

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 : SCIENCES ET TECHNOLOGIES
Filière : ELECTROTECHNIQUE
Spécialité : COMMANDES ELECTRIQUES

Thème

Réalisation et commande d'un panneau solaire biaxial

Présenté Par :

- 1) HADDOU Azzedin
- 2) KEBIR Amina

Devant les jurys composés de :

Mr. AYACHE Zouaoui	MAA	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Président
Mr. YOUNES Mohammed	Pr	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Examinateur
Dr. FLITI Mohammed	MCA	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant
Dr. ZEGADI Chawki	Dr		<u>Co-Encadreur</u>

Remerciement

Nous remercions *avant tout Allah* tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donnée afin que nous puissions terminer nos études et finaliser ce travail.

Nos remerciements aussi à notre directeur de mémoire Mr FLITTI Mohamed pour son encadrement et ses conseils avisés qui nous ont permis de mener à bien ce travail.

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.

Nos remerciements vont aussi au directeur du centre universitaire BELHADJ Bouchaib d'Ain temochent et à tous les professeurs de l'établissement universitaire qui ont contribué de près ou de loin à notre formation. J'ai apprécié la bonne collaboration de mes collègues de la promotion Master commandes électriques.

Enfin, nous adressons nos remerciements à tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin à réaliser ce projet de fin d'études.

Dédicace

L'ouange à mon seigneur pour la volonté, le courage, la santé, l'ouverture d'esprit et l'inspiration dont il m'a graphie pour réaliser ce travail.

A mon père qui a toujours cru en moi et n'a jamais cessé de me soutenir puis ce travail constitue une légère compensation pour tous les nobles sacrifices que tu t'es assumés pour mon bien être et mon éducation, qu'il soit l'expression de profonde gratitude Et ma grande considération.

A ma mère celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite.

A ma deuxième maman Omoulkhir et mon oncle saidDerbal.

A mes frères et sœurs : Mostapha, Amine, Yesser, Mohamed, Abdelillah, Hadjer, Radhia, Amina, Leila, Nadjet.

A toute la famille kebir, Derbal, Ghitri.

A tous mes copines surtout : , Bouchra, Amina, Djihene, Kaouther, Khouloud , Farah, Mina, Wafa , Souad , Essma, Soumia, Aicha, sans oublier ses mamans que dieu les garde pour elles

A tous ceux qui sont chères et qui m'aiment et tous ceux que j'aime.

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

Je dédie ce travail.

Amina

Dédicace

Tout d'abord, je remercie **ALLAH** tout puissant de m'avoir donnée la force et les moyens pour accomplir ce modeste travail.

A mes parents

Pour tous les sacrifices qu'ils ont faits et pour tout le soutien qu'ils ont offert tout au long de mes études.

J'espère qu'ils puissent trouver dans ce modeste travail un témoignage d'amour et d'affection envers eux.

A mes amis et mes collègues

Pour leur encouragement et pour tous les bons moments qu'on a vécus ensemble.

J'espère que notre amitié durera éternellement.

Argedine

SOMMAIRE

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclatures

Introduction generale..... 1

Chapitre I :

Généralité sur le système Photovoltaïque

I.1 Introduction :..... 3

I.2 Généralité..... 3

I.3 L'énergie solaire 4

I.3 .1 Type d'énergie solaire : 5

I.4 Rayonnement solaire..... 5

I.4.1 Les différents types de rayonnement 5

a) Rayonnement direct RD..... 5

b) Rayonnement diffus Rd 5

c) Rayonnement solaire réfléchi 5

d) Le rayonnement global RG 5

I.4.2 Rayonnement en Algérie..... 6

I.5 La cellule photovoltaïque..... 7

I .5.1 Historique..... 7

I.5.2 Définition 7

I.5.3 Les différents types de cellules en silicium 8

a) Cellules en silicium amorphe..... 8

b) Cellules en silicium monocristallin..... 9

SOMMAIRE

c) Cellules en silicium multi cristallin	9
I.5.4 L'effet photovoltaïque.....	10
I.5.4.1. Définition	10
I.5.5 Principe de fonctionnement d'un panneau solaire	11
I.5.5.1 Dopage de type N (Négatif)	12
I.5.5.2 Dopage de type P (Positif) :	13
I.5.5.3 Jonction P-N :	13
I.5.6 Configuration des cellules photovoltaïques pour produire des quantités utilisables de puissance	14
I.6 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque.....	15
I.6.1. Circuit électrique idéal	15
I.6.2 Circuit électrique réel.....	16
I.6.3 La Puissance.....	18
I.6.4 Le courant de court circuit I_{cc}	19
I.6.5 La tension de circuit ouvert V_{co}	19
I.6.6 Le facteur de forme	19
I.6.7 Le rendement	19
I.7 Association de cellules.....	20
I.7.1 Association de cellules en série	20
I.7.2 Association de cellules en parallèle :	21
I.8 Le rendement d'un panneau photovoltaïque.....	22
I.8.1 Puissance produite	22
I.8.2 Positionnement.....	23
I.8.3 Positionnement (angle d'inclinaison)	24

SOMMAIRE

I. 9 Avantages et inconvénients de la photovoltaïques	26
I.9.1 Les avantages	26
I.9.2 Les inconvénients.....	26
I.10 Conclusion	27

Chapitre II :

Dimensionnement d'un système photovoltaïque

II.1 Introduction	28
II.2 Mouvement du Globe terrestre	28
II.3 La sphère céleste.....	28
II.4. Les coordonnées célestes.....	29
II.4.1 Les coordonnées géographiques	29
II.4.1.1 Longitude.....	29
II.4.1.2 Latitude	29
II.4.2 Les coordonnées horaires	30
II.4.2.1 La déclinaison solaire	30
II.4.2.2 Angle horaire(w).....	30
II.4.3 Les coordonnées horizontales.....	31
II.4.3.1 Hauteur angulaire du soleil (h)	31
II.4.3.2 Azimuth (a).....	31
II.5 logicielle Pvsys	32
II.5.1 Trois menus principaux	33
a) Pré-dimensionnement	34
Conception des projets	35
b) Outil	35
II.6 L'utilisation d'un logiciel pvsyst.....	36
II.6.1. Création de la localisation	36
II.6.2 .Récupération des données météo.....	39

SOMMAIRE

II.6.3.Description de notre installation.....	42
II.6.4 Résultats (sous forme des courbes)	48
II.6.5 Schéma de l'installation.....	51
II.6.6 Simulation.....	52
II.7 Conclusion	56

Chapitre III :

Réalisation d'un prototype de poursuite

III .1 Introduction :	56
III.2 Systèmes de suiveur solaire :	56
III.3 Les différents systèmes de suiveur solaire :	57
III.3.1 Suiveur à axe horizontal	58
III.3.2 Suiveur à axe vertical incliné	58
III.3.3 Suiveur à deux axes	59
III.4 Le principe du tracker solaire avec Arduino	59
III.5 Introduction du Mécanisme.....	61
III.5.1 Partie mécanique	61
III.5.2 partie électrique	63
III.5.2 .1 Composants du prototype du tracker.....	64
III.6 Programmation	74
III.7 L'essai du système	75
III.8 Control via Matlab- Simulink	75
III.8.1. Développement et test du programme sous Simulink :	76
III.9 Conclusion.....	77
Bibliographie	80

LISTE DES FIGURES

Liste des figures

Chapitre I :

Généralité sur le système Photovoltaïque

Fig. I. 1 : principe de la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire.	4
Fig. I. 2: Type d'énergie solaire.	5
Fig. I. 3: Composantes du rayonnement solaire.	6
Fig. I. 4: les différentes zones énergétiques dans l'Algérie.	6
Fig. I. 5: Central solaire photovoltaïque.....	7
Fig. I. 6: Panneaux PV (cellule amorphe).	8
Fig. I. 7: Photo d'une cellule monocristalline.	9
Fig. I. 8: Photo d'une cellule multi cristalline.....	10
Fig. I. 9: effet photovoltaïque.....	11
Fig. I. 10: Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.	12
Fig. I. 11: Dopage de type N.	12
Fig. I. 12: Dopage de type P.....	13
Fig. I. 13: La jonction PN.....	14
Fig. I. 14: Configuration des cellules photovoltaïques.....	15
Fig. I. 15 : Schéma électrique idéal de cellule Photovoltaïque.	16
Fig. I. 16: Schéma électrique équivalent d'une cellule Photovoltaïque.	17
Fig. I. 17: caractéristique $I=f(v)$	19
Fig. I. 18: caractéristique $P=f(v)$	19
Fig. I. 19 : Montage.	20
Fig. I. 20: Caractéristiques résultante d'un groupement en série.	21
Fig. I. 21: le schéma de regroupement partielle d'une cellule PV.	21
Fig. I. 22: Caractéristiques résultante d'un groupement en parallèle.	22
Fig. I. 23: Rendement pour différents types de technologies au cours des années.	23
Fig. I. 24: Dépendance des performances d'un panneau PV de l'angle β	23
Fig. I. 25: Rendement d'une cellule photovoltaïque en fonction de son angle d'incidence . .	24
Fig. I. 26: Représentation de l'angle d'inclinaison θ	25
Fig. I. 27: Représentation des équinoxes et solstices et l'inclinaison de l'axe de rotation de la terre par rapport à son plan de translation autour du soleil.	25

Chapitre II :

Dimensionnement d'un système photovoltaïque

Fig. II. 1 : Variation saisonnière du rayonnement solaire.	28
Fig. II. 2: La sphère céleste.	29
Fig. II. 3: Les coordonnées géographiques.	30
Fig. II. 4: La déclinaison du soleil en fonction des jours.	30
Fig. II. 5:Les coordonnées horaires.	31
Fig. II. 6: Les coordonnées horizontales.	32
Fig. II. 7:logiciel PVSYST5_0.	33
Fig. II. 8:le menu principal.	33
Fig. II. 9:Fenêtre centrale d'accueil d'option « prés-dimensionnement ».....	34
Fig. II. 10:Fenêtre centrale accueil d'option « Conception de projet ».....	35
Fig. II. 11:choix de l'outil.....	36
Fig. II. 12:Choix du site géographique.....	37
Fig. II. 13:Choix de du nouveau projet.	38
Fig. II. 14: les coordonnées géographiques du site d'Ain Temouchent.	39
Fig. II. 15:trajectoire du soleil à Ain Temouchent.	39
Fig. II. 16:Coordonnées météorologique de Ain Temouchent (irradiation globale, rayonnement diffus, température max et la vitesse du vent).	40
Fig. II. 17:Fenêtre de l'enregistrement des données de Ain Temouchent.	41
Fig. II. 18:Choix du type de projet.	41
Fig. II. 19:Choix de l'application.	42
Fig. II. 20:Définition du projet.	43
Fig. II. 21: choix d'albédo pour le site du projet.	43
Fig. II. 22: sauver le projet.	45
Fig. II. 23:Choix de l'inclinaison du panneau.	45
Fig. II. 24: Définition d'ombrages proches.	46
Fig. II. 25: autonomie avec des énergies.	46
Fig. II. 26: standard définition de système nombre des batteries et des panneaux.	47
Fig. II. 27: définition d'un module PV.....	48
Fig. II. 28: Influence de l'ensoleillement sur la courbe I-V.....	48
Fig. II. 29: Influence de la température sur la courbe I-V.....	49
Fig. II. 30: Influence de Température constate sur la courbe P-V.	50

Fig. II. 31:Influence d'ensoleillement constant sur la courbe P-V.....	50
Fig. II. 32: Schéma simplifié du système PV isolé avec batterie.	51
Fig. II. 33: Choix de l'inclinaison du panneau.	51
Fig. II. 34: simulation.	52
Fig. II. 35: Production normalisées (par KWp installé) sans suiveur.	55
Fig. II. 36:Production normalisées (par KWp installé) avec suiveur.	55

Chapitre III :

Réalisation d'un prototype de poursuite

Fig. III. 1: Production électrique.	57
Fig. III. 2: Les différents types des suiveurs solaires.	57
Fig. III. 3: Suiveur à axe horizontal.....	58
Fig. III. 4: Suiveur à 1 axe vertical incliné.....	58
Fig. III. 5: Suiveur à deux axes ADES : modèle 5F-27 M.....	59
Fig. III. 6: fonctionnement d'un Tracker solaire à système bi-axial.	60
Fig. III. 7: l'organigramme principal.	61
Fig. III. 8: Aperçu général du système.	62
Fig. III. 9: Circuit électrique du suiveur proposé.	63
Fig. III. 10: Photorésistance LDR. Fig. III. 11: Circuit équivalent du capteur LDR.	64
Fig. III. 12: Résistance de 10 K Ω	65
Fig. III. 13: Servomoteur	66
Fig. III. 14: Technique de commande d'un servomoteur.	67
Fig. III. 15: MLI pour Servomoteur.	67
Fig. III. 16: une platine d'essais (breadboard).	68
Fig. III. 17: La Carte ArduinoUno	69
Fig. III. 18: la fenêtre principale de logiciel.....	70
Fig. III. 19: Modulation de largeur d'impulsion ou PWM.	72
Fig. III. 20: Cable USB type A/B (ArduinoUNO).	73
Fig. III. 21: schéma de circuit imprimé.....	74
Fig. III. 22: Une fenêtre du programme élaboré.....	74
Fig. III. 23: liste des blocs après l'installation de la carte Arduino Uno.	76
Fig. III. 24: configuration de la chaîne d'acquisition.....	76

LISTE DES TABLEAUX

Liste des tableaux

Chapitre II :

Dimensionnement d'un système photovoltaïque

Tableau. II. 1: Coefficient d'albédo usuels. 44

Tableau. II. 2: paramètres généraux de simulation. 53

Chapitre III :

Réalisation d'un prototype de poursuite

Tableau. III. 1: Décodeur du marquage de couleurs des résistances. 65

NOMENCLATURES

Nomenclatures

PV : photovoltaïque

Ds : Diamètre de soleil

Dt : Diamètre de la terre

Lts : Distance moyenne soleil- terre

Λ : la longueur d'onde

Ns : Nombre des cellules en série

ICC : Courant de court-circuit de la cellule PV

Vco :tension en circuit ouvert

VcoNs : La somme des tensions en circuit ouvert de Ns cellules en série.

IccNs : Courant de court-circuit de Ns cellules en série.

IccNP : La somme des courants de court circuit de cellule en parallèle

VcoNP :Tension du circuit ouvert de cellules en parallèle.

VT : nKT/e

Np : Nombre des cellules en parallèle.

Rser : Résistance interne de la cellule.

Rshu : la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction

Isat : 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 ($e=1,6 \cdot 10^{-19} C$)

N : le facteur d'idéalité de la jonction ($1 < n < 3$)

IPV : le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur

VPV : la tension aux bornes de cette même cellule

Iph : la photo -courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température ou bien courant de (court-circuit)

Id : Courant qui traverse la diode.

Pmax : la puissance électrique maximum fournie par la cellule PV

Iopt : Le courant optimal

Vopt : La tension optimale

FF : facteur de forme

η : Rendement énergétique

Pinc : 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 ($^{\circ}$).

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.

NOMENCLATURES

H : Angle horaire du soleil

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

Dns : le nombre de jour d'autonomie

Bc : la capacité de la batterie.

DC: courant continu

AC : Courant alternatif

PWM : pulse with modulation



Introduction générale

Introduction générale

La recherche de sources d'énergies renouvelables et non polluantes constitue l'une des préoccupations technologiques majeures XXI siècle, étant donnée l'épuisement progressif des sources d'énergies fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel) et problème écologiques croissants liés à l'utilisation de ces énergies.

L'accès et le contrôle de ressources d'énergies sera toujours crucial dans le monde, sachant que ce dernier se développe et grandit à une allure rapide. L'usage d'énergies augmentera aussi vite pour faire face à cette demande croissante. Des nouvelles technologies de la génération d'énergies doivent être utilisées avec des formes d'énergies renouvelables plus conventionnelles. C'est là où l'énergie photovoltaïque (PV) s'impose. Elle offre un usage effectif, inépuisable et facilement exploitable tant que le soleil brille encore. C'est pour cela que la recherche scientifique se développe dans le sens de généraliser, améliorer et optimiser l'exploitation des systèmes solaires PV.

L'optimisation des systèmes solaires est basée sur des critères de dimensionnement et de maximisation de la puissance générée pour avoir un bon rendement.

Selon une étude mondiale sur l'énergie solaire, L'Algérie est l'un des trois plus importants champs solaires au monde, ce qui en fait l'énergie solaire géante du soleil.

L'Algérie a réservé une multitude d'investissement dans la technologie photovoltaïque et ses applications à titre d'exemple le projet HASSI R'MEL. Ce dernier consiste à mettre à profit des concentrateurs solaires cylindra-parabolique muni des systèmes de poursuite solaire.

Les premières applications des suiveurs solaires remontent vers les années 1750 où le principe repose sur l'utilisation de l'héliostat pour qu'un panneau solaire ait un meilleur rendement, ce dernier peut en effet varier en fonction de l'orientation. La rotation d'un miroir de l'héliostat est assurée par un mécanisme d'horlogerie dans la plus ancienne mention du système se trouve dans des publications datant en 1742 du physicien néerlandais Willem Jacobs Gravesande.

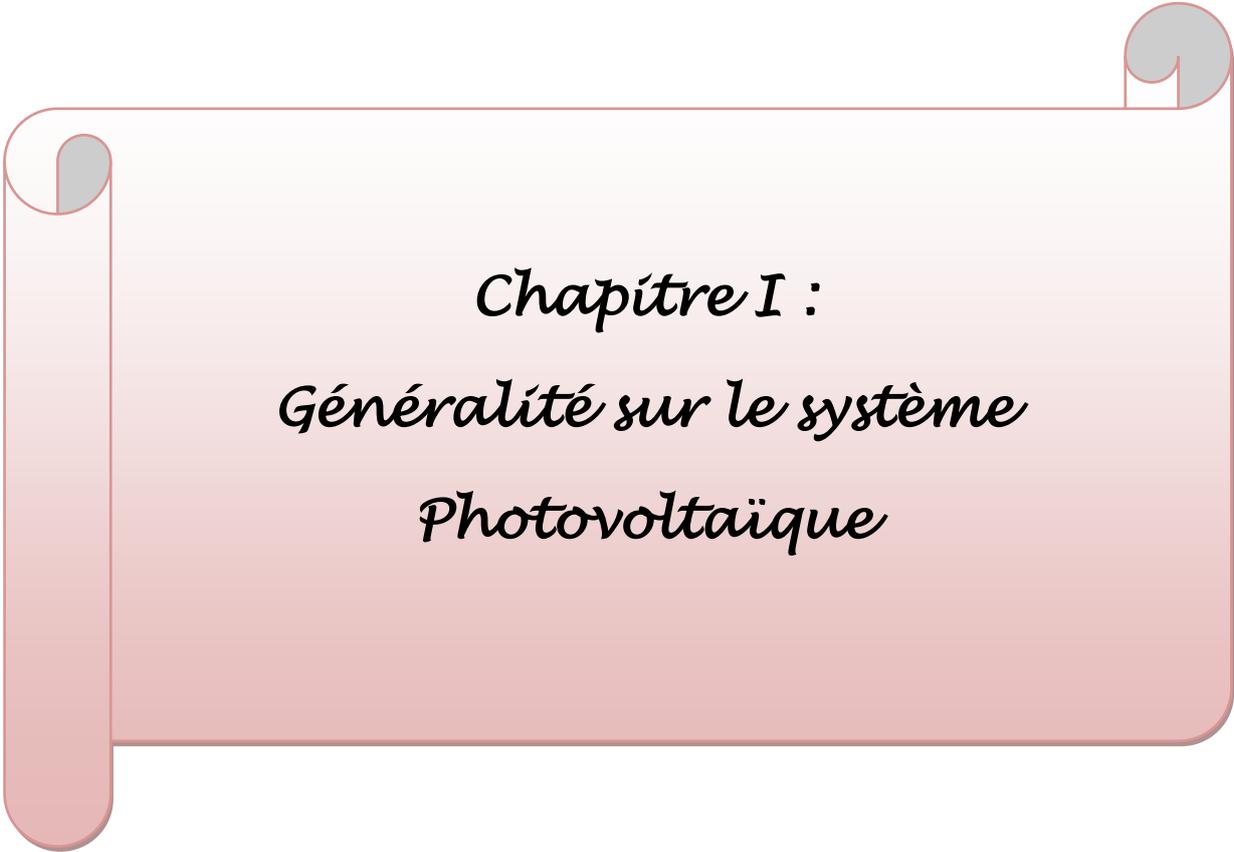
Dans ce contexte, notre motivation dans ce travail développé en chapitres est d'optimiser l'énergie fournie par les panneaux photovoltaïques dans le but de maximiser la

INTRODUCTION GENERALE

quantité d'éclairement absorbé par les panneaux photovoltaïques en suivant le mouvement du soleil pendant la journée(trackers).

Notre rapport est organisé dans la manière suivante :

- Dans le premier chapitre : une étude général du système photovoltaïque leur principe de fonctionnement, et leurs caractéristiques.
- Le second chapitre est consacré au dimensionnement et le fonctionnement de système sans et avec suiveur solaire par le logiciel Pvsyst 5.74 .
- Le troisième chapitre est dédié à l'étude et réalisation d'un prototype d'un suiveur solaire bi axial (programmation via MATLAB)
- Enfin, on finalise notre travail par une conclusion générale et perspectives au future.



Chapitre I :
Généralité sur le système
Photovoltaïque

I.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique renouvelable, produite par les rayonnements du Soleil. La production de cette énergie peut se faire grâce aux cellules photovoltaïques, composant électrique qui, exposé à la lumière, produit de l'électricité en quantité proportionnelle à la puissance lumineuse incidente.

Dans ce chapitre on va présenter le système photovoltaïque, comment cela fonctionne ? ses composants.

I.2 Généralité

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 (1).

I.3L'énergie solaire

L'électricité est une des formes d'énergie les plus versatiles et qui s'adapte au mieux à chaque nécessité. Son utilisation est si étendue, qu'aujourd'hui on pourrait difficilement concevoir une société techniquement avancée qui n'en fasse pas usage.

Le principe de l'énergie solaire photovoltaïque consiste à transformer le rayonnement solaire en électricité à l'aide d'une cellule photovoltaïque

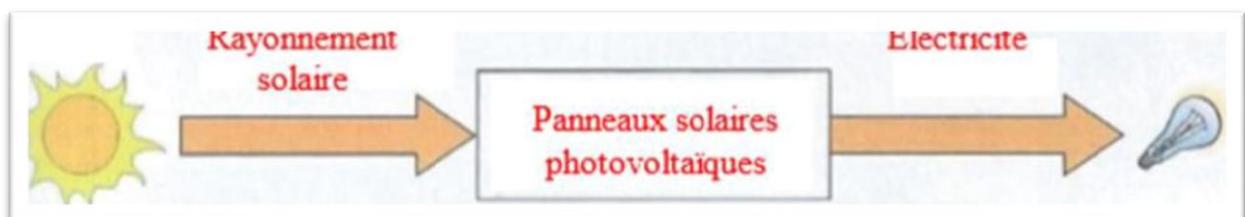


Fig. I. 1 : principe de la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire.

I.3.1 Type d'énergie solaire :

Il existe deux types d'énergie solaire : photovoltaïque, thermique(2).

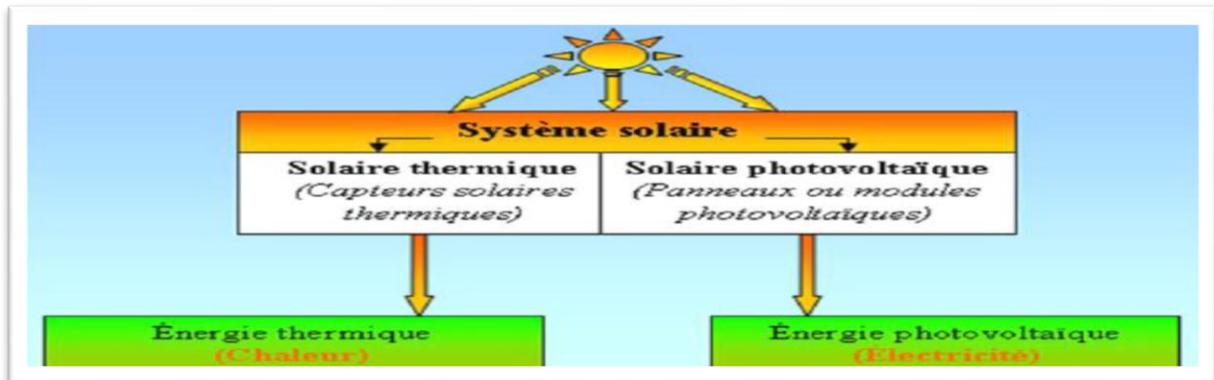


Fig. I. 2: Type d'énergie solaire.

I.4 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est la matière première de l'énergie solaire, c'est une propagation d'une onde de longueur qui varie entre 0.2 et 4.10⁻⁶m, sans la nécessité d'un support physique pour se déplacer, il arrive au sol après la perte d'une grande partie de son intensité, à cause d'une partie de l'ultraviolet, qui s'absorbent.

I.4.1 Les différents types de rayonnement

a) Rayonnement direct RD

Le rayonnement direct est reçu directement du soleil, sans diffusés par l'atmosphère. Les rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut par des modules.

b) Rayonnement diffus Rd

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable ...).

c) Rayonnement solaire réfléchi

L'albédo est la partie réfléchi par le sol. Il dépend de l'environnement du site. Il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur le plan incliné.

d) Le rayonnement global RG

Le rayonnement global désigne l'intensité globale de flux solaire sur une surface réceptrice(3).

$$RG = RD + Rd$$

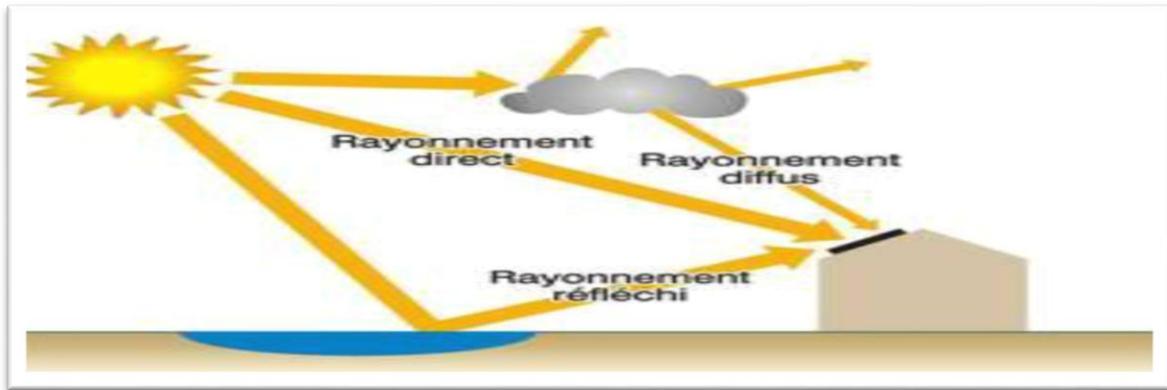


Fig. I. 3: Composantes du rayonnement solaire.

I.4.2 Rayonnement en Algérie

L'Algérie possédant un gisement solaire important, de part son climat, la puissance solaire maximale en tout point de notre pays est d'environ 1Kw/m². L'énergie journalière maximale moyenne (ciel clair, mois de Juillet) dépasse les 6Kw/m² et l'énergie annuelle maximale en Algérie est de l'ordre de 2500 KW/m²(4). La carte ci-dessous représente les différentes zones énergétiques de l'Algérie.

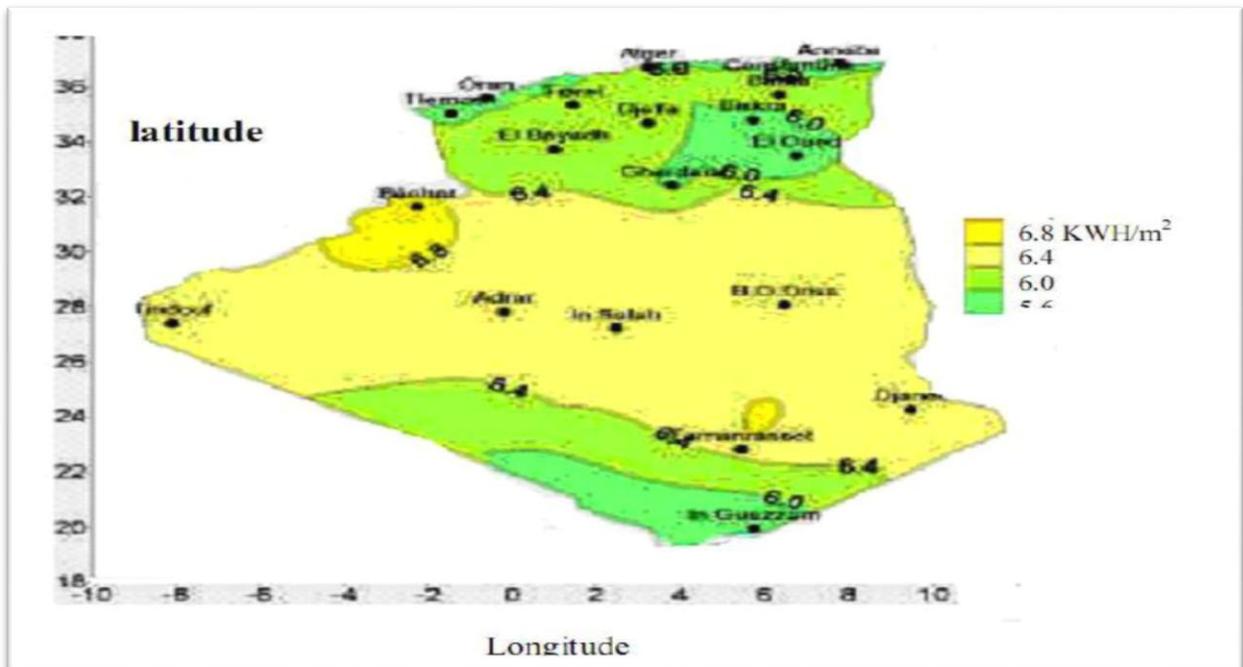


Fig. I. 4: les différentes zones énergétiques dans l'Algérie.

I.5 La cellule photovoltaïque :

I.5.1 Historique :

Le terme « photovoltaïque » désigne le processus physique qui consiste à transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique par le transfert de l'énergie des photons aux électrons d'un matériau. Le principe photovoltaïque a été découvert par le physicien français A. Becquerel en 1839 et expliqué par Albert Einstein en 1905 (c'est pour cette explication qu'il a reçu le prix Nobel de Physique en 1921). Le préfixe Photo vient du grec « phos » qui signifie lumière. « Volt » vient du patronyme d'Alessandro Volta (1745-1827), physicien qui a contribué aux recherches sur l'électricité. Photovoltaïque (*PV*) signifie donc littéralement électricité lumineuse. (5)

I.5.2 Définition

La cellule photovoltaïque est l'élément qui permet de convertir l'énergie solaire en énergie électrique. Un panneau solaire photovoltaïque peut être constitué de certaines cellules photovoltaïques, Plusieurs cellules sont reliées entre elles pour former ce qu'on appelle un module solaire photovoltaïque, par la suite, plusieurs modules sont regroupés pour former une installation ou même une centrale solaire photovoltaïque (Figure(I.5)).(6)



Fig. I. 5: Central solaire photovoltaïque.

Une cellule photovoltaïque (ou photopile) est un dispositif qui transforme l'énergie lumineuse en courant électrique. La cellule photovoltaïque est le composant électronique semi-

conducteur qui compose un panneau solaire photovoltaïque et qui exposé à la lumière, produit de l'électricité.

I.5.3 Les différents types de cellules en silicium

Le silicium a été choisi pour réaliser les cellules solaires photovoltaïques pour ses propriétés électroniques, il est caractérisé par la présence de quatre électrons sur sa couche périphérique.(7)

a) Cellules en silicium amorphe

Le silicium lors de sa transformation produit un gaz qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est gris foncé.

➤ **Avantage :**

- Fonctionne avec un faible éclairement.
- Moins cher que les autres technologies.
- Moins sensible aux températures élevées que les cellules monocristallines ou multicristallin.

➤ **Inconvénients :**

- Rendement faible en plein soleil (5 à 10%).
- Performances qui diminuent avec le temps.

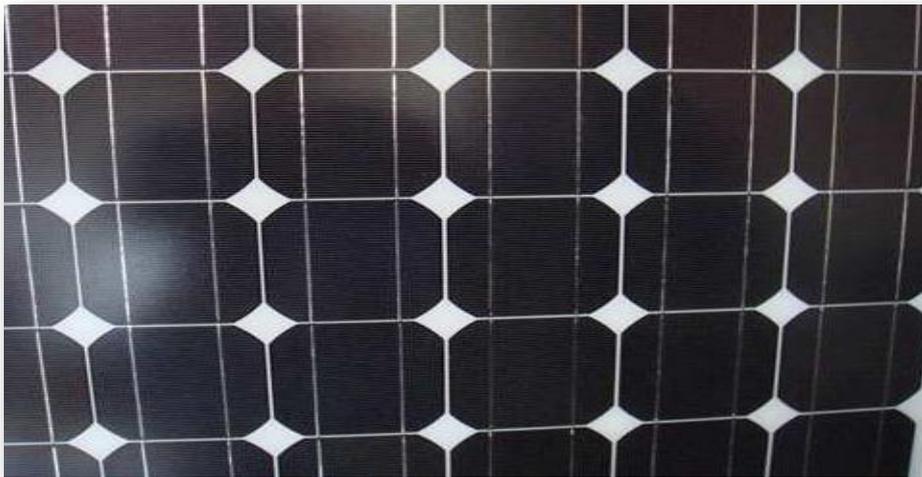


Fig. I. 6: Panneaux PV (cellule amorphe).

b) Cellules en silicium monocristallin

La technologie monocristalline, plus chère, utilise des barres pures de silicium également employées dans la fabrication des puces électroniques. Il est généralement obtenu par fusion. Lors du refroidissement, le silicium se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront ensuite les cellules. C'est cellules sont en général d'un bleu uniforme.(7)

- **Avantage :**
 - Très bon rendement (15 à 22%).
- **Inconvénients :**
 - Coût élevé.
 - Rendement faible sous un faible éclaircissement.

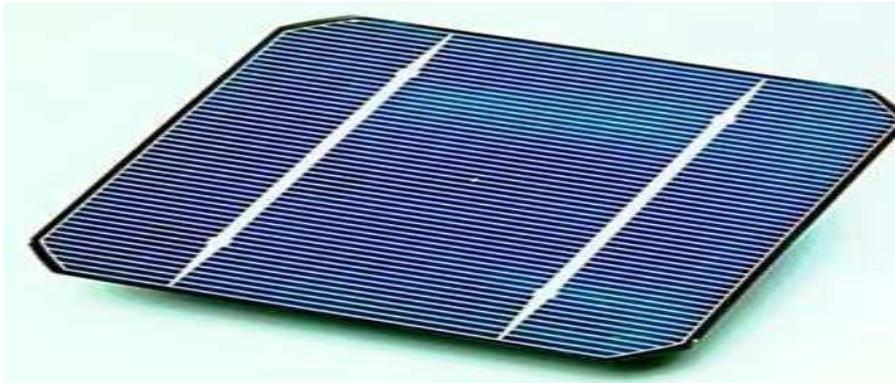


Fig. I. 7: Photo d'une cellule monocristalline.

c) Cellules en silicium multi cristallin :

Le silicium poly cristallin est obtenu par refonte des chutes de silicium monocristallin issues des opérations d'équarrissage (action d'amener la pièce aux dimensions voulues). Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. La cellule photovoltaïque est d'aspect bleuté, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.(7)

- **Avantage :**
 - Bon rendement de conversion, mais un peu moins que le monocristallin.
 - Moins cher à produire que le monocristallin.
- **Inconvénients :**
 - Rendement faible sous un faible éclaircissement (10 à 13%).



Fig. I. 8: Photo d'une cellule multi cristalline.

I.5.4 L'effet photovoltaïque

I.5.4.1. Définition

L'effet photovoltaïque est l'effet photoélectrique, caractérisé par la production d'un courant électrique entre deux parties de matériaux différents qui sont en contact et exposée à la lumière ou à un rayonnement électromagnétique générale. Cet effet photovoltaïque est le principe des cellules photovoltaïques et est donc essentielle pour la production de mendiante de l'électricité solaire Lorsqu'un matériau (semi-conducteur) est exposé à la lumière du soleil, Les atomes exposés au rayonnement sont " bombardés " par les photons constituant la lumière. Sous l'action de ce bombardement, les électrons sont décrochés. Les électrons " décrochés " créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque. (8)

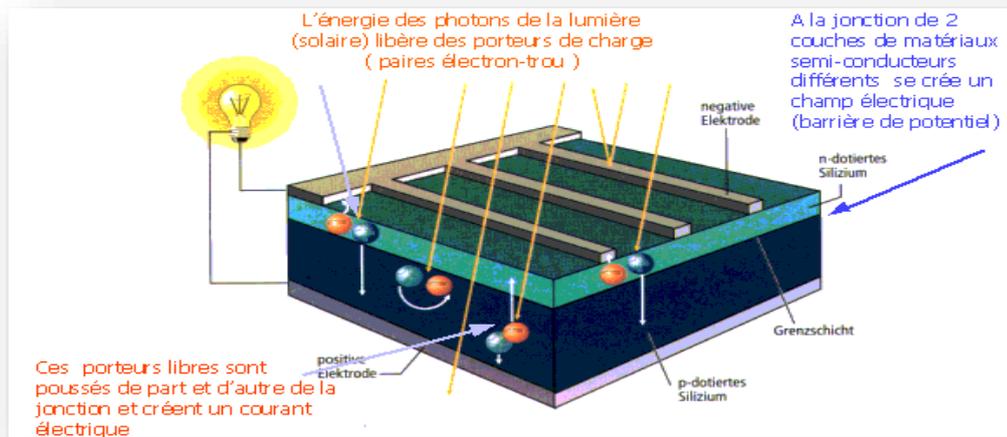


Fig. I. 9: effet photovoltaïque.

I.5.5 Principe de fonctionnement d'un panneau solaire

Toute la lumière du soleil n'est pas utilisée par le panneau solaire. Seulement une partie du spectre est utilisable : la longueur d'onde nécessaire pour arracher un électron.

La lumière du soleil, moteur du processus, fournit l'énergie qui est convertie en courant électrique. Cette lumière est composée de petites particules d'énergie (photons) qui se comportent comme autant de projectiles. Lorsqu'un photon frappe une cellule photovoltaïque, il peut rebondir dessus, la traverser ou être absorbé par elle. Seuls les photons qui sont absorbés fournissent de l'énergie convertible en électricité. Lorsque le matériau (semi-conducteur) absorbe suffisamment de lumière solaire (énergie) des électrons sont arrachés des atomes du matériau par les photons solaires. Ces électrons sont alors libres de circuler et créent un courant électrique.

La conversion directe de l'énergie solaire en électricité se fait par l'intermédiaire d'un matériau semi-conducteur généralement le Silicium que l'on trouve en abondance sur Terre (extrait de la Silice compris dans le sable). Lorsque les photons sont absorbés par un matériau semi-conducteur, ils cèdent toute leur énergie aux atomes appartenant à la jonction PN, ceci donne naissance à plusieurs paires électrons/trous. Le nombre de ces paires formées dépend de l'énergie des photons incidents et du matériau utilisé. (8)

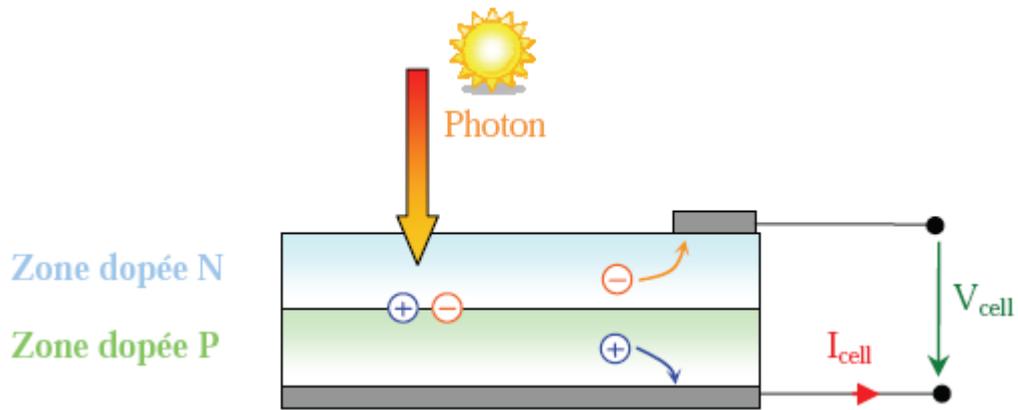


Fig. I. 10: Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

I.5.5.1 Dopage de type N (Négatif)

Les semi-conducteurs de type N sont appelés semi-conducteurs extrinsèques. Le but d'un dopage N est de produire un excès d'électrons porteurs dans le semi-conducteur. Afin de comprendre comment un tel dopage s'effectue, considérons le cas du silicium (Si). Les atomes de silicium ont quatre électrons de valence, chacun étant lié à un atome de silicium voisin par une liaison covalente. Si un atome ayant cinq électrons de valence, comme ceux du groupe V de la table périodique (par exemple, le phosphore (P), l'arsenic (As) ou l'antimoine (Sb)), est incorporé dans le réseau cristallin, alors cet atome présentera quatre liaisons covalentes et un électron libre. Cet électron, qui n'est pas un électron de liaison, n'est que faiblement lié à l'atome et peut être facilement excité vers la bande de conduction. Les matériaux ainsi formés sont appelés semi-conducteurs de type N parce qu'ils contiennent un excès d'électrons négativement chargés.(7)

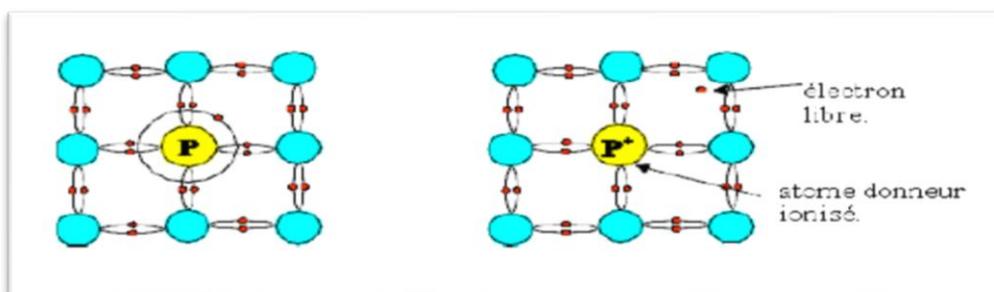


Fig. I. 11: Dopage de type N.

I.5.5.2 Dopage de type P (Positif)

Les semi-conducteurs de type P sont également des semi-conducteurs extrinsèques. Le but d'un dopage P est de créer un excès de trous. Dans ce cas, un atome trivalent, généralement un atome de bore, est substitué à un atome de silicium dans le réseau cristallin. En conséquence, il manque un électron pour l'une des quatre liaisons covalentes des atomes de silicium adjacents, et l'atome peut accepter un électron pour compléter cette quatrième liaison, formant ainsi un trou. Quand le dopage est suffisant, le nombre de trous dépasse de loin le nombre d'électrons.(7)

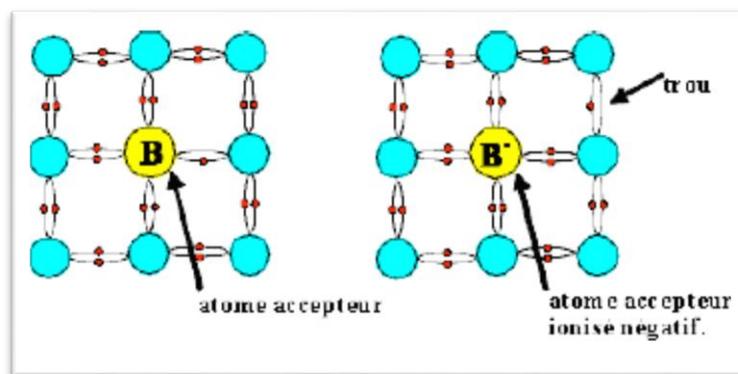


Fig. I. 12: Dopage de type P.

I.5.5.3 Jonction P-N

La jonction P-N est créée lorsque les deux types de silicium sont mis en contact. Cette jonction doit permettre le passage des électrons entre les deux plaques.

Dans le cas d'une cellule photovoltaïque, le gap du semi-conducteur de type N est calculé de manière à ce que le courant ne puisse pas s'établir seul : il faut qu'il y ait un apport d'énergie, sous forme d'un photon de lumière, pour qu'un électron de la couche N soit arraché et vienne se placer dans la couche P.

- Quand un photon de lumière frappe une pièce en silicium, deux choses peuvent arriver :
- le photon peut passer directement à travers le silicium (si l'énergie du photon est inférieure à l'énergie de la bande interdite du semi-conducteur en silicium).
 - le photon est absorbé par le silicium (si l'énergie de photon est plus grande que l'énergie de la bande interdite de silicium).

Quand un photon est absorbé, il donne son énergie à un électron. D'habitude cet électron est dans la bande de valence et il est fermement lié par des liens covalents avec les atomes

voisins et il est donc incapable de s'éloigner. L'énergie donnée cela par le photon "éjecte" l'électron vers la bande de conduction, où il est libre de se déplacer au sein de la maille du semi-conducteur. Le lien covalent que l'électron avait précédemment est maintenant en endroit où il manque un électron - on l'appelle un trou électronique. L'absence du lien covalent permet aux électrons des atomes voisins de se déplacer dans ce "trou", laissant ainsi un autre trou derrière et de cette façon le trou peut se déplacer dans la maille. Ainsi, on peut dire que les photons absorbés dans le semi-conducteur créent des trous électroniques mobiles. Un photon doit seulement avoir une énergie plus grande que celle de la bande de valence pour extraire un électron de la bande de valence vers la bande de conduction : une différence de potentiel électrique (tension) et un courant électrique sont créés.(7)

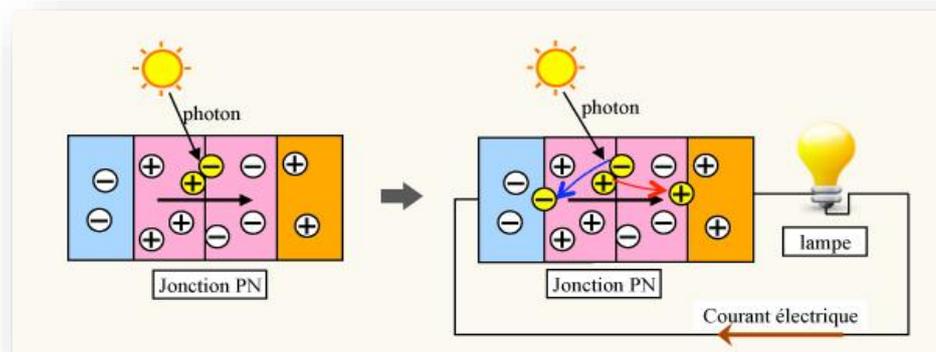


Fig. I. 13: La jonction PN.

I.5.6 Configuration des cellules photovoltaïques pour produire des quantités 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. (10)

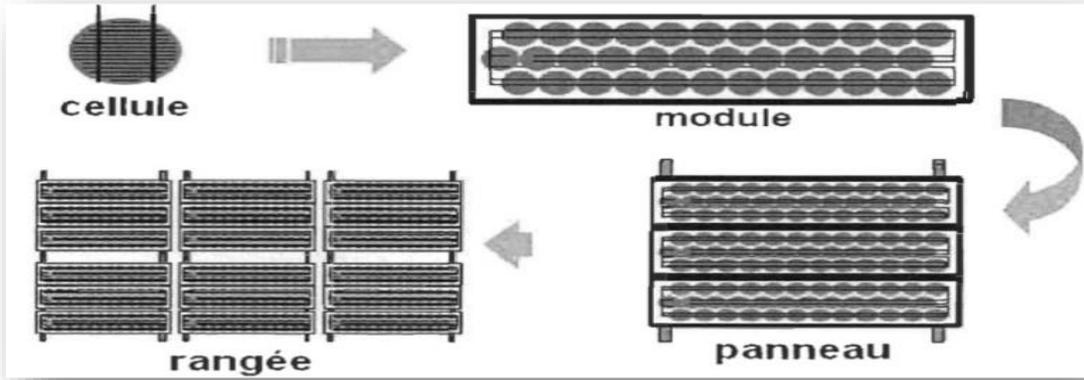


Fig. I. 14: Configuration des cellules photovoltaïques.

I.6 Caractéristiques électriques d’une cellule photovoltaïque

I.6.1.Circuit électrique idéal

La cellule photovoltaïque peut être représentée par le circuit électrique équivalent donnée par la figure I.15 composé d’un générateur de courant et d’une diode parallèle. Le courant I généré par la cellule s’écrit alors.(11)

Dans ce cas le courant généré par la cellule s’écrit :

$$I = I_{ph} - I_D \dots \dots \dots (I-1).$$

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{u}{ut}} - 1 \right) \dots \dots \dots (I-2).$$

$$I_{Ph} = N_p \left[I_{CC} + K_i (T - T_{ref}) \right] \frac{E_g}{E_{gref}} \dots \dots \dots (I-3).$$

$$I = I_{Ph} - I_S \left(e^{\frac{u}{ut}} - 1 \right) \dots \dots \dots (I-4).$$

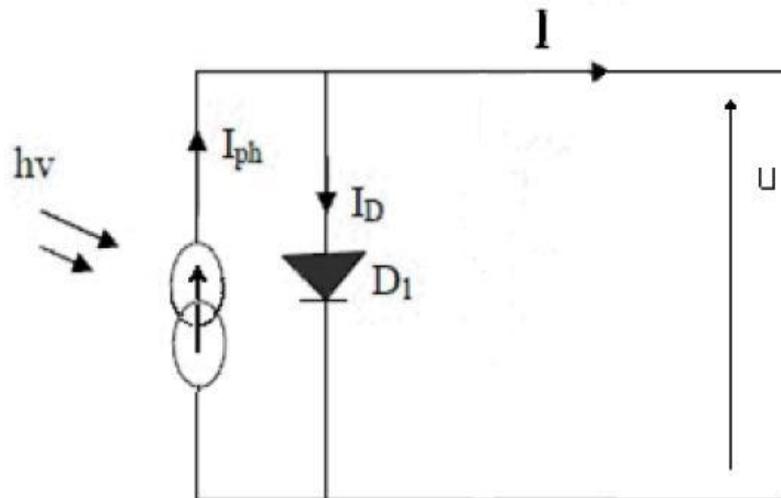


Fig. I. 15 : Schéma électrique idéal de cellule Photovoltaïque.

U : tension.

U_t : KT/q tension thermique.

K : 1.38×10^{-23} constant de Boltzmann.

N_p : nombre des cellules parallèle.

q : 1.602×10^{-19} Charge de l'électron.

T : température absolue en °K.

T_{ref} : température absolue en °K référentielle.

I_{cc} : courant de court circuit.

I_s : Courant de saturation de la diode.

I_{ph} : Photo courant.

I.6.2 Circuit électrique réel

La cellule photovoltaïque réelle peut être représentée par le circuit électrique équivalent donné par la Figure I.16, qui est composé d'un générateur de courant et d'une diode parallèle plus les résistances série et parallèles(11)

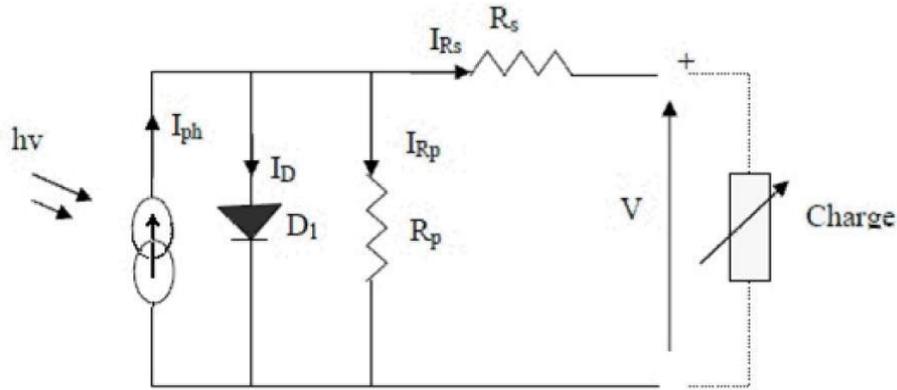


Fig. I. 16: Schéma électrique équivalent d'une cellule Photovoltaïque.

La caractéristique courant-tension pour une température donnée et un éclairement solaire fixé est donnée ci-dessous (11) :

Le courant généré par la cellule s'exprime comme suite :

$$I_{RS} = I_D - I_{Rp} \dots\dots\dots (I-5)$$

$$I_D = I_0 \cdot \left(e^{\frac{q(V+R_s \cdot I_{RS})}{A \cdot K \cdot Tc}} - 1 \right) \dots\dots\dots (I-6)$$

$$I_{Rp} = \frac{(V+R_s \cdot I_{RS})}{R_p} \dots\dots\dots (I-7)$$

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{q(V+R_s \cdot I_{RS})}{A \cdot K \cdot Tc}} - 1 \right) - \frac{(V+R_s \cdot I_{RS})}{R_p} \dots\dots\dots (I-8)$$

A : le facteur d'idéalité de la jonction (1 < A < 3)

I_{ph} : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident).

I_0 : Courant de diode, représente le courant de fuite interne à une cellule causée par la Jonction P-N de la cellule.

R_p : Résistances shunt représente les fuites autour de la jonction P-N dues aux impuretés et sur les coins de cellule.

R_s : Résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi-conducteur, ainsi les résistances ohmique et de contact au niveau des connections des cellules.

q: La charge de l'électron ($1,6.10^{-19}C$).

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

Tc : Température de jonction (K).

$T_c = T + (NOCT - 20) E_g / 800$.

T : la température ambiante.

E_g :Éclairement.

NOCT ::(Nominal operating cella température), température nominal de fonctionnement de la cellule qui est mesurée sous les conditions suivantes :

- Journée claire d'ensoleillement moyenne 800(w/m2).
- Température ambiante de (20°C).
- Vitesse moyenne du vent (1m/s).

En négligeant le terme $\frac{(V+R_s.I)}{R_p}$ pour une résistance shunt très grande, il vient que le courant généré par la cellule devient :

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{q(V+R_s.I)}{A.K.T_c}} - 1 \right) \dots\dots\dots (I-9)$$

I.6.3 La Puissance

La partie intéressante de la caractéristique courant-tension pour l'utilisateur c'est celle que génère de l'énergie, donc ce ne sera ni au point de tension de circuit ouvert, ni au point de court circuit, qui ne génère aucune énergie puisque la puissance est le produit du courant par la tension, donc la puissance maximale génère par la cellule. (12)

$$P_m = I_m \times V_m \dots\dots\dots (I-10)$$

- La puissance du panneau constitué des cellules parallèle :

$$P_p = N_p \times I \times V \dots\dots\dots (I-11)$$

- La puissance du panneau constitué des cellules série :

$$P_s = N_s \times I \times V \dots\dots\dots (I-12)$$

➤ La puissance du panneau constitué des cellules série et parallèle :

$$P_p = N_p \times I \times V \times N_s \dots\dots\dots (I-13)$$

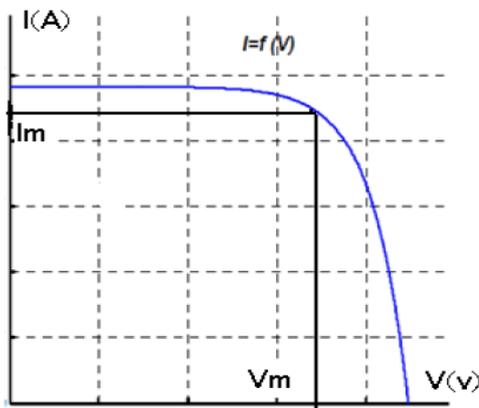


Fig. I. 17: caractéristique I=f(v).

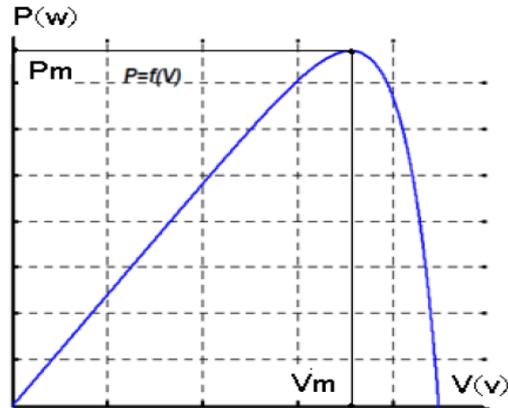


Fig. I. 18: caractéristique P=f(v).

N_p : Le nombre des cellules associé en parallèle.

P_m : La puissance maximale.

I_m : Le courant maximum.

V_m : La tension maximale.

N_s : Le nombre des cellules associé en série.

I.6.4 Le courant de court circuit I_{cc}

Soit le courant débité par la cellule quand la tension à ses bornes est nulle .en pratique cecourant est très proche de la photo courant I_{ph} .

I.6.5 La tension de circuit ouvert V_{co}

Soit la tension qui apparait aux bornes de la cellule quand le courant débité est nul.

I.6.6 Le facteur de forme :

Qui indique le degré d'idéalité de la caractéristique, soit le rapport :

$$F_F = \frac{P_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} \dots\dots\dots (I-14).$$

I.6.7 Le rendement

η définit le rendement énergétique d'une cellule par le rapport entre la puissance maximale fournie par la cellule et la puissance incidente :

$$\eta = \frac{P_m}{E.S} \dots\dots\dots (I-15).$$

I.7 Association de cellules

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur électrique de très faible-puissance au regard des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. En effet une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés délivre, aumaximum, quelques watts sous une tension très faible, par principe, puisqu'il s'agit d'unetension de jonction. Les générateurs photovoltaïques sont, par conséquent, réalisés parassociation d'un grand nombre de cellules élémentaires.

Ces cellules sont commercialisées sous la forme de modules photovoltaïques asso-ciégénéralement en série pour élever la tension, un certain nombre de cellules élémentaires detechnologie et caractéristiques identiques. Suivant les besoins de l'utilisation, ces mo-dulesont ensuite associés en réseau série-parallèle de façon à obtenir la tension et le courant désirés.

Cette association doit être réalisée en respectant des critères précis, en raison des dés-qui libres apparaissant dans un réseau de photopiles en fonctionnement. En effet, bien que choisies théoriquement identiques, les nombreuses cellules qui constituent le générateur pré-sentent des caractéristiques différentes du fait des dispersions de construction inévitables, mais aussi d'un éclairage et d'une température non uniformes sur l'ensemble du réseau.

La mise en place de dispositifs de protection efficaces contre les effets négatifs de ces déséquilibres sur le comportement et la fiabilité doit être prévue [9].

I.7.1 Association de cellules en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la ca-ractéristique résultante en série est obtenue par addition des tensions a courant donne.

$$V_{SCO} = N_S \times V_{CO} \dots \dots \dots (I - 16).$$

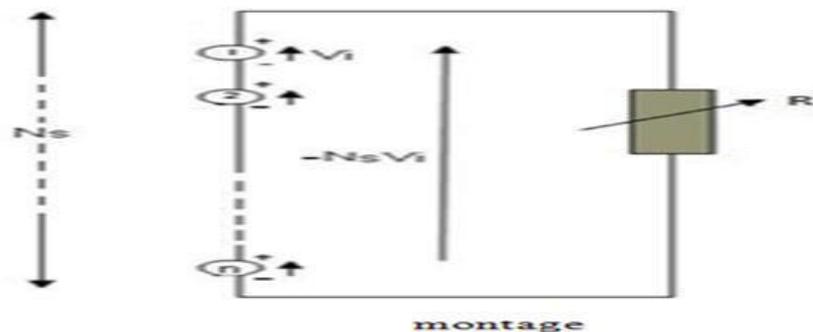


Fig. I. 19 : Montage.

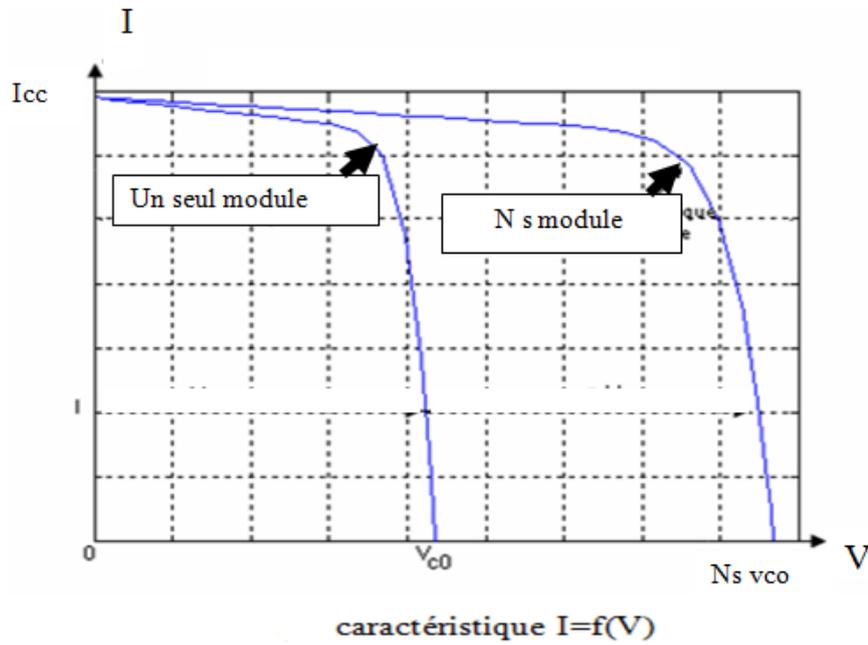


Fig. I. 20: Caractéristiques résultante d'un groupement en série.

I.7.2 Association de cellules en parallèle

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série.

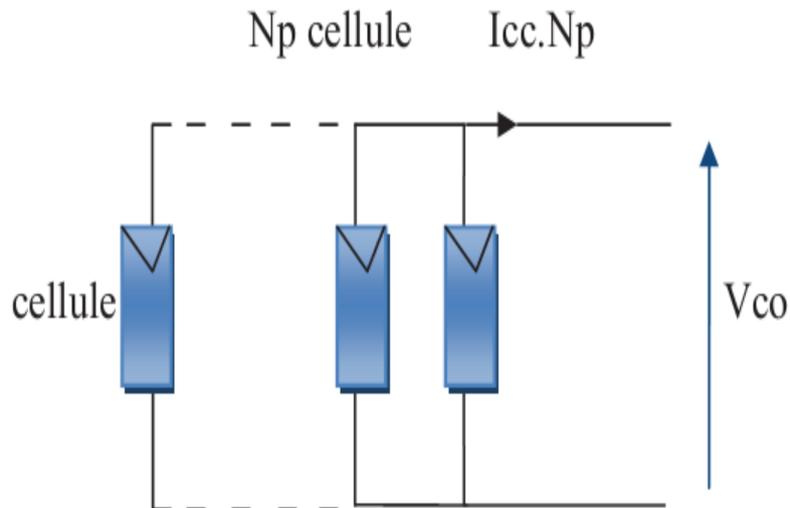


Fig. I. 21: le schéma de regroupement parallèle d'une cellule PV.

ID: Courant dans la diode. Il représente le courant de fuite interne à une cellule.

Rsh: Résistance shunt. Elle est parcourue par un autre courant de fuite.

R_s : Résistance série. Elle engendre les pertes provoquées par le contact électrique des cellules entre elles.

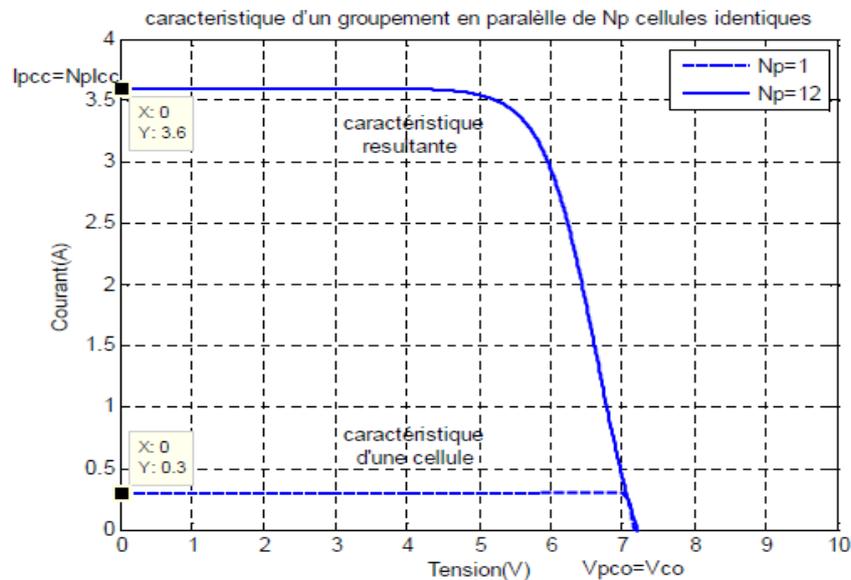


Fig. I. 22: Caractéristiques résultante d'un groupement en parallèle.

I.8 Le rendement d'un panneau photovoltaïque

I.8.1 Puissance produite

Le rendement d'un panneau solaire photovoltaïque dépend des technologies utilisées lors de sa fabrication. Il existe plusieurs types dont les plus connus sont les panneaux PV à base de cellules en Silicium poly cristallin, Silicium monocristallin, Silicium amorphe, les cellules multi-jonctions, etc. Chacune de ces technologies présente des avantages et des inconvénients.

En particulier, le rendement, qui est généralement le critère de choix, dépend des conditions climatiques du lieu d'installation (dans les régions caractérisées par des températures élevées, les systèmes au Silicium amorphe sont préférés à ceux au mono ou poly cristallin) .(13)

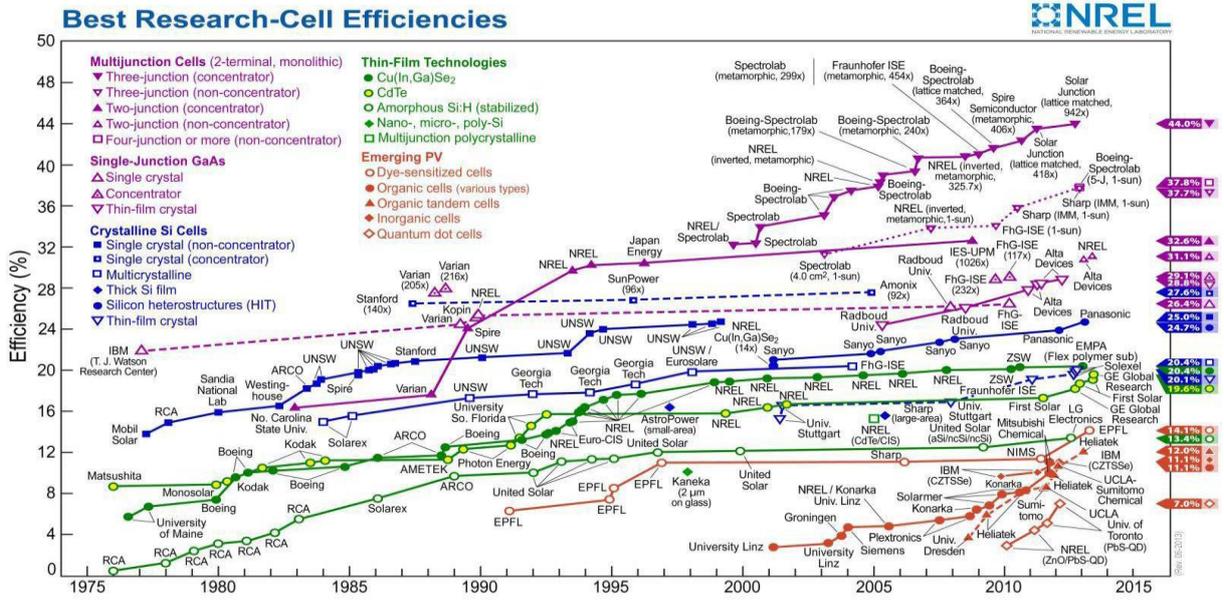


Fig. I. 23: Rendement pour différents types de technologies au cours des années.

Pour un panneau PV, le rendement, R exprimé en pourcent (%), est défini par le rapport de la puissance électrique produite par le panneau PV (PEP) à la puissance solaire reçue (PSR).

I.8.2 Positionnement

L'énergie fournie par le panneau PV dépend fortement de la quantité d'éclairement solaire absorbée par ce dernier. Cette quantité dépend de l'orientation du panneau par rapport au soleil. Pour collecter le maximum d'énergie, le panneau PV doit être constamment orienté perpendiculairement aux rayons solaires (Figure (I.24)).(14)

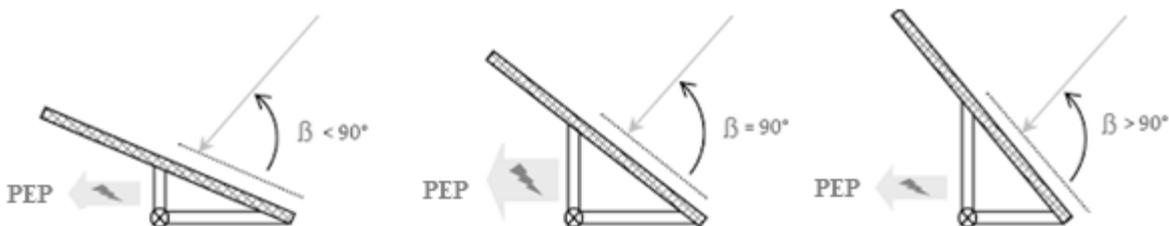


Fig. I. 24: Dépendance des performances d'un panneau PV de l'angle β .

Avec : β l'angle formé entre le plan du panneau et les rayons lumineux incidents, l'angle optimal correspond à un angle de 90° comme indiqué dans la figure (I.24).

Chaque fois que cet angle diminue ou augmente, la surface (m^2) du panneau exposée aux rayons diminue et donc en partant de la puissance produite, le rendement diminue aussi, d'où l'importance de l'orientation des panneaux par rapport à la position du Soleil .(14)

Le rendement en puissance solaire exploitée peut être calculé à l'aide de l'équation suivante :

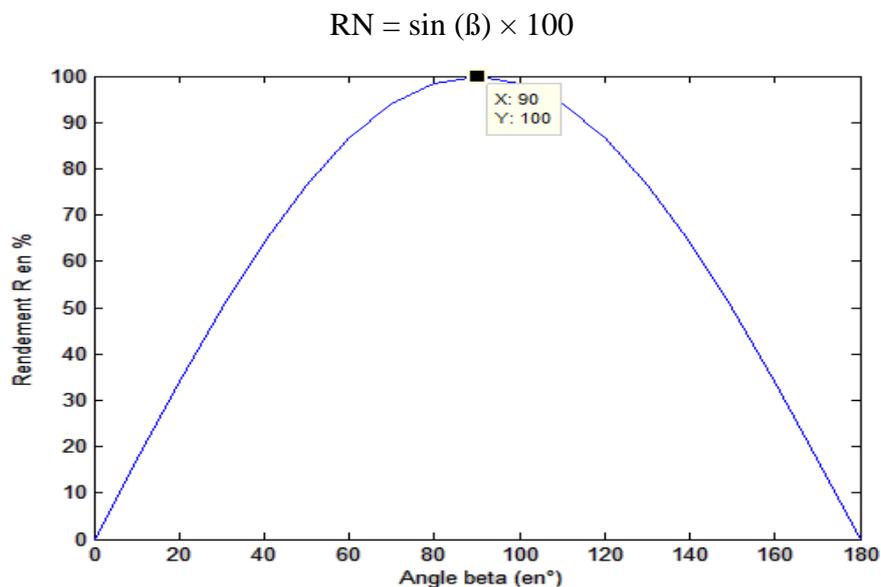


Fig. I. 25: Rendement d'une cellule photovoltaïque en fonction de son angle d'incidence .

I.8.3 Positionnement (angle d'inclinaison)

Un autre facteur qui influence sur les performances du panneau PV est l'angle d'inclinaison, qui correspond à l'angle formé par le plan du panneau solaire par rapport à l'horizontale (le plan du sol).

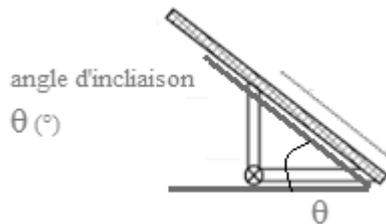


Fig. I. 26: Représentation de l'angle d'inclinaison θ .

En effet, l'évolution de la trajectoire du soleil varie selon les saisons (l'inclinaison de la terre varie), l'angle d'inclinaison est plus réduit en été et plus important en hiver.

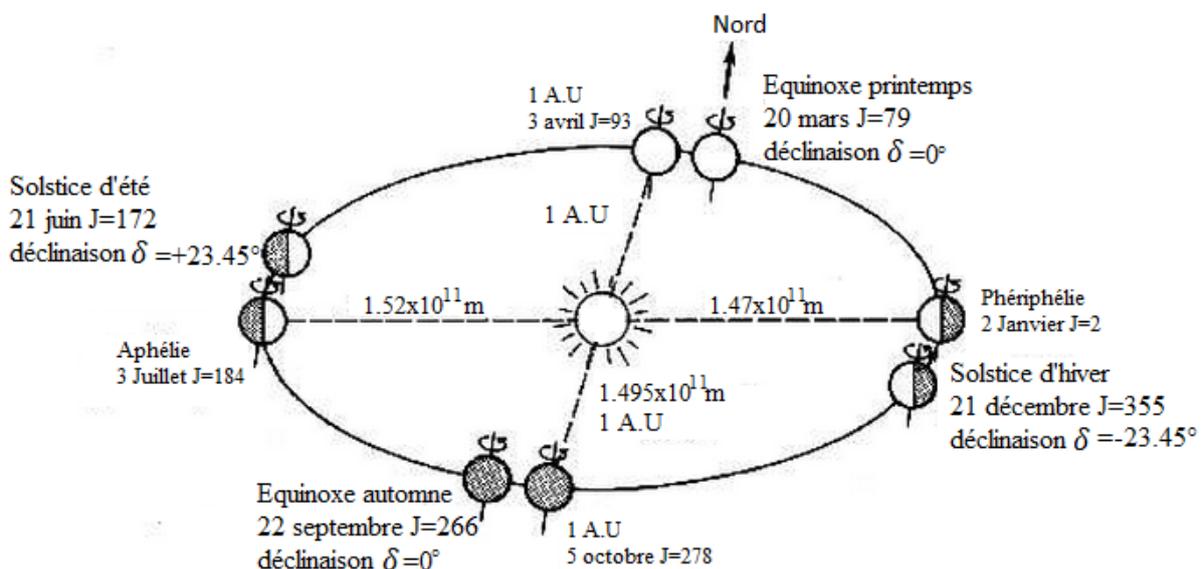


Fig. I. 27: Représentation des équinoxes et solstices et l'inclinaison de l'axe de rotation de la terre par rapport à son plan de translation autour du soleil.

Cependant si l'on désire maximiser la puissance générée par un panneau PV et avoir un rendement optimal, il faut tenir compte de tous ces paramètres et contraintes liées à l'orientation du module ainsi que la position du soleil. Ceci peut être assurée par un système de poursuite solaire (suiveur soleil ou encore dit tracker solaire (appellation courante)) permettant de suivre le soleil tout au long de la journée.

Pour cela, la structure possède deux degrés de liberté : une rotation horizontale pour régler l'azimut et une rotation verticale pour l'inclinaison. Ce système permet ainsi, aux panneaux photovoltaïques de suivre continuellement et en temps réel la trajectoire du soleil pour assurer une production électrique maximale, d'où la nécessité de définir avec exactitude les trajectoires empruntées par le soleil, de manière à définir la meilleure façon avec laquelle sera effectué le suivi automatique.(14)

I. 9 Avantages et inconvénients de la photovoltaïques

I.9.1 Les avantages

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rend 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.
- Enfin, 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 des grandes dimensions.

I.9.2 Les inconvénients

- 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 pour le BENELUX) 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.

I.10 Conclusion

Dans ce chapitre on a donné une vue générale sur le système photovoltaïque, même nous avons présenté le principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par cellule photovoltaïque.

Le chapitre décrit brièvement les cellules solaires les plus couramment utilisées, leurs rendements ainsi que leurs avantages et inconvénients.

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 II :
*Dimensionnement d'un système
photovoltaïque*

II.1 Introduction

Le programme **pvsysta** été créé pour être utilisé par les ingénieurs et les chercheurs mais il est aussi un dispositif pédagogique très utile avec une aide contextuelle détaillé qui clarifier la procédure et les modèles utilisés en détail et qui donne une approche convivial **pvsyst** permet de transférer des données météo d'une plusieurs sources différentes et même des données personnelles.

Et dans ce chapitre qui va suivre on va détailler l'utilisation de logicielle **pvsyst 5.74** pour un système photovoltaïque avec et sans suiveur solaire.

II .2 Mouvement du Globe terrestre

La terre décrit autour du soleil une orbite elliptique quasi circulaire avec une période de 365,25 jours. Le plan de cette orbite est appelé plan de l'écliptique. C'est au solstice d'hiver (21décembre) que la terre est la plus proche du soleil, et au solstice d'été (22juin) qu'elle en est la plus éloignée. La terre tourne sur elle-même avec une période de 24h. Son axe de rotation (l'axe des pôles) a une orientation fixe dans l'espace. Il fait un angle $23^{\circ}27'$ avec la normale au plan de l'écliptique.(15)

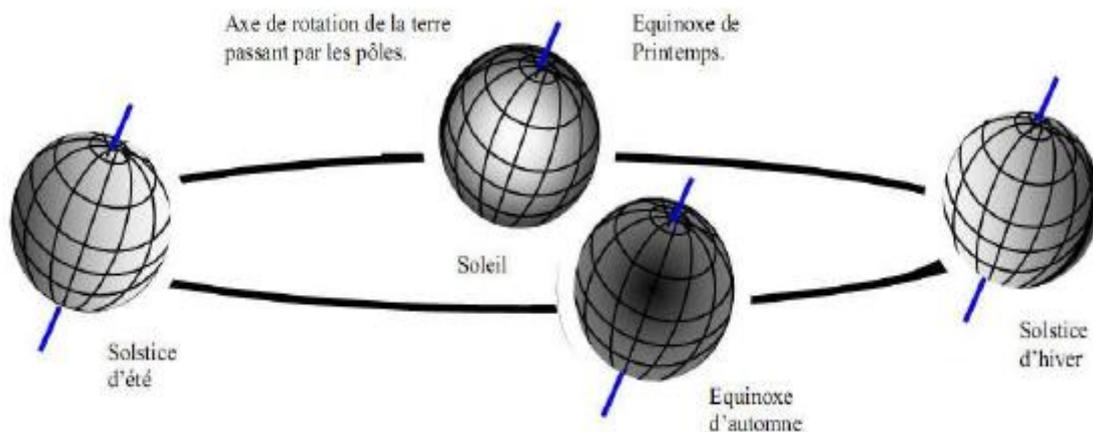


Fig. II. 1 : Variation saisonnière du rayonnement solaire.

II.3 La sphère céleste

La sphère céleste est une sphère imaginaire d'un diamètre immense, avec la terre au centre. On considère que tous les objets visibles dans le ciel se trouvent sur la surface de la sphère céleste. On peut résumer les différentes caractéristiques sur la sphère elle-même comme est représenté sur la figure (II-2). La direction des objets peut être quantifiée de façon précise à l'aide d'un système des coordonnées célestes.(15)

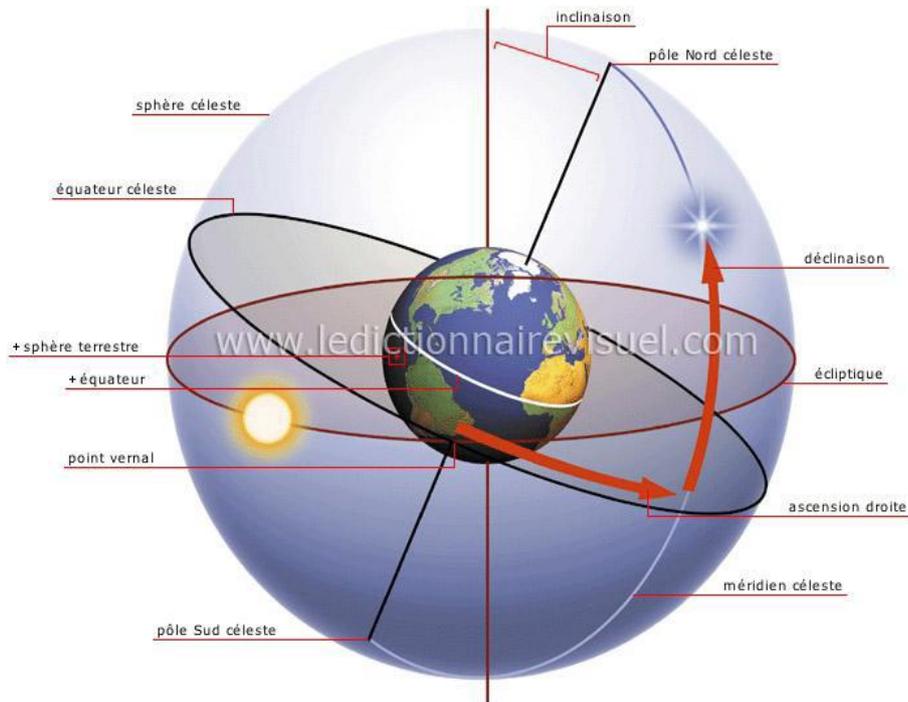


Fig. II. 2: La sphère céleste.

II.4. Les coordonnées célestes

II.4.1 Les coordonnées géographiques

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre.

II.4.1.1 Longitude

La longitude d'un lieu l correspond à l'angle que fait le plan méridien passant par ce lieu avec un plan méridien retenu comme origine. On a choisi pour méridien (origine 0°) le plan passant par l'observatoire de Greenwich. Par convention on affecte du signe (+) les méridiens situés à l'est de ce méridien, et du signe (-) les méridiens situés à l'ouest. (15)

II.4.1.2 Latitude

La latitude d'un lieu Φ correspond à l'angle avec le plan équatorial, que fait le rayon joignant le centre de la terre à ce lieu. L'équateur terrestre est donc caractérisé par latitude égale à 0° , le pôle nord par la latitude $+90^\circ$ et le pôle sud par la latitude -90° . Cette convention de signe affecte le signe (+) à tous les lieux de l'hémisphère nord et le signe (-) à tous les lieux de l'hémisphère sud. (15)

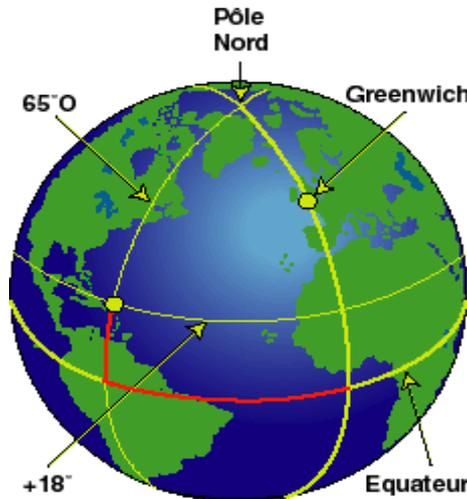


Fig. II. 3: Les coordonnées géographiques.

II.4.2 Les coordonnées horaires

II.4.2.1 La déclinaison solaire

C'est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre. Elle varie tout au long de l'année, entre deux valeurs extrêmes (-23°27' et +23°27' environ) et elle s'annule aux équinoxes de printemps et d'automne, sa valeur peut être calculée par la formule suivante :

$$\delta = 23.45 \sin (360 * (284 + n) / 365) \dots\dots\dots (II-17).$$

Avec n : numéro du jour dans l'année

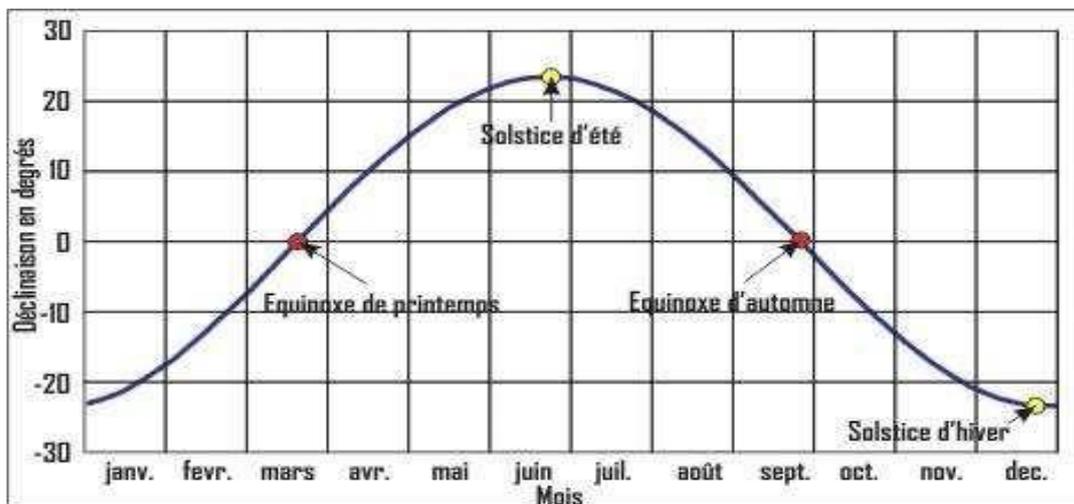


Fig. II. 4: La déclinaison du soleil en fonction des jours.

II.4.2.2 Angle horaire(w)

L'angle horaire du soleil est l'angle formé par le plan méridien du lieu et celui qui passe par la direction du soleil si l'on prend comme origine le méridien de Greenwich, l'angle

horaire est compris entre 0 et 360 degrés La valeur de l'angle horaire est nulle à midi solaire, négative le matin, positive dans l'après-midi et augmente de 15 par heure, L'angle horaire est obtenu de la façon suivante :

$$W \text{ (rad)} = 180 \times (\text{TSV}/12 - 1) \text{ ou } W \text{ (rad)} = 360 \times (\text{TSV} - 12) / 24 \dots \dots \dots \text{ (II-18)}$$

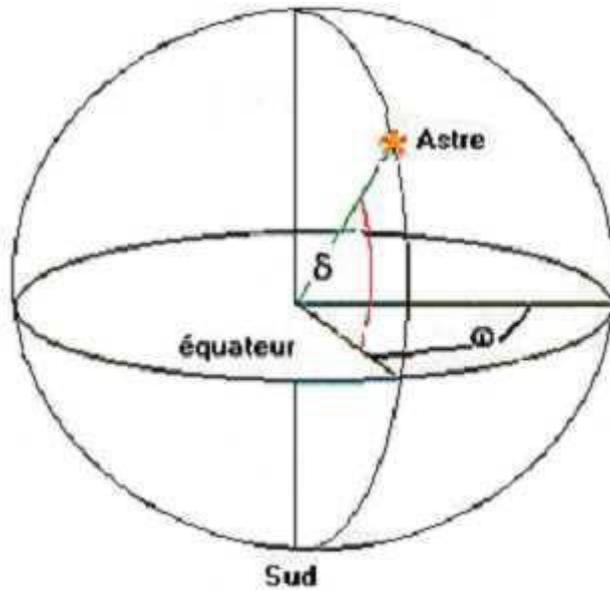


Fig. II. 5: Les coordonnées horaires.

II.4.3 Les coordonnées horizontales

II.4.3.1 Hauteur angulaire du soleil (h)

C'est l'angle formé par le plan horizontal au lieu d'observation et la direction du soleil. Cette hauteur durant le jour peut varier de 0 (soleil à l'horizon) à 90 (soleil au zénith)

$$h = \text{Arc Sin} (\text{Sin} (\Phi) \times \text{Sin} (\delta) + \text{Cos} (\Phi) \times \text{Cos} (\delta) \times \text{Cos} (w)) \dots \dots \dots \text{ (II-19)}$$

II.4.3.2 Azimuth (a)

C'est l'angle compris entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil. La connaissance de l'azimut du soleil est indispensable pour le calcul de l'angle d'incidence des rayons sur une surface non horizontale. (15)

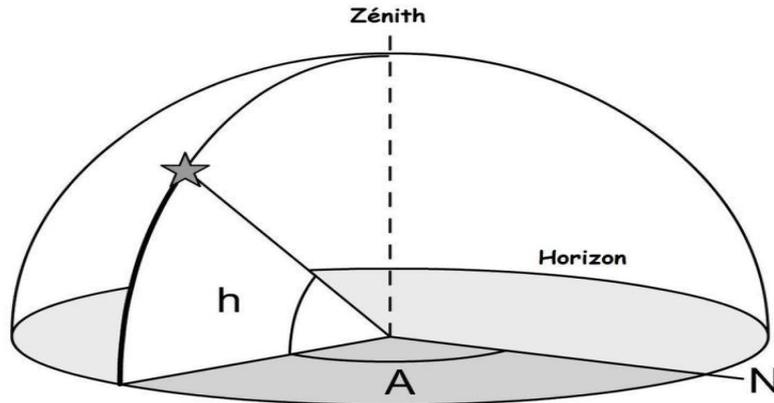


Fig. II. 6: Les coordonnées horizontales.

II.5 logicielle Pvsys

Pvsyst 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 est une application de pré dimensionnement assez simple à prendre en main et accessible au néophyte. Le deuxième permet une étude beaucoup plus approfondie et prend en compte beaucoup plus de paramètres. 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. Vient ensuite une partie résultats où l'on choisit les données qui nous intéressent.

Ce logiciel est donc accessible aux confirmés comme au néophyte. Dans cette documentation ne seront pas traitées les parties « installation de pompage » et les aspects financiers.(16)

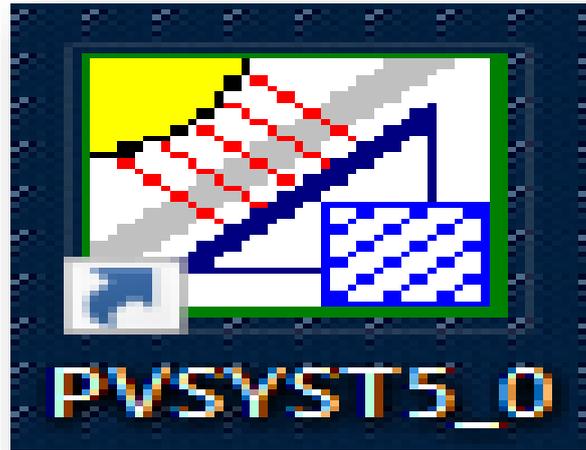


Fig. II. 7: logiciel PVSYST5_0.

II.5.1 Trois menus principaux

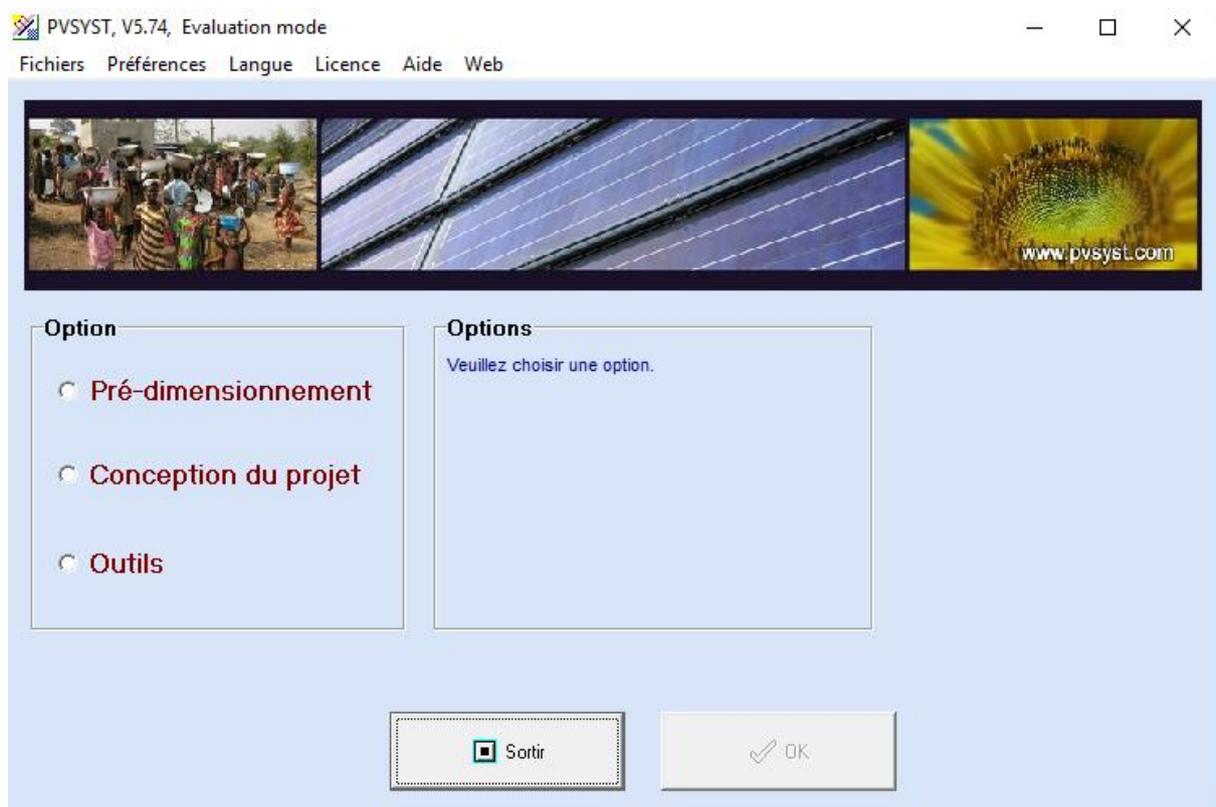


Fig. II. 8: le menu principal.

a) Pré-dimensionnement

Pour une étude rapide et simple : on donne une location et un système puis le logiciel calcul quelques paramètres de pré dimensionnement ainsi qu'un graphe de production énergétique annuelle, un graphe d'irradiation par mois, un tableau récapitulatif et une étude de coût. Le pré dimensionnement concerne trois systèmes :

- Couplé au réseau
- Isolé avec batteries
- Pompe

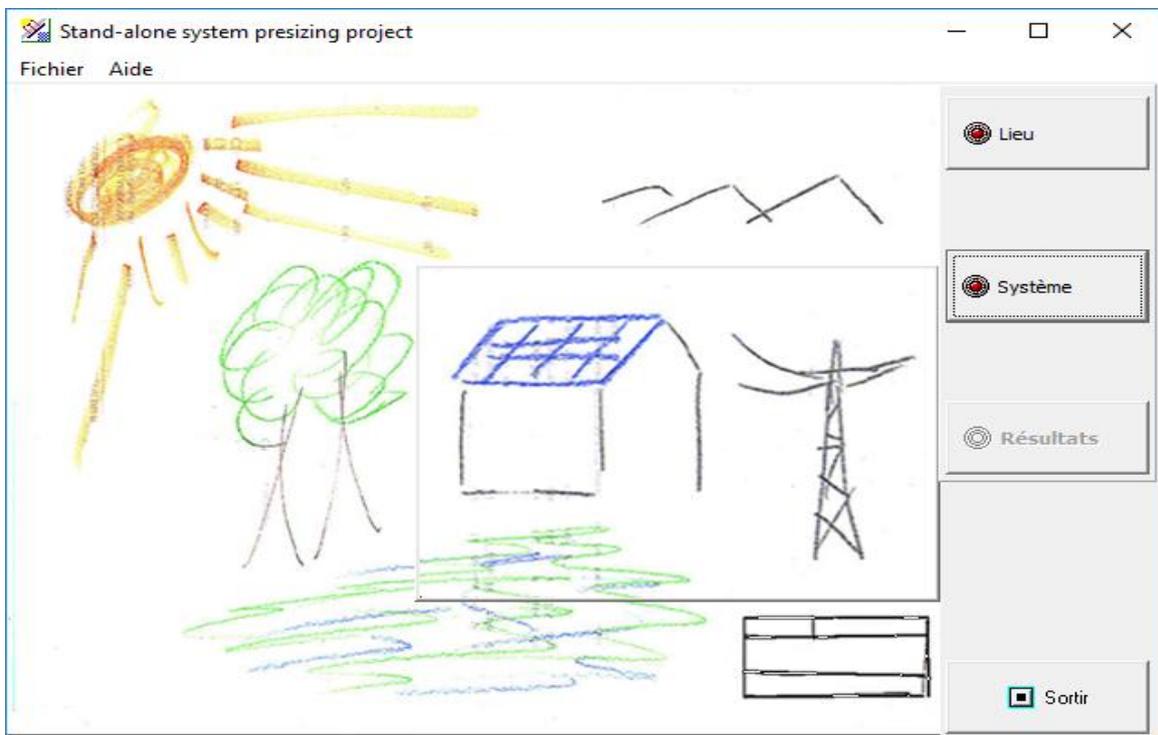


Fig. II. 9: Fenêtre centrale d'accueil d'option « pré-dimensionnement »

Conception des projets

Pour une étude plus approfondie avec de nombreux paramètres à prendre en compte notamment les ombres proches et lointaines. On dispose aussi de plus de choix au niveau de l'orientation des panneaux avec le choix par exemple de panneaux "tracking" qui suivent la course du soleil. Les calculs sont basés sur des systèmes réels commercialisés que l'on choisira parmi une vaste liste. On génère ensuite une simulation qui nous fournis un large choix de résultats et de graphe personnalisables.

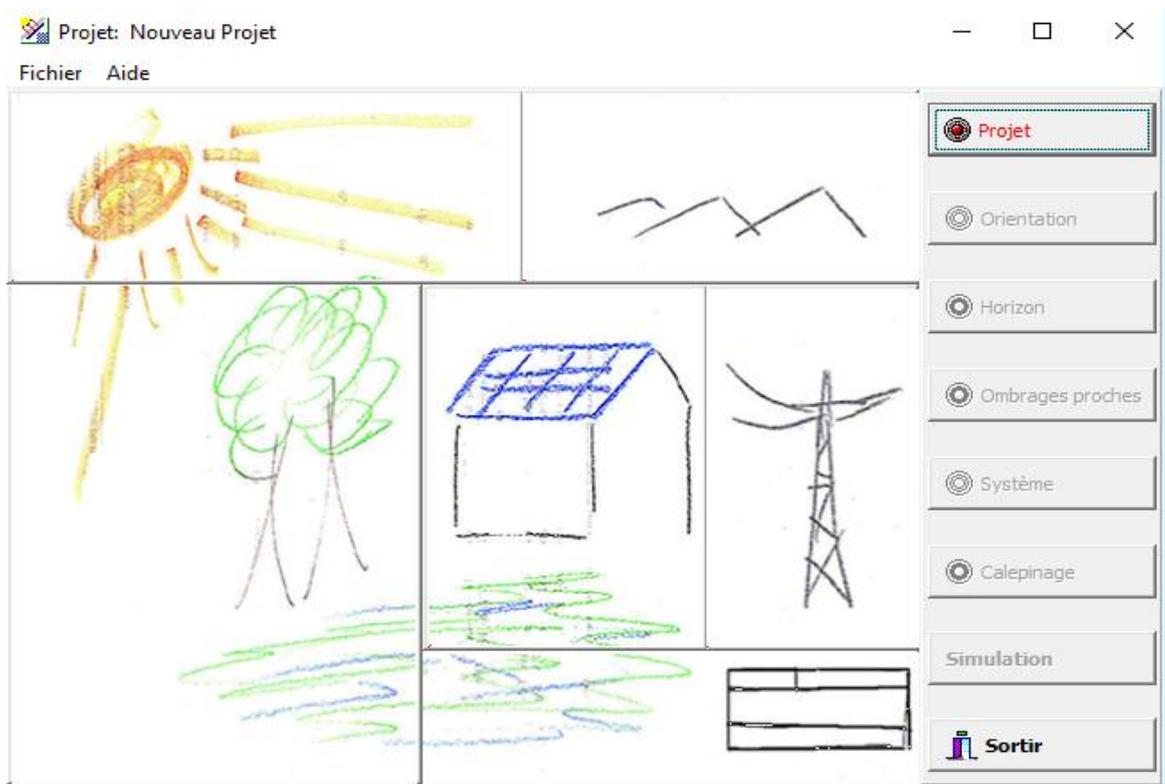


Fig. II. 10:Fenêtre centrale accueille d'option « Conception de projet »

b) Outil

Permet de modifier les bases de données et d'utiliser des outils du programme sans pour autant créer un projet complet.

A évalué : pour les utilisateurs expérimentés, on peut utiliser dans l'onglet préférences le "editthidd en parameters". On pourra modifier de nombreux paramètres qui auront une influence directe sur les calculs du logiciel. A modifier avec précaution.

II.6 L'utilisation d'un logiciel pvsyst

PVSYST est d'un usage relativement simple.

II.6.1.Création de la localisation

clique sur « outil ».

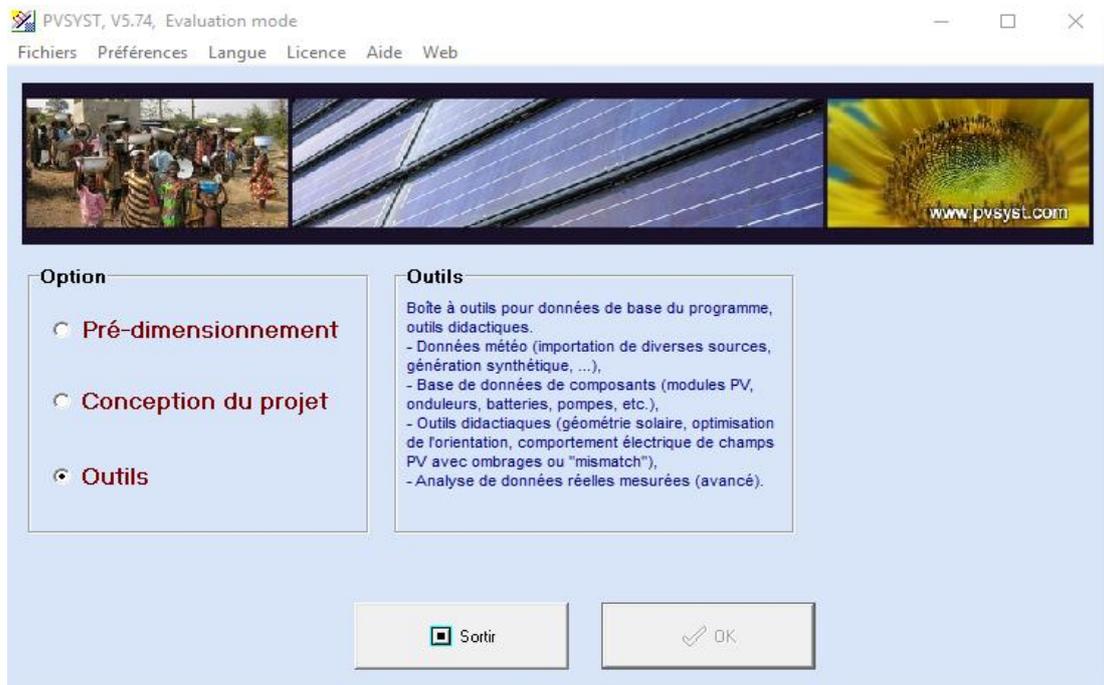


Fig. II. 11:choix de l'outil

Une fenêtre du logiciel est donnée.

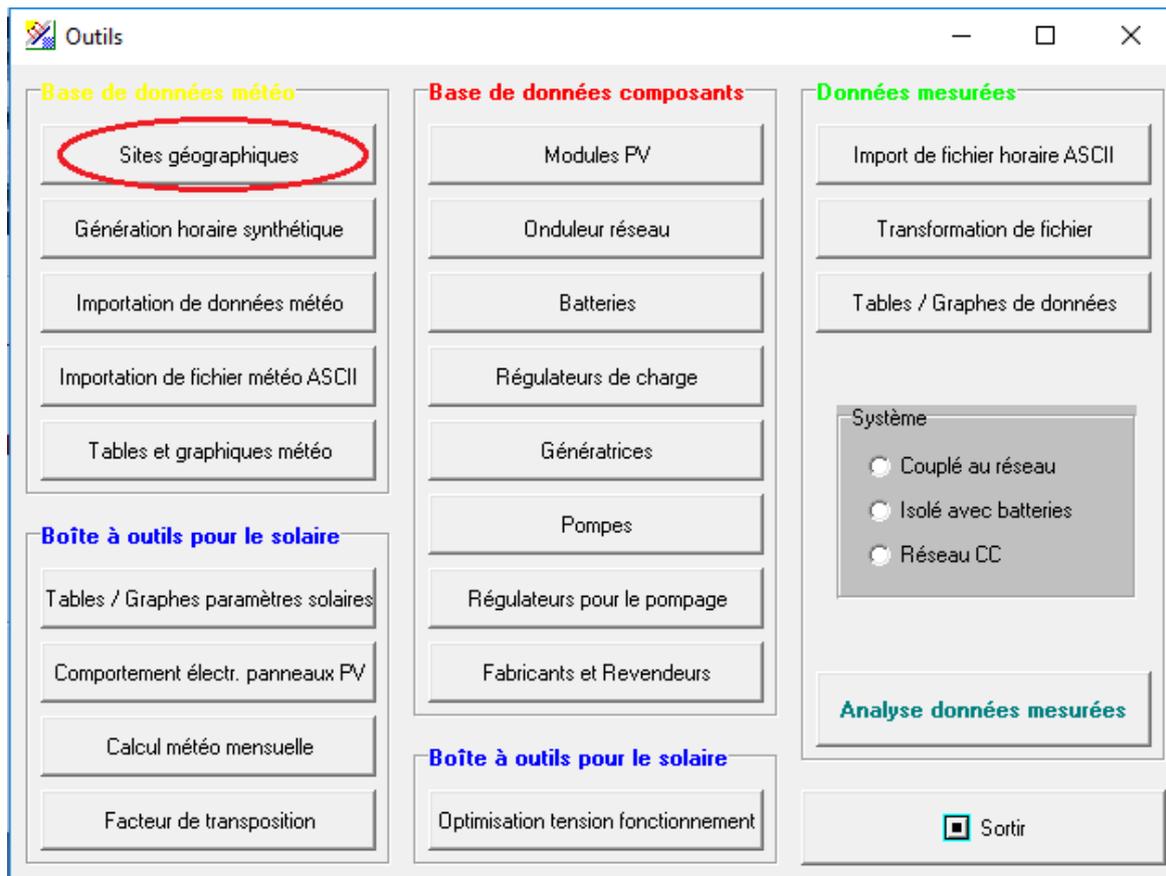


Fig. II. 12: Choix du site géographique

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.

Pour créer le site de notre wilaya dans la base des données du logiciel, nous avons suivi la procédure suivante :

On choisit le site géographique de la figure (II.12), ensuite on clique sur le bouton nouveau de la figure (II.13).

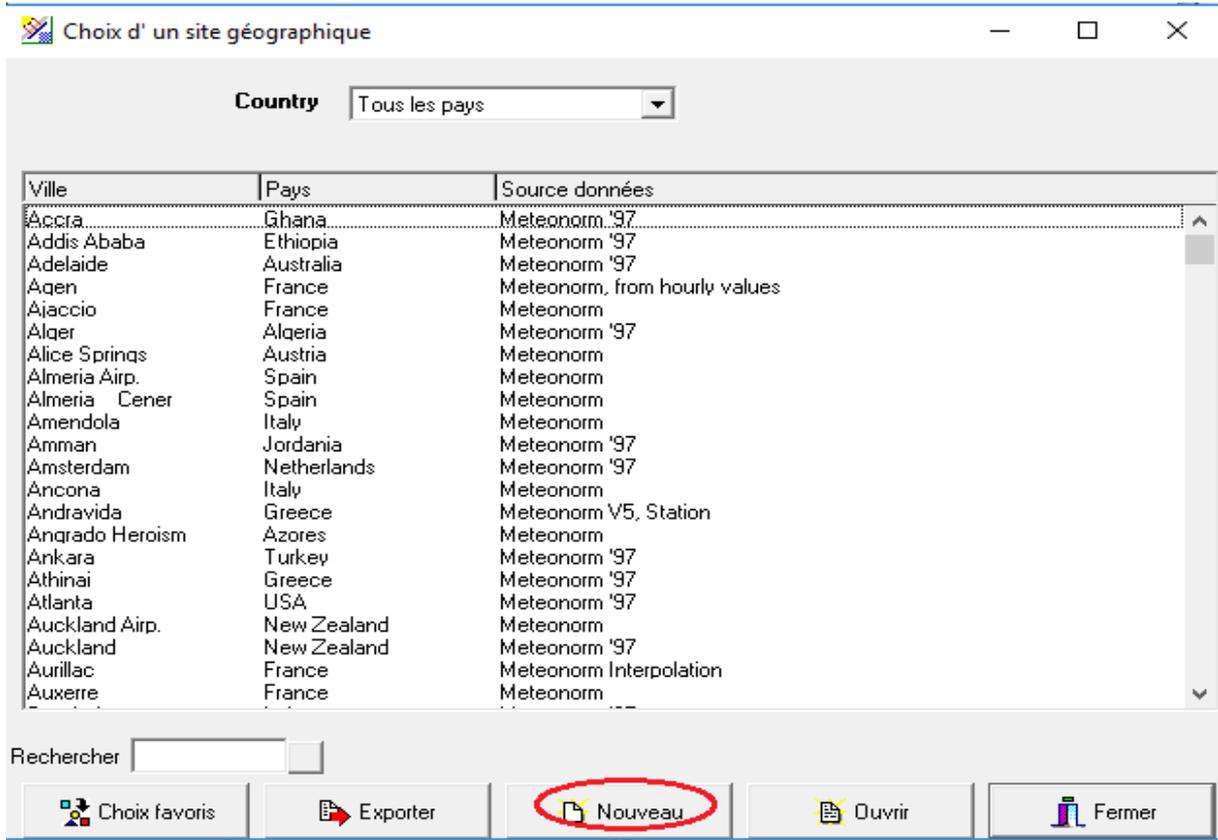


Fig. II. 13: Choix de du nouveau projet.

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

II.6.2 .Récupération des données météo

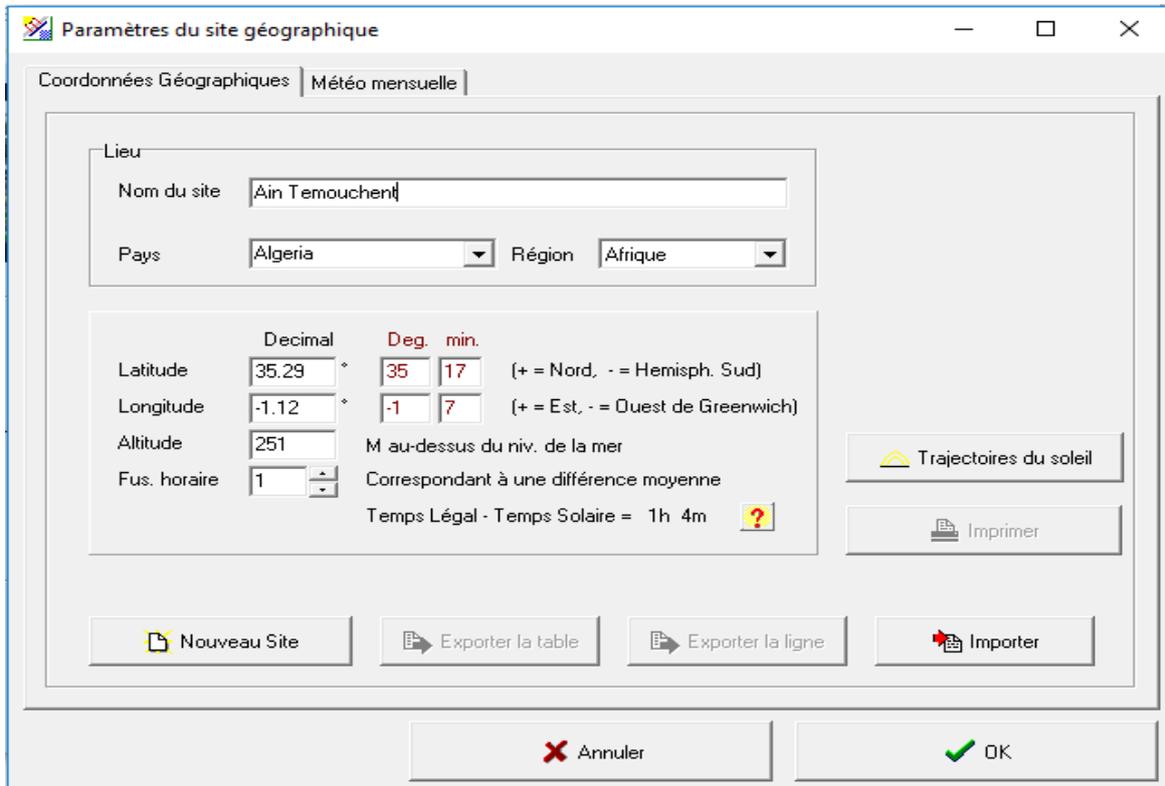


Fig. II. 14: les coordonnées géographiques du site d'Ain Temouchent.

On clique sur le bouton Météo mensuelle, on vas remplir le vide d'après la sources des Donnée puis, on clique sur le bouton trajectoire du soleil dans la fenêtre précédent.

Trajectoire du soleil à Ain Temouchent, (Lat. 35.3°N, long. 1.1°W, alt. 251 m)

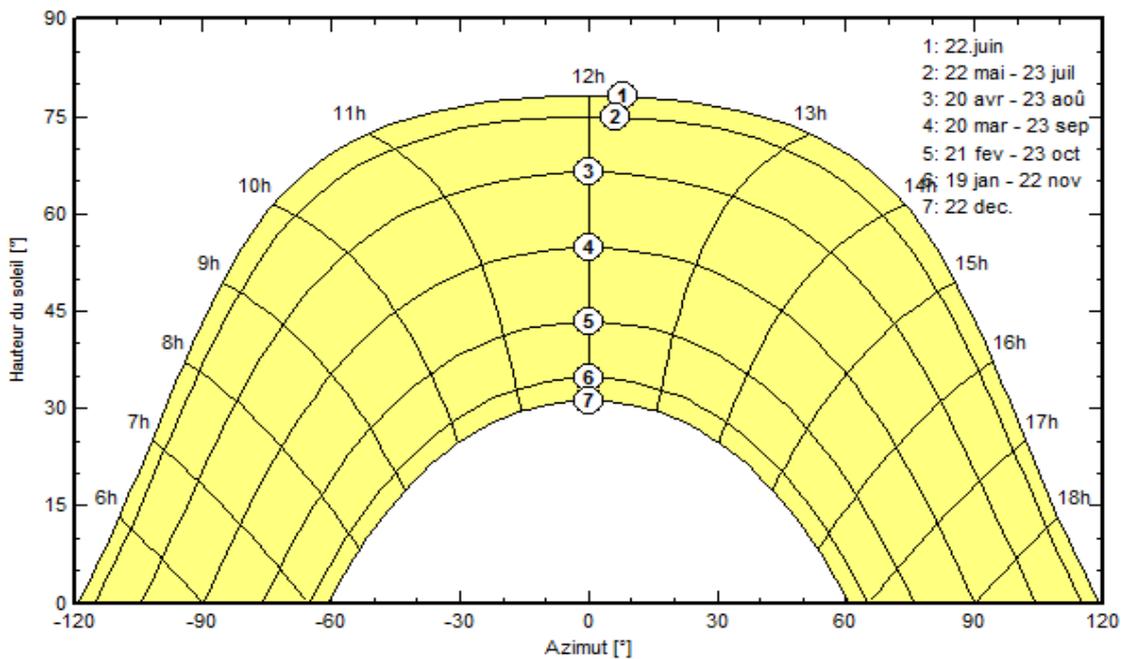


Fig. II. 15:trajectoire du soleil à Ain Temouchent.

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 à 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 à 12 h Universelle, elle n'atteint que 31°.

Puis, on clique sur le bouton Météo mensuelle pour voir la figure suivante :

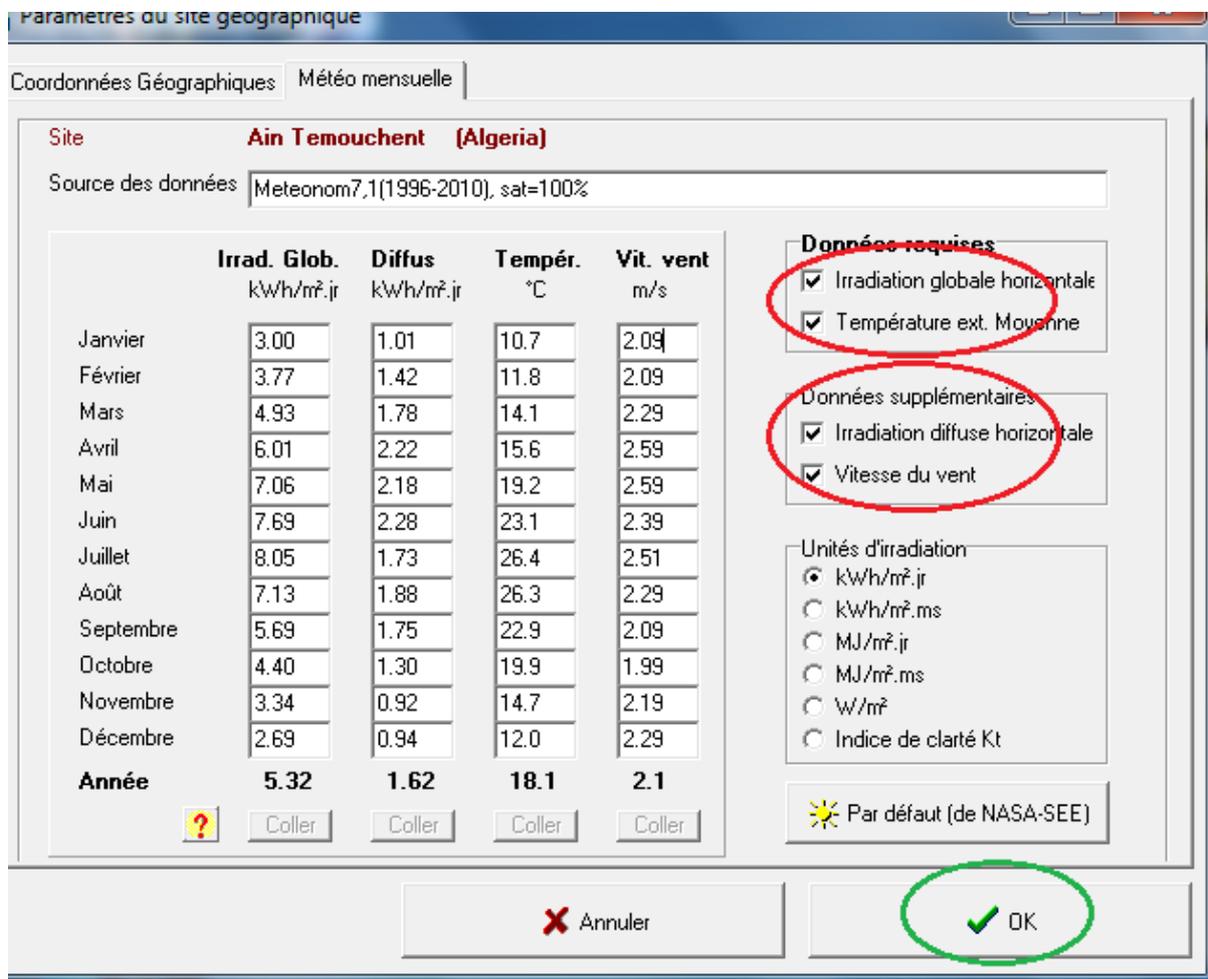


Fig. II. 16: Coordonnées météorologique de Ain Temouchent (irradiation globale, rayonnement diffus, température max et la vitesse du vent).

Toutes ces données peuvent être sauvegardées (Figure II.17).

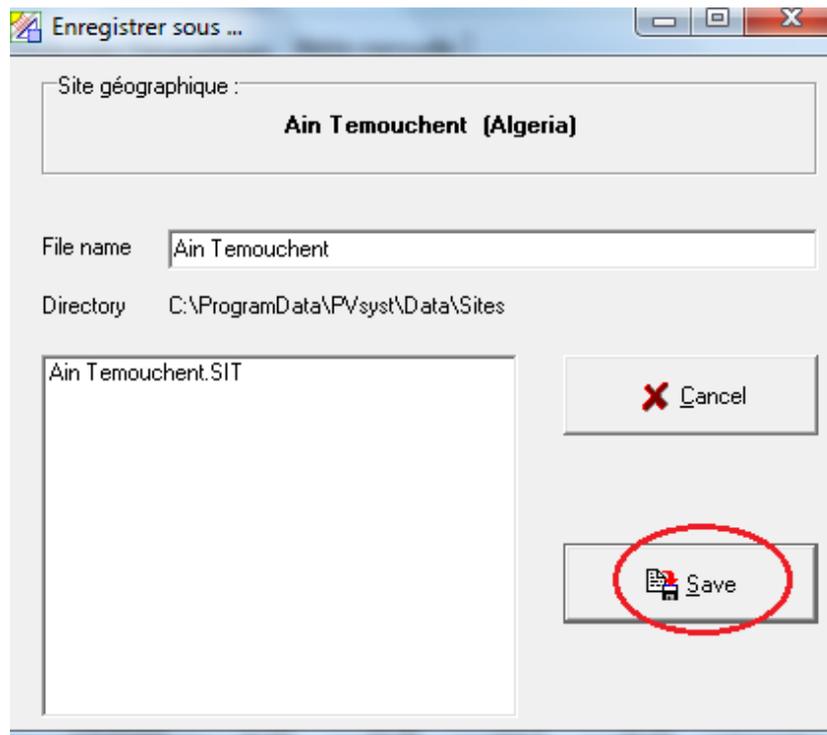


Fig. II. 17: Fenêtre de l'enregistrement des données de Ain Temouchent.

Après la création du site on passe à l'étape suivante (voir la figure (II.18)).

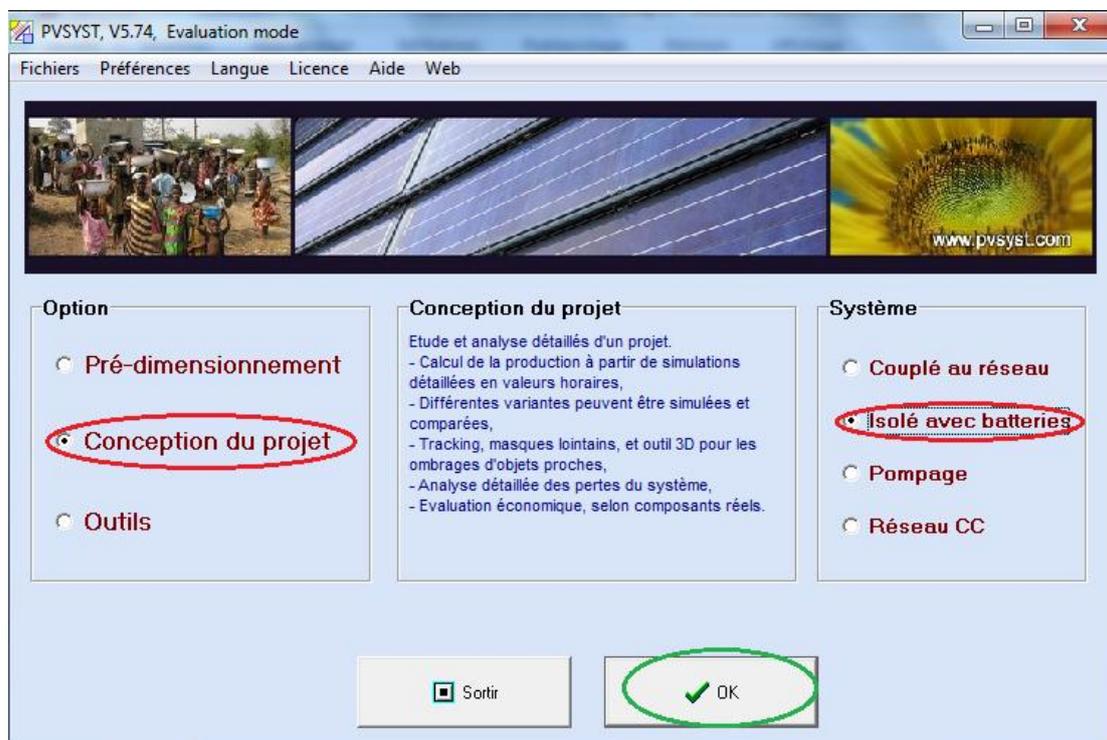


Fig. II. 18: Choix du type de projet.

II.6.3. Description de notre installation

▪ **Projet :**

On clique sur le bouton Projet comme le montre la figure suivante(II.19).

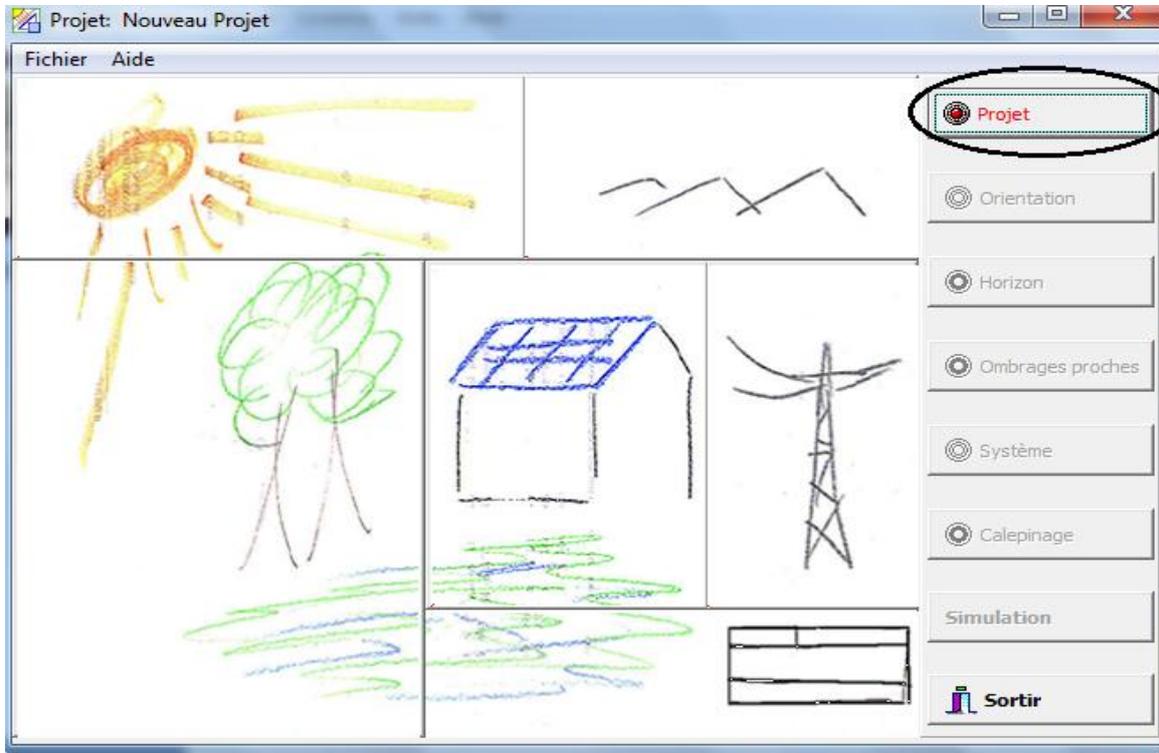


Fig. II. 19: Choix de l'application.

On va rentrer un nom de projet puis, on clique sur « next (localisation) » ; on choisit le pays et la ville(Figure II.20).

Dans site et météo on choisit la valeur de l'albédo de 0.2 pour tous les mois de l'année.

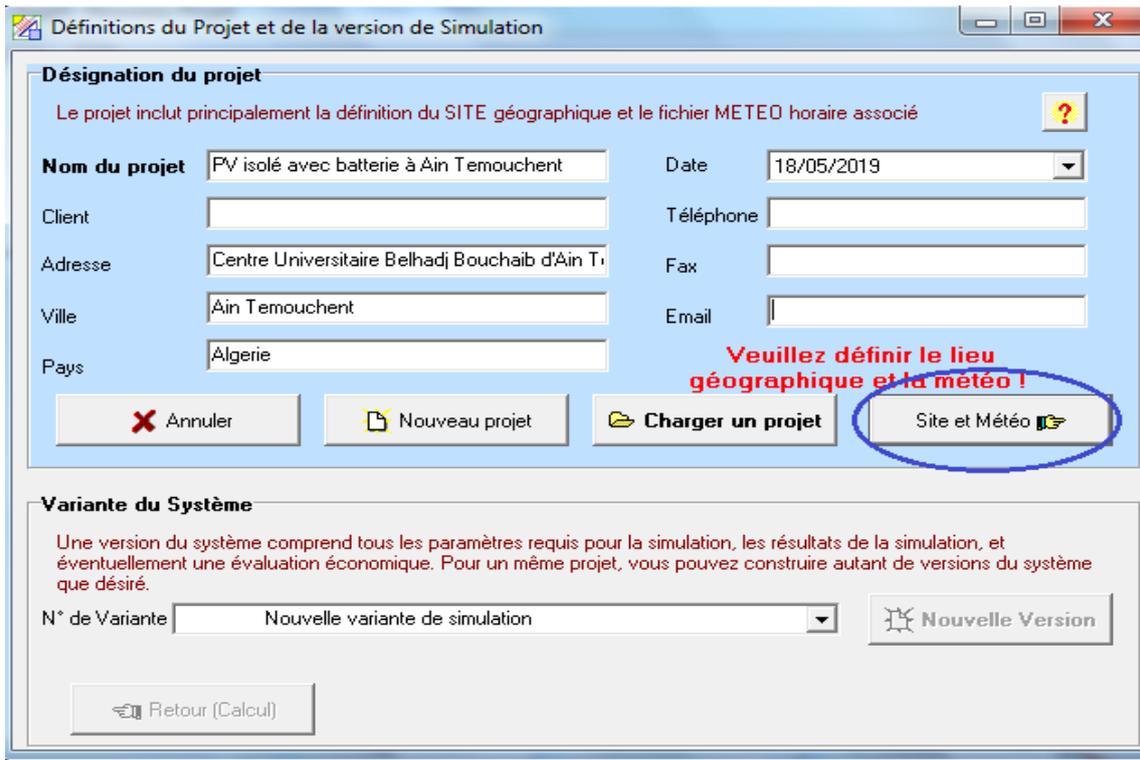


Fig. II. 20: Définition du projet.

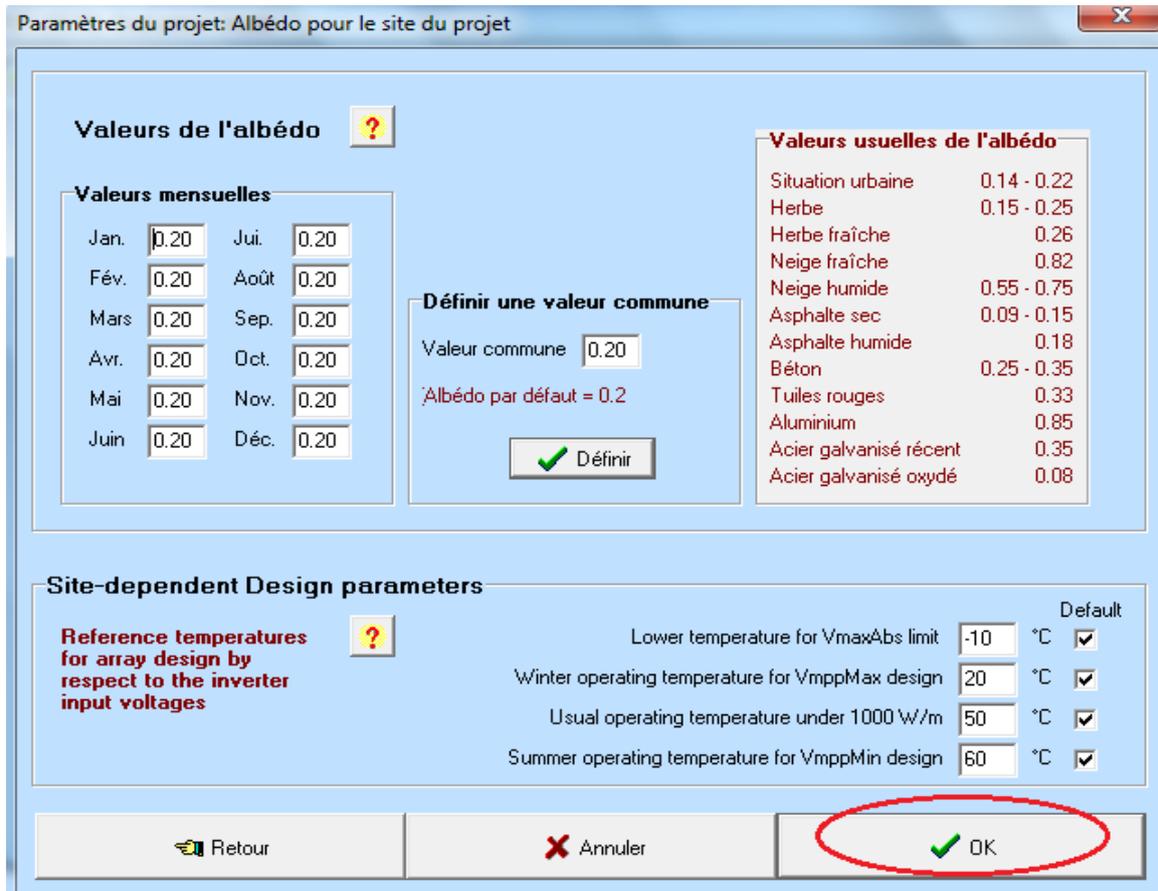


Fig. II. 21: choix d'albédo pour le site du projet.

La valeur habituelle est de 0,2 (par défaut dans PVsyst). La meilleure valeur pour une situation donnée peut être obtenue par une mesure directe sur le site (c'est le rapport des éclairiments 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, dépend de sa structure.

Tableau. II. 1:Coefficient d'albédo usuels.

Milieu urbain	0.14-0.22
Herbe	0.15-0.25
Herbe fraîche	0.26
Neige fraîche	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

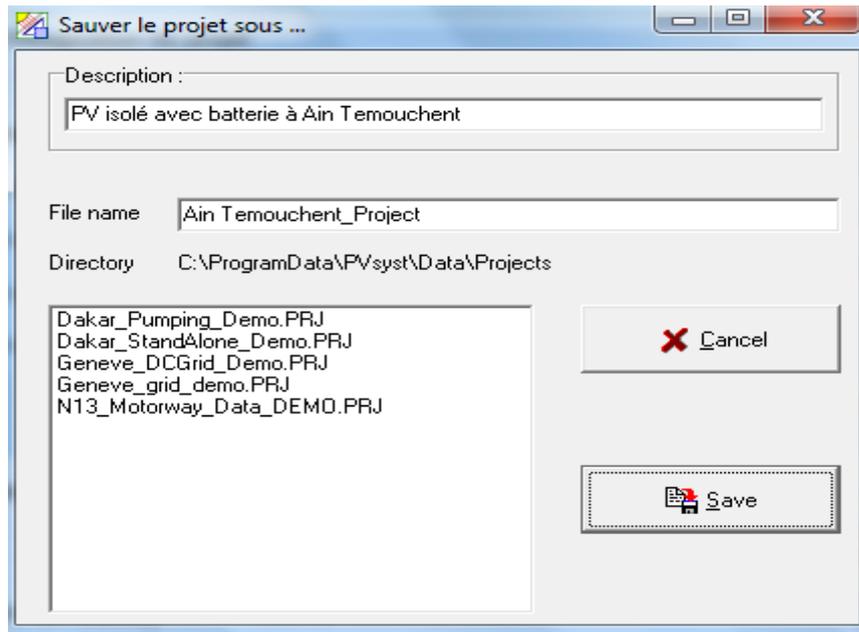


Fig. II. 22: sauver le projet.

Clique sur « Save » dans la fenêtre de confirmation du nom du fichier « projet ».

▪ **Orientation du champ de panneaux :**

On clique sur orientation.

❖ **Premier tâche :Système sans suiveur**

Rentrez les paramètres qui sont important qui sont le (inclinaison plan) ou inclinaison des panneaux et le (Azimut) ou orientation par rapport au sud (voir Fig. II.23).

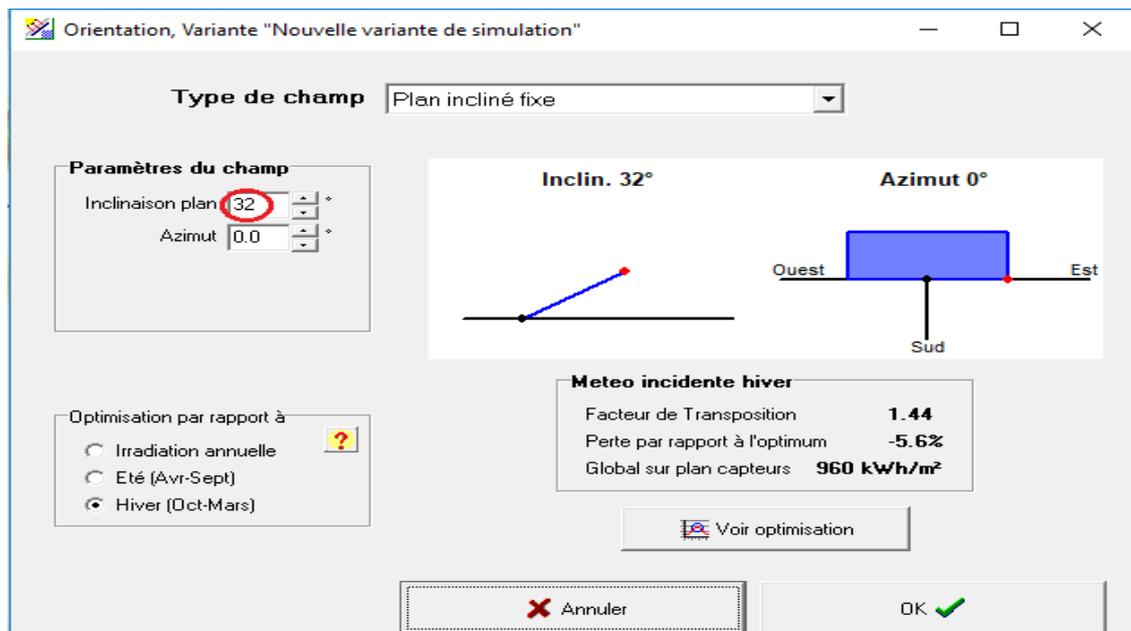


Fig. II. 23:Choix de l'inclinaison du panneau.

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

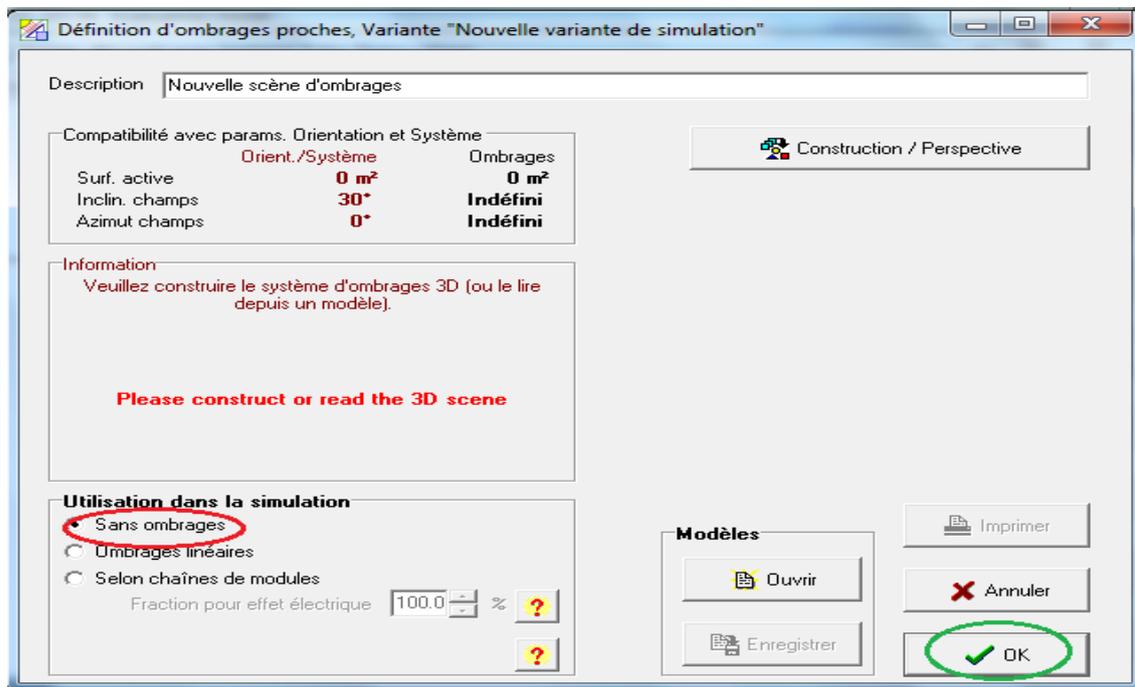


Fig. II. 24: Définition d'ombrages proches.

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

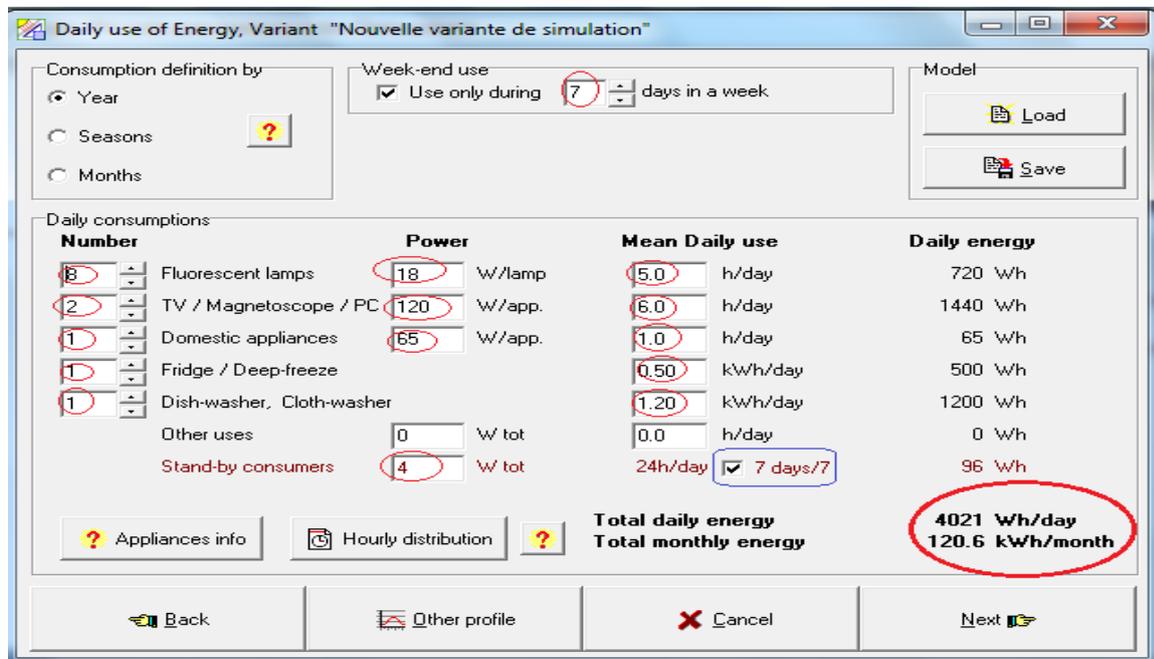


Fig. II. 25: autonomie avec des énergies.

▪ **Panneaux et batteries**

Cette partie du logiciel permet de définir les composants les plus importants de notre installation : les panneaux et les batteries.

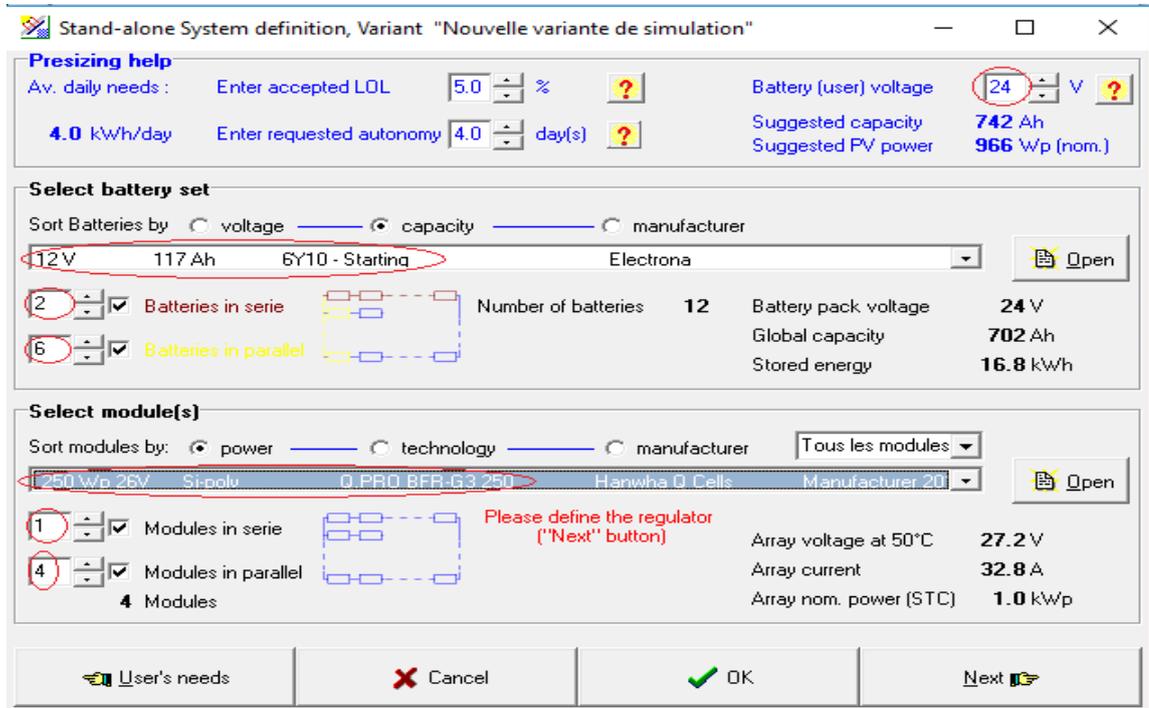


Fig. II. 26: standard définition de système nombre des batteries et des panneaux.

Le logiciel PVSYS 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).

➤ **Nombre du module**

quatre (04) modules PV modèle « HanwhaQCells » (26V 250Wc), quatre branches en parallèle, et chaque branche comporte un (1) module (c à d 24V par branche).

➤ **Nombre des batteries**

Douze (12) batteries modèle « Electrona » (12V 117Ah) , six (6) branches en parallèle, et chaque branche comporte deux(2) batteries (c à d 24V par branche).

➤ **Les coordonnées du module PV**

On clique sur « open » après on appuie sur le bouton « Données de base » voir la Figure suivante (II.27).

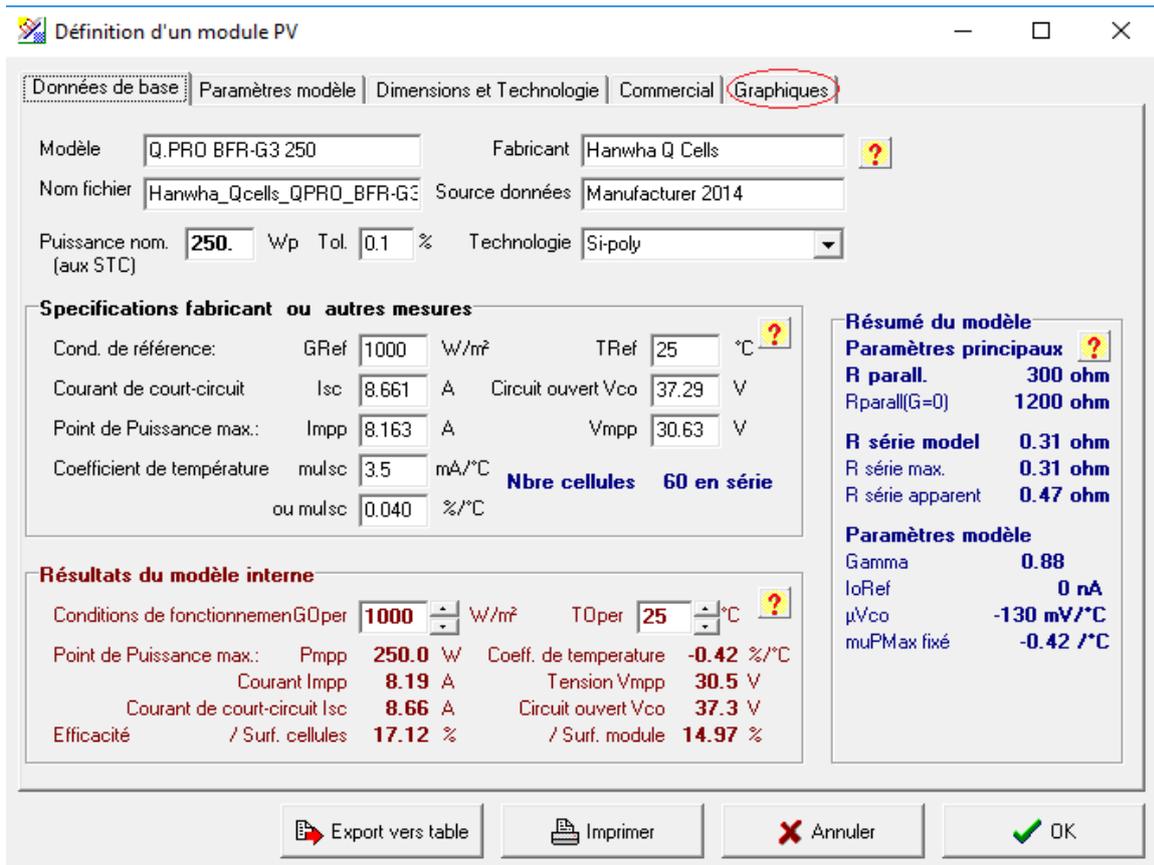


Fig. II. 27: définition d'un module PV.

On clique sur le bouton « Graphiques » (Fig. II.27).

II.6.4 Résultats (sous forme des courbes)

✓ Influence de l'ensoleillement sur (I-V)

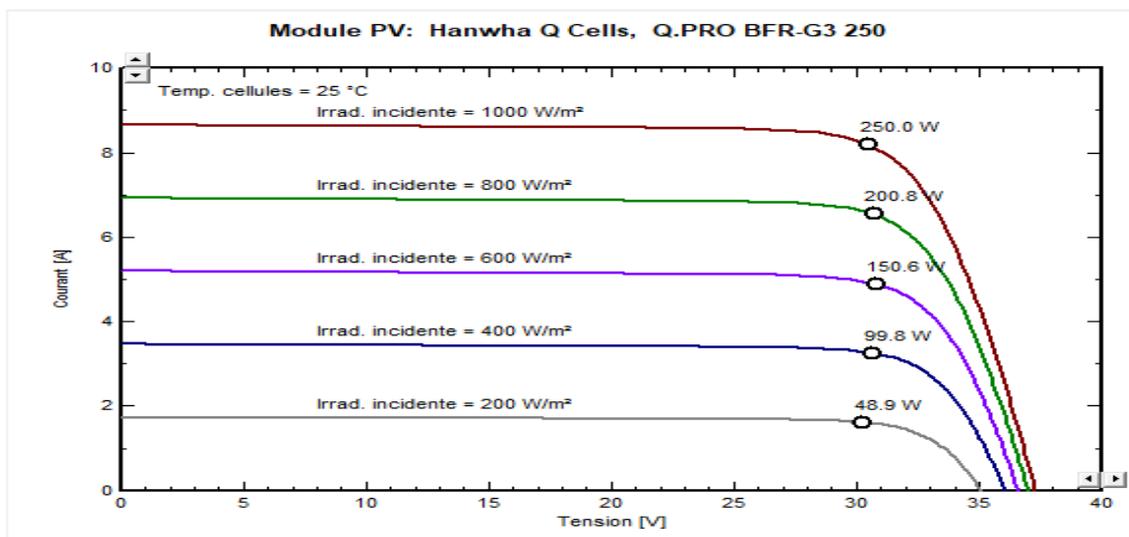


Fig. II. 28: Influence de l'ensoleillement sur la courbe I-V.

La figure (II.28) présente la caractéristique (I-V) d'un module photovoltaïque modèle « HanwhaQCells » (26V 250Wc) , pour différents ensoleillements à une température fixe de 25°.

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.

✓ **Influence de la température sur(I-V) :**

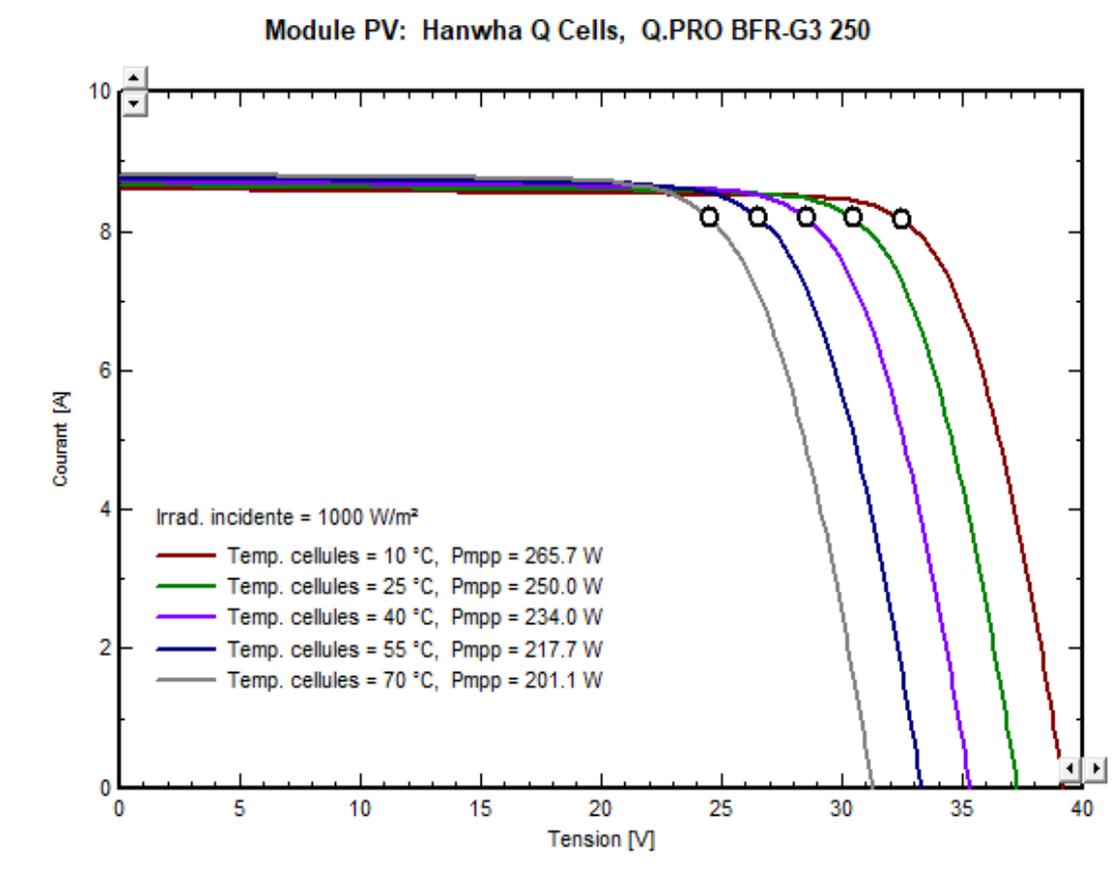


Fig. II. 29: Influence de la température sur la courbe I-V.

La figure II.29 montre l'influence de la température sur la caractéristique I-V d'un module « HanwhaQCells » (26V 250Wc) . Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique I(V). Le courant dépend de la température puisque le courant augmente 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**

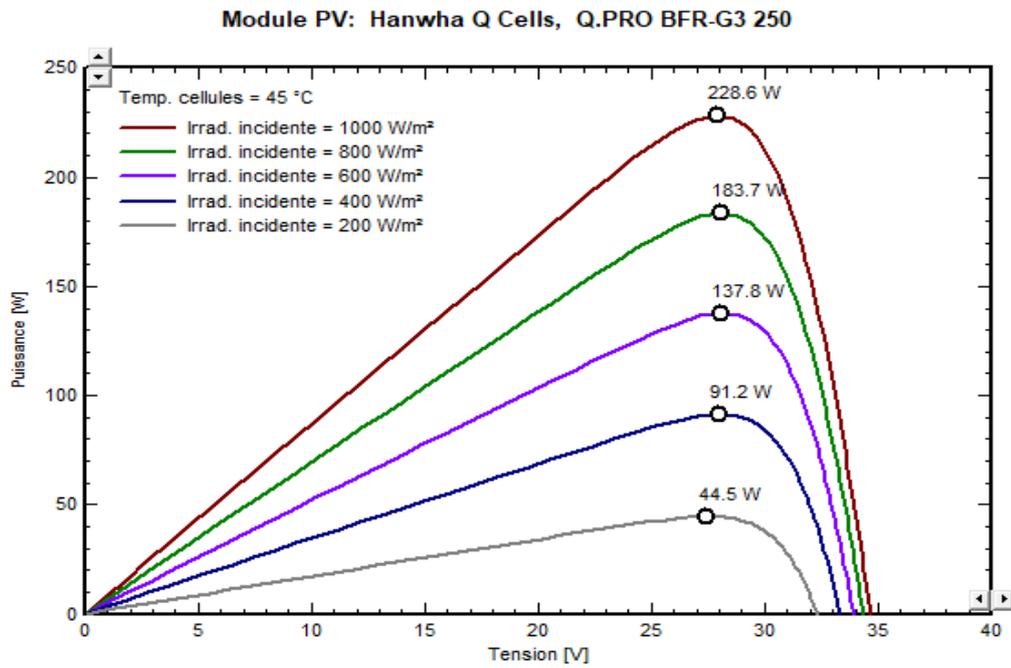


Fig. II. 30: Influence de Température constante sur la courbe P-V.

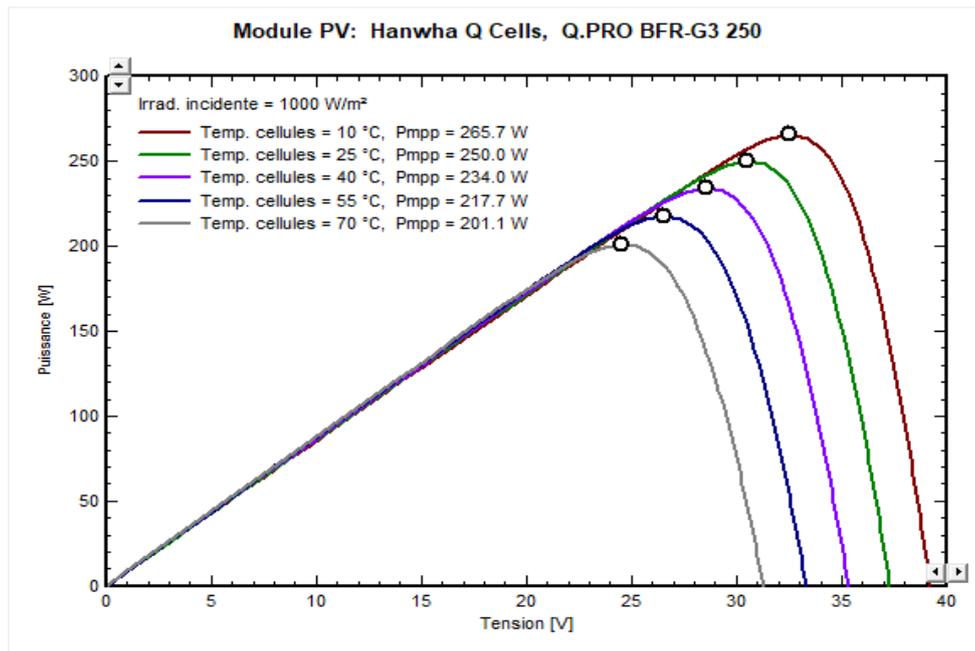


Fig. II. 31: Influence d'ensoleillement constant sur la courbe P-V.

II.6.5 Schéma de l'installation

- On choisit le type de régulateur et l'onduleur.

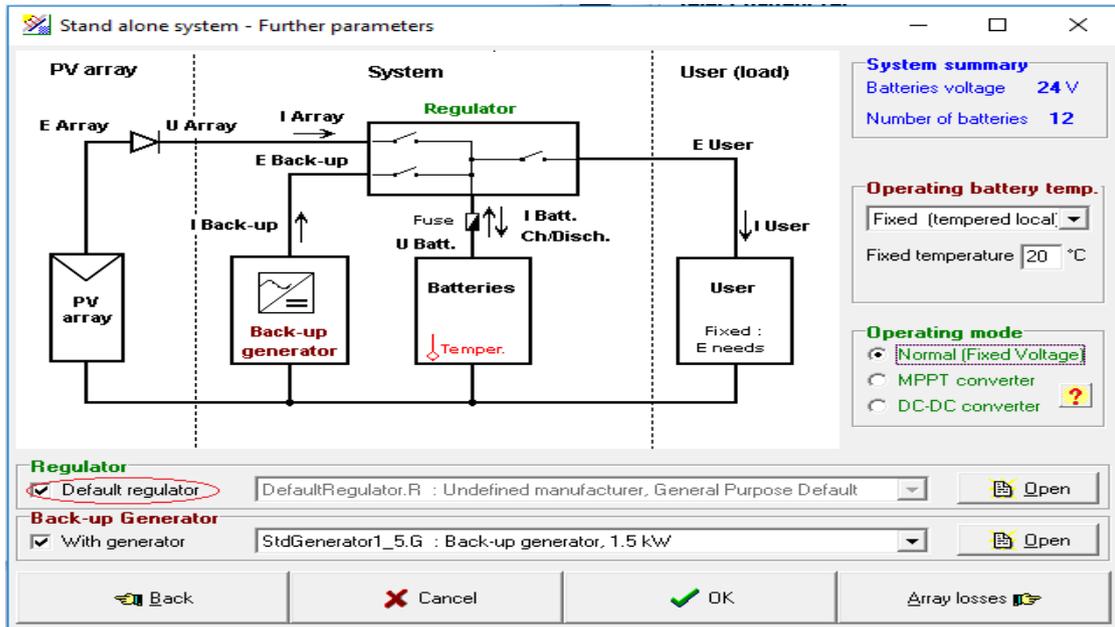


Fig. II. 32: Schéma simplifié du système PV isolé avec batterie.

❖ Seconde tâche : système avec suiveur deux axes

On a utilisé le même système étudié avec le même dimensionnement sauf qu'on a changé le type de champ (voir la figure II.33).

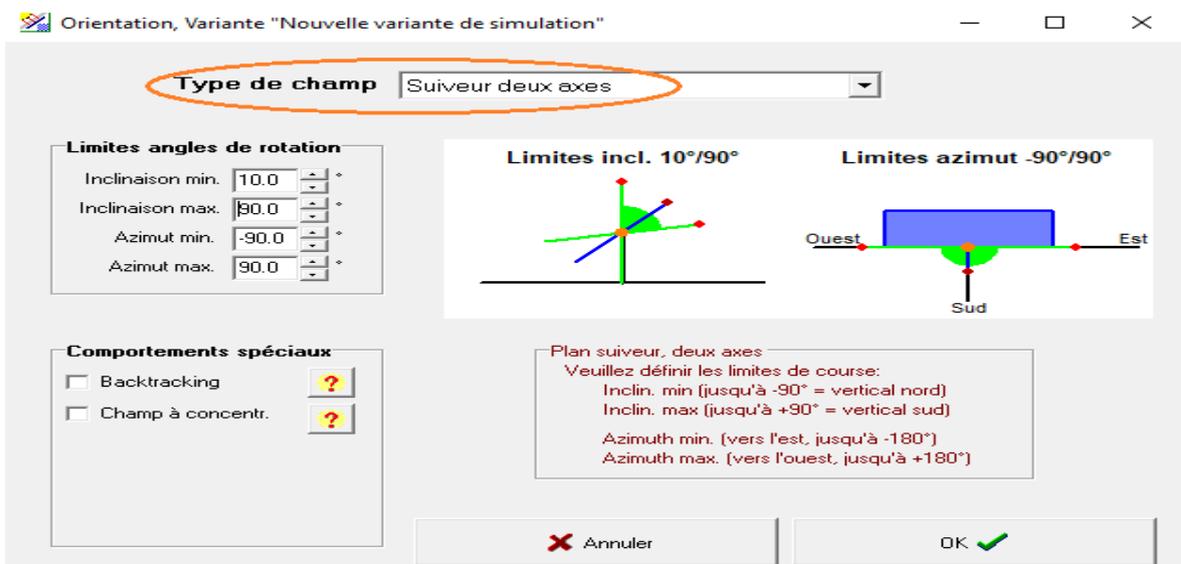


Fig. II. 33: Choix de l'inclinaison du panneau.

II.6.6 Simulation

Une fois que tous les paramètres sont correctement entrés, on clique sur le bouton « simulation », dans la fenêtre qui s'ouvre, on lance la simulation.

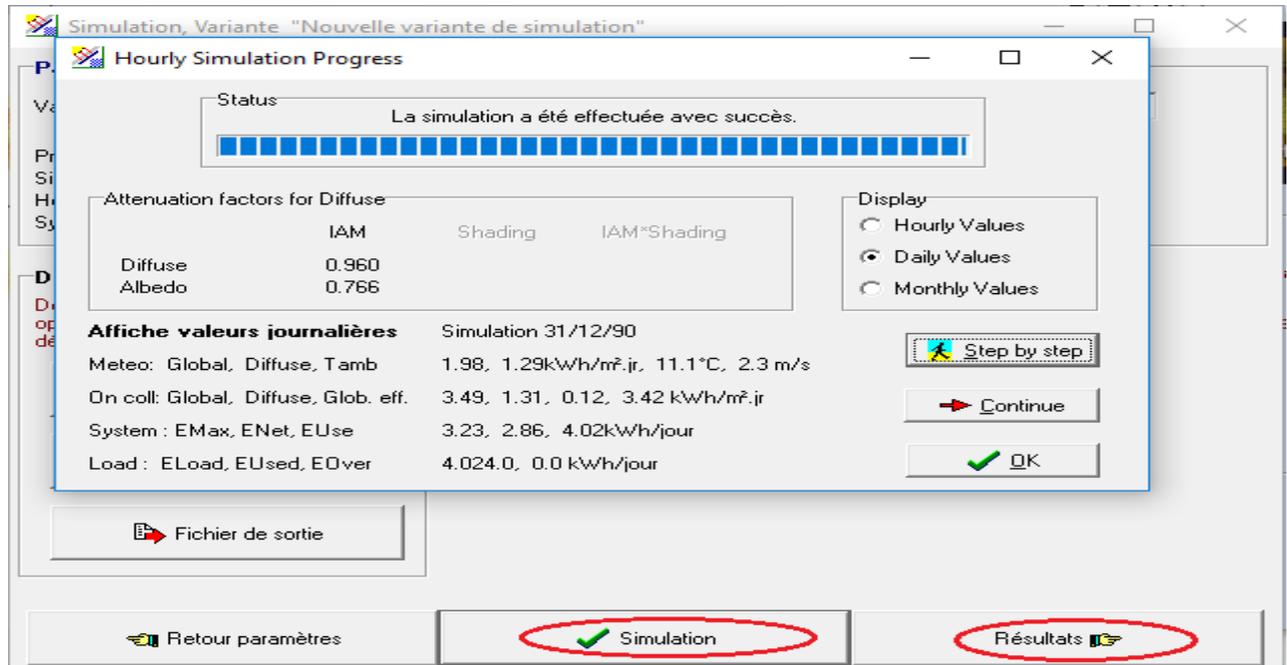


Fig. II. 34: simulation.

Après la simulation, on clique sur « Résultats » pour accéder à toutes les données principales, est à d'autre que nous pouvons définir : graphes, graphes personnalisés, tableau personnalisés, données économique et le rapport au format PDF en appuyant « rapport ».

Tableau. II. 2: paramètres généraux de simulation.

PVSYST V5.74		20/05/19	Page 1/4
Système isolé avec batteries: Paramètres de simulation			
Projet :	PV isolé avec batterie a ain temouchent		
Site géographique	Ain Temouchent	Pays	Algeria
Situation	Latitude 35.3°N	Longitude	1.1°W
Temps défini comme	Temps légal	Fus. horaire TU+1	Altitude 251 m
	Albédo	0.20	
Données météo :	Ain Temouchent, Données horaires synthétiques		
Variante de simulation : Nouvelle variante de simulation			
	Date de la simulation	20/05/19 à 14h42	
Paramètres de simulation			
1^{er} étape :			
Orientation plan capteurs	Inclinaison 32°	Azimut	0°
2^{ém} étape :			
Suiveur à deux axes	Inclin .minimum 0°	Inclin. Maximale	90°
Limites de course	Azimut minimum -90°	Azimut Maximale	90°
Caractéristiques du champ de capteurs			
Module PV	Si-poly	Modèle	Q.PRO BFR-G3 250
		Fabricant	Hanwha Q Cells
Nombre de modules PV	En série	1 modules	En parallèle 4 chaînes
Nombre total de modules PV	Nbre modules	4	Puissance unitaire 250 Wc
Puissance globale du champ	Nominale (STC)	1000 Wc	Aux cond. de fonct. 893 Wc (50°C)
Caractéristiques de fonct. du champ (50°C)	U mpp	27 V	I mpp 33 A
Surface totale	Surface modules	6.7 m²	Surface cellule 5.8 m ²

Facteurs de perte du champ PV

Fact. de pertes thermiques	Uc (const)	20.0 W/m ² K	Uv (vent)	0.0 W/m ² K / m/s
=> Tempér. de fonct. nominale (G=800 W/m ² , Tamb=20°C, Vent=1m/s.)				NOCT 56 °C
Perte ohmique de câblage	Rés. globale champ	14 mOhm	Frac. pertes	1.5 % aux STC
Perte de qualité module			Frac. pertes	0.0 %
Perte de "mismatch" modules			Frac. pertes	4.0 % (tension fixée)
Effet d'incidence, paramétrisation ASHRAE IAM =	1 - bo (1/cos i - Paramètre bo			0.05

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

Batterie	Modèle	6Y10 - Starting		
	Fabricant	Electrona		
Caractéristiques du banc de batteries	Tension	24 V	Capacité nominale	702 Ah
	Nombre d'unités	2 en série x 6 en parallèle		
	Température	Fixée (20°C)		
Régulateur	Modèle	General Purpose Default		
	Technologie	Undefined	Coeff. de temp.	-5.0 mV/°C/elem.
Seuils de régulation batterie	Charge	27.4/26.2 V	Décharge	23.5/25.2 V
	Commande génératrice d'appoint	23.6/25.8 V		
génératrice d'appoint	Modèle	1.5 kW		
	Fabricant	Back-up generator		
	Puissance	2 kW		
Besoins de l'utilisateur :	Consomm. domestique	Constants sur l'année		
	moyenne	4.0 kWh/Jour		

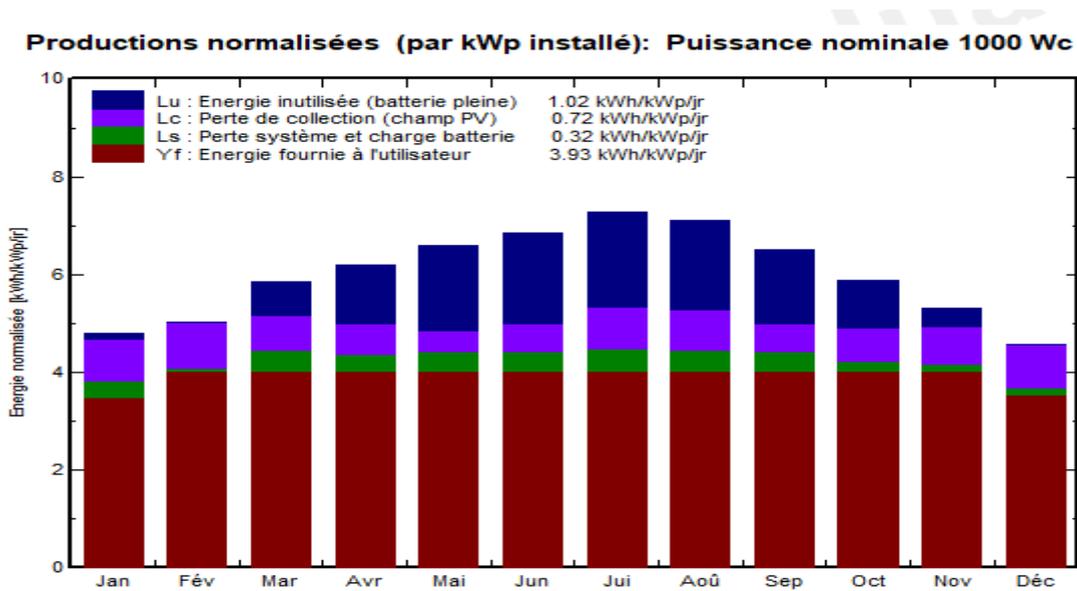


Fig. II. 35: Production normalisées (par KWp installé) sans suiveur.

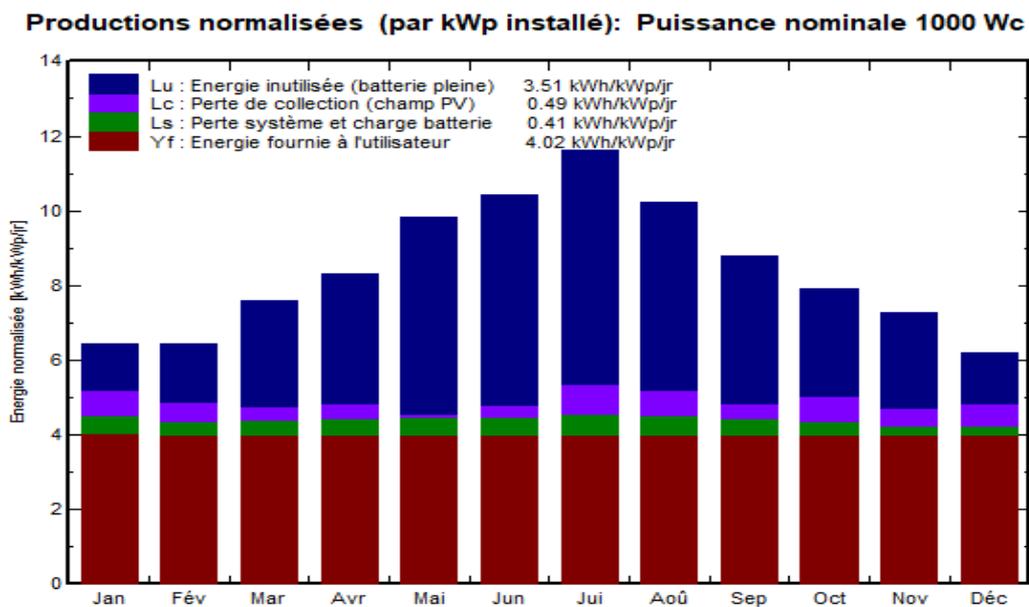


Fig. II. 36: Production normalisées (par KWp installé) avec suiveur.

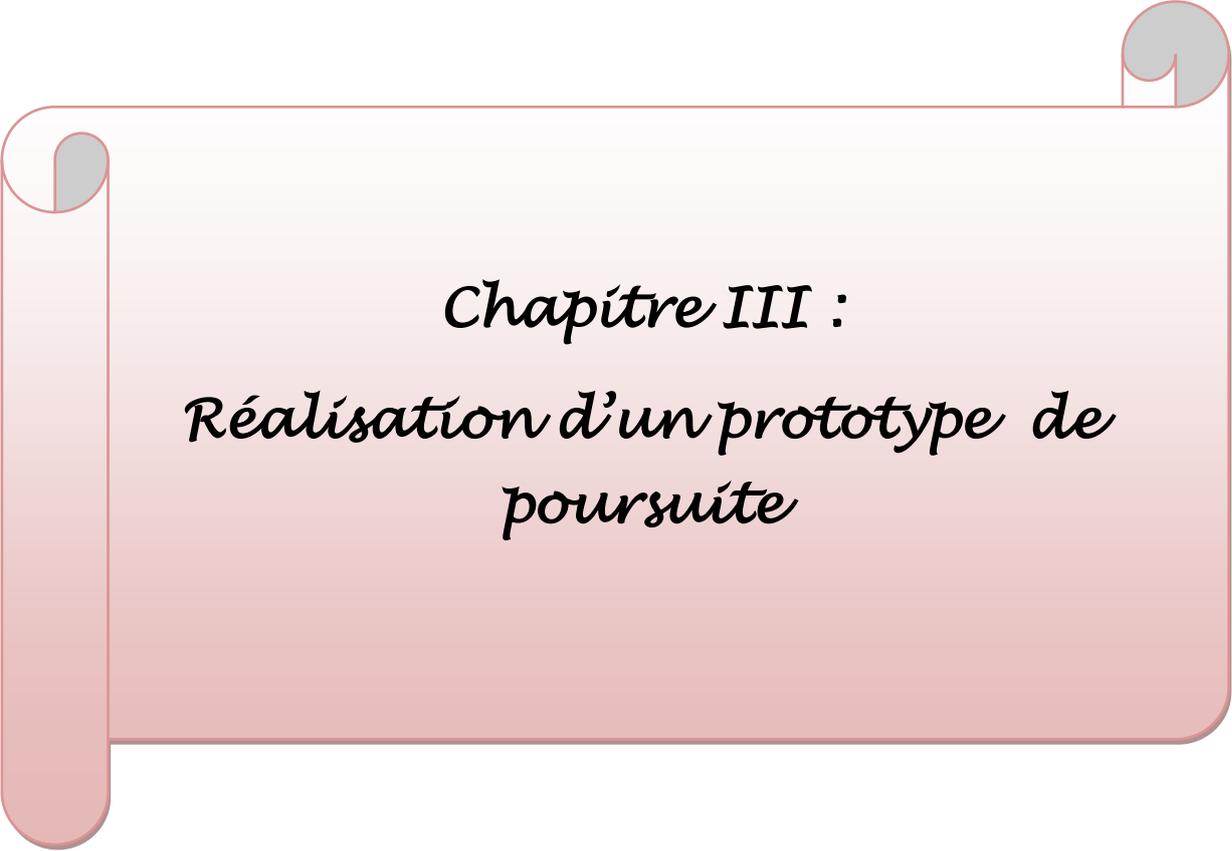
Les figures (II.35 et II.36) montrent la production énergétique annuelle du panneau, On remarque que l'énergie fournie à l'utilisateur reste constante 3.93KWh/jours car c'est le même système utilisé. Par contre l'énergie inutilisée dans le plan suiveur à deux axes est plus grande par rapport à l'énergie inutilisée dans le plan fixe. Les résultats obtenus confirment l'importance d'un système PV avec suiveur solaire.

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait le dimensionnement d'une installation solaire PV autonome avec et sans suiveurs.

Les résultats obtenus valide 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 III :
Réalisation d'un prototype de
poursuite

III.1 Introduction

La production d'électricité par un système photovoltaïque dépend du rayonnement solaire reçu par les panneaux constituant ce système. Ceci a mené les experts de ce domaine à effectuer plusieurs études et recherches pour augmenter le rendement de conversion des panneaux, surtout en leur permettant de recevoir plus de rayonnement en poursuivant, à tout instant, la course du Soleil dans le ciel : on appelle cela technique de suivi solaire (ou système suiveur de Soleil).

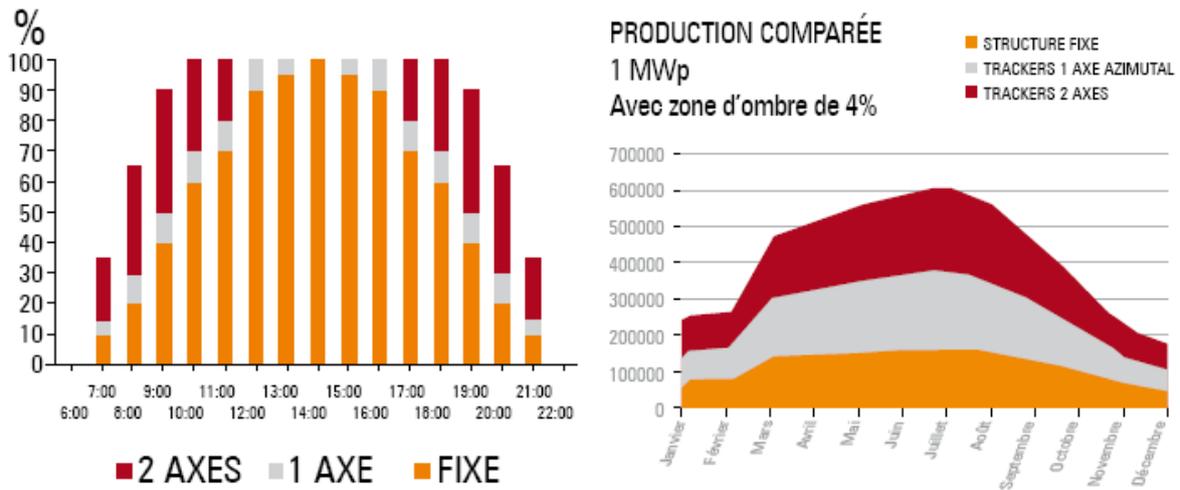
Dans ce chapitre, on présentera une vue d'ensemble du dispositif expérimental que nous avons réalisé «**Suiveur Solaire Bi-axial à Base de capteurs de lumière**». Ce système suiveur est constitué d'une partie mécanique qui sert à supporter le panneau et le diriger vers le rayonnement perpendiculaire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

III.2 Systèmes de suiveur solaire

La puissance et le sens des rayons solaires variant en permanence en raison de la rotation terrestre et de la composition de l'atmosphère. Les cellules des modules photovoltaïques à montage fixe ne peuvent transformer qu'une fraction de l'énergie lumineuse émise par le soleil en énergie électrique. Les SSS ou trackers solaires sont des dispositifs mobiles qui permettent de maintenir l'orientation des modules photovoltaïques vers le soleil. Ainsi, l'angle d'incidence reste constant, et l'intensité de la lumière et par conséquent de l'énergie, reste stable. Cela permet non seulement d'exploiter efficacement les heures d'ensoleillement, mais aussi de tirer parti de la lumière diffuse, ce qui se traduit par un sur plus d'énergie solaire de 25 à 50% et une meilleure rentabilité économique ainsi qu'un amortissement plus rapide des coûts d'acquisition.(9)

Le diagramme comparatif de production électrique (Figure III.1) montre pour une journée en soleillée d'été, le gain de production électrique obtenu en passant d'une installation fixe à une installation équipée d'un suiveur de trajectoire solaire. Les principales caractéristiques différenciant les suiveurs sont les suivantes :

- Le gain en production électrique (par rapport à des panneaux solaires fixes).
- L'orientation mono ou multi axiale.
- La précision du positionnement vis-à-vis du soleil (type d'asservissement).
- La robustesse (tenue au vent) et la fiabilité.
- Le coût.



III.3 Les différents systèmes de suiveur solaire

Le rendement des panneaux solaires peut être amélioré en suivant deux logiques. La première consiste à suivre l'azimut (c'est-à-dire la course du soleil), les panneaux doivent donc suivre le soleil d'Est en Ouest. La deuxième consiste à améliorer l'incidence des rayons solaires en ajustant la hauteur des panneaux. L'incidence des rayons solaires dépend des saisons (en hiver le soleil est en moyenne plus bas qu'en été) et de l'heure de la journée. Les différents types de suiveurs (Figure III.2)(9) rencontrés sur le marché sont les suivants :

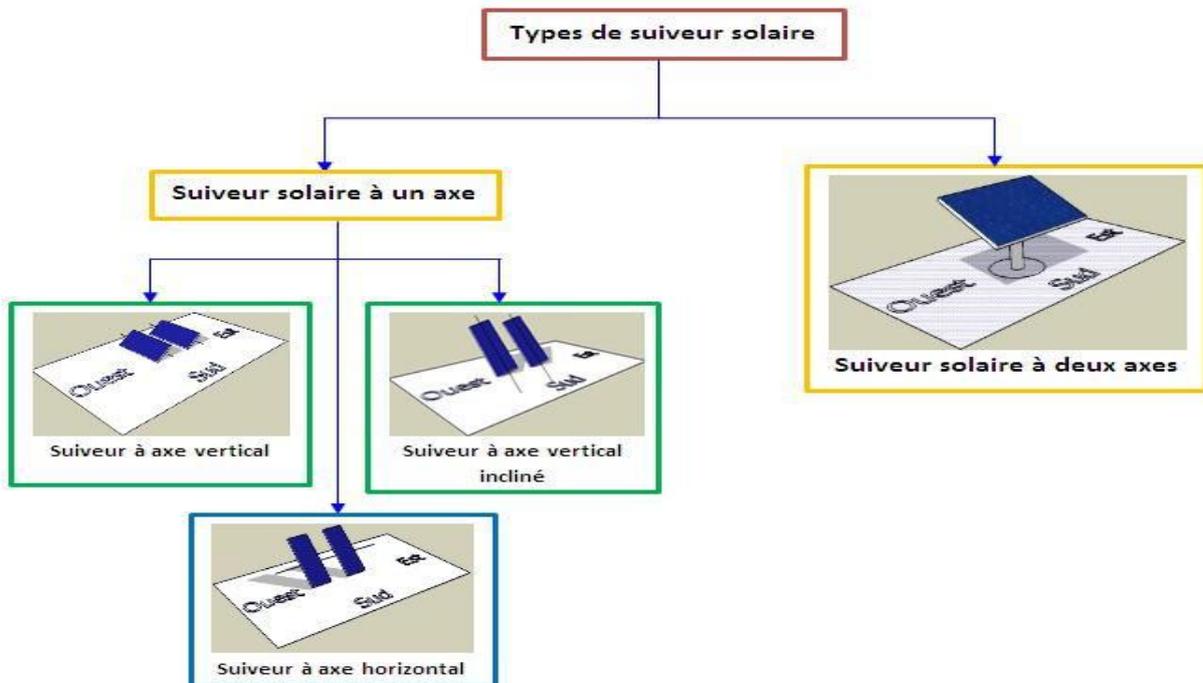


Fig. III. 2: Les différents types des suiveurs solaires.

III.3.1 Suiveur à axe horizontal

Ce type de suiveur n'apporte que très peu de gain par rapport à un système fixe. Il est plus intéressant d'utiliser des suiveurs à un axe vertical. En revanche, sa conception est la plus simple de l'ensemble des suiveurs et peut ne pas entraîner une diminution trop significative du GCR si ce type de suiveur est équipé d'un organe de régulation appelé back tracking, qui empêche d'incliner davantage les modules dès que les ranges se font mutuellement de l'ombre. Sans back tracking, en conservant un GCR de 45%, il faudrait un suiveur permettant une plage d'inclinaison allant de 10 à 30° pour obtenir la meilleure solution. Cependant, le gain resterait assez faible : de l'ordre de 2,2% (ce gain ne compense pas le surcoût).(9)

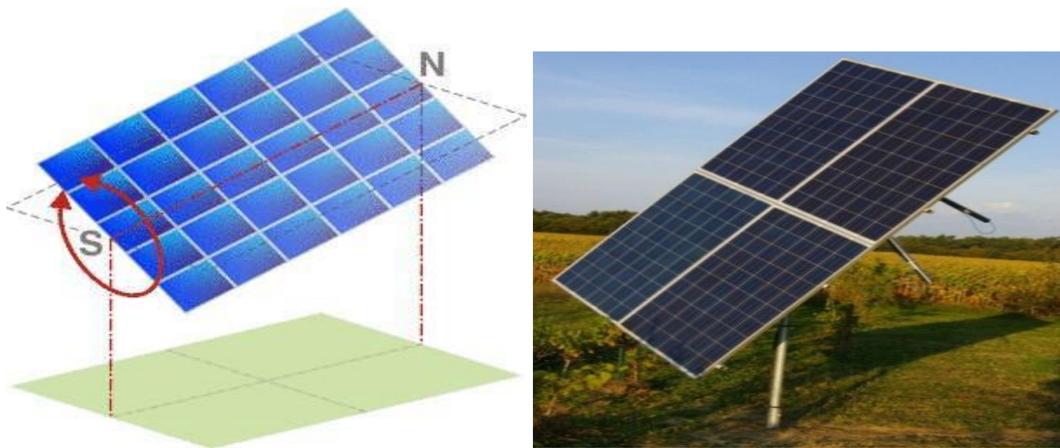


Fig. III. 3: Suiveur à axe horizontal.

III.3.2 Suiveur à axe vertical incliné

Ce type de suiveur permet un gain d'environ 20% pour un GCR de 25%. Il est souvent moins imposant que les suiveurs à 2 axes, moins coûteux et permet d'installer plus de puissance sur un terrain donné comparé aux 2 axes.

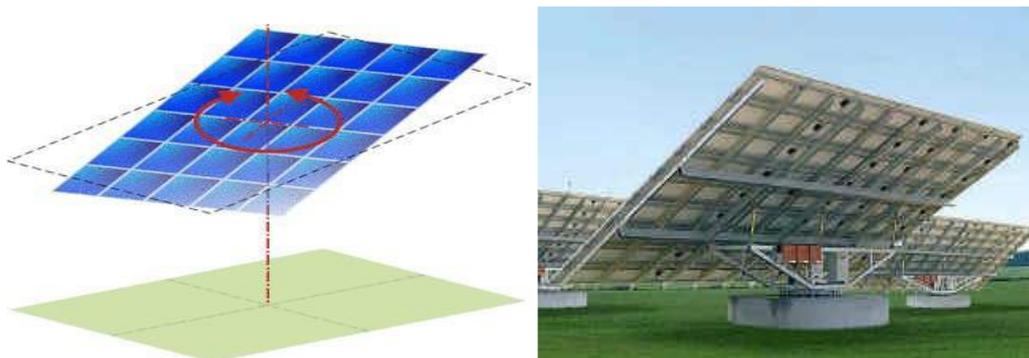


Fig. III. 4: Suiveur à 1axe vertical incliné.

III.3.3 Suiveur à deux axes

Les suiveurs à deux axes permettent un gain d'environ 30% pour un GCR d'environ 10%. Ce type de suiveur est très imposant et visible de loin.



Fig. III. 5: Suiveur à deux axes ADES : modèle 5F-27 M.

III.4 Le principe du tracker solaire avec Arduino

Notre réalisation d'un tracker solaire avec Arduino se base principalement sur un automate capable de suivre une source lumineuse en s'orientant de façon optimale en direction des rayons lumineux.

Les mouvements de rotations se produisant selon deux axes (vertical et horizontal) nous utilisons donc deux moteurs commandés par notre carte Arduino (le microcontrôleur).

La méthode utilisée est comparable à celle de l'asservissement. Notre panneau solaire est équipé de quatre capteurs photosensibles et il s'oriente en fonction de la luminosité reçue par chaque capteur. Notre programme compare la luminosité reçue par chaque capteur et ajuste la position si une différence est détectée. Par exemple, si les capteurs du haut reçoivent plus de lumière que ceux du bas, le programme va détecter cette différence et va orienter le panneau vers le haut pour compenser. Ce sera le même principe pour la gauche et la droite.

La programmation de la carte Arduino a été nécessaire pour que le montage puisse fonctionner sans connexion avec l'ordinateur, le code étant enregistré sur la carte Arduino.

Enfin nous avons fabriqué aussi une carte électronique, que nous utilisons comme support, ainsi nous n'avons pas besoin de câblage, les panneaux photovoltaïques et les capteurs sont directement montés sur cette carte électronique et le microcontrôleur Arduino se trouve en dessous de cette dernière.

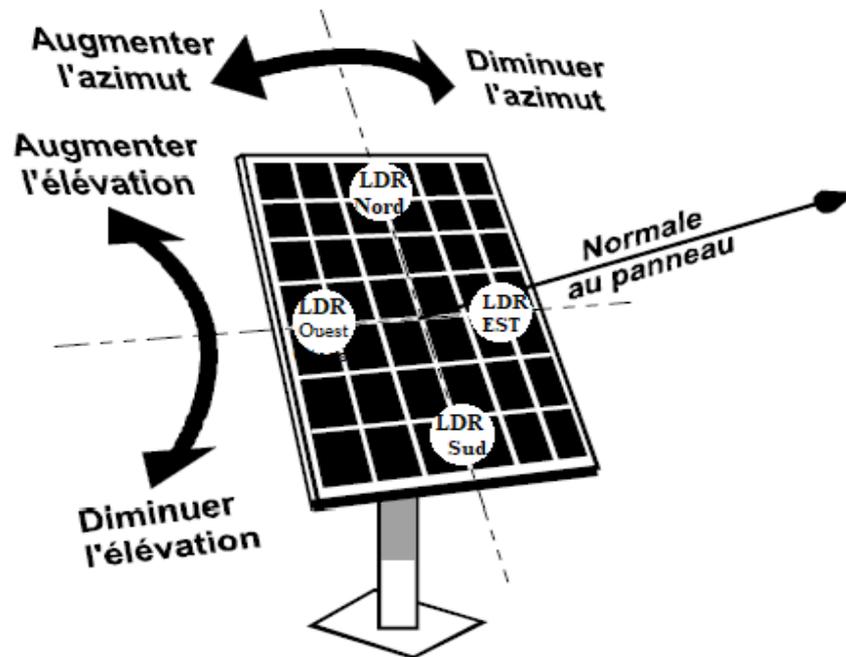


Fig. III. 6: fonctionnement d'un Tracker solaire à système bi-axial.

Dans la Figure précédente, supposant 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.

▪ Réalisation de l'organigramme

Avant de passer à la programmation, nous devons réaliser un organigramme qui explique le déroulement des différentes séquences, tant intérieures qu'extérieures (Figure (III.7)).

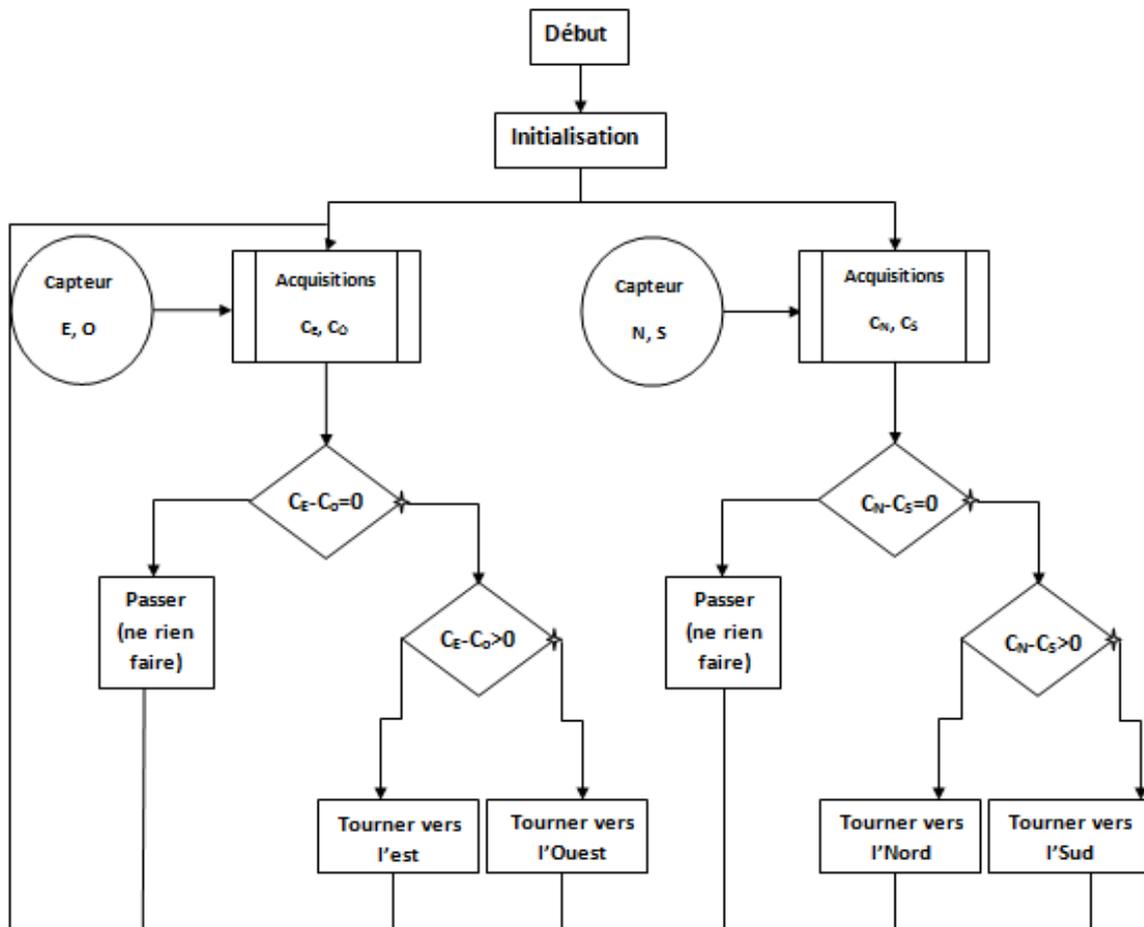


Fig. III. 7: l'organigramme principal.

III.5 Introduction du Mécanisme

Il existe deux principaux mécanismes de suivi :

III.5.1 Partie mécanique

Ce système suiveur est constitué d'une partie mécanique qui sert à supporter le panneau et le diriger vers le rayonnement perpendiculaire du soleil.

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

Un servomoteur pour l'orientation en azimut et l'autre pour l'orientation en hauteur.

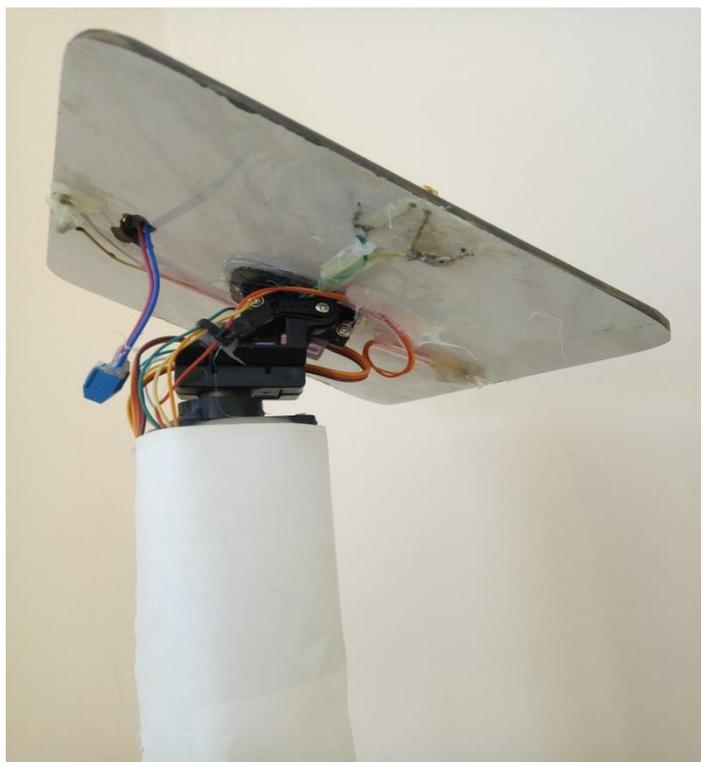


Fig. III. 8: Aperçu général du système.

III.5.2 partie électrique

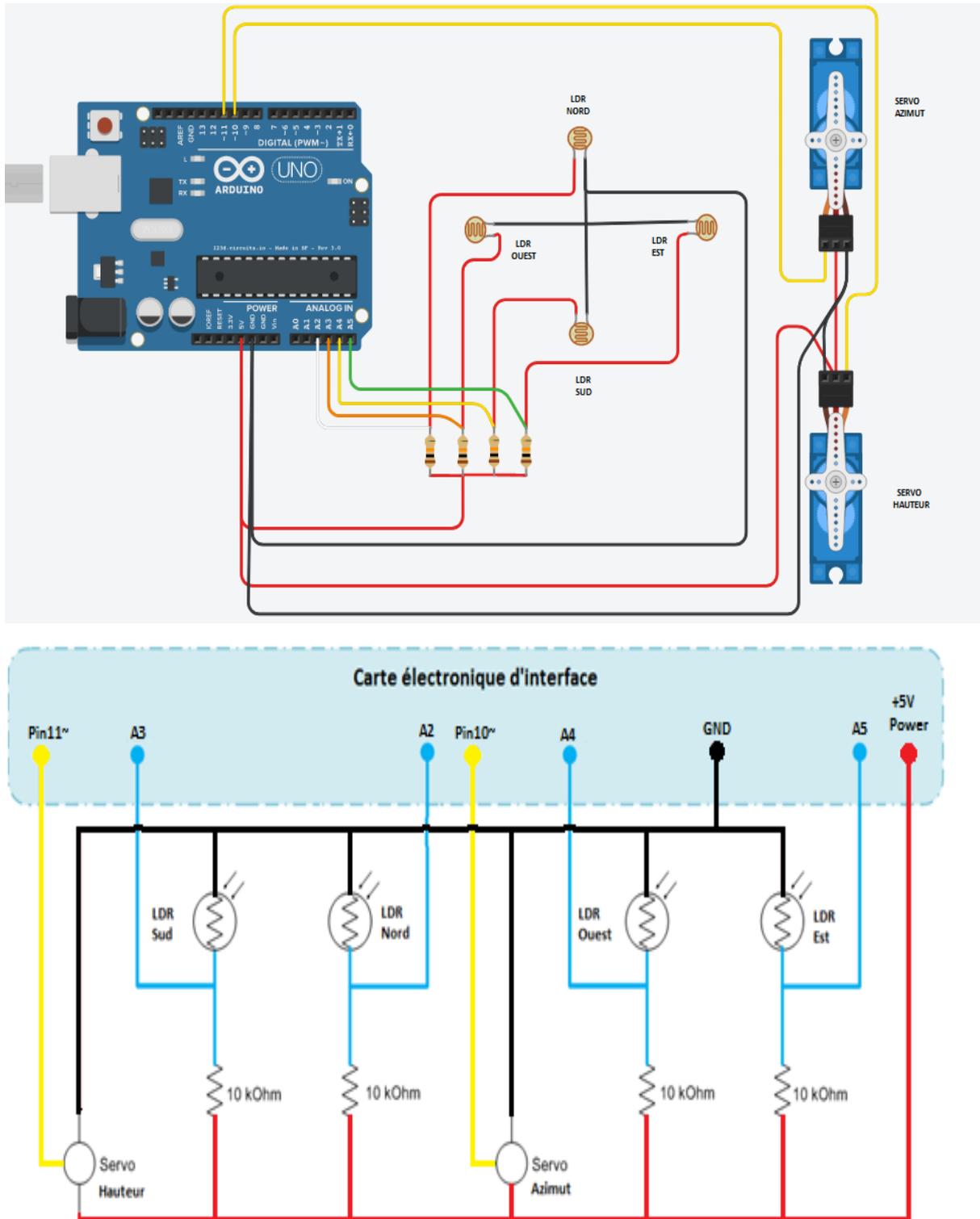


Fig. III. 9: Circuit électrique du suiveur proposé.

III.5.2 .1 Composants du prototype du tracker

Les composants sont des éléments de base en électronique qui, une fois assemblés, constitueront un circuit électronique.

a) Photorésistance (LDR)

C'est un composant dont la valeur en Ohms dépend de la lumière à laquelle elle est exposée []. En effet, sa résistance varie en fonction du flux lumineux incident, elle est inversement proportionnelle à la lumière reçue. Le choix s'est porté sur cette dernière vu que son temps de réponse est beaucoup plus court par rapport à la photodiode.

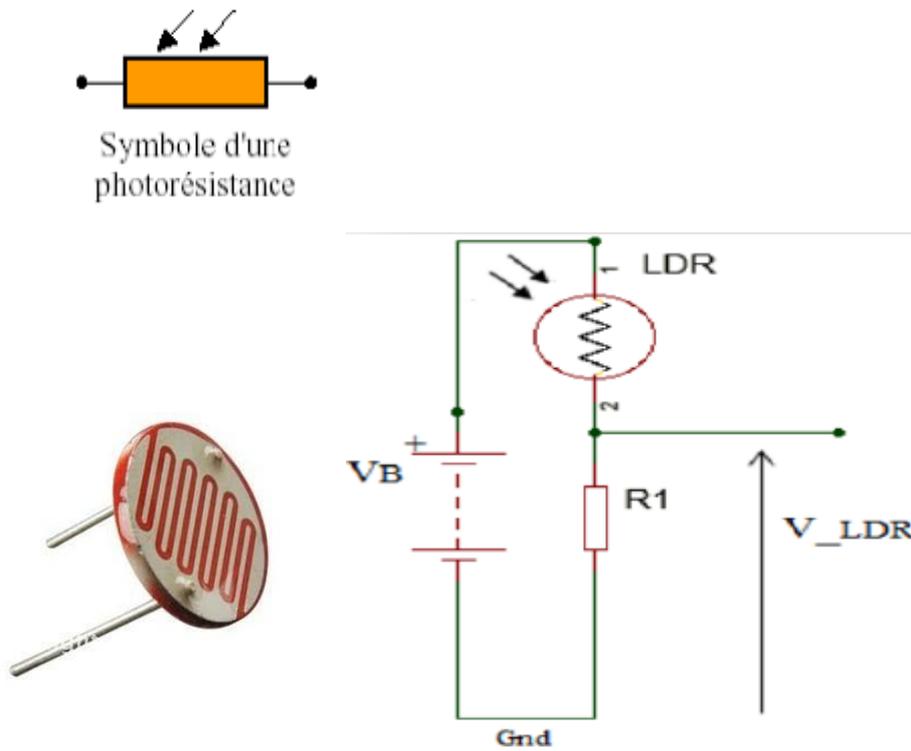


Fig. III. 10:Photorésistance LDR.Fig. III. 11:Circuit équivalent du capteur LDR.

La tension délivrée par le capteur est donnée par la relation:

$$V\text{-LDR} = \frac{V_b \times R1}{R\text{-LDR} + R1} \dots\dots\dots (III.1)$$

où : VB : tension batterie (V)

R-LDR : résistance de la LDR (Ω)

b) Resistance

Une résistance fait opposition au passage d'un courant et permet donc de réduire l'intensité de ce courant dans un circuit électrique. L'unité de mesure d'une résistance est l'ohm.

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. III. 1: Décodeur du marquage de couleurs des résistances.

Couleur	Bande n°1	Bande n°2	Bande n°3	Multiplieur	Tolérance
Noir	0	0	0	1Ω	
Marron	1	1	1	10 Ω	±1%
Rouge	2	2	2	100 Ω	±2%
Orange	3	3	3	1KΩ	
Jaune	4	4	4	10KΩ	
Vert	5	5	5	100KΩ	±0.5%
Blue	6	6	6	1MΩ	±0.25%
Violet	7	7	7	10MΩ	±0.10%
Gris	8	8	8	100MΩ	±0.05%
Blanc	9	9	9	1GΩ	
Or				0.1Ω	±5%
Argent				0.01Ω	±10%



Fig. III. 12: Résistance de 10 KΩ.

c) Servomoteur

Les servomoteurs sont des actionneurs très utilisés en modélisme et dans l'industrie, ils ont comme caractéristique principale leur « couple », c'est-à-dire la force de rotation qu'ils

peuvent exercer. Plus un servomoteur aura de couple est plus et pourra actionner des « membres » lourds comme déplacer un bras qui porte une charge.

Pour la robotique de loisirs, les servomoteurs ont en général peu de couple et sont de taille réduite, bien adapté à un encombrement minimal et à une énergie disponible limitée.

Les servomoteurs sont pilotés par un fil de commande et alimentés par deux autres fils.

Habituellement, ces trois fils sont rassemblés dans une prise au format standard.

Un fil rouge est relié à l'alimentation positive (+5 ou +6 selon le servo), le fil noir est relié à la masse (GND) et le fil jaune est utilisé pour la commande.

Il y aurait beaucoup à dire sur le fonctionnement d'un servomoteur, ses composants, son moteur et le petit potentiomètre qui permet de connaître sa position mais cette fiche va droit au but et se limitera à son utilisation avec l'Arduino. [ms.tel]



Fig. III. 13: Servomoteur .

Un servomoteur est principalement caractérisé par :

- Sa vitesse de rotation pour aller à la position désirée en rad/s.
- 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 définit 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.

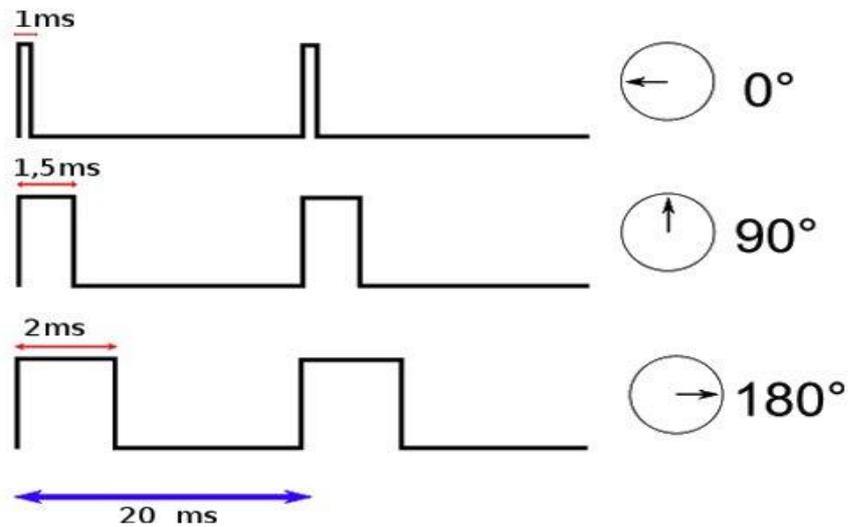


Fig. III. 14: Technique de commande d'un servomoteur.

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.

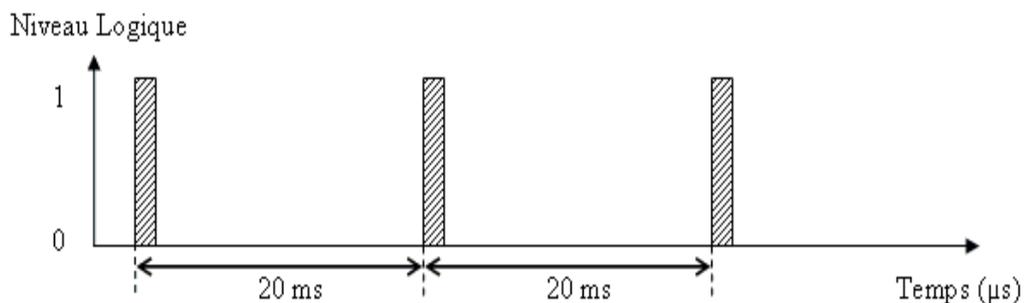


Fig. III. 15: MLI pour Servomoteur.

d) platine d'essai (breadboard)

Une platine d'essai est un support qui comporte des petits trous dans lesquels nous pouvons positionner nos composants ainsi que des fils qui nous permettront de réaliser notre circuit électrique. À l'intérieur de notre platine, il faut imaginer qu'il y a des chemins déjà existants que nous pouvons voir dans le dessin ci-dessous.



Fig. III. 16: une platine d'essais (breadboard).

Les caractéristiques du servomoteur utilisé :

- Type : TowerPro MG90S
- Dimensions : $22.8 \times 12.2 \times 28.5$ mm
- Poids : 13.4 g
- Vitesse : 0.10 sec /60° sous 4.8 v – 0.08 sec/60° sous 6v
- Couple de blocage : 1.8 kg/cm sous 4.8 v- 2.2 kg sous 6v
- Tension : 4.8 v – 6 v
- Pignons métalliques

e) La carte Arduino

L'Arduino est une carte électronique en Matériel Libre pour la création artistique interactive.

Elle peut servir:

- 1/ pour des dispositifs interactifs autonomes simples.
- 2/ comme interface entre capteurs/actionneurs et ordinateur.
- 3/ comme programmeur de certains microcontrôleurs.

La carte Arduino qu'on l'a utilisé c'est bien « ArduinoUno » (voir figure III.17), C'est la première version stable des cartes Arduino. Elle possède toutes les fonctionnalités d'un microcontrôleur classique en plus de sa simplicité d'utilisation. Elle utilise une puce ATmega328 [F2017].

Le système Arduino est composé de deux choses principales : le matériel et le logiciel.

Le matériel

Il s'agit d'une carte électronique basée autour d'un microcontrôleur Atmega du fabricant Atmel, dont le prix est relativement bas pour l'étendue possible des applications.

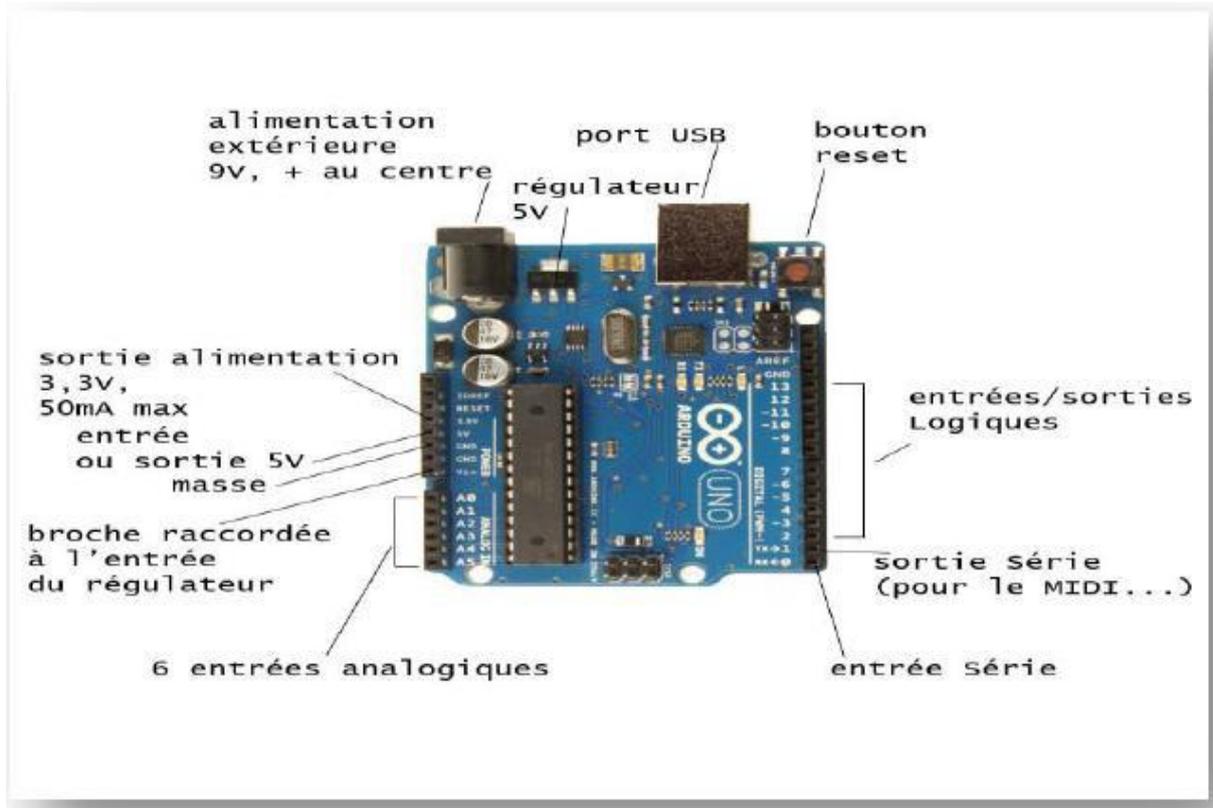


Fig. III. 17: La Carte ArduinoUno .

Le logiciel

Le logiciel permet de programmer la carte Arduino. Il offre une multitude de fonctionnalités.

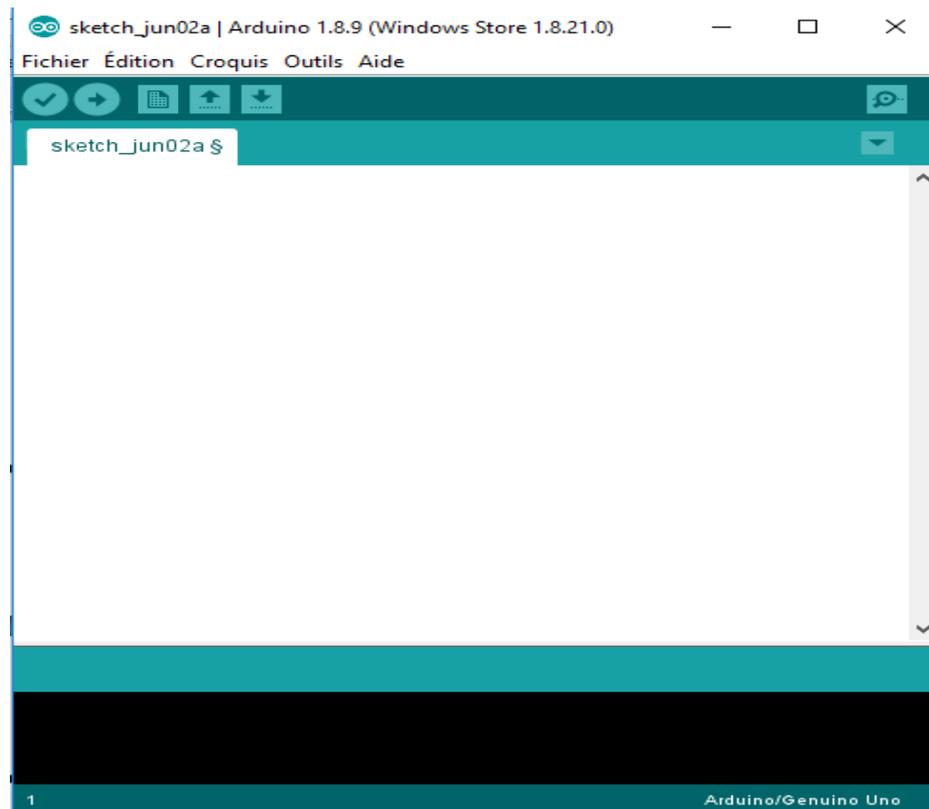


Fig. III. 18: la fenêtre principale de logiciel.

➤ **Caractéristiques de la carte ArduinoUno**

- Microcontrôleur : ATmega328 (ATMEL de la famille AVR 8bits).
- Tension de fonctionnement : 5V.
- Tension d'alimentation (recommandée) : 7-12V.
- Tension d'alimentation (limites) : 6-20V.
- Broches E/S numériques : 14 (dont 6 disposent d'une sortie PWM).
- Broches d'entrées analogiques : 6 (utilisables en broches E/S numériques).
- Intensité maxi disponible par broche E/S (5V) : 40 mA (200mA cumulé pour l'ensemble des broches E/S).
- Intensité maxi disponible pour la sortie 3.3V 50 Ma.
- Intensité maxi disponible pour la sortie 5V Fonction de l'alimentation utilisée - 500 mAmA si port USB utilisé seul.
- Mémoire Programme Flash : 32 KB (ATmega328) dont 0.5 KB sont utilisés par le bootloader.
- Mémoire SRAM (mémoire volatile) : 2 KB (ATmega328).
- Mémoire EEPROM (mémoire non volatile) : 1 KB (ATmega328).

- Vitesse d'horloge : 16 MHz.

➤ **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 sur-tension en chaleur).. Il ne faut pas brancher sur le 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 :

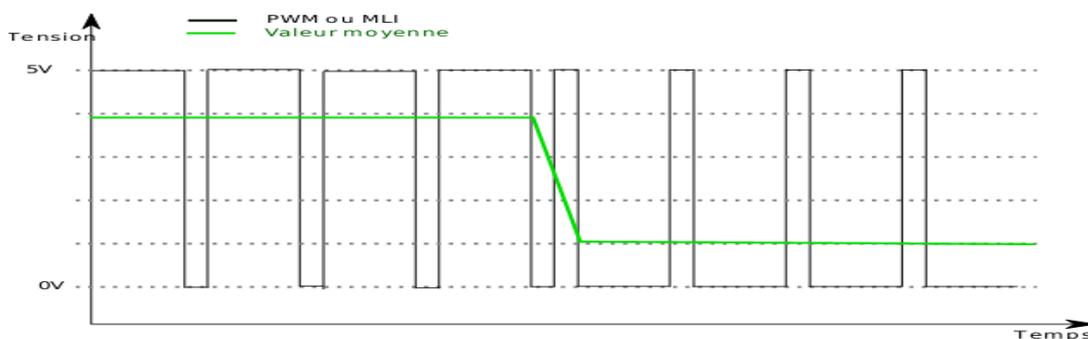


Fig. III. 19: Modulation de largeur d'impulsion ou PWM.

➤ **Les avantages de la carte ArduinoUno**

- Pas cher.
- Environnement de programmation clair et simple.
- Multiplateforme : tourne sous Windows, Macintosh et Linux.
- Nombreuses bibliothèques disponibles avec diverses fonctions implémentées.
- Logiciel et matériel open source et extensible.

f) **câble USB**

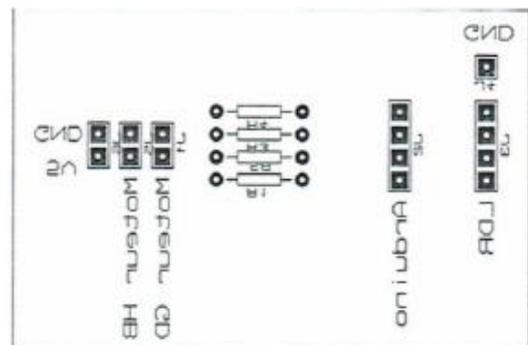
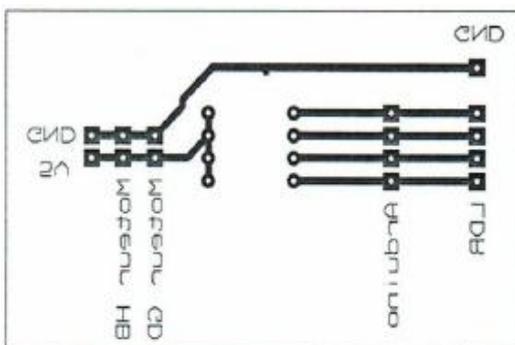


Fig. III. 20: Cable USB type A/B (ArduinoUNO).

Le câble USB permet à la fois d'alimenter un projet Arduino, de programmer la carte (via Arduino IDE) mais aussi d'utiliser le Moniteur Série [BZ].

g) **Circuit imprimé**

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



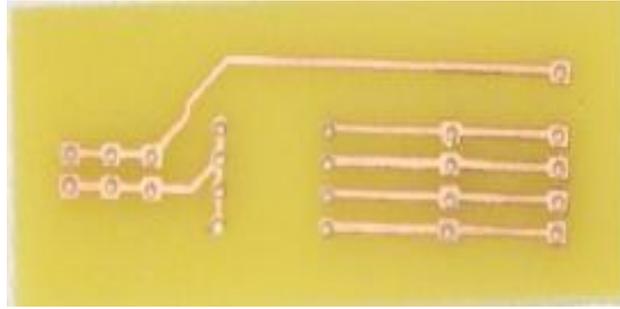


Fig. III. 21: schéma de circuit imprimé.

III.6 Programmation

```

/*
  Trackeur solaire à deux axes
  Auteur: Haddou Azzeddine & Kebir Amina
  Encadreur: Dr. Fliti Med
  Date: 2018/2019
  Matériels utilisés:
  4x Résistance 10 Kohm
  4x LDR
  2x Servomoturs MG90S
  1x Carte Arduino UNO
  */
#include <Servo.h>
  Servo servoHB, servoGD;
int capH=2 ;           //Capteur Haut (nord)
int capB=3 ;           //Capteur Bas (Sud)
int lumH=0 ;           //La valeur du capteur haut
int lumB=0 ;           //La valeur du capteur bas
int posHB=0;           //La position du Servo Hauteur
int moyHB=0;           //La moyenne des capteur haut bas
int capG=4 ;           //Capteur Gauche (Est)
int capD=5 ;           //Capteur droite (Ouest)
  
```

Compilation terminée.

Fig. III. 22: Une fenêtre du programme élaboré.

III.7 L'essai du système

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 dans les quatre sens (est-ouest-nord et sud). Notre suiveur n'a pas été testé pour l'ensoleillement solaire.

III.8 Control via Matlab- Simulink

En second lieu, nous développons des blocs Simulink qui assurent les fonctions suivantes: acquérir, traiter et afficher les données depuis la carte ArduinoUno. En effet, à partir de la version 2013a de Matlab, la carte Arduino UNO ainsi qu'Arduino MEGA peuvent être installées automatiquement on peut accéder à plusieurs ressources à ce sujet. L'installation se fait en exécutant tout simplement la commande `>> target installer` et suivre les étapes, de préférence il faut choisir l'installation en ligne. À partir de cette étape, la carte ArduinoUno est reconnue sous Matlab/Simulink et une librairie contenant des blocs spécifiques est installée automatiquement sous Simulink comme l'indique la figure 3.18. Les blocs Simulink installés peuvent être utilisés avec les autres pour réaliser une multitude d'applications telles que :

- Exploitation des entrées/sorties digitales ou analogiques .
- Commande PWM.
- Commander directement des servomoteurs.
- Communiquer en utilisant la liaison série (via le convertisseur USB/Série).
- Commande de systèmes (Asservissement, automatisation, etc.).

Une fois que le programme de l'acquisition et du traitement des entrées est testé sous Simulink, nous entamons la dernière phase qui est la compilation du programme directement de Simulink vers la carte Arduino UNO, cette dernière peut fonctionner, maintenant, d'une façon autonome.

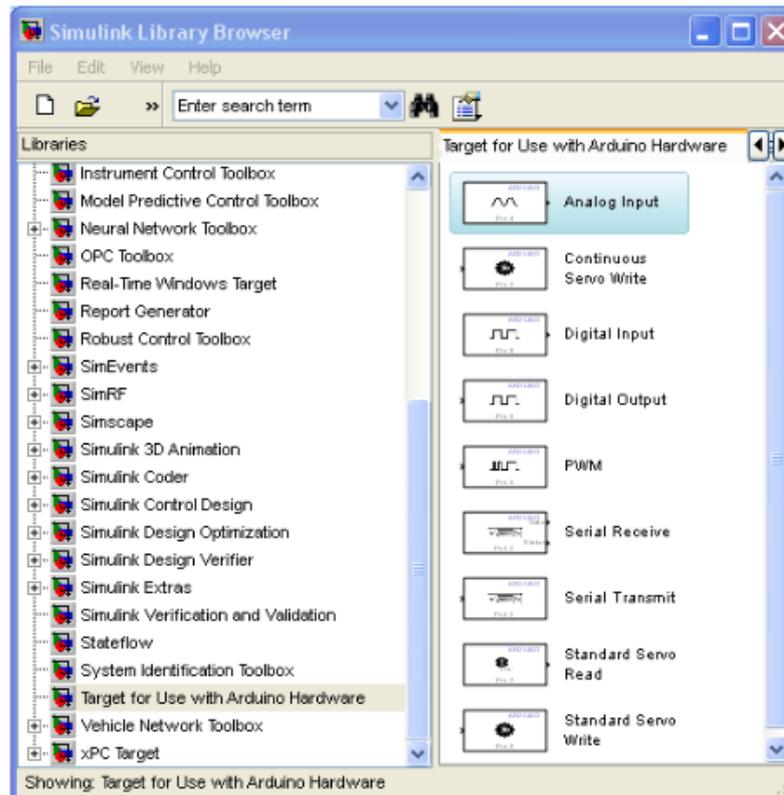


Fig. III. 23: liste des blocs après l'installation de la carte ArduinoUno.

III.8.1. Développement et test du programme sous Simulink

Dans cette partie, nous allons développer et tester, sous Simulink, le programme qui va traiter les données transmises à partir de la carte Arduino UNO. La figure III.24 montre la chaîne d'acquisition qui regroupe le panneau solaire, la carte Arduino UNO configurée en carte d'acquisition.

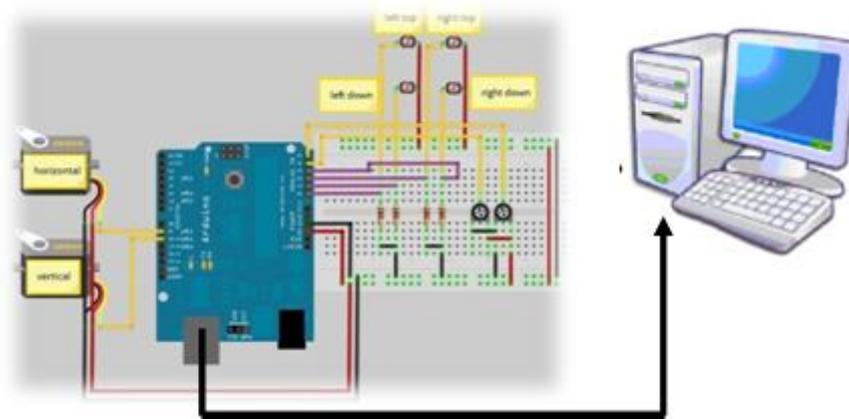


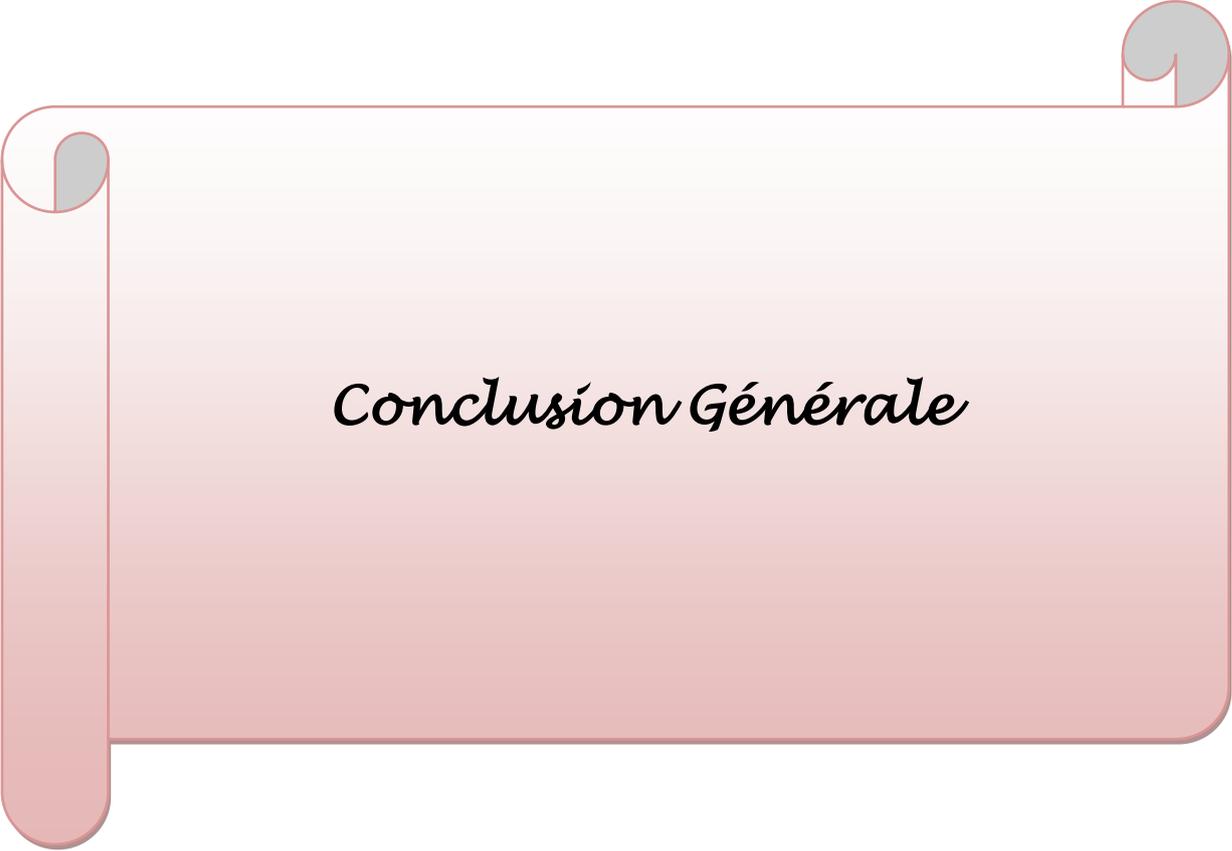
Fig. III. 24: configuration de la chaîne d'acquisition.

III.9 Conclusion

Ce troisième et dernier chapitre fût consacré au montage et l'installation de notre système de suivi solaire. En présentant les différents éléments qui le constituent. En effet, grâce à la carte Arduino, et au programme de commande que nous avons élaboré, sans oublier les capteurs de lumières.

Le rôle de notre système de poursuite consiste à contrôler le mouvement du suiveur de soleil toute la journée. L'importance de ce système est de capter le maximum de rayonnement solaire (un bon rendement).

Dans la deuxième partie, nous avons présenté une nouvelle approche de control, nous avons fait appel à Arduino une plateforme matérielle très répandue et Matlab/Simulink un programme de modélisation/simulation professionnel bien connu. Avec une carte Arduino, il est intéressant d'exploiter les performances de l'environnement Matlab/Simulink, pour ce faire, il suffit de faire appel à des exemples réels basés sur la simulation, expliquer les contraintes sur le plan pratique à travers la connectivité au matériel didactique à bas coût et exécuter des lois de commande sur un microcontrôleur. L'exemple pratique qui a été présenté dans cette partie, est considéré d'une part, comme étant un didacticiel permettant la mise en œuvre de cette nouvelle technologie et, d'autre part, un point de départ d'une série de prototypes pédagogiques pluridisciplinaires à échelonner sur d'autre projet réalisable.



Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

La réalisation de ce projet de fin d'étude est un grand bénéfice pour nous dans plusieurs aspects, il nous a permis d'enrichir et améliorer nos connaissances en énergie photovoltaïque, la nature du domaine traité et le projet a réalisé sont conformes à notre parcours de master (Commande électrique), ce qui nous a encouragé à travailler sérieusement d'un côté afin d'atteindre les objectifs fixés pour ce projet, et d'un autre pour développer et améliorer nos connaissances d'électricité, électronique, informatique et de mécanique.

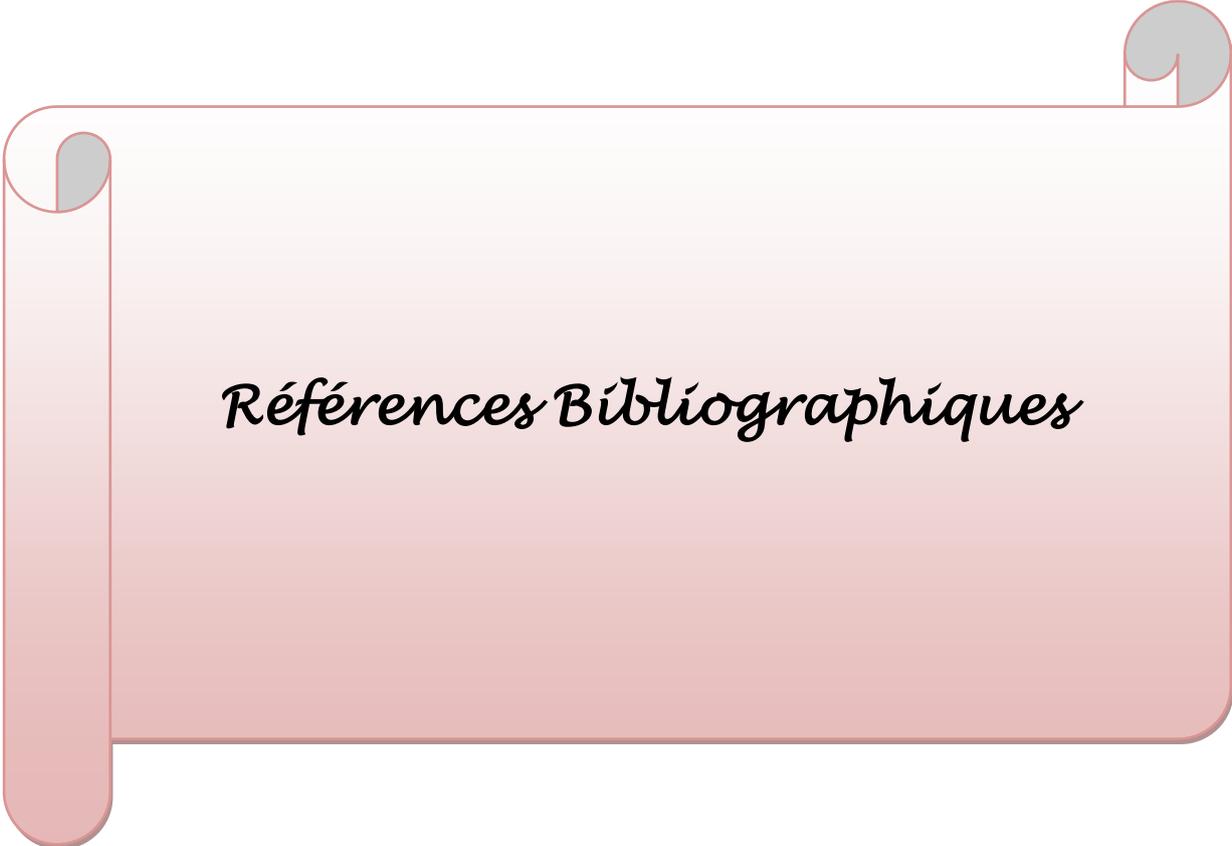
L'objectif de ce modeste travail est l'étude du système de poursuite dans les panneaux photovoltaïques. Ce travail est consacré à l'étude et l'optimisation d'un système de poursuite solaire photovoltaïque dans notre site (d'Ain temouchent), Notre solution consiste en l'utilisation de quatre capteurs de lumière (LDR) placés selon une géométrie bien précise sur le support des panneaux PV à l'aide des composants électroniques programmable gérés par un microcontrôleur (arduino). Il a pour but d'améliorer le rendement et la puissance du panneau photovoltaïque (PV).

Dans notre étude et simulation nous avons fait un algorithme et utilisé un logiciel de simulation PV système. Permet de calculer chaque élément de système photovoltaïque.

A cet effet ; une comparaison entre le traqueur a été faite vue de ces rendements d'absorption énergétique et pour mettre en évidence l'efficacité de système orienté par rapport à celui fixe. Nous avons montré par la simulation que le traqueur à double axes était le meilleur.

D'un côté pratique nous avons conçu et réalisé un prototype d'un traqueur (mécanique/électrique).

Un programme de commande sous logiciel Arduino. Nous avons présenté une nouvelle approche de contrôle, nous avons fait appel à Arduino une plateforme matérielle très répandue et Matlab/Simulink un programme de modélisation/simulation professionnel.



Références Bibliographiques

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1]. Adouane Mabrouk, Etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique, mémoire de Magister ; ENP– El Harrach ; 2008.
- [2]. (s.d.). Récupéré sur <http://energiespropres.e-monsite.com>.
- [3]. Djounaidi Karim 'Mémoire de fin d'étude master : Etude d'un système photovoltaïque autonome', université de Biskra 2013.
- [4]. MEKRELOUF Ali et BENYAMINA ABDERRAHMEN « étude et réalisation d'un système suiveur solaire à deux axes », Université de HASSIBA BEN BOUALI – CHLEF , 2011.
- [5]. (s.d.). Récupéré sur site web « <https://www.futurasciences.com> ».
- [6]. (s.d.). Récupéré sur site web « <http://outilssolaires.com> ».
- [7]. (s.d.). Récupéré sur http://panneausolaire.free.fr/fabrication_fonctionnement.php.
- [8]. Formation 2011 : Installation & maintenance des systèmes photovoltaïque.
- [9]. (s.d.). Les Energies Renouvelables en Algérie Réalités & Perspectives.
- [10]. Abdallah Jelali, interconnexion d'un système photovoltaïque sur le réseau Electrique, mémoire présenté à l'université du Québec à Trois-Rivières ; Août 2012.
- [11]. Khoudrane Ismail : mémoire fin étude « Etude d'un système de poursuite solaire pour les.
- [12]. Soufi Adel, Mémoire de fin d'étude « Modélisation et Control System.
- [13]. (s.d.). Récupéré sur <https://henry-juliendesgra.wixsite.com/tpe-energie-solaire/rendment>.
- [14]. Mlle BENMOHAMMADI Zahra Mémoire de fin d'étude « master » « Etude, conception et réalisation d'une commande d'un tracker solaire (suiveur solaire) ». Université Sidi Mohammed Ben Abdellah 2013/214.
- [15]. Anne La bouret, « Energie-Solaire-Photovoltaïque », (2003), Dunod.
- [16]. Damien MAZILLE & Vincent BOITIER: Documentation pour l'utilisation du logiciel PVSyst V5.
- [17]. (s.d.). Récupéré sur site web « <https://www.mathworks.com> ».
- [18]. (s.d.). Récupéré sur site web «<https://www.arduino.com>».

RESUME

ملخص :

استغلال الطاقات المتجددة في الجزائر يعرف تطورات هامة بحيث نتطرق في هذه الدراسة الى تحويل الطاقة الشمسية الى طاقة كهربائية بواسطة الألواح الكهروضوئية بحيث يكون انتاجها أعظميةا، فإن لديها ميزة كونها صديقة للبيئة و مرنة و موثوق بها و هذا هو سبب ابتكارنا نظام يتبع مسار الشمس من زوايا متعددة (متعقب الشمس) من أجل تحسين كفاءة الألواح الشمسية

كلمات مفتاحية : الطاقة الشمسية، كهروضوئية، متتبع الشمس، اللاقط، المرود.

Résumé :

Développement important. Dans notre travail, elles ont l'avantage d'être non polluantes, 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'améliorer le rendement des panneaux solaires.

Mots clés : Energie solaire, photovoltaïque, suiveur solaire, LDR, le rendement.

Abstract:

Important development. In our work, they have the advantage of being non-polluting, flexible and reliable that's why, we realized a system that follows the race of the sun from multiple angles (solar tracker) so that it completely irradiates the panel in order to improve the performance of solar panels.

Key words: Solar energy, photovoltaics, solar tracker, IDR, yield.