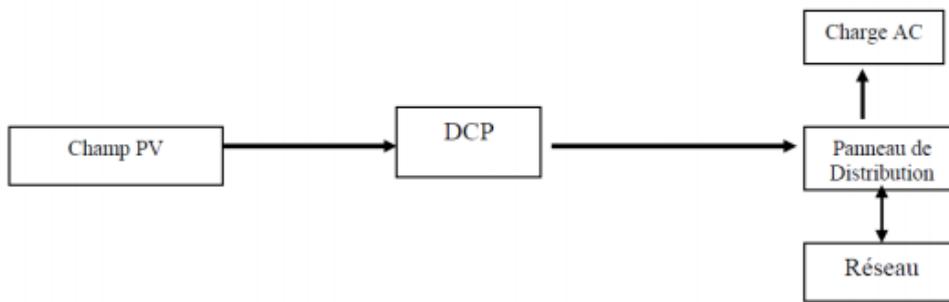


Figure II 2. Système PV connecté au réseau sans batterie de stockage [48]

II.6 Convertisseurs DC/AC couplés au réseau

L'alimentation du convertisseur est la puissance DC du générateur photovoltaïque ou la batterie. A la sortie on récupère la puissance AC qui sera utilisée pour les charges alternatives ou injectée dans le réseau [49, 50,51]. L'efficacité des onduleurs dépend du courant de charge pour que la puissance de sortie devienne maximale. Elle peut être élevée à 95% mais peut être plus basse que (75-80%) si l'onduleur fonctionne sous la partie de charge. La majorité des onduleurs, pour les applications photovoltaïques, peuvent être classifiés en trois catégories :

Onduleurs à fréquence variable : qui sont utilisés pour les systèmes autonomes surtout dans les systèmes photovoltaïques de pompage.

Les deux suivants types sont convenables pour les systèmes connectés aux réseaux :

- ✓ **Onduleurs auto- commutatif à fréquence fixe.**
- ✓ **Onduleurs à fréquence fixe** (redresseurs qui fonctionne en régime onduleurs). La (Figure II.3) représente les différentes configurations possibles pour l'utilisation des onduleurs [49, 50,51, 52].

L'onduleur assume une fonction de liaison directe avec le réseau électrique et il est susceptible de causer de grave dommages : il doit donc répondre à des impératifs concernant la qualité du courant (tension, fréquence, déphasage), la sécurité (risque de production sur le réseau lorsque ce dernier est coupé) et de fiabilité (les performances ne doivent pas diminuer dans le temps).

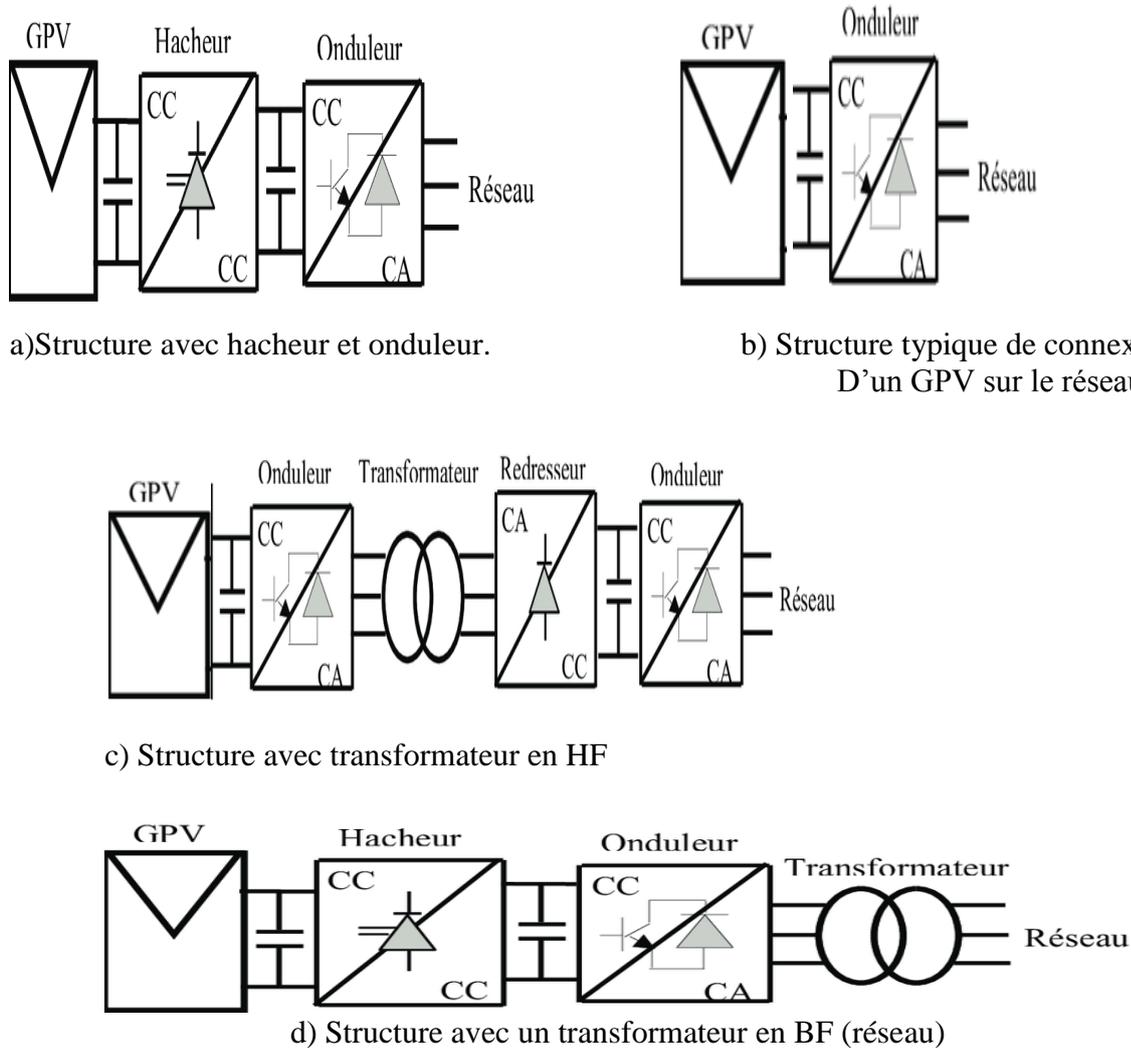


Figure II.3. Configuration des différentes variétés en onduleurs

II.7 Matériel

Le matériel utilisé pour le dimensionnement d'installation PV et l'analyse économique dans le cadre de la présente étude est le PVSYST.

Le PVSYST est un logiciel développé pour des systèmes de production d'énergie de petites puissances. Il permet de faire des simulations de systèmes avec des énergies renouvelables et avec des énergies fossiles.

II.8 Dimensionnement d'installation PV

Le dimensionnement est un aspect fondamental de la conception du système. C'est l'ensemble des opérations nécessaires, une fois connue la consommation de l'installation, pour déterminer les dimensions optimales du générateur photovoltaïque, du système

d'accumulation et capable de garantir cette consommation. Dans cette partie il ya deux paramètres particulièrement importants :

Connaitre le rayonnement incident sur le système et déterminer avec précision

La consommation. Certes, il est facile de calculer approximativement qui permettent de déterminer les dimensions des panneaux pour pouvoir couvrir les besoins en consommation d'une localité concrète [53].

II.8.1 Paramètres d'entrée intervenants dans le dimensionnement

D'une manière générale, les paramètres à prendre en compte pour concevoir et dimensionner un système photovoltaïque sont assez nombreux et concernent :

- Le lieu où sera placé le générateur PV,
- Le système PV (modules, régulateur, onduleur et batteries),
- La charge.

II.8.1.1 Paramètres relatifs au système PV

Les paramètres concernant le système donnent à titre indicatif un ordre de grandeur du rendement de l'installation, sont relatifs aux modules photovoltaïques, éléments de batterie, régulateur et onduleur existants dans le marché. Ces paramètres basés sur un critère liant d'un côté la satisfaction des besoins et le fonctionnement optimal du système et de l'autre la disponibilité. [54]

II.8.1.2 Paramètres relatifs au site d'installation

Le dimensionnement du générateur PV est dicté par les conditions relatives au site. Pour adopter les capacités générateur PV / batterie, aux conditions de charge, il est indispensable de connaître les caractéristiques de l'irradiation solaire par jour ou par mois, soit l'énergie moyenne reçue sur un plan donné, à l'endroit même où sera situé le générateur PV. Les données doivent être connues pour chaque mois de l'année. Elles peuvent être obtenues par des organismes nationaux de météorologie ou par des calculs (outil informatique), qui exigent les paramètres d'entrées suivants : [55]

- ✓ Latitude,
- ✓ Altitude,
- ✓ Réflectivité du sol ou albédo,

- ✓ Irradiation moyenne journalière la plus défavorable dans l'année, soit mesurée ou calculée.

II.8.1.3-Paramètres concernant le module PV

Les paramètres concernant le module PV sont : [54]

- ✓ Tension maximale,
- ✓ Courant maximal,
- ✓ Puissance maximale.

Les paramètres aux conditions standards (1000 W, 25 °C) sont donnés par le constructeur.

II.8.1.4 Paramètres concernant l'onduleur

Pour l'onduleur continu/alternatif on précisera le rendement seulement, qui est aussi donné par le constructeur. [55]

II.8.1.5 Paramètres concernant la charge

Les paramètres concernant la charge sont : [54]

- ✓ Type d'alimentation continue ou alternative,
- ✓ Puissance de la charge,
- ✓ Durée de fonctionnement moyenne par jour.

II.9 Méthode de dimensionnement

Il existe plusieurs méthodes de dimensionnement d'un système photovoltaïque :

II.9.1 Méthode de la probabilité d'erreur dans la consommation

Cette méthode permet d'optimiser le dimensionnement d'un système dans des conditions complexes (fluctuation saisonnières de l'irradiation, ciel couvert (nuageux),...etc.) grâce à un logiciel adapter.

L'inconvénient de cette méthode est qu'il faut connaître les radiations pour un nombre d'années très grand (10ans minimum). [56]

II.9.2 Méthode du mois le plus défavorable

Dans cette méthode, on estime l'énergie récupérable pour une période critique d'un mois, appelé le mois le plus défavorable. Ce mois correspond au mois pendant lequel la valeur de l'irradiation moyenne mensuelle est la plus faible de l'année ou dans certains pays la période d'hivers est rude. [57]

- Calcul de la puissance crête totale du champ PV

Chapitre II : Dimensionnement et Stratégie de fonctionnement système PV connecté au réseau

La puissance crête totale du champ photovoltaïque, dépend de l'irradiation quotidienne du lieu d'utilisation, elle est donnée par : [57]

$$P_{pv} = (E_c \times G_0) \div (c_p \times I_r) \quad (\text{II.1})$$

I_r : Irradiation du mois le plus défavorable

P_{pv} : Puissance crête du champ photovoltaïque

E_c : Energie consommée

c_p : Coefficient correcteur

- Choix de la tension de fonctionnement du champ PV

On choisit la tension de fonctionnement en fonction de la puissance crête du champ PV en watt. De façon générale : [57]

- ✓ Moins de 500 watts crête : elle est de 12V
- De 501 à 2000 watts crêtes : elle est de 24V
- De 2001 à 10000 watts crêtes : elle est de 48V
- Plus de 10000 watts crête : elle est supérieure à 48V

- Détermination du nombre de modules à installer

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 : [56]

$$N_m = P_{pv} \div P_u \quad (\text{II.2})$$

P_{pv} : Puissance crête de l'installation

P_u : Puissance crête unitaire

Le nombre de modules connectés en série est égal

$$N_{ms} = V_{pv} \div V_u \quad (\text{II.3})$$

V_{pv} : Tension du générateur PV.

V_u : Tension nominale unitaire.

- Le nombre de modules connectés en parallèle est égale à

$$N_{mp} = N_m \div N_{ms} \quad (\text{II.4})$$

II.9.3 Méthode de la moyenne annuelle

Cette méthode est très proche de celle du mois le plus défavorable. Elle utilise aussi, l'irradiation journalière en (KWh/m²/jr), pour une durée d'une année. [56]

II.9.4 Méthode LPSP

Probabilité de Perte d'énergie (Loss of Power Supply Probability) est une technique probabiliste introduite par Abou Zahr et Ramakumar dans le domaine des systèmes de génération photovoltaïques et largement utilisée dans la conception et l'optimisation des systèmes autonome (stand alone), jusqu'à présent.

Elle est basée sur le concept de LPSP qui est la probabilité que le système rencontre une pénurie à un moment donné pendant une période d'analyse, c'est-à-dire un état dans lequel le système ne serait pas en mesure de fournir l'énergie nécessaire à la charge. [58]

Donc la méthode LPSP est définie comme étant la fraction de l'énergie déficitaire sur celle demandée par la charge. Elle exprime le taux de non-satisfaction de la charge. A partir de l'information sur la variabilité de la ressource renouvelable et sur la corrélation avec la charge, la méthode LPSP peut être définie, en termes d'état de charge des batteries par : [58]

$$Ebat(t) = Ebat(t - t) \times (t - \sigma) + ((El(t) - Es(t)) \quad (\text{II.5})$$

Où,

$Ebat(t)$: Energie stockée dans la batterie à une heure t.

$Ebat(t - t)$: Energie stockée dans la batterie à l'heure précédente.

σ : Taux horaire d'autodécharge.

$Es(t)$: Energie produite par la source(Wh).

$El(t)$: Energie demandée par la charge à une date t (Wh) ond

η_{ond} : Rendement de l'onduleur

II.9.5 Méthode des heures équivalentes

Elle considère que l'intensité fournie par un module photovoltaïque est proportionnelle à l'ensoleillement, le calcul est effectué pour le mois le plus défavorable de l'année, on détermine alors le courant fourni par le champ photovoltaïque dans les conditions où la température est donnée par la relation [59]

$$Tj = Tu + 25 \quad (\text{II.6})$$

Tu : Température diurne

Connue aussi sous le nom de méthode «Ampère-heure» [60] cette méthode consiste à déterminer le nombre de panneaux photovoltaïques nécessaire pour satisfaire la demande, puis peu à peu à réduire ce nombre, tout en calculant le pourcentage des besoins énergétiques

Annuels fournis par le générateur PV et ainsi à compléter le reste par l'énergie fournie par un générateur complémentaire. [61]

Etape 1 : Evaluation de la puissance à produire EP

Etape 2 : Détermination de la capacité de stockage des batteries

Etape 3 : Calcul de la puissance crête nécessaire P_c du générateur photovoltaïque pour Chaque mois.

Etape 4 : Détermination du nombre de panneaux photovoltaïques nécessaire chaque Mois

II.9.6 Méthode utilisabilité solaire

La méthode d'utilisabilité solaire [62] est un outil très puissant pour le dimensionnement des systèmes photovoltaïques. L'utilisabilité de la radiation solaire est définie comme étant la fraction de la radiation totale incidente sur la surface des panneaux PV, et qui excéderait un niveau spécifique appelé niveau critique.

II.9.7 Méthode simplifiée

Etape 1 : Estimation des besoins journaliers de l'utilisateur en électricité

Il s'agit d'estimer la consommation d'équipements supposés connus. L'objectif est d'obtenir la consommation totale moyenne par jour.

L'énergie totale moyenne nécessaire chaque jour E_{cj} (Wh/j) est la somme des consommations énergétiques des divers équipements constituant le système à étudier, à savoir les télévisions, les lampes d'éclairage, les appareils électroniques, etc... ; Elle est donnée par la

Loi suivante :
$$E_{cj} = \sum E_j \quad (\text{II.7})$$

Pour les équipements qui ne sont pas utilisés quotidiennement et pour tous les équipements à forte consommation, partez de la durée du cycle de fonctionnement de la tâche. Ainsi, la consommation de chaque équipement peut être calculée comme suit [63] :

$$E_j = P_j \times t_j \times N_j \quad (\text{II.8})$$

t_j : Temps de fonctionnement.

N_j : Nombre des équipements.

Etape 2 : Estimation de l'ensoleillement sur le site de l'installation du générateur PV

Les données de l'ensoleillement peuvent être relevées sur le site ou enregistrées sur la carte de l'ensoleillement de la région ou encore obtenues au niveau de la station météo la plus proche de la zone. [64]

Etape 3 : calcul du nombre de panneaux solaire

Nombre des modules PV = $\frac{\text{consommation journalière}}{\text{Production journalière}}$

$$N_{ppv} = (E_{cj}) \div (P_{ppv}) \text{ (II.9)}$$

Etape 4 : Choix de l'onduleur

Le dimensionnement sera basé sur : [57]

- Le rendement : c'est la conversion (DC/AC) qui atteint des valeurs assez élevées en fonctionnement nominal (égale à 0,8),
- La consommation à vide : c'est l'ensemble des pertes induites par l'onduleur en absence de charge, la diminution de ces pertes assure un bon stockage dans l'accumulateur,
- La fréquence sera 50Hz,
- La tension d'entrée : elle est égale à celle de la batterie.

La puissance nominale est donnée par cette équation :

$$P_{ond} = P_n \div n_{ond} \text{ (II.10)}$$

Etape 5 : Dimensionnement des câbles

Il est nécessaire de limiter la longueur des câbles électriques entre le générateur photovoltaïque et les récepteurs. Cette distance n'excède jamais quelques mètres. En effet les systèmes solaires fonctionnent généralement sous faible tension (12V, 24V, 48V), donc avec un courant élevé ($P = U \times I$), Si U est faible, I est très élevé pour la même puissance.

Le transport à distance de ce courant de plusieurs ampères provoque des pertes par effet joule aux niveaux des conducteurs. [56]

$$P_j = \Delta V \times I = R \times I^2 \text{ (II.11)}$$

On calcul de la sections des câbles, d'après les formules suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} S = (\rho \times L) \div R \\ R = \Delta V \div I; \Delta V = e \times V \\ S = (\rho \times I \times L) \div (e \times V) \end{array} \right.$$

Avec :

ρ : Résistivité du câble ($\rho = 0.017 \text{ ohm mm}^2/\text{m}$ pour le cuivre)

I : Intensité du courant électrique L : Longueur du câble électrique

e : Chute de la tension (3-5%)

V : Tension du système PV

II.10 Constitutions de système

Cette section décrit les différents composants du système PV connecté au réseau pour donner une compréhension des composantes et certains aspects de leurs fonctionnements, qui est importante pour le fonctionnement du système intégré au réseau électrique.

II.10.1 Générateur photovoltaïque

De la part de ses dimensions, les cellules PV délivrent une puissance de quelque watt sous une tension de faible. Pour produire plus de puissance, il doit assembler plusieurs cellules afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque. En effet, les modules PV sont composés d'un ensemble de cellules mises en série et/ou en parallèle réalisant la conversion de la lumière du soleil en électricité.

Les modules eux-mêmes associés en série et parallèle pour former un champ photovoltaïque d'une puissance crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairement, de température et de spectre solaire.

Le générateur photovoltaïque (GPV) est une combinaison de plusieurs modules PV ou panneau. Il représente pour un système PV la source de l'énergie à fournir. [65]



Figure II.4. La cellule au champ GPV.

II.10.2 Onduleurs

Pour alimenter des équipements fonctionnant en courant alternatif, un dispositif électronique statique de conversion ou convertisseur DC/AC est utilisé pour la transformation du courant continu en courant alternatif [66].

➤ Caractéristiques d'onduleurs

- Onduleurs légers (de basse puissance), ils fournissent en sortie une puissance de 100 à 10000W.
- Onduleurs de résistance moyenne, ils fournissent une puissance allant de 500 à 20000W.
- Onduleurs robustes (de grande puissance), Ils fournissent une puissance électrique allant de 10000 à 60000W

II.10.3 Les Conducteurs

Le câblage a pour but de regrouper électriquement les modules solaires.

Généralement, les modules sont câblés tout d'abord en série pour réaliser des branches qui comportent chacune leur diode en série. La mise en parallèle de branches est réalisée, pratiquement, à l'aide de boîtes de jonction fixées sur les châssis. Il est indispensable d'apporter un soin particulier au serrage des cosses et au câblage de l'installation. Une chute de tension trop importante dans les connexions et dans les câbles peut réduire le courant de charge de la batterie. Cette chute de tension est loin d'être négligeable lorsque de forts courants sont fournis sous de faibles tensions. Cette contrainte impose l'utilisation de câbles résistant aux intempéries et dont la section sera fonction de la distance entre panneau solaire et batterie.

Les sections de câbles doivent être calculées de façon à limiter la perte de puissance à 1%. [67]

II.11 Choix de composant

II.11.1 Choix de générateur photovoltaïque

On choisit le générateur photovoltaïque en fonction des caractéristiques suivantes :

- Puissance nominale.
- Tension nominale.
- Tension à puissance maximum.
- Courant à puissance maximum.
- Puissance nominale.

Chapitre II : Dimensionnement et Stratégie de fonctionnement système PV connecté au réseau

- Tension en circuit ouvert.
- Courant de court-circuit.
- Durée de vie supérieure à 25 ans Puissance de sortie garantie de 90% dans les 10 ans, 80% au-delà

La puissance maximum (crête) est obtenue en multipliant la tension maximum par le courant maximum soit ($P = U \times I$)

Cette puissance ne sera obtenue que si le panneau solaire est exposé dans les conditions « STC » (voir explications ci-dessous).

La tension à vide correspond à la tension délivrée par le panneau solaire en circuit ouvert ; le courant de court-circuit correspond à l'intensité maximum que pourra délivrer le panneau.

La durée de vie d'un panneau solaire généralement donnée pour étant supérieure à 25 ans se situe réellement entre 35 et 40 ans ; il est important de savoir que les fabricants garantissent une puissance de 90% dans la limite de 10 ans et 80% au-delà des 10 ans. Un panneau fiable bien fabriqué se situera plus facilement aux alentours de 85% après 20 ans. Pour garantir un fonctionnement optimal même après 20 ans, il faut donc anticiper ces pertes et les intégrer dans votre calcul de départ.[68]

II.12 Etude technique et bilan de puissance et énergétique

II.12.1 Fiche technique d'un Panneau solaire

Dimensions Module	LG 400 N2T-A5
Technologie	Si-mono
Puissance nominale P_{mpp} *	402.3 W
Tension à puissance max. V_{mpp} *	42.20 V
Courant à puissance max. I_{mpp} *	9.490 A
Tension en circuit ouvert V_{oc}	44.72 V
Courant de court-circuit I_{sc}	10.23 A

Tableau II.01.Fiche technique de panneau solaire LG 400 N2T-A5 Si-mono 400WC36V.

II.12.2 Fiche technique de l'onduleur

Nom de Modèle	Sunny tripower 20000TLEE-JP
Tension DC maximum	580 V
Courant DC maximum	36 V
Plage de Tension MPP(T)	800 V
Puissance AC Maximum	20 KW
Tension AC nominal	400 V
Courant AC maximum	29 A
Fréquence	50 Hz
$\cos\phi$	0,99

Tableau II.02.Fiche technique de l'onduleur.

II.13 Bilan de puissance et énergétique

Niveau bas

Structure de la bibliothèque	Appareils	Nombre	Puissance unitaire [w]	Fréquence [h/jour]	Puissance [W]	Energie [Wh]
Salle internat et informatique 1	Ordinateur	20	961	8	19220	153760
	Tube fluorescent	20	18	8	360	2880
	Ampoule LED	16	30	8	480	3840
	Climatiseur	02	3200	8	6400	25600
Espace	Ordinateur	13	961	8	12493	99944

Chapitre II : Dimensionnement et Stratégie de fonctionnement système PV connecté au réseau

multimédia Salle d'informatique 2	Tube fluorescent	44	18	8	792	6336
	Ampoule LED	28	30	8	840	6720
	Climatiseur	03	3200	8	9600	76800
Foyer pour Etudiants	Ordinateur	02	961	8	1922	15376
	Réfrigérateur	02	66	8	132	1056
	Pc portable	01	432	8	432	3456
	Imprimante	01	501	8	501	4008
	Photo copieuse	03	1300	8	3900	31200
	Tube fluorescent	20	18	8	360	2880
	Ampoule LED	02	30	8	60	480
Foyer pour Etudiants	Ordinateur	01	961	8	961	7688
	Tube fluorescent	32	18	8	576	4608
	Ampoule LED	06	30	8	180	1440
	Modem	01	12	8	12	96
Atelier de reliure de livres	Ordinateur	01	961	8	961	7688
	Imprimant	01	501	8	501	4008
	Ampoule LED	16	30	8	480	3840

Chapitre II : Dimensionnement et Stratégie de fonctionnement système PV connecté au réseau

Salle de stockage de livre 2	Tube fluorescent	32	18	8	576	4608
	Ampoule LED	22	30	8	660	5280
Banque de prêt des Livres	Tube fluorescent	24	18	8	432	3456
	Ampoule LED	08	30	8	240	1920
Toilettes pour femmes	Ampoule LED	07	30	8	210	1680
	Ampoule néo	01	10	8	10	80
Toilettes pour homme	Ampoule néo	01	10	8	10	80
	Ampoule LED	07	30	8	210	1680
Couloir	Tube fluorescent	16	30	8	480	3840

1^{er} niveau

Salle de lecture pour les étudiants N°1	Tube fluorescent	60	18	8	1080	8640
	Ampoule LED	22	30	8	660	5280
	Climatiseur	03	3200	8	9600	76800
Espace vide	Spot flua-resto	80	12	8	960	7680

Chapitre II : Dimensionnement et Stratégie de fonctionnement système PV connecté au réseau

	Tube fluorescent	20	18	8	360	2880
Salle de lecture pour les étudiants N°2	Tube fluorescent	60	18	8	1080	8640
	Ampoule LED	22	30	8	660	5280
	Climatiseur	03	3200	8	9600	76800
Salle de lecture pour enseignant	Tube fluorescent	44	18	8	792	6336
	Ampoule LED	18	30	8	540	4320
	Climatiseur	03	3200	8	9600	76800
Salle de lecture pour les étudiants N°3	Tube fluorescent	44	18	8	792	6336
	Ampoule LED	18	30	8	540	4320
	Climatiseur	03	3200	8	9600	76800
Toilettes pour Femmes	Tube fluorescent	12	18	8	216	1728
	Ampoule néo	01	10	8	10	80
Couloir	Tube fluorescent	08	18	8	144	1152
Les escaliers	ampoule LED	04	30	8	120	960
	Tube fluorescent					

Les bureaux		16	18	8	288	2304
	Ampoule LED	04	30	8	120	960
Couloir entre les bureaux	Tube fluorescent	12	18	8	216	1728

Energie Total [Wh]	863960
Puissance tôt [W]	111195

Tableau II.03. Estimation de l'énergie journalière consommée par jour.

II.14 Dimensionnements d'un système PV par la méthode simplifiée

II.14.1 Energie total de consommée

$$E_{cj} = \sum E_j \text{ (II. 12)}$$

$$E_{cj} = 863960 \text{ [Wh/j]}$$

II.14.2 Puissance crête de l'installation de un champ photovoltaïque

$$P_{crete} = (E_c \times G_o) \div (I_r \times C_p) \text{ (II. 13)}$$

$$P_{crete} = (863960 \times 1000) \div (4420 \times 0.65)$$

$$P_{crete} = 300.717 \text{ [KW]}$$

II.15 Avantages et inconvénients des systèmes connectés au réseau

a- Avantages

- n'ont pas besoin de stockage d'énergie et éliminent donc le maillon le plus problématique (et plus cher) d'une installation autonome. C'est en fait le réseau dans son ensemble qui sert de réservoir d'énergie [69].
- Pas de gaspillage - tout excédent est livré au réseau - particulièrement intéressant pendant les périodes d'absence de son domicile, pendant le week-end, pendant les vacances quand les modules continuent à travailler. On évite les pertes d'énergie associées au stockage en batterie lorsque la batterie est complètement chargée par exemple [70].
- On n'est pas obligé de calculer méticuleusement ses besoins en électricité, et de prévoir des niveaux de demande exceptionnellement très élevés, même si très rares [71].

- On peut commencer petit et agrandir par la suite sans problèmes de dimensionnement compliqués [69].
- On peut satisfaire à une partie ou à la totalité de ses besoins [69].

b- Inconvénients

C'est vraiment la voie royale qui permettra au photovoltaïque de faire sa percée dans nos vies. Cependant...

- La consommation risque de redevenir relativement "invisible," et on pourrait retomber dans le piège de la consommation irréfléchie [71].
- Les contraintes électriques imposées par les sociétés d'électricité peuvent être Rigoureuses, et les onduleurs synchrones doivent répondre aux exigences techniques des compagnies de production et de transport d'énergie. Par exemple, il faut un mécanisme de coupure automatique du courant au réseau dans l'éventualité d'une panne pour éliminer tout risque à ceux qui font les travaux de réparation [72].

Mais le plus important, c'est la question du prix payé pour les kWh livrés au réseau... Il est difficile de dire combien de temps il faudra pour atteindre un niveau de prix où le kWh photovoltaïque sera compétitif avec le kWh conventionnel, issu de combustibles fossiles (pétrole, gaz ou charbon) ou fissile (nucléaire).

Il est évident que ce choix n'est aujourd'hui économiquement viable qu'avec un soutien de fonds publics significatifs, et c'est ce que ce passe dans la plupart des pays européens. Mais ce concept est tellement séduisant que de plus en plus

II.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents éléments constituant le système d'installation PV raccordé au réseau. Ainsi que leur dimensionnement qui a été effectué par l'estimation du potentiel énergétique journalier disponible et la puissance de notre charge.

Nous avons dimensionné les différents composants de l'installation Photovoltaïque à savoir les panneaux photovoltaïques, l'onduleur. Le dimensionnement c'est fait en utilisant la méthode simplifiée.

Chapitre III

*Résultats de simulation et
discussion*

III.1 Introduction

La production d'énergie photovoltaïque se repose sur les conditions climatiques par conséquent elle est variable dans le temps (jour, nuit, saisons ...etc.).

Pour pallier à cet inconvénient majeur on associe à l'intégration d'énergie PV dans un réseau électrique.

Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée. [69] Les outils comme les logiciels font partie des grandes réalisations concernant l'énergie renouvelable. De nombreux logiciels existent maintenant pour modéliser, optimiser ou dimensionner les différents systèmes conçus à partir de l'énergie renouvelable. [70] Dans notre étude, nous avons utilisé le logiciel PVSYST.

III.2 Présentation de logiciel de simulation PVSYST

Le programme PVSYST est un logiciel de simulation de systèmes photovoltaïques, développé initialement par le Groupe de Physique Appliquée (GAP) de l'Université de Genève [73]. Ce logiciel est conçu pour être utilisé par les architectes, les ingénieurs et les chercheurs, mais 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 économique 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 [64]. On lance le logiciel PVSYST, l'interface suivante s'affiche :



Figure.III.1. Interface de logiciel PVSYST

La simulation à base du logiciel PVSYST suit l'organigramme suivant :

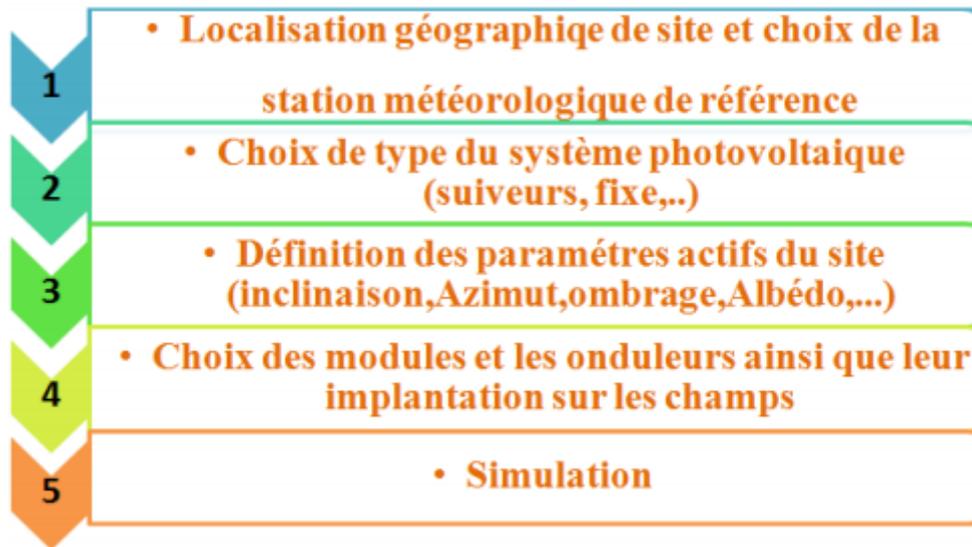


Figure.III.2.Etapes de simulation avec PVSYST.

III.3 Caractéristiques de la zone de Naama

Le territoire de la wilaya de Naâma occupe une superficie de 29.514,14 Km² et se caractérise par trois grands espaces géographiques :

Une zone Nord steppique plane représentant 74% de la superficie totale de la wilaya, soit 21.840,46 Km² ; une zone montagneuse occupant 12% du territoire de la wilaya, soit 3.541,69 Km², et faisant partie de l'Atlas saharien, sa structure est hétérogène et on distingue du nord au sud 04 unités distinctes ; les piémonts sud de l'atlas tellien :

Cette partie ou l'altitude varie de 900 à 1200 m est parsemée de chaîne montagneuse isolées s'élevant jusqu' à 1400 m correspond à la zone alfatière et l'espace du chott de la wilaya est constitué par les chotts Gharbi à l'ouest et Chergui à l'Est. [76]

III.3.1Trajectoire du soleil

La connaissance du mouvement apparent du soleil pour un point donné de la sur face terrestre est nécessaire pour toute application solaire. La position du soleil est définie par deux angles : sa hauteur HS (angle entre le soleil et le plan horizontal du lieu) et son Azimut AZ (angle avec la direction du Sud, compté négativement vers l'Est)

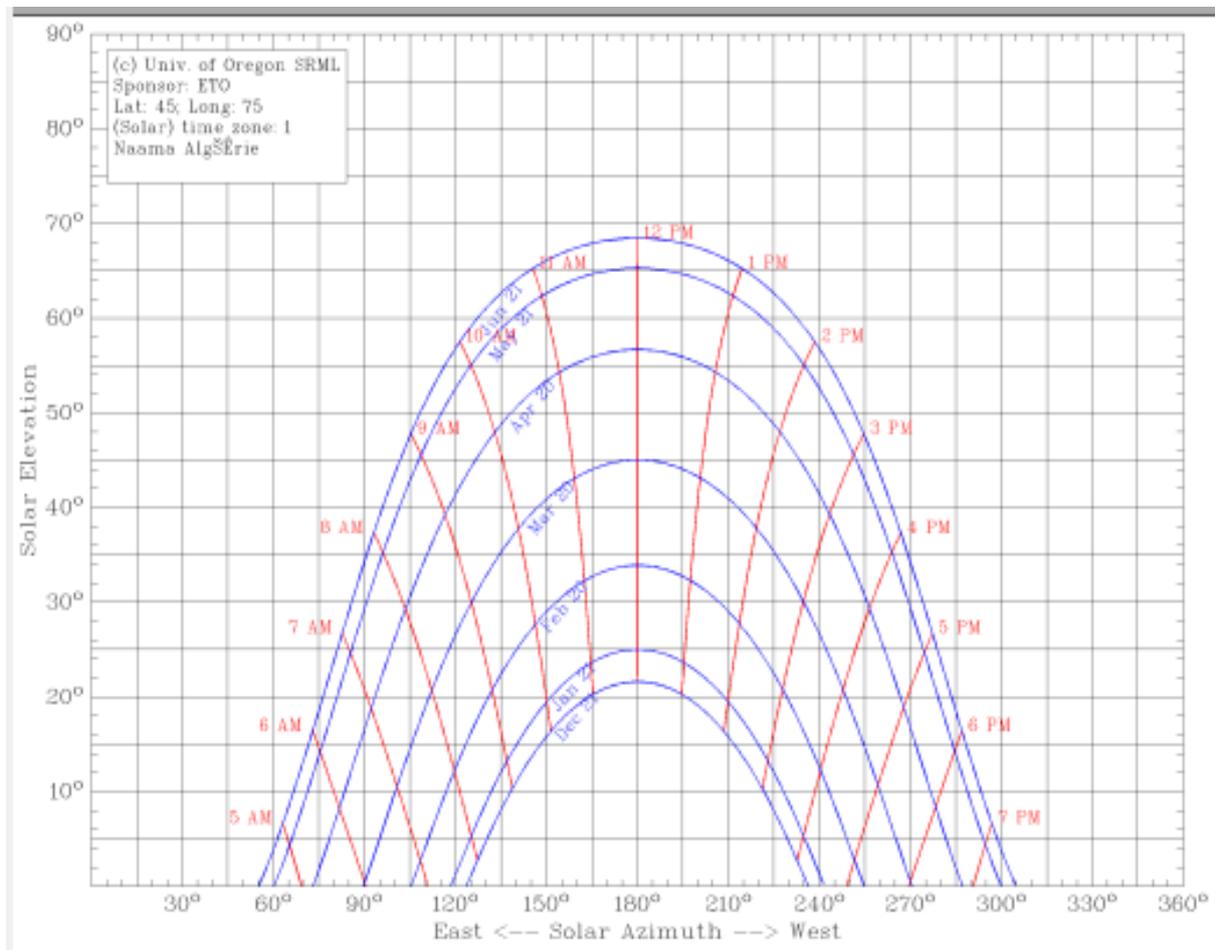


Figure III.3. Trajectoire de Naama. [77]

III.3.2 Collecte de données

III.3.2.1 présentation du site

Pour cette étude, une localisation géographique est considérée NAAMA, située à l'ouest de l'Algérie



Figure.III.4.Localisation de la wilaya de Naama

III.3.2.2 Les coordonnées géographiques de Naama Algérie

Latitude	33°16'00" Nord
Longitude	0°19'00" Ouest
L'altitude par rapport au niveau de la mer	1169 m
Situation	Haut du formulaire
Temps	GMT + 01 :00

Tableau III.1.Les coordonnées géographiques de la wilaya de Naama. [70]

III.3.2.3 Données météorologiques

☀ Irradiation

Des mesures de l'irradiation solaire ont été prises sur le site (par jour). En utilisant l'orientation et l'inclinaison des modules photovoltaïque, la latitude du lieu et les valeurs de rayonnement global on indique, en (Wh/m²/j), pour chaque mois, la

Chapitre III : Résultats de simulation et discussion

quantité moyenne d'énergie solaire que reçoit chaque jour par m² de surface horizontale. La moyenne mensuelle du rayonnement quotidien sur un plan incliné (32°) [73]

Pour chacun des douze mois de l'année est donnée par le tableau suivant :

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
Irradiation	2640	3250	4200	5110	5930	6430	6340	5800	4530	3670	2800	2340

Tableau III.2. Valeurs de l'irradiation globale journalière moyenne.

Le vent

La vitesse horaire moyenne du vent à Naama connaît une variation saisonnière modérée au cours de l'année. La période la plus venteuse de l'année dure 4,6 mois, du 26 janvier au 15 juin, avec des vitesses de vent moyennes supérieures à 15,1 kilomètres par heure. Le jour le plus venteux de l'année est le 11 avril, avec une vitesse moyenne du vent de 16,8 kilomètres par heure. La période la plus calme de l'année dure 7,4 mois, du 15 juin au 26 janvier. Le jour le plus calme de l'année est le 15 octobre, avec une vitesse moyenne horaire du vent de 13,4 kilomètres par heure. [74]

Température

La saison très chaude dure 2,9 mois, du 12 juin au 8 septembre, avec une température quotidienne moyenne maximale supérieure à 31 °C. Le jour le plus chaud de l'année est le 18 juillet, avec une température moyenne maximale de 36 °C et minimale de 23°C.

La saison fraîche dure 3,9 mois, du 14 novembre au 9 mars, avec une température quotidienne moyenne maximale inférieure à 16 °C. Le jour le plus froid de l'année est le 12 janvier, avec une température moyenne minimale de 2 °C et maximale de 12 °C. [74]

Inclinaison

Les panneaux solaire doit être incliné de manière à former un angle de **43°** avec le sol (l'altitude +10°)

✚ Orientation Vers le sud.

III.4 Profils de charge de la bibliothèque technique

Notre étude est sur la bibliothèque technique du centre universitaire Salhi Ahmed Naama qui a une énergie de **134337 [Wh]** et consomme une puissance **112514 [W]**.

III.4.1 Structure de la bibliothèque technique de CUN SALHI AHMED

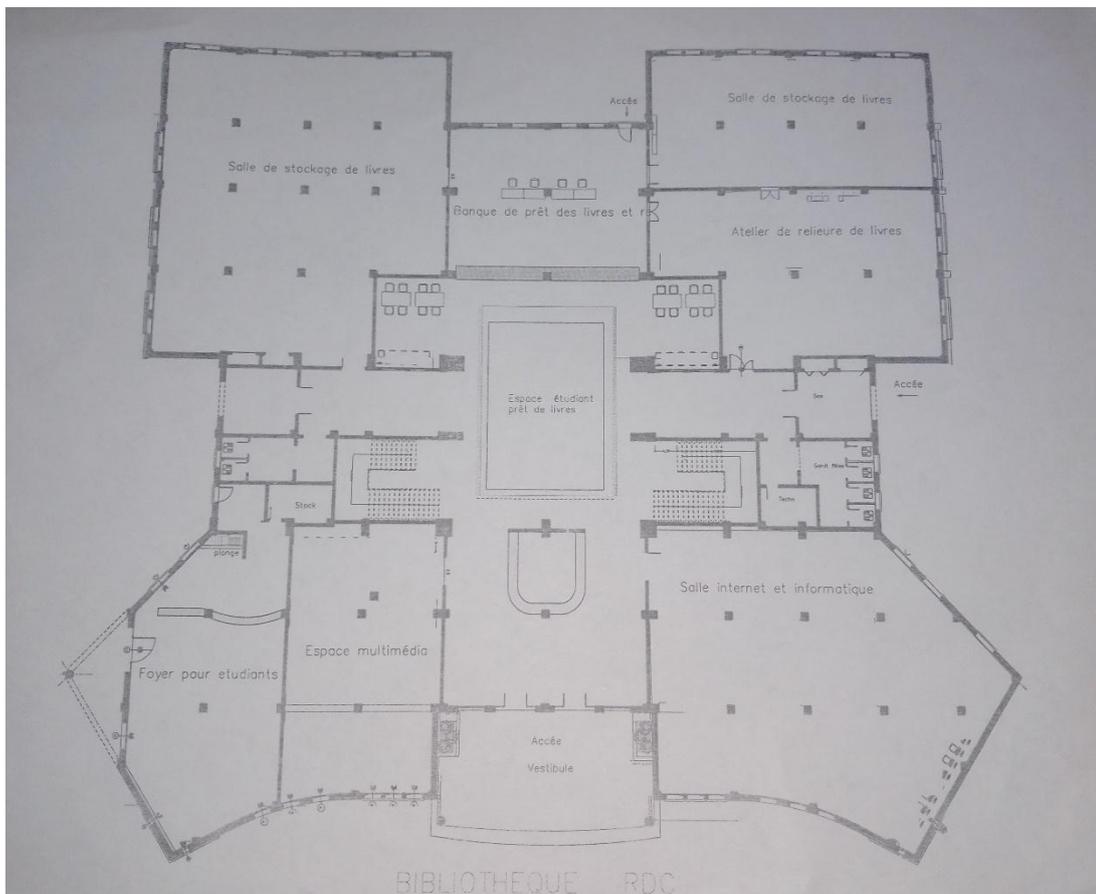


Figure.III.5structure de la bibliothèque niveau RDC

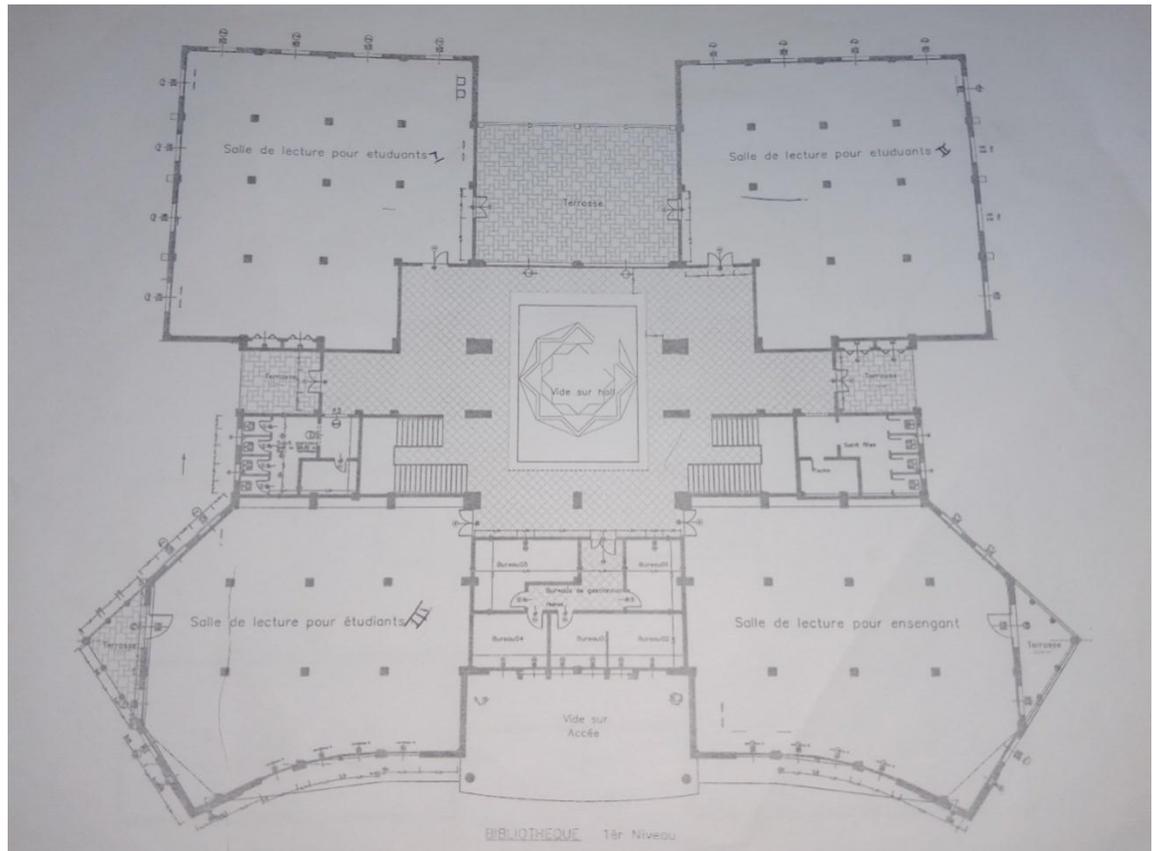


Figure.III.6 Structure de la bibliothèque 1^{ère} niveau.

III.5 Influence de la température et de l'éclairement

La caractéristique d'une cellule PV (ou d'un générateur PV) est directement dépendante de l'éclairement et de la température. Les variations du courant et de la puissance en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairiments à température maintenue constante 25°C, figure III.5, montrent clairement l'existence de maxima sur les courbes de puissance correspondant aux Points de Puissance Maximale P_{max} . Lorsque l'irradiation varie pour une température donnée, le courant de court-circuit I_{cc} varie proportionnellement à l'irradiation. Dans un même temps, la tension de circuit ouvert V_{co} (à vide) varie très peu.

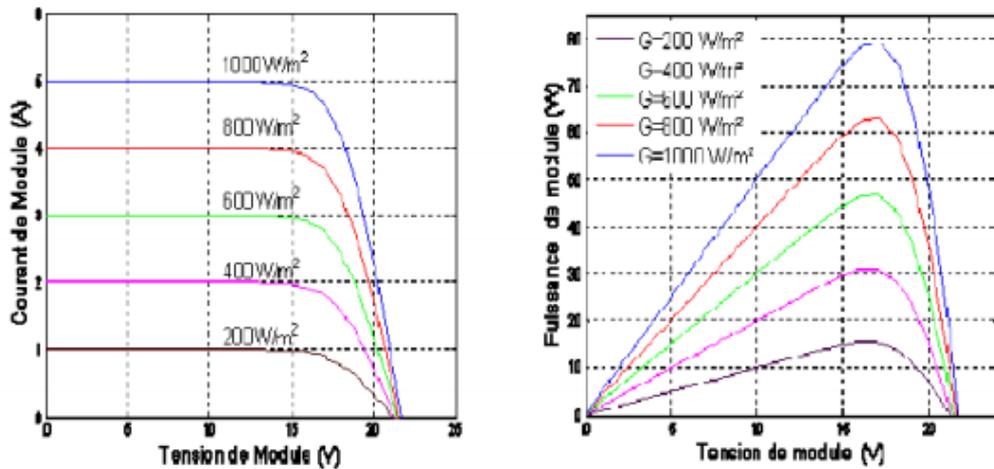


Figure.III.7. Evolution de la caractéristique $I(V)$ (a) et $P(V)$ (b) en fonction de l'irradiation.

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires. La température a également une influence sur la caractéristique d'un générateur PV. La figure III.6 présente la variation des caractéristiques d'une cellule PV en fonction de la température à un éclairement donné. L'éclairement est ici fixé à 1000W.m^{-2} .

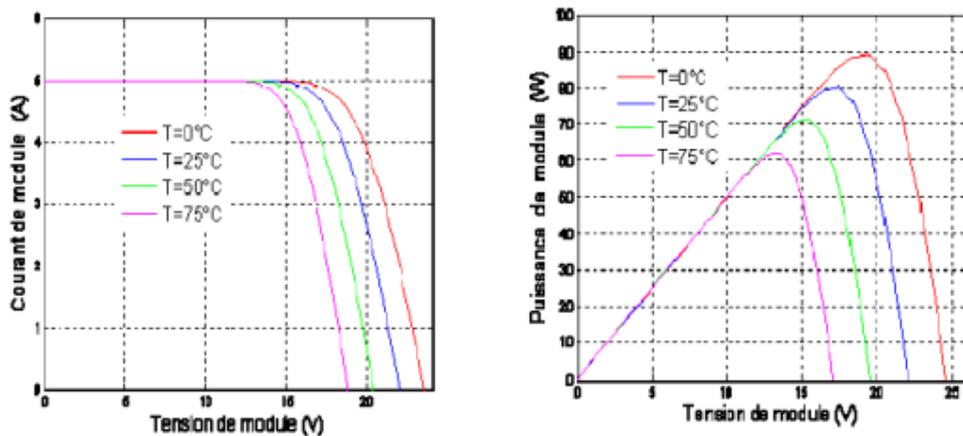


Figure.III.8. Evolution de la caractéristique $I(V)$ (a) et $P(V)$ (b) pour différentes températures.

Par contre, si la température croît à irradiation constante, la tension à vide V_{co} décroît avec la température. Plus la température est élevée plus V_{co} est faible et le courant de court-circuit I_{cc} augmente avec la température. Cette hausse est nettement moins importante que la baisse

Chapitre III : Résultats de simulation et discussion

de tension. L'influence de la température sur I_{cc} peut être négligée dans la majorité des cas. La température et l'éclairement sont donc les deux principaux paramètres qui vont modifier la caractéristique d'un générateur PV. Ces deux paramètres devront donc être étudiés avec soin lors de la mise en place d'une installation PV.

III.6 Orientation des modules PV

Vu le prix élevé des modules PV, il est nécessaire de choisir des orientations et inclinaisons favorables à la production d'énergie. Nous avons choisi un plan Incliné fixe par rapport à l'horizontale comme illustre la figure.III.7c'est l'inclinaison optimale donnée par le logiciel PVSYST

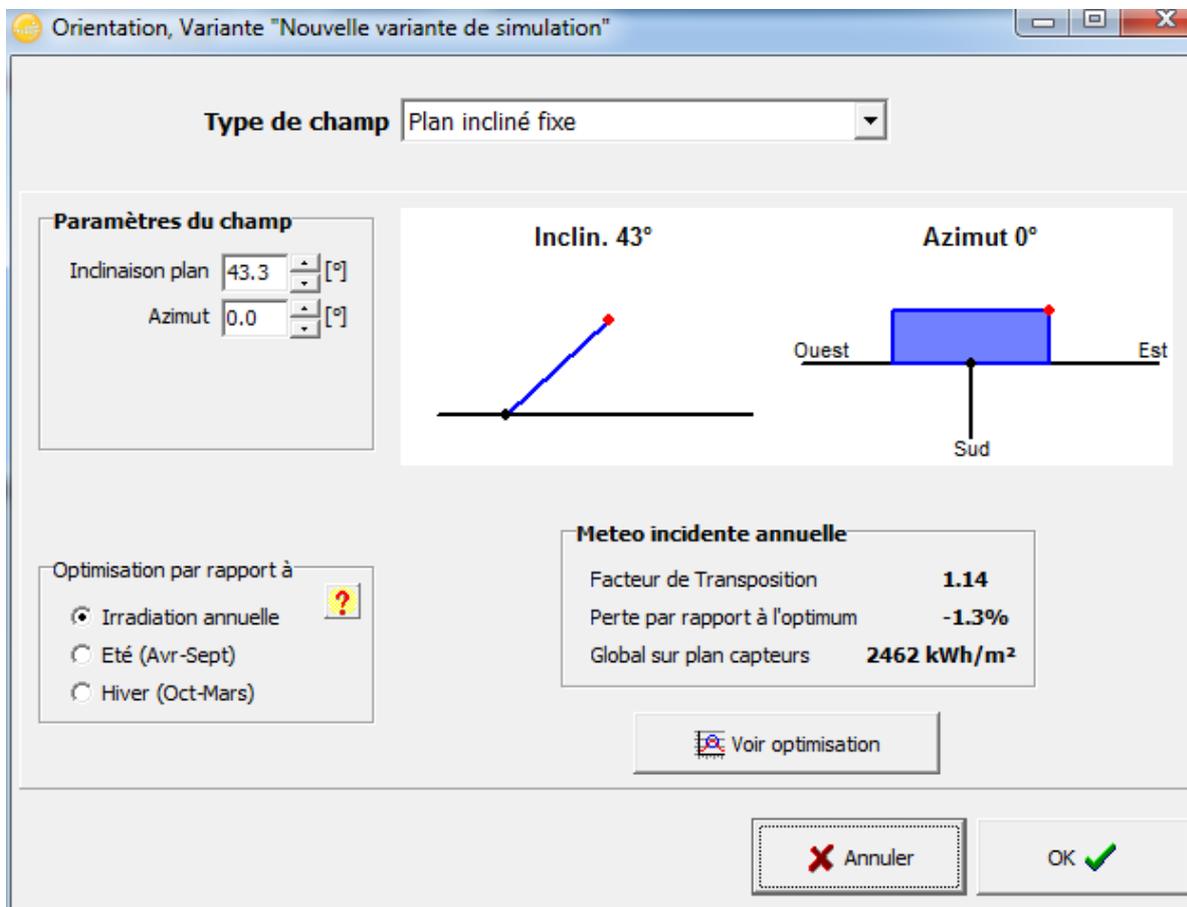


Figure III.9.Orientation et inclinaison du système PV.

III.7 Schéma de l'installation PV raccorde au réseau

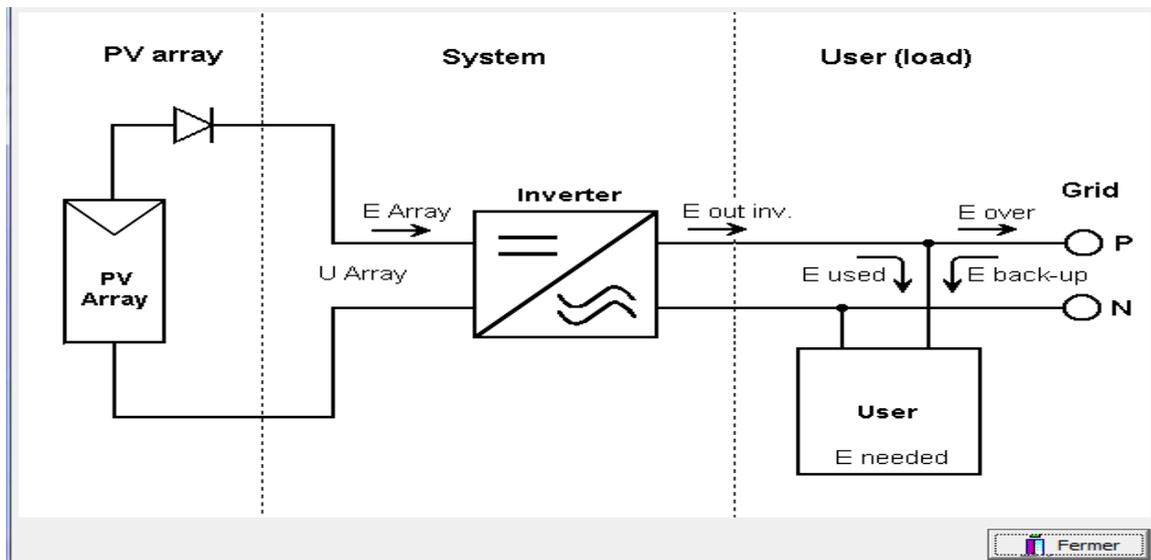


Figure.III.10. Schéma de l'installation PV raccorde au réseau.

III.8 Résultats de simulation

III.8.1 Besoins électriques

The screenshot shows the configuration window for a PV module. The interface includes several tabs: Données de base, Dimensions et Technologie, Paramètres modèle, Données additionnelles, Commercial, and Graphiques. The main configuration area is divided into several sections:

- Données de base:** Modèle (LG 400 N2T-A5), Fabricant (LG Electronics), Nom fichier (LGElectronics_LG400_N2T_A5.PA), Source données (Manufacturer 2017), Base de données PVsyst originale, Prod. depuis 2017.
- Puissance no (aux STC):** 400.0 Wp, Tol. +/- 0.0, 3.0 %, Technologie Si-mono.
- Specifications fabricant ou autres mesures:**
 - Cond. de référence GRef: 1000 W/m², TRef: 25 °C
 - Courant de court-circuit Isc: 10.23 A, Circuit ouvert Vco: 50.50 V
 - Point de Puissance max. Imp: 9.490 A, Vmpp: 42.20 V
 - Coefficient de température muIsc: 3.1 mA/°C, Nbre cellules: 72 en série
 - ou muIsc: 0.030 %/°C
- Résumé du modèle Paramètres principaux:**
 - R parall.: 1500 ohm
 - Rparall(G=0): 3500 ohm
 - R série model: 0.34 ohm
 - R série max.: 0.36 ohm
 - R série apparent: 0.53 ohm
- Paramètres modèle:**
 - Gamma: 1.021
 - IoRef: 0.02 nA
 - μVco: -142 mV/°C
 - muPMax fixé: -0.36 /°C
- Résultats du modèle interne:**
 - Conditions de fonctionnement GOper: 1000 W/m², TOper: 25 °C
 - Point de Puissance max. Pmpp: 402.3 W, de température: -0.36 %/°C
 - Courant Imp: 9.74 A, Tension Vmpp: 41.3 V
 - Courant de court-circuit Isc: 10.23 A, Circuit ouvert Vco: 50.5 V
 - Efficacité / Surf. cellules: 21.63 %, / Surf. module: 19.03 %

Buttons at the bottom include: Voir optimisation, Export vers table, Imprimer, Annuler, and OK.

Figure.III.11. Définition d'un module PV.

Définition d'un système réseau, Variante "Nouvelle variante de simulation"

Définition d'un onduleur pour le réseau

Paramètres principaux | Courbe d'efficacité | Paramètres additionnels | Paramètres de sortie | Dimensions et Technologie

Modèle: Sunny Tripower 20000TLEE-JP Fabricant: SMA

Nom fichier: SMA_Tripower_20000TLEE_JP.OND Base des données: Manufacturer 2015

? Base de données PVsyst originale Prod. depuis 2014

Entrée (CC, Champ PV)

Tension MPP minimale 580 V

Tension min. pour PNom N/A V

Courant d'entrée maximum N/A A

Tension MPP nominale 580 V

Tension MPP maximale 800 V

Tension PV max. absolue 1000 V

Puissance seuil 22 W

Spécification contractuelle, sans réelle signification physique ? Obligatoire

Puissance PV nominale 20.4 kW

Puissance PV maximale 20.4 kW

Courant PV maximum 36.0 A

Sortie (Réseau AC)

Monophasé Fréquence

Triphasé 50 Hz

Biphasé 60 Hz

Tension du réseau 400 V

Puissance AC nominale 20.0 kW

Puissance AC maximale 20.0 kW

Courant AC nominal 29.0 A

Courant AC maximum 29.0 A

Efficacité

Efficacité maximale 98.50 % ?

Efficacité définie pour 3 tensions

Export vers table Imprimer Annuler OK

Figure.III.12. Définition d'un Onduleur pour le réseau.

III.8.2 Simulation des équipements énergétiques

III.8.2.1 Modules et onduleurs

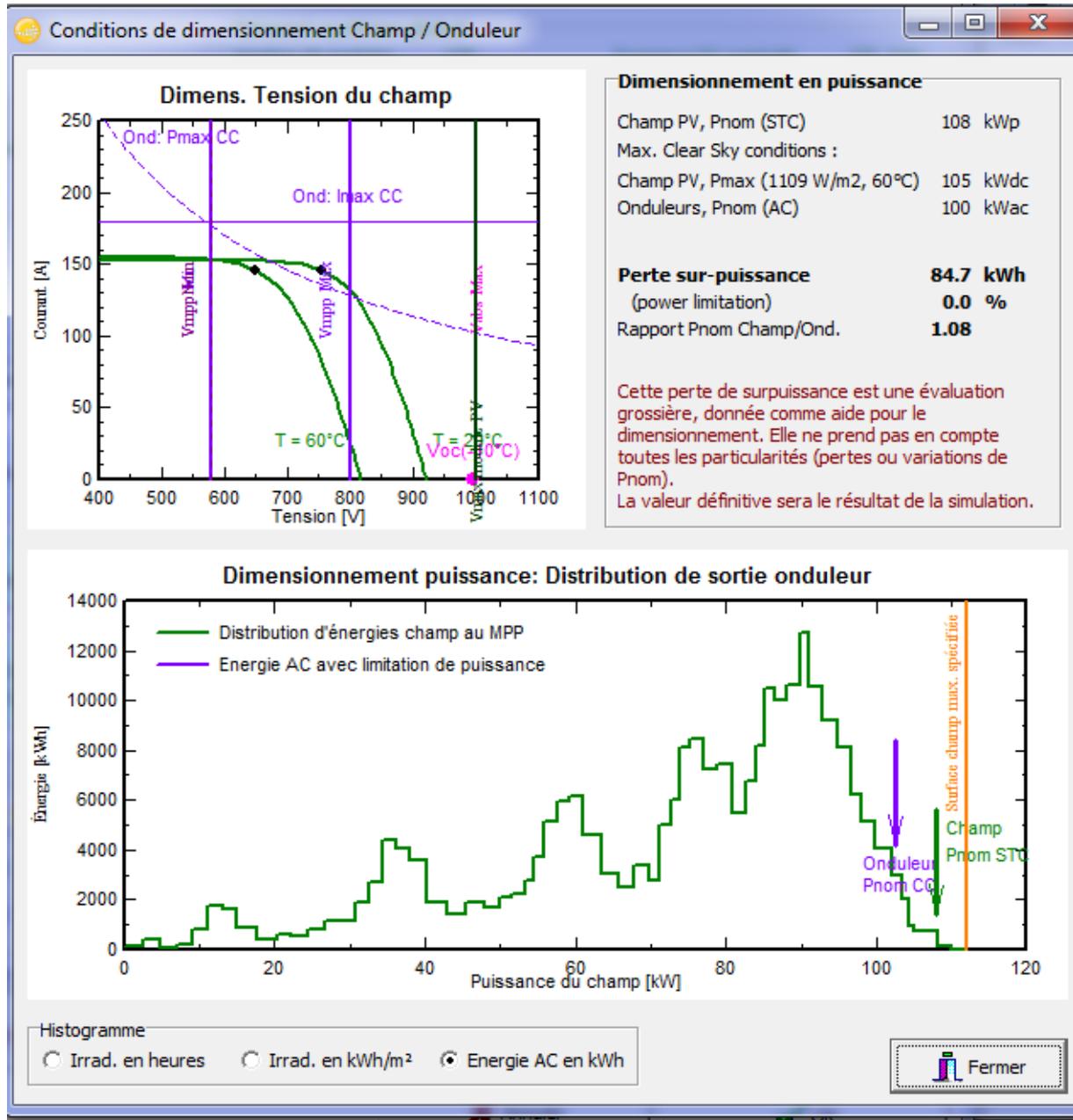


Figure.III.13. Conductions de dimensionnement Champ/ Onduleur.

III.8.2.2 Branchement de PPV

Comme illustré sur la figure (III.12) : le champ PV sera constitué de 270 de modules de 400W/36V (technologie mono Silicium) répartis sur une surface de 571m², comme suit :

- 18 modules en série.
- 15 modules en parallèle.



Figure.III.14. Ensemble du système.

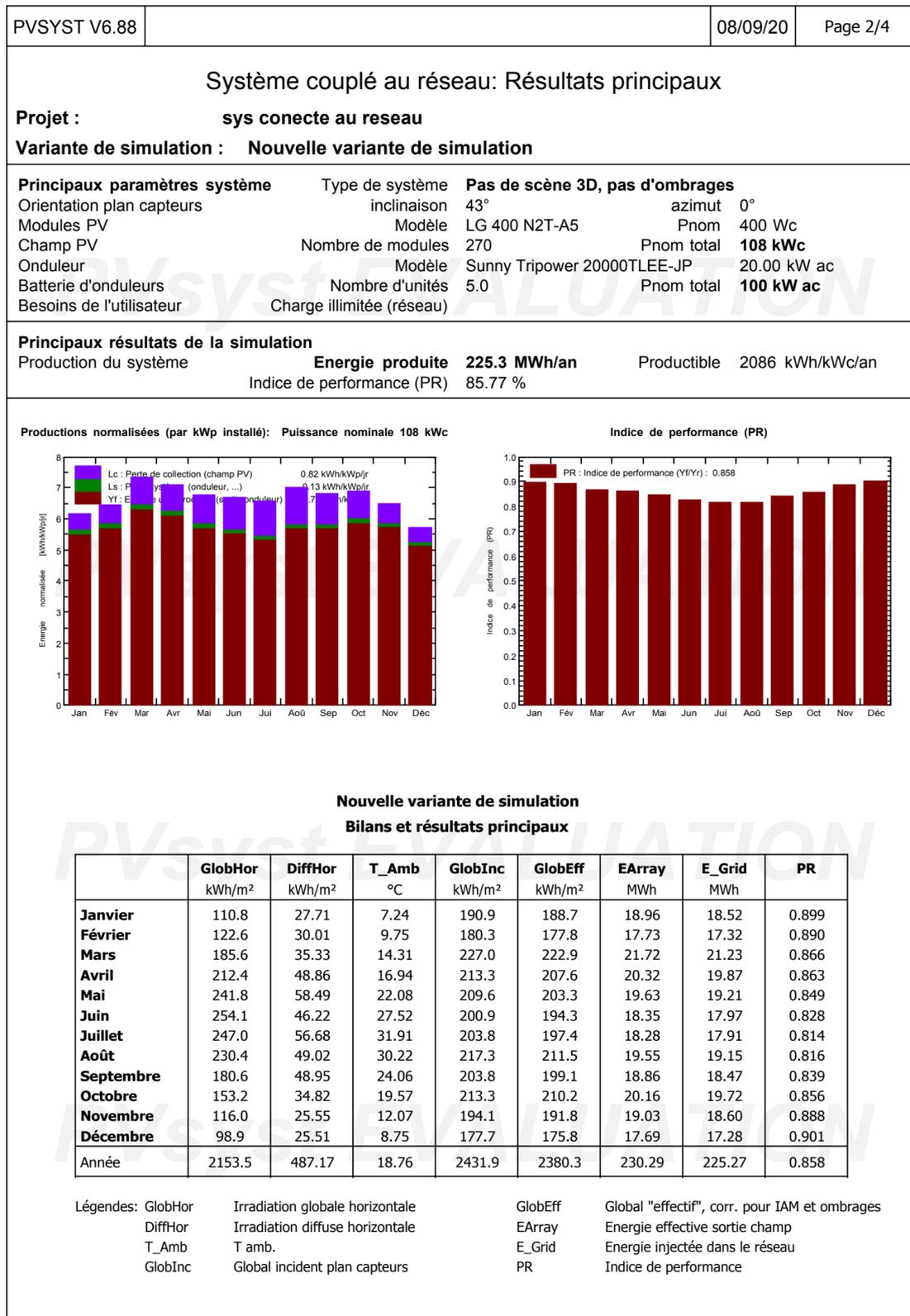
III.9 Rapport de simulation

Après la simulation par le PVSYST de la consommation de bibliothèque scientifique de CUN, on obtient

PVSYST V6.88		08/09/20	Page 1/4						
Système couplé au réseau: Paramètres de simulation									
Projet : sys conecte au reseau									
Site géographique	Naama	Pays	Algeria						
Situation	Latitude 33.26° N	Longitude	-0.32° W						
Temps défini comme	Temps légal Fus. horaire TU+1	Altitude	1168 m						
Données météo:	Naama	Meteonorm 7.2 (1986-2005), Sat=100% - Synthétique							
Variante de simulation : Nouvelle variante de simulation									
	Date de la simulation	08/09/20 à 13h04							
Paramètres de simulation	Type de système	Pas de scène 3D, pas d'ombrages							
Orientation plan capteurs	Inclinaison	43°	Azimut 0°						
Modèles utilisés	Transposition	Perez	Diffus Perez, Meteonorm						
Horizon	Pas d'horizon								
Ombrages proches	Sans ombrages								
Besoins de l'utilisateur :	Charge illimitée (réseau)								
Caractéristiques du champ de capteurs									
Module PV	Si-mono	Modèle	LG 400 N2T-A5						
Base de données Pvsyst originale	Fabricant	LG Electronics							
Nombre de modules PV	En série	18 modules	En parallèle 15 chaînes						
Nombre total de modules PV	Nbre modules	270	Puissance unitaire 400 Wc						
Puissance globale du champ	Nominale (STC)	108 kWc	Aux cond. de fonct. 98.8 kWc (50°C)						
Caractéristiques de fonct. du champ (50°C)	U mpp	677 V	I mpp 146 A						
Surface totale	Surface modules	571 m²	Surface cellule 502 m²						
Onduleur	Modèle	Sunny Tripower 20000TLEE-JP							
Base de données Pvsyst originale	Fabricant	SMA							
Caractéristiques	Tension de fonctionnement	580-800 V	Puissance unitaire 20.0 kWac						
Batterie d'onduleurs	Nbre d'onduleurs	5 unités	Puissance totale 100 kWac						
			Rapport Pnom 1.08						
Facteurs de perte du champ PV									
Fact. de pertes thermiques	Uc (const)	20.0 W/m²K	Uv (vent) 0.0 W/m²K / m/s						
Perte ohmique de câblage	Rés. globale champ	76 mOhm	Frac. pertes 1.5 % aux STC						
Perte de qualité module			Frac. pertes -0.8 %						
Perte de "mismatch" modules			Frac. pertes 1.0 % au MPP						
Perte de "mismatch" strings			Frac. pertes 0.10 %						
Effet d'incidence (IAM): Fresnel, anti-reflets, n(verre)=1.526, n(AR)=1.290									
	0°	30°	50°	60°	70°	75°	80°	85°	90°
	1.000	0.999	0.987	0.962	0.892	0.816	0.681	0.440	0.000

Pvsyst Evaluation mode

Figure.III.15. Paramètres de la simulation.



PVsyst Evaluation mode

Figure.III.16. résultats principaux de la simulation.

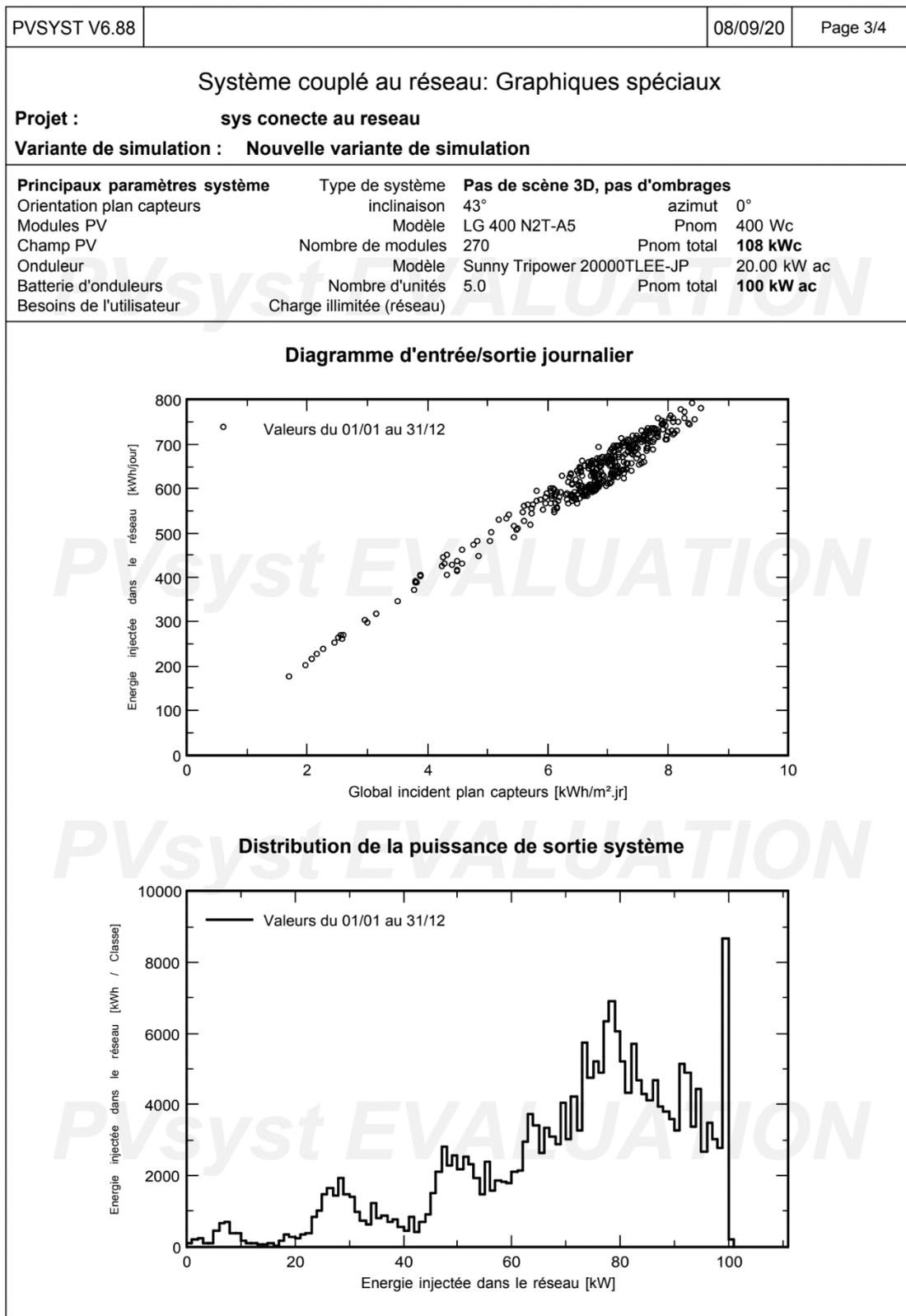
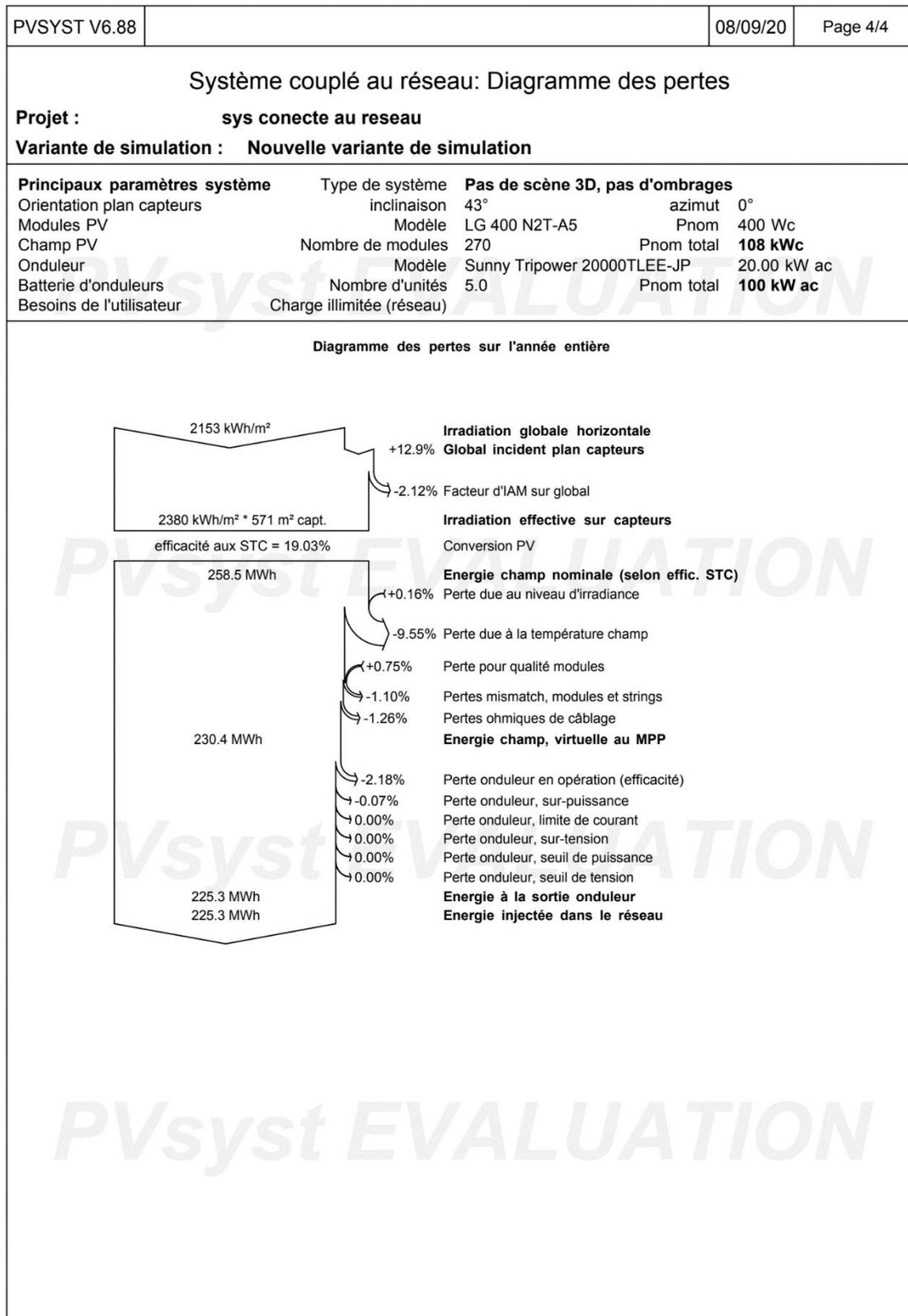


Figure.III.17. Graphiques spéciaux de la simulation.



PVsyst Evaluation mode

Figure.III.18. Diagramme des pertes de la simulation.

III.10 Résultats Discussion

Notre travail présente une installation PV raccordée au réseau réalisée par logiciel PVSYS qu'il aide nous pour déterminer une bonne installation dans un espace spécifique bibliothèque technique.

En a déterminé cette installation par les étapes suivantes :

- Déterminer le site géographique de notre ville.
- Choisir de module PV modèle LG 400W 36V Si-mono
- Choisir le type de l'onduleur SMA.
- Entrer puissance nominale 112.5 kW.

Après la simulation il donne un résumé global de l'installation qui contient nombre de modules installés 18 modules en série et 15 en parallèle et 05 onduleurs.

Le rapport de cette simulation affiche les Paramètres de la simulation et les résultats principaux, Graphiques spéciaux de l'entrée et la sortie d'onduleur aussi le Diagramme des pertes de la simulation.

III.11 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le rapport de simulation par logiciel PVSYS. Ainsi leur dimensionnement qui couvre les besoins de notre installation on aura besoin de 270 panneaux PV de 400 W, et 05 onduleurs. Pour l'alimentation énergétique de la bibliothèque Technique de CUN.

Conclusion générale

Conclusion

La Wilaya de NAAMA est située dans le nord-ouest de l'Algérie, qu'est connue par ses bons calibrages climatiques pour produire l'énergie électrique à partir de l'énergie solaire.

Un système PV est un système générateur d'électricité pour répondre à des besoins énergétiques.

Nous avons présenté les notions fondamentales concernant le principe de l'effet photovoltaïque, le potentiel solaire et les différentes technologies des cellules solaires.

En suite notre installation est raccordée au réseau quand le champ PV ne fonctionne pas à cause des conditions climatiques.

Le réseau ici joue le même rôle, il alimente et fournit l'énergie électrique à la bibliothèque CUN.

Nous avons présenté les différentes méthodes de dimensionnement d'un système PV.

Nous avons fait notre étude par la méthode simplifiée en utilisant le logiciel PVSYST appliqué sur la bibliothèque Technique de CUN SalhiAhmedNaama. Le dimensionnement à l'aide du logiciel PVSYST a pour objet de couvrir les besoins de notre installation.

Finalement, on peut dire que les systèmes PV raccordés au réseau peuvent jouer un rôle très important en apportant une solution réellement économique pour couvrir les besoins énergétiques de notre installation.

Bibliographie

Bibliographie

Bibliographie

- [1] MEZIANI Fariza, « Détermination du gisement solaire par traitement d'image MSG », UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU, mémoire de magister.
- [2] Stéphane VIGHETTI, « Systèmes Photovoltaïques Raccordés Au Réseau : Choix Et Dimensionnement Des Etages De Conversion », Université De Grenoble, Thèse De Doctorat Soutenu Le24/09/2010.
- [3] BorniAbdelhalim, «Etude Et Régulation D'un Circuit D'extraction De La Puissance Maximale D'un Panneau Solaire», Université Mentouri De Constantine, mémoire de Magister Soutenu le : 05/05/2009
- [4] Bendjellouli Zakaria, « Contribution A La Modélisation D'une Cellule Solaire », Université De Bechar, Mémoire De Magister Soutenu Le28/06/2009.
- [5] KonradMertens, Photovoltaic: fundamentals, technology, and practice, Chichester, Wiley, 2014, 280 p.
- [6] T.M. Razykov, « Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects », Solar Energy, 2011, p. 1580–1608.
- [7] « De nouvelles molécules photovoltaïques minimalistes et efficaces », sur cnrs.fr, 17 juin 2013 (consulté le 10 mai 2017).
- [8] http://tecsol.blogs.com/mon_weblog/2018/09/les-prix-poursuivent-leur-baisse-pour-les-projets-solaires-laur%C3%A9ats-des-ao-sur-b%C3%A2timent-et-en-autoco.html
- [9] http://tecsol.blogs.com/mon_weblog/2018/08/appel-doffres-cre-44-les-quatre-projets-Valorem-sont-laur%C3%A9ats.html.
- [10] C, Fröhlich.1978: World radiometric reference. World Meteorological Organization, Commission for instruments and methods of observation, report WMO 490, p 108-112.
- [11] Charles Chauliaguet : L'énergie solaire dans le bâtiment, Editions Eyrolle 1981 P22, 32 et p147-148
- [12] J, Bernard. Energie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing. (2004).
- [13] Yves Jannot. Thermique solaire. Paris (2007).
- [14] HADJ BELKACEMI Mohammed, « Modélisation et Etude Expérimentation d'un Capteur Solaire non Vitré et Perforé ». , Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, Mémoire de

Bibliographie

Master Soutenu le 06 juillet 2011.

- [15] Michel Dagueneat : les séchoirs solaires : théorie et pratique, Unisco, paris ; 1985.
- [16] Pierre Henri Communay : Héliothermiques ; Le gisement solaire Méthodes et calculs. Groupe de Recherche et d'Édition-2002.
- [17] M. Capderou, Atlas solaire de l'Algérie, Tome 1, Vol. 1 et 2 ; OPU, 1987.
- [18] A. Mefti ; M. Y Bouroubi ; H. Mimouni, Evaluation du potentiel énergétique solaire, Bulletin des Energies Renouvelables, N°2, P12, décembre 2002.
- [19] Emery, K.; Burdick, J.; Caiyem, Y.; Dunlavy, D.; Field, H.; Kroposki, B.; Moriarty, T.; Ottoson, L.; Rummel, S.; Strand, T.; Wanlass, M.W.; Temperature dependence of Photovoltaic cells, modules and systems Photovoltaic Specialists Conference, 1996, Conference Record of the Twenty Fifth IEEE, Page(s):1275 – 1278, 13-17 May 1996.
- [20] William Shockley and Hans J. Queisser; « Detailed balance limit of efficiency of P-N Junction solar cells »; J. APPL. PHYS. 32, 510; DOI:10.1063/1.1736034, (1961).
- [21] Zaouk, D.; Zaatat, Y.; Khoury, A.; Llinares, C.; Charles, J.-P.; Bechara, J.; Ajaka, M.; « Electrical and optical characteristics of NAPS solar cells of Si (PiN) structure », Environment and Solar, Page 93 – 95, 2000 Mediterranean Conference for 16-17 Nov. 2000.
- [22] A. Souici, « Physique des Semi-conducteurs », Cours de l'université de Béjaia, Algérie, (2013-2014).
- [23] A. Bensaada, « Technologie des semi-conducteurs », Livre, Université d'Oran, Alger.
- [24] F. baccar el boubkari. « Evaluation des mécanismes de défaillance et de la fiabilité d'une Nouvelle terminaison haute tension : approche expérimentale et modélisation associée », Thèse de doctorat, université de bordeaux, 1 décembre 2015.
- [25] Van Overstraeten, R. J. ET R. P. Mertens, « *Solid State Electron* ». 30, 1077- 1087, (1987).
- [26] L. Lasne, « *Physique et technologie des composants de puissance* », de Bordeaux, 2001.
- [27] Stéphane VIGHETTI, « Systèmes Photovoltaïques Raccordés Au Réseau : Choix Et Dimensionnement Des Etages De Conversion », Université De Grenoble, Thèse De Doctorat Soutenu Le 24/09/2010.
- [28] Akassewa Tchapo SINGO, « Système D'alimentation Photovoltaïque Avec Stockage Hybride Pour L'habitat Énergétiquement Autonome », Université Henri Poincaré, Thèse De Doctorat Soutenu Le 3/02/2010
- [29] Professeur : J-J. PIREAUX, « Travail Sur Les Panneaux Photovoltaïques ». Université

Bibliographie

Notre- Dame De La Paix, Article :Année2006-2007.

[30] Abbassen Lyes, « Etude De La Connexion Au Réseau Electrique D'une Centrale Photovoltaïque ». Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, Mémoire De Magister Soutenu Le05/05/2011.

[31] Anne Labouret, Michel Viloz, **Energie solaire photovoltaïque, Paris** :Dunod, Le Moniteur, 3 éme Édition, 2006,352 pages

[32] BorniAbdelhalim, «Etude Et Régulation D'un Circuit D'extraction De La Puissance Maximale D'un Panneau Solaire», Université Mentouri De Constantine, mémoire de Magister Soutenu le : 05/05/ 2009.

[33] MOHAMED ARROUF, « Optimisation De L'ensemble Onduleur, Moteur Et Pompe Branche Sur Un Générateur Photovoltaïque ». , Université Mentouri De Constantine, Thèse De Doctorat Soutenu Le25/12/2007.

[34] HalouaneAssia, « Modélisation du transfert radiatif dans les strates supérieures d'un Module photovoltaïque ».Université M'HAMED BOUGARA BOUMERDES, Mémoire de Master soutenue 2017.

[35] Zhao J., Wang A., Altermatt P.P., Wenham S.R., Green M.A. "24% efficient silicon solar cells".Photovoltaic Energy Conversion.Conference Record of the Twenty Fourth.IEEE Photovoltaic Specialists Conference - IEEE First World Conference, Volume 2, 5-9 Dec. 1994 Page(s):1477 - 1480 vol.2.

[36] Zhao J., Wang A., Campbell P., Green M.A. "A 19.8% efficient honeycomb multicrystalline silicon solar cell with improved light trapping". Electron Devices, IEEE Transactions, Volume 46, Issue10, Oct.1999, Page1978–1983.

[37] Luque, S. Hegedus. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering (second edition). John Wiley and Sons, 2011.

[38] R. Khezzar et al. « Comparaison entre les différents modèles électriques et détermination Des paramètres de la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque ». Revue des Energie Renouvelables Vol.13 N° 3, pp 379-388, 2010

[39] https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9seau_%C3%A9lectrique

[40] J.C.Hermondez, P.G. Vidal and G. Almonacid "Photovoltaic grid connected buildings.Sizing and economic Analysis" Renewable Energy 15 (1998) pp : 562-565.

[41] C. eskander and E. Scerri "Interfacing a Solar Photovoltaic System with the National Elictricity Grid in Malta" Renewable Energy 15 (1998) Pp.: 578-580. [35] Paul D.

[42] Maycock "Cost Reduction in PV manufacturing Impact in Grid-connected and Building Integrated Markets" Solar Energy Materials and Solar cells 47 (1997) Pp.: 37-45

Bibliographie

- [43] M. Ohnishi and A. Takeoka “Advanced photovoltaic Technologies and Residential Applications” *Renewable Energy*, Vol. 6, No. 3 (1995) Pp: 275-282.
- [44] A. Payne, R. Duke and R. H. Williams “Accelerating residential PV expansion: Supply Analysis for competitive electricity markets” *Energy Policy* 29 (2001) Pp: 787-799.
- [45] E. D. Spooner and G. Harbidge “Review of international standards for grid-connected photovoltaic systems” *Renewable Energy* 22 (2001) pp : 235-239.
- [46] E. Wiemken, H. G. Beyer, W. Heydenreich and K. Kiefer “Power characteristics of PV Ensembles: experiences from the combined power production of 100 grid-connected PV Systems distributed over the area of Germany” *Solar Energy*, Vol. 70, No. 6 (2001) PP.513-518.
- [47] https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/energy/pdf/solar-Photovoltaic/NRCan_BIPV_Factsheet_FR.pdf
- [48] F. Bouchtoucheherfa «Etude et réalisation d’une centrale photovoltaïque connectée au Réseau de distribution électrique BT». Mémoire de magister, Ecole National Polytechnique Elharach, 2004.
- [49] ChuenChien “Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller, part I” *IEEE Transactions on System Mann. AndcyriRsetrs*, Vol. 20 No. 2, March/April 1990 Pp: 405-417.
- [50] W. Maranda, G. De Mey and A. Evost “Optimisation of the Master –Slave inverter System For Grid-Connected Photovoltaic Plants” *Energy convers. Mgmt Vol. 39, No. 12, Pp: 1239-1246, 1998.*
- [51] I.H. Atlas, A.M. Sharaf “A Novel Fuzzy Logic Controlleur for Maximum Power Extraction From a PV array Driving a three Phase Induction Motor” *IEEE Transactions on Conversion Energy* 1994 Pp: 853-856.
- [52] H. M Mashaly and all “Fuzzy Logic Controller for Photovoltaic-Utility Interfacing Scheme” *IEEE Transactions on Energy* 1994 Pp: 715-718.
- [53] NDIAYE Modou, « conception et optimisation d’un modèle d’électrification hybride Raccordé au réseau de distribution de la SENELEC application à la résidence hôtelière MOUNA NDAYANE », Diplôméd’ingénieur de conception (2002/2003).
- [54] ZERROUKI Zolikha et BEREKSI REGUIG Rym «Dimensionnement d’un système Photovoltaïque autonome », Mémoire de master, Université Abou BakrBelkaid de Tlemcen (2016 / 2017).

Bibliographie

- [55] SEMAOUI Smaïl, « Etude de l'électrification d'un village avec de l'énergie solaire Photovoltaïque », Mémoire de Magister, Université de Ouargla (23 /06/ 2004).
- [56] ZIDANE Ammar, «Etude et dimensionnement d'une installation photovoltaïque au Niveau d'un puits de gaz» Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira de Bejaïa (Promotion Juin 2012).
- [57] IAMARENE Samir «Dimensionnement d'une installation photovoltaïque pour un site (BTS, BSC) du réseau télécom wania», Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira de Bejaïa (19/09/2012)
- [58] BENCHERIF Mohammed, « Modélisation de systèmes énergétiques photovoltaïques et Éoliens intégration dans un système hybride basse tension », Thèse de doctorat, Université Abou-BakrBelkaïde de Tlemcen.
- [59] B.ChIKH-BLED, I.SARI-ALI Et B. BENYOUCEF, Revue Internationale technique, « Méthode de dimensionnement optimal d'une installation photovoltaïque », N° 41 (2010)25-30, Université Abou-BakrBelkaïd, Faculté des Sciences
- [60] DHAKER Abbas, « Contribution au dimensionnement et à l'optimisation des systèmes Hybrides éoliens-photovoltaïques avec batteries pour l'habitat résidentiel autonome », Thèse de Doctorat, Université de Poitiers (20 juin 2012), Disponible sur Internet.
- [61] DJILAT Zahra BOURAS Sarra Méthodes de dimensionnement d'un système Photovoltaïque, application à la région de M'sila mémoire de master 2018/2019
- [62] http://bibfac.univ-tlemcen.dz/bibfs/opac_css/doc_num.php?explnum_id=277
- [63]MERAD Souheyla née MAMOUN, « Dimensionnement d'une Installation Photovoltaïque d'un lieu peu fréquenté : Cas d'un Cabanon Situé à Marsat Ben M'Hidi (TLEMEN) », Mémoire de Master, Université Abou-BakrBelkaïde Tlemcen, 8 Juin 2010.
- [64] BOUKHLIF Hamza, « Dimensionnement technique d'une installation photovoltaïque De 300kw », Mémoire de Master, Université M'hamedBougara de Boumerdes, promotion juin 2017.
- [65]Mekki ADDOU et Abderrahim BEDDIAF Dimensionnement d'une installation Photovoltaïque autonome pour l'alimentation d'une ferme MEMOIRE de MASTER 2016,
- [66]MATALLAH Sorya, «Dimensionnement et simulation d'un système photovoltaïque pour Alimenter un habitat dans la wilaya d'Ouargla», Mémoire de Master, Université Kasdi Merbahd'Ouargla (07/06/2015).
- [67] SystèmesPV_Polytech_Alain Ricaud_Oct-11.doc

Bibliographie

- [68] COMPRENDRE L'ÉNERGIE SOLAIRE : LES CARACTÉRISTIQUES DES PANNEAUX SOLAIRES. Publié par Philippe Herwegh, le 3 septembre 2015 dans la Catégorie : Sources D'alimentation
- [69] Wernher Swigers and Johan H.R. Enshin "An integrated Maximum Power Point Tracker For Photovoltaic Panels" Press Poly techniques et Universitaires Romandes 1999.
- [70] Noureddine Golea "Commande par la logique floue", Thèse de Magister, université de Sétif 1994.
- [71] M. G. Simoes, N.N. Franceschetti and M. Friedhofer "A Fuzzy logic based Photovoltaic Peak Power tracking Controller" IEEE Energy Convers. Mgmt 1998 Pp.: 300-305.
- [72] J. H. R. Enslin and all "Integrated Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Converter" IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 44, No. 6 December 1997 Pp: 769-773.
- [73] ALLAOUA Ferhat ALBANE Amirouche implémentation d'une stratégie de contrôle D'un système hybride (Photovoltaïque Diesel) 2011/2012
- [74] M. KARA Abdelfattah Dimensionnement et analyse du coût d'un système hybride de Production d'énergie renouvelable pour des sites isolés en Algérie
Mémoire de Master UNIVERSITE FERHAT ABBAS –SETIF/2014 1
- [75] MOSTAHSINE Smail, «Etude comparatif de panneaux solaires photovoltaïques à Ifrane»,
Rapport de licence, Université Sidi Mohammed Ben Abdellah 16 Jin 2015
- [76] <http://www.afriquescience.info>.
- [77] <http://solardat.uoregon.edu/SunChartProgram.html?fbclid=IwAR3ZscCaA05i9LfbqVFayIbGZSAdgN1hBoy-94ItjPCPFT00fM-1Tdp0DhY>