



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique**

Université Aboubakr Belkaid – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Électronique

Spécialité : Instrumentation Électronique

Par :

 **FOUNDOU Abdelkader.**

 **HASSAN Souleyman.**

Thème

Pilotage automatique d'un système photovoltaïque

Soutenu à Tlemcen, le 27 / 06/ 2018 devant le jury composé de :

Encadreur : **Pr : GHAF FOUR kheireddine** **Université de Tlemcen.**

Président: **Pr : BOUAZZA Benyounès** **Université de Tlemcen**

Examineur : **MCA : MASSOUM Nordine** **Université de Tlemcen**

Année universitaire : 2017-2018

Remerciement

Avant tout nous tenons nos remerciements à notre dieu tout puissant
de nous avoir donné la force et le courage.

A la suite Nous tenons à remercier **Pr: Kheireddine Ghaffour** qui a fait un
effort énorme, à travers ses informations avec ses conseils et ses
encouragements.

Nous voudrions aussi exprimer nos remerciements aux membres de jury

Pr : BOUAZZA Benyounès et **Dr : MASSOUM Nordine**

d'avoir fait l'honneur d'accepter le jury de ce travail.

Que tous les enseignants de département de génie électrique et Électronique

Nos plus chaleureux remerciements pour tous ceux qui de près et de loin ont
contribué à la réalisation de cette mémoire.

F. Abdelkader & H. Souleyman

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à ceux qui sont la source de mon inspiration et
mon courage.

A ma très cher mère, qui ma donne toujours l'espoir de vivre et qui n'a
jamais cessé de prier pour moi.

A mon très cher père Dieu le bénisse

A mon frère Mohamed pour ses encouragements et son soutien,

Et surtout pour son sacrifice afin que rien n'entrave le déroulement de mes
études.

A Pr: Ghaffour Kheireddine.

A mes chers frères "Om alkhair, Aida, Meriem, Fatha, Noura, Djamila, Idris,
Boudjamaa, Abdelmadjed, Mebark, Fatna, Zaha, Abdelhamid.

A G.Bodjamaa, D.Omar, B.Wahiba, M.Ichraf, C.Abdelmalek.

A Tous les étudiants d'instrumentation – Université de TLEMCEN-.

A tous mes amis

Foundou Abdelkader

Dédicace

A ma **maman** chérie, à ma source d'inspiration, pour son amour, sa confiance et pour tous les sacrifices qu'elle a consacrés pour moi à tout moment de ma vie. Merci de me subventionner quotidiennement, en espérant que je pourrai te rendre fière de moi **maman** A mon frère **Ahmed** et toute ma **famille**, pour leur soutien en tout temps et pour les précieux conseils et encouragements qui m'ont toujours aidé. A mon cher **papa**, pour sa grande patience, sa disponibilité et l'encouragement qu'il m'a prodigué tout au long de ce travail.

Hassan Souleyman

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	01
----------------------------	----

CHAPITRE 1: Généralité sur système photovoltaïque

I.1 Introduction.....	03
I.2 Semi-conducteur.....	03
I.2.1 Les semi-conducteurs intrinsèques.....	05
I.2.2 Les semi-conducteurs extrinsèques.....	05
I.2.3 La jonction PN.....	07
I.3 Effet photovoltaïque.....	08
I.4 Principe de fonctionnement.....	09
I.5 Caractéristique électrique des modules photovoltaïque.....	10
I.5.1 Tension de circuit ouvert.....	10
I.5.2 Courant de court-circuit.....	11
I.5.3 Puissance maximal.....	11
I.5.4 Facteur de forme.....	11
I.5.5 Rendement.....	12
I.6 Dimensionnement d'un panneau photovoltaïque.....	13
I.6.1 Principes de dimensionnement et de positionnement du panneau.....	13
I.6.1.1 Dimensionnement sur le mois le moins ensoleillé.....	13
I.6.1.2 Dimensionnement sur le mois le plus ensoleillé.....	14
I.6.2 Stockage inter-saisonnier de l'énergie.....	14
I.6.3 Procédure de dimensionnement du panneau solaire.....	15
I.7 conclusion.....	16

CHAPITRE 2: Simulation d'une cellule PV a l'aide de PC1D

II.1 Introduction.....	18
II.2 PC1D (Personnel Computer One Dimension).....	18
II.3 le fonctionnement du PC1D.....	18
II.4 étude l'influence de l'épaisseur et le dopage sur le rendement quantique et électrique.....	19
II.4.1 Test sans couche antireflet.....	20
II.4.1.1 influence de l'épaisseur.....	20
II.4.1.2 influence du dopage de l'émetteur.....	21
II.4.1.3 influence du dopage de la base.....	22
II.4.2 Test avec couche antireflet.....	24
II.4.2.1 influence de l'épaisseur et l'ongle.....	24
II.4.2.2 influence du dopage de l'émetteur.....	26
II.4.2.3 influence du dopage de la base.....	27
II.5 Conclusion.....	29

CHAPITRE 3: LE SYSTEM SUIVEUR SOLAIRE

III.1 Introduction.....	31
III.2 Suiveur solaire.....	31
III.2.1 Les types des suiveurs solaires.....	31
III.2.1.1 suiveurs passifs.....	31
III.2.1.2 suiveurs actifs.....	32
III.2.1.2.1 suiveurs mono-axe.....	33
III.2.1.2.2 suiveurs double-axe.....	33
III.3 Principe de fonctionnement.....	33
III.4 les coordonnées horaires.....	34
III.5 les coordonnées solaires.....	35
III.6 Orientation et inclinaison.....	35
III.7 Les avantage de système suiveur solaire.....	37
III.8 Intérêt des panneaux solaire photovoltaïques mobiles par rapport à panneaux fixes.....	38
III.9 Présentations comparées pour un système fixe et avec suiveur.....	38
III.10 conclusion.....	39

CHAPITRE 4: Application et Test et Résultat

IV.1 Introduction.....	41
IV.2 Objectif du travail.....	41
IV.3 La partie électronique.....	41
IV.3.1 Photorésistance (LDR).....	41
IV.3.1.1 Principe de fonctionnement.....	42
IV.3.1.2 Réalisation du capteur.....	43
IV.3.2 Le servomoteur.....	43
IV.3.2.1 commande des servomoteurs.....	45
IV.3.3 Le circuit de commande.....	46
IV.3.3.1 Arduino UNO.....	46
IV.3.3.1.1 caractéristique de carte Arduino UNO.....	46
IV.4 Partie informatique.....	47
IV.4.1 L'organigramme.....	47
IV.4.2 programmation.....	49
IV.5 Partie simulation.....	49
IV.5.1 Principe de fonctionnement.....	50
IV.5.2 Circuit de protection.....	50
IV.6 Test et résultat.....	51
IV.6.1 Comparaison entre un système suiveur et fixe.....	51
IV.6.2 Dimensionnement.....	53
IV.7 Conclusion.....	54

liste des figures

N°	Titre	Page
Chapitre 1		
Figure (I-1)	Comparaison des structures de bande électroniques des métaux, semi-conducteurs et isolants	05
Figure (I-2)	dopage type N	06
Figure (I-3)	dopage type P	07
Figure (I-4)	Présentation schématique de la zone de charge d'espace à l'intérieur de la jonction p-n	08
Figure (I-5)	conversion photovoltaïque	08
Figure (I-6)	Principe de fonctionnement d'un cellule photovoltaïque	09
Figure (I-7)	Tracé de la courbe $I_p = f(P_v)$ pour différents types de cellules	09
Figure (I-8)	Dimensionnement du panneau photovoltaïque. Liaison entre les paramètres	11
Chapitre 2		
Figure (II-1)	Panneau principal du simulateur solaire PC1D (version 5.0).	15
Figure (II-2)	Rendement quantique a des valeurs d'épaisseur (<i>TSCA</i>)	16
Figure (II-3)	Rendement électrique a des valeurs d'épaisseur(<i>TSCA</i>)	16
Figure (II-4)	Rendement quantique par rapport a dopage N (<i>TSCA</i>)	17
Figure (II-5)	Rendement électrique par rapport a dopage N (<i>TSCA</i>)	19
Figure (II-6)	Rendement quantique par rapport a dopage P (<i>TSCA</i>)	20

Figure (II-7)	Rendement électrique par rapport a dopage P (<i>TSCA</i>)	20
Figure (II-8)	Rendement quantique par rapport a l'épaisseur dans 54.74°(<i>TACA</i>)	20
Figure (II-9)	Rendement électrique par rapport a l'épaisseur dans 54.74°(<i>TACA</i>)	23
Figure (II-10)	Rendement quantique par rapport a l'épaisseur dans 30.74° (<i>TACA</i>)	23
Figure (II-11)	Rendement électrique par rapport a l'épaisseur dans 30.74° (<i>TACA</i>)	24
Figure (II-12)	Rendement quantique par rapport a dopage N (<i>TACA</i>)	24
Figure (II-13)	Rendement électrique par rapport a dopage N (<i>TACA</i>)	25
Figure (II-14)	Rendement quantique par rapport a dopage P (<i>TACA</i>)	25
Figure (II-15)	Rendement électrique par rapport a dopage P (<i>TACA</i>)	26
Chapitre 3		
Figure (III-1)	système générale de suiveur solaire.	32
Figure (III-2)	suiveur passif.	33
Figure (III-3)	suiveur actif.	33
Figure (III-4)	Vue d'en haut de la disposition des quatre capteurs LDR.	34
Figure (III-5)	Principe général de la commande du suiveur.	35
Figure (III-6)	La déclinaison du soleil en fonction d'année	36
Figure (III-7)	orientation et inclinaison d'un panneau PV.	38
Figure (III-8)	Irradiation annuelle relative sur le plan incliné à Uccle en fonction de l'orientation et l'inclinaison	40
Figure (III-9)	diagramme de comparaison entre la production avec suiveur et la production avec système fixe.	40

Chapitre 4		
Figure (IV-1)	Photorésistance (LDR):	42
Figure (IV-2)	Caractéristique d’une photorésistance	43
Figure (IV-3)	Branchement de résistance LDR en diviseur de tension.	44
Figure (IV-4)	Servomoteur SG90.	44
Figure (IV-5)	Brochage de servomoteur	45
Figure (IV-6)	Déplacement angulaire d'un servomoteur	46
Figure (IV-7)	La carte Arduino UNO	47
Figure (IV-8)	caractéristique de carte Arduino UNO	47
Figure (IV-9)	L'organigramme de système	48
Figure (IV-10)	Interface du logiciel Arduino.	49
Figure (IV-11)	le schéma de système sous PROTEUS.	50
Figure (IV-12)	circuit de protection sous ISIS PROTEUS	51
Figure (IV-13)	Typon d'un circuit de protection	52
Figure (IV-14)	circuit imprimé d'un circuit de protection	53
Figure (IV-15)	les valeurs de tension d'un système fixe	53
Figure (IV-16)	les valeurs de tension d'un système suiveur	53
Figure (IV-17)	Dessin composants du système.	54
Figure (IV-18)	la réalisation finale de notre système.	55

List d'abréviation

liste des abréviations

- + **Wh** : **Watt**- heure (énergie consommée)
 - + **PV** : Photovoltaïque
 - + **δ** : Déclinaison
 - + **H** : Angle horaire (hauteur)
 - + **L** : Longitude
 - + **φ** : Latitude
 - + **LDR** : Light-Dependent Resistor
 - + **V_{co}** : Tension de circuit ouvert
 - + **I_{cc}** : Courant de Court Circuit
 - + **V_{mppt}, I_{mppt}** : les points de fonctionnement optimal.
 - + **FC** : Le facteur de correction.
 - + **PWM** : Pulse Width Modulation
 - + **R_{sh}** : Résistance Shunt
 - + **R_s** : Résistance Série du générateur en (Ω).
 - + **E1** : Entrée analogique LDR Est.
 - + **E2** : Entrée analogique LDR Ouest.
 - + **E3** : Entrée analogique LDR Nord.
 - + **E4** : Entrée analogique LDR Sud.
 - + **V_s** : Tension Seuil.
 - + **VLDR Est** : Tension LDR Est.
 - + **VLDR Ouest** : Tension LDR Ouest.
 - + **VLDR Nord** : Tension LDR Nord.
 - + **VLDR Sud** : Tension LDR Sud.
 - + **TSCA** : Test sans couche antireflet
 - + **TACA** : Test avec couche antireflet
 - + **SvM** : Servomoteur.
-

Introduction générale

Introduction générale:

Les énergies renouvelables sont des énergies qui se renouvellent assez rapidement pour être considérées comme inépuisables à l'échelle humaine du temps.

L'énergie solaire est disponible, non polluante et gratuite. C'est pourquoi, elle est de plus en plus utilisée. Comme alternative aux combustibles. Dans la production d'électricité. L'Algérie possède l'un des gisements solaire les plus élevés au monde, avec une durée d'ensoleillement sur la totalité du territoire national pouvant atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara).

Besoin mondiaux en électricité : en moyenne, 2500 kWh par personne par an 6 milliards d'habitants : 15 1012 kWh d'électricité par an [1]

Le soleil est aujourd'hui réduit au statut d'énergie, une énergie qu'il nous faut la capter, la transformer, la stocker.... Capter cette énergie et la transformer directement en électricité par effet photovoltaïque. Proviens de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteur comme le silicium. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure. C'est l'effet photovoltaïque. L'énergie est apportée par les photons, (composants de la lumière) qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique. Ce courant continu de micro puissance calculé en watt crête (W_c) peut être transformé en courant alternatif.

Les premières applications des suiveurs solaires remontent vers les années 1750 où le principe repose sur l'utilisation de l'héliostat. La rotation du miroir de l'héliostat est assurée par un mécanisme d'horlogerie dont la plus ancienne mention du système se trouve dans des publications datant de 1742 du physicien néerlandais Willem Jacob's Gravesande [2]

A cet effet, notre étude s'intéresse à l'énergie fournie par les panneaux photovoltaïques dans le but de maximiser la quantité d'éclairement absorbé par les panneaux photovoltaïques en suivant le mouvement du soleil pendant la journée.

Donc, le mémoire présenté est organisé en quatre chapitres :

Chapitre 1 : Généralité sur système photovoltaïque.

Chapitre 2 : Simulation d'une cellule PV à l'aide de PC1D.

Chapitre 3 : LE SYSTEM SUIVEUR SOLAIRE.

Chapitre 4 : Application et Test et Résultat.

Chapitre I:

"Généralité sur système photovoltaïque "

I.1 Introduction :

l'augmentation du cout des énergies classique d'un part , et la limitation de leurs ressources d'autre part , font que l'énergie photovoltaïque devient de plus en plus une solution parmi les options énergétique prometteuses avec des avantages comme l'abondance l'absence de tout pollution et la disponibilité en plus ou moins grands qualités en tout point du globe terrestre. Actuellement, on assiste a un regain d'intérêt pour les installation utilisant l'énergie solaire, surtout pour les application sur des sites isolés.

La conversion photovoltaïque est l'un des modes les plus intéressants d'utilisation de l'énergie solaire. Elle permet d'obtenir d'électricité de façon directe et autonome a l'aide d'un matériel fiable et d'une durée de vie relativement élevée, permettant une maintenance réduite.

Le but d'un système photovoltaïque (PV) est d'utiliser la conversion directe de l'énergie solaire par effet photovoltaïque pour subvenir aux besoins en énergie de l'utilisation [1].

I.2 Semi-conducteur

Un semi-conducteur est un matériau qui a les caractéristiques électriques d'un isolant, mais pour lequel la probabilité qu'un électron puisse contribuer a un courant électrique, quoique faible, est suffisamment importante. En d'autres termes, la conductivité électrique d'un semi-conducteur est intermédiaire entre celle des métaux et celle des isolants.

Le comportement électrique des semi-conducteurs est généralement modélisé a l'aide de la théorie des bandes d'énergie. Ce modèle stipule qu'un électron dans un solide ne peut que prendre des valeurs d'énergie comprises dans certains intervalles que l'on nomme "bandes ", plus spécifiquement bandes permises, lesquelles sont séparées par d'autres " bandes" appelées bandes d'énergie interdites ou bandes interdites.[3]

Deux bandes d'énergie permises jouent un rôle particulier :

- la dernière bande complètement remplie, appelée " bande de valence "
- la bande d'énergie permise suivante appelée " bande de conduction "

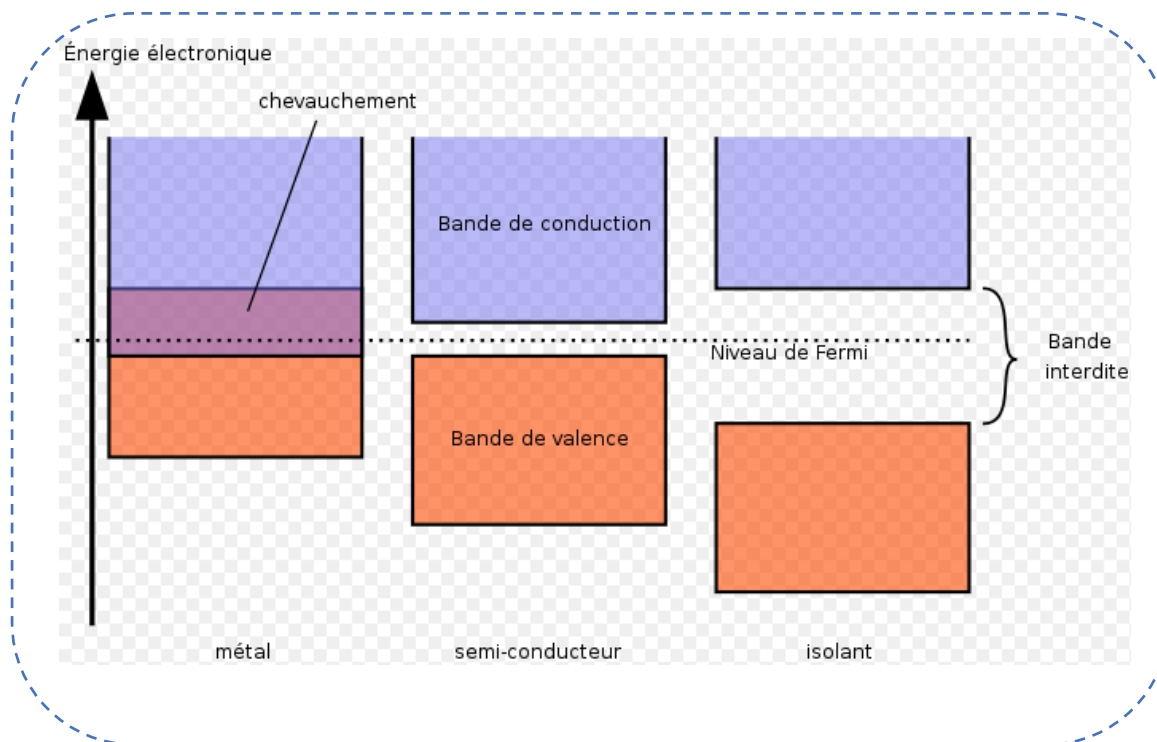


Figure I.1: Comparaison des structures de bande électroniques des métaux, semi-conducteurs et isolants

La bande de valence est riche en électrons mais ne participe pas aux phénomènes de conduction (pour les électrons). La bande de conduction, quant à elle, est soit vide (comme aux températures proches du zéro absolu dans un semi-conducteur) soit semi-remplie (comme dans le cas des métaux) d'électrons. Cependant c'est elle qui permet aux électrons de circuler dans le solide.[3]

Dans les conducteurs (métaux), la bande de conduction et la bande de valence se chevauchent. Les électrons peuvent donc passer directement de la bande de valence à la bande de conduction et circuler dans tout le solide.

Dans un semi-conducteur, comme dans un isolant, ces deux bandes sont séparées par une bande interdite, appelée couramment par son équivalent anglais plus court « gap ». L'unique différence entre un semi-conducteur et un isolant est la largeur de cette bande interdite, largeur qui donne à chacun ses propriétés respectives.

Dans un isolant cette valeur est si grande (aux alentours de 6 eV pour le diamant par exemple) que les électrons ne peuvent passer de la bande valence à la bande de conduction: les électrons ne circulent pas dans le solide.

Dans les semi-conducteurs cette valeur est plus petite (1,12 eV pour le silicium, 0,66 eV pour le germanium, 2,26 eV pour le phosphore de gallium). Si on apporte cette énergie (ou plus) aux électrons, par exemple en chauffant le matériau, ou en lui appliquant un champ électromagnétique, ou encore dans certains cas en l'illuminant, les électrons sont alors capables de passer de la bande de valence à la bande de conduction, et de circuler dans le matériau.[3]

I.2.1 Les semi-conducteurs intrinsèques :

Un semi-conducteur est dit intrinsèque lorsque le cristal n'est pas pollué (volontairement ou non) par des impuretés pouvant changer la concentration en porteurs libres pour une température différente de 0K des électrons peuvent devenir "libres" c'est-à-dire passer de la bande de valence à la bande de conduction, où leur concentration est noté n . ces électrons laissent des trous dans la BV (avec une concentration notée p) eux-aussi libre de se déplacer avec de plus, une égalité entre les concentration n et p . pour ce cas particulier. On définit une concentration intrinsèque n_i (égale aux concentrations n et p) pour laquelle on montrera plus loin qu'elle donnée par la relation:[4]

$$n = p = n_i(T) = AT^{3/2} \exp(-E_G/2KT)$$

Où A : constante spécifique du matériau.

T : la température.

E_G : band gap.

K : constant de Boltzmann.

I.2.2 Les semi-conducteurs extrinsèques :

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

Dopage de type N :

On remplace un atome de silicium par un atome pentavalent. Quatre d'entre eux assurent les liaisons avec les atomes voisins de silicium et le cinquième resté disponible va être excité vers la bande de conduction très facilement par l'agitation thermique. D'où le nombre d'électron libre qui va fortement augmenter : dans ce cas le nombre de trou est très inférieur au nombre d'électron libre.[5]

On obtient ainsi un cristal dopé N (négatif).

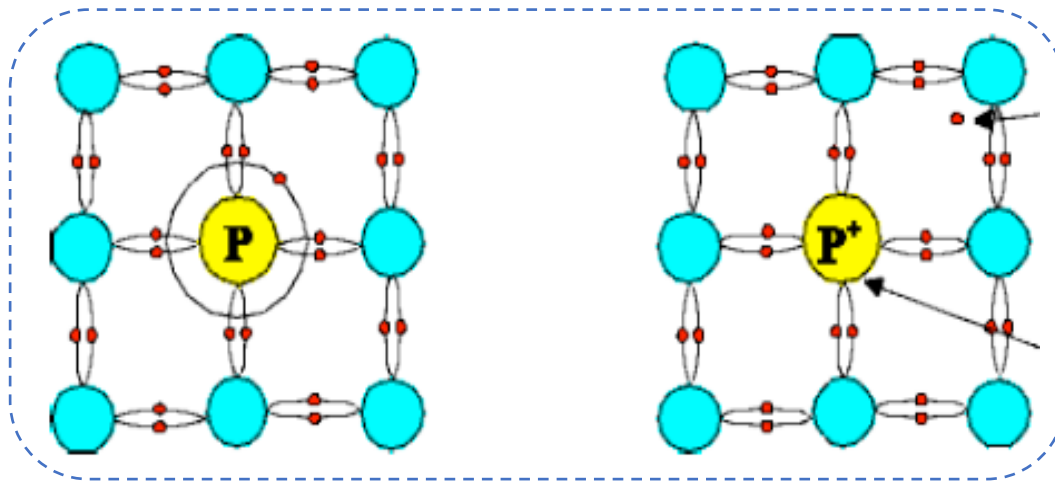


Figure I.2: dopage type N

Dopage de type P:

De la même façon on introduit des atomes Trivalents, ses trois électrons vont assurer les liaisons covalentes avec trois atomes voisins mais laisser un trou au quatrième. Ce trou se déplace de proche en proche dans le cristal pour créer un courant.[5]

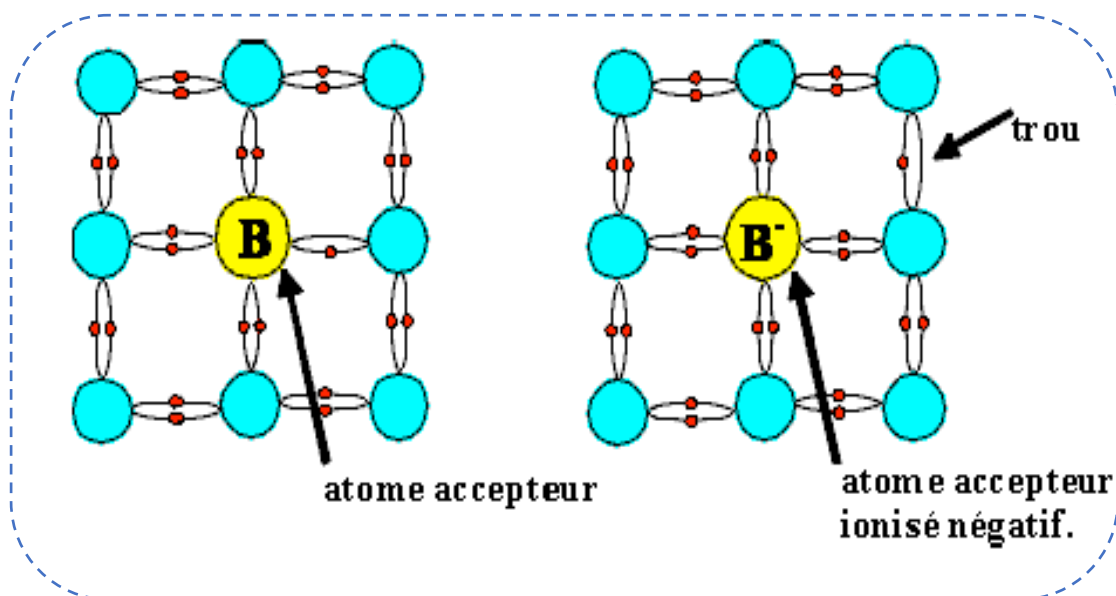


Figure I.3: dopage type P

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

L'une des solutions, couramment utilisée, pour extraire sélectivement les électrons et les trous utilise un champ électrique au moyen d'une jonction PN, entre deux couches dopées respectivement P et N :

- La couche supérieure de la cellule est composée d'un semi-conducteur dope N. Dans cette couche, il existe une quantité d'électrons libres supérieure a celle du matériau intrinsèque (i.e. non dope), d'ou l'appellation de dopage N, comme négatif (charge de l'électron). Le matériau reste électriquement neutre : c'est le réseau cristallin qui supporte globalement une charge négative.

- La couche inférieure de la cellule est composée d'un semi-conducteur dope P. Cette couche possédera donc en moyenne une quantité d'électrons libres inférieure a celle du matériau intrinsèque (i.e. non dope), les électrons sont liés au réseau cristallin qui, en conséquence, est chargé positivement. La conduction électrique est assurée par des trous, positifs (P).[5]

I.2.3 La jonction PN :

Au moment de la création de la jonction P-N, les électrons libres de la région N rentrent dans la couche P et vont se recombiner avec les trous de la région P. Il existera ainsi, pendant toute la vie de la jonction, une charge positive de la région N au bord de la jonction (parce que les électrons en sont partis) et une charge négative dans la région P au bord de la jonction (parce que les trous en ont disparu) ; l'ensemble forme la Zone de Charge d'Espace (ZCE) et il existe un champ électrique entre les deux, de N vers P. Ce champ électrique fait de la ZCE une diode, qui ne permet le passage du courant que dans un sens : les électrons peuvent passer de la région P vers la région N, mais pas en sens inverse ; inversement les trous ne passent que de N vers P.

En fonctionnement, quand un photon arrache un électron a la matrice, créant un électron libre et un trou, sous l'effet de ce champ électrique ils partent chacun a l'opposé : les électrons s'accumulent dans la région N (qui devient le pôle négatif), tandis que les trous s'accumulent dans la couche dopée P (qui devient le pôle positif). Ce phénomène est plus efficace dans la ZCE ou il n'y a pratiquement plus de porteurs de charges (électrons ou trous) puisqu'ils se sont annihilés, ou a proximité immédiate de la ZCE : lorsqu'un photon y crée une paire électron-trou, ils se séparent et ont peu de chance de rencontrer leur opposé, alors que si la création a lieu plus loin de la jonction, l'électron (respectivement le trou) nouveau conserve une grande chance de se recombiner avant d'atteindre la zone N (respectivement la zone P). Mais la ZCE est très mince, aussi n'est-il pas utile de donner une grande épaisseur a la cellule.

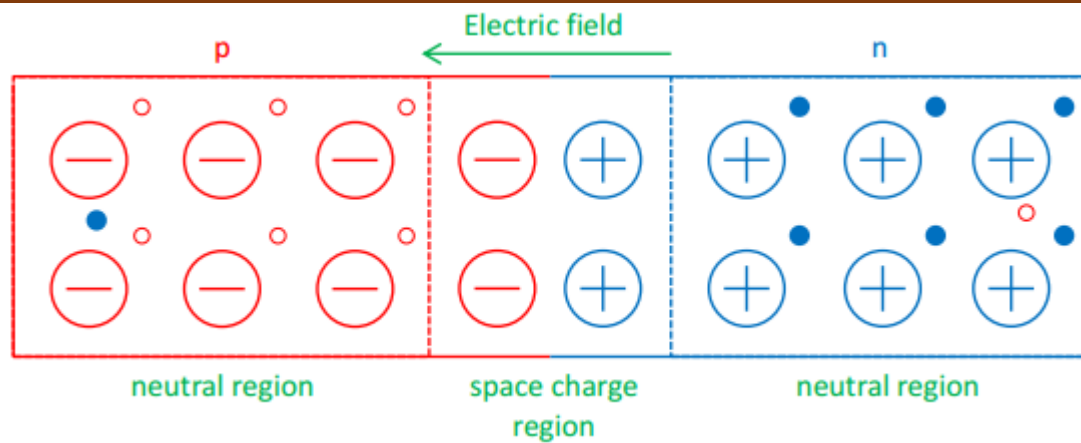


Figure I.4 : Présentation schématique de la zone de charge d'espace à l'intérieur de la jonction p-n

D'un point de vue électrique, une cellule photovoltaïque est l'équivalent d'un générateur de courant auquel on a adjoint une diode. Il faut ajouter des contacts électriques (qui laissent passer la lumière en face éclairée: en pratique, on utilise un contact par une grille), une couche antireflet pour assurer une bonne absorption des photons, etc.

Pour que la cellule fonctionne, et produise le maximum de courant, on ajuste le gap du semi-conducteur au niveau d'énergie des photons. On peut éventuellement empiler les jonctions, de façon cellules photovoltaïques.

I.3 Effet photovoltaïque

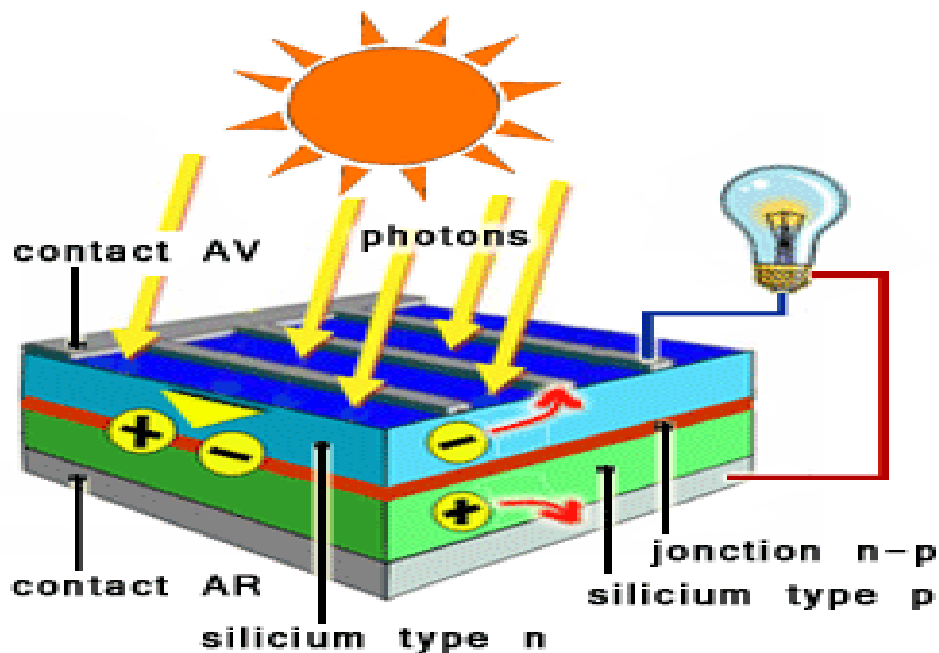


Figure I.5 : conversion photovoltaïque

L'effet photoélectrique (EPE) désigne en premier lieu l'émission d'électrons par un matériau soumis à l'action de la lumière. Par extension, il regroupe parfois l'ensemble des phénomènes électriques d'un matériau provoqués par l'action de la lumière. On distinguera alors deux effets : des électrons sont éjectés du matériau (émission photoélectrique) et une modification de la conductivité du matériau (photoconductivité, effet photovoltaïque lorsqu'il est en œuvre au sein d'une cellule photovoltaïque, effet photo électrochimique, effet photo résistif).[3]

Lorsque l'EPE se manifeste, toute l'énergie du photon incident se transmet à l'électron périphérique.

Une quantité d'énergie minimale est nécessaire pour extraire l'électron de l'atome, l'énergie excédentaire est transmise à l'électron sous forme d'énergie cinétique.

Les photons de la source lumineuse possèdent une énergie caractéristique déterminée par la fréquence de la lumière. Lorsqu'un électron du matériau absorbe un photon et que l'énergie de celui-ci est suffisante, l'électron est éjecté; sinon l'électron ne peut s'échapper du matériau. Comme augmenter l'intensité de la source lumineuse ne change pas l'énergie des photons mais seulement leur nombre, on comprend aisément que l'énergie des électrons émis par le matériau ne dépend pas de l'intensité de la source lumineuse.[3]

L'énergie d'un photon est caractérisée par : $E = h \cdot \nu$, hypothèse posée par Planck.

E : énergie du photon (J)

ν : fréquence de la radiation monochromatique

h : constante de Planck qui vaut $6,626076 \times 10^{-34}$ J.s

On constate que l'énergie du photon est proportionnelle à la fréquence et varie donc en fonction de la radiation.

I.4 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est le suivant : les « grains » de lumière qu'on appelle photons, en pénétrant très légèrement dans le silicium, déplacent quelques électrons du métal. Le métal semi-conducteur ne permettant le déplacement des électrons que dans un sens, les électrons déplacés par la lumière doivent passer par le circuit extérieur pour revenir à leur place, ce qui engendre un courant.[6]

Les cellules produisent de l'électricité chaque jour même si le ciel est nuageux : dans ce cas, le rendement est simplement moins élevé. Les cellules sont assemblées sous forme de panneaux photovoltaïques, panneaux qui sont encastrés sur ou dans la toiture des habitations.[6]

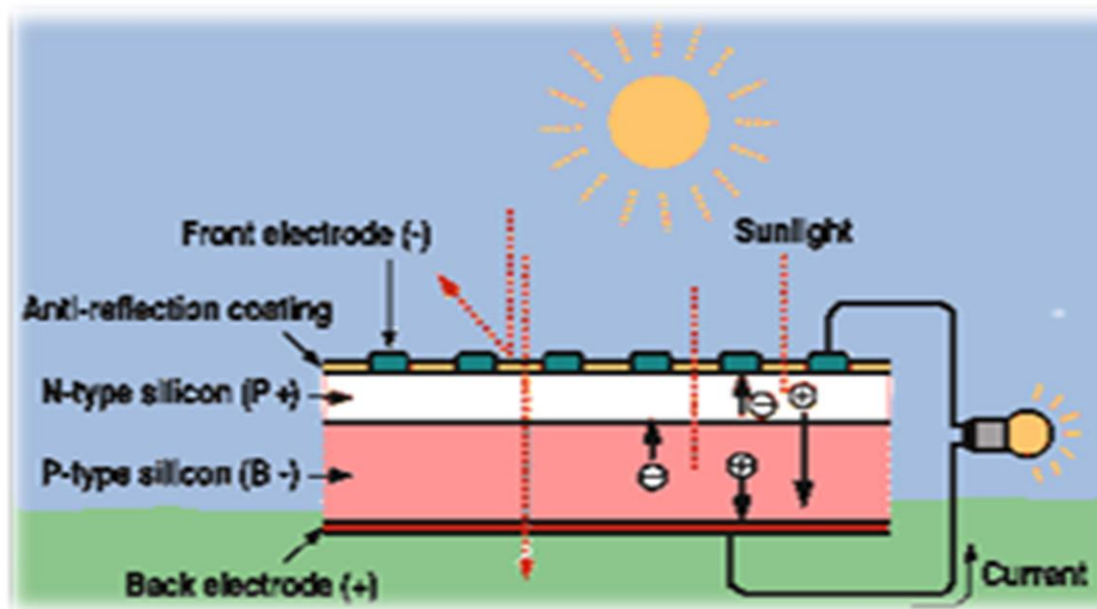


Figure I.6 : Principe de fonctionnement d'un cellule photovoltaïque

I.5 Caractéristique électrique des modules photovoltaïque :

Les différents paramètres caractérisant un module photovoltaïque sont la tension de circuit ouvert, courant de court-circuit, puissance maximale, facteur de forme et rendement. Ils sont extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différents modules éclairés dans des conditions identiques.

I.5.1 Tension de circuit ouvert

Si on place un module sous une source lumineuse constante sans aucune circulation de courant, on obtient à ses bornes une tension maximale continue, dite tension à circuit ouvert V_{co} . $V_{co} = N_s \cdot 0,6 \text{ V}$.

Où 0,6 est la tension pour une cellule PV élémentaire et N_s est le nombre de cellules on l'obtient en branchant directement un voltmètre aux borne de module PV.

I.5.2 Courant de court-circuit

Lorsqu'on place le module PV en court-circuit, il débite son courant maximal à tension nulle. On dit courant de court-circuit I_{cc} . On obtient sa valeur en branchant un ampèremètre aux bornes du module. Dans les modules PV au silicium, le courant I_{cc} est de l'ordre de $12\text{mA}/\text{cm}^2$.

I.5.3 Puissance maximale

La puissance fournie au circuit extérieur par un module photovoltaïque sous éclairement dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes du module). Cette puissance est maximale (notée $P_{\max}$) pour un point de fonctionnement $P_{\max}$ (I_{opt} , V_{opt}) de la courbe Courant-Tension.

$$P_{\max} = I_{\text{opt}} \cdot V_{\text{opt}}$$

I.5.4 Facteur de forme

On appelle facteur de forme ff le rapport entre la puissance maximale fournie par le module PV $P_{\max}(V_{\text{pm}} \cdot I_{\text{pm}})$, et le produit du courant de court-circuit I_{CC} par la tension de circuit ouvert (c'est à dire la puissance maximale d'un module idéal).

$$FF = \frac{V_{\text{pm}} \cdot I_{\text{pm}}}{V_{\text{oc}} \cdot I_{\text{cc}}}$$

Les facteurs de forme typiques pour différentes technologies photovoltaïques sont les suivant:

- Technologie silicium cristallin (m-Si) : $ff = 0,83$
- Technologie silicium amorphe a-Si : $ff = 0,7$
- Technologie Tellure de Cadmium (CdTe) : $ff = 0,76$
- Technologie Cuivre Indium Sélénium (CIS) : $ff = 0,78$

I.5.5 Rendement

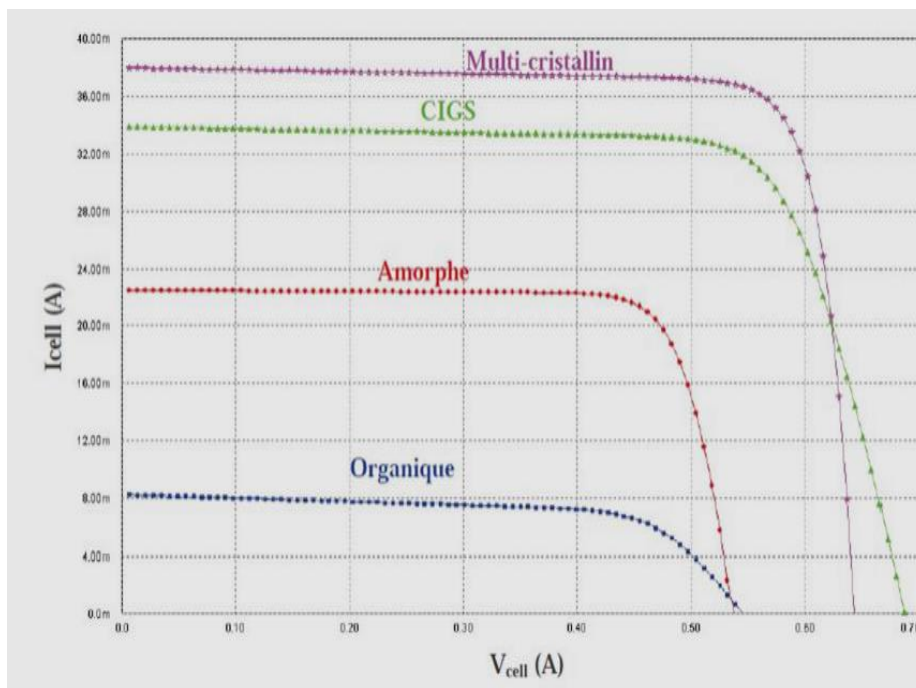
Le rendement énergétique d'un module PV est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par le module $P_{\max}(I_{\text{opt}}, V_{\text{opt}})$, et la puissance solaire incidente. Il est donné par:

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{inc}}} = \frac{I_{\text{opt}} V_{\text{opt}}}{P_{\text{inc}}}$$

Voici le rendement de conversion typique pour différentes technologies photovoltaïques :

- Technologie silicium cristallin (m-Si) : de 15 à 17 % .
- Technologie silicium amorphe a-Si : 6 à 8 %.
- Technologie Tellure de Cadmium (CdTe) : 11 à 12 %.
- Technologie Cuivre Indium Sélénium (CIS) : 12 à 13 %.
- Technologie cellule organique (à l'état de la recherche : 5 % (record à 11 %).

Suivant les technologies de cellules photovoltaïques, le tracé de l'équation $I_p = f(V_p)$ garde la même forme mais les valeurs de tension à vide sont légèrement différentes et surtout, pour une même surface, les courants de court-circuit sont différents pour la raison que les rendements de conversion sont différents pour chaque technologie.



(graphe source : INES RDI/CEA)

Figure I.7 : Tracé de la courbe $I_p = f(P_v)$ pour différents types de cellules

I.6 Dimensionnement d'un panneau photovoltaïque

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

Généralement, la variation de l'énergie fournie par un panneau photovoltaïque d'inclinaison donnée, ne suit pas celle des besoins en énergie d'une habitation. Si on fixe la puissance crête pour satisfaire au mieux les besoins d'un mois donné, on obtient généralement un déficit ou un excédent pour d'autre mois. Sur quelle période faut-il s'efforcer d'égaliser les besoins et les apports? Une inclinaison égale à la latitude du lieu permet de capter une quantité d'énergie annuelle maximale, mais :

- ✚ Une partie de cette énergie risque d'être inutile ; l'énergie est chère à stocker.

- ✚ Le panneau risque d'être trop cher.

Une inclinaison forte (plus proche de la vertical : latitude du lieu + 20° par exemple) favorise la captation de l'énergie solaire en hiver (quand le soleil est bas).[7]

I.6.1 Principes de dimensionnement et de positionnement du panneau

Les deux principes extrêmes illustrent les raisonnements employés pour confronter :

- ✚ L'énergie que le panneau doit fournir.

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

I.6.1.1 Dimensionnement sur le mois le moins ensoleillé

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

C'est la solution généralement adopté par les sociétés commercialisant et installant des systèmes photovoltaïque.[8]

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

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

- ✚ De favoriser l'exposition du panneau pendant la saison la moins ensoleillée en choisissant une inclinaison supérieure de 10 à 20° (15° en général) à la latitude du site;
- ✚ De surdimensionner la batterie par aux besoins réels (principalement liés au nombre possible de jour sans soleil durant cette saison moins ensoleillée ; [9]

Il est alors possible de dimensionner non plus sur le mois le mois ensoleillé, mais sur des mois un peu plus ensoleillé permettant de combler le déficit du mois le mois ensoleillé grâce à une capacité suffisante de la batterie. [8]

I.6.1.2 Dimensionnement sur le mois le plus ensoleillé

La puissance crête est suffisante pour satisfaire les besoins pendant le mois le plus ensoleillé et généralement tout à fait insuffisante pour satisfaire les besoins d'hiver.

Un tel dimensionnement implique le recours à une source d'énergie complémentaire. Dans un système à deux sources, il faut alors favoriser l'utilisation de l'énergie solaire pendant les mois plus ensoleillés et donc, choisir une faible inclinaison des modules (α =la latitude -10° à 20°). Ce dimensionnement trouve sa limite dans le coût de l'énergie complémentaire. [1]

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

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

I.6.2 Stockage inter-saisonnier de l'énergie

Il est envisageable de mieux adapter les apports solaires aux besoins en utilisant en hiver de l'énergie stockée en batterie pendant les périodes ensoleillées. [9]

Le stockage à long terme (03 à 06 mois) en batterie et pourtant pratiquement exclu à cause de son coût : la capacité de la batterie nécessaire est trop importante.

De plus :

La charge de la batterie est alors délicate (il faudrait fractionner la capacité ou augmenter le courant de la charge).

I.6.3 Procédure de dimensionnement du panneau solaire

Quel que soit le principe retenu, il revient finalement à assurer l'adéquation entre les apports et les besoins pour une période donnée (généralement un mois donné), c'est-à-dire, comparer que doit fournir le panneau avec des tableaux qui donnent l'énergie fournie par un panneau de puissance donnée, selon divers inclinaisons. Les liaisons entre les principales grandeurs sont représentées dans la figure suivante :

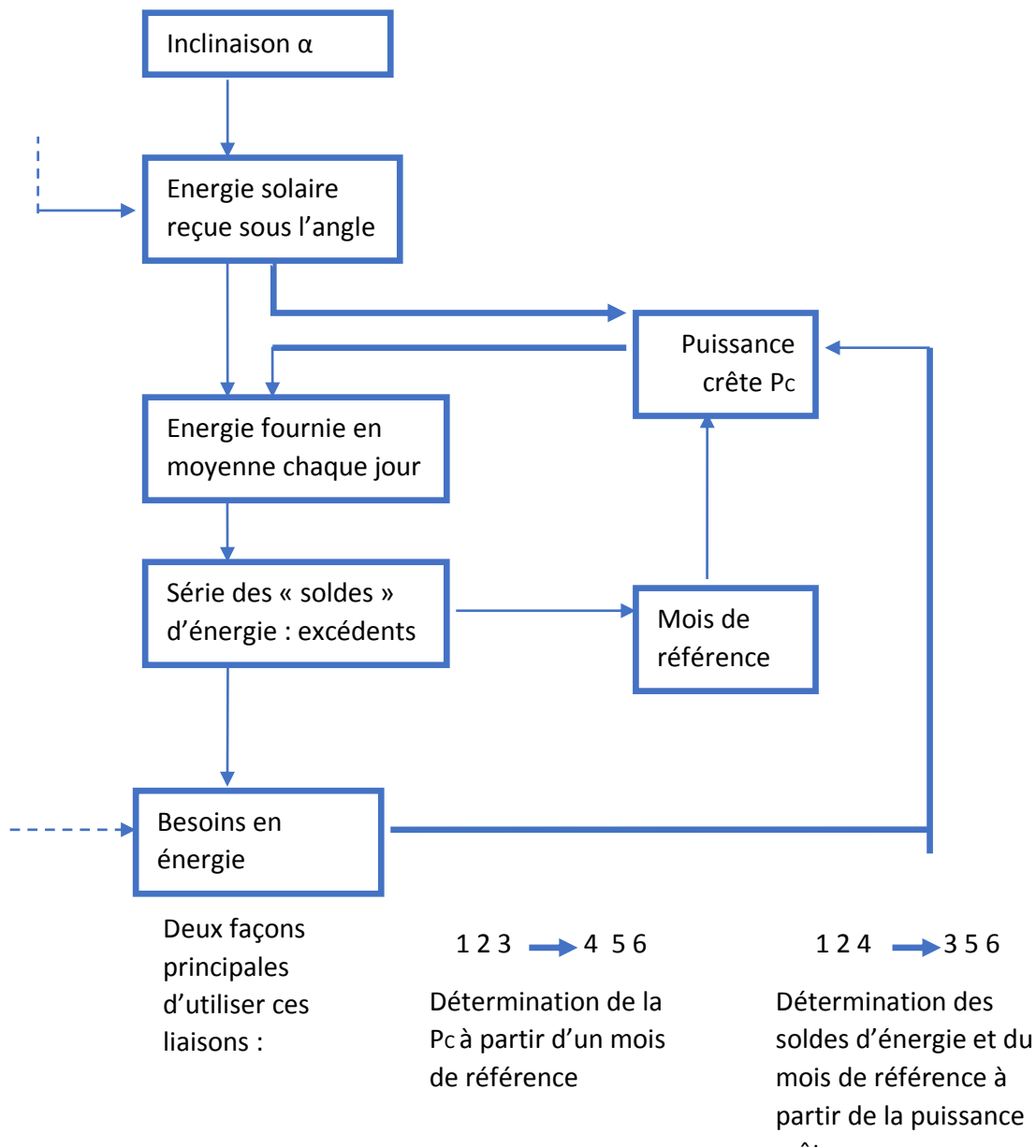


Figure I.8: Dimensionnement du panneau photovoltaïque. Liaison entre les paramètres
[8]

I.7 conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire .et son application dans le domaine photovoltaïque. Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales et leurs groupements dans le module photovoltaïque et nous avons donné des notions sur le module photovoltaïque : rendement, nombre des cellules dans le module, leur encapsulation et leur encadrement. Et les avantages et les inconvénients et leurs applications.

Chapitre II:

" Simulation d'une cellule PV a l'aide de PC1D"

II.1 Introduction:

Le but de l'étude de simulation est de comprendre physiquement la structure développée et d'analyser les possibilités d'amélioration. Pour cela, il est nécessaire d'utiliser un logiciel capable de simuler le silicium amorphe.

II.2 PC1D (Personnel Computer One Dimension)

Le PC1D est un simulateur solaire unidimensionnel pour Windows, créé initialement au laboratoire de sandia National par Dr.paul Basore et son équipe en 1984, puis développé par Dr. Don Clugston à l'Université de New South Wales (UNSW) en Australie. La première version a été publiée en décembre 1985. Le programme est devenu populaire grâce à son interface simple et souple, ce qui le rend facile à utiliser. Durant son exécution, seul le fichier PC1D.EXE est nécessaire pour les calculs. La base de données du PC1D contient un fichier help PC1D.HLP et quelques fichiers additionnels des paramètres physiques de quelques matériaux tels que le silicium(Si), le Germanium(Ge), l'InP et le GaAs. Il contient aussi les spectres solaires standards terrestres, spatiaux solaires à base de Si, Ge et les cellules solaires à base de semi-conducteurs [10]

II.3 le fonctionnement du PC1D:

L'interface proposée par le simulateur PC1D permet de bien présenter la structure solaire à étudier, qui peut être représentée au maximum par cinq couches. Chaque couche est prise en charge par le simulateur à travers les paramètres de la figure II.1.

Pour chaque couche, une liste de paramètres s'affiche sur la fenêtre principale. En cliquant sur le paramètre, on introduit la nouvelle valeur.

Après l'introduction de toutes les données nécessaires du matériau, le PC1D peut fonctionner. Un schéma descriptif de la structure étudiée est généré systématiquement du côté droit du panneau principal du simulateur. Pour spécifier l'étude à faire sous PC1D, deux fichiers externes sont nécessaires pour son exécution. Ces fichiers spécifient l'étude à faire, soit en obscurité (DarkIV.EXC) soit sous éclairage (Ine-Sun.EXC, Scan-Qe.EXC). Le fichier (Ine-Sun.EXC) permet le calcul des caractéristiques (I-V, P-V), ainsi que le rendement η et le facteur de forme FF, alors que le fichier (Scan-Qe.EXC) permet le calcul de la réponse spectrale. [11]

*** DEVICE ***

Device area: 100.0 cm²
 Front surface texture depth: 3.000 μm
Front surface neutral
Rear surface neutral
 Exterior front reflectance: 10.00%
No exterior rear reflectance
 Internal optical reflectance enabled
 Front surface optically rough
 Emitter contact enabled
 Base contact enabled
 Internal conductor: 0.3000 S
 ** REGION 1 **
 Thickness: 300.0 μm
 Material from si.mat
 Carrier mobilities from internal model
 Dielectric constant: 11.90
 Band gap: 1.124 eV
 Intrinsic conc. at 300 K: 1.000e+010 cm⁻³
 Refractive index from si.inr
 Absorption coeff. from si300.abs
 Free carrier absorption enabled
 P-type background doping: 1.513e+016 cm⁻³
 First front diff.: N-type, 2.870e+020 cm⁻³ peak
No second front diffusion
No rear diffusion
 Bulk recombination: Tau n = Tau p = 7.208 μs
 Front-surface recombination, S model
 Rear-surface recombination, S model

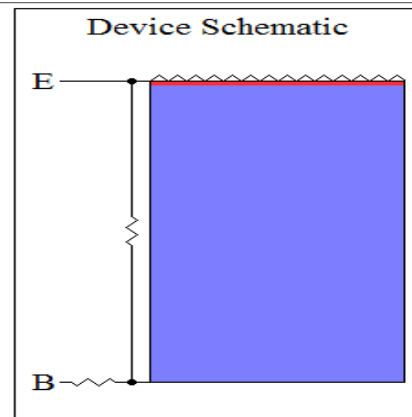


Figure II.1: Panneau principal du simulateur solaire PC1D (version 5.0).

II.4 étude l'influence de l'épaisseur et le dopage sur le rendement quantique et électrique

Rendement quantique QE:

$$QE = \frac{\text{Nombre des photon actifs}}{\text{nombre total des photon incident}}$$

Rendement électrique η :

$$\eta = \frac{\text{puissance}}{p \text{ incidence}}$$

II.4.1 Test sans couche antireflet

II.4.1.1 influence de l'épaisseur :

* rendement quantique QE:

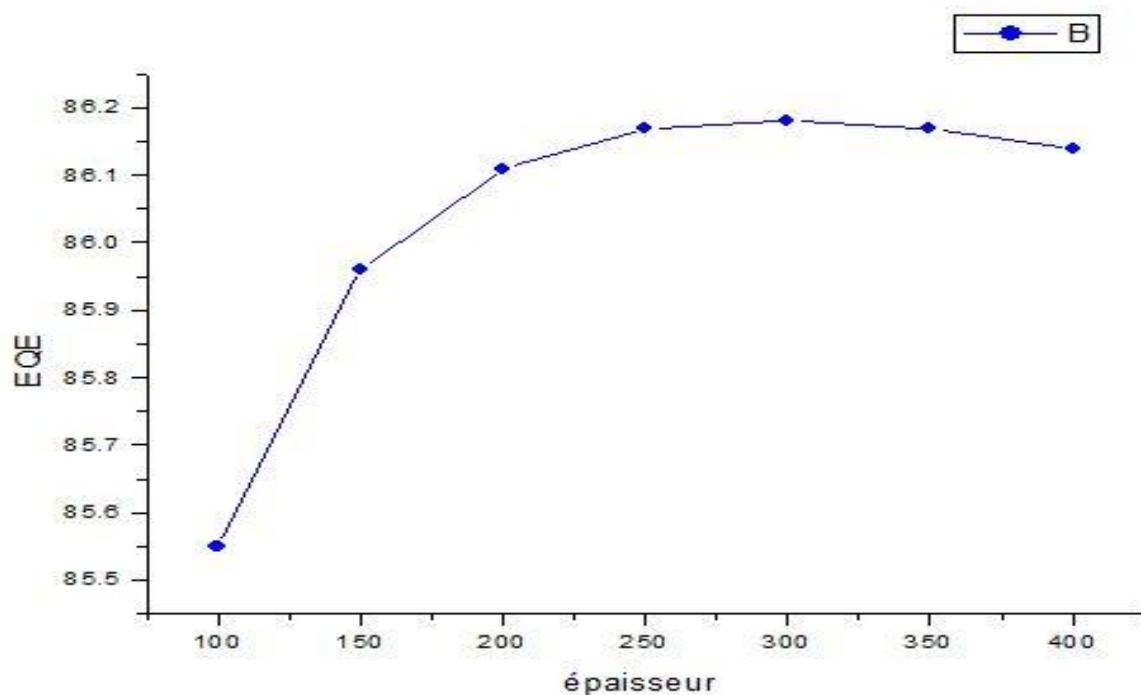


Figure II.2: Rendement quantique a des valeurs d'épaisseur

** rendement électrique η :

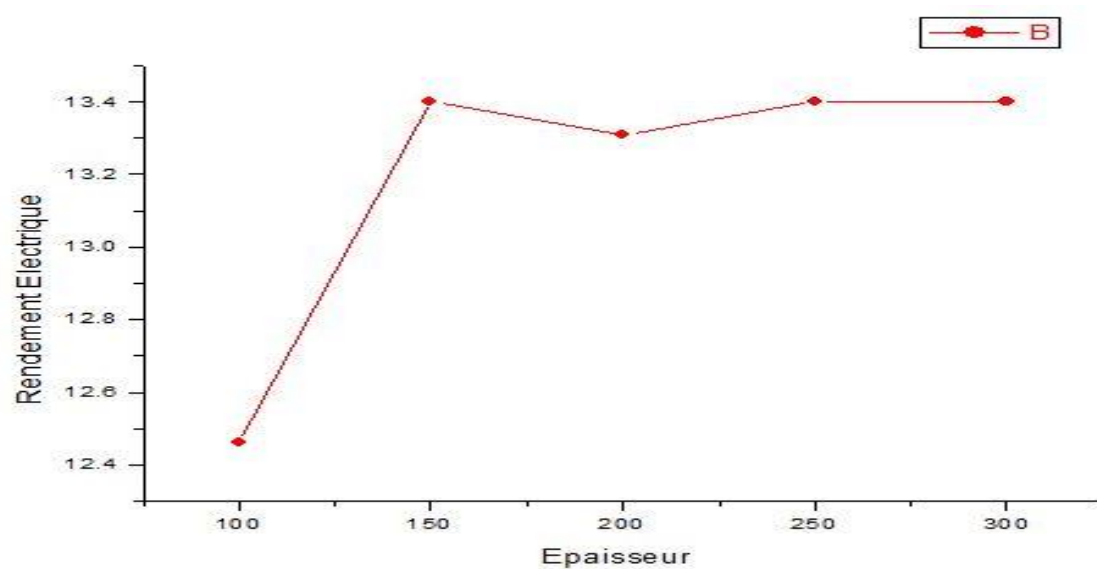


Figure II.3: Rendement électrique a des valeurs d'épaisseur

Synthèse:

Après les testes dans le cas d'absence couche antireflet en remarque ces que les rendements quantique et électrique augments solen l'augmentation de l'épaisseur.

II.4.1.2 influence du dopage de l'émetteur

* rendement quantique QE:

Fixé la valeur de dopage de base a $1.513 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ et varié la valeur d'émetteur entre 2.87×10^{16} et 2.87×10^{20} .

Dopage (cm^{-3})	EQE (%)
2.87×10^{16}	99.19
2.87×10^{17}	97.74
2.87×10^{18}	96.70
2.87×10^{19}	96.23
2.87×10^{20}	95.89

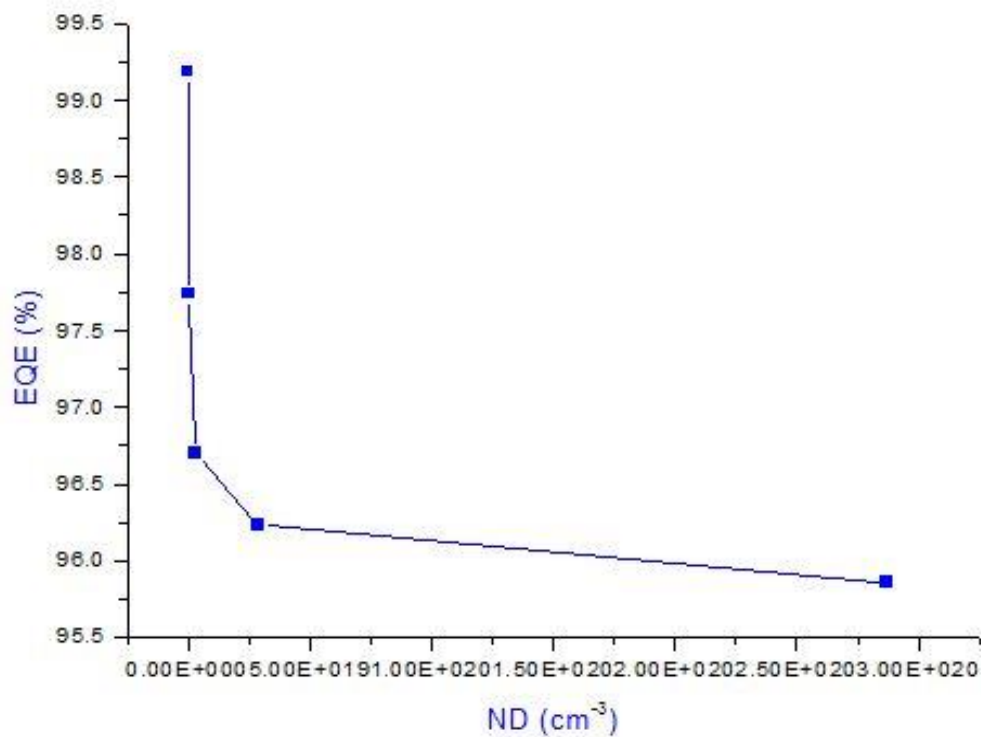


Figure II.4: Rendement quantique par rapport a dopage N

**rendement électrique η :

Dopage (cm-3)	η (%)
2.87 e^{16}	9.8
2.87 e^{17}	11.8
2.87 e^{18}	12.6
2.87 e^{19}	13.2
2.87 e^{20}	13.4

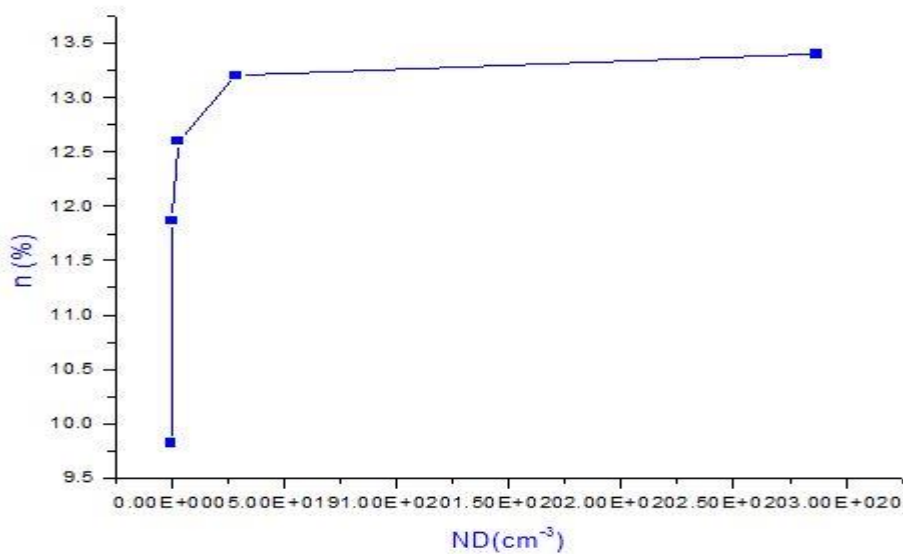


Figure II.5: Rendement électrique par rapport a dopage N

Synthèse:

Après les testes dans le cas sans couche antireflet:

Si en augmente la valeur de dopage de l'émetteur le rendement quantique démunie. Et le rendement électrique augmenté

II.4.1.3 influence du dopage de la base

* rendement quantique QE:

Fixé la valeur de dopage de l'émetteur a $2.87 \text{ e}^{20} \text{ cm}^{-3}$ et varié la valeur de la base entre 1.53 e^{16} et 1.53 e^{20}

Dopage (cm-3)	EQE (%)
2.87 e^{16}	86.30
2.87 e^{17}	85.82
2.87 e^{18}	84.24
2.87 e^{19}	79.20
2.87 e^{20}	64.36

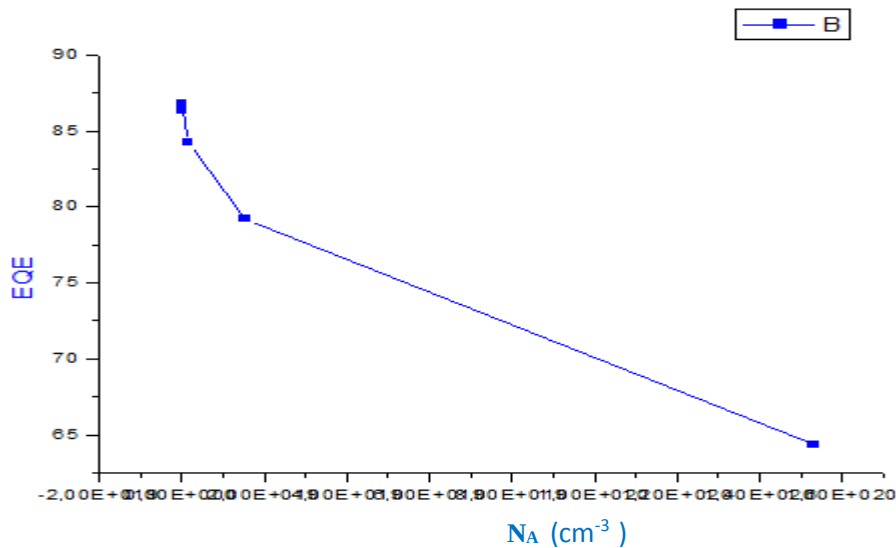


Figure II.6: Rendement quantique par rapport a dopage P

**rendement électrique η :

Dopage (cm-3)	η (%)
2.87×10^{16}	13.41
2.87×10^{17}	13.50
2.87×10^{18}	11.56
2.87×10^{19}	6.58
2.87×10^{20}	1.84

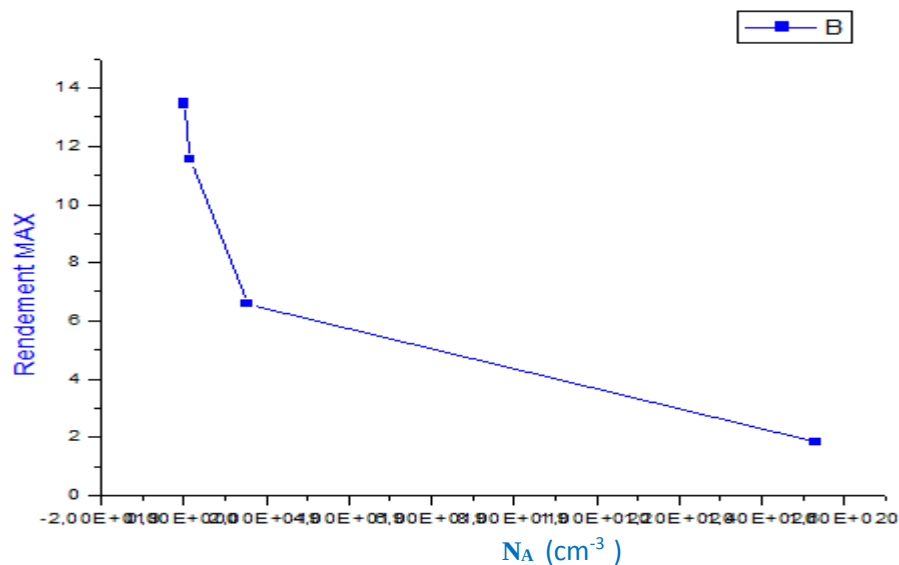


Figure II.7: Rendement électrique par rapport a dopage P

Synthèse:

Après les testes dans le cas sans couche antireflet en remarque ces que les rendements quantique et électrique démunie solen l'augmentation des valeurs de dopage N_A .

II.4.2 Test avec couche antireflet

II.4.2.1 influence de l'épaisseur et l'angle:

* rendement quantique QE angle 54.75°:

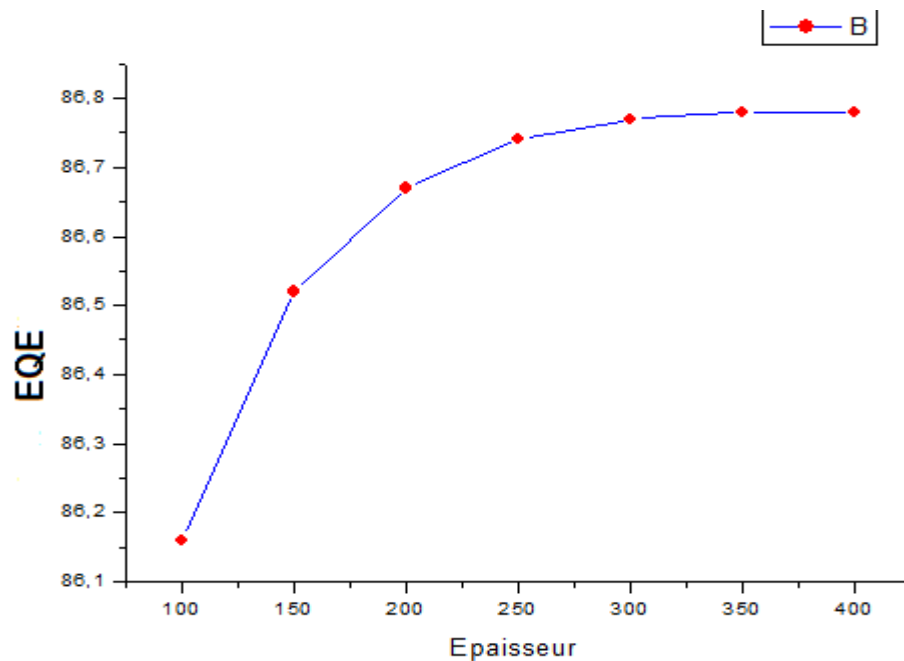


Figure II.8:: Rendement quantique par rapport a l'épaisseur dans 54.74°

**rendement électrique η angle 54.74° :

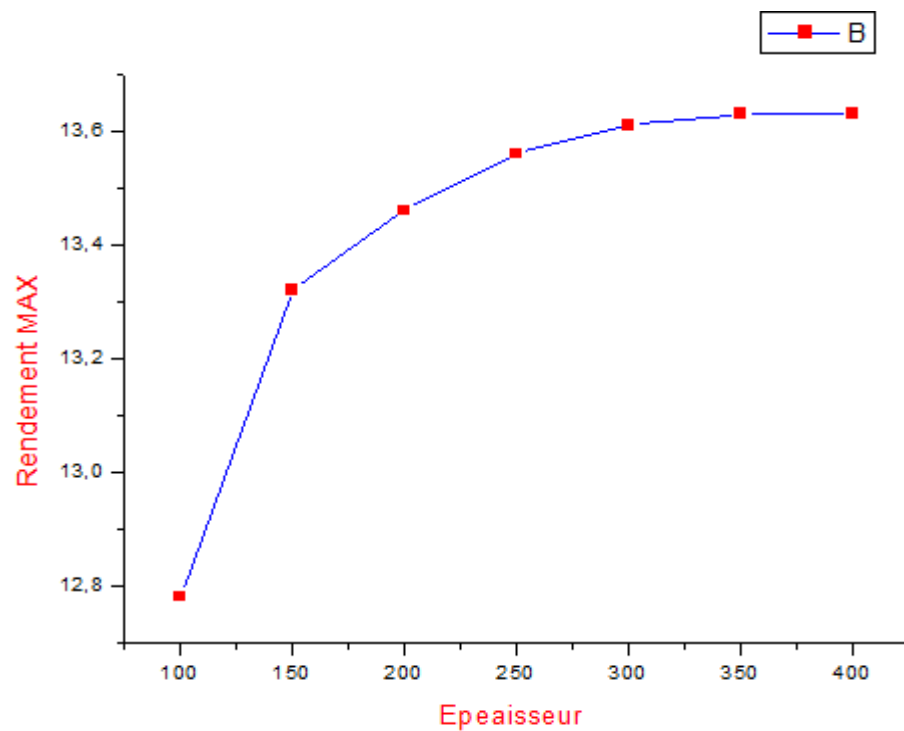


Figure II.9: Rendement électrique par rapport a l'épaisseur dans 54.74°

* rendement quantique QE ongle 30.75°:

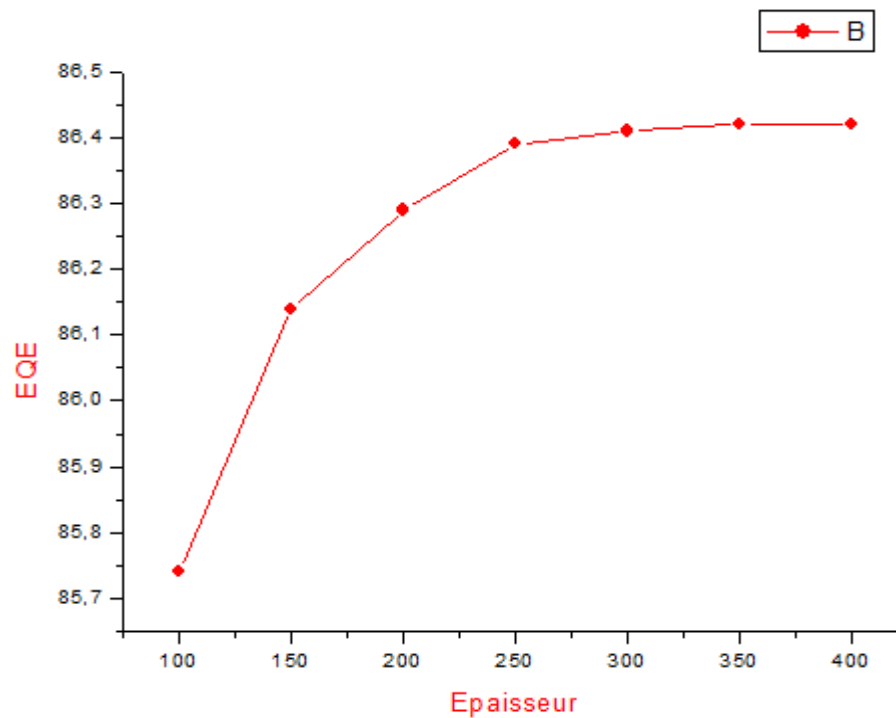


Figure II.10: Rendement quantique par rapport a l'épaisseur dans 30.74°

**rendement électrique η ongle 30.74°:

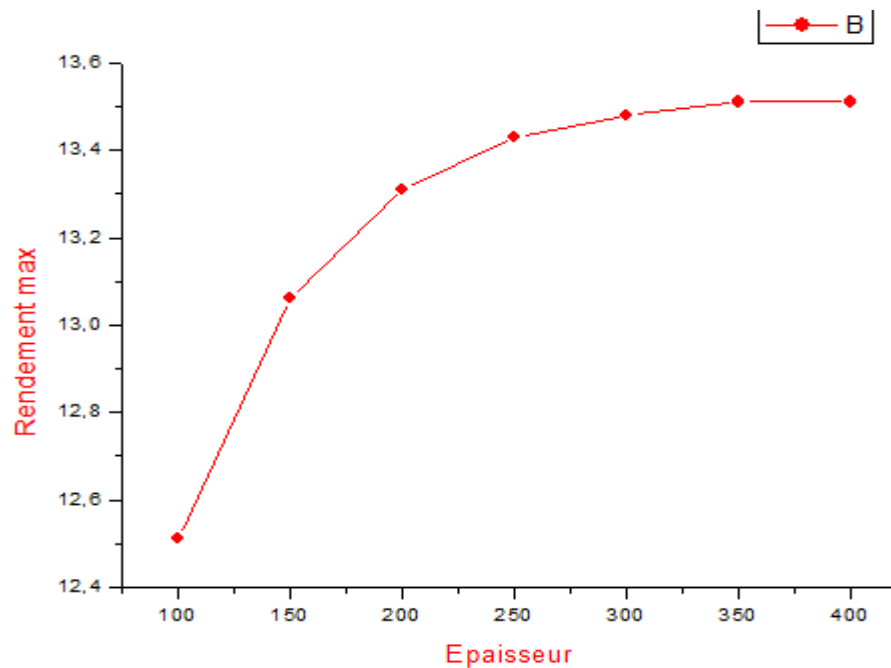


Figure II.11: Rendement électrique par rapport a l'épaisseur dans 30.74°

Synthèse:

Après les testes dans le cas avec couche antireflet en remarque

Si en augment l'ongle est l'épaisseur les rendements quantique et électrique augments.

II.4.2.2 influence du dopage de l'émetteur

* rendement quantique QE:

Dopage (cm ⁻³)	EQE (%)
2.87×10^{16}	89.28
2.87×10^{17}	88.08
2.87×10^{18}	87.15
2.87×10^{19}	86.73
2.87×10^{20}	86.41

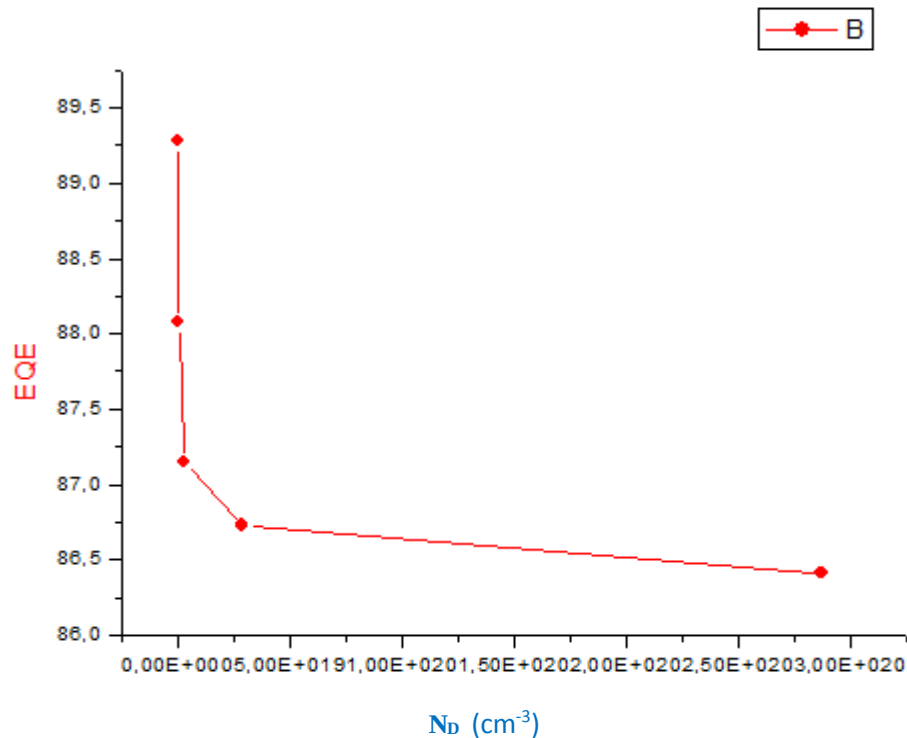


Figure II.12: Rendement quantique par rapport a dopage N

**rendement électrique η :

Dopage (cm ⁻³)	η (%)
2.87×10^{16}	9.83
2.87×10^{17}	11.84
2.87×10^{18}	12.62
2.87×10^{19}	13.23
2.87×10^{20}	13.48

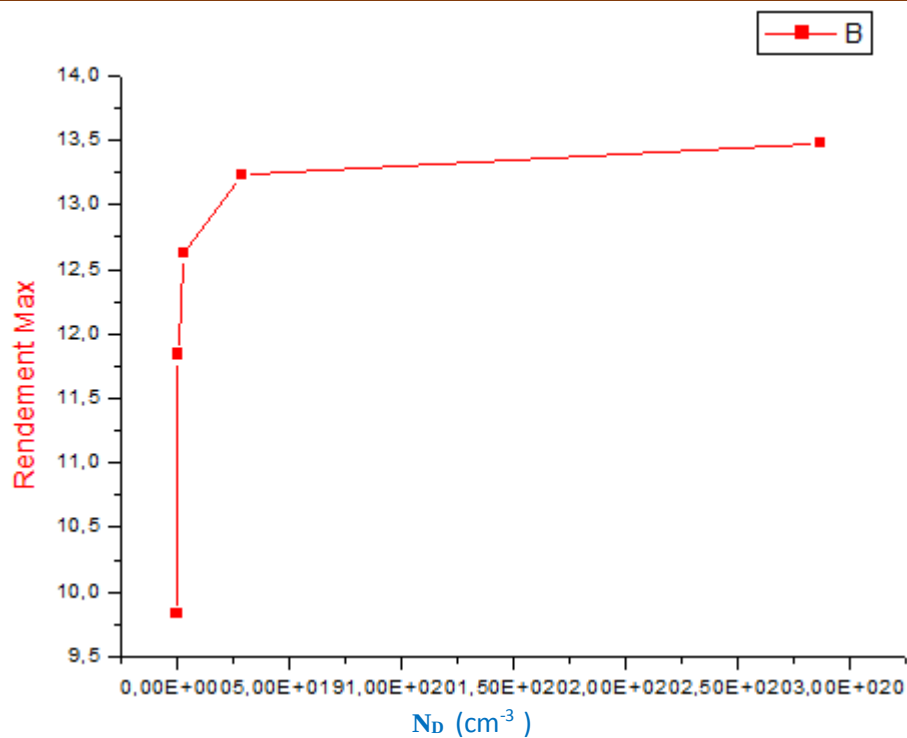


Figure II.13: Rendement électrique par rapport a dopage N

Synthèse:

Après les testes dans le cas avec couche antireflet:

Si on augmente la valeur de dopage de l'émetteur le rendement quantique diminue. Et le rendement électrique augmente

II.4.2.3 influence du dopage de la base

* rendement quantique QE:

Fixé la valeur de dopage de l'émetteur à $2.87 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ et varié la valeur de la base entre 1.53×10^{16} et 1.53×10^{20}

Dopage (cm-3)	EQE(%)
2.87×10^{16}	86.41
2.87×10^{17}	86.05
2.87×10^{18}	84.58
2.87×10^{19}	79.52
2.87×10^{20}	64.11

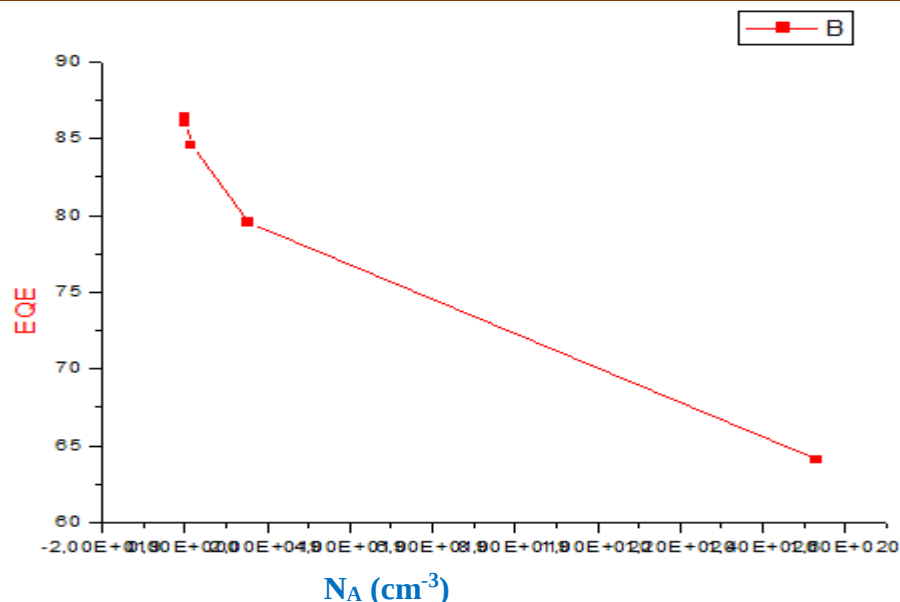


Figure II.14: Rendement quantique par rapport a dopage P

**rendement électrique η :

Dopage (cm-3)	η (%)
2.87 e^{16}	9.83
2.87 e^{17}	11.84
2.87 e^{18}	12.62
2.87 e^{19}	13.23
2.87 e^{20}	13.48

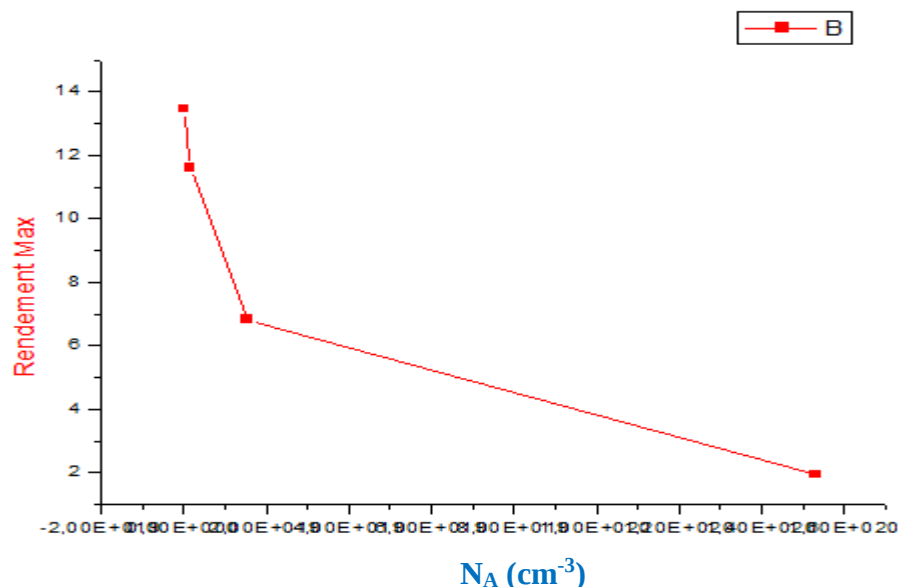


Figure II.15: Rendement électrique par rapport a dopage P

Synthèse:

Après les testes dans le cas avec couche antireflet en remarque ces que les rendements quantique et électrique démunie solen l'augmentation des valeurs de dopage N_A .

II.5 Conclusion:

Dans ce chapitre on traite les variations des paramètres électriques de la cellule solaire (hétéro jonction) sur le rendement,

Les paramètres de la cellule température et l'influence de la recombinaison sur les faces avant et arrière de la base nous avons fait varier ces deux paramètres séparément ; et aussi influence du dopage de les couches n (émetteur), n^+ (la base) et p (BSF) , et Variation du rendement de la cellule en fonction De l'épaisseur de substrat et de l'émetteur et de BSF. Et je voir que le rendement de varie avec les paramètres précédents.

Chapitre III:

"LE SYSTEM SUIVEUR SOLAIR "

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous avons présenté les dernières techniques de suivi solaire avec quelques comparaisons de systèmes fixes pour démontrer l'importance de cette technique dans l'obtention de l'énergie maximale à différents moments

III.2 Suiveur solaire

Un traquer solaire ou suiveur de Soleil est un système utilisant le principe de l'héliostat. C'est une structure portante qui permet d'orienter des panneaux solaires afin d'en augmenter la productivité.

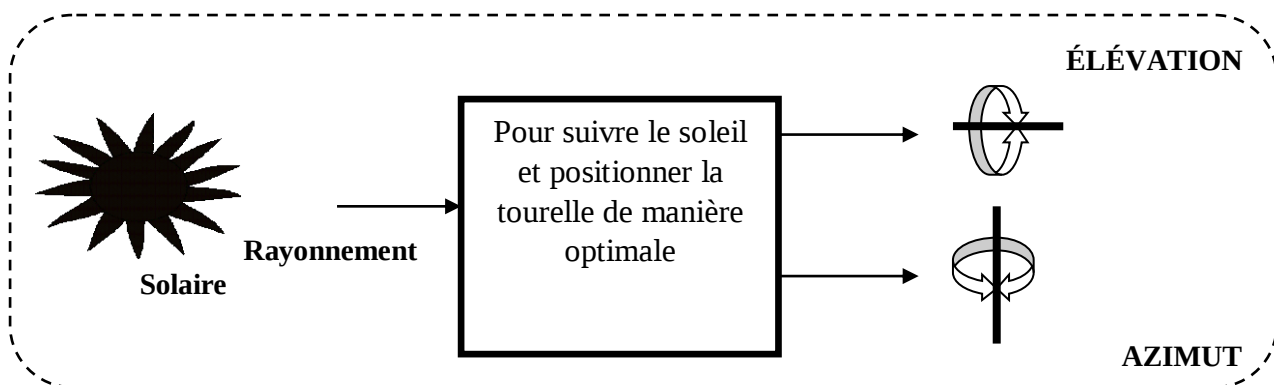


Figure III.1 : système générale de suiveur solaire.

III.2.1 Les types des suiveurs solaires

On distingue principalement deux grandes familles de suiveurs solaires : les passifs et les actifs qui comportent les suiveurs mono-axe et double axe.[12]

III.2.1.1 suiveurs passifs

Suiveurs passifs est constitué dans son architecture de deux tubes en cuivre montés sur les côtés Est et Ouest du panneau PV. Le tube de matière cuivre est rempli de de CFC, HCFC et fluides chimiques capable de se vaporiser à basse température. En effet, lorsque l'exposition au rayonnement solaire augmente la température d'un côté du panneau, le composé dans le tube en cuivre se vaporise. La partie gazeuse du composé occupe un plus grand volume interne, et sa partie liquide est décalée vers le côté ombragé (le plus lourd). [12]

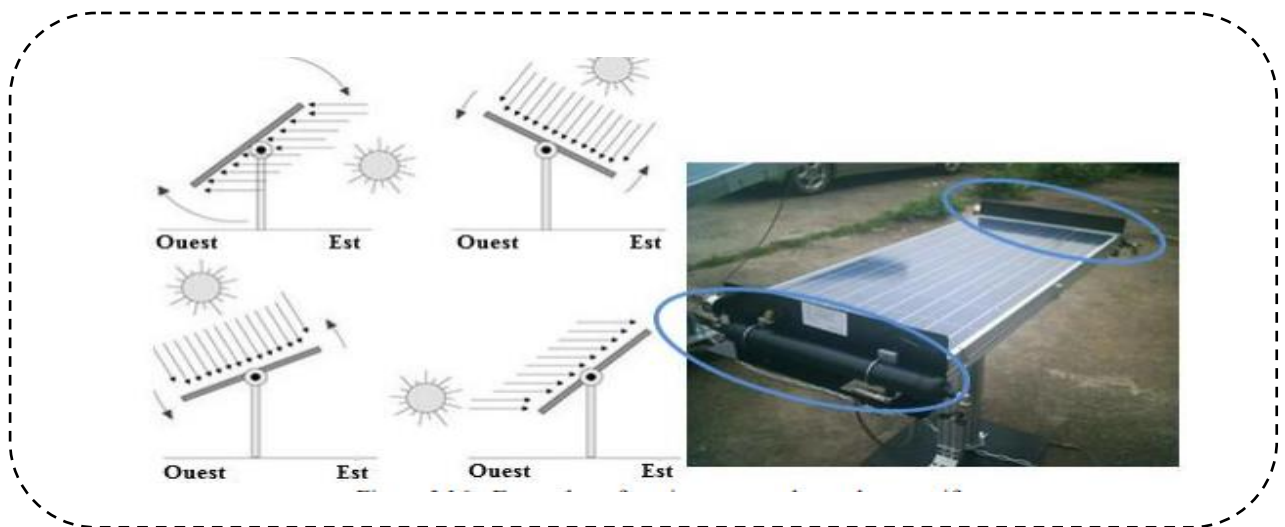


Figure III.2 : suiveur passif.

III.2.1.2 suiveurs actifs

Les suiveurs solaires actifs utilisent le principe de la détection de lumière, suivant la trajectoire solaire en cherchant à optimiser au maximum l'angle d'incidence du rayonnement solaire sur leur surface. Il existe deux types dans cette famille : les suiveurs mono-axe et double axe. L'avantage de ces derniers par rapports aux suiveurs passifs c'est qu'ils représentent une meilleure précision de suivi et ne nécessitent aucune intervention manuelle pour les ajuster.

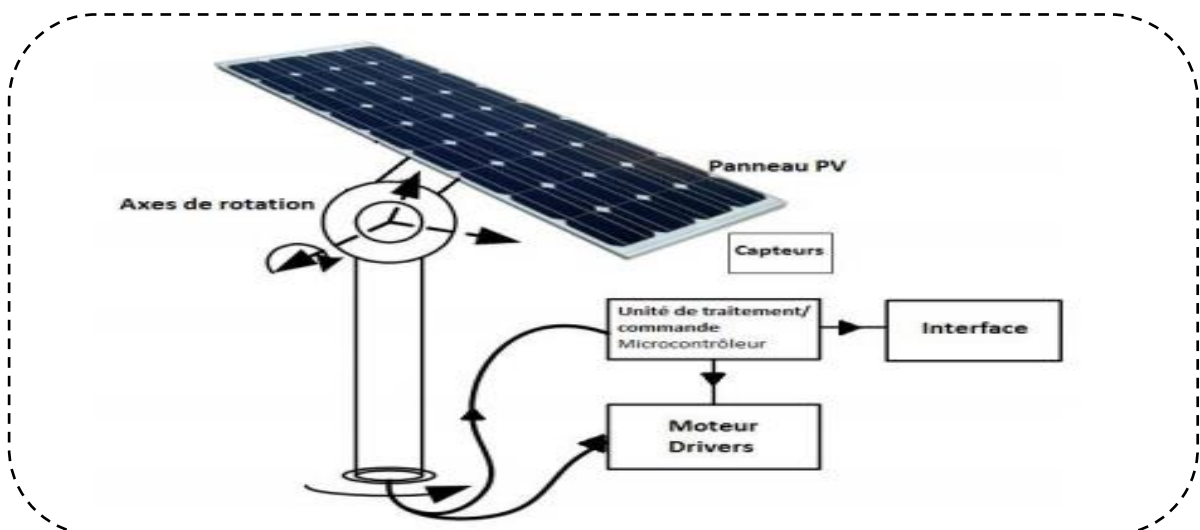


Figure III.3 : suiveur actif.

- ✚ **Le suiveur passif** : emploient le rayonnement des soleils pour chauffer gaz qui déplace le Traqueur à travers le ciel.
- ✚ **Les traqueurs actifs** : emploient les commandes électriques ou hydrauliques pour déplacer le traqueur.[12]

III.2.1.2.1 suiveurs mono-axe

En partant du principe général précédent, on retrouve le suiveur mono-axe qui permet une rotation selon l'axe d'azimut seulement, et qui est le plus souvent utilisé en raison de sa simplicité.

III.2.1.2.2 suiveurs double -axe

Pour assurer un suivi complet de la course solaire (en azimut et en zénith), on additionne, à l'architecture précédente, deux autres capteurs LDR pour couvrir les changements (Nord Sud) de la déclinaison solaire « δ » qui varie de $+23.45^\circ$ à -23.45° durant l'année.

Le principe est le même pour le suiveur double axe, il est basé sur la différence d'éclairement des quatre LDR

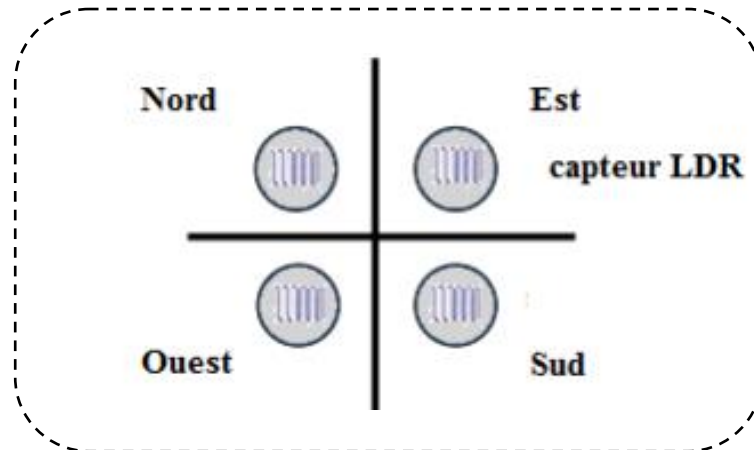


Figure III.4 : Vue d'en haut de la disposition des quatre capteurs LDR.

III.3 Principe de fonctionnement

Le système vise à orienter en temps réel les capteurs vers le Soleil, pour placer le panneau dans une position optimale par rapport à l'incidence du rayonnement solaire (perpendiculaire au rayonnement si possible), car tout au long de la journée et de l'année (selon les saisons) la position du soleil varie constamment et d'une manière différente selon la latitude. Cette adaptation en temps réel a pour effet de substantiellement augmenter la captation et production d'énergie.

Elle peut se faire sur deux axes : en azimut (d'est en ouest, à mesure de l'avancée de la journée) et en hauteur (selon la saison et, de nouveau, l'avancée de la journée). L'idéal est d'utiliser un traqueur à deux axes, mais il en existe aussi avec un seul (typiquement avec un suivi seulement en azimut, l'angle par rapport au sol étant fixé selon l'optimum local, qui dépend de la latitude).

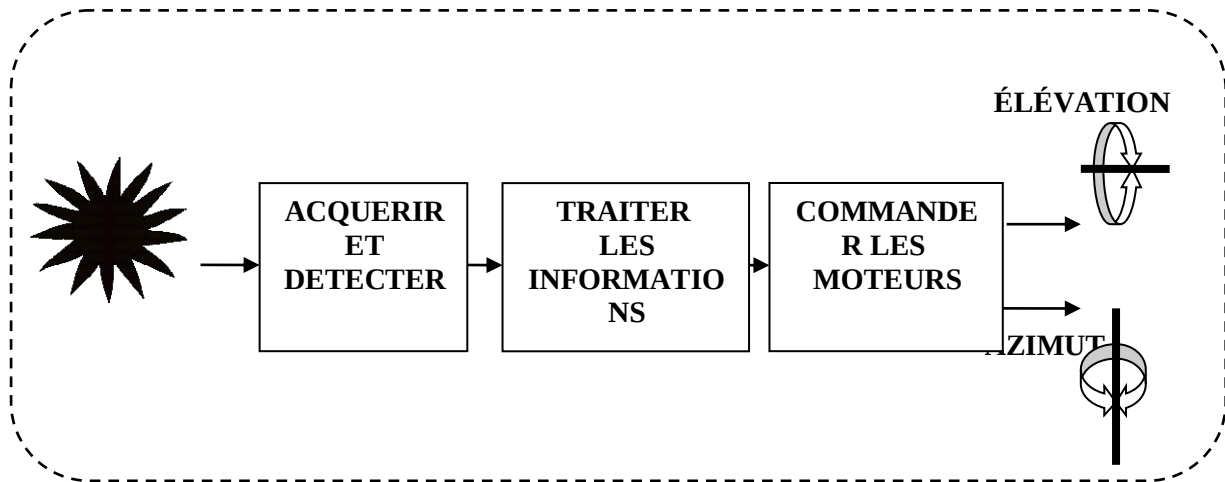


Figure III.5 : Principe général de la commande du suiveur.

III.4 les coordonnées horaires

- **La déclinaison solaire** : C'est l'angle formé par la direction de soleil et le plan équatorial terrestre. elle varie tout au long de l'année, entre deux valeurs extrêmes ($-23^{\circ}27'$ et $+23^{\circ}27'$ environ) et elle s'annule aux équinoxes de printemps et d'automne $\delta = 23.45 \sin(\frac{360}{365}(n - 81))$
- **Angle horaire** : 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 $H = 15(TSV - 12)$

n : le numéro du jour de l'année.

TSV : temps solaire varis. [13]

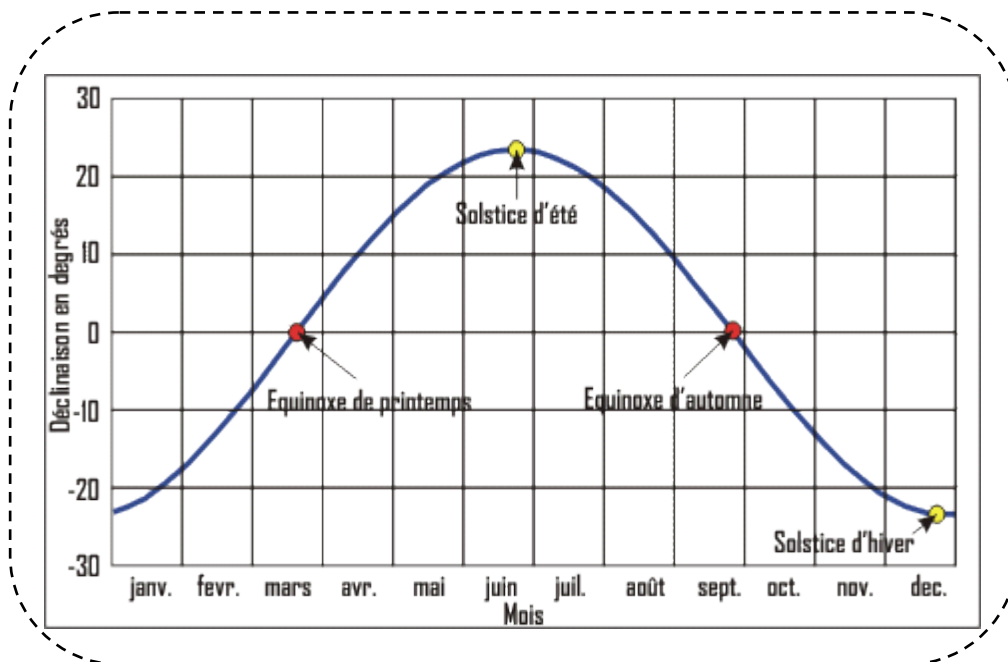


Figure III.6 : La déclinaison du soleil en fonction d'année.[14]

III.5 les coordonnées solaires

Pour un module situé en un lieu précis de la surface terrestre (latitude + longitude), la position du soleil dans le ciel, à un instant donné (date + heure), elle est exprimée par différents angles :

- **Angle d'AZIMUT** : C'est angle mesuré partir du sud avec la projection horizontale des rayons directs du soleil, dans un plan horizontal. $\alpha =$

$$\text{Arcsin}\left(\frac{\cos(\delta) \sin(H)}{\cos(h)}\right)$$

- **Angle de ZÉNITH (hauteur)**: C'est l'angle entre la verticale d'une surface est un rayon du soleil. $h = \text{Arcsin}(\sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(H))$ [14]

III.6 Orientation et inclinaison

Une fois identifiée le type de toiture et les possibilités d'intégration, l'orientation et l'angle d'inclinaison des panneaux de l'installation doivent être analysés.

La localisation de l'installation sur le toit est très importante. Idéalement, elle doit être orientée (à nos latitudes) plein sud, avec un angle d'inclinaison de 35°. Le système présente toutefois un rendement suffisant entre l'ouest et l'est, avec un degré d'inclinaison compris entre 20° et 60°. Un écart par rapport à la situation idéale implique donc une perte de rendement de quelques pourcents seulement (voir tableau ci-dessous). [14]

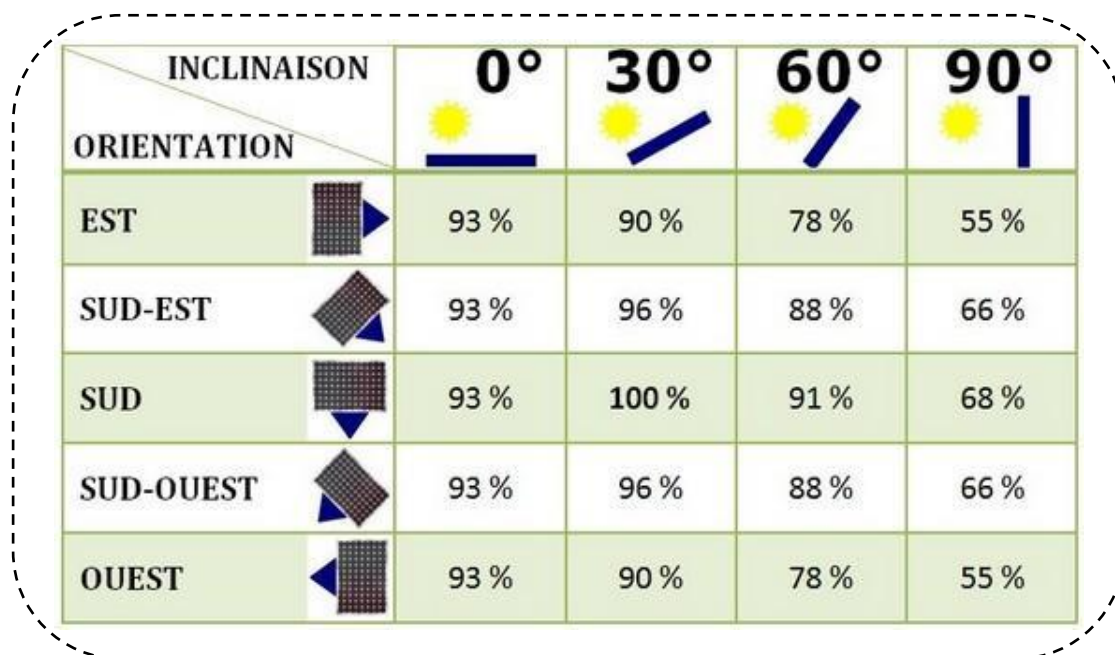


Figure III.7 : orientation et inclinaison d'un panneau PV.

Le disque solaire représenté dans la figure (III.4) qu'exprime cette perte de rendement d'une autre manière en montrant l'irradiation solaire globale sur un plan incliné à Uccle en fonction de l'orientation et de l'inclinaison. Le facteur de correction (**FC**) y est également exprimé en %. Ce facteur va du jaune (100%) au bleu (30%).

On remarque qu'il y a une zone assez importante autour de ce point où l'orientation et l'inclinaison n'ont pas trop d'influence sur l'irradiation : d'Ouest / Sud-Ouest à Est / Sud Est avec des angles d'inclinaison compris entre 10° et 55°, la perte d'énergie reste inférieure à 10% en base annuelle. Cela s'explique par la grande importance de l'irradiation diffuse sous nos latitudes : en Belgique, environ 60% de l'énergie solaire est reçue sous forme de rayonnement diffus. [14]

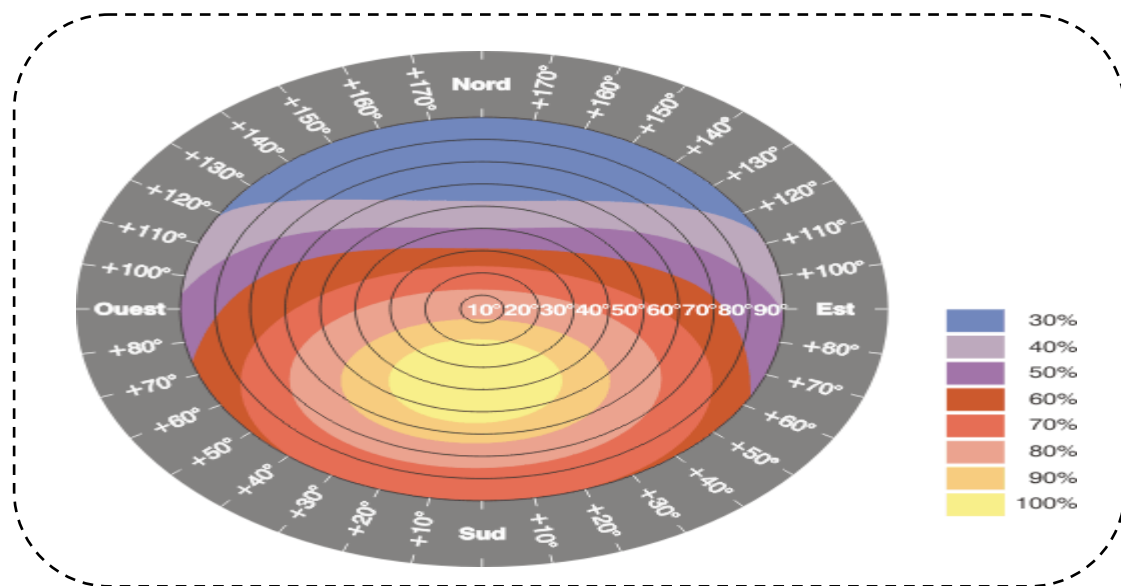


Figure III.8 : Irradiation annuelle relative sur le plan incliné à Uccle en fonction de l'orientation et de l'inclinaison

Différentes conceptions des traqueurs solaires sont proposées, et le fonctionnement de la plupart dépende des capteurs (avec une boucle fermée), et du contrôle de temps (avec une boucle ouverte).

L'ancien type de traqueur exige que la position du soleil soit déterminée par des capteurs de Photocellules, et la précision de ce type de commande dépend du nombre de capteurs dans tous les sens, tandis que le plus récent comporte la détermination locale de (latitude et longitude) du site de l'installation, ainsi que du jour et la période de l'année à l'aide des équations qui décrivent la voie de piste solaire dans le ciel, qui bien peut être estimé.

Des traqueurs solaires peuvent être divisés en deux types principaux selon le type de la commande et de la sensibilisation ou du système de positionnement. [14]

III.7 Les avantages de système suiveur solaire

- ✚ Parce que la position du soleil dans le ciel va progressivement changer au cours de la journée et au fil des saisons tout au long de l'année utilise le système de suivi du soleil pour augmenter les investissements dans l'énergie photovoltaïque
- ✚ Aides financières égales aux panneaux fixes
- ✚ Augmente le nombre de cas d'implantation quand les solutions classiques ne sont pas possibles
- ✚ Peut valoriser les espaces de terrains perdus

III.8 Intérêt des panneaux solaire photovoltaïques mobiles par rapport aux panneaux fixes

Au cours de la journée, le soleil se déplace continuellement, alors qu'un générateur Photovoltaïque est fixe dans sa position, perdant ainsi une considérable quantité d'énergie, qui pourrait être disponible.

Dans une installation fixe qui, pour en optimiser le rendement est exposé au Sud, l'énergie rendue par les modules **PV** est maximale seulement à midi comme indiqué sur la figure **(III-8)**. Pour cela si les modules **PV** sont toujours orientés vers le soleil, c'est comme s'il y avait constamment la condition correspondante à midi, la puissance générée est toujours celle maximale.

Les modules photovoltaïques placés sur des suiveurs de soleil ont un rendement énergétique qui augmente de manière appréciable par rapport aux installations fixes.

Les suiveurs de soleil proposés dans notre gamme offrent un suivi de la trajectoire du soleil suivant un axe motorisé et un axe saisonnier manuel. Ils engendrent ainsi une augmentation de la production moyenne d'électricité de l'ordre de 35%.**[14]**

III.9 Présentations comparées pour un système fixe et avec suiveur

Le soleil voyage à travers 360 degrés est-ouest par jour, mais du point de vue de toute fixe.

L'emplacement de la partie visible est de 180 degrés pendant une période de 1/2 jour. Effets d'horizon locaux réduire cela un peu, ce qui rend le mouvement effectif d'environ 150 degrés. Un panneau solaire dans une orientation fixe entre l'aube et le coucher du soleil se verra un mouvement de 75 degrés sur de chaque côté, et ainsi, selon le tableau ci-dessus, perdra 75% de l'énergie dans la matinée et le soir. La rotation des panneaux à l'est et à l'ouest peut aider à récupérer ces pertes.

Le soleil se déplace également à travers 46 degrés nord-sud au cours de la période d'une année. Le même ensemble de les panneaux placés au milieu entre les deux extrêmes locaux verront donc le soleil se déplacer 23 degrés de chaque côté, causant des pertes de 8,3% Un traquer qui représente à la fois le quotidien et mouvements saisonniers est connu comme un traquer à deux axes.

L'énergie apportée par le faisceau direct diminue avec le cosinus de l'angle entre la lumière entrante et le panneau. Le tableau no. 2.1 montre la puissance directe perdue (%) due à désalignement.[15]

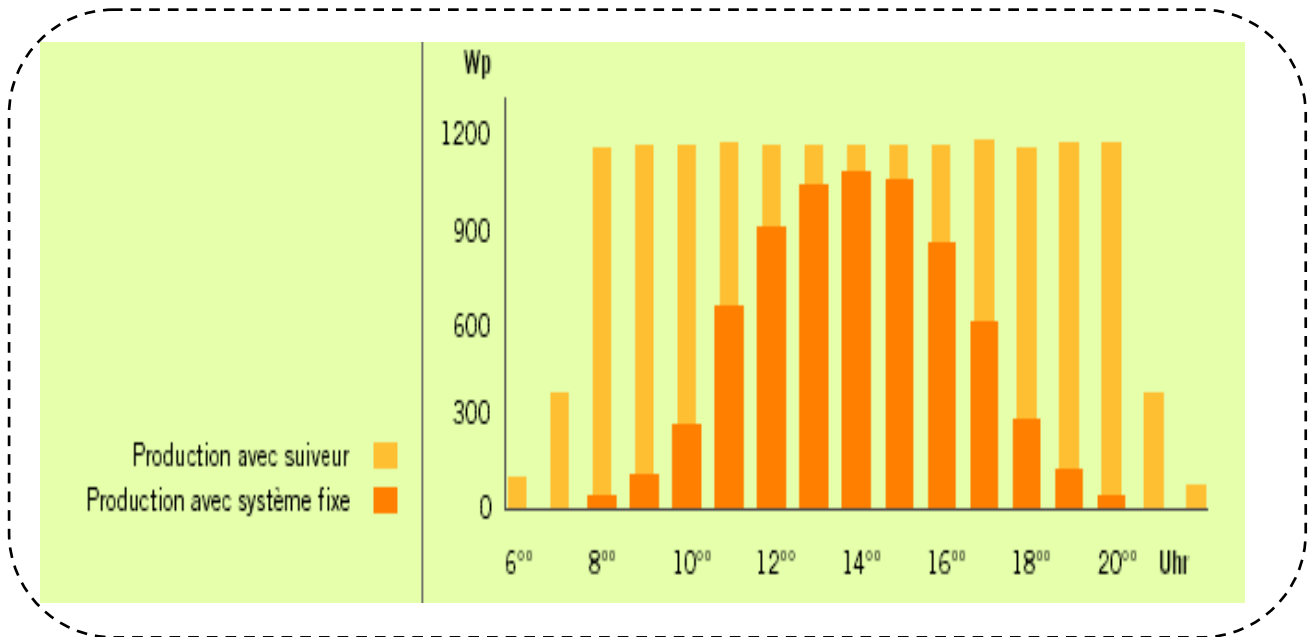


Figure III.9 : diagramme de comparaison entre la production avec suiveur et la production avec système fixe.

III.10 conclusion

L'un des rôles de notre système de suivi est de contrôler le mouvement des suiveurs de Sun par un programme informatique. Où le traquer est dirigé pour suivre le soleil automatiquement après un certain chemin. L'importance de ce système est de capturer la quantité maximale de rayonnement solaire Le système de suivi du soleil donne des résultats très satisfaisants par rapport aux systèmes fixes.

Chapitre IV:

" Application, Test & Résultat "

IV.1 Introduction:

Ce chapitre est la plus important de notre mémoire qui la simulation et réalisation du système suiveur .Notre réalisation se décompose en quatre parties principales :

- + La partie électronique
- + La partie informatique
- + La partie simulation
- + Test et résultat

Donc, le bon fonctionnement de notre système se base essentiellement sur l'ensemble de ces parties.

IV.2 Objectif du travail :

Notre projet porte sur l'étude et la réalisation d'un prototype d'un suiveur solaire double axe pour une cellule photovoltaïque, l'orientation de ce dernier vers l'est et l'ouest et nord et sud pour capter le maximum d'énergie solaire dans toute la journée. Ce système est commandé par carte Arduino UNO d'un microcontrôleur **ATMeg328**.

IV.3 La partie électronique :

IV.3.1 Photorésistance (LDR):

Une photorésistance (L.D.R en l'anglais « Light Dependent Resistor») est un dipôle qui diminue sa résistance lorsqu'il est éclairé. Placé dans un circuit fermé, il modifie l'intensité du courant sous l'action de la lumière. [15]

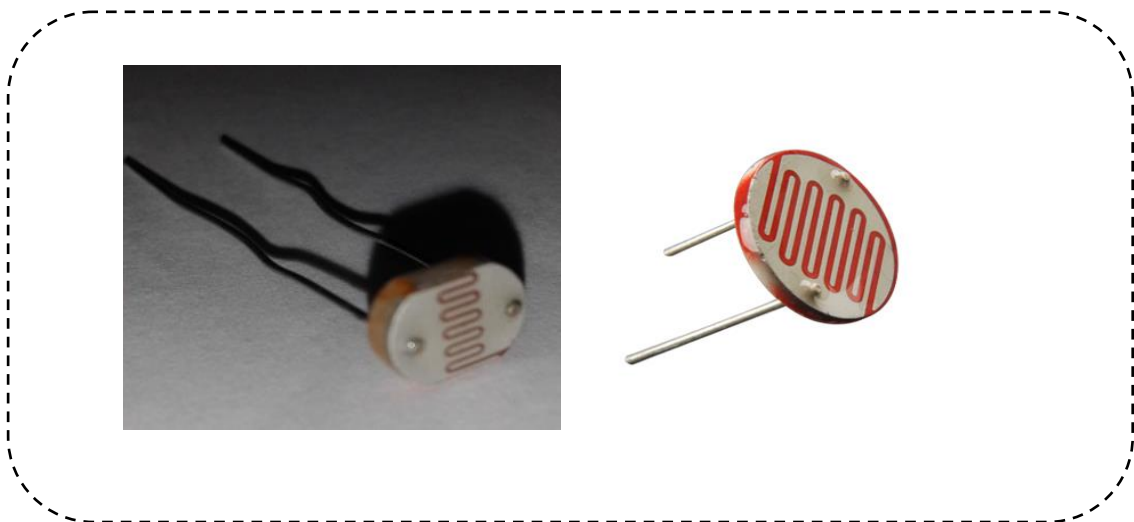


Figure IV.1 Photorésistance (LDR):

IV.3.1.1 Principe de fonctionnement :

Un cristal à semi-conducteur à basse température contient peu d'électrons libres. La conductivité du cristal est très faible, proche de celle d'un isolant. Lorsque la température du cristal augmente. De plus en plus d'électrons qui étaient immobiles dans les liaisons covalentes s'échappent et peuvent participer à la conduction.

A température ambiante si le même cristal semi-conducteur est soumis à une radiation lumineuse, l'énergie apportée par les photons peut suffire à libérer certains électrons utilisés dans les liaisons covalentes entre atomes du cristal. Plus le flux lumineux sera intense, plus le nombre d'électrons libres pour assurer la conduction sera grand, ainsi la résistance de la LDR est inversement proportionnelle à la lumière reçue. La sensibilité dépend de la fréquence de la radiation lumineuse. Pour convertir cette variation de la lumière en une tension on utilise le circuit diviseur de tension. [15]

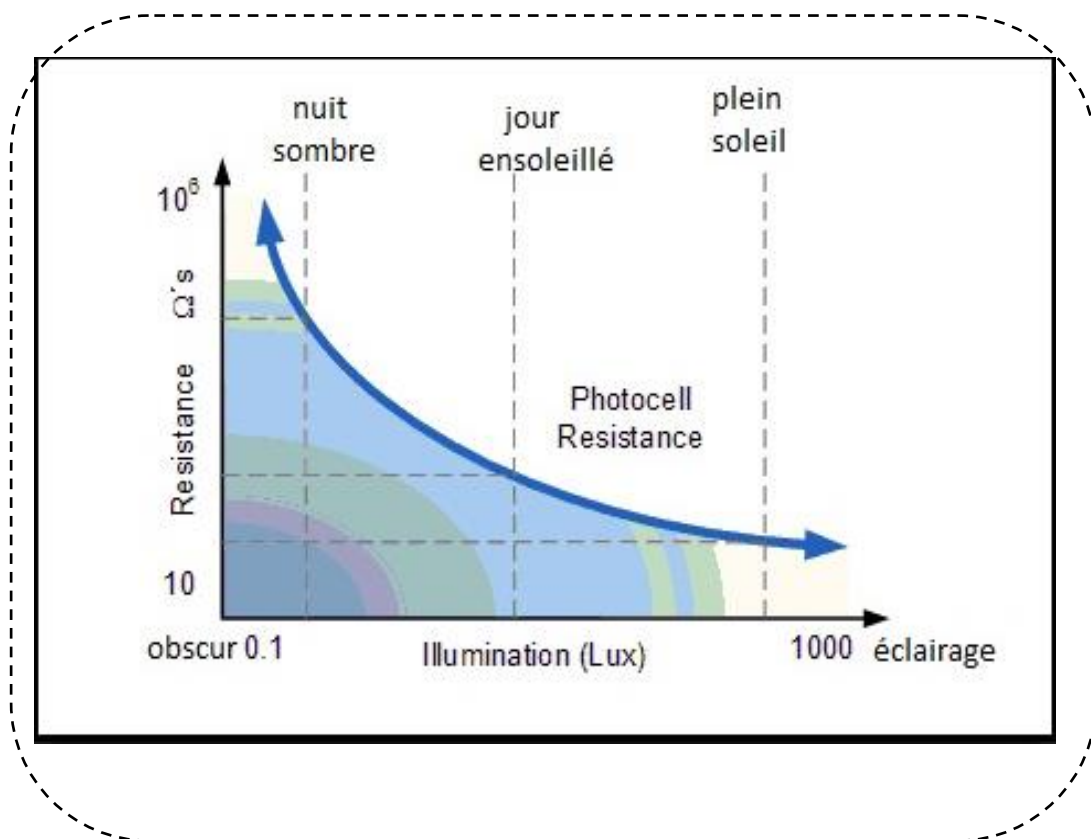


Figure IV.2 : Caractéristique d'une photorésistance

IV.3.1.2 Réalisation du capteur :

Le montage est basé sur un diviseur de tension :

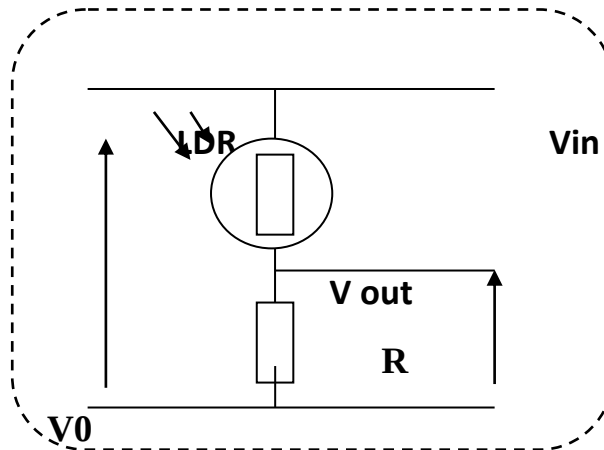


Figure IV.3: Branchement de résistance LDR en diviseur de tension.

$$V_{out} = \left(\frac{R}{R + R_{LDR}} \right) \cdot V_{in}$$

- **V_{in}**: Tension d'alimentation du capteur (5v).
- **R LRD** : Résistance du LDR.
- **V_{out}** : Tension de la sortie du capteur.
- **R** : Résistance en (k Ω).

IV.3.2 Le servomoteur :

Un servomoteur est un système qui a pour but de produire un mouvement précis en réponse à une commande externe, C'est un actionneur (système produisant une action) qui mélange l'électronique, la mécanique et l'automatique.

Un servomoteur est composé:

- ✚ d'un moteur à courant continu.
- ✚ d'un axe de rotation.
- ✚ un capteur de position de l'angle d'orientation de l'axe (très souvent un potentiomètre)
- ✚ une carte électronique pour le contrôle de la position de l'axe et le pilotage du moteur à courant continu. [16]

Un servomoteur est constitué de trois fils :

Marron : masse.

Rouge : V_{cc} (4.8 à 6 v).

Jaune : signal de commande.



Figure IV.4 Servomoteur SG90.

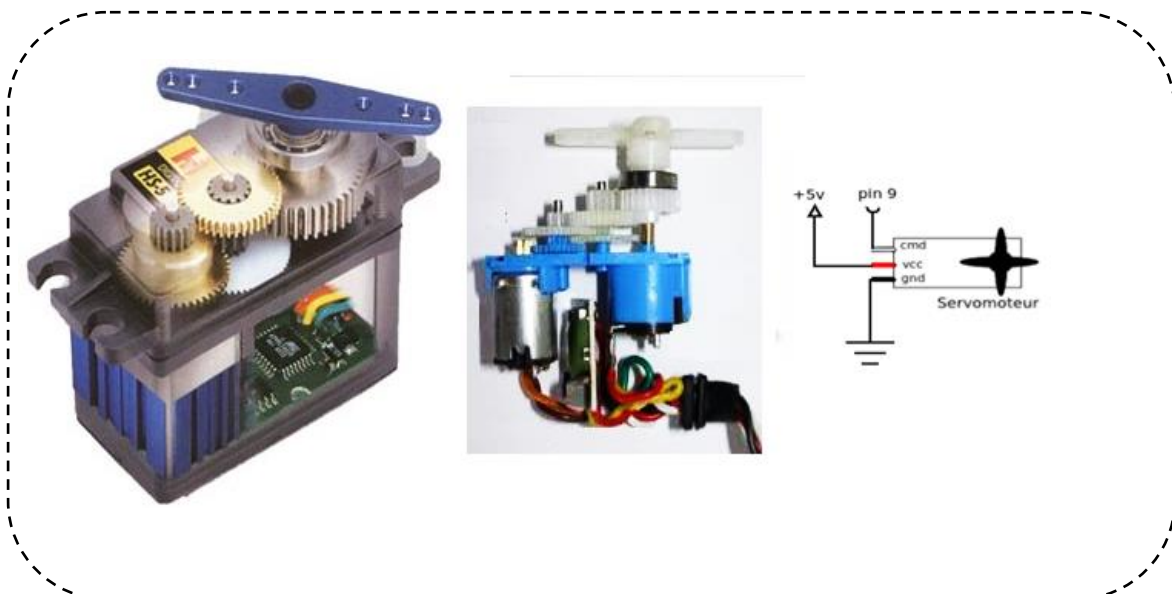


Figure IV.5 Brochage de servomoteur

IV.3.2.1 commande des servomoteurs :

Le signal de commande d'un servomoteur est un signal PWM de fréquence 50Hz et dont le niveau haut doit être entre 1 et 2ms (en théorie) comme la montre la **figure (IV.7)**.

1.0 ms → 90° en angle de sortie

1.5 ms → 0° en angle de sortie

2.0 ms → en angle de sortie

PWM (Pulse With Modulation) sert à commander le signal d'un servomoteur. Mais, à la différence des moteurs à courant continu, il est la durée de l'impulsion positive qui contrôle la position, plutôt que de la vitesse, de l'arbre du servomoteur. La valeur de l'impulsion neutre dépend de l'asservissement maintient l'arbre du moteur d'asservissement en position médiane. L'augmentation de la valeur de l'impulsion fera le tour du servomoteur dans le sens horaire, et une impulsion plus courte passe dans le sens antihoraire de l'arbre.

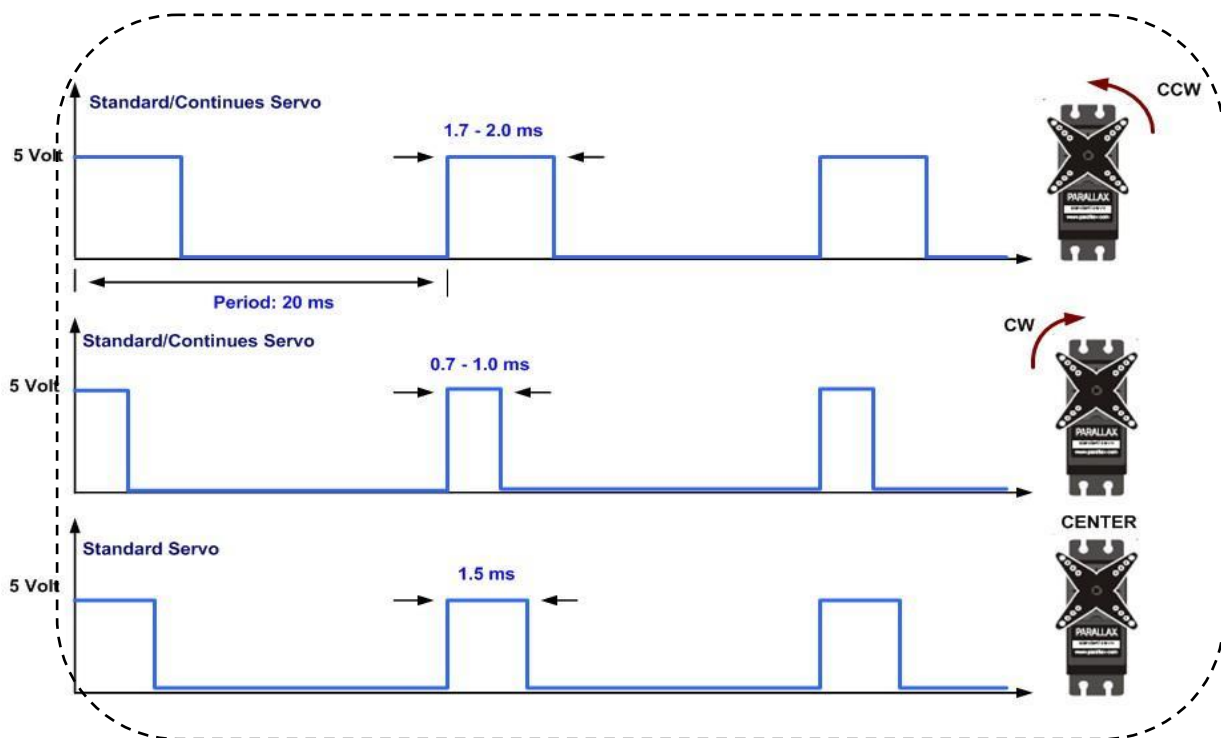


Figure IV.6 Déplacement angulaire d'un servomoteur

IV.3.3 Le circuit de commande :

Ce système est commandé par un circuit programmable dit « Arduino UNO » d'un microcontrôleur **ATMeg328**, l'avantage de circuit est de minimiser la surface des cartes électriques donc on minimise l'utilisation des quantités des composants électroniques.

IV.3.3.1 Arduino UNO :

Le modèle UNO de la société ARDUINO est une carte électronique dont le cœur est un microcontrôleur ATMEL de référence ATmega328. Le microcontrôleur ATmega328 est un microcontrôleur de 8bits de la famille AVR dont la programmation peut être réalisée en langage C. [17]

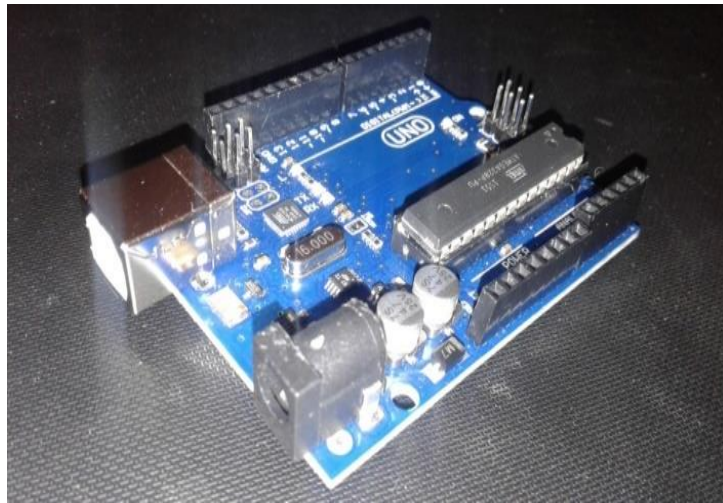


Figure IV.7 La carte Arduino UNO

IV.3.3.1.1 caractéristique de carte Arduino UNO :

- Tension d'alimentation interne (5V).
- Tension d'alimentation (recommandée) 7 à 12V, (limites) 6 à 20V.
- Entrées/sorties numériques : 14 dont 6 sorties PWM.
- Entrée analogique 6
- Courant max par broches E/S=40mA.
- Courant max sur sortie 3.3V=50mA.
- Mémoire flash 32 KB dont 0.5 KB utilisée par le boot loader.
- Mémoire SRAM 2 KB.
- Mémoire EEPROM 1KB.
- Fréquence l'horloge = 16MHz.
- Dimensions = 68.6mm x 53.3mm. [15]

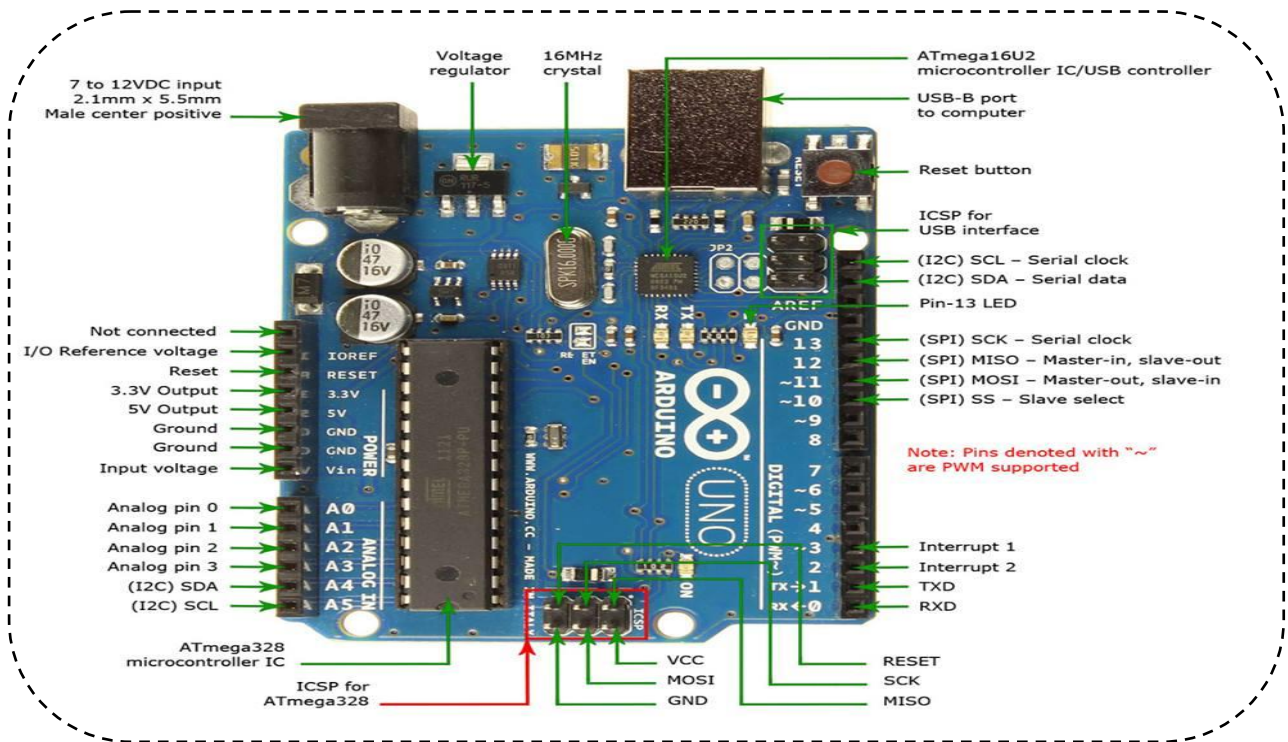


Figure IV.8 caractéristique de carte Arduino UNO

➤ Le microcontrôleur

Le microcontrôleur utilisé sur la carte Arduino UNO est un microcontrôleur de type **ATMEL - ATmega328**. C'est un microcontrôleur ATMEL de la famille AVR.

- Processeur 16 MHz
- Memoir: 32 KB Flash- 2 KB SRAM -1 KB EEPROM.
- E/S : 14 Digitales (6PWM), 6 Analogiques. [17].

IV. 4 Partie informatique :

IV. 4.1 L'organigramme :

Pour faciliter la compréhension du programme, on a essayé de le décrire par un organigramme ,car celui-ci possède l'avantage d'être compréhensible.

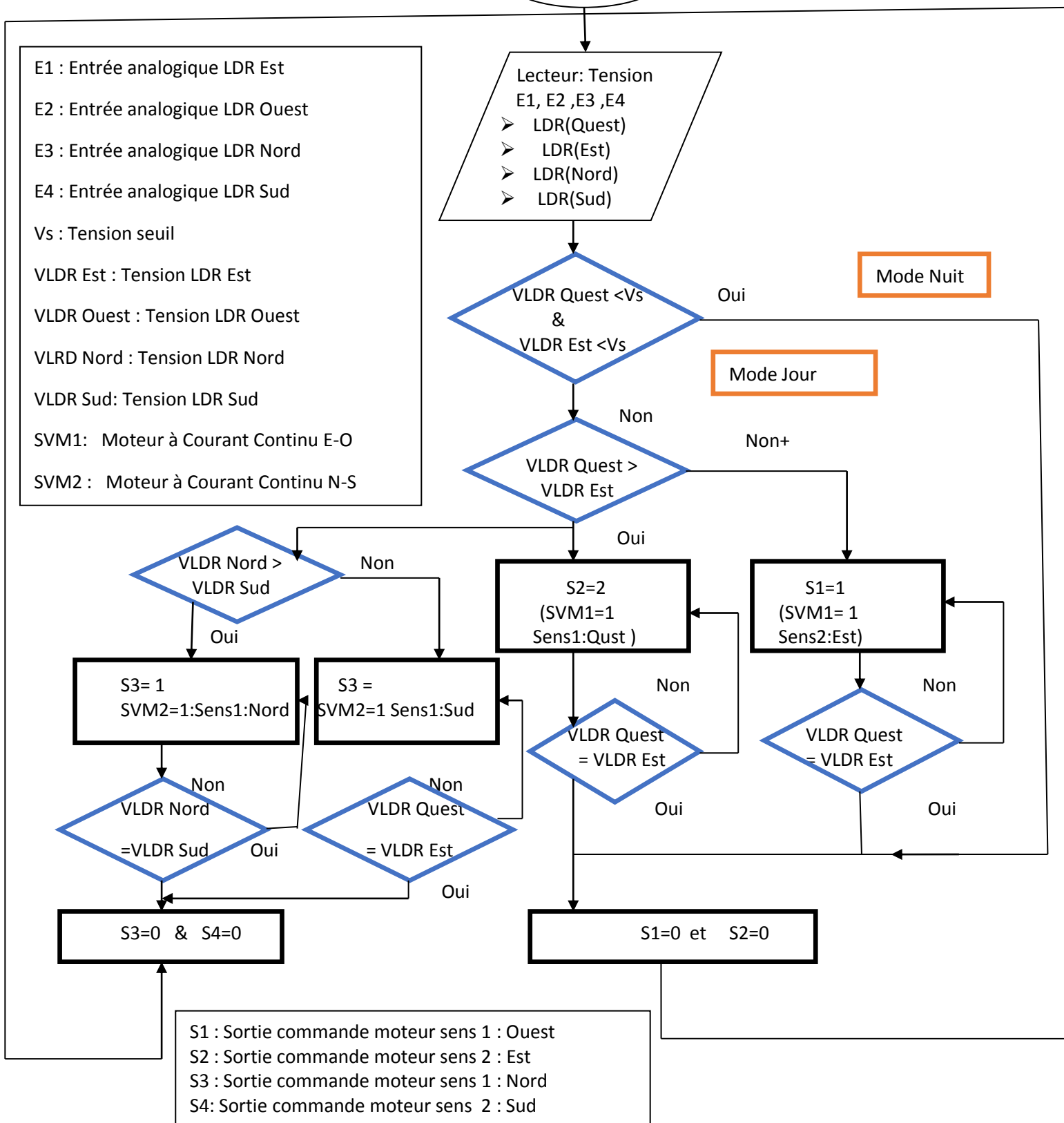


Figure IV.9 L'organigramme de système.

IV.4.2 programmation:

La carte **Arduino UNO** est une carte programmable, elle peut être programmée avec le logiciel (**Arduino1.6.9**)

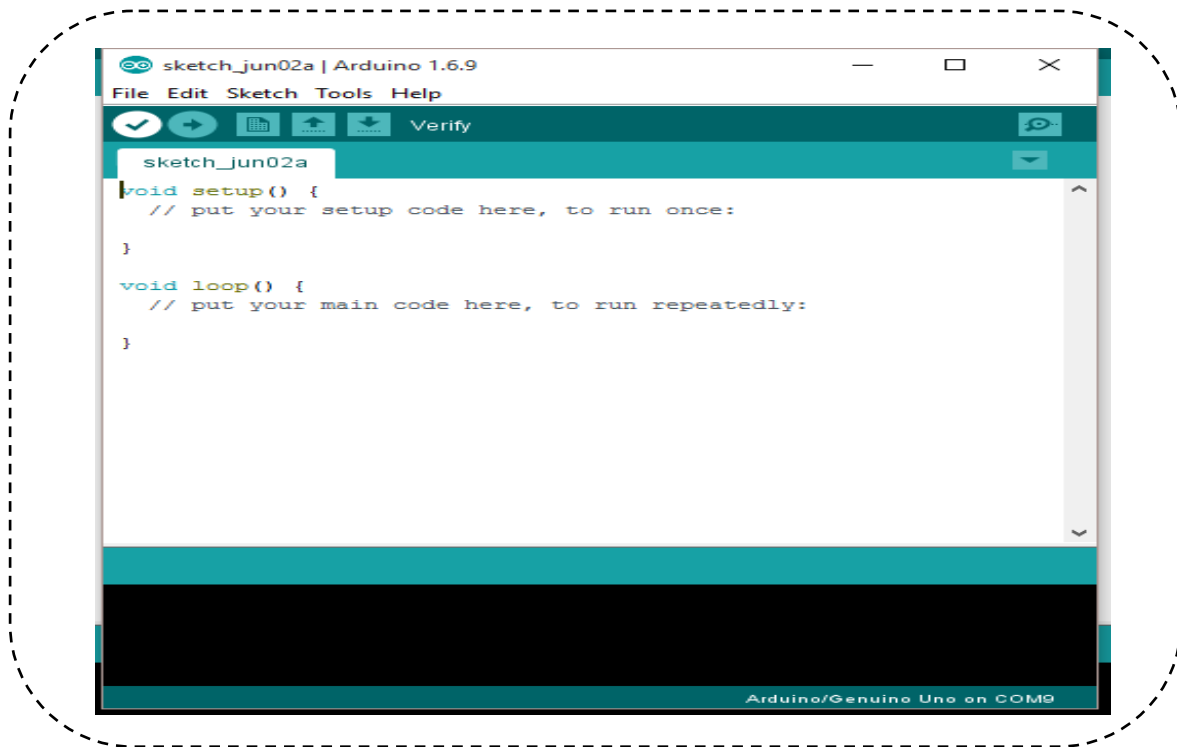


Figure IV.10 : Interface du logiciel Arduino.

IV.5 Partie simulation :

Avant de commencer de réalisation, nous avons choisi de lancer la simulation de notre système sur le logiciel **PROTEUS-ISIS** pour tester leur fonctionnement.

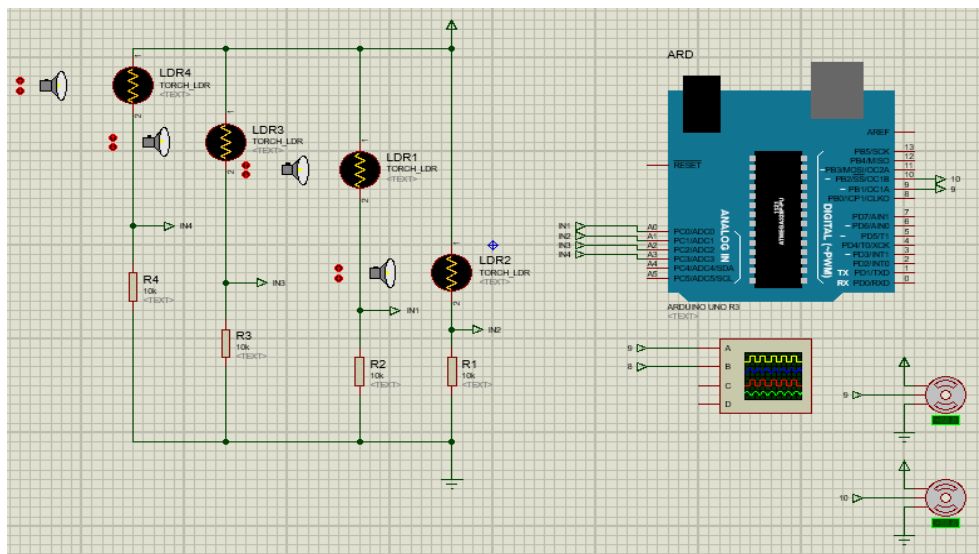


Figure IV.11 : le schéma de système sous PROTEUS.

IV.5.1 Principe de fonctionnement :

Les capteurs de lumières LDR envoient un signal électrique aux ports analogiques RA0/1 du microcontrôleur. Celui-ci lit le signal qui peut être $<2,63V$ pendant la nuit et $>2,63V$ dans le cas du jour. Si c'est ce dernier cas qui se présente, le PIC envoie un signal au circuit de puissance à travers les ports RB 0/1/2/3. Ce dernier provoque la rotation du moteur dans le sens de la LDR la moins éclairée. Deux moteurs à courant continu sont employés pour une rotation en monture azimutale et zénithale. L'amplitude et la durée de l'impulsion de la commande sont fixées durant la phase de programmation, elles dépendent du panneau PV utilisé et de la motorisation choisie (poids du module PV, couple moteur (N.m)).

IV.5.2 Circuit de protection :

Ce circuit est constitué de 4 résistances valant 1k ohm chacune de ces résistances est collée avec l'un des LDR afin de les protéger aussi relié avec les entrees analogique d'Arduino A0, A1, A3, A4,. En plus d'une paire de résistance variable, pour contrôler la vitesse et l'incertitude des deux servomoteurs directement lié à A4, A5 d'Arduino.

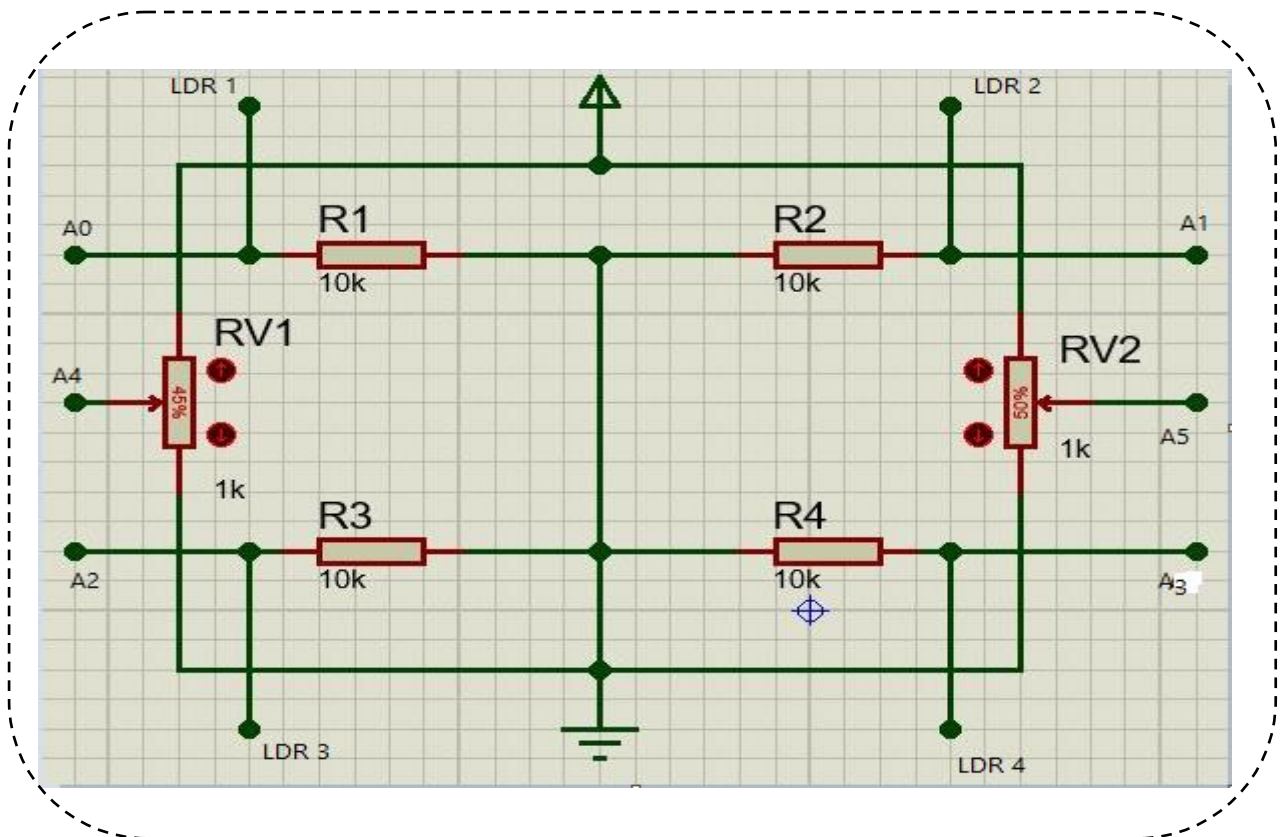


Figure IV.12 circuit de protection sous ISIS PROTEUS

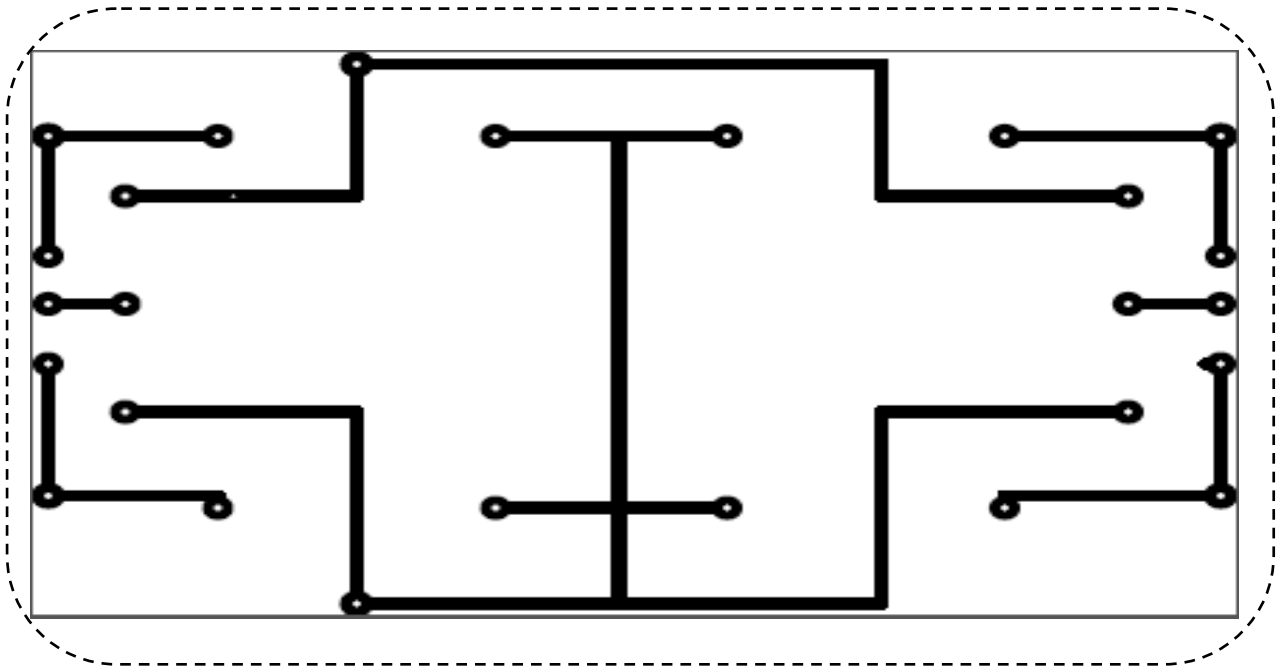


Figure IV.13 Typon d'un circuit de protection

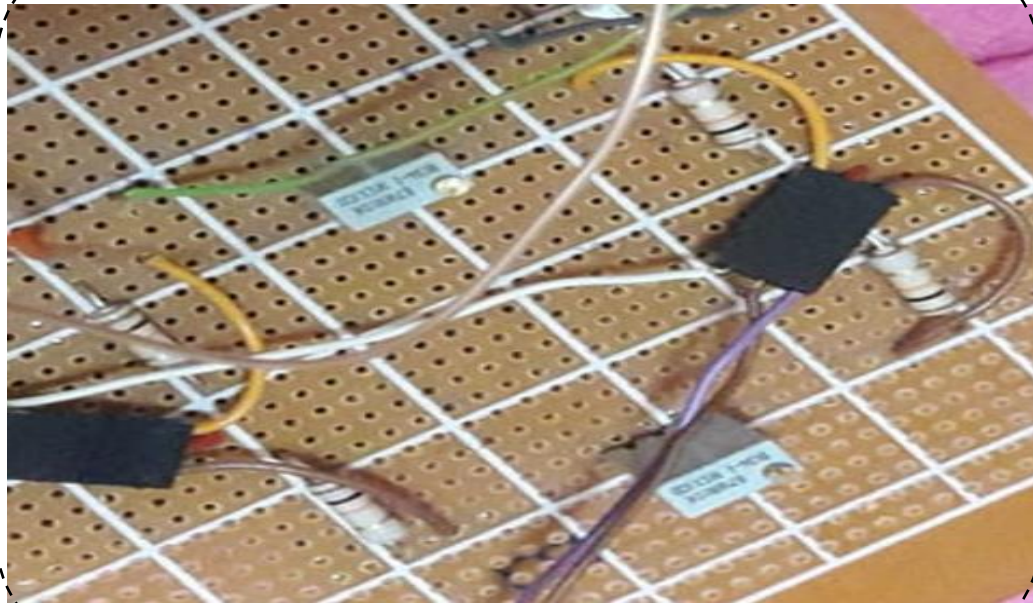


Figure IV.14 circuit imprimé d'un circuit de protection

IV.6 Test et résultat :

IV.6.1 Comparaison entre un système suiveur et fixe :

A) Système fixe:

Nous définissons la cellule solaire sur un angle d'inclinaison $\Theta = 25^\circ$



Figure IV.15 les valeurs de tension d'un système fixe

B) Système suiveur:

Dans ce cas, nous mesurons la tension produite par la cellule solaire en la traçant travers trois angles.



Figure IV.16 les valeurs de tension d'un système suiveur

Résultat :

Grâce à des expériences, nous tirons le traquer offre plus de sortie que le statique car les rayons lumineux le long de la journée sont verticaux sur la cellule solaire.

IV.6.2 Dimensionnement:

Notre projet se compose de plusieurs parties cohérentes les unes avec les autres, la taille de chaque pièce joue un rôle important dans le bon travail du traquer et élimine les différents problèmes tels que (l'équilibre, le poids et l'espace), nous devons donc expliquer les dimensions de chaque pièce.

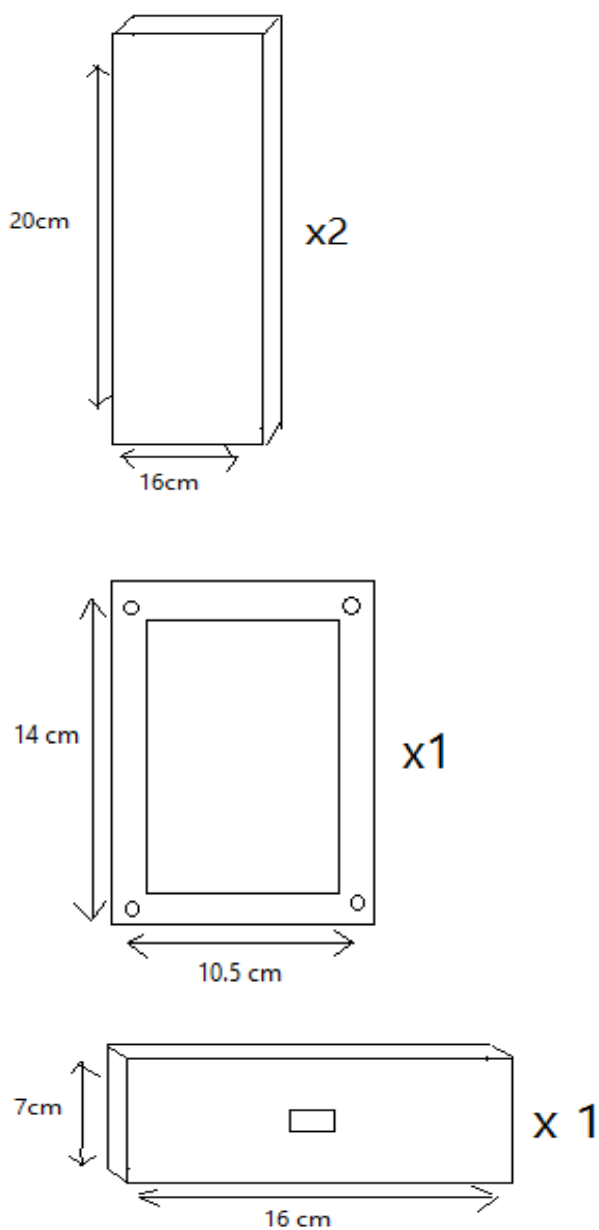


Figure IV.17 Dessin des composants du système.



Figure IV.18 la réalisation finale de notre système.

IV.7 Conclusion:

Dans ce chapitre. La réalisation du suiveur de soleil nécessite un bon choix du composants électronique utilise , et ce à travers une simulation en temps réelle sous l'environnement logiciel .Nous avons énuméré les démarches suivies pour la programmation et l'implémentation.

Dans ce même chapitre on a effectué des tests par lampe électrique, les résultats ont été magnifique et notre système suit la lumière avec fidélité.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Dans une installation photovoltaïque, un système de poursuite solaire se révèle important pour collecter le maximum d'énergie. Pour les modules PV à base de concentrateurs, où les rayons solaires doivent être constamment perpendiculaires au panneau, un système de poursuite solaire est indispensable. L'objectif de notre travail a porté sur l'élaboration d'une technique active de suivi de la trajectoire solaire durant toute l'année

Pendant ce projet, les signaux de commande générés ont été simulés à l'aide du logiciel ISIS.

Avant que nous ayons testés le fonctionnement de notre structure, nous avons trouvés plusieurs problèmes en premier le choix de capteur et son emplacement. Nous avons toujours un problème de choix des composants.

Notre grand problème est dans les premiers tests, c'est le problème du capteur, même que les quatre capteurs sont dans le même éclairage mais ses sorties sont déficientes.

A cause de ce problème la précision de notre suiveur est très mauvaise, nous avons réglés ce problème.

Ce projet m'a permis d'approfondir et d'enrichir mes connaissances acquises durant la formation professionnelle, espérant bien qu'il sera appliqué dans une centrale de production électrique solaire réelle.

Bibliographie

Bibliographié

[1]: Jean jacques Beziane (18 Nov 2012) – l'énergie solaire

[2]:Thomas B. Greenslade, Jr., « Heliostats », Jules-Célestin Jamin — « Cours de physique de l'École polytechnique. Tome 3 - Fasc. 2 » Gauthier-Villars et fils (Paris) - 1885-1906

[3]: cellules_photovoltaiques.odt

[4]:A.chovet , P.Masson. physique des semi-conducteurs. Ecole polytechnique, universitaire de Marseille,2004/2005. P19.

[5]: MORNAY Thomas, Les cellules photovoltaïques, Classes préparatoires CPE Institution des Chartreux Année 2004-2005. P 03.

[6]: <https://www.les-energies-renouvelables.eu>

[7]: Méthode de Dimensionnement des Systèmes Photovoltaïques pour l'habitat

[8]:FOGELMAN & Régis MONTLOIN, « Installations Photovoltaïques dans l'habitat isolé » livre édité par : EDISUD, 1983.

[9]:Anne LABOURET et Michel VILLOZ, « Energie Solaire Photovoltaïque », livre édité par : DUNOD), 2006.

[10]:P.Basore, PC-1D Installation Manuel and Users Guide Version 3.1 report sand 91-0516. UC-274 Unlimited Release Printed May 1991.

[11]:Mr. ABDERREZEK MAHFOUD. " Modélisation des cellules solaires tandem à couches minces et à haut rendement ", P 97-98

[12]:B.RABEH et D. AYOUB « Conception et Réalisation d'un Suiveur Solaire Bi-axial à Base De capteurs de lumière » -mémoire Master professionnel – Université Kasdi Merbah –électronique- Ouargla 2015/2016.

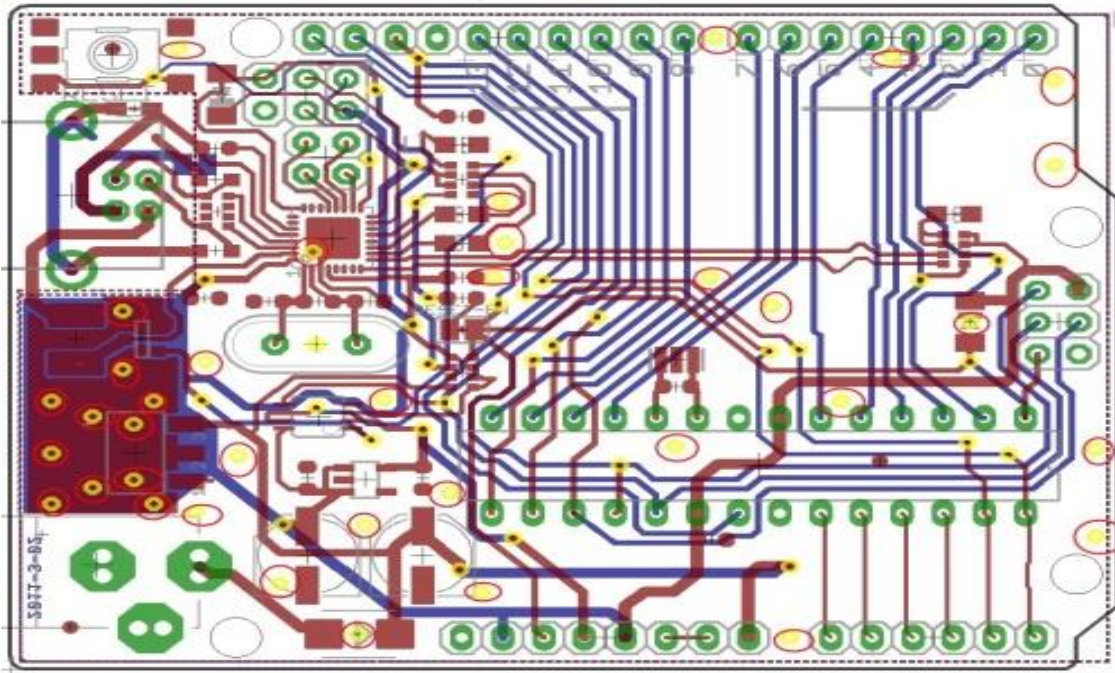
[13]:MEKRELOUF Ali et BENYAMINA ABDERRAHMEN « étude et réalisation d'un système suiveur solaire à deux axes » -Université de HASSIBA BEN BOUALI – CHLEF , 2011.

[14]: Professeur Cheknane Ali- Docteur Merad née Mesri Mokhtaria. « Introduction au gisement solaire algérien Théorie et applications ».Université Amar Telidji – Laghouat.

[15] :ISTIA. « carte ARDUINO UNO Microcontrôleur ATMega328 ».

[16] :<https://www.supinfo.com/articles/single/296-qu-est-ce-qu-servomoteur> le 30/05/2018 a 18:08

Annexe



Typen de carte Arduino

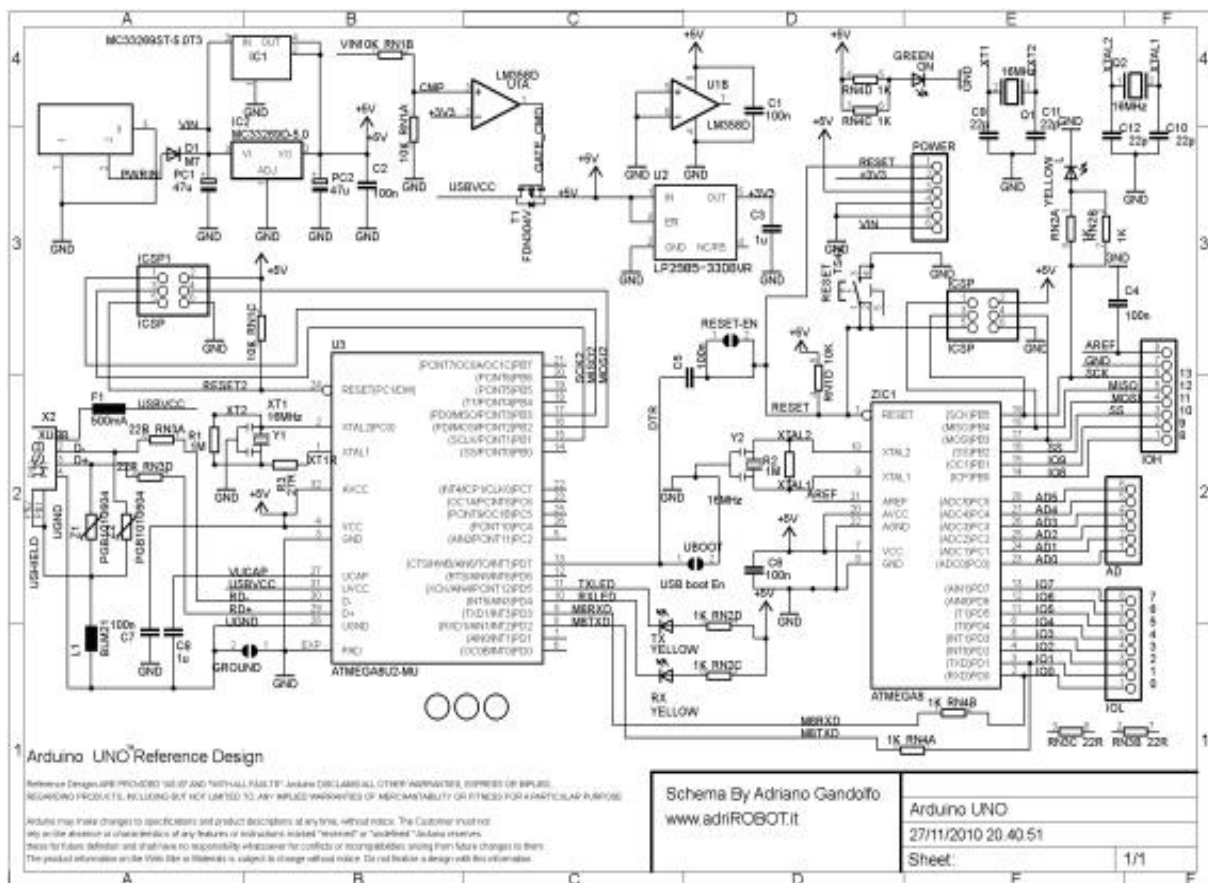
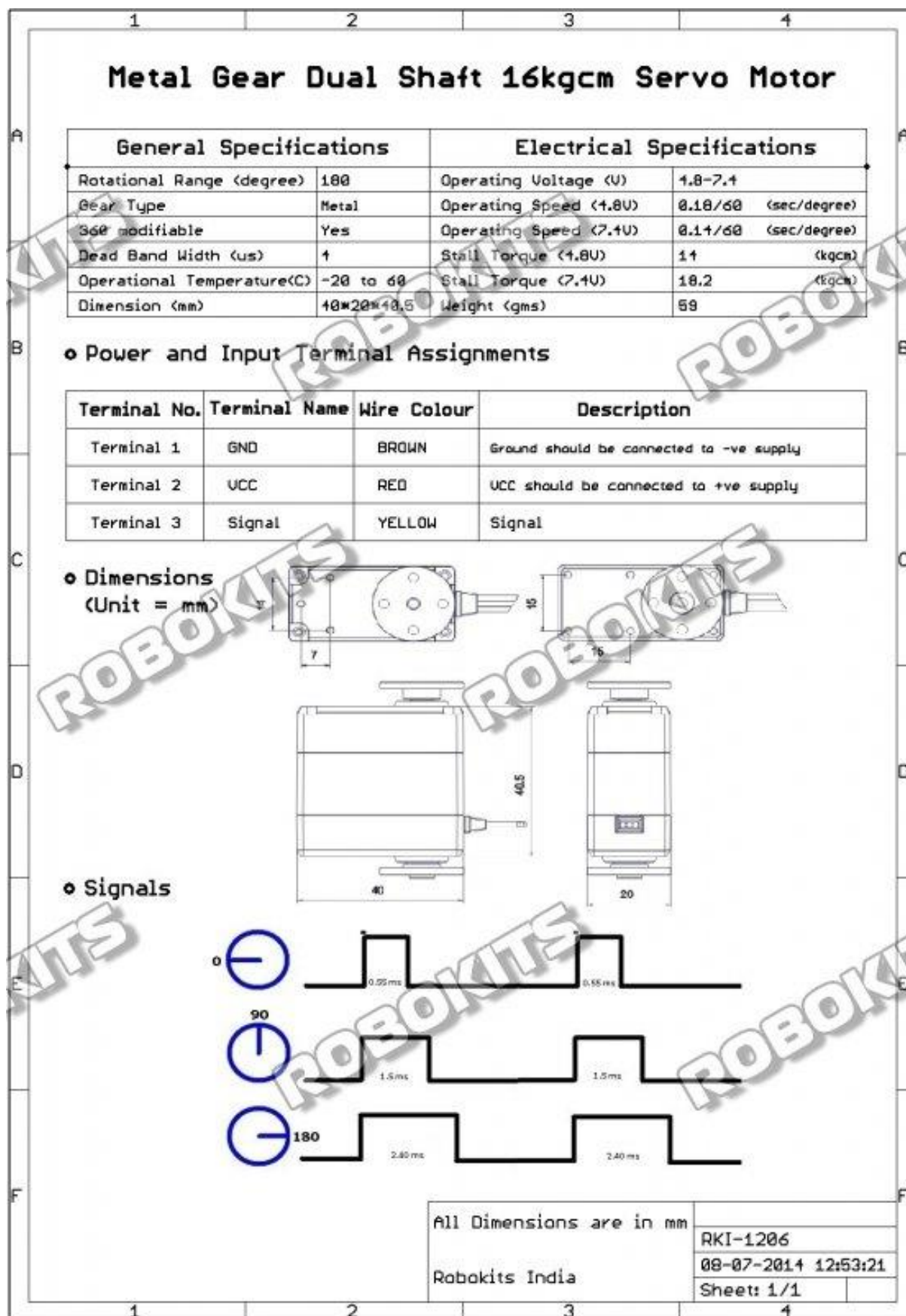
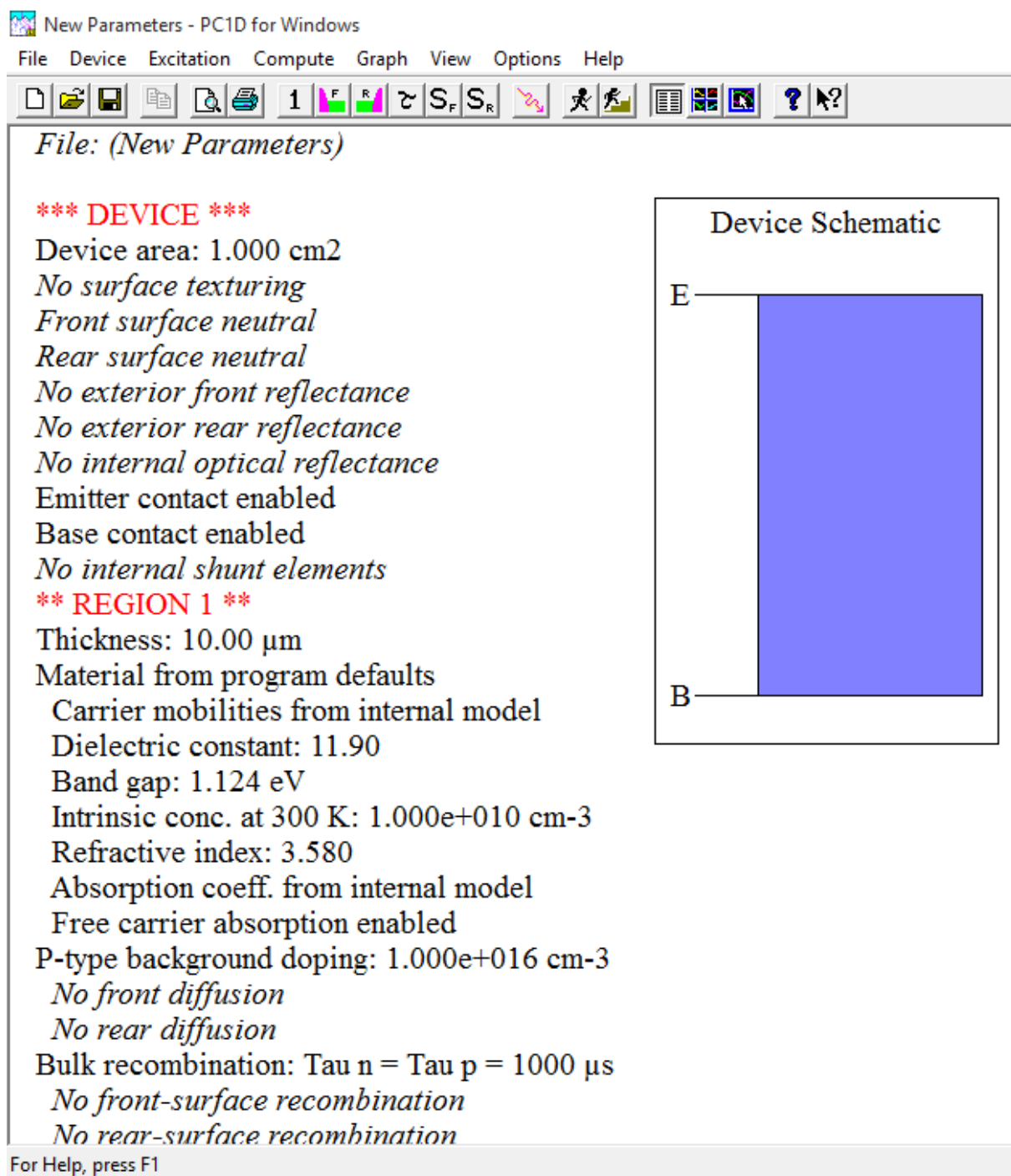


Schéma simplifié de la carte Arduino



Datasheet de servomoteur SG90



Interface de logiciel PC1D

Résumé

Notre travail est une homogénéisation de la mécanique, de l'électronique et de l'informatique. Utilisation de deux servomoteurs qui permettent la rotation de la cellule solaire dans quatre directions, basée sur quatre capteurs de lumière qui enregistrent les tensions autant que l'intensité du rayonnement et envoient ces enregistrements au contrôleur (Arduino UNO), qui permet la comparaison des niveaux de tensions pour la commande de servomoteur. En outre, il permet l'orientation du panneau vers le soleil.

Mots clés : PV, Suiveur solaire, LDR, Arduino, l'énergie solaire, servomoteur.

المخلص

عملنا هو تجانس الميكانيك والالكترونيات وعلوم الكمبيوتر. استخدامنا اثنين من المحركات ذات التيار المستمر و التي تسمح بتدوير الخلية الشمسية في أربعة اتجاهات ، استنادًا إلى أربعة مستشعرات ضوئية تسجل التغير في شدة الإشعاع وترسل هذه السجلات إلى وحدة التحكم (Arduino UNO) ، مما يسمح بمقارنة المستويات الفولتية للتحكم في المحركات. بالإضافة إلى ذلك يسمح بتوجيه اللوحة نحو الشمس.

الكلمات المفتاحية : ألواح الشمسية ,المتتبع الشمسي , الطاقة الشمسية ,أردوينو ,محرك كهربائي ,اللواقط الضوئية
