الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
المركز الجامعي لعين تموشنت
Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent
Institut de Technologie
Département de Génie Electrique

Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Domaine : SCIENCE ET TECHNOLOGIE
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Commande Des systèmes Electriques
Thème

Etude et réalisation d'un système de production d'énergie électrique par des panneaux photovoltaïques

Présenté Par :
1) HADJ ABDERRAHMANE Mohammed El Amine
2) GHEZZAL Mohammed Walid

Devant les jurys composés de :

Mr. AYACHE Zouaoui	MAA	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Président
Mr.FATMI Moulay	MCB	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Examinateur
Mr.FLITI Mohammed	MCB	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant

Année universitaire 2016/2017

Avant propos

Nous remercions ALLAH le tout-puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience pour mener à terme ce présent travail.

Nous tenions à remercier vivement notre encadreur, Mr FLITI Mohammed pour sa gentillesse, sa disponibilité et sa contribution générale a l'élaboration de ce travaille

Nous remercions par ailleurs vivement les membres du jury de nous avoir fait l'honneur de juger notre travail et d'assister à notre soutenance.

Nous exprimons notre reconnaissance et notre sympathie à tous les professeurs qui nous ont enseigné car si nous sommes là aujourd'hui c'est bien grâce à eux. Sans oublier de citer tous nos camarade de la 2ème année master Electrotechnique (option : Commande des systèmes électriques).

Nous remercions tous nos amis et tous ceux qui de près ou de loin nous ont toujours soutenu dans cette aventure.

Dédicace

Avant tout, je tiens à remercier le dieu, et l'unique qui m'offre le courage et la volonté nécessaire pour affronter les différentes difficultés de la vie,

Je dédie ce modeste travail

A mes très chers parents HADJ ABDERRAHMANE MANSOUR et ZENASNI KHALIDA,

Pour leurs sacrifices, leur amour, leur prières et leur soutient.

A mes sœurs Anissa et Fatima

A ma chère famille, petite ou grande, proche ou lointaine.

A mes chers cousins et cousines sans oublier Abdel Illah

A tous mes amis,

Sans qui la vie me semblerait bien fade, je vous souhaite la prospérité et le succès,

Et a tous ceux qui nous ont assisté dans la réalisation et le bon déroulement de ce travaille.

Amine

Dédicace

Avant tout, je tiens à remercier le dieu, et l'unique qui m'offre le courage et la volonté nécessaire pour affronter les différentes difficultés de la vie,

Je dédie ce modeste travail

A mes parents Brahim et Fatima

A mon frère Ilyes, et mes sœurs Imene et Khadidja

A toute ma famille.

A mes amis et mes collègues de la promotion 2017 « génie électrique ».

A Tous mes chers amis, tous ceux que j'aime et me sont très chers.

Et a tous ceux qui nous ont assisté dans la réalisation et le bon déroulement de ce travaille.

Walid

Nomenclatures

PV	photovoltaïque
D_s	Diamètre de soleil
D_t	Diamètre de la terre
L_{ts}	Distance moyenne soleil- terre
λ	la longueur d'onde
N_s	Nombre des cellules en série
I_{CC}	Courant de court-circuit de la cellule PV
V_{co}	tension en circuit ouvert
V_{coNs}	La somme des tensions en circuit ouvert de Ns cellules en série.
I_{ccNs}	Courant de court-circuit de Ns cellules en série.
I_{ccN_P}	La somme des courants de cout circuit de cellule en parallèle
V_{coN_P}	Tension du circuit ouvert de cellules en parallèle.
V_T	$\frac{nKT}{e}$
N_p	Nombre des cellules en parallèle.
R_{ser}	Résistance interne de la cellule.
R_{shu}	la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction
I_{sat}	le courant de saturation
K	la constante de Boltzmann(1,38110$^{-23}J/K$)
T	la température effective des cellules en Kelvin(K)
e	la charge de l'électron (e=1,6 10^{-19} C)
n	le facteur d'idéalité de la jonction (1< n<3)
I_{PV}	le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur
V_{PV}	la tension aux bornes de cette même cellule
I_{ph}	la photo -courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température ou bien courant de (court-circuit)
I_d	Courant qui traverse la diode.
P_{max}	la puissance électrique maximum fournie par la cellule PV
I_{opt}	Le courant optimal
V_{opt}	La tension optimale
FF	facteur de forme
ɳ	Rendement énergétique
P_{inc}	est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des générateurs PV
R	le rendement en (%)

β	l'angle d'incidence en (°).
λ	Longitude
Φ	Latitude
δ	Déclinaison solaire
J	le numéro du jour de l'année compté à partir du 1er janvier, c'est à dire il varie de là 365 ou 366 selon l'année.
H	Angle horaire du soleil
$\mathbf{V_r}$	La vitesse linéaire de rotation à l'équateur.
TSV	(Temps Solaire Vrai) temps repéré de façon que le soleil se trouve au zénith à midi.
TU	(Temps Universel) Le décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich.
TL	(Temps Légal) Temps donné par une montre.
Δt	Correction de l'équation du temps.
h	hauteur du soleil
α	Azimut du soleil
IRGM	l'irradiation journalière moyenne
MDOD	décharge maximale admissible par la batterie
CJM	consommation journalière moyenne
$\mathbf{D_{ns}}$	le nombre de jour d'autonomie
$\mathbf{B_c}$	la capacité de la batterie.
ξ	une mesure de la réflectivité du sol
DC	Courant continu
AC	Courant alternatif

Liste des figures

Chapitre1 *: Principe de fonctionnement d'un système photovoltaïque.*

Figure 1.1 : Carte de l'irradiation globale directe annuelle moyenne en Algérie (période 2002-2011) 8

Figure1.2 : Composants du rayonnement solaire : extraterrestre, global=direct+diffus +albédo 11

Figure1.3: Le spectre du rayonnement solaire 12

Figure 1.4 : atome du silicium 13

Figure 1.5 : Le diagramme énergétique 13

Figure 1.6 : Dopage de type N 14

Figure 1.7 : Dopage de type P 14

Figure 1.8 : La jonction PN 15

Figure1.9 : Configuration des cellules photovoltaïques 15

Figure1.10 : Structure basique d'une cellule solaire 16

Figure1.11 : Principe de fonctionnement d'une pile solaire à jonction PN standard 17

Figure1.12 : Cellule solaire au silicium monocristallin 18

Figure1.13 : Cellules poly-cristallines 19

Figure1.14 : Cellules Couche mince (Amorphe) 19

Figure1.15: Caractéristique courant tension de Ns cellule en série 20

Figure1.16: Caractéristique courant tension de ($\boldsymbol{NP}$) cellule en parallèle 21

Figure1.17 : regroupement mixte des cellules (série et parallèle) 21

Figure1.18 : Schéma équivalent électrique d'une cellule PV 22

Figure1.19: Module photovoltaïque 25

Figure 1.20 : Angle d'incidence sur un module PV 25

Figure 1.21: Rendement des modules PV en fonction de l'angle d'incidence 26

Figure1.22 : Caractéristique I =f (V) d'un module photovoltaïque 26

Figure1.23 : Composants d'un champ de modules PV 27

Figure1.24 : Exemple de la structure d'un système PV autonome 32

Figure 1.25: Schéma des installations photovoltaïques couplées au réseau 33

Chapitre2 : *Dimensionnement d'un système photovoltaïque.*

Figure2.1 : Coordonnés terrestre..... 37

Figure 2.2 : Variation annuelle de la déclinaison du soleil 39

Figure 2.3 : Angle horaire du soleil 40

Figure 2.4 : variation de l'angle horaire (H) en fonction de temps solaire vrai..... 41

Figure 2.5: Repère horizontal 41

Figure2.6: Le mouvement de la terre autour de soleil 43

Figure 2.7 : Choix de l'outil 46

Figure 2.8: Choix du site géographique 46

Figure 2.9 : Choix de l'emplacement du nouveau projet 47

Figure 2.10 : Introduction des cordonnées géographique du site de Ain Temouchent..... 48

Figure 2.11 : Trajectoire du soleil à Ain Temouchent 48

Figure 2.12 : Coordonnées météorologique de Ain Temouchent (irradiation globale, rayonnement diffus, température max et la vitesse du vent)..... 49

Figure2.13 : Fenêtre de l'enregistrement des donnés de Ain Temouchent..... 50

Figure 2.14 : Choix du type de projet..... 50

Figure 2.15 : Choix de l'application..... 51

Figure 2.16 : Définition du projet..... 51

Figure 2.17: Choix de l'albédo..... 52

Figure 2.18 : Choix de l'inclinaison du panneau 53

Figure 2.19 : Définition d'ombrages proches 54

Figure 2.20 : Consommation journalière 54

Figure 2.21 : Nombre de module et de batterie..... 55

Figure 2.22 : Les cordonnées du module..... 56

Figure 2.23 : Choix de type du régulateur 56

Figure 2.24: Influence de l'ensoleillement sur la courbe I-V 57

Figure 2.25 : Influence de la température sur la courbe I-V..... 58

Figure 2.26 : Influence de l'ensoleillement et la température sur la courbe P-V 59

Figure 2.27 : Choix de l'inclinaison du panneau 60

Figure 2.28: Production normalisées (par KWp installé). 62

Chapitre3 : *Réalisation d'un prototype d'un suiveur solaire.*

Figure3.1: Un champ de tournesol 66
Figure 3.2: Système de poursuite mono-axial. 66
Figure 3.3 : Système De Poursuite Solaire Bi axial. 67
Figure3.4 : Dessin de la maquette 68
Figure3.5 : Algorithme du contrôle. 69
Figure3.6 : Aperçu général du système. 70
Figure3.7 : Circuit électrique du suiveur proposé. 71
Figure 3.8 : résistance 10 KΩ 72
Figure3.9 : Aperçu d'une photorésistance. 73
Figure 3.10 : Branchement de résistance LDR en diviseur de tension 73
Figure 3.11 : La relation entre l'éclairage et la résistance du LDR 74
Figure3.12: Servomoteur. 75
Figure3.13 : Technique de commande d'un servomoteur 75
Figure3.14 : MLI pour Servomoteur 76
Figure 3.15 : Schéma du circuit imprimé 76
Figure 3.16 : Circuit imprimé 76
Figure 3.17: Schéma représente une carte électronique 77
Figure3.18 : Modulation de largeur d'impulsion ou PWM 79
Figure3.19 : Une fenêtre du programme élaboré 80

LISTE DES TABLEAUX

Tableau1.1 : consistance du programme de développement des énergies renouvelables..... 9

Tableau 2.1: Estimation des besoins énergétiques journaliers……..45

Tableau 2.2 : Coefficients d'albédo usuels. 53

Tableau 2.3 : paramètres généraux de simulation. 60

Tableau 3.1 : marquage des résistances, code des couleurs..... 72

AVANT PROPOS I
Dédicace II
Nomenclatures IV
Liste des figures VI
Liste des tableaux IX
Tables des matières X
Introduction générale 1

Chapitre1 : Principe de fonctionnement d'un système photovoltaïque.

1.1. INTRODUCTION 5
1.2. GENERALITE 5
1.3. HISTORIQUE DU PHOTOVOLTAIQUE 6
1.4. L'ALGERIE ET LE POTENTIEL D'ENERGIE 7
1.4.1. Potentiel Solaire : 7
1.4.2. Projets et actions de la phase 2011-2014 du Programme national des énergies photovoltaïque (2011-2014) 8
1.4.3. Consistance du programme de développement des énergies photovoltaïque(2011-2014) 9
1.5. RAYONNEMENT SOLAIRE 9
1.5.1. Différents composants du rayonnement solaire 10
1.5.1.1. Le rayonnement direct 10
1.5.1.2. Le rayonnement diffus 10
1.5.1.3. Le rayonnement solaire réfléchi ou l'albédo 11
1.5.1.4. Le rayonnement global 11
1.5.2. Spectre du rayonnement 11
1.6. EFFET PHOTOVOLTAIQUE 12
1.7. SEMI-CONDUCTEUR 12
1.7.1. Les semi-conducteurs intrinsèques : 13
Les semi-conducteurs extrinsèques : 13
1.7.2.1. Dopage de type N : 13
1.7.2.2. Dopage de type P : 14

1.7.3. La jonction PN : 14
1.8. CONFIGURATION DES CELLULES PHOTOVOLTAIQUE POUR PRODUIRE DES QUANTITES UTILISABLES DE PUISSANCE 15
1.9. CELLULES PHOTOVOLTAIQUES 15
1.9.1. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque : 16
1.9.2. Synthèse des cellules photovoltaïques 17
1.9.2.1cellules monocristallines : 17
1.9.2.2. Cellules poly-cristallines 18
1.9.2.3. Cellules amorphes 19
1.9.2.4. Autre type des cellules 20
1.9. 3. Regroupement des cellules 20
1.9.3.1. Regroupement en série 20
1.9.3.2. Regroupement en parallèle 21
1.9.3.3. Regroupement (série et parallèle) 21
1.9.4. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque 22
1.9.5. Paramètres d'une cellule photovoltaïque 23
1.9.5.1. Courant de court -circuit (ICC) 23
1.9.5.2. Tension de circuit –ouvert (VCO) 23
1.9.5.3. Facteur de forme 24
1.9.5.4. Rendement énergétique 24
1.10. MODULE PHOTOVOLTAIQUE 24
1.10.1. Ajustement des modules 25
1.10.1.1. L'orientation des modules 25
1.10.1.2. L'angle d'incidence 25
1.10.2. Caractéristique Courant-Tension d'un module photovoltaïque 26
1.11. PANNEAU SOLAIRE 27
1.12. SYSTEME DE STOCKAGE 27
1.12.1. Définition de batterie 28
1.12.2. Fonctionnement des batteries 28
1.12.2.1. Autonomie 28
1.12.2.2. Courant de surcharge 28
1.12.2.3. Stabilisation de la tension 28

1.12.3. Caractéristiques principales d'une batterie 28
1.12.3.1. La tension nominale [19] 28
1.12.3.2. Capacité en Ampère heure 29
1.12.3.3. Rapports de chargement et déchargement 29
1.12.3.4. Température 29
1.12.3.5. La durée de vie 29
1.12.3.6. Profondeur de décharge 29
1.12.3.7. Tension d'utilisation 30
1.12.3.8. Rendement 30
1.12.3.9. Taux d'autodécharge 30
1.13. SYSTEME DE REGULATION 30
1.13.1. Régulation de décharge 30
1.13.2 Régulation de la charge 31
1.14. SYSTEME DE CONVERSION 31
1.14.1 convertisseurs continu-continu 31
1.14.2 convertisseurs continus-alternatif 31
1.15. LA CHARGE 32
1.16. CLASSIFICATION D'UN SYSTEME SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE 32
1.16.1. Système autonome 32
1.16.2. Système hybride 33
1.16.3. Système raccordés au réseau 33
1.17. AVANTAGES ET INCONVENIENTS D'UNE INSTALLATION PV 34
1.17.1. Avantages [15] 34
1.17.2. Inconvénients [15] 34
1.18. CONCLUSION 35

Chapitre2 : *Dimensionnement d'un système photovoltaïque.*

2.1. INTRODUCTION 37
2.2. COORDONNEES TERRESTRES 37
2.2.1. Longitude (λ) 37

2.2.2. Latitude (Φ)..... 38
2.2.3. L'altitude..... 38
2.2.4. Irradiation..... 38
2.3. LES COORDONNEES DU SOLEIL..... 38
2.3.1 Coordonnées équatoriales..... 38
2.3.1.1. Déclinaison solaire (δ)..... 38
2.3.1.2. Angle horaire du soleil (H)..... 40
2.3.2. Coordonnées horizontales..... 41
2.3.2.1. Hauteur du soleil (h)..... 41
2.3.2.2. Azimut du soleil (**α**)..... 42
2.4. MOUVEMENT DE LA TERRE ET LE MOUVEMENT DU SOLEIL ET SES..... 42
2.4.1. Mouvement de rotation..... 42
2.4.2. Mouvement de translation..... 43
2.5. DIMENSIONNEMENT DU GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE..... 43
2.5.1. Estimation des besoins en énergie électrique..... 43
2.5.2. Dimensionnement du parc de batterie..... 44
2.6. DIMENSIONNEMENT D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE A AIN..... 44
2.6.1 Description du logiciel Pvsyst 5.74..... 45
2.6.2 Calcul de la taille du générateur PV et du champ de batteries avec..... 46
2.6.3 Résultats de simulation et interprétation..... 57
2.7. CONCLUSION..... 63

Chapitre3 : *Réalisation d'un prototype d'un suiveur solaire.*

3.1. INTRODUCTION..... 65
3.2. QU'EST-CE QU'UN SUIVEUR SOLAIRE..... 65
3.3. DIFFERENTS SYSTEMES DE POURSUITE SOLAIRE..... 66
3.3.1. Système de poursuite solaire mono axial..... 66
3.3.2. Système de poursuite solaire bi axial..... 66
3.4. INTERET D'UN SUIVEUR SOLAIRE..... 67
3.5. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU SYSTEME..... 68

3.6. PRESENTATION DU MECANISME 69
3.6.1. Aspect mécanique 69
3.6.2. Aspect électrique 70
3.6.2.1. Composants du prototype de suiveur solaire 71
3.7. PROGRAMMATION 79
3.8. CONCLUSION 81

Bibliographie 85
Webographie 88
Résumé 89

Introduction Générale

Les sources d'énergie conventionnelles, obtenues de notre environnement, tendent à épuiser avec une rapidité relative due à ses utilisations irrationnelles par l'humanité. Cette origine incontrôlée des énergies naturelles, certainement mène à un accord avec notre système écologique à l'instabilité. La diminution des sources de pétrole, gaz naturel et sources naturelle de charbon mènent à faire un effort de trouver des nouvelles sources d'énergie pour permettre une réduction dans l'utilisation des sources naturelles de combustible, c'est le but souhaité des pays industrialisés du monde [20] [22].

Le soleil, bien que distant de plus de 150 millions de kilomètres de nous, demeure notre plus grande source d'énergie même si elle est intermittente.

C'est une énergie propre qui n'émet aucun gaz à effet de serre et sa matière première, le soleil, est disponible partout dans le monde, gratuit et inépuisable.

A travers l'effet photovoltaïque l'énergie contenue dans la lumière solaire peut être convertie directement à une énergie électrique. Cette méthode de conversion d'énergie présente quelques avantages parmi lesquelles : la simplicité : en construction modulaire, flexibilité d'utilisation [5], temps court de l'installation et de fonctionnement, régularité élevée et basse maintenance [13]. Dans un autre coté, les systèmes photovoltaïques représentent une source d'énergie électrique silencieuse, sûre, non polluée et renouvelable fortement appropriée pour l'intégration dans les régions urbaines [23].

Les trois genres de systèmes photovoltaïques que l'on rencontre généralement sont les systèmes autonomes, hybrides et connectés à un réseau. Les deux premiers sont indépendants du service public de distribution d'électricité, on les retrouve souvent dans les régions éloignées.

Les systèmes autonomes dépendent uniquement de l'énergie solaire pour répondre à la demande d'électricité. Ils peuvent comporter des accumulateurs qui emmagasinent l'énergie produite par les modules au cours de la journée servant la nuit ou lors des périodes où le rayonnement solaire est insuffisant. Ces systèmes peuvent également répondre aux besoins d'une application (par exemple, le pompage de l'eau) sans recours aux accumulateurs.

Les systèmes hybrides qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité, sont composés d'un générateur photovoltaïque combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible, ou aux deux à la fois. Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée, lorsqu'il n'y a pas assez de lumière solaire à certains moments de l'année, ou si on désire diminuer l'investissement dans les champs de modules photovoltaïques et les batteries d'accumulateurs.

Les systèmes connectés à un réseau sont constitués de modules solaires photovoltaïques reliés entre eux (en série ou en parallèle) et branchés sur un ou plusieurs onduleur(s) eux-mêmes connecté(s) au réseau de distribution ou de transport d'électricité.

Dans ce contexte, notre motivation dans ce travail développé en chapitres est d'optimiser l'énergie fournie par les panneaux photovoltaïques dans le but de maximiser la quantité d'éclairement absorbé par les panneaux photovoltaïques en suivant le mouvement du soleil pendant la journée.

Dans ce mémoire on va dimensionner des installations photovoltaïques avec le logiciel Pvsyst 5.74 Pour se faire nous avons présenté ce manuscrit de la façon suivante :

Dans le premier chapitre, nous décrivons une introduction au système photovoltaïque et leur principe de fonctionnement.

Le second chapitre est consacré au dimensionnement d'un système photovoltaïque par le logiciel Pvsyst 5.74.

Le troisième chapitre est dédié à l'étude et la réalisation d'un prototype d'un suiveur solaire à deux axes.

Chapitre 1

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE

1.1. INTRODUCTION

De nos jours, l'homme a à sa disposition sur la Terre de nombreuses sources d'énergie. Les plus utilisées sont les énergies dites fossiles (charbon, pétrole, gaz) car non renouvelables et issues d'un long processus de transformation de la matière organique, parce qu'elles sont faciles à exploiter, et rentables. Cependant, pour différentes raisons, il s'avère que ces énergies ne peuvent plus être utilisées. Tout d'abord, les réserves d'énergie fossiles commencent à s'amoindrir. Ensuite, en raison de la très forte demande en provenance des pays en voie de développement comme la Chine et l'Inde pour ne pas les citer, les prix de ces énergies ne cessent d'augmenter, les rendant inabordables pour certaines personnes. Et puis, lors de leur utilisation, ces énergies émettent une grande quantité de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone, notamment) qui participent fortement au réchauffement planétaire, qui devient un problème grandissant pour la Terre et les êtres vivants.

De nombreuses énergies non polluantes, ou renouvelables, ou abondantes partout à la surface du globe pourraient pourtant être utilisées par l'homme. Entre autres, on distingue l'énergie éolienne, l'énergie nucléaire, l'énergie hydroélectrique et l'énergie solaire. Mais l'énergie éolienne n'est pas assez rentable, au sens qu'elle ne permet pas de produire beaucoup d'énergie par unité de surface. L'énergie nucléaire, même si elle a un fort rendement, produit des déchets très polluants et peu dégradables. De plus elle fait peur en raison des graves accidents qui peuvent se produire (catastrophe de Tchernobyl), et en raison du risque de prolifération nucléaire. L'énergie hydroélectrique a un bon rendement mais, un fort impact écologique et humain, n'est pas disponible partout, et la plupart des espaces qui lui sont propices sont déjà saturés de barrages.

L'énergie solaire, elle est disponible partout à la surface du globe, en quantité égale dans l'année, et a un bon rendement grâce à la technologie actuelle. Elle est de plus facile à exploiter. Elle semble être l'énergie la plus prometteuse pour l'avenir.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque. L'énergie photovoltaïque est la plus jeune des énergies renouvelables, elle a l'avantage d'être non polluante, souple et fiable.

C'est pour cela que nous avons décidé de l'étudier plus en détail. Mais comment exploiter au mieux cette énergie? Et quels sont les enjeux liés à son utilisation? [W1]

1.2. GENERALITE

Depuis très longtemps, l'homme a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil, étoile la plus proche de la terre. La plupart des utilisations sont directes comme en agriculture, à travers la photosynthèse, ou dans les diverses applications de séchage et de chauffage. Cette

énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre et malgré une atténuation importante lors de la traversée de l'atmosphère, la quantité restante demeure encore importante quand elle arrive au sol. On peut ainsi compter sur 1000 W/m² crête dans les zones tempérées et jusqu'à 1400 W/m² lorsque l'atmosphère est faiblement polluée en poussière ou en eau. Le flux solaire reçu au niveau du sol dépend de:

- L'orientation, la nature et l'inclinaison de la surface terrestre.
- La latitude du lieu de collecte, son degré de pollution ainsi que de son altitude.
- La période de l'année.
- L'instant considéré dans la journée.
- La nature des couches nuageuses.

Ainsi, il existe des zones dans le monde plus favorisées que d'autres du point de vue ensoleillement. Elles sont répertoriées sous forme d'atlas et mettent en évidence des gisements solaires.

Les principaux phénomènes physiques évoqués ci/dessus sont des paramètres à prendre en compte pour l'installation et la maintenance des générateurs photovoltaïques. En effet, le comportement de ces générateurs d'énergie s'avère plus ou moins aléatoire, en fonction du site de mise en fonctionnement. Ainsi, si l'on considère des zones à climat sec et possédant un taux d'ensoleillement important dans l'année, le flux solaire peut être facilement modélisable et prévisible en fonction des heures de la journée et des jours de l'année. Le fonctionnement des générateurs photovoltaïque (PV) est alors souvent proche de celui estimé. Si, au contraire on considère des zones plus défavorables, souvent ventées et présentant un temps nuageux alternant avec des périodes d'ensoleillement sur plusieurs journées par an, l'irradiation change rapidement et dans de larges proportions.

Il est alors difficile de faire des prédictions fines sur le taux d'irradiation sur un lieu et une heure précise. Des relevés expérimentaux ont montré des changements d'ensoleillements importants inférieurs à 10s, pouvant se produire plusieurs fois par minute. Dans ce cas très défavorable, l'exploitation du gisement solaire devient plus difficile par des générateurs PV, qui doivent tenir compte de cette réalité.

De même, prenons le cas d'un site présentant des zones d'ombres liées à des infrastructures ou des reliefs naturels. Le comportement du générateur PV ne va plus être homogène et va souvent présenter des comportements dégradés qu'il faudra soit éviter, soit prévenir. La production d'énergie est dans ce cas souvent bien dégradée. Enfin, il ne faudra pas négliger des changements brutaux du point de fonctionnement directement lié au comportement de la charge sur laquelle le générateur PV doit débiter [8].

1.3. HISTORIQUE DU PHOTOVOLTAIQUE

Découvert en 1839 par Antoine Becquerel et expliqué par Albert Einstein en 1905 (c'est pour cette explication qu'il a reçu le prix Nobel de Physique en 1921). L'effet photovoltaïque permet la transformation de l'énergie lumineuse en électricité. Ce principe

repose sur la technologie des semi-conducteurs. Il consiste à utiliser les photons pour libérer les électrons et créer une différence de potentiel entre les bornes de la cellule qui génère un courant électrique continu.

L'utilisation des cellules solaires débute dans les années quarante. Le domaine spatial a besoin d'une énergie sans combustible embarqué. La recherche s'intensifie sur le photovoltaïque.

En 1954 est créée par les laboratoires BELL la première cellule photovoltaïque avec un rendement de 4%.

Le spatial devient le banc d'essai de la technologie photovoltaïque. Les coûts de fabrication élevés des cellules et leurs rendements médiocres ne leur permettent pas encore une exploitation à grande échelle. Il faudra attendre les années 70 pour que les gouvernements et les industriels investissent dans la technologie photovoltaïque.

Au cours des années 80, la technologie photovoltaïque terrestre a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales de quelques mégawatts, et est même devenue familière des consommateurs à travers de nombreux produits de faible puissance y faisant appel : montres, calculatrices, balises radio et météorologiques, pompes et réfrigérateurs solaires [W2].

Le progrès des techniques de production de cellules photovoltaïques ainsi que l'augmentation des volumes de production ont entrainé, à partir des années 1990, une baisse des prix. La production de modules se fait en Chine (près de 60 % de la production totale), au Japon, aux EU, en Allemagne et en Europe, avec en particulier des grandes compagnies comme Yingli Green Energy, First Solar et Suntech Power. La production mondiale de modules photovoltaïques est passée de 5 MWc en 1982 à plus de 18GWc en 2013[W3] [2].

1.4. L'ALGERIE ET LE POTENTIEL D'ENERGIE

1.4.1. Potentiel Solaire :

Vue de sa localisation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaire les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara).

L'énergie reçue annuellement sur une surface horizontale de 1m² soit près de 3 KWh/m² au nord et dépasse 5,6 KWh/m^2 au Grand Sud (TAMENRASSET) [W4].

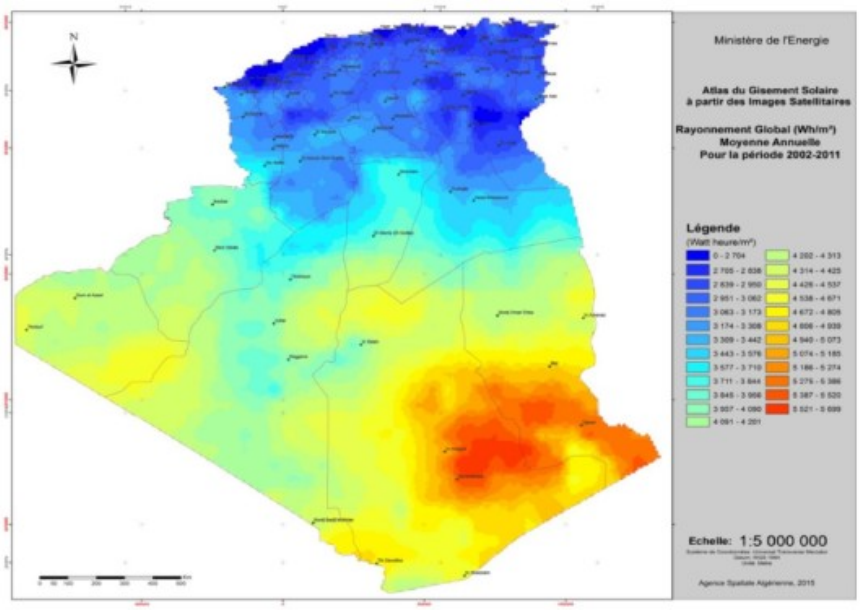


Figure 1.1 : Carte de l'irradiation globale directe annuelle moyenne en Algérie (période 2002-2011)

1.4.2. Projets et actions de la phase 2011-2014 du Programme national des énergies photovoltaïque (2011-2014)

La phase d'expérimentation du programme (2011-2014) a connu la réalisation de plusieurs projets et actions:

- La centrale photovoltaïque de 1,1 MWc à Ghardaïa, mise en service en juin 2014.
- La Centrale photovoltaïque 03 MW de Djanet (Illizi), mise en service en février 2015.
- La Centrale photovoltaïque 20 MW de Adrar (Adrar), mise en service en octobre 2015.
- La Centrale photovoltaïque 03 MW de Kabertene (Adrar), mise en service en octobre 2015.
- La Centrale photovoltaïque 13 MW de Tamanrasset (Tamanrasset), mise en service en novembre 2015.
- La Centrale photovoltaïque de 09 MW Tindouf (Tindouf), mise en service en décembre 2015.
- La Centrale photovoltaïque de 06 MW Z.Kounta (Adrar), mise en service en janvier 2016.
- La Centrale photovoltaïque 09 MW de Timimoune (Adrar), mise en service en février 2016.
- La Centrale photovoltaïque 05 MW de Reggane (Adrar), mise en service en janvier 2016.
- La Centrale photovoltaïque 05 MW d'In-Salah (Tamanrasset), mise en service en février 2016.
- La Centrale photovoltaïque 05 MW d'Aoulef (Adrar), mise en service en mars 2016.
- La Centrale photovoltaïque 20 MW d'Ain El-Ibel (Djelfa), mise en service en avril 2016.
- La Centrale photovoltaïque 20 MW de Khnag (Laghouat), mise en service en avril 2016.

- La Centrale photovoltaïque 15 MW d'Oued El-Kebrit (Souk Ahras), mise en service en avril 2016.
- La Centrale photovoltaïque 20 MW de Sedrate Leghzal (Nâama), mise en service en mai 2016.
- La Centrale photovoltaïque 30 MW d'Ain-Skhouna (Saida), mise en service en mai 2016 [W4].

1.4.3. Consistance du programme de développement des énergies renouvelables

La consistance du programme en énergie renouvelables à réaliser pour le marché national sur la période 2015-2030 est de 22 000 MW, répartie par filière comme suit:

Tableau1.1 : consistance du programme de développement des énergies renouvelables [W4].

Unité : MW	1ere phase 2015-2020	2éme phase 2021-2030	Total
Photovoltaïque	**3000**	**10 575**	**13 575**
Eolienne	**1010**	**4000**	**5010**
CSP	**-**	**2000**	**2000**
Cogénération	**150**	**250**	**400**
Biomasse	**360**	**640**	**1000**
Géothermie	**05**	**10**	**15**
TOTAL	**4525**	**17 475**	**22 000**

- **Première phase 2015 - 2020 :** Cette phase verra la réalisation d'une puissance de 3000 MW d'énergie photovoltaïque

- **Deuxième phase 2021 - 2030** : Le développement de l'interconnexion électrique entre le Nord et le Sahara (Adrar), permettra l'installation de grandes centrales d'énergies [W4].

1.5. RAYONNEMENT SOLAIRE

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80%d'hydrogène, 19%d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus depuis que Langevin et Perrin, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène –hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium; la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement [3].

Sa lumière, à une vitesse de 300000km/s, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre, sa distribution spectrale de l'atmosphère est présentée un maximum pour une

longueur d'onde d'environ 0.5µm, la température de corps noir à la surface du soleil est d'environ5780°k [3].

Diamètre de soleil D_s=1.39*10^9m

Diamètre de la terre D_t=1.27*10^7m

Distance moyenne soleil- terre L_{ts}=1.5*10^{11}m

Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne terre-soleil de 150 Millions de km), c'est ce que l'on appelé la constante solaire égale à 1367W/m².

La part d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser qui absorbe une partie du rayonnement solaire (environ 15%) et la réémet dans toutes les directions sous forme de rayonnement diffus. L'atmosphère réfléchi une autre partie du rayonnement solaire vers l'espace (environ 6%).

L'énergie reçue par une surface dépend en outre de la saison, de la latitude, des conditions météorologiques, du relief, de la pollution, de l'orientation de la surface considérée, etc.

1.5.1. Différents composants du rayonnement solaire

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé Au sol (la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus), on distingue plusieurs composantes :

1.5.1.1. Le rayonnement direct

Le rayonnement direct est le rayonnement solaire atteignant directement la surface terrestre depuis le soleil. Il dépend de l'épaisseur de l'atmosphère que la radiation solaire doit traverser et de l'inclination des rayons par rapport au sol. Le pyrhéliomètre est l'instrument qui permet de mesurer l'intensité du rayonnement direct. Le pyrhéliomètre doit être muni d'un dispositif chargé de l'orienter en permanence vers le soleil [W5].

1.5.1.2. Le rayonnement diffus

Le rayonnement diffus est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières qui produisent cet (éclatement) des rayons du soleil.

Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques [9].

1.5.1.3. Le rayonnement solaire réfléchi ou l'albédo

Le rayonnement solaire réfléchi du sol est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige) [4].

L'albédo est donné par l'équation (1.1) [3] :

$$\text{Albedo (Alb)} = \frac{énergier\ éfléchie}{énergiere\ çue} \qquad (1.1)$$

1.5.1.4. Le rayonnement global

Le rayonnement global est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran.

Les stations météorologiques généralement mesurer le rayonnement global horizontal par un Pyranomètre placé horizontalement à l'endroit requis [9].

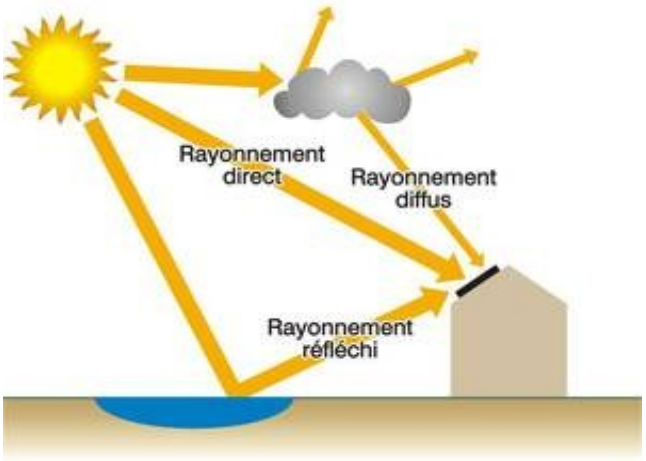


Figure1.2 : Composants du rayonnement solaire : extraterrestre, global=direct+diffus +albédo [4].

1.5.2. Spectre du rayonnement

Le rayonnement solaire et de nature électromagnétique, il est composé de «grains» de lumière appelés «photons», ces particules sont animées d'une vitesse est d'une énergie extrêmement élevées constituant des radiations électromagnétiques dont le spectre s'étend, depuis les rayonnements radio jusqu'aux rayons X [1].

L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde λ [1].

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800° K. la figure (1.3) montre une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites. Sa distribution en énergie est répartie en :

Ultraviolet UV : $0.20 < \lambda < 0.38\ \mu m$ 6.4%

Visible : $0.38 < \lambda < 0.78$ µm 48.0%

Infrarouge IR : $0.78 < \lambda < 10$ µm 45.%.

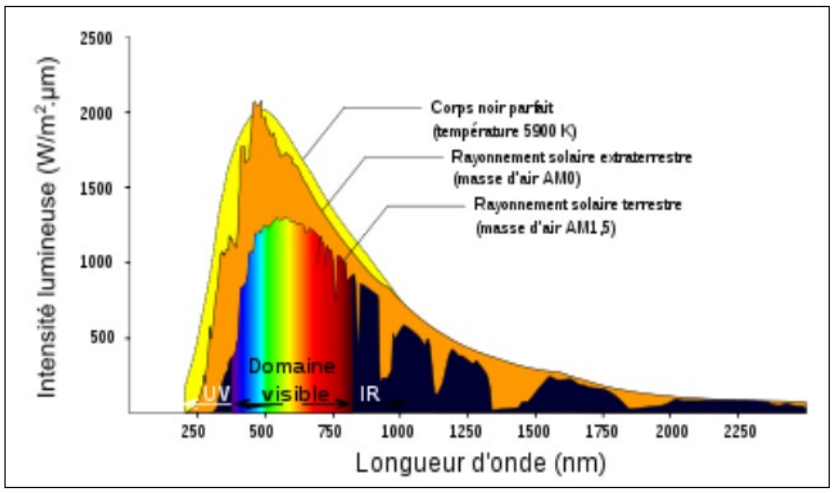


Figure1.3: Le spectre du rayonnement solaire [3].

1.6. EFFET PHOTOVOLTAIQUE

Le terme « photovoltaïque » vient du Grec et qui signifie Lumière, il est composé de deux parties : « photos » (lumière) et du nom de famille du physicien italien (Alessandro Volta) qui inventa la pile électrique en 1800 et donna son nom à l'unité de mesure de la tension électrique, le volt.

L'effet photovoltaïque est un des effets photoélectriques. Il est mis en œuvre dans les cellules photovoltaïques pour produire de l'électricité à partir du rayonnement solaire. L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien français Edmond Becquerel et présenté à l'académie des sciences en 1839. Il est le produit du choc des photons de la lumière sur un matériau semi-conducteur qui transmet leur énergie aux électrons qui génèrent une tension électrique.

L'effet photovoltaïque est obtenu par absorption des photons dans un matériau semi-conducteur qui génère alors des paires électrons-trous (excitation d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction) créant une tension ou un courant électrique. Plusieurs types de composants peuvent être créés à partir de ce principe. Ils sont appelés photodiodes, phototransistors ou des photopiles. Cet effet photovoltaïque est notamment utilisé dans les panneaux solaires photovoltaïques [W6].

1.7. SEMI-CONDUCTEUR

Les matériaux semi-conducteurs sont des corps dont la résistivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants.

Les quatre électrons de valence du silicium permettent de former quatre liaisons covalentes avec un atome voisin. Dans ce cas, tous les électrons sont utilisés et aucun n'est disponible pour créer un courant électrique [W2].

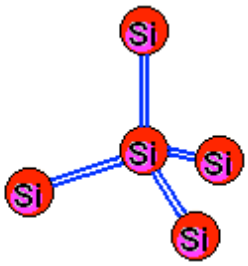


Figure 1.4 : atome du silicium [W2]

1.7.1. Les semi-conducteurs intrinsèques :

Les quatre électrons de valence du silicium permettent de former quatre liaisons covalentes avec un atome voisin. Dans ce cas, tous les électrons sont utilisés et aucun n'est disponible pour créer un courant électrique [W2].

Les matériaux semi-conducteurs sont des corps dont la résistivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants.

Les électrons situés sur la couche la plus éloignée du noyau, qui participent aux liaisons covalentes peuvent, sous l'effet de l'agitation thermique, devenir porteur de charge.

Le diagramme énergétique est constitué de deux bandes (conduction et valence) séparé par une bande interdite. Pour franchir cette bande l'électron doit acquérir de l'énergie (thermique, photon, …) Mais le nombre d'électrons libres dans un semi-conducteur intrinsèque reste très faible. Ici le nombre de trou et d'électron est égal [W2].

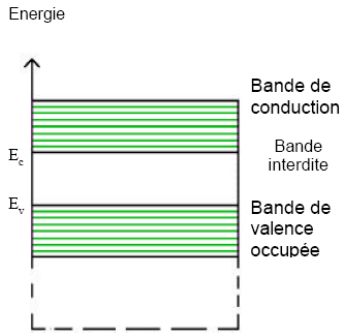


Figure 1.5 : Le diagramme énergétique [W2]

1.7.2. Les semi-conducteurs extrinsèques :

Pour augmenter la conductivité des semi-conducteurs on y introduit des impuretés. Ce procédé est appelé dopage.

1.7.2.1. Dopage de type N :

On remplace un atome de silicium par un atome pentavalent. Quatre d'entre eux assurent les liaisons avec les atomes voisins de silicium et le cinquième resté disponible va être excité vers la bande de conduction très facilement par l'agitation thermique. D'où le

nombre d'électron libre qui va fortement augmenter : dans ce cas le nombre de trou est très inférieur au nombre d'électron libre.

On obtient ainsi un cristal dopé N (négatif) [W2].

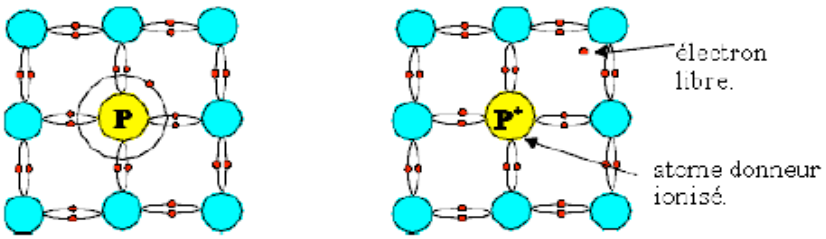


Figure 1.6 : Dopage de type N [W2]

1.7.2.2. Dopage de type P :

De la même façon on introduit des atomes trivalents, ses trois électrons vont assurer les liaisons covalentes avec trois atomes voisins mais laisser un trou au quatrième. Ce trou se déplace de proche en proche dans le cristal pour créer un courant.

Ici le nombre de trous est très supérieur au nombre d'électrons libres du cristal intrinsèque, on obtient donc un cristal dopé P (positif), les impuretés utilisées sont souvent du Bore [W2].

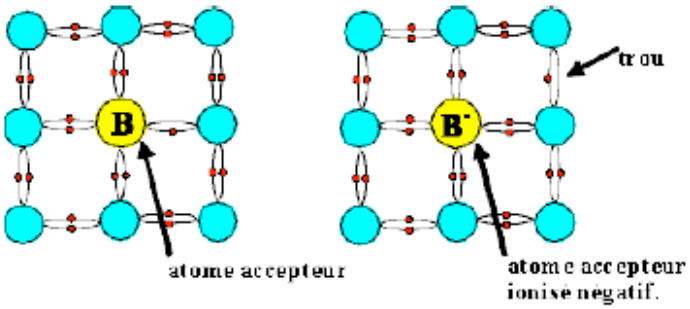


Figure 1.7 : Dopage de type P [W2]

1.7.3. La jonction PN :

Une jonction PN est l'accolement d'une région dopé P et d'une région dopée N.

Lors de cet assemblage les porteurs de charges libres s'attirent et se recombinent dans la zone de jonction où les porteurs libres disparaissent : c'est la zone de transition.

Il ne reste donc plus que les ions dans cette zone qui vont créent un champ électrique interne au niveau de la jonction et qui empêche les charges libres restantes dans chaque zone de traverser la jonction pour se recombiner [W2].

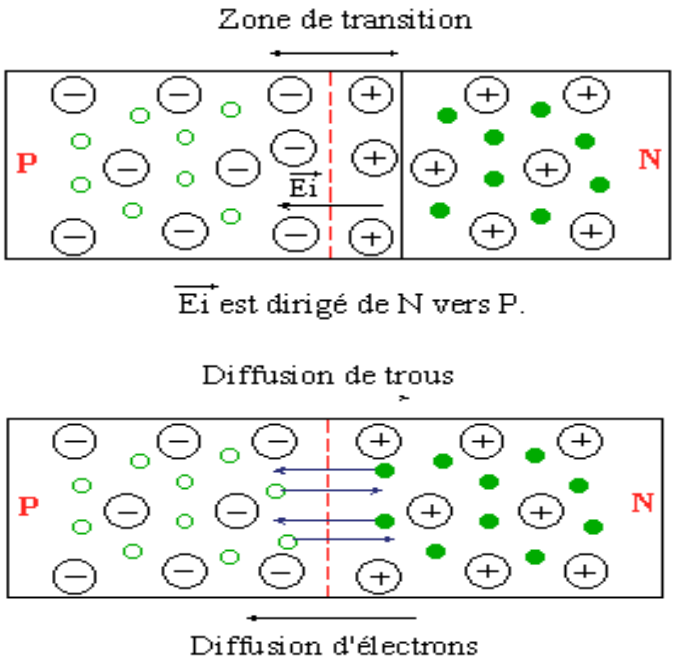


Figure 1.8 : La jonction PN [W2]

1.8. CONFIGURATION DES CELLULES PHOTOVOLTAIQUE POUR PRODUIRE DES QUANTITES UTILISABLE DE PUISSANCE

Les cellules photovoltaïques sont reliées électriquement en série et/ ou en parallèle pour produire des tensions et/ou des courants plus élevés. Les modules photovoltaïques se composent par des cellules photovoltaïques liées entre eux, ces modules peuvent former une unité d'un panneau photovoltaïque complet. Les panneaux photovoltaïques incluent plus d'un module de PV assemblé comme unité pré câblée et peut s'installer sur place, qui est l'unité génératrice de puissance complète [14]**.**

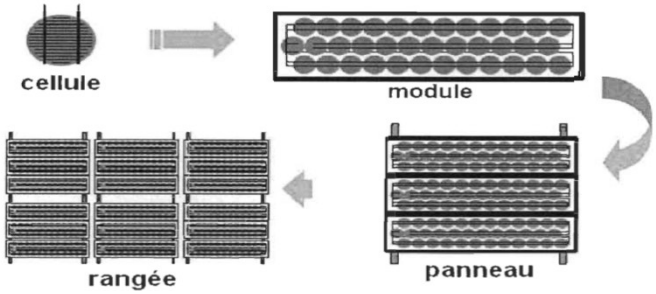


Figure1.9 : Configuration des cellules photovoltaïques [14].

1.9. CELLULES PHOTOVOLTAIQUES

Les cellules PV sont les plus petits éléments d'une installation photovoltaïque. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants et transforment directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- D'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électronique) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne,
- Une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaire,
- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode,

Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement [4].

Figure1.10 : Structure basique d'une cellule solaire [4].

La tension générée par une cellule peut varier entre 0,3V et 0,7Ven fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule.

1.9.1. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur (SC) de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau semi-conducteur comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction PN a été formée [8].

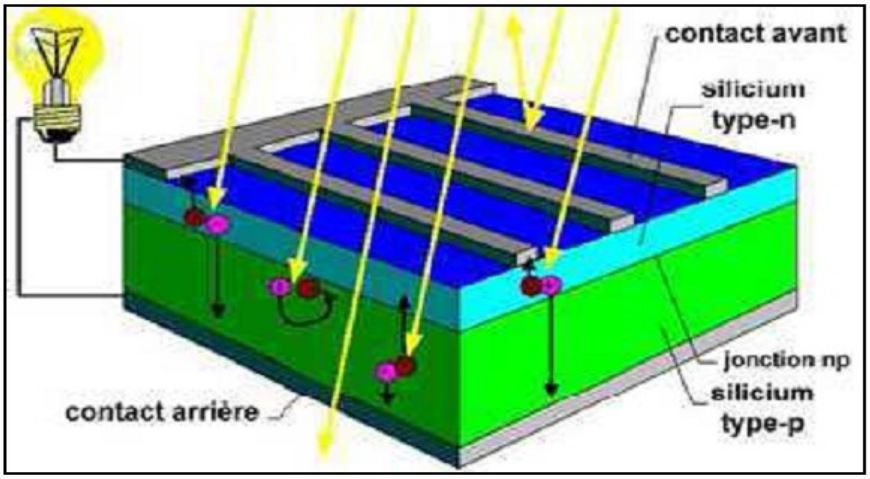


Figure1.11 : Principe de fonctionnement d'une pile solaire à jonction PN standard [8].

Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, figure (1.11), les atomes exposés au rayonnement sont "bombardés" par les photons constituant la lumière; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être " arrachés / décrochés : si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau.

C'est l'énergie cinétique du photon qui est transformé en énergie thermique.

Dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons " décrochés" créent une tension électrique continue faible: c'est l'effet photovoltaïque [8].

1.9.2. Synthèse des cellules photovoltaïques

Pour les applications terrestres, le silicium est devenu le matériau le plus utilisé pour fabriquer des cellules PV en raison essentiellement de sa disponibilité et de la connaissance acquise sur son comportement électrique. Il est utilisé, pour cela, sous de nombreuses formes (monocristallin, poly cristallin, amorphe, en couche mince,…), en fonction des performances recherchées [8].

1.9.2.1cellules monocristallines :

La cellule monocristalline qui s'approche le plus du modèle théorique : cette cellule est effectivement composée d'un seul cristal divisé en deux couches. Ce type de cellule présente le plus haut pouvoir de conversion. Les cellules monocristallines permettent d'obtenir de hauts rendements, de l'ordre de 15 à 22% [11].

Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme, intense et brillant. Elles sont utilisées, mais ne sont pas majoritaires sur le marché de l'énergie photovoltaïque.

Ces cellules souffrent néanmoins des inconvénients :

- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc très chère.
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.
- Une durée d'amortissement de l'investissement en énergie élevée (jusqu'à 7 ans) [11].

Figure1.12 : Cellule solaire au silicium monocristallin [8].

1.9.2.2. Cellules poly-cristallines

Les cellules poly cristallines sont composées d'un agglomérat de cristaux, ce qui diminue leur prix de fabrication. Elles aussi proviennent du sciage de blocs de cristaux, mais ces blocs sont coulés et sont dès lors hétérogènes [11]. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme.

Le silicium poly cristallin est devenu aujourd'hui la technologie la plus utilisée. Elle représente près de 50% du marché [4].

Les cellules poly cristallines est caractérisées par [11] :

- Coût de production moins élevé.
- Nécessite moins d'énergie.
- Rendement de 13 et jusqu'à 20% en labo (moins bonne que le monocristalline).

Les inconvénients des cellules poly-cristallines sont les même que le monocristalline.

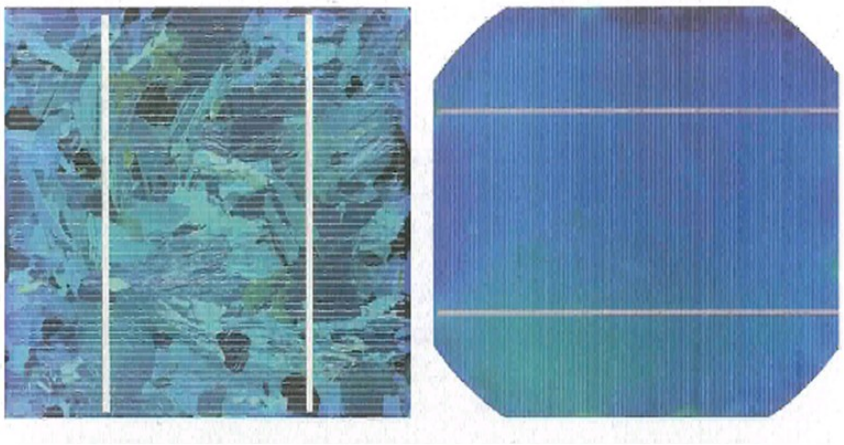


Figure1.13 : Cellules poly-cristallines [8].

1.9.2.3. Cellules amorphes

Le silicium amorphe, apparu en 1976. Sa structure atomique est désordonnée, non cristallisée, mais il possède un coefficient d'absorption supérieur à celui du silicium cristallin. Cependant, ce qu'il gagne en pouvoir d'absorption, il le perd en mobilité des charges électriques (rendement de conversion faible) [11].

- Coût de production bien plus.
- Rendement de seulement 5%par module et de 14% au laboratoire.
- Fonctionne sous très faible éclairement.
- Elles sont moins chères.

Grâce à la technologie des nouveaux matériaux le tellurure de cadmium (CdTe), l'arséniure de gallium (GaAs) ainsi que le di séléniure de cuivre et d'indium (CIS) ont permis d'obtenir des rendements de 38% au laboratoire [11].

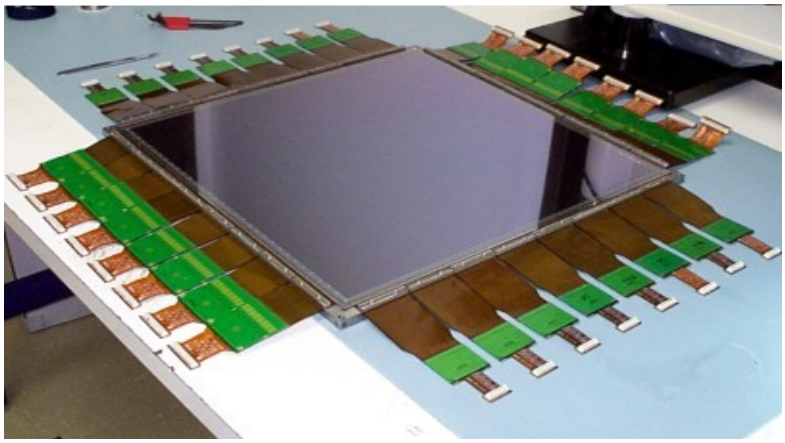


Figure1.14 : Cellules Couche mince (Amorphe) [8].

1.9.2.4. Autre type des cellules

De par le monde, un certain nombre de recherches sont encore effectuées pour créer de nouvelles cellules de rendement plus élevé, possédant une grande stabilité de leurs caractéristiques dans le temps et présentant de faibles coûts de fabrication. Si ce type d'énergie doit être développé à très grande échelle comme «Générateur électrique», il faut résoudre le problème du prix des capteurs. Aussi, depuis plusieurs années, on parle de Matériaux organiques et de polymères qui présentent, sous certaines conditions, des propriétés photovoltaïques. Ceci suscite actuellement un regain de recherches dans divers laboratoires dans le monde, renouvelant d'autant les efforts portés sur la synthèse des matériaux. Ces cellules, dites de troisième génération, bien qu'actuellement présentent de faibles rendements par rapport aux capteurs inorganiques, sont intéressantes par leur très faible coût et sont donc prometteuses pour l'avenir [8].

1.9. 3. Regroupement des cellules

1.9.3.1. Regroupement en série

Une association de (N_s) cellule en série figure 1.15 permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenues par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation résume les caractéristique électriques d'une association série de (Ns) cellules [19].

$$V_{coNS}=N_s*V_{co} \quad (1.2)$$

$$I_{ccNs}=I_{cc} \quad (1.3)$$

V_{coNs} : La somme des tensions en circuit ouvert de Ns cellules en série.

I_{ccNs} : Courant de court-circuit de Ns cellules en série.

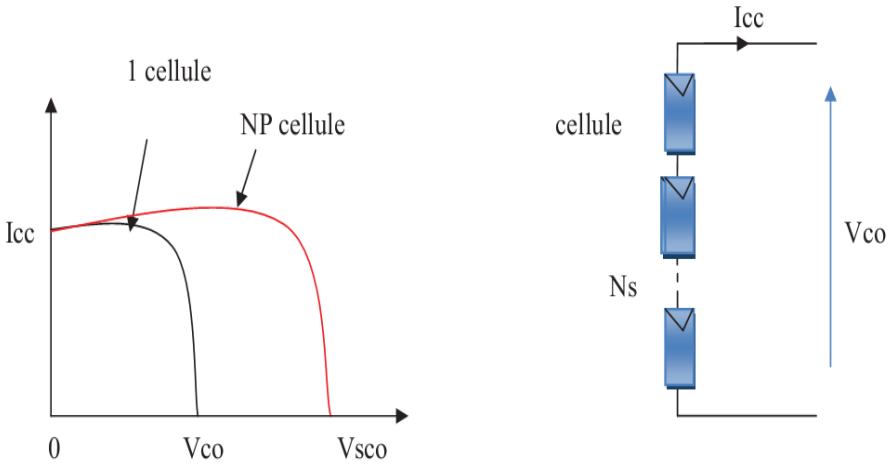


Figure1.15: Caractéristique courant tension de Ns cellule en série [19].

1.9.3.2. Regroupement en parallèle

Une association parallèle de (N_P) cellule figure (1.16) est possible et permet d'accroitre le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants [19].

Avec:

$$I_{ccN_P} = N_P * I_{CC} \quad (1.4)$$

$$V_{co} = V_{coN_P} \quad (1.5)$$

I_{ccN_P}:La somme des courants de court circuit de (N_P) cellule en parallèle.

V_{coN_P}:Tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle.

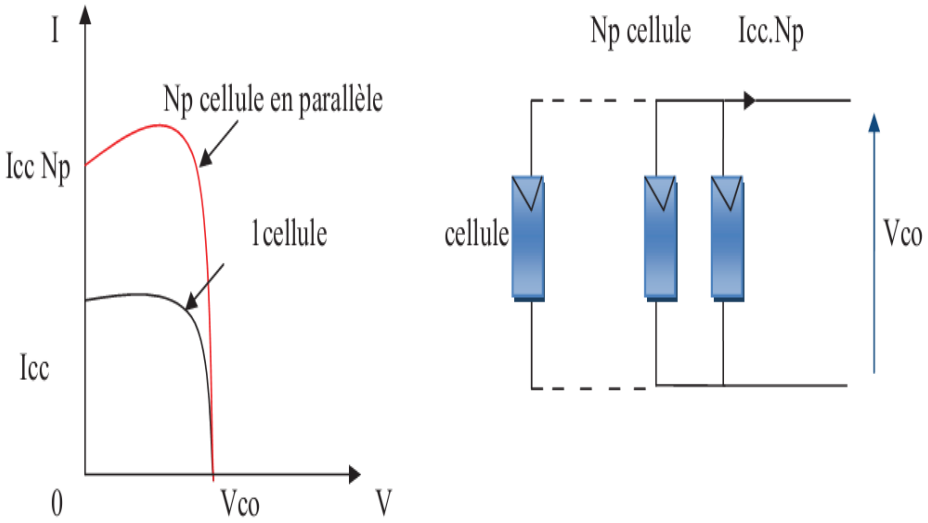


Figure1.16: Caractéristique courant tension de (N_P) cellule en parallèle [19].

1.9.3.3. Regroupement (série et parallèle)

Figure1.17 : regroupement mixte des cellules (série et parallèle) [12].

On utilise généralement ce type d'association pour en tirer une tension importante puisque l'association en série des cellules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule. La caractéristique d'un groupement de deux modules solaires est représentée ci-dessous, ce qui peut être généralisé sur une gamme de Ns modules solaires en série. Ce genre de groupement augmente le courant.

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque [12].

1.9.4. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

La figure (1.18) présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairement. Il correspond à un générateur de courantI_{pv} monté en parallèle avec une diode. Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma.

Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique I =f (V) de la cellule :

- La résistance série (R_{ser}) est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé ;
- La résistance shunt (R_{shu}) est due à un courant de fuite au niveau de la jonction; elle dépend de la façon dont celle -ci a été réalisée [17].

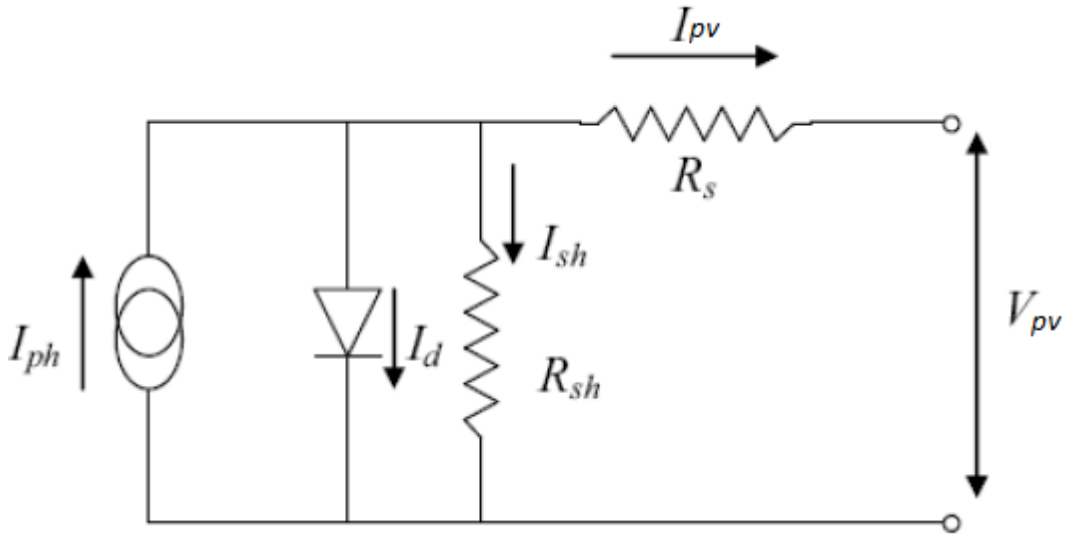


Figure1.18 : Schéma électrique équivalent d'une cellule PV [17].

Le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension d'une cellule PV est donné par la formule (1.6) [17]:

$$I_{PV}=I_{ph}-I_{sat}\left[\exp\left(\frac{e(V_{PV}+(I_{PV}.R_{ser}))}{nKT}\right)-1\right]-\frac{V_{PV}+(I_{PV}.R_{ser})}{R_{shu}} \quad (1.6)$$

Où

I_{sat} : est le courant de saturation,

K : est la constante de Boltzmann(1,38110$^{-23}J/K$),

T : est la température effective des cellules en Kelvin(K),

e : est la charge de l'électron (e=1,6 10^{-19} C),

n : est le facteur d'idéalité de la jonction (1< n<3),

I_{PV} : est le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur,

V_{PV} : est la tension aux bornes de cette même cellule,

I_{ph} : est la photo -courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température ou bien courant de (court-circuit),

R_{shu} : est la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction,

R_{ser} : est la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions.

I_d : le courant qui traverse la diode [17].

1.9.5. Paramètres d'une cellule photovoltaïque

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant- tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivantes [17]:

1.9.5.1. Courant de court -circuit (I_{CC})

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_{ser} nulle etR_{shu} infinie), ce courant se confond avec la photo – courant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (1.6) [17] en obtient :

$$I_{CC}=I_{ph}-I_{sat}\left[\exp\left(\frac{e\,(I_{CC}.R_{ser})}{nKT}\right)-1\right]-\frac{(I_{CC}.R_{ser})}{R_{shu}} \quad (1.7)$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme $I_{sat}\left[\left(\frac{e\,(I_{PV}.R_{ser})}{nKT}\right)-1\right]$ devantI_{ph}.

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule (pratiquement$I_{CC}=I_{ph}$).

1.9.5.2. Tension de circuit –ouvert (V_{CO})

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie, et décroit avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse [24].

$$V_{CO}=V_T \mathrm{Ln}\left[\frac{I_{ph}}{I_{sat}}+1\right] \quad (1.8)$$

Avec $V_T = \frac{nKT}{e}$

Si la résistance série est nulle et celle parallèle est infinie l'expression de la tension de circuit ouvert sera :

$$V_{CO} = V_T \text{Ln} [\frac{I_{ph}}{I_{sat}}] \quad (1.9)$$

1.9.5.3. Facteur de forme

On appelle facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage (fill factor), le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule P_{max} (I_{opt} , V_{opt}) et le produit du courant de court-circuit I_{CC} par la tension de circuit –ouvert V_{co} (c'est-à-dire la puissance maximale d'une cellule idéale). Le facteur de forme indique la qualité de la cellule; plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante, Il est de l'ordre de0.7 pour les cellules performantes ; et diminue avec la température [17]. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites R_{ser} etR_{shu}. Il est défini par [17] :

$$\text{FF}=\frac{P_{max}}{I_{CC}V_{co}}=\frac{I_{opt}V_{opt}}{I_{CC}V_{co}} \quad (1.10)$$

1.9.5.4. Rendement énergétique

C'est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule P_{max} (I_{opt} , V_{opt}) et la puissance solaire incidente. Il est donné par [17]:

$$\eta=\frac{P_{max}}{P_{inc}}=\frac{I_{opt}V_{opt}}{P_{inc}} \quad (1.11)$$

Avec P_{inc} est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des générateurs PV. Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

1.10. MODULE PHOTOVOLTAIQUE

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module figure (1.19-a). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthyléne-vynil- acétate) figure (1.19-b) et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'une ou de polyéthylène [10].

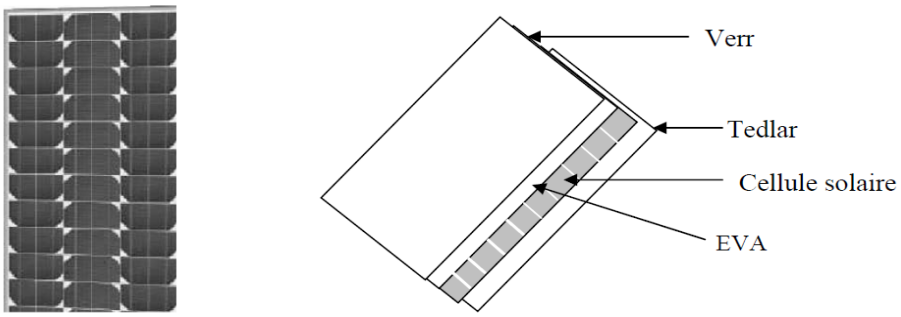


Figure1.19: Module photovoltaïque.

1.10.1. Ajustement des modules

1.10.1.1. L'orientation des modules

L'orientation des modules doit être plein sud pour les sites de l'hémisphère Nord et plein nord pour les sites de l'hémisphère sud. L'utilisation d'une boussole est fortement recommandée pour éviter toute approximation qui risquerait d'introduire une perte de puissance consécutive à une mauvaise orientation.

1.10.1.2. L'angle d'incidence

Cela correspond au plan formé entre le panneau photovoltaïque et les rayons lumineux, (Fig. 1.20). Cet angle a une grande importance. L'angle d'incidence optimal correspond à un angle de 90°. Chaque fois que cet angle diminue ou augmente, la surface en m^2 du panneau solaire exposé aux rayons lumineux diminue et donc en partant de la puissance du panneau solaire, le rendement diminue aussi.

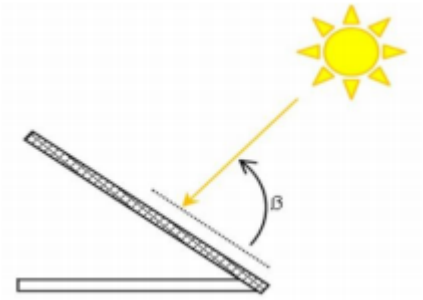


Figure 1.20 : Angle d'incidence sur un module PV [W7]

L'angle d'incidence joue un rôle majeur pour les rendements du panneau. Il est défini selon l'équation suivante [W7]:

$$R = 100.\sin\beta \qquad (1.12)$$

Avec, R, le rendement en (%) et β , l'angle d'incidence en (°).

La figure 1.21 représente l'évolution du rendement en fonction de l'angle d'incidence.

Ainsi, le rendement est maximal lorsque les rayons arrivent perpendiculairement (90°) sur le module photovoltaïque. Alors que pour un angle de 45°, le rendement n'est que de 70 % [W7].

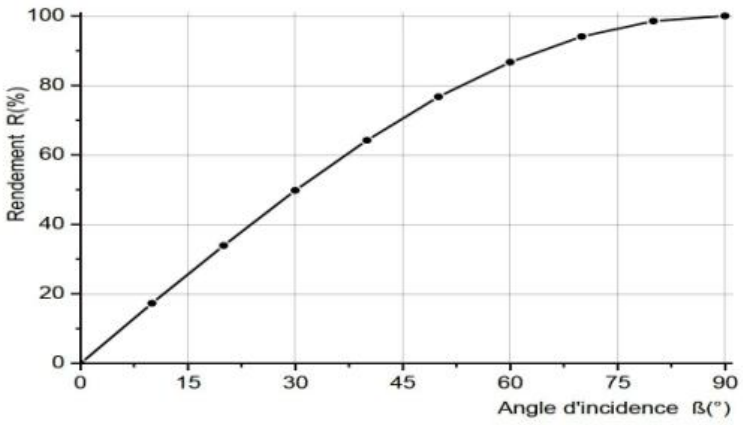


Figure 1.21: Rendement des modules PV en fonction de l'angle d'incidence [W7].

1.10.2. Caractéristique Courant-Tension d'un module photovoltaïque

La figure (1.22) représente la courbe I =f (V) d'un module photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température.

L'irradiation standard adoptée pour mesurer la réponse des modules photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m^2 et une température de 25°C [17].

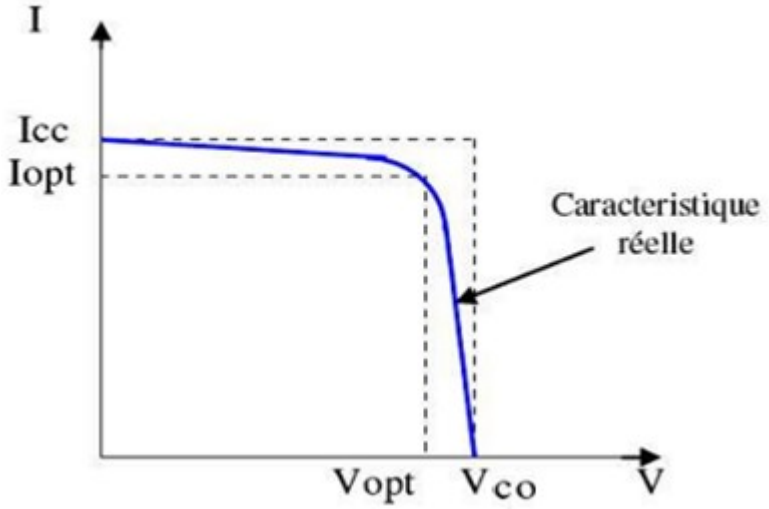


Figure1.22 : Caractéristique I =f (V) d'un module photovoltaïque [17].

Il est difficile de donner un caractère source de courant ou de tension à un module photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant -tension. Par conséquent, le module photovoltaïque est considéré comme une source de puissance avec un point P_m où la puissance se trouve être maximale. Il est donc intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance crête installée.

Il est important de noter que certains régulateurs solaires réalisent une adaptation d'impédance afin qu'à chaque instant on se trouve proche de ce point P_m.

1.11. PANNEAU SOLAIRE

Le panneau solaire se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique.

Le composant le plus crucial de toute installation PV est le module PV, qui se compose de piles solaires interconnectées. Ces modules sont raccordés entre eux pour former des panneaux et des ensembles (champs) de manière à pouvoir satisfaire différents niveaux de besoins en énergie [3].

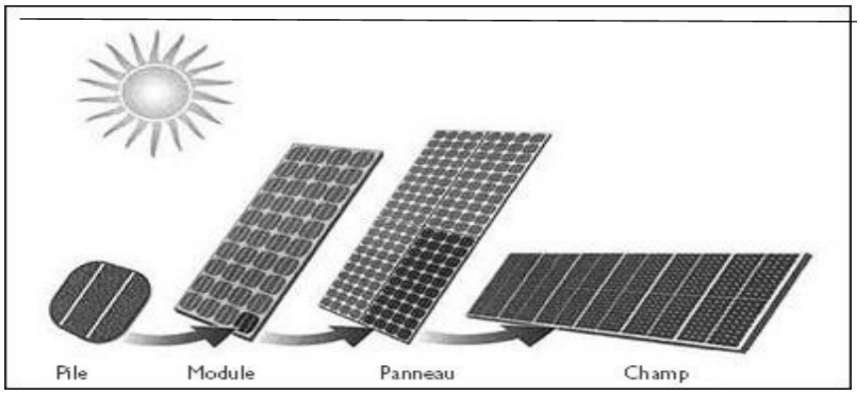


Figure1.23 : Composants d'un champ de modules PV [3].

1.12. SYSTEME DE STOCKAGE

Les panneaux solaires photovoltaïques ne produisent de l'énergie que le jour. mais on a souvent besoin d'électricité la nuit (notamment pour s'éclairer). Pour bénéficier d'électricité la nuit ou durant les jours pluvieux, il primordial d'installer des accumulateurs (batteries) qui vont permettent de stocker l'énergie sous forme chimique.

Le stockage correspond à la conservation de l'énergie produite par le générateur PV, en attente pour une utilisation ultérieure. Ce système de stockage est un élément crucial de l'installation photovoltaïque du point de vue technique, mais aussi du point de vue économique; car il représente 40 à 50 % du coût de l'installation. Vue l'importance du stockage électrochimique de l'énergie solaire, une étude théorique des différents types de batteries est menée, en particulier la batterie au plomb qui est la moins coûteuse comparativement aux autres batteries.

La gestion de l'énergie solaire nécessite des stockages suivant les conductions météorologiques et qui vont répondre à deux fonctions principales [10] :

- Fournir à l'installation de l'électricité lorsque le générateur PV n'en produit pas (la nuit ou par mauvais temps par exemple)

- Fournir à l'installation des puissances plus importantes que celles fournies par le générateur PV.

1.12.1. Définition de batterie

Parfois, appelée "accumulateur" est basé sur une technique de conversion réversible d'énergie, destinée à stocker l'énergie électrique dans une énergie différente afin de pouvoir la réutiliser ultérieurement [W3].

Les batteries solaires stockent l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques afin d'assurer l'alimentation électrique en toutes circonstances (jour ou nuit, ciel dégagé ou couvert). Une batterie utilisée avec des panneaux solaires est une batterie à décharge lente (appelée aussi batterie solaire). Ces batteries sont spécifiquement conçues pour les applications solaires. Elles n'ont pas les mêmes caractéristiques qu'une batterie de voiture par exemple, elles se déchargent plus progressivement et supportent mieux les décharges fréquentes peu profondes [W8].

1.12.2. Fonctionnement des batteries

La batterie remplit trois fonctions importantes sont :

1.12.2.1. Autonomie

Une batterie permet de répondre aux besoins de la charge en tout temps, même la nuit ou par temps nuageux [18].

1.12.2.2. Courant de surcharge

Une batterie permet de fournir un courant de surcharge pendant quelques instants, c'est-à-dire un courant plus élevé que celui que peut fournir le champ PV. Ceci est nécessaire pour faire démarrer les moteurs et les autres appareils requérant un courant de démarrage de 3 à 5 fois supérieur au courant d'utilisation [18].

1.12.2.3. Stabilisation de la tension

Une batterie permet de fournir une tension constante, en éliminant les écarts de tension du champ PV et en permettant aux appareils un fonctionnement à une tension optimisée.

Les deux types de batteries utilisées le plus couramment dans les systèmes photovoltaïques sont les batteries avec accumulateurs au plomb-acide et les batteries avec accumulateur au nickel-cadmium (Ni-Cd) [18].

1.12.3. Caractéristiques principales d'une batterie

1.12.3.1. La tension nominale [19]

Elle dépend du nombre d'accumulateurs placés en série. En général, les tensions usuelles sont 12V, 24V, 48V.

1.12.3.2. Capacité en Ampère heure

Les Ampères heure d'une batterie sont simplement le nombre d'Ampères qu'elle fournit multiplié par le nombre d'heures pendant lesquelles circule ce courant.

Théoriquement, par exemple, une batterie de 200 Ah peut fournir 200 A pendant une heure, ou 50 A pendant 4 heures, ou 4 A pendant 50 heures.

Il existe des facteurs qui peuvent faire varier la capacité d'une batterie tels que [16] :

1.12.3.3. Rapports de chargement et déchargement

Si la batterie est chargée ou est déchargée à un rythme différent que celui spécifié, la capacité disponible peut augmenter ou diminuer.

Généralement, si la batterie est déchargée à un rythme plus lent, sa capacité augmentera légèrement. Si le rythme est plus rapide, la capacité sera réduite [16].

1.12.3.4. Température

Un autre facteur qui influence la capacité est la température de la batterie et celle de son atmosphère. Le comportement d'une batterie est spécifié à une température de 27 degrés. Des températures plus faibles réduisent leur capacité significativement. Des températures plus hautes produisent une légère augmentation de leur capacité, mais ceci peut augmenter la perte d'eau et diminuer la durée de vie de la batterie [16].

1.12.3.5. La durée de vie

Un accumulateur peut être chargé puis déchargé complètement un certain nombre de fois avant que ces caractéristiques ne se détériorent .Par ailleurs, quel que soit le mode d'utilisation de l'accumulateur, il y'a une durée de vie totale exprimée en année (ou en nombre de cycles) [10].

1.12.3.6. Profondeur de décharge

La profondeur de décharge est le pourcentage de la capacité totale de la batterie qui est utilisé pendant un cycle de charge/décharge.

Les batteries de "cycle peu profond" sont conçues pour des décharges de 10 à 25% de leur capacité totale dans chaque cycle. La majorité des batteries de "cycle profond" fabriquées pour les applications photovoltaïques sont conçues pour des décharges jusqu'à 80% de leur capacité, sans les endommager. Les fabricants de batteries de nickel-Cadmium assurent qu'elles peuvent totalement être déchargées sans aucuns dommages. La

profondeur de décharge : Cependant, affecte même les batteries de cycle profond. Plus la décharge est grande plus la durée de vie de la batterie est réduite [10].

1.12.3.7. Tension d'utilisation

C'est la tension à laquelle l'énergie stockée est restituée normalement à la charge [10].

1.12.3.8. Rendement

C'est le rapport entre l'énergie électrique restituée par l'accumulateur et l'énergie fournie à l'accumulateur [10].

1.12.3.9. Taux d'autodécharge

L'autodécharge est la perte de capacité en laissant l'accumulateur au repos (sans charge) pendant un temps donné [10].

1.3 SYSTEME DE REGULATION

Les systèmes de régulation de charge sont des éléments d'un système photovoltaïque qui ont pour but de contrôler la charge et la décharge d'une batterie afin d'en maximiser la durée de vie. Son rôle principal est de réduire le courant lorsque la batterie est presque entièrement chargée. Lorsqu'une batterie se rapproche d'un état de charge complète, de petites bulles commencent à se former sur les électrodes positives. A partir de ce moment, il vaut mieux réduire le courant de charge non seulement pour éviter des dégâts mais aussi afin de mieux atteindre l'état de charge complète. Un courant trop élevé peut provoquer une déformation des électrodes à l'intérieur, ce qui pourrait créer un court-circuit.

Le régulateur de charge assure deux fonctions principales :

- la protection des batteries contre les surcharges et les décharges profondes.
- L'optimisation du transfert d'énergie du champ PV à l'utilisation.

La tension aux bornes de la batterie est l'indication sur laquelle s'appliquera le régulateur pour assurer sa fonction. Le régulateur mesure en permanence cette tension et la compare à deux seuils de tension prérégler : seuil haut et seuil bas.

Il existe plusieurs types de régulateurs [6] :

1.13.1. Régulation de décharge

La régulation de décharge s'effectue par un comparateur qui compare la tension de la batterie à un seuil de tension préréglé bas et transmet l'information à un circuit de commande. Ce dernier arrête de décharge lorsque la tension par élément dépasse la tension de seuil [6].

1.13.2 Régulation de la charge

La régulation de la charge effectue par une réduction de courant lorsque la batterie est chargée, on évite la charge lorsque la tension par élément dépasse la tension de surcharge.

Il existe plusieurs types de montage de régulation de charge pour les batteries au plomb [6].

1.14. SYSTEME DE CONVERSION

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le champ PV et la charge (sans stockage avec charge en continu, il portera le nom de convertisseur continu continue), soit entre la batterie et la charge (il sera alors appelé onduleur ou convertisseur continu alternatif).

L'onduleur est généralement associé à un redresseur qui réalise la transformation du courant alternatif en courant continu et dont le rôle sera de charger les batteries et d'alimenter le circuit en continu de l'installation en cas de longue période sans soleil [6].

1.14.1 convertisseurs continu-continu

Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au point de puissance maximal [6].

Ce système d'adaptation est couramment appelé MPPT (maximum power point tracking).

Son rendement se situe entre 90 et 95%. Ce système présent deux inconvénients pour un PV de faible puissance :

- Prix élevé.
- Le gain énergétique annuel par rapport à un système moins complexe (cas d'une régulation de la tension) n'est pas important [6].

1.14.2 convertisseurs continus-alternatif

C'est un dispositif destiné à convertir le courant continu en courant alternatif. On le désigne sous le nom d'onduleur. C'est un dispositif utilisant des transistors de puissance ou des thyristors. L'onde de sortie présente, dans le plus simple des cas, une forme carrée qui peut s'adapter à quelques types de charges, des pertes à vide considérables surtout pour des faibles puissances. Les onduleurs peuvent être améliorés à l'aide d'un filtrage ou par utilisation des systèmes en PWM (pulse Width modulation) qui permettent grâce à la modulation de la longueur des impulsions d'obtenir une onde de sortie sinusoïdale [6]. Avec ce système, on obtient :

- Un rendement élevé sur une plage du taux de charge.
- De faibles pertes à vide.

1.15. LA CHARGE

La charge est l'équipement électrique alimenté par le système peut être de type continue comme des équipements de télécommunications, le pompage d'eau, ou de type alternative dans les cas d'usage domestique (maison solaire), ce cas nécessite un onduleur [6].

1.16. CLASSIFICATION D'UN SYSTEME SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

Les systèmes photovoltaïques sont actuellement divisés en deux grandes catégories: Les systèmes autonomes et les systèmes couplés au réseau [9].

1.16.1. Système autonome

Le rôle des systèmes autonomes est d'alimenter un ou plusieurs consommateurs situés dans Une zone isolée du réseau électrique. Comme on le remarque sur la Figure (1.24)qui représente l'exemple d'un système PV autonome, un système de stockage est associé aux générateurs PV pour assurer l'alimentation à chaque instant et pendant plusieurs jours malgré l'intermittence de La production.

Ce système de stockage représente une part très importante du coût de l'installation, et ces conditions de fonctionnement sont très contraignantes. Par conséquent, des systèmes de gestion de l'énergie ont été développé afin d'optimiser la durée de vie du système de stockage et de réduire les coûts de fonctionnement [9].

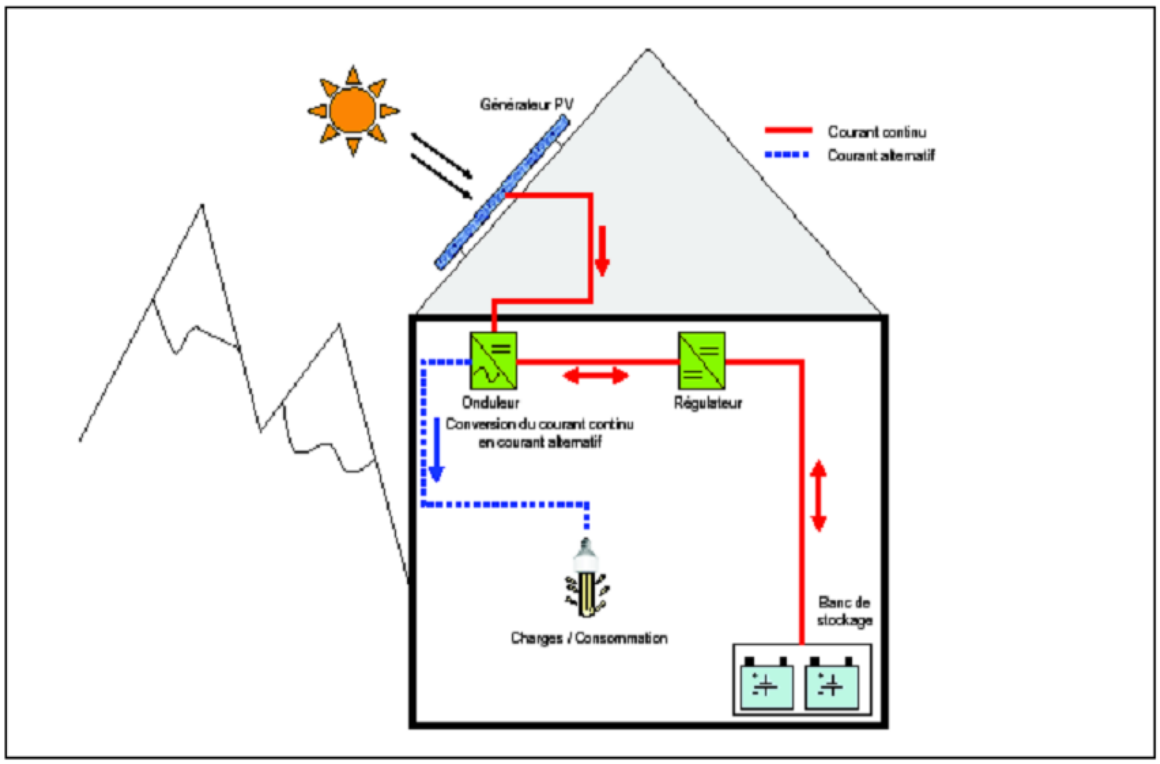


Figure1.24 : Exemple de la structure d'un système PV autonome [9].

1.16.2. Système hybride

Pour de très nombreuses applications d'intérêt sensible et stratégique comme les relais de télécommunication, les postes frontaliers, l'habitat isolé, les dispensaires, etc., hors réseau d'électricité conventionnelle, la disponibilité permanente de la source primaire d'énergie est vitale et conditionne dans une très large mesure, la fiabilité des installations et leur fonctionnement permanent.

Les solutions technologiques classiques apportées par le stockage électrochimique conventionnel sont onéreuses, limitées techniquement en puissance et restreintes en capacité. Les solutions apportées par les groupes électrogènes, de part la nécessité d'approvisionnement en carburant et celle de leur maintenance, présentent des inconvénients liés au bruit, la pollution et sur tout leur mauvais rendement à charge partielle. Les nouvelles solutions technologique sa apportées par les systèmes hybrides, même si elles ne sont pas encore économique compétitives, offrent par contre une sûreté élevée. Toutefois, à la vue de la nécessité du développement durable, ces solutions, avec l'appui de la volonté publique, peuvent être économiquement viables, à moyen et long terme [9].

1.16.3. Système raccordés au réseau

Les systèmes 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. La figure (1.25) montre les deux types d'installations existantes pour l'injection de la production solaire:

Injection de la totalité de la production: L'énergie produite par les modules est directement injectée sur le réseau électrique. Les périodes d'injections sur le réseau correspondent aux périodes de production photovoltaïque.

Injection du surplus de production: L'énergie produite par les modules est directement consommée sur place par les charges. L'éventuel surplus de production par rapport à la consommation instantanée est injecté sur le réseau [9].

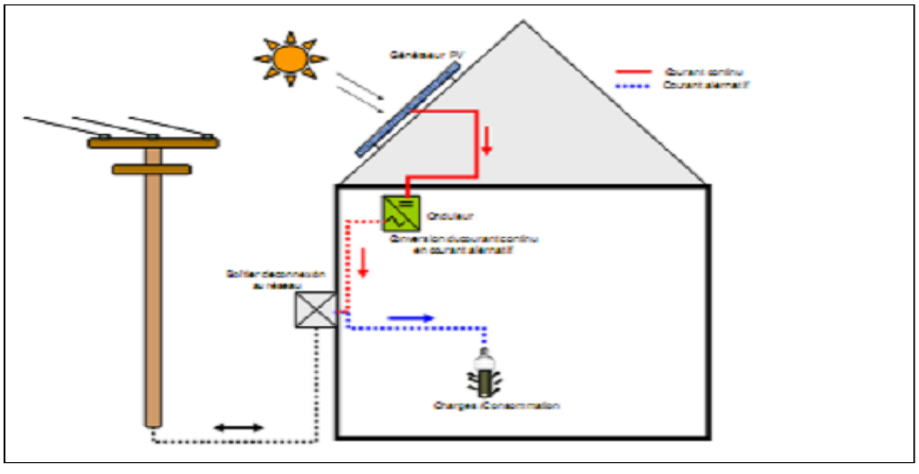


Figure 1.25: Schéma des installations photovoltaïques couplées au réseau.

Les installations photovoltaïques couplées au réseau ont cependant deux inconvénients majeurs:

- l'intermittence de la production d'énergie solaire ne permet pas le contrôle des périodes d'injections.
- le déphasage entre la production et la consommation réduit la notion d'autonomie énergétique personnelle.

1.17. AVANTAGES ET INCONVENIENTS D'UNE INSTALLATION PV

1.17.1. Avantages [15]

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

1.17.2. Inconvénients [15]

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15 MW/km² par an) avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.
- Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur.
- tributaire des conditions météorologiques.

1.18. CONCLUSION

Actuellement, l'électricité solaire photovoltaïque est l'une des disciplines mondiales les plus importantes dans le développement durable. Malgré la maîtrise de la technologie de fabrication des cellules solaires et de leur encapsulation, les installations photovoltaïques sont encore chères.

Pour cela la maîtrise de la technologie seule, ne se fait plus à la diminution des couts des installations PV, mais encore des techniques de dimensionnement utilisé.

Dans le chapitre suivant, on présentera une étude comparative d'un système photovoltaïque autonome avec et sans suiveur en utilisant le logiciel Pvsyst 5.74.

Chapitre 2

DIMENSIONNEMENT D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

2.1. INTRODUCTION

La réalisation des installations photovoltaïques exige une méthode de calcul et de dimensionnement de haute précision. L'installation sous dimensionnée reste une installation qui manque de fiabilité, tandis qu'une installation surdimensionnée va nous conduire à un coût plus élevé

D'une façon générale, la maîtrise du dimensionnement global est basée sur les différentes caractéristiques techniques des sous-systèmes constituants l'installation photovoltaïque (le générateur PV, les batteries, régulateurs et convertisseurs) d'un côté et les méthodes de dimensionnement utiles d'autre côté.

Un autre critère très important intervenant sur la fiabilité des installations PV, est la disponibilité d'une base des données de gisement météorologiques fiable des sites d'installation.

Dans ce chapitre nous allons voir le dimensionnement d'un système photovoltaïque ainsi la stratégie du dimensionnement utilisé.

2.2. COORDONNEES TERRESTRES

La terre est pratiquement une sphère qui tourne autour d'un axe passant par le pôle Nord et le pôle Sud.

Tout point sur la terre est caractérisé par sa latitude et sa longitude. Ces deux grandeurs représentent les coordonnées géographiques de ce point ainsi que par son altitude [26].

.

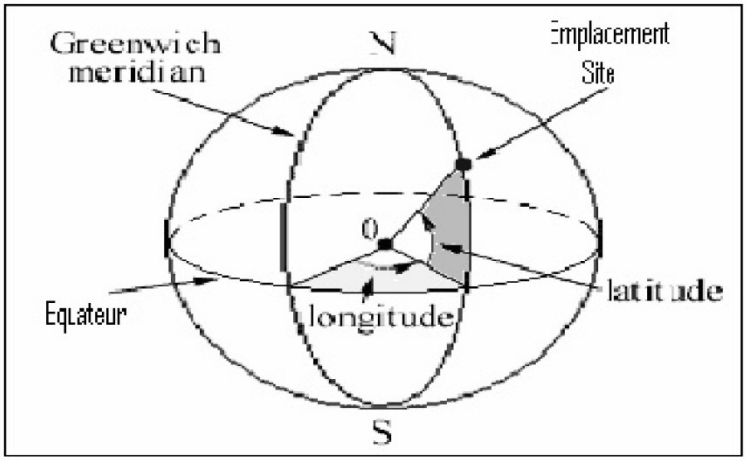


Figure2.1 : Coordonnés terrestre [26].

2.2.1. Longitude (λ)

La longitude d'un lieu correspond à l'angle formé par deux plans méridiens (passant par l'axe des pôles), l'un étant pris comme origine (méridien de Greenwich 0°) et l'autre déterminé par le lieu envisagé.

On affecte du signe (+) les méridiens situés à l'est de ce méridien, et du signe (-) les méridiens situés à l'ouest.

La longitude d'un lieu peut aussi être comprise entre -180° et +180°, à tout écart de 1° de longitude correspond à un écart de 4 minutes de temps. La longitude sera désignée ici par la lettre λ_0 [4] [21].

- Longitude OUEST $\lambda_0 < 0°$
- Longitude EST $\lambda_0 > 0°$

Nous prenons celle d'Ain Temouchent : λ =1°08' Ouest

2.2.2. Latitude (Φ)

La latitude d'un lieu à la surface de la terre est l'angle entre l'équateur et le rayon de la terre passant par le lieu considéré. La latitude (ϕ) est comptée de 0° à +90° dans l'hémisphère nord et 0° à -90° dans l'hémisphère sud [4]. Nous prenons celle de Ain Temouchent : ϕ=35 °17' N

2.2.3. L'altitude

L'altitude d'un point correspond à la distance verticale entre ce point et une surface de référence théorique (niveau moyen de la mer), on l'exprime généralement en mètre [4] [21].

2.2.4. Irradiation

Correspond à l'énergie totale qui est reçue durant un espace de temps déterminée (souvent par jour). Par exemple l'irradiation d'un jour est 5kWh/m^2.jour.

Ces deux caractéristiques sont de toute évidence variable en fonction du site, de l'heure de la journée et de la saison

2.3. LES COORDONNEES DU SOLEIL

Pour un lieu donné, la position du soleil est repérée à chaque instant de la journée et de l'année par deux systèmes de coordonnées différents :

- Par rapport au plan équatorial de la terre (repère équatorial).
- Par rapport au plan horizontal du lieu (repère horizontal).

2.3.1 Coordonnées équatoriales

Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan équatorial de la terre à l'aide de deux angles (δ, H).

2.3.1.1. Déclinaison solaire (δ)

C'est l'angle que font les rayons du soleil avec le plan de l'équateur, on adopte la convention de compter positivement les latitudes de l'hémisphère Nord (compris entre 0° à

l'équateur et +90° au pôle Nord), et négativement celle de l'hémisphère Sud (compris entre 0° à l'équateur et -90° au pôle Sud), et variée tout au long de l'année entre deux valeurs extrêmes ±23.45°.

Les lois du mouvement relatif terre-soleil permettent de calculer les variations de la déclinaison au long de l'année. Pour la pratique, une formule d'approximation est suffisante, elle est donnée par l'équation (2.1) [W9].

$$\delta = 23{,}45 \sin\left(\frac{2\pi}{365}(284 + J)\right) \qquad (2.1)$$

Avec:

J : le numéro du jour de l'année compté à partir du 1er janvier, c'est à dire il varie de là 365 ou 366 selon l'année.

δ varie entre deux valeurs extrêmes : $-\delta_0 \leq \delta \leq +\delta_0$ avec $\delta_0 = 23{,}45°$.

La variation de la déclinaison du soleil au cours de l'année est représentée par la figure 2.2 [7].

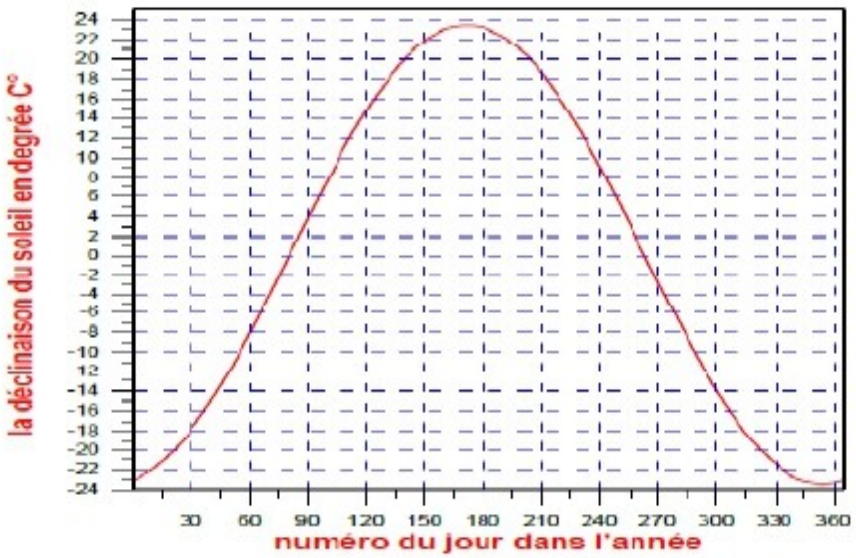


Figure 2.2 : Variation annuelle de la déclinaison du soleil [7].

- δ =0 (Equinoxes): les équinoxes représentent les deux dates de l'année ou le soleil traverse le plan équatorial, Les équinoxes automnal, le 21 septembre, marquant le début de la chute de la durée de la journée, et l'équinoxe vernal le 21 mars, marquant le début de l'accroissement de la durée du jour.
- δ = 23,45° (au Solstice été): Le solstice d'été (au 21 juin), nous observons que le soleil est à son point le plus élevé dans le ciel. Elle marque le début de l'été dans l'hémisphère nordique.
- δ = -23,45° (au Solstice hiver): Il coïncide avec le 21décembre.

2.3.1.2. Angle horaire du soleil (H)

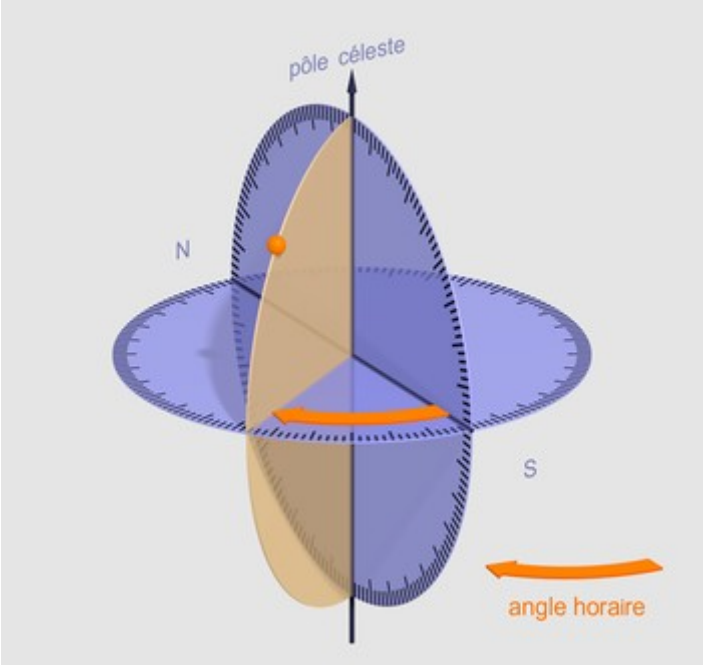


Figure 2.3 : Angle horaire du soleil

C'est l'angle que font les projections de la direction du soleil avec la direction du méridien du lieu, l'angle horaire du soleil varie à chaque instant de la journée selon la relation [26].

$$H = 15(TSV - 12) \tag{2.2}$$

Avec :

$$TSV = TI - TU + \left(\frac{\Delta t + 4\lambda}{60}\right) = TL - \left(TU - \frac{\lambda}{15}\right) + \frac{\Delta t}{60} \tag{2.3}$$

$$\Delta t = 9{,}87\ sin\ 2\left(\frac{360}{365}.(J - 81)\right) - 7{,}35\ cos\ \left(\frac{360}{365}.(J - 81)\right) - 1{,}5\ sin\left(\frac{360}{365}.(J - 81)\right) \tag{2.4}$$

- TSV (Temps Solaire Vrai) : Temps repéré de façon que le soleil se trouve au zénith à midi.
- H : Angle horaire du soleil
- TU (Temps Universel) : Le décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich.
- TL (Temps Légal) : Temps donné par une montre.
- Δt : Correction de l'équation du temps.
- λ: longitude du lieu.
- L'angle horaire H varie de -180° à +180°.

On prend:

H > 0 après midi.

H < 0 le matin

H = 0 midi TSV.

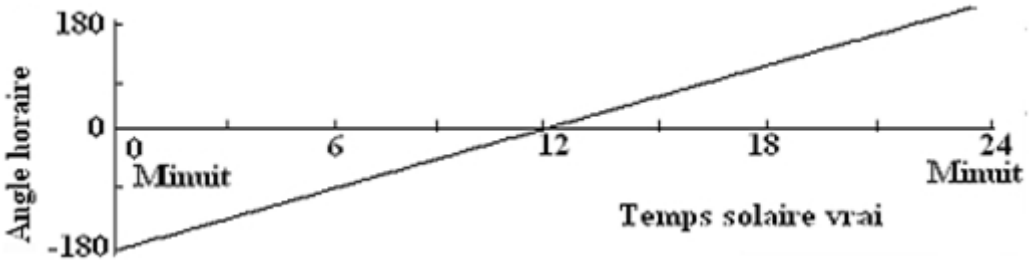


Figure 2.4 : variation de l'angle horaire (H) en fonction de temps solaire vrai [4].

2.3.2. Coordonnées horizontales

Le repère horizontal est formé par le plan de l'horizon astronomique et vertical du lieu. Dans ce repère, les coordonnées sont la hauteur h et l'azimut a (figure 2.5) [8].

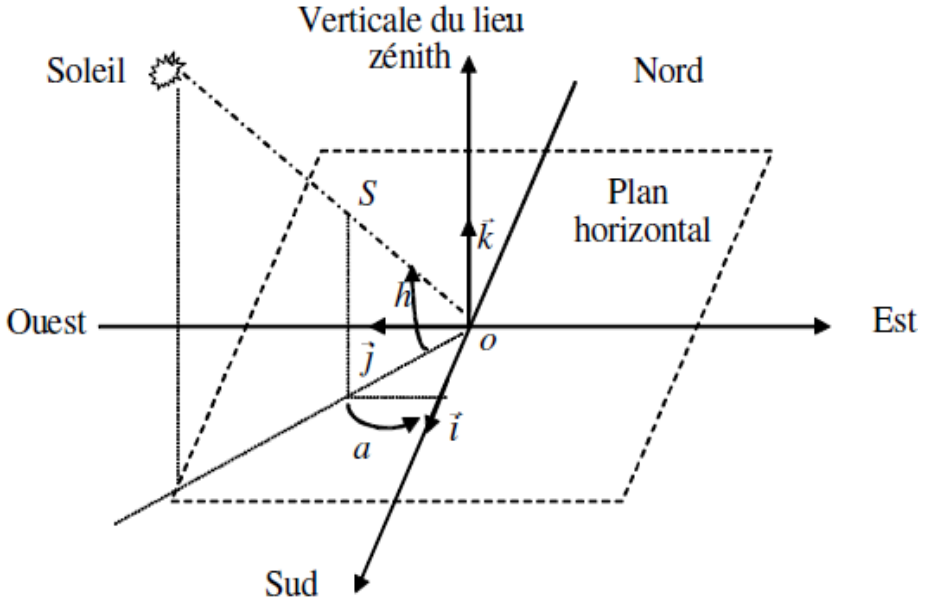


Figure 2.5: Repère horizontal.

2.3.2.1. Hauteur du soleil (h)

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan horizontal. La hauteur du soleil varie à chaque instant de la journée et de l'année selon la relation suivante [4] :

$$sin(h) = cos(\delta).cos(\Phi).cos(H) + sin(\Phi).sin(\delta) \quad (2.5)$$

Avec :

- h : Hauteur du soleil.
- δ : déclinaison solaire.

- Φ: Latitude.
- H : L'angle horaire du soleil.

2.3.2.2. Azimut du soleil (α)

C'est l'angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du Sud. L'azimut du soleil varie à chaque instant de la journée selon la relation suivante [4] :

$$sin(\alpha) = \frac{cos(\delta).sin(H)}{cos(h)} \quad (2.6)$$

Avec :

- **α** : varie entre -180° à +180°.
- H : L'angle horaire du soleil.
- h : Hauteur du soleil.
- δ : Déclinaison solaire.

On prend: **α**> 0 → vers l'ouest, **α** < 0 → vers l'est et **α** = 0 → direction du sud.

2.4. MOUVEMENT DE LA TERRE ET LE MOUVEMENT DU SOLEIL ET SES COORDONNEES

La trajectoire de la terre autour du soleil s'appelle «l'écliptique». La distance terre soleil ne varie que ± 1.7 % par rapport à sa valeur moyenne qui est de $1.49675*10^8$Km. Cette distance est minimale au début de janvier et maximale au début de juillet.

On peut décomposer le mouvement de chacun d'eux en mouvement de rotation et mouvement de translation.

2.4.1. Mouvement de rotation

La terre tourne autour de son axe de rotation (pôle Nord, pôle Sud) dans le sens trigonométrique. L'alternance des jours et des nuits est une manifestation immédiate de ce mouvement.

On définit le jour solaire comme de la durée moyenne entre deux passages consécutifs au méridien d'un lieu, ce jour est divisé en 24 intervalles égaux appelés heures. La rotation de la terre s'effectue avec une période de «P_r=23h 56mn 04 s»24h.

Sa vitesse linéaire de rotation à l'équateur est V_r≈0,465Km/s, elle est variable en fonction de latitude φ telle que :

$V_r(\Phi) = V_r(cos(\Phi))$. (2.7)

Avec :

- Φ: Latitude.

Les saisons n'existaient pas si la terre se tenait droite, sur son orbite .mais le fait que

son axe de rotation est penché d'un angle de 23.27°≈23.45° avec un mouvement de révolution, le pôle Nord et le pôle Sud vont pouvoir successivement se dorer à la lumière [27].

2.4.2. Mouvement de translation

Dans l'univers tout est en mouvement. La terre est en rotation sur elle-même puis elle tourne autour du soleil en P_t=365 jours 5h 48mn 40s ≈365.25 jours. Elle décrit une orbite elliptique dont le soleil occupe l'un des foyers. Cette orbite est située dans un plan appelé plan de l'écliptique ou le soleil est presque au centre. Elle est légèrement aplatie, elle correspond à un cercle de rayon moyen de $1.49675*10^8$Km. Cette distance est minimale au début de janvier et maximale au début de juillet [27].

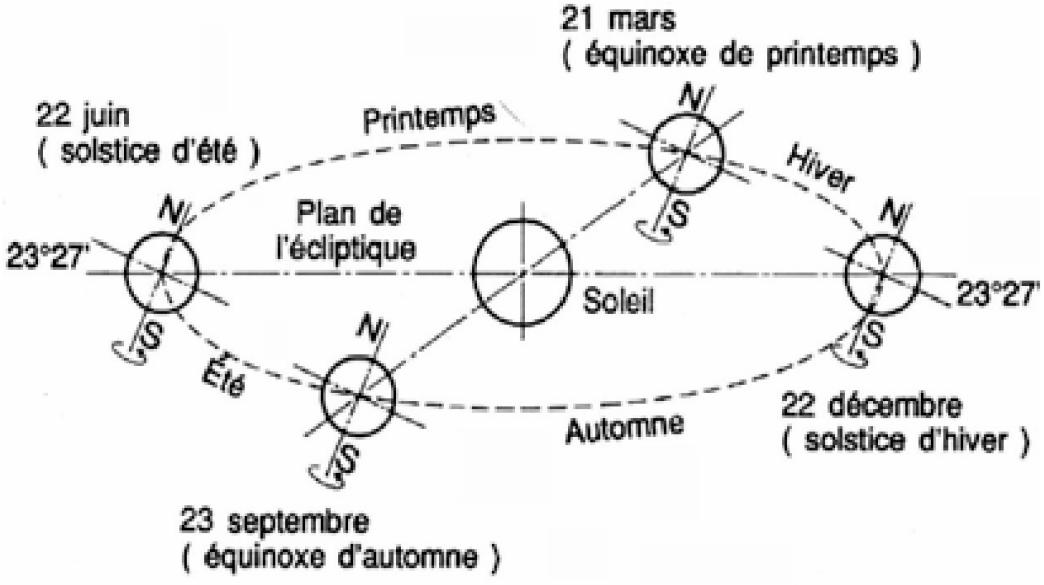


Figure2.6: Le mouvement de la terre autour de soleil.

2.5. DIMENSIONNEMENT DU GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

2.5.1. Estimation des besoins en énergie électrique

Le dimensionnement d'un système photovoltaïque est basé sur l'évaluation des besoins en énergie électrique (consommation journalière moyenne CJM) de l'utilisateur. Ces besoins peuvent être des charges DC ou des charges AC, ou bien les deux.

- **les étapes de dimensionnement à suivre :**

Pour dimensionner les générateurs PV, on procède en trois étapes [W10] :

Etape1 : Calcul de l'irradiation journalière moyenne (IRGM).

Etape2 : Calcul du rendement du générateur.
Etape3 : Calcul de la taille du générateur à installer.

2.5.2. Dimensionnement du parc de batterie

Pour réaliser le dimensionnement du parc de batterie, on procède de la façon suivante:
Etape1 : On calcule la consommation journalière moyenne.
Etape2 : On détermine le nombre de jour d'autonomie (Dns) dont on souhaite bénéficier.
Etape3 : On détermine la profondeur de décharge maximale acceptable par la batterie(MDOD) d'après le type de batterie utilisée.
Etape4 : On calcul la capacité (Bc) de la batterie.

- **Nombre de jours d'autonomie (D_{ns}) :**

Ce chiffre correspond aux périodes où il n'y a pas de production d'énergie de la part des modules (jours sans soleil, panne éventuelle…) et où la batterie seule doit prendre la relève. Ce chiffre permet de calculer la réserve tampon pour assurer le bon fonctionnement des récepteurs.

- **Taux de décharge maximale acceptable (MDOD) :**

Il s'agit du pourcentage de décharge exceptionnellement acceptable par la batterie sans qu'il y ait risque de détérioration .Les constructeurs préconisent :

- 80% pour les batteries au plomb stationnaires (spécial solaire), soit MDOD=0.80 ;
- 50%pour les batteries au plomb de démarrage (de voiture), soit MDOD=0.50
- 100%pour les batteries cadmium/nickel soit MDOD=1.00.

80% de décharge veut dire qu'au maximum de décharge la batterie conserve toujours 20%de charge

2.6. DIMENSIONNEMENT D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE A AIN TEMOUCHENT

Le but de notre travail est le dimensionnement et la simulation numérique du fonctionnement d'un système de production d'énergie électrique autonome isolé avec batterie d'un foyer à Ain Temouchent. Il s'agit d'une étude comparative entre deux systèmes photovoltaïques identiques, le premier est équipé d'un suiveur solaire tandis que le deuxième est sans suiveur. Cela, afin de montrer l'importance du suiveur en termes de puissance générée.

Le système est dimensionné pour satisfaire les besoins journaliers de consommation, évaluée à 3920 Wh /jour, comprenant l'éclairage, les appareils électroménagers de faible consommation, (réfrigérateur, machine à laver, TV…etc.), d'une habitation type d'une famille de quatre (4) personnes.

Dans cette étude, on va utiliser le cahier des charges suivant :

1- Consommation journalière :

Tableau 2.1: Estimation des besoins énergétiques journaliers.

Les appareils utilisés	Nombre des appareils	Puissance (W)	Durée d'utilisation (h /jour)	Consommation (Wh/jour)
Eclairage	20	11W/lampe	5	1100
TV	2	50W/TV	4	400
Réfrigérateur	1	500 Wh/jour	24	500
Machine à laver	1	1800 Wh/jour	-	1800
Consommation en mode veille	1	5W	24	120
Total				3920

2- ***Une autonomie :*** de 3 jours.

3- ***Site d'installation:*** Ain Temouchent

Il existe plusieurs logiciels de dimensionnement des systèmes utilisant les énergies renouvelables comme une source inépuisable primaire. Nous nous sommes servis de Pvsyst pour l'étude d'un système purement photovoltaïque autonome isolé avec batterie.

2.6.1 Description du logiciel Pvsyst 5.74

PV SYST est un logiciel de dimensionnement de panneaux solaires permettant d'obtenir diverse informations telles que la production d'énergie, l'irradiation et le coût de l'installation, la surface nécessaire, ou la production annuelle d'énergie. Un mode avancé permet d'obtenir beaucoup plus d'informations pour une étude très complète.

Le logiciel comprend principalement deux modes de fonctionnement. Le premier et une application de pré dimensionnement assez simple à prendre en main. Le deuxième permet une étude beaucoup plus approfondie et prend en compte beaucoup plus de paramètre. De plus il se base sur du matériel concret pour ses calculs, contrairement au premier mode qui effectue ses calculs pour un cas très général.

Pour chacun des deux modes, le principe est le même : on donne la localisation géographique de l'installation, puis on entre les données concernant l'installation. Vien ensuite une partie résultats où l'on choisi les données qui nous intéresse.

2.6.2 Calcul de la taille du générateur PV et du champ de batteries avec PVSYST 5.74

Dans la fenêtre principale du logiciel PVSYST 5.74. (Figure 2.7) en clique sur le bouton outils

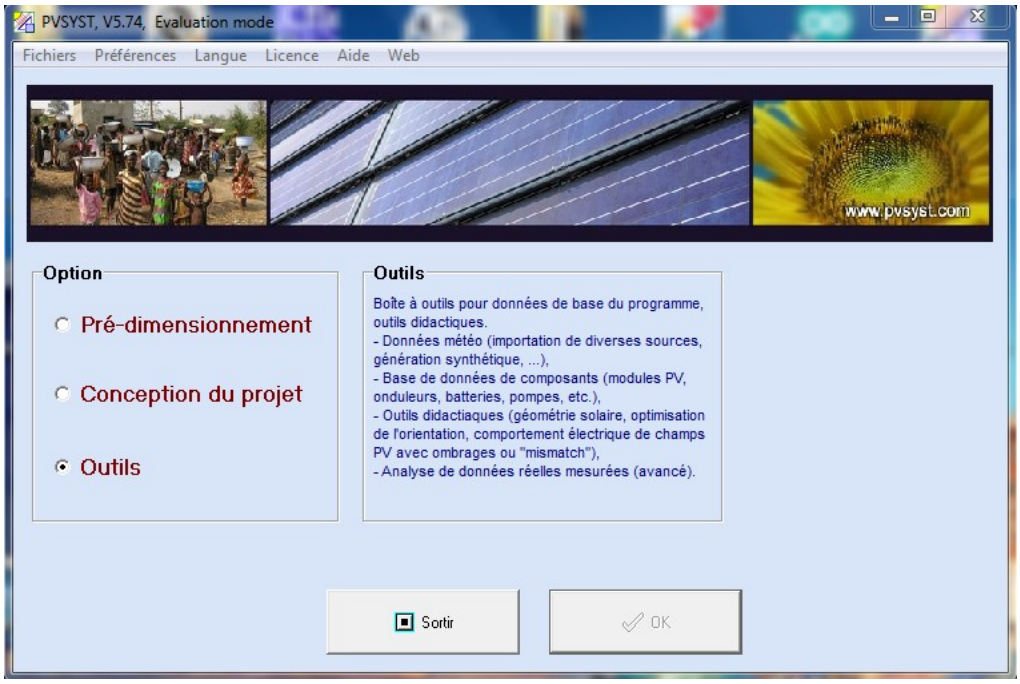


Figure 2.7 : Choix de l'outil

Une fenêtre du logiciel est donnée.

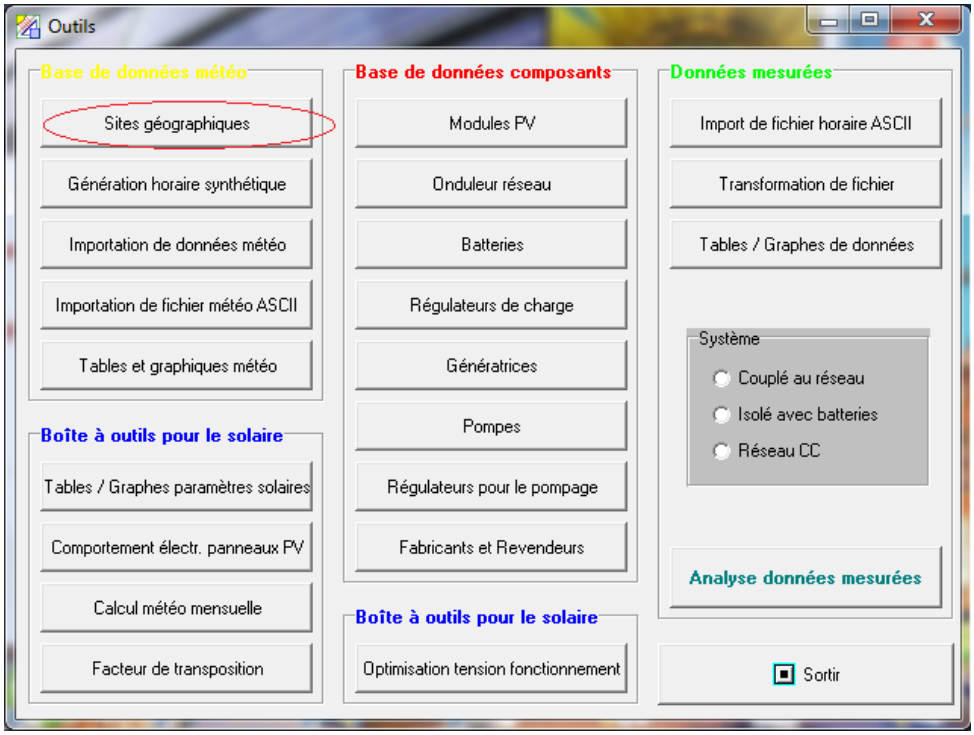


Figure 2.8: Choix du site géographique

Un projet de simulation PVsyst commence par la définition d'un site géographique et d'une météo. Deux possibilités sont disponibles :

1- Soit le site géographique est disponible dans la bibliothèque du logiciel.

2- Ou bien, l'utilisateur peut spécifier le site désiré à n'importe quel endroit.

À chaque site défini dans PVsyst, correspond un fichier météo. Ce dernier comporte généralement les principales données météorologiques mensuelles du site.

Pour crée le site de Ain Temouchent dans la base des données du logiciel, nous avons suivi la procédure suivante :

On clique sur le bouton sites géographique de la figure 2.8, ensuite sur le bouton nouveau de la figure 2.9.

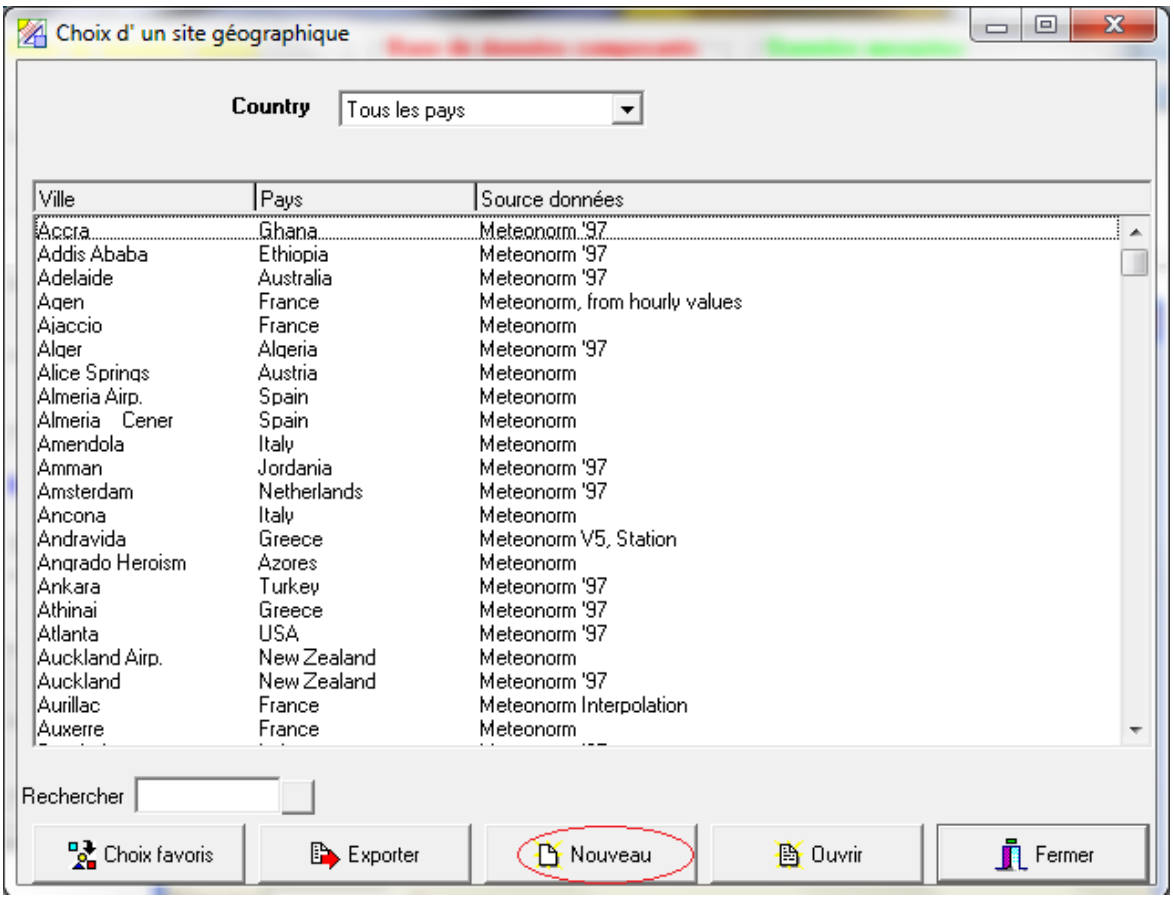


Figure 2.9 : Choix de l'emplacement du nouveau projet

On suit les étapes pour choisir le site d'installation qui est Ain Temouchent (latitude, longitude, altitude).

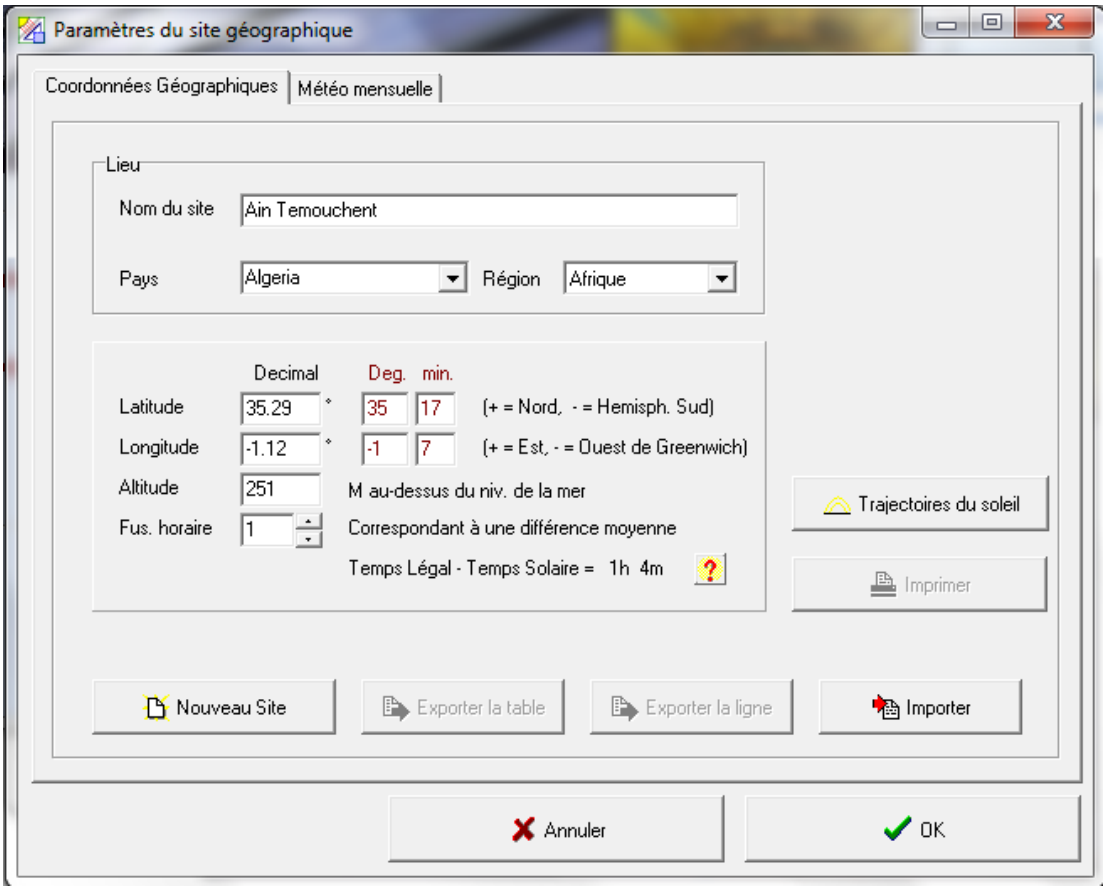


Figure 2.10 : Introduction des coordonnées géographique du site de Ain Temouchent.

On clique sur le bouton Météo mensuelle puis, On clique sur le bouton trajectoire du soleil.

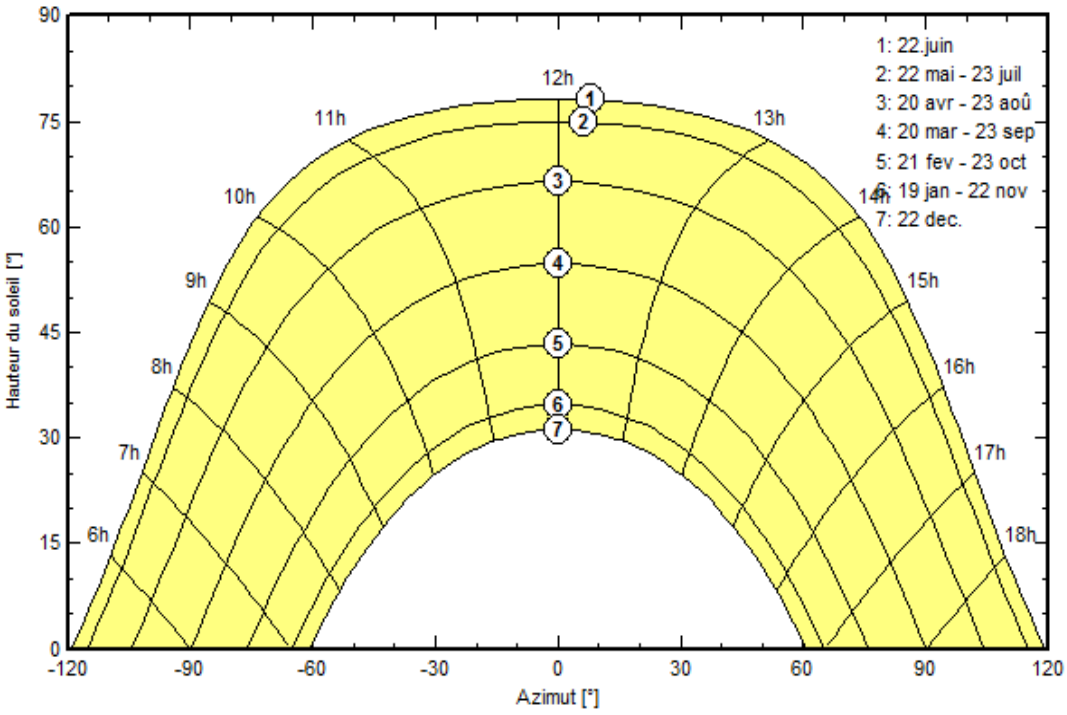


Figure 2.11 : Trajectoire du soleil à Ain Temouchent

La figure 2.11 présente la course solaire par un diagramme en temps légal.

En regardant plus précisément, la valeur de l'azimut à différents moments de l'année, on constate que l'expression "le Soleil se lève à l'est et se couche à l'ouest" n'est pas exacte. En effet, en décembre, il se lève au sud-est pour se coucher au sud-ouest, tandis qu'en juin, il se lève pratiquement au nord-est pour se coucher au nord-ouest. Ceci donne 7 heures d'ensoleillement maximum en décembre et plus de 16 heures en juin : ce sont les deux époques des solstices de l'année. Ce n'est qu'aux équinoxes de printemps et d'automne que la durée du jour est égale a celle de la nuit.

Ce que concerne à la hauteur du Soleil, elle atteint un maximum de 77° le 22 juin à 12 heures (heure universelle), alors que le 22 décembre a 12 h Univ, elle n'atteint que 31°.

Puis, on clique sur le bouton Météo mensuelle voir la figure (2.12).

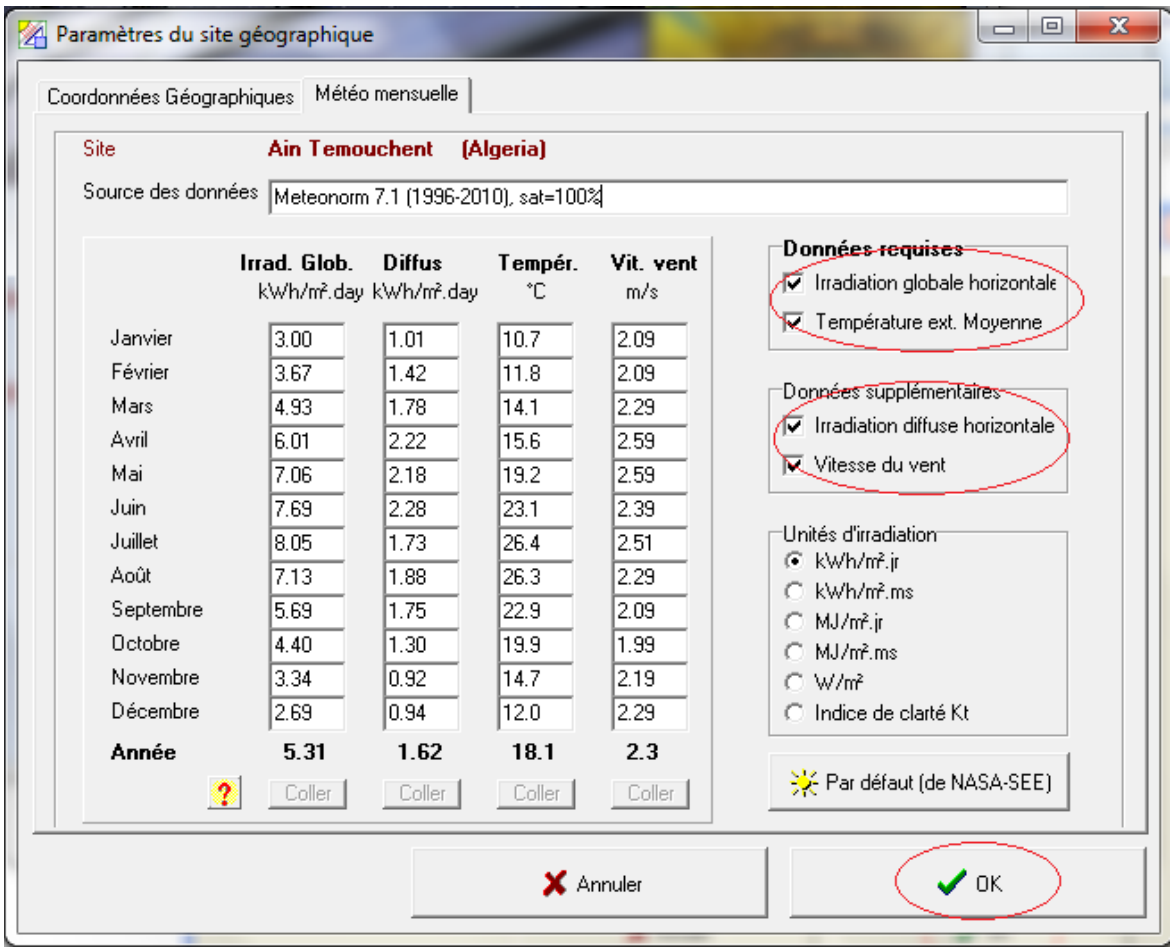


Figure 2.12 : Coordonnées météorologique de Ain Temouchent (irradiation globale, rayonnement diffus, température max et la vitesse du vent)

Puis on clique sur le bouton Save pour l'enregistrement

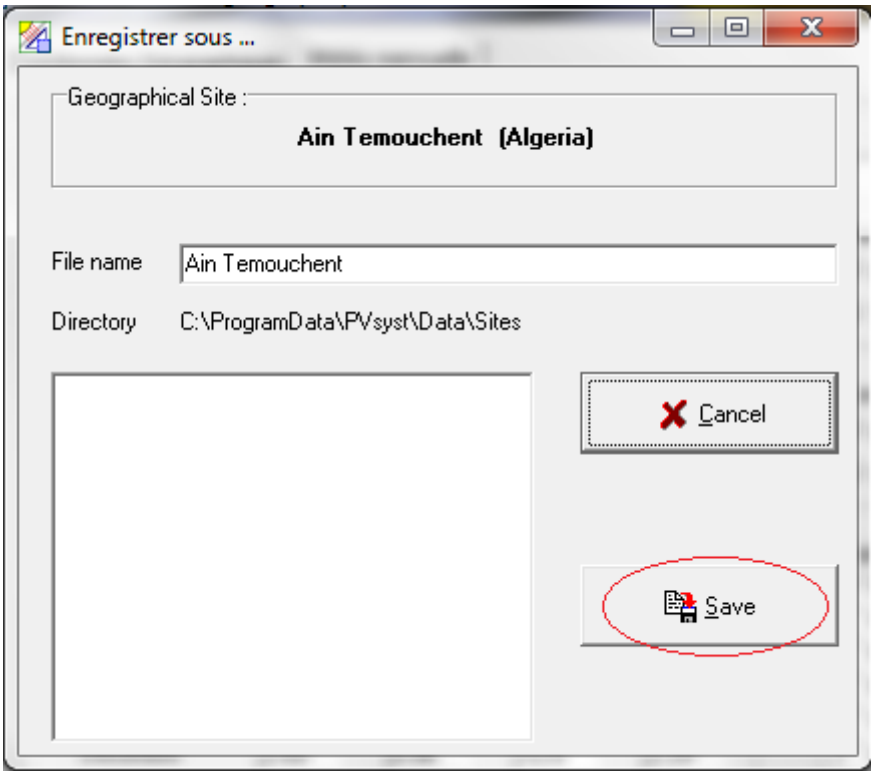


Figure2.13 : Fenêtre de l'enregistrement des donnés de Ain Temouchent

Une fois le site d'Ain Temouchent crée, on va sur le menu principal pour faire une conception d'un projet isolé avec batteries (Voir Figure 2.14).

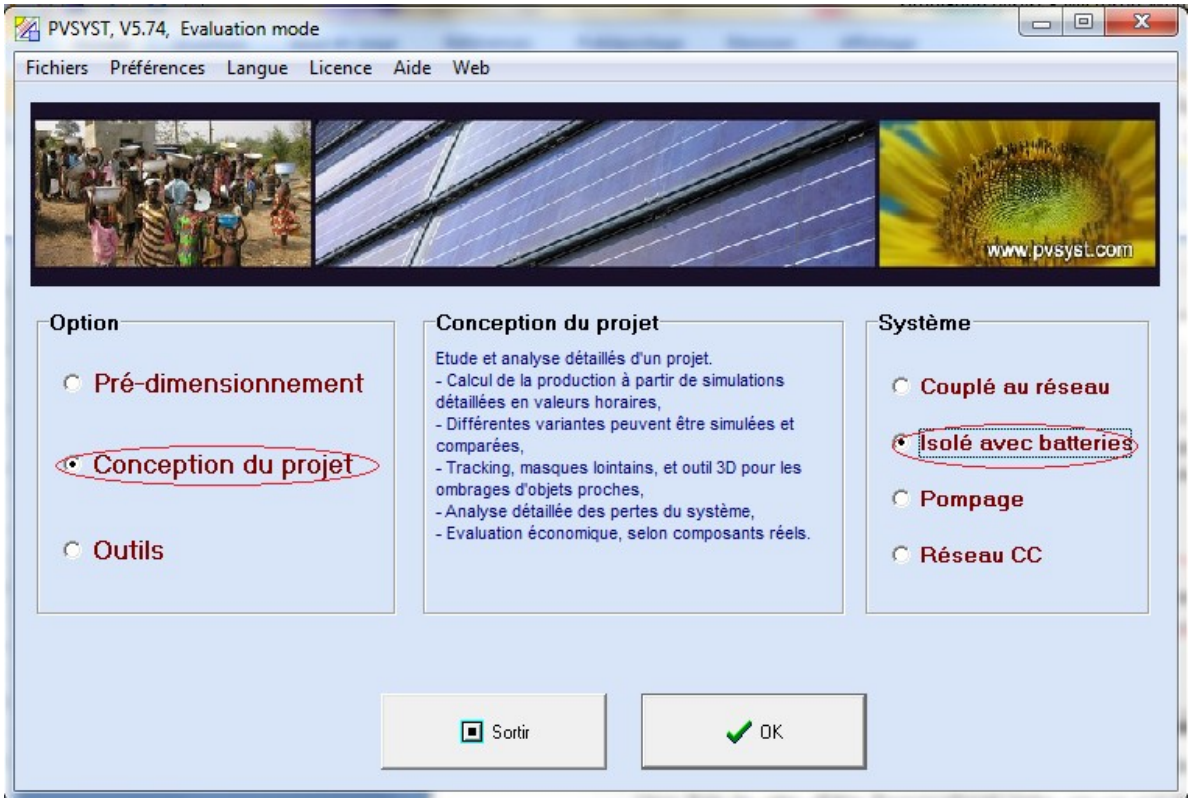


Figure 2.14 : Choix du type de projet

On clique sur le bouton Projet voir figure 2.15

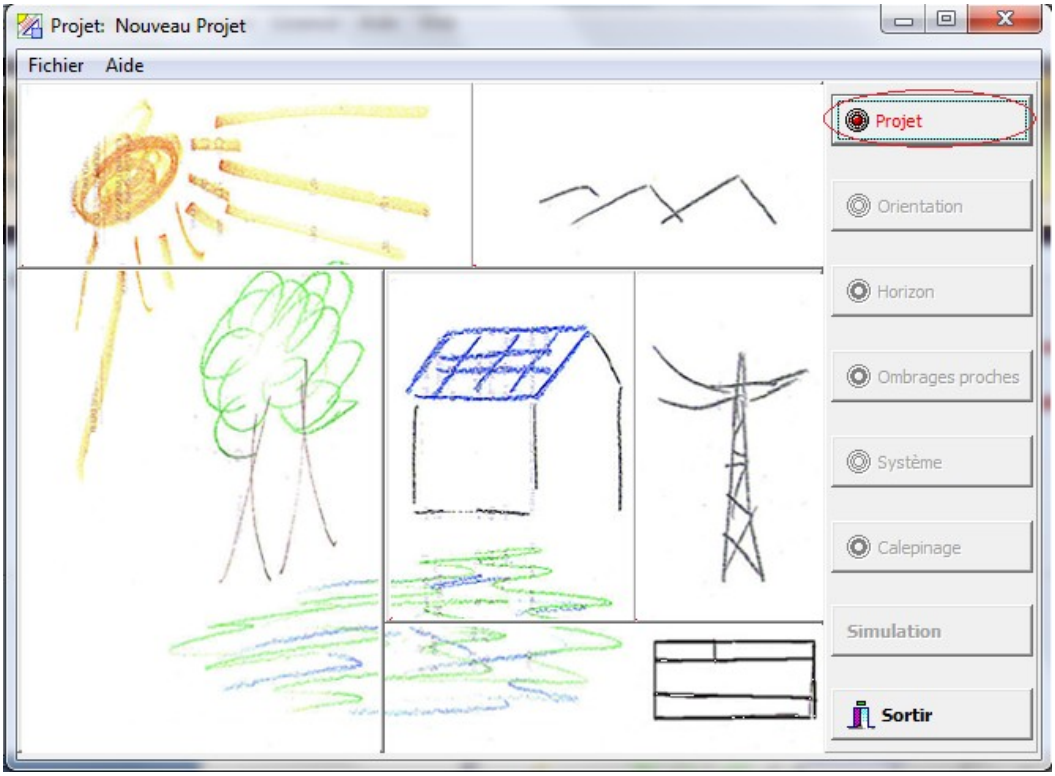


Figure 2.15 : Choix de l'application

On clique sur site et météo on choisit la valeur de l'albédo de 0.2 pour tous les moi de l'année

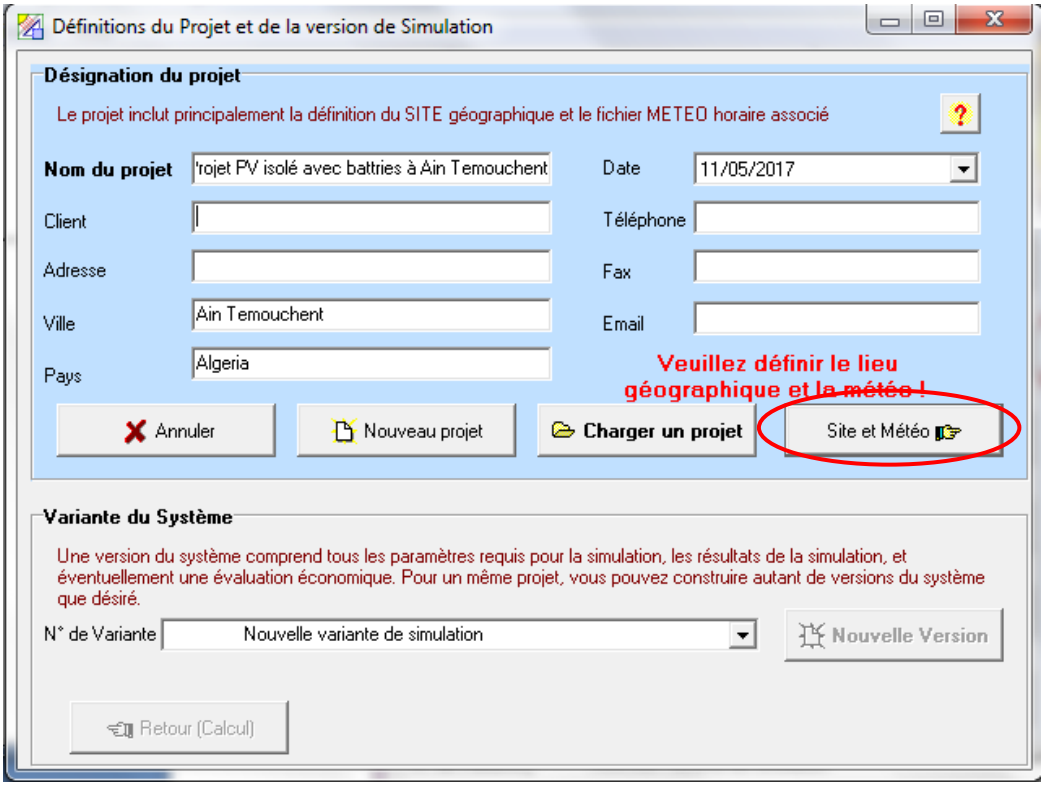


Figure 2.16 : Définition du projet

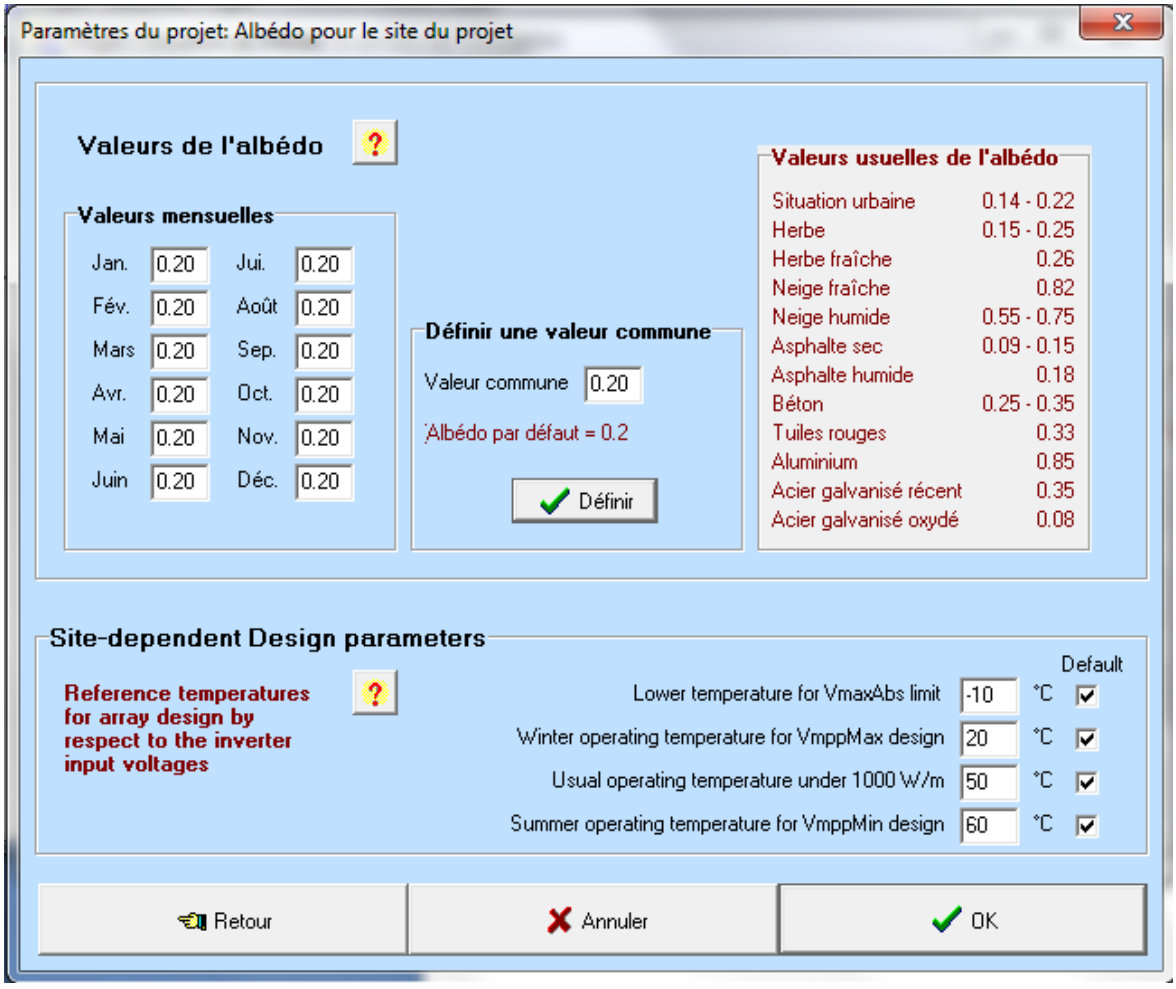


Figure 2.17*:* Choix de l'albédo

La valeur généralement admise dans les localités urbaines est de l'ordre entre 0,14 et 0,22, la valeur habituelle est de 0,2 (par défaut dans PVsyst. Idéalement, la meilleure valeur pour une situation donnée peut être obtenue par une mesure directe sur le site (c'est le rapport des éclairements mesurés par un solarimètre tourné vers le sol.

Dans la pratique, à l'exception des plans verticaux, cette valeurs ne prend pas une grande importance en tant que composant de l'albédo est relativement faible dans l'irradiation globale de l'incident. Le tableau suivant donne quelques valeurs habituelles pour le facteur d'albédo :

Où ξ est une mesure de la réflectivité du sol, dépond de sa structure.

Tableau 2.2 : Coefficients d'albédo usuels.

Milieu urbain	**0.14-0.22**
Herbe	**0.15-0.25**
Herbe fraiche	**0.26**
Neige fraiche	**0.82**
Neige mouillée	**0.55-0.75**
Asphalte sec	**0.09-0.15**
Asphalte mouillé	**0.18**
Béton	**0.25-0.35**
Tuiles rouges	**0.33**
Aluminium	**0.85**
Acier galvanisé neuf	**0.35**
Galvanisé très sale	**0.08**

❖ **Premier cas : Système sans suiveur**

On clique sur ok et on sauvegarde toutes les informations, et puis on choisit l'inclinaison du panneau en cliquant sur Orientation (voir figure2.15), plan incliné fixe de 32° et l'azimut 0° (C.-à-d. vers le sud)

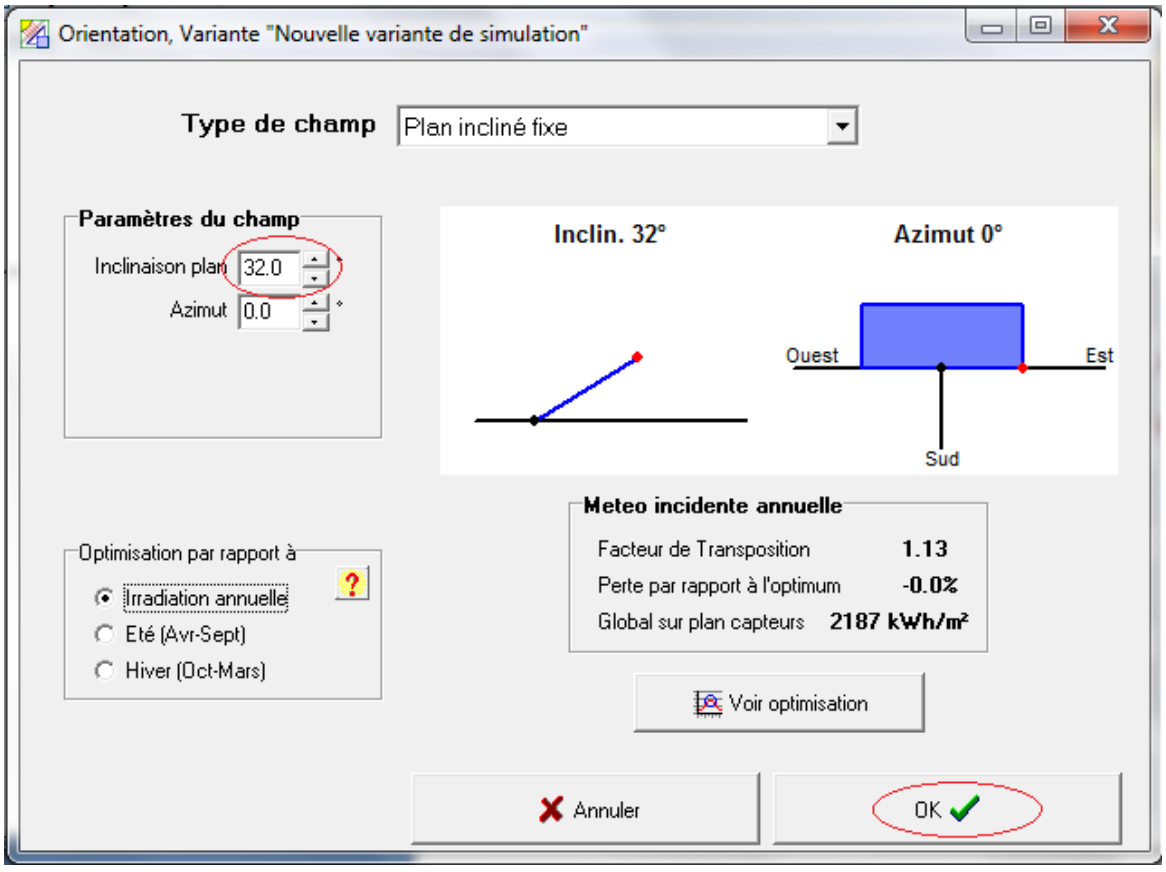


Figure 2.18 *:* Choix de l'inclinaison du panneau

On clique sur le bouton OK puis en doit choisir le type d'ombrage. Pour notre cas, nous avons choisi un système sans ombrages.

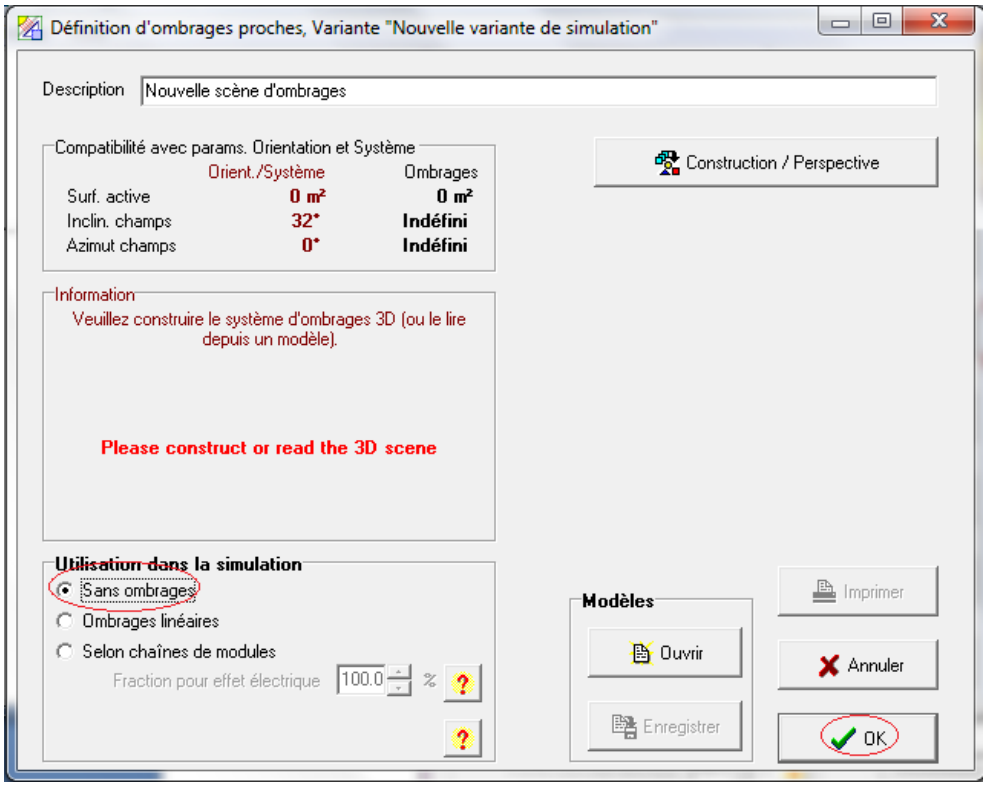


Figure 2.19 : Définition d'ombrages proches

Ensuite, on définit la puissance, le nombre des lampes, le réfrigérateur, la machine a lavé et le téléviseur ainsi le nombre d'heures de fonctionnement conformément à notre cahier de charge.

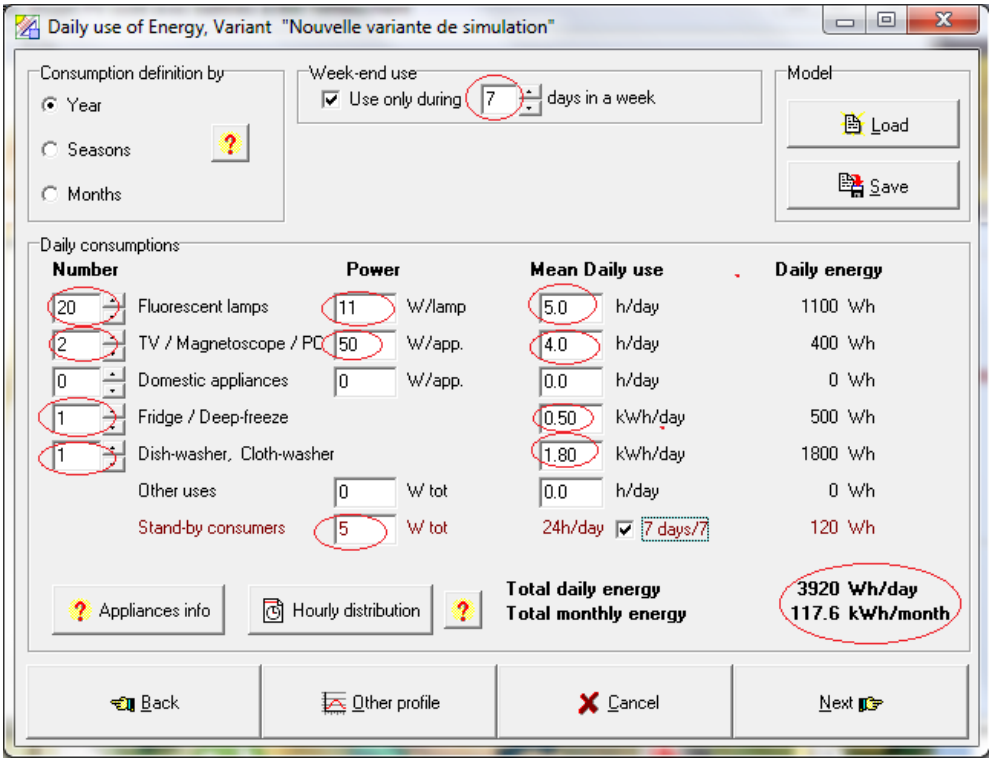


Figure 2.20 : Consommation journalière

Nous avons choisi la tension d'installation de 48 Volt et trois jours d'autonomie (Voir figure ci-dessous)

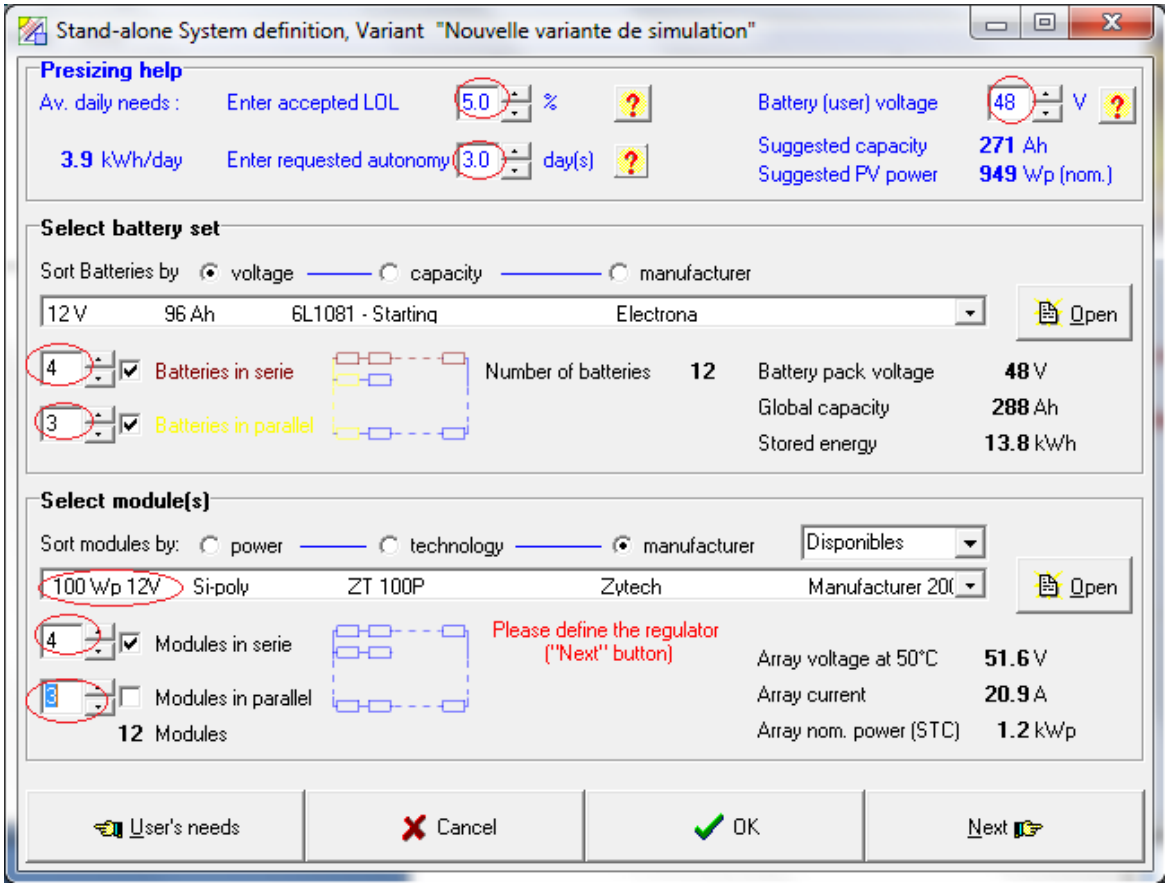


Figure 2.21 : Nombre de module et de batterie

Le logiciel PVSYST 5.74 permet également le choix des modules en terme de tension et de puissance d'un coté et de l'autre coté le choix des batteries (tension et puissance).

A - Pour les modules :

Douze (12) modules PV modèle « Zytech » (12V 100Wc), trois branches en parallèle, et chaque branche comporte quatre (4) modules (c à d 48V par branche).

B - Pour les batteries :

Douze (12) Batteries modèle « Electrona » (12V 96Ah), trois branches en parallèle, et chaque branche comporte quatre (4) batteries (c à d 48V par branche).

✓ **Les caractéristiques du module**

En cliquant sur le bouton graphique

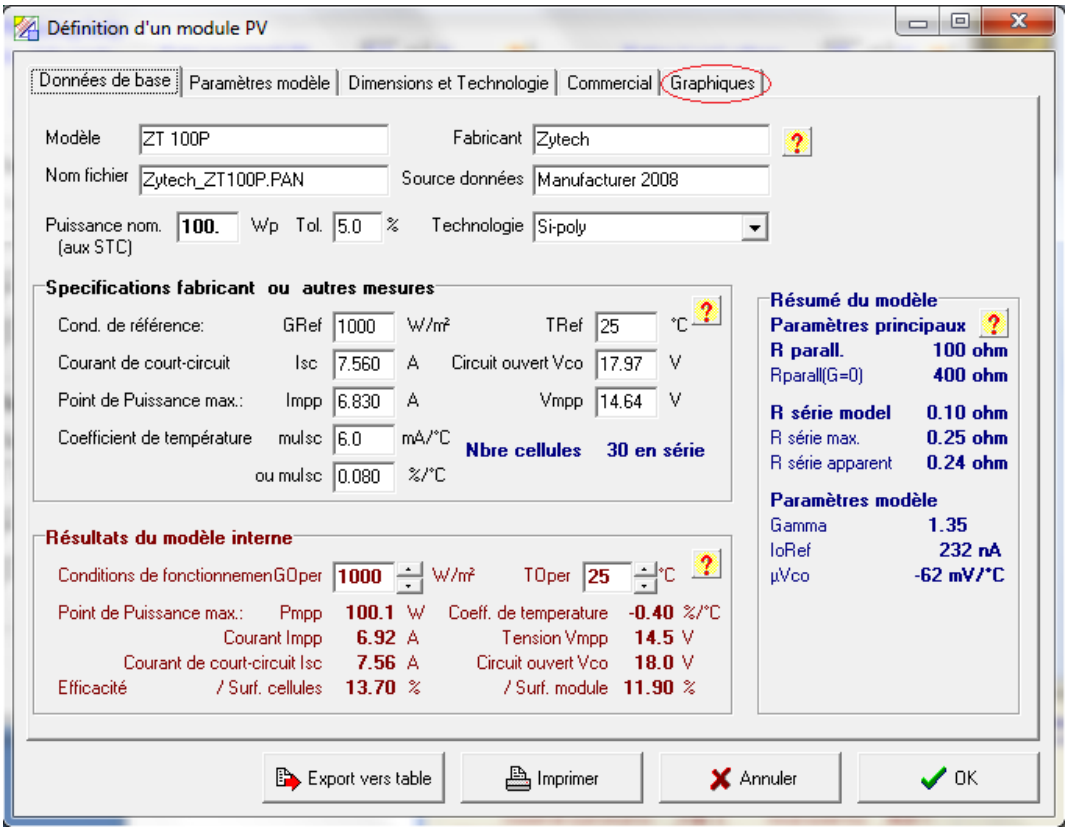


Figure 2.22 : Les coordonnées du module

Finalement on choisit le type de régulateur et l'onduleur

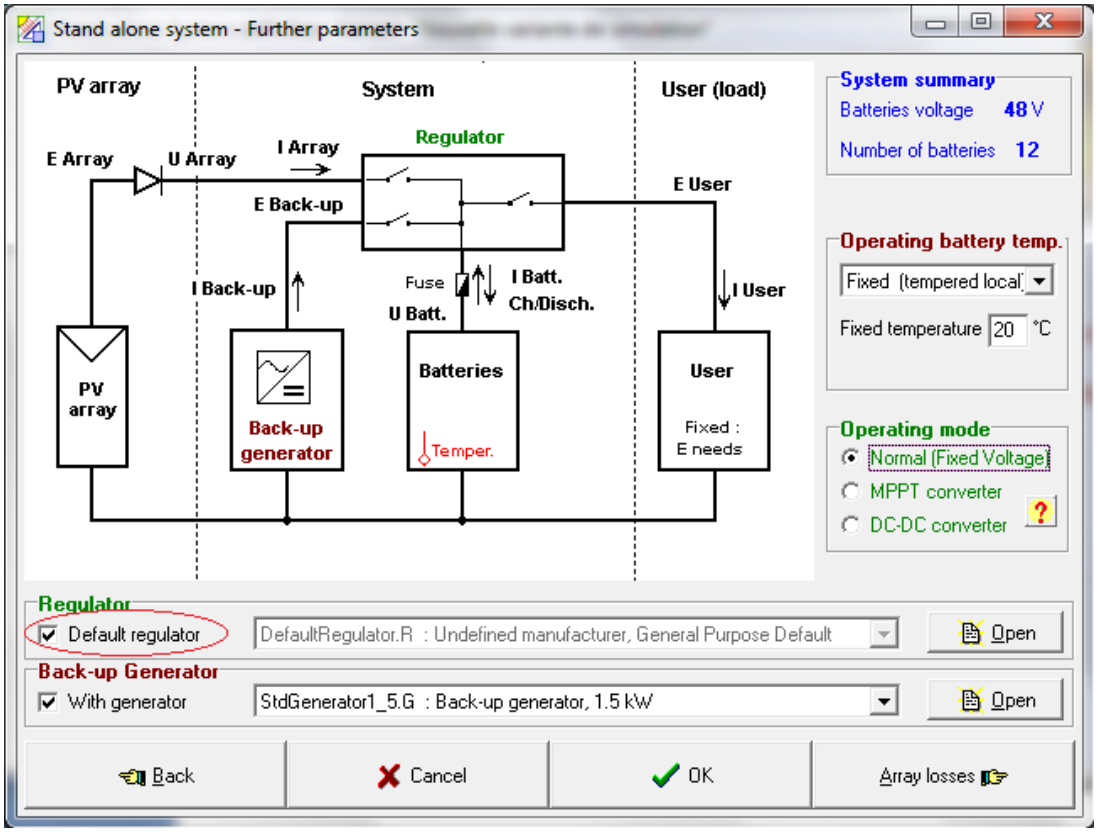


Figure 2.23 : Choix de type du régulateur

2.6.3 Résultats de simulation et interprétation

Les résultats de la simulation du générateur photovoltaïque sont présentés par les figures suivantes :

- **Effet de l'ensoleillement sur les caractéristiques I-V**

La figure 2.25 présente la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque modèle « Zytech » (12V 100Wc), pour différents ensoleillements à une température fixe de 25°.

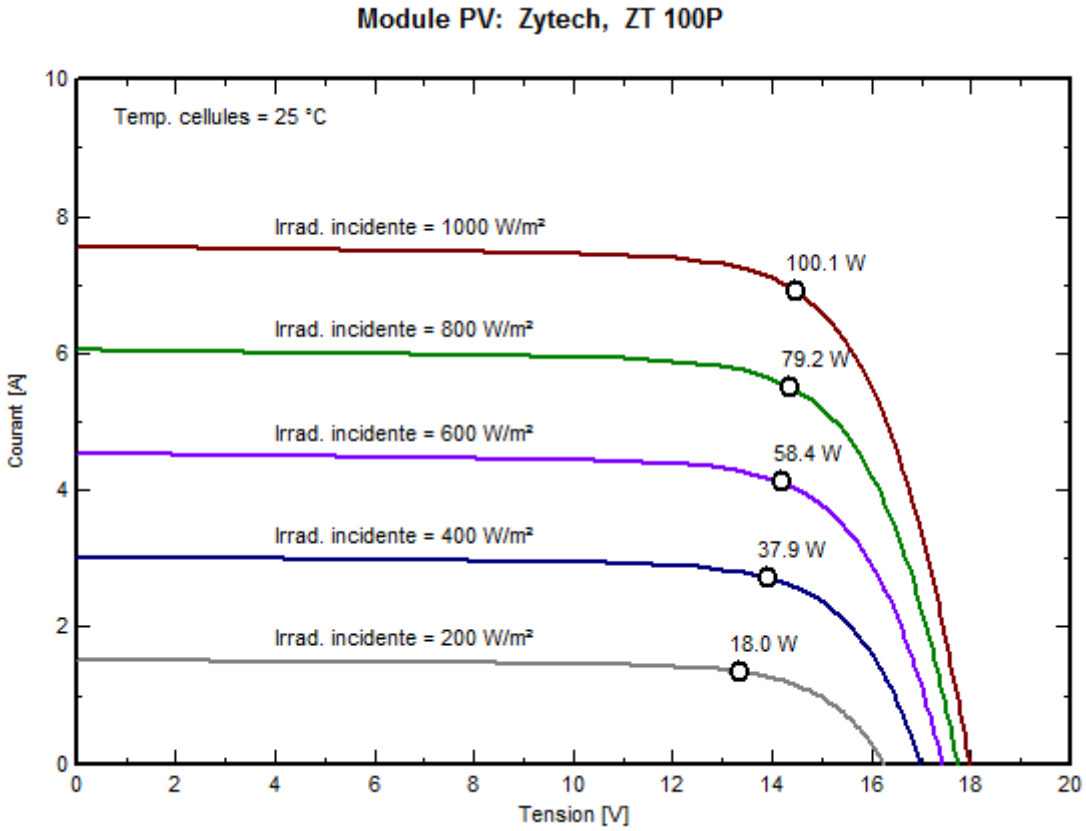


Figure 2.24: Influence de l'ensoleillement sur la courbe I-V

D'après la figure 2.24, on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension (V) varie légèrement car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement, alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique ceci implique donc que :

- La puissance optimale de la cellule (Popt) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement.
- Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension.

- **Effet de température sur les caractéristiques I-V**

L'effet le plus important est l'influence de la température qui demandera des choix importants dans la conception des panneaux et des systèmes.

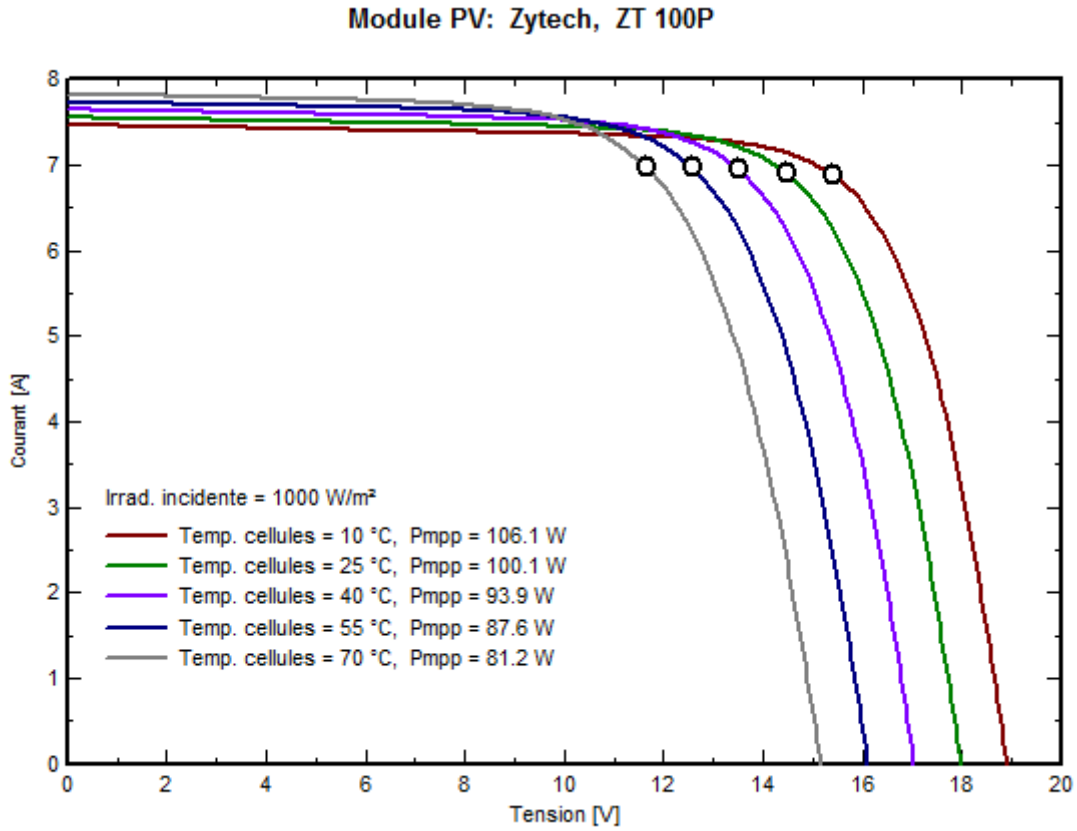
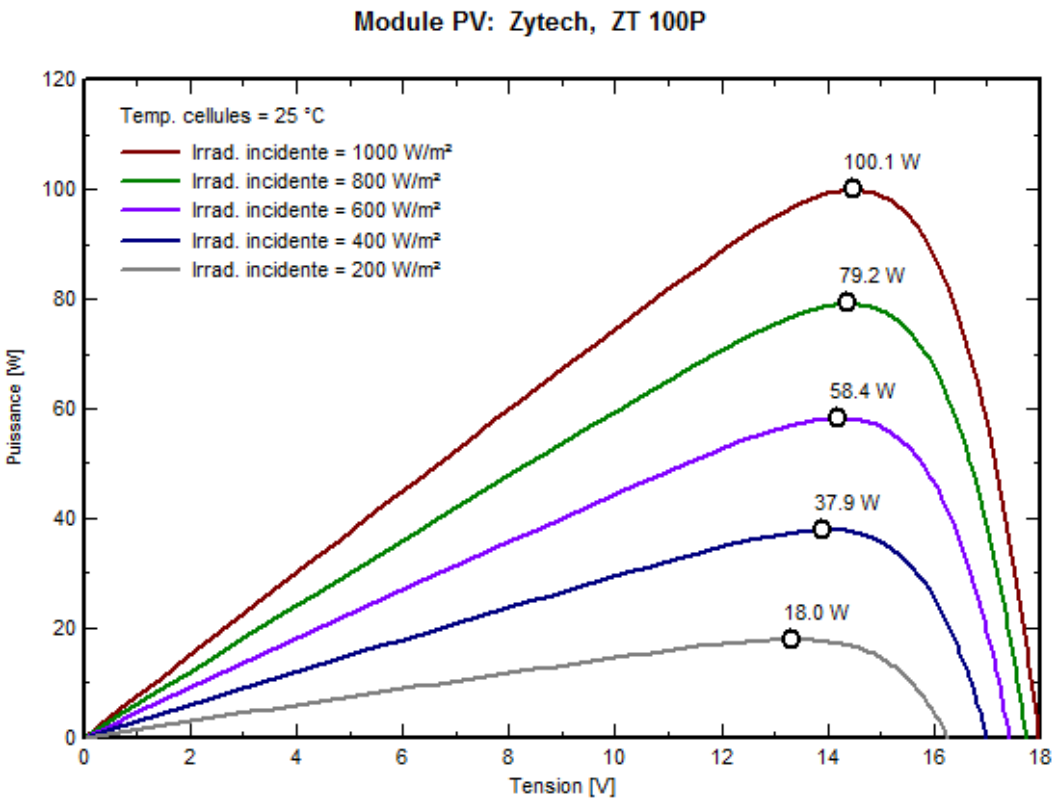


Figure 2.25 : Influence de la température sur la courbe I-V

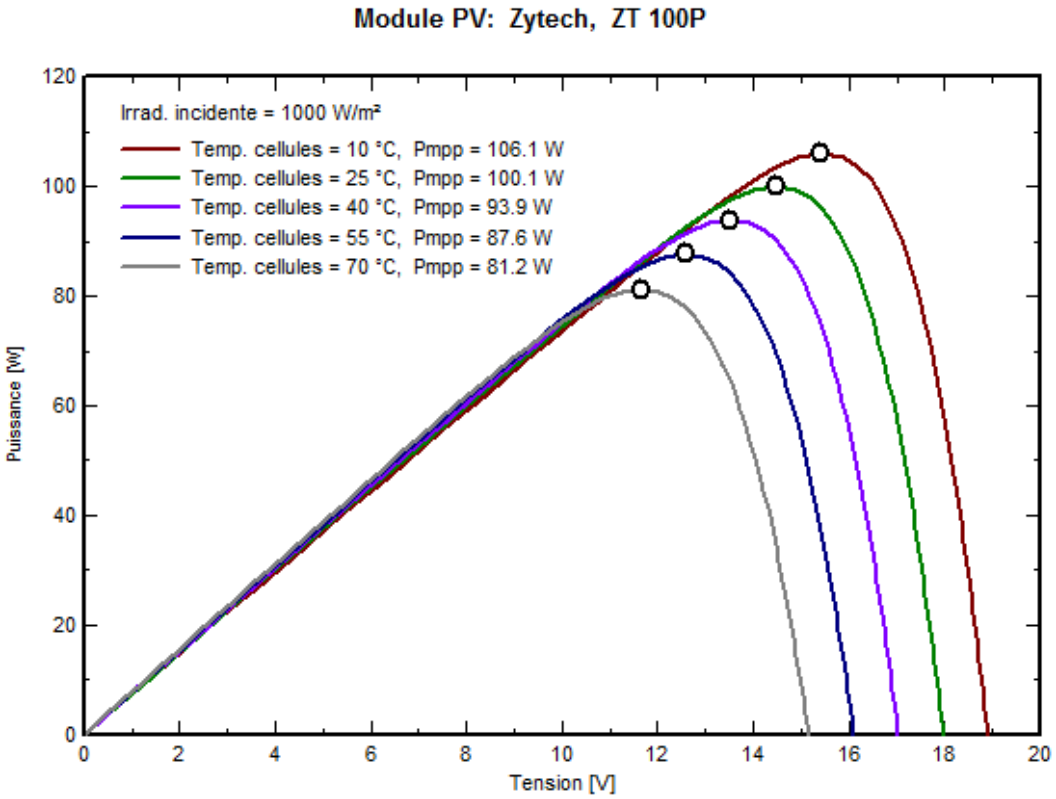
La figure 2.25 montre l'influence de la température sur la caractéristique I-V d'un module « Zytech » (12V 100Wc). Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique I(V). Le courant dépond de la température puisque le courant augment légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quant la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution.

- **Caractéristiques puissance-tension P-V**

Sans tenir compte des caractéristiques I-V, le générateur photovoltaïque peut être défini avec ses caractéristiques de tension-puissance (P-V). Figure (a) montre les caractéristiques photovoltaïques P-V de générateur « Zytech » (12V 100Wc), pour des valeurs différentes d'ensoleillement à une température fixe, alors que la figure (b) présente les caractéristiques P-V pour différents valeurs de températures à un ensoleillement fixe.



Figure(a) (Température constante)



Figure(b) (Ensoleillement constant)

Figure 2.26 : Influence de l'ensoleillement et la température sur la courbe P-V

❖ **Deuxième cas : Système avec suiveur à deux axes**

On a utilisé le même système étudie et le même dimensionnement à l'exception que nous avons ajouté un suiveur à deux axes à notre système.

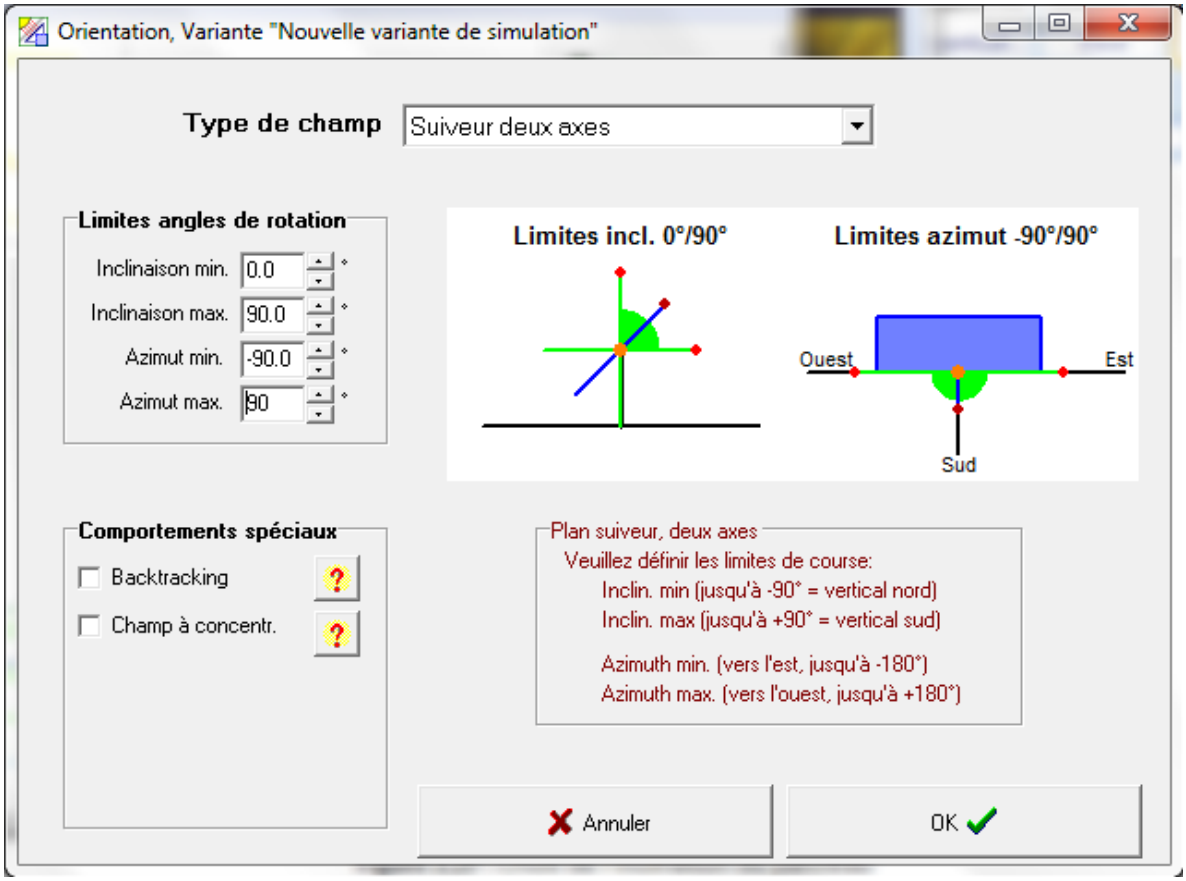


Figure 2.27 : Choix de l'inclinaison du panneau

Le résumé des conditions ainsi des résultats issus de l'utilisation d'un régulateur, est représenté ci-dessous :

Tableau 2.3 : paramètres généraux de simulation.

PVSYST V5.74		11/05/17	Page 1/4
Système isolé avec batteries: Paramètres de simulation			
Projet : Projet PV isolé avec batteries à Ain Temouchent			
Site géographique :	**Ain Temouchent**		**Pays : Algeria**
Situation	Latitude35.3°N		Longitude1.1°W
Temps défini comme	Temps légal Fus. horaire TU+1		Altitude251 m
Albédo 0.20			

Données météo : Ain Temouchent, Données horaires synthétiques

Variante de simulation : Nouvelle variante de simulation

Date de la simulation11/05/17 à 23h46

Paramètres de simulation

1er étape :

Orientation plan capteurs Inclinaison 32° Azimut 0°

2ém étape :

Suiveur à deux axes Inclin .minimum 0° Inclin. Maximale 90°

Limites de course Azimut minimum -90° Azimut Maximale 90°

Caractéristique du champ de capteurs

Module PV Si-poly Modèle **ZT 100P**

Fabricant Zytech

Nombre de modules PV En série 4 Modules En parallèle 3 Chaines

Nombre Totale de modules PV Nombre module 12 Puissance unitaire 100 Wc

Puissance globale du champ Nominale (STC) **1.20 KWC** Aux cond. De fonct. 1.08 KWC (50°C)

Caractéristique de fonct. Du champ (50°C) Umpp 52 V Impp 21A

Surface totale Surface modules 10.1 m2 surface cellule 8.8 m2

Paramètres du système Type de système **Système Isolé avec batteries et génératrice**

Batterie Modèle **6L1081-Starting**

Fabricant Electrona

Caractéristique du banc de batteries Tension 48 V capacité nominale 288 Ah

Nombre d'unités 4 en série x3 en parallèle

Température Fixée (20°C)

Génératrice d'appoint Modèle 1.5 KW

Fabricant Back-up generator

Puissance 1.5 KW

Besoins de l'utilisateur: Cosonmm. domestique Constants sur l'année

Moyenne 3.9 KWh/Jour

Principaux résultats de la simulation

Plan fixe

Production du système **Energie disponible2335 KWh/an** Productible 1946 KWh/KWc/a

Energie utilisée 1429 KWh/an En excès (inutilisée) 792KWh/an

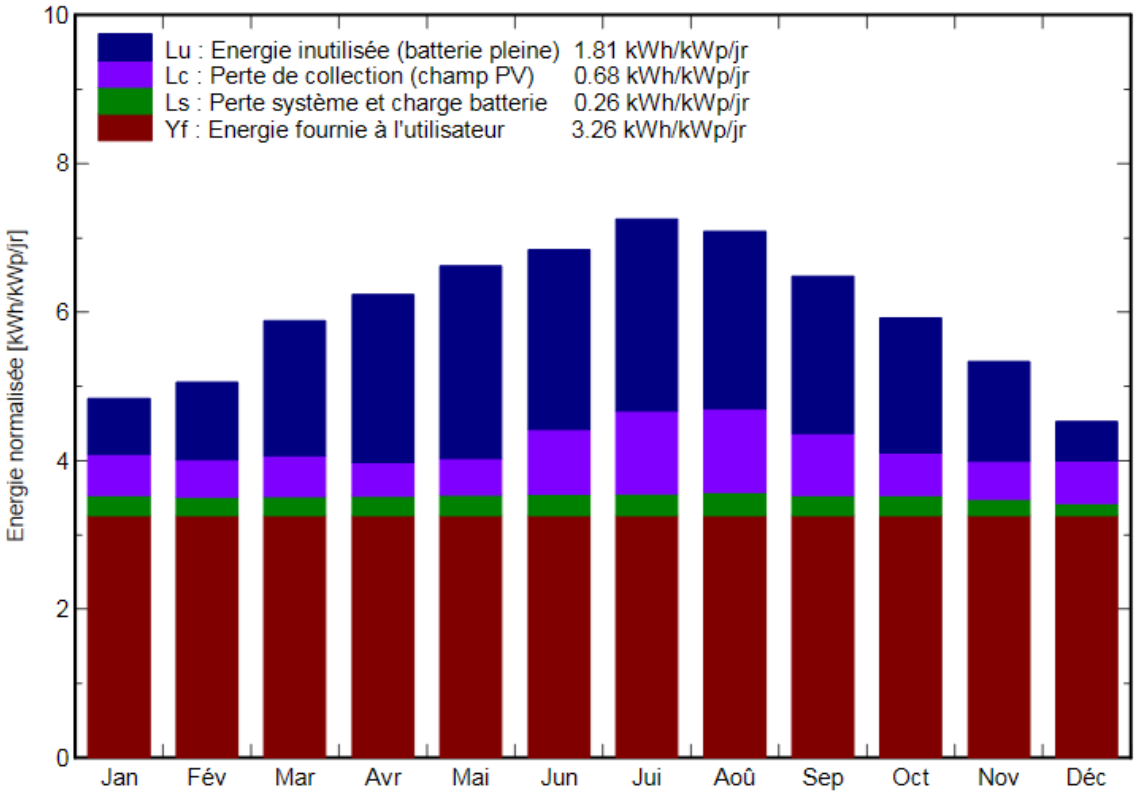
Energie d'appoint de la génératrice Energie d'appoint 0KWh/an Consomm. De carburant 0/an

Suiveur à deux axes

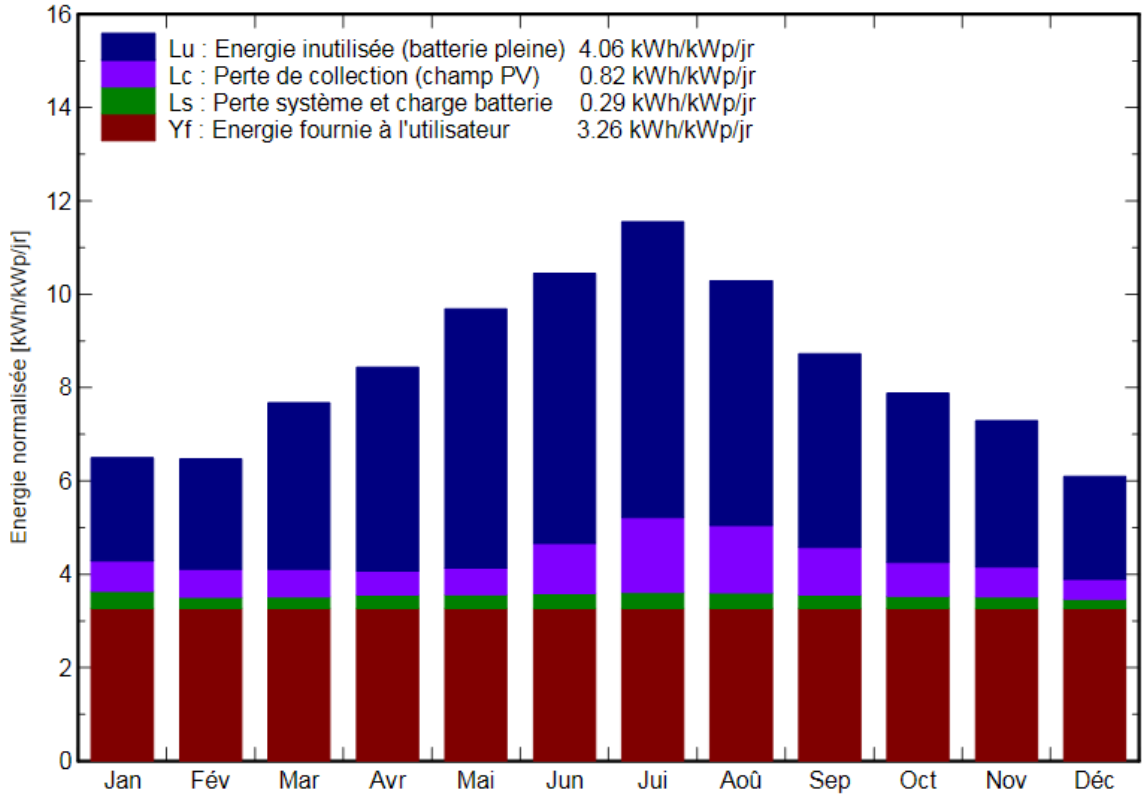
Production du système **Energie disponible3334 KWh/an** Productible 2778 KWh/KWc/a

Energie utilisée 1429 KWh/an En excès (inutilisée) 1777 KWh/an

Energie d'appoint de la génératrice Energie d'appoint 0KWh/an Consomm. De carburant 0/an



(a) Plan fixe (Sans suiveur)



(b) Système avec suiveur

Figure 2.28: Production normalisées (par KWp installé).

Les figures 2.28-a et 2.28-b montre la production énergétique annuelle du panneau, On remarque que l'énergie fournie à l'utilisateur reste constante 3.26 KWh/jours car c'est le même système utilisé. Par contre l'énergie inutilisée dans le plan suiveur est plus grande que le plan fixe. Les résultats obtenus confirment l'importance d'un système PV avec suiveur solaire.

2.7. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté le principe et les étapes de dimensionnement des installations photovoltaïques autonomes optimisées.

Les résultats obtenus confirment l'importance d'un suiveur solaire à deux axes par rapport à un plan fixe, en termes de production annuelle d'énergie électrique. Pour une même installation donnée la présence du suiveur solaire permettre une augmentation de 30% d'énergie électrique.

Le chapitre suivant sera consacré à la réalisation d'un prototype d'un suiveur solaire à deux axes.

Chapitre 3

REALISATION D'UN PROTOTYPE D'UN SUIVEUR SOLAIRE

3.1. INTRODUCTION

L'amélioration du rendement des systèmes photovoltaïques dépend de deux facteurs, le panneau solaire et le système de traque solaire.

L'orientation des panneaux photovoltaïques est un problème très important. En effet, le principe même des panneaux suppose que le rayonnement parvienne à la surface dans une direction déterminée. Puisque la position apparente du soleil par rapport à un point de captation est constamment variable à l'échelle d'une journée, nous serons donc obligés de modifier constamment la position des panneaux afin de suivre celle du soleil en utilisant un système de suiveur solaire automatique. Ce dernier est adapté à la position du panneau de manière à ce que la radiation solaire incidente soit toujours perpendiculaire pour capter le maximum de rayon incident. La production dans ce cas est presque homogène pour toute la journée et on augmente notre production en puissance de 30% à 40%.

Dans ce chapitre, on présentera une vue d'ensemble du dispositif expérimental que nous avons réalisé «Suiveur Solaire Bi-axial à Base de capteurs de lumière». Ce système suiveur est constitué d'une partie mécanique qui sert à supporter le panneau et le diriger vers le rayonnement perpendiculaire du soleil et également une partie électronique constituée des capteurs solaires, une carte microcontrôleur « Arduino » et des servomoteurs électriques.

3.2. QU'EST-CE QU'UN SUIVEUR SOLAIRE

Le tracker solaire est une structure portante qui permet d'orienter les panneaux solaires photovoltaïques en fonction de la position du Soleil, afin d'augmenter la productivité. En effet, le Soleil change de position tout au long de la journée, l'angle d'incidence des rayons avec les panneaux augmente et l'éclairage n'est donc pas optimal. C'est pourquoi nous nous basons sur le modèle du tournesol, qui suit le trajet du soleil afin d'accéder au meilleur ensoleillement possible pour assurer la photosynthèse. L'idée est que le surplus d'énergie produite grâce à l'orientation des panneaux sera plus important que l'énergie dépensée à orienter les panneaux de façon optimale. En effet, un tracker solaire peut augmenter le rendement d'un panneau photovoltaïque jusqu'à 40 % de plus qu'un panneau fixe. La meilleure orientation est celle qui fait que les rayons soient perpendiculaires aux panneaux. Suivre le Soleil nécessite deux axes : en azimut (d'Est en Ouest à mesure de l'avancée de la journée) et en hauteur (selon la saison et l'avancée de la journée). La meilleure façon de suivre le Soleil est donc d'utiliser un tracker à deux axes, mais il en existe avec un seul axe qui dépend de l'azimut, l'angle des panneaux par rapport au sol étant calculé de façon optimum selon la latitude

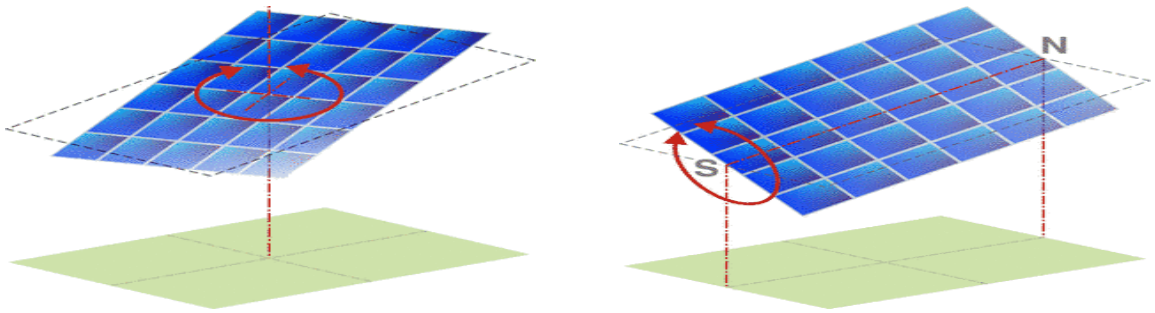
Dans notre cas, le suivi de soleil se fera sur les deux axes, en azimut et en hauteur.

Figure3.1: Un champ de tournesol

3.3. DIFFERENTS SYSTEMES DE POURSUITE SOLAIRE

3.3.1. Système de poursuite solaire mono axial

C'est un système qui tourne autour d'un axe simple. Par exemple, les panneaux solaires peuvent être exposés plein sud. A l'instar du soleil qui se lève à l'est et se couche à l'ouest, la position des panneaux sera corrigée en vue d'accroître leur rendement. La figure ci-dessous représente un panneau solaire avec un système de poursuite mono- axial :



Figure(a) **Figure (b)**

Figure 3.2: Système de poursuite solaire mono-axial.

3.3.2. Système de poursuite solaire bi axial

C'est un système qui suit la course du soleil sous des angles multiples, de manière à ce qu'il irradie entièrement le panneau. Ainsi on améliore le rendement des panneaux solaires de 30 à 40%.

La figure ci-dessous représente un panneau solaire avec un système de poursuite bi axial :

Figure 3.3 : Système De Poursuite Solaire Bi axial.

On distingue principalement le suiveur à un axe, qui permet de suivre le soleil d'est en ouest, du suiveur à deux axes qui permet une modification de l'orientation et de l'inclinaison. Ce dernier cas nécessite l'intervention de deux moteurs.

3.4. INTERET D'UN SUIVEUR SOLAIRE

L'industrie de la cellule photovoltaïque se doit d'être aussi efficace que possible. On peut accroître le rendement des PV de deux manières. La première consiste à améliorer techniquement la cellule photovoltaïque, la seconde à optimiser le mouvement du système de poursuite solaire.

L'utilisateur final va préférer une solution mobile de poursuite solaire plutôt qu'une installation fixe pour plusieurs raisons:

- Le rendement des panneaux photovoltaïques est accru de 30 à 40%
- La surface du parc solaire est réduite tout en gardant le même potentiel
- Le temps de retour sur investissement est réduit
- Amortissement du système en 4 ans (en moyenne)
- La durée de vie est de 25 à 30 ans.

Suivre la course quotidienne du soleil d'Est en Ouest génère un gain de productivité de votre panneau solaire de l'ordre de 20 à 62% selon votre situation géographique. Les installations au près de l'Equateur bénéficient de manière optimale des avantages de la poursuite solaire.

Le propriétaire d'un parc solaire équipé d'un système de suiveur solaire va augmenter ses revenus car ceux-ci dépendent de la quantité d'énergie produite.

Notre démarche consiste à fournir un système d'entraînement pour panneau solaire permettant une exploitation optimale des capacités du photovoltaïque.

3.5. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU SYSTEME

Nous avons choisis l'utilisation de photorésistances (abréviation : LDR voir la définition en bas dans la sélection Composants du prototype de suiveur solaire) écartées l'une de l'autre et déterminer l'orientation du soleil en calculant la différence d'éclairage. Le dessin suivant représente la maquette :

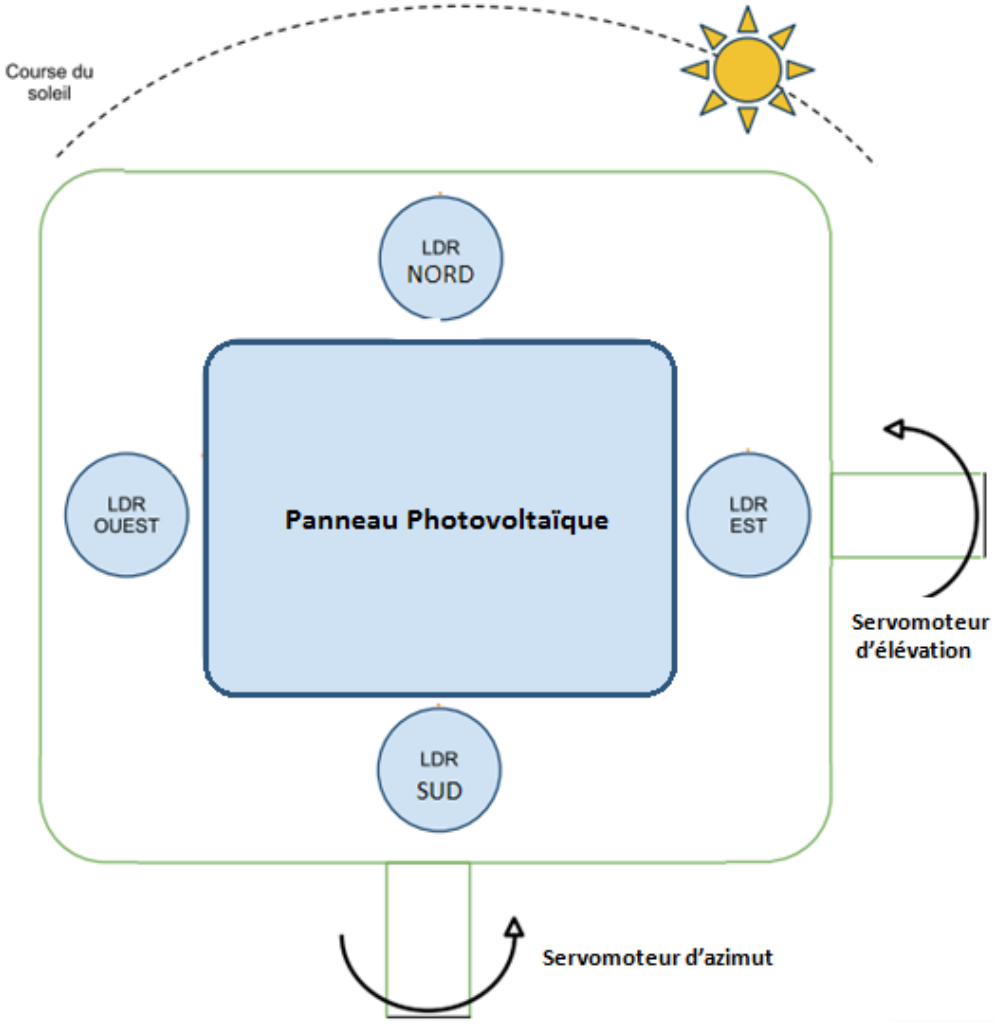


Figure3.4 : Dessin de la maquette

On voit sur le dessin que si par exemple la LDR EST reçoit plus de lumière que la LDR OUEST donc le servomoteur d'azimut va tourner en direction de l'EST pour égaliser tout ça. Le même principe s'applique sur l'axe NORD-SUD.

L'organigramme suivant résume le principe de fonctionnement :

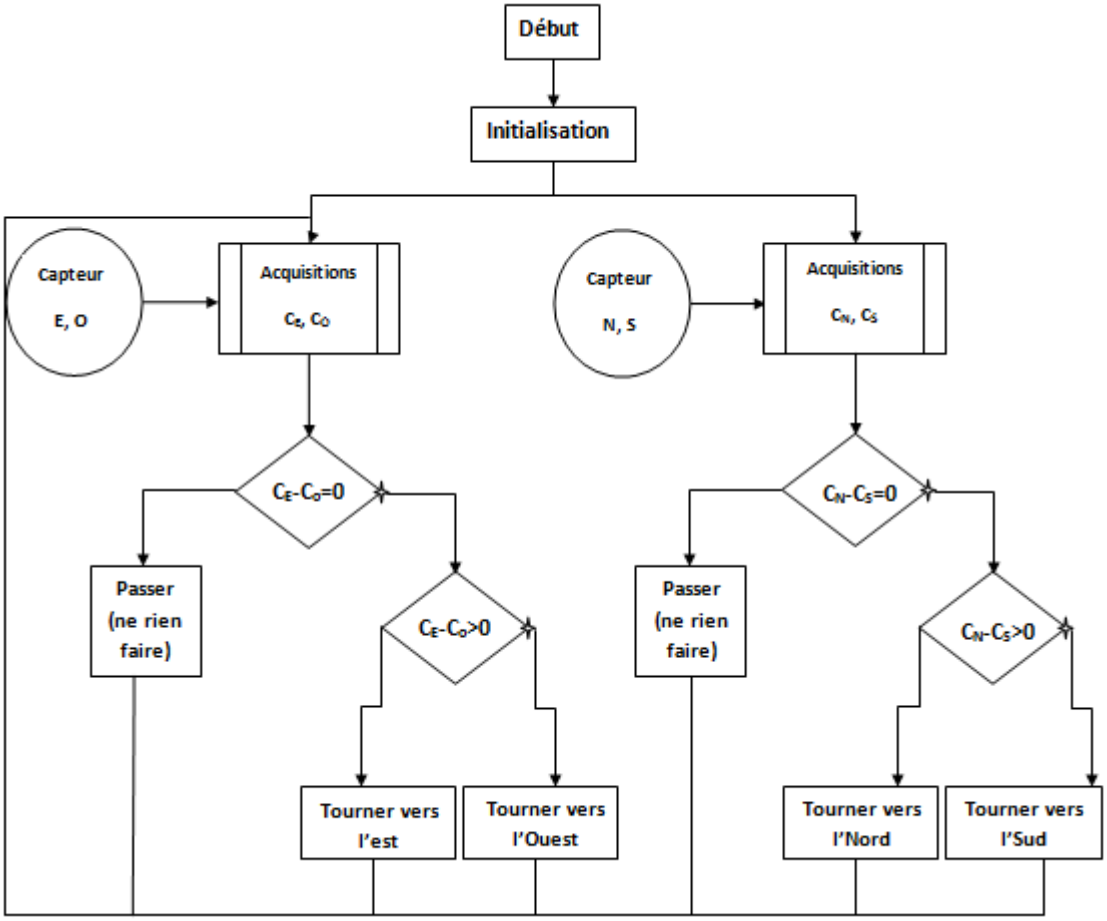


Figure3.5 : Algorithme du contrôle.

3.6. PRESENTATION DU MECANISME

Notre réalisation peut être décomposée en deux parties :

- Partie mécanique
- Partie électrique

3.6.1. Aspect mécanique

Le panneau solaire est monté sur un support inclinable sur les deux axes (horizontal et vertical). Deux servomoteurs sont nécessaires pour orienter l'ensemble.

1. Un servomoteur pour l'orientation en azimut.
2. Un autre servomoteur pour l'orientation en hauteur.

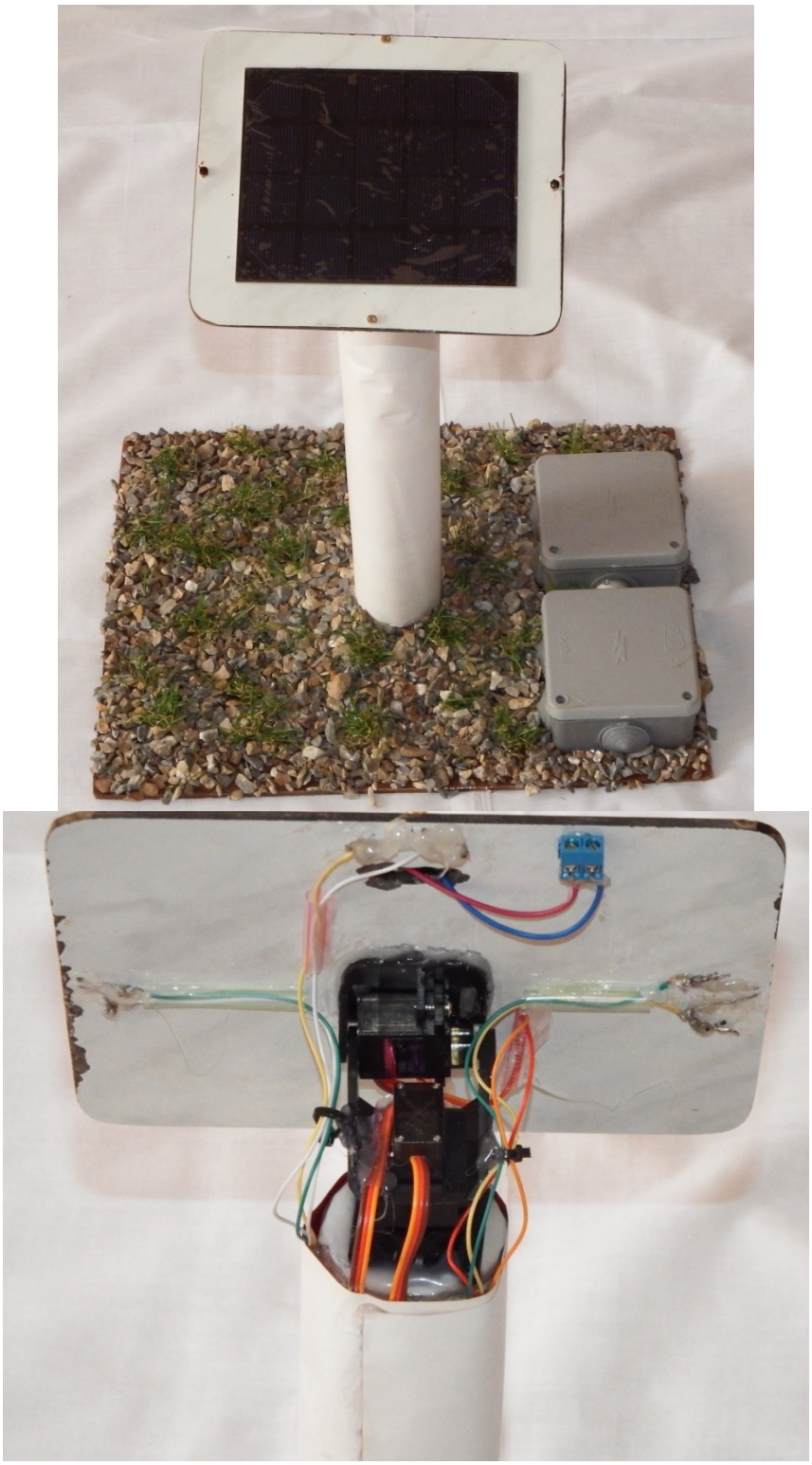
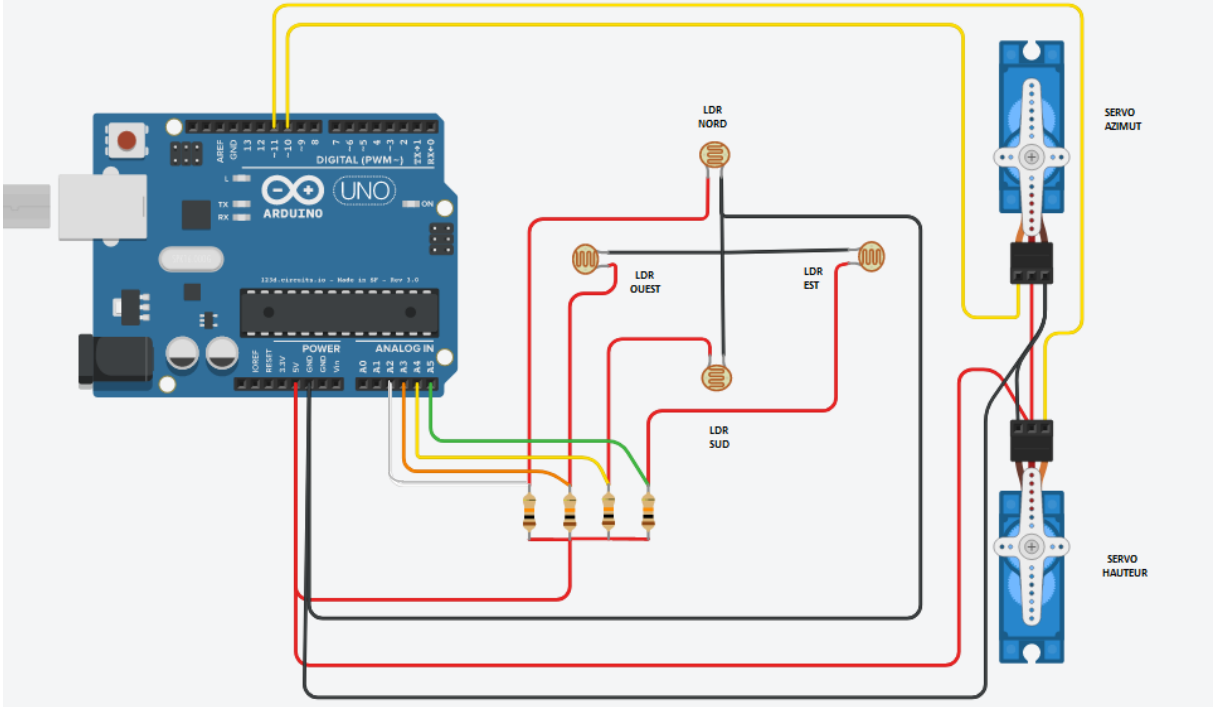


Figure3.6 : Aperçu général du système.

3.6.2. Aspect électrique

Nous avons réalisé le circuit suivant :



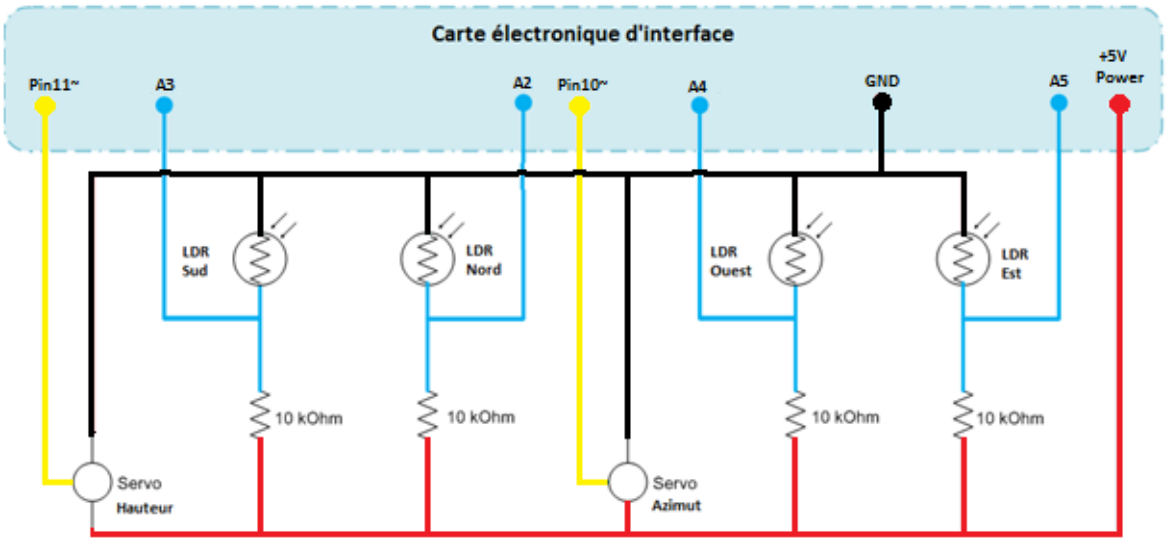


Figure3.7 : Circuit électrique du suiveur proposé.

3.6.2.1. Composants du prototype de suiveur solaire

Les composants sont des éléments de base en électronique qui, une fois assemblés, constitueront un circuit électronique. Chacun de ces éléments a un comportement bien particulier, dépendant de ses caractéristiques et de ses conditions d'utilisation.

a) Résistance

Quatre résistances de 10 kΩ sont utilisées afin de protéger les entrées de la carte d'interface.

En électronique, la valeur de notre résistance est codée par des anneaux de couleurs :

Tableau 3.1 : marquage des résistances, code des couleurs

Couleur	1er chiffre significatif	2éme chiffre significatif	3éme chiffre significatif	Multiplicateur	Tolérance
Argent				X0,01 Ω	± 10%
Or				X0,1 Ω	± 5%
Noir		0	0	X1 Ω	± 20%
Marron	1	1	1	X10 Ω	±1%
Rouge	2	2	2	X100 Ω	± 2%
Orange	3	3	3	X1 kΩ	
Jaune	4	4	4	X10 kΩ	
Vert	5	5	5	X100 kΩ	
Bleu	6	6	6	X1 MΩ	
Violet	7	7	7		
Gris	8	8	8		
Blanc	9	9	9		

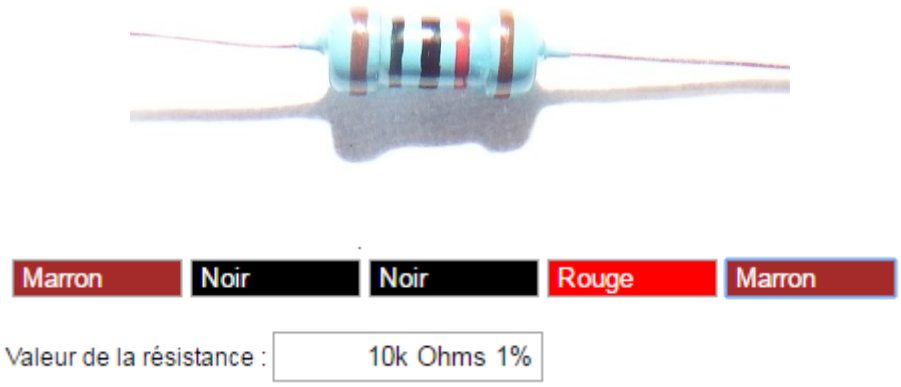


Figure 3.8 : résistance 10 KΩ.

b) Photorésistance(LDR)

Nous avons utilisé un capteur à base de la photorésistance pour réduire le prix de revient, et simplifier le fonctionnement. Le principe que nous avons adopté est classique, il consiste à contrôler l'égalité d'éclairement de 4 capteurs répartis dans les 4 quadrants deux capteur du l'axe horizontal et les deux autres sur l'axe vertical.

Le capteur «LDR» (Light Dependent Resistor) à résistance photo-dépendante sont des composants électroniques dans la résistivité varie en fonction du flux lumineux incident: plus elle est éclairée, plus sa résistivité baisse, la taille d'une LDR est de 3mm.

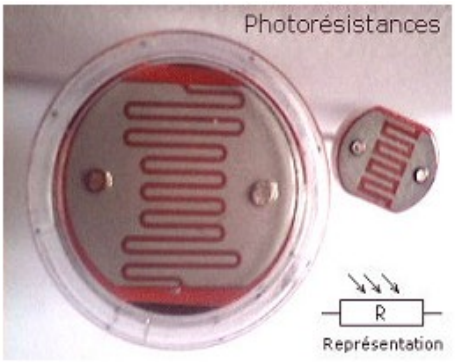


Figure3.9 : Aperçu d'une photorésistance.

Une photorésistance est composée d'un semi-conducteur à haute résistivité. Si la lumière incidente est d'intensité suffisamment élevée, les photons absorbés par le semi-conducteur donneront aux électrons liés assez d'énergie pour sauter dans la bande de conduction, les électrons libres (avec leurs trous d'électron) ainsi produits abaissant la résistance de l'ensemble.

Le montage est basé sur un diviseur de tension :

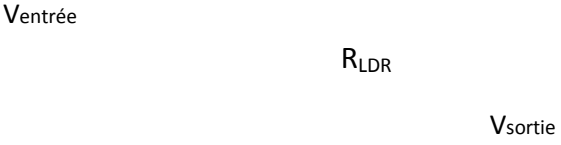


Figure 3.10 : Branchement de résistance LDR en diviseur de tension [25].

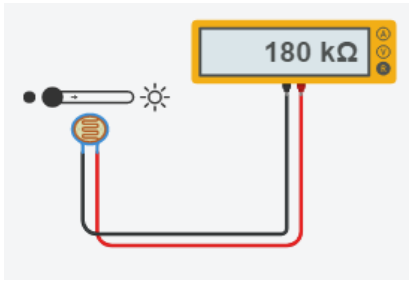
$$V_{sortie} = \frac{R_{LDR}}{10000 + R_{LDR}} \times V_{entrée} \qquad (3.1)$$

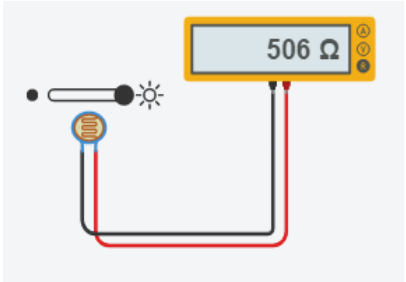
$V_{entrée}$: Tension d'alimentation du capteur (5v)

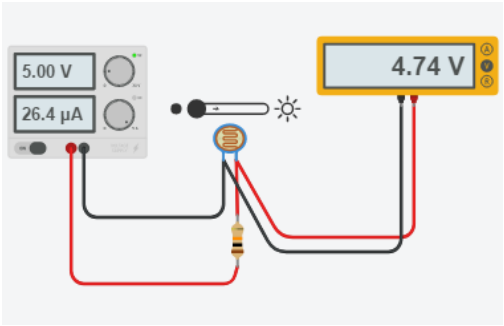
R_{LDR} : Résistance du LDR

V_{sortie} : Tension de la sortie du capteur (dépend de la lumière)

Il faut que les capteurs sont posés sur le même plan du panneau solaire pour que le l'éclairement soit le même sur les deux [25].







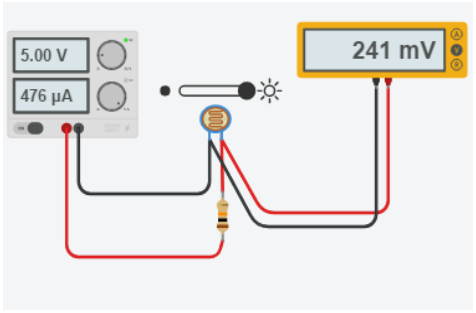


Figure (a) LDR dans l'ombre **Figure (b) LDR sous l'éclairage**

Figure 3.11 : La relation entre l'éclairage et la résistance du LDR

c) Le servomoteur

Le servomoteur est un petit moteur asservi c'est-à-dire qu'un circuit interne contrôle en permanence sa position. Il a souvent une plage de liberté réduite (moins d'un tour) mais peut atteindre à coup sûr une position et la maintenir avec force. Il existe de nombreux modèles. Les plus petits peuvent être actionnés directement avec la carte électronique.

Contrairement à un moteur classique qui est utilisé pour tourner avec une vitesse proportionnelle à un courant ou à une tension, un servomoteur est utilisé pour obtenir une position.

Le servomoteur peut tourner dans un sens ou dans l'autre en fonction de l'information donnée. Par sa conception un servomoteur classique à une course limitée à ±180°.

Un servomoteur est généralement un bloc noir ou bleu avec un petit plateau rotatif sur le dessus. De ce bloc partent 3 fils dont les couleurs sont généralement les suivantes :
Noir : la masse
Rouge : l'alimentation 5 V.
Jaune : signal de commande.

Figure3.12: Servomoteur.

Un servomoteur est principalement caractérisé par :

- Sa vitesse de rotation pour aller à la position désirée en rad/s ou sec/60°
- Son couple (torque en anglais) qui signifie la force que le servomoteur peut dégager pour garder la position souhaitée en kg/cm ou en Nm.

Contrairement aux moteurs classiques, le servomoteur est commandé en numérique. Il suffit de lui envoyer une impulsion logique (commandable directement par un microcontrôleur) dont la durée varie entre 1ms et 2ms. La durée de l'impulsion défini la position du servomoteur, c'est-à-dire que si l'impulsion dure 1ms, le servomoteur se déplacera tout à gauche et si l'impulsion dure 2ms, il ira tout à droite. Vous aurez également compris que pour 1,5ms, le servomoteur se positionne au milieu.

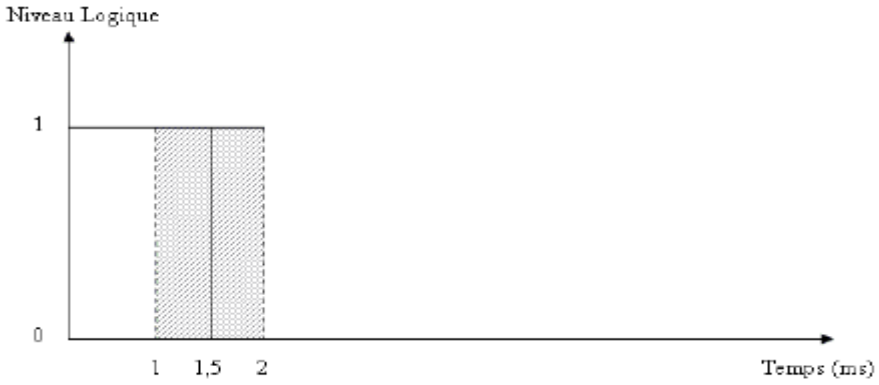


Figure3.13 : Technique de commande d'un servomoteur

Au repos, un servomoteur n'a que très peu de force. C'est pourquoi une seule impulsion ne lui permet souvent pas de garder la position demandée. Pour exploiter toute la puissance d'un servomoteur il est nécessaire de renvoyer la commande toutes les 20ms maximum. Au-delà de cette valeur, le servomoteur risque de trembler pour garder sa position.

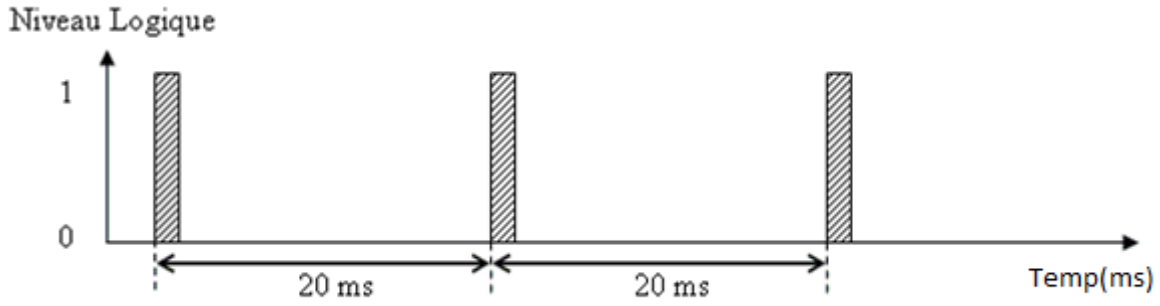


Figure3.14 : MLI pour Servomoteur

Les caractéristiques du servomoteur utilisé (MG90s) :

- Poids: 13.4 g
- Dimension: 22.5 x 12 x 35.5mm environ
- Couple de décrochage 1.8 kgf·cm (4.8V), 2.2 kgf·cm (6 V)
- La vitesse de fonctionnement: 0.1 s/60° (4.8 V), 0.08 s/60 ° (6 V)
- Tension de fonctionnement: 4.6V – 6.0V

d) Circuit imprimé

Pour minimiser le câblage on a utilisé un circuit imprimé ci-dessous :

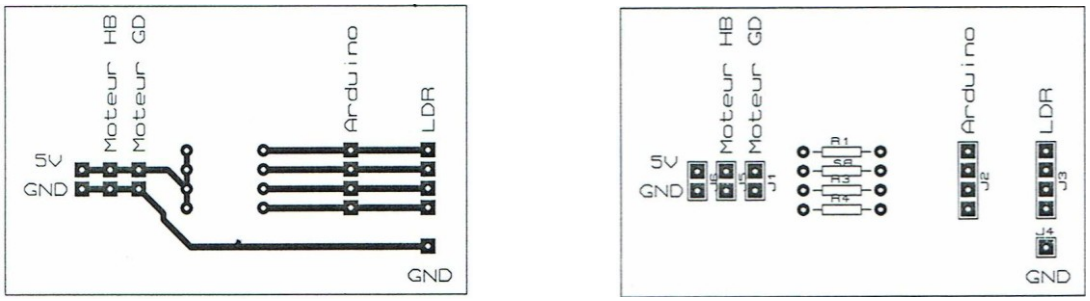


Figure 3.15 : Schéma du circuit imprimé.

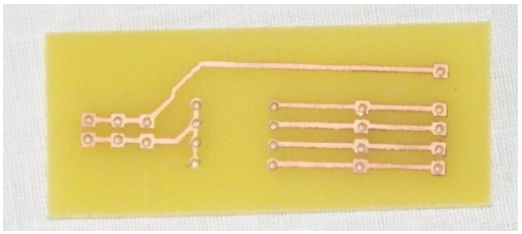


Figure 3.16 : Circuit imprimé

e) Carte électronique d'interface

La carte électronique utilisée est une plate-forme de prototypage d'objets interactifs à usage créatif constituée des composants électroniques et d'un environnement de programmation.

Cet environnement matériel et logiciel permet à l'utilisateur de formuler ses projets par l'expérimentation directe. La carte est composée de :

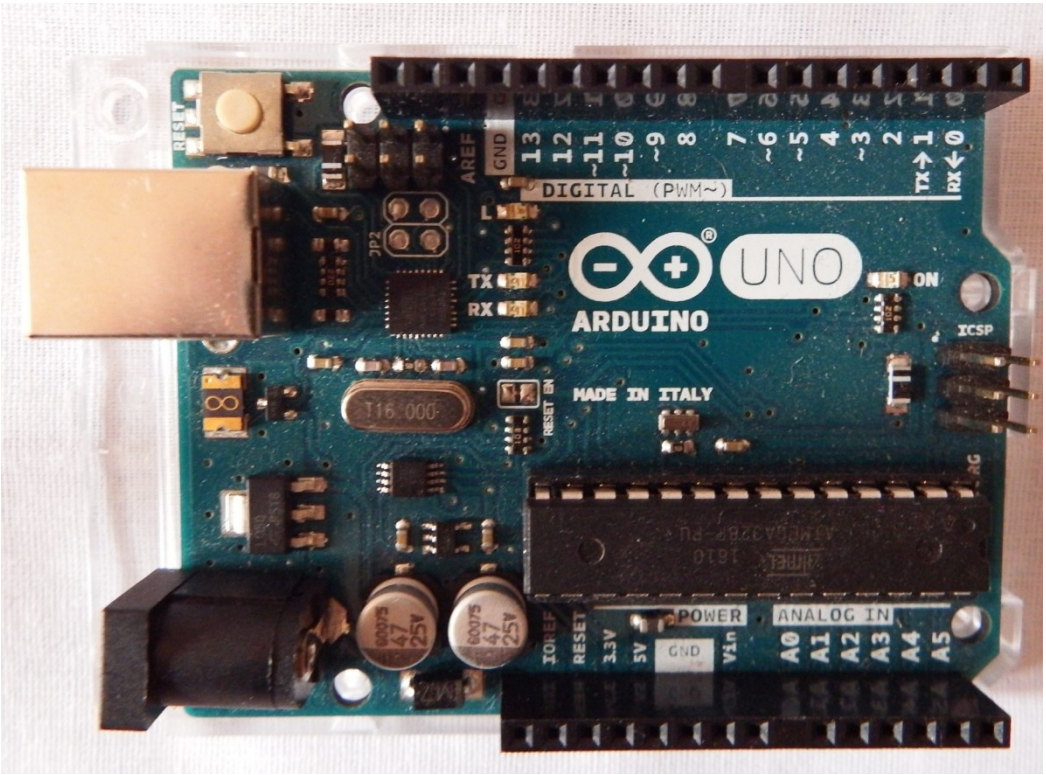


Figure 3.17: Schéma représente une carte électronique.

- Circuit intégré (Microcontrôleur)
- Entrées et sorties numériques
- Entrées et sorties analogiques
- Port USB
- Alimentation interne
- Alimentation externe

➢ **Microcontrôleur ATMEGA 328T-PU**

Un microcontrôleur ATMEGA 328T-PU est un petit processeur informatique relié à des entrées et des sorties numériques (0 ou 1) ou analogiques (tension variable). Il est capable de mémoriser et d'exécuter un programme visant à interpréter les entrées pour agir sur les sorties. Il se programme en général à l'aide d'un ordinateur mais peut fonctionner de manière autonome. Ils sont en général programmés en C/C++ et nécessitent des connaissances approfondies en électronique. Mais des différences peuvent apparaître pour des fonctions plus complexes.

➢ **Interface USB/série**

Cette partie permet d'établir une communication avec un ordinateur, directement avec un câble USB, afin de programmer le contrôleur ou d'échanger des informations avec un programme qu'il exécute. Côté ordinateur, la carte électronique apparaît au même titre

que n'importe quel périphérique USB et nécessite l'installation d'un pilote. Lorsqu'on utilise cette connexion, l'ordinateur assure directement l'alimentation de la carte électronique via la liaison USB.

- **Alimentation**

Ce circuit assure l'alimentation de l'ensemble des composants et des sorties suivant deux modes différents :

1. lorsque la carte est connectée à un ordinateur via USB, c'est le port USB de l'ordinateur qui fournit l'énergie (5 V) ;
2. lorsqu'on branche une source d'énergie au connecteur de la carte (batterie, transformateur ou pile), le système peut fonctionner de manière autonome.

Ce circuit inclut un régulateur de tension à 5 V mais il doit être alimenté entre 6 et 20 V. On conseille en général de l'alimenter plutôt entre 7 et 12 V pour garder une marge en basse tension et éviter que le circuit ne chauffe trop (car le régulateur de tension disperse toute surtension en chaleur).. Il ne faut pas brancher sur l'alimentation 5 V de la carte des composants qui consomment plus de 500 mA.

- **Entrées/sorties**

C'est par ces connexions que le microcontrôleur est relié au monde extérieur. La carte électronique est dotée de :

- 6 entrées analogiques.
- 14 entrées/sorties numériques dont 6 peuvent assurer une sortie MLI (voir explication en bas dans la section « Les sorties numériques »).

Les entrées analogiques lui permettent de mesurer une tension variable (entre 0 et 5 V) qui peut provenir de capteurs ou d'interfaces divers (potentiomètres, etc.).

- **Les entrées/sorties numériques**

Reçoivent ou envoient des signaux « 0 » ou « 1 » traduits par 0 ou 5 V. On décide du comportement de ces connecteurs (entrée ou sortie) en général dans l'initialisation du programme mais il peut être aussi changé dans le corps du programme.

- **Les sorties numériques**

Peuvent actionner de nombreux composants (LED, transistor, etc.) mais elles ne peuvent pas fournir beaucoup de courant (40 mA pour une carte électronique).

Pour piloter des circuits de plus forte puissance, il faut passer par des transistors ou des relais.

La puce ATMEGA n'est pas capable de sortir des tensions variables. Heureusement, 6 des sorties numériques (N° 3, 5, 6, 9, 10, 11) peuvent produire un signal (PWM). Ce sigle signifie « Pulse With modulation » en anglais ; en français l'on parle de MLI : "« Modulation de largeur d'impulsion ». Il s'agit d'un artifice permettant de produire une tension variable à partir d'une tension fixe.

La technique s'apparente approximativement à du morse : le signal de sortie est modulé sous forme d'un signal carré dont la largeur des créneaux varie pour faire varier la tension moyenne :

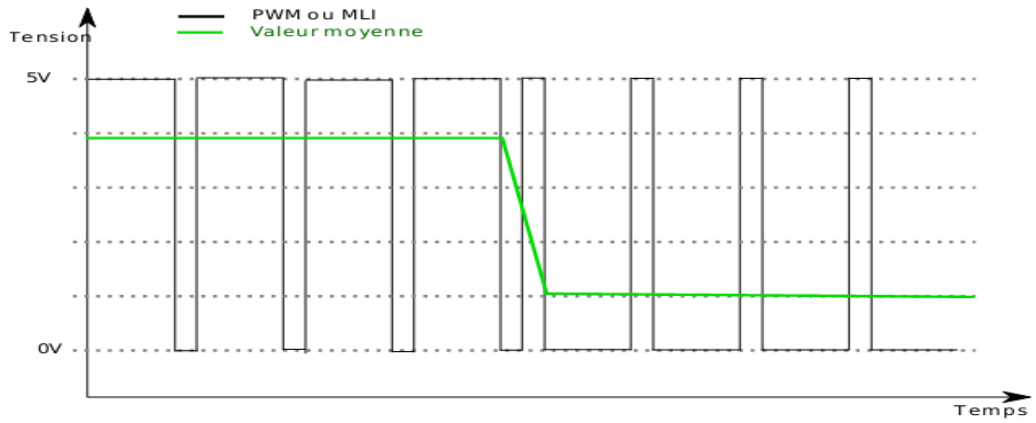


Figure3.18 : Modulation de largeur d'impulsion ou PWM.

3.7. PROGRAMMATION

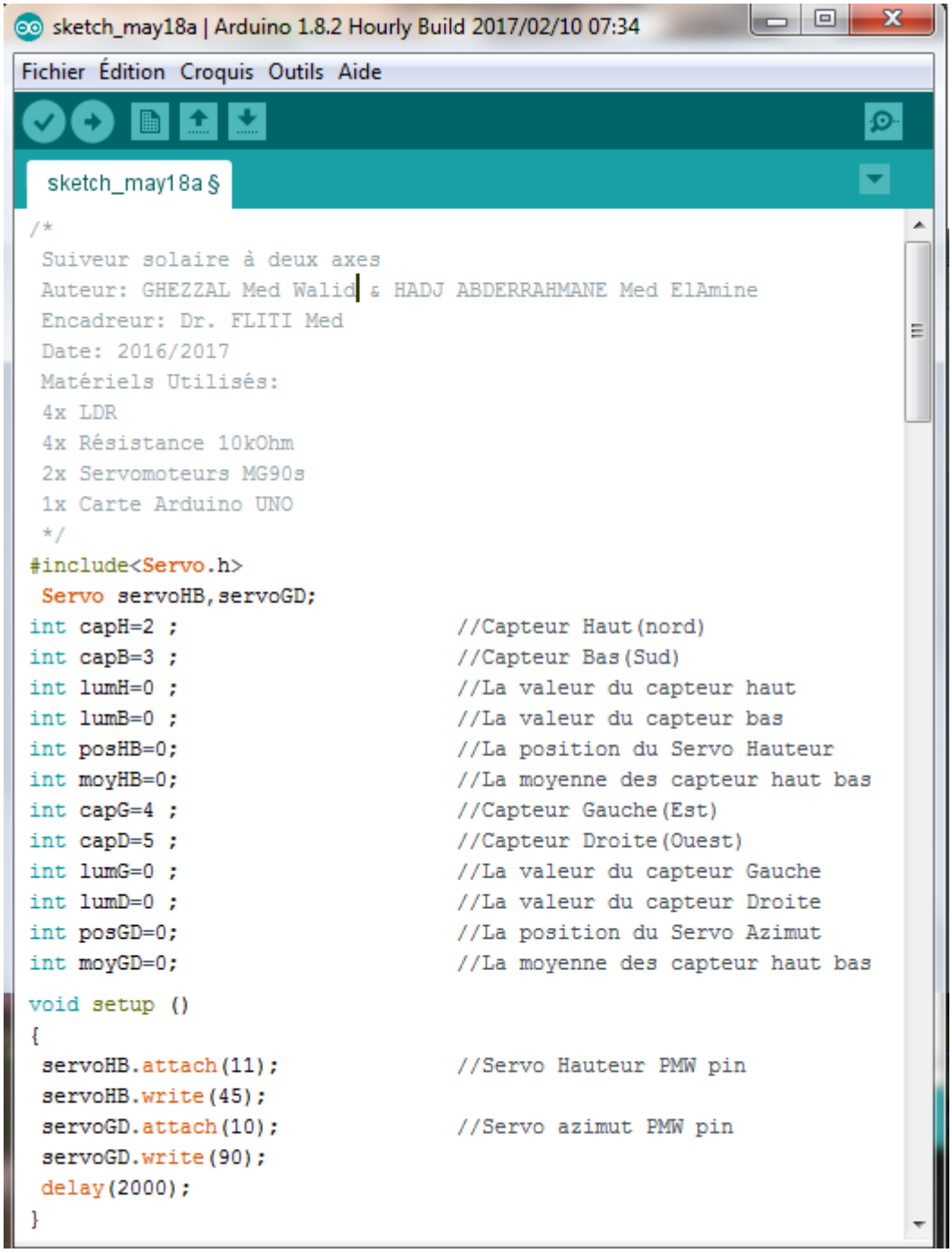


Figure3.19 : Une fenêtre du programme élaboré.

Nous avons effectué des essais sur notre prototype au laboratoire, en utilisant une torche. Les essais ont confirmé le bon fonctionnement de notre dispositif, et par la suite notre programme de commande. Le support des panneaux a bien suivi la lumière de la torche et le soleil dans les quatre sens (est-ouest-nord et sud).

3.8. CONCLUSION

Le rôle de notre système de poursuite consiste à contrôler le mouvement du suiveur de soleil et à le commander par un programme informatique(C++). Le suiveur va être orienté pour suivre automatiquement le soleil suivent une trajectoire bien déterminée. L'importance de ce système est de capter le maximum de rayonnement solaire.

Le système avec des photorésistances constitue une solution entièrement autonome, facile à mettre en œuvre (nous n'avons eu besoin d'aucun réglage particulier) et qui apporte un gain en énergie intéressant, notamment aux heures de la journée les moins ensoleillées.

CONCLUSION GENERALE

Dans une installation photovoltaïque, un système de poursuite solaire se révèle important pour collecter le maximum d'énergie. Pour les modules PV à base de concentrateurs, où les rayons solaires doivent être constamment perpendiculaires au panneau, un système de poursuite solaire est indispensable. L'objectif de notre travail a porté sur l'élaboration d'une technique de suivi de la trajectoire solaire durant toute l'année. Notre solution consiste en l'utilisation de quatre capteurs de lumière (LDR) placés selon une géométrie bien précise sur le support des panneaux PV. Les signaux issus de ces quatre capteurs sont traités par le microcontrôleur ATMEGA 328T-PU qui commande les servomoteurs.

Un premier prototype de suiveur solaire a été réalisé afin d'évaluer expérimentalement les performances du système en visualisant le rendement avec et sans suiveur solaire. Nos perspectives pour ce projet seront de réaliser un champ photovoltaïque a base de ce suiveur solaire. Nous pensons aussi à améliorer les matériaux des semi-conducteurs et d'intensifier les recherches dans un système de refroidissement compatible avec notre prototype . Ce projet de fin d'étude m'a apporté de nouvelles connaissances dans le domaine des énergies renouvelable et en particulière l'énergie solaire qui est en plein essor.

Bibliographie

[1] M. Dahbi, Etude et optimisation d'une installation Hybride PV-Eolienne Autonome, mémoire de Magister ; option physique énergétique ; 2007.

[2] Benouar Fatna, la réponse spectrale d'une cellule solaire photovoltaïque, mémoire de Master ; université Djilali Liabes– Sidi Bel -Abbes ; 2012-2013.

[3] Bendjamâa Ibrahim, modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque, mémoire de magistère ; université Abou - Bakr Belkaïd – Tlemcen ; 2011-2012.

[4] Helali Amélia, modélisation d'une cellule photovoltaïque : Etude comparative, mémoire de Magistère ; université Mouloud Mammeri–Tizi-Ouzou; 2012.

[5] T. Senju and K. Uezato "Maximum Power Point Tracker Using Fuzzy Control for Photovoltaic Arrays" IEEE Int. Conf. On Tech. 1994 pp : 143-147.

[6] Belhadj Mohamed, modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome, mémoire de magistère; Centre universitaire, Institut des Sciences Exactes–Bechar ; 2007-2008.

[7] Tsamda Abdrrahmane et Kadour Mahmoud, Développement d'un logiciel de dimensionnement des installations photovoltaïques, mémoire d'ingénieur d'état; ENP–El Harrach ; 2007.

[8] Adouane Mabrouk, Etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique, mémoire de Magister ; ENP– El Harrach ; 2008.

[9] Boucheritte Wafa, Convertisseurs multiniveaux dans les systèmes PV connectés au réseau, mémoire de Magistère; université Mohamed Khider– Biskra;

[10] Rihi Ahmed et Irach Djamal, simulation d'un module photovoltaïque autonome, mémoire de Licence ; université Hassiba Benbouali– chlef ; 2011-2012.

[11] Bennouna Djelloul et Mebarki Abdelkader, Etude et réalisation d'un chargeur de batterie pour système photovoltaïque, mémoire ingénieur d'état; université Djilali Liabes– Sidi Bel -Abbes ; 2009-2010.

[12] Merazi Kada, Etude de l'art des onduleurs pour systèmes photovoltaïques, mémoire de Master; université Djilali Liabes– Sidi Bel -Abbes ; 2011-2012.

[13] M. M. Saied (SM) and all "Optimal Design Parameters for a PV array coupled to a DC
Motor Via a DC-DC Transfomer" IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 6, No.
4, December 1991 pp : 593-598

[14] Abdallah Jelali, interconnexion d'un système photovoltaïque sur le réseau Electrique, mémoire présenté à l'université du Québec à Trois-Rivières ; Août 2012.

[15] Soltane Belakhal, conception et commande des machines à aimants permanents dédiées an énergie renouvelables, thèse doctorat ; université de Constantine; 2010.

[16] Nekaa Djamel et Safi Rouchedi, Conception et réalisation d'un système photovoltaïque, mémoire de Master ; université Hassiba Benbouali– chlef ; 2012.

[17] Bensaci Wafa, modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT, mémoire de Master ; université Kasdi-Merbah–Ouargla ; 2011-2012.

[18] Bernard, Chauvin, Lebrun, J.F Murez, P. Stassi, Station solaire autonome pour

l'alimentation des antennes de l'expérience de radio détection à l'observation Pierre Auger, 2006.

[19] Othmane Benseddik et Fathi Djaloud, Etude et Optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque, mémoire de Master

[20] Wernher Swigers and Johan H.R.Enshin "An integrated Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Panels" Press Poly techniques et Universitaires Romandes 1999.

[21] Amroun Mohamed Nadir, modélisation d'un panneau solaire photovoltaïque par estimation de la puissance maximale, mémoire de master ; université Djilali liabes de sidi bel Abbes, 2012-2013.

[22] Betka Achour "Optimisation d'un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil"
Thèse de Magister, université de Biskra.

[23] 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.

[24] Anne, Labouret et Villoz Michel. *Energie solaire photovoltaïque*, Paris, Dundo, 2009, 355 pages.

[25] Yagoub, Abed Salah Amel, Étude et Simulation d'un Système de Production d'Énergie Électrique par des Panneaux Photovoltaïques, mémoire de Master; université Djilali Liabes– Sidi Bel -Abbes ; 2013-2014.

[26] Mr BEKKOUCHE Sidi Mohammed El Amine, « Modélisation du Comportement Thermique de Quelques Dispositifs Solaires », Thèse doctorat ; L'UNIVERSITE ABOU-BAKR BELKAÏD – TLEMCEN,2008/2009.

[27] ACHOU YACINE, RACHEDI ABDALLAH, « Réalisation d'une carte de mesure et d'affichage à base d'Arduino Mega2560 : application aux systèmes photovoltaïque », Mémoire MASTER ACADEMIQUE, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA,2015/2016.

Webographie

[W1] https://www.eleves.ens.fr/home/gouzien/Publications/Secondaire/Elie_Gouzien_TPE.pdf
[W2] https://www.prepa-cpe.fr/documents/Les_cellules_photovoltaiques.pdf
[W3] https://fr.wikipedia.org/wiki/
[W4] http://www.energy.gov.dz/francais/uploads/2016/Energie/energie-renouvelable.pdf
[W5] https://www.edfenr.com/lexique/rayonnement-direct/
[W6] https://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_photovolta%C3%AFque effet phototvoltaique wikipedia
[W7] www.univ-tebessa.dz/fichiers/ENP/sienr2014_12.pdf
[W8] http://sii-technologie.ac-rouen.fr/Microtechniques/STI2D/Projet_Lumea/Champ_Energie/AT4_Batterie/Ressource-Batterie-solaire.pdf
[W9] http://www.heliodon.net/downloads/Beckers_2010_Helio_007_fr.pdf
[W10] http://www.cder.dz/download/cicme08_4.pdf

Résumé

L'énergie photovoltaïque est la plus jeune des énergies renouvelables, elle a l'avantage d'être non polluante, souple et fiable c'est pour cela, on a réalisé un système qui suit la course du soleil sous des angles multiples (trackeur solaire) de manière à ce qu'il irradie entièrement le panneau dans le but d'améliore le rendement des panneaux solaires de 30 à 40%.

ملخص

الطاقة الضوئية هي من اصغر الطاقات المتجددة، فإن لديها ميزة كونها صديقة للبيئة ومرنة وموثوق بها وهذا هو السبب ابتكارنا نظام يتبع مسار الشمس من زوايا متعددة (متعقب الشمس) بحيث يضيء تماما اللوح من أجل تحسين كفاءة الألواح الشمسية بنسبة 30 إلى40 ٪.

Abstract

Photovoltaic energy is the youngest of the renewable energies, it has the advantage of being non-polluting, flexible and reliable. for this reason we realized a system which tracks the sun's course from multiple angles (solar tracker) So that it completely irradiates the panel in order to improve the efficiency of the solar panels by 30 to 40%.