

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Réf :/2023



MEMOIRE

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

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux électriques

Par : **Sansri Amira et Shadi Ghassan Ouda Shameya**

Thème

**Étude Expérimentale d'un Capteur Solaire photovoltaïque Fixe
et Mobile et Réalisation d'un Suiveur Solaire à Base d'une
Carte Arduino.**

Soutenu publiquement, le 19/Juin/2023 devant le jury composé de :

M. BOULOUH Messaoud	Professeur	Univ. Guelma	Président / Examineur
M. FERAGA Chams-Eddine	Professeur	Univ. Guelma	Encadreur
Mme. Gueroui Assia	MCB	Univ. Guelma	Examineur
M. Azouzi Ahmidet	Docteur	A.I.C. Annaba	Membre invité

Année Universitaire : 2022/2023

Remerciements

Ce n'est pas facile d'arriver à accomplir notre travail sans aide ni conseils à cause des problèmes rencontrés.

Pour cela Nous tenons à remercier en premier lieu **Allah** tout puissant qui nous a donné la santé, le courage, la volonté et la patience qu'il nous les a données durant toutes ces années d'études.

Ainsi nous voudrions remercier **M FERAGA Chams-Eddine**, Professeur à l'Université du 8 mai 1945, Guelma, pour son encadrement et ses conseils généreux et avisés qu'il a prodigués. Il était tout le temps disponible avec des clarifications et des réponses aux questions que nous avions sur le travail. Il n'a jamais cessé de nous donner des idées sur ce projet, il nous a témoigné sa confiance, sans oublier sa qualité humaine. Qu'il trouve ici, notre plus profonde gratitude.

De plus, nous tenons à exprimer nos sincères remerciements au **Dr AZOUZI Ahmidat**, qui nous a accompagné dans nos travaux pratiques et ne nous a épargné aucun de ses équipements et a été un soutien tout au long de ce travail.

Nos sincères remerciements aux Président du Jury **M.BOULOUH Messaoud**, Professeur à l'Université du 8 mai 1945, à Mme **GUERROUI Assia**, maître de conférences à l'Université du 8 mai 1945, pour avoir accepté de faire partie du jury. Nos remerciements vont aussi à **M Taba Mohamed Taher** pour son aide précieuse.

Nous remercier vivement les ingénieures de Laboratoires **M^{me} Berkani Fatiha** et **M^{elle} Boukharouba soraya**.

Nous remercions également **Belkhiri Omnia**, qui n'a pas lésiné sur nous avec des informations qui profiteraient à notre travail.

En fin, Nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

DÉDICACE

*JE TIENS À DÉDIER CE MODESTE TRAVAIL AVANT TOUT :
À MES CHERS PARENTS, LA LUMIÈRE DE MES YEUX, LA JOIE
DE MON CŒUR, LE CALME DE MON ÂME ET LA COURONNE DE
MA TÊTE QUI N'ONT PAS CESSÉ DE PARIER POUR MOI ET
M'ONT AIDÉ DURANT TOUTE LA DURÉE DE MES ÉTUDES, QUE
DIEU LES GARDE POUR NOUS.*

*À MON FRÈRE «RAMZI» MA COTE DURE, MON SOUTIEN, QUI NE
SE FATIGUE, NE S'ENNUIE ET NE S'INCLINE JAMAIS.*

*SANS OUBLIER MES CHÈRES SŒURS «RAZIKA, SAÛSEN ET
YASMINE » QUI REPRÉSENTENT MON ÂME, LE BONHEUR DE
MES JOURS, TOUT L'AMOUR, LA TENDRESSE, LE DON ET D'EUX
J'AI GAGNÉ CONFIANCE ET FORCE.*

*À MES DEUX FRÈRES QUE MA MÈRE N'A PAS MIS AU MONDE
« BILEL ET OMAR ».*

*AUX FLAMMES DU PLAISIR, QUE DIEU LEUR ACCORDE LE
SUCCÈS, LES LEUR PROTÈGE ET GUIDE LEURS PAS
« YAAQOUB, TASNIM, HAMZA, ZAKARIA, YOMNA ET MOATAZ »
À TOUS MES AMIS INTIMES ET PARTICULIÈREMENT : « MARWA,
IMEN, AIDA, DJIHANE ET MEYS ».*

*ET À TOUS CEUX QUI M'ONT AIDÉ DE PRÈS OU DE LOIN À
ACCOMPLIR CE TRAVAIL.*

S.AMIRA

DÉDICACE

JE DÉDIE CE TRAVAIL À :

** EN PREMIER LIEU À MES PARENTS QUI ONT CONSENTI
BEAUCOUP DE SACRIFICES POUR ME PERMETTRE DE
RÉALISER MES OBJECTIFS.*

*QU'ILS TROUVENT ICI TOUTE MA RECONNAISSANCE ET MA
GRATITUDE.*

** A MES FRÈRES FADI ET ADEL. A MA SŒUR TAHANI. ET À
TOUTE LA FAMILLE SANS EXCEPTION.*

S.SHADI

Titre : *Étude Expérimentale d'un Capteur Solaire photovoltaïque Fixe et Mobile et Réalisation d'un Suiveur Solaire à Base d'une Carte Arduino.*

Résumé

Dans ce mémoire, nous avons présenté l'étude expérimentale d'un capteur solaire fixe et mobile et réalisation d'un suiveur solaire à base d'une carte Arduino. D'abord, nous avons survolé brièvement la modélisation d'un capteur solaire photovoltaïque (PV). Ensuite, sur un banc d'essai expérimental nous avons enregistré des mesures de puissance d'un GPV au fil de la journée selon différentes directions ce qui nous a permis de déduire son orientation optimale. En outre, de par l'étude expérimentale des GPV fixe et mobile dans des conditions climatique variables on a démontré que le GPV mobile permet de collecter le maximum de rayonnement incident, ce qui a conduit à une augmentation de la puissance fournie comparativement au GPV fixe. Enfin, en dernier lieu nous avons procédé à la réalisation d'un prototype de suiveur solaire mono axe à base d'une carte arduino, qui a démontré sa capacité à s'adapter aux trajectoires du soleil afin de récupérer le maximum d'énergie possible.

Mots-clés : modélisation, capteur solaire, étude expérimentale, Arduino.

Title: Experimental Study of a Fixed and Mobile Photovoltaic Solar Sensor and Realization of a Solar Tracker Based on an Arduino Card.

Summary

In this thesis, we presented the experimental study of a fixed and mobile solar collector and the realization of a solar tracker based on an Arduino card. First, we briefly reviewed the modeling of a photovoltaic (PV) solar collector. Then, on an experimental test bench, we recorded power measurements of a fixed GPV throughout the day in different directions, which allowed us to deduce its optimal orientation. In addition, through the experimental study of fixed and mobile GPV in variable climatic conditions, it has been demonstrated that the mobile GPV makes it possible to collect the maximum incident radiation, which has led to an increase in the power supplied compared to the fixed GPV. . Finally, lastly we proceeded to the realization of a prototype of single axis solar tracker based on an arduino card, which demonstrated its ability to adapt to the trajectories of the sun in order to recover the maximum possible energy.

Keywords: modeling, solar collector, inclination, orientation, experimental study, arduino board.

العنوان: دراسة تجريبية لجهاز استشعار الطاقة الشمسية الكهروضوئية الثابتة والمتحركة وتصميم جهاز تعقب الطاقة الشمسية استناداً إلى بطاقة أردوينو.

ملخص:

في هذه الرسالة ، قدمنا الدراسة التجريبية لمجمع الطاقة الشمسية الثابتة والمتحركة وإدراك جهاز تعقب الطاقة الشمسية بناءً على بطاقة أردوينو. أولاً ، استعرضنا بإيجاز نمذجة مجمع الطاقة الشمسية الكهروضوئية بعد ذلك ، على مقعد اختبار تجريبي ، سجلنا قياسات الطاقة لـ GPV الثابت على مدار اليوم في اتجاهات مختلفة ، مما سمح لنا باستنتاج اتجاهه الأمثل .بالإضافة إلى ذلك ، من خلال الدراسة التجريبية لـ GPV الثابتة والمتحركة في الظروف المناخية المتغيرة ، تم إثبات أن GPV المتحرك يجعل من الممكن جمع الحد الأقصى من الإشعاع الحادث ، مما أدى إلى زيادة الطاقة المزودة مقارنة بـ GPV الثابت . أخيرًا ، انتقلنا إلى تحقيق نموذج أولي لمتتبع الطاقة الشمسية أحادي المحور استناداً إلى بطاقة اردوينو ، والتي أظهرت قدرتها على التكيف مع مسارات الشمس لاستعادة أقصى طاقة ممكنة.

الكلمات المفتاحية: النمذجة ، الجامع الشمسي ، الميل ، التوجه ، الدراسة التجريبية ، لوح اردوينو

Introduction générale.....	1
<i>Chapitre I : Modélisation d'un capteur solaire.....</i>	4
Introduction.....	5
I.1.L'effet photovoltaïque.....	5
I.2. Modélisation de la cellule photovoltaïque.....	6
I.3.Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.....	8
I.3.1.Le courant de court-circuit (I_{cc}).....	10
I.3.2.La tension en circuit ouvert (V_{CO}).....	10
I.4.Rendement de conversion d'énergie (η).....	11
I.5.Facteur de forme F_F	11
I.6.Influence de la Température.....	11
I.7.Influence de l'éclairement.....	12
Conclusion :.....	13
<i>Chapitre II : Caractéristiques et propriétés des panneaux solaires au fil de la journée....</i>	14
Introduction	15
II.1.Mouvements de la terre	15
II.2 Trajectoire du soleil	17
II.2.1.La latitude	17
II.2.2.Longitude	18
II.2.3.Altitude	18
II.3.Normes d'installation de panneaux solaires fixes.....	18
II.3.1.La direction du panneau solaire	19
II.3.1.1.Comparaison entre les résultats.....	22
II.3.2. Choix de l'angle d'inclinaison du panneau solaire.....	23
II.3.3.Installation de panneaux en parallèle ou en série ou mixte	24
II.3.4. Distance entre les panneaux solaires.....	26
II.4. Les types d'installations	27
II.4.1.Installation On grid.....	27
II.4.2.Installation Off grid.....	28
II.5.Le suiveur solaire	28
II.5.1.Définition de suiveur solaire.....	29

II.5.2.Types des suiveurs solaires.....	29
II.5.2.1.Suiveurs solaires manuels.....	30
II.5.2.2.Suiveurs solaires passifs.....	30
II.5.2.3.Suiveurs solaires actifs.....	31
II.5.2.3.1.Tracker solaire à axe unique.....	31
II.5.2.3.2. Tracker solaire à double axe.....	32
II.5.3.Avantages et inconvénients d’un suiveur solaire.....	33
II.5.3.1.Avantages.....	33
II.5.3.2. Inconvénients	33
Conclusion.....	34
<i>Chapitre III: Étude expérimentale d’un panneau solaire fixe et d’un panneau solaire mobile.....</i>	35
Introduction :.....	36
III.1.Position du soleil	36
III.2. Objectif d’un suiveur soleil	36
III.3. Caractéristiques géographiques du site.....	37
III.4. Description du banc d’essais expérimental	37
III.4.1. Les instruments de mesure utilisés	38
III.5.Méthode de déroulement du processus expérimentale.....	38
III.5.1. Procédure expérimentale	40
III.5.2.Résultats et discussion	40
III.5.2.1.Comparaison entre les deux modes de fonctionnement.....	45
III.5.3.Variation du courant et de la tension en fonction du temps.....	47
III.5.4. Variation de l’éclairement et la température au cours de la journée.....	49
III.5.5. Variation de la puissance au cours de la journée.....	49
Conclusion :.....	50
<i>Chapitre IV : Réalisation d’un suiveur solaire mono axe à base d’une carte Arduino....</i>	51
Introduction :.....	52
IV .1Un schéma synoptique	52
IV.2. Description et études des différents composants utilisés	53

IV.2.1. Capteur de lumière	53
IV.2.2. Le circuit de commande.....	54
IV.2.2.1.Définition d'Arduino.....	54
IV.2.2.2.Description de la carte Arduino UNO.....	55
IV.2.3.Câblages	56
IV.2.3.1.Câble USB	56
IV.2.3.2.Fils de prototypage.....	56
IV.2.4.Plaque d'essai.....	57
IV.2.5.Le servomoteur.....	57
IV.2.6.Cellule solaire utilisée.....	59
IV.3.Description et réalisation du suiveur solaire	59
IV.3.1. Assemblage des éléments constitutifs du suiveur	60
IV.3.2.Assemblage électronique.....	60
Conclusion :.....	62
Conclusion générale.....	63
Bibliographie.....	65

Liste des symboles

- I_{cc} : Le courant de court-circuit (A).
- V_{co} : La tension de circuit ouvert (V).
- P_{max} : La puissance maximale produite PV (W).
- V_{max} : Tension qui correspond à la puissance maximale (V).
- I_{max} : Courant qui correspond à la puissance maximale (A).
- P_{inc} : La puissance du rayonnement solaire incident
- S : Surface de la cellule solaire en (m²).
- R_{SH} : Résistances parallèle shunt (Ω).
- R_s : Résistance série (Ω).
- I : Le courant du panneau photovoltaïque (A).
- V : La tension du panneau photovoltaïque (V).
- P : La puissance du panneau photovoltaïque (W).
- I_D : Courant de diode(A).
- I_{PH} : Photo-courant (A).
- I_0 : Le courant de saturation (A).
- q : La constante de charge d'électron, égale à $1.6.10^{-19}$ C
- k : la constante de Boltzmann, égale à $1.38.10^{-23}$ j/k
- q : Charge d'électron $1,602.10^{-9}$ C
- A : Le facteur d'idéalité de diode.
- G_{STC} : éclairement effective et de référence [W/m²]
- T_{STC} : température effective et de référence en Kelvin [K]
- $I_{PH,STC}$: courant photonique sous condition de référence [A] ;
- K_C : coefficient de température de I_{PH} [A/K].
- STC : standard test condition
- F_F : Facteur de forme
- G : Eclairement (W/m²)
- η : Rendement (%).

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Modélisation d'un capteur solaire

Figure I.1 : Coupe transversale d'une cellule PV typique.....	6
Figure I.2 : schéma équivalent d'une cellule solaire.....	7
Figure I.3 : Caractéristique courant-tension et puissance-tension.....	9
Figure I.4 : Générateur PV en court-circuit.....	10
Figure I.5 : Générateur PV en circuit ouvert.....	10
Figure I.6 : Caractéristiques P-V et I-V du module PV selon la température.....	12
Figure I.7 : Caractéristiques P-V et I-V du module PV selon l'éclairement.....	12

Chapitre II: Caractéristiques et propriétés des panneaux solaires au fil de la journée

Figure.II.1: la rotation de la Terre sur elle-même.....	16
Figure.II.2: la rotation de la Terre autour de soleil.....	17
Figure.II.3: la trajectoire du soleil.....	17
Figure.II.4: la latitude et longitude.	18
Figure.II.5: Evolution de l'éclairement en fonction de temps pour un panneau fixe orienté à l'Est.....	19
Figure.II.6: Evolution de la puissance en fonction de la tension pour un panneau fixe orienté à l'Est.....	19
Figure.III.7: Evolution de l'éclairement en fonction de temps pour un panneau fixe orienté à l'Ouest.....	20
Figure.II.8: Evolution de la puissance en fonction de la tension pour un panneau fixe orienté à l'Ouest.....	20
Figure.II.9: Evolution de l'éclairement en fonction de temps pour un panneau fixe orienté au Nord.....	21

Figure.II.10: Evolution de la puissance en fonction de la tension pour un panneau fixe orienté au Nord.....	21
Figure.II.11: Evolution de l'éclairement en fonction de temps pour un panneau fixe orienté au Sud.....	22
Figure.II.12: Evolution de la puissance en fonction de la tension pour un panneau fixe orienté au Sud.....	22
Figure II.13: L'angle d'incidence des rayons solaires.....	24
Figure. II.14: Le montage de modules photovoltaïques en série.....	24
Figure. II.15: Le montage de modules photovoltaïques en parallèle.....	25
Figure. II.16: Le montage de modules photovoltaïques en mixte.....	26
Figure.II.17:Calcul de la distance entre les panneaux solaires.....	27
Figure.II.18 : Installation on grid.....	28
Figure.II.19: installation off grid.....	28
Figure II.20 : suiveur solaire.....	29
Figure.II.21: classification des suiveurs solaires.....	30
Figure.II.22: Suiveur passif.....	31
Figure.II.23 : Tracker solaire à axe unique.....	32
Figure.II.24 : Tracker solaire à double axe.....	33

Chapitre III : Étude expérimentale d'un panneau solaire fixe et d'un panneau solaire mobile

Figure III.1 : Position du soleil pour une journée	36
Figure.III.2: Capteur solaire photovoltaïque.....	37
Figure III.3. Circuit de mesure du système PV.....	39
Figure III.4. Schéma de mesure de puissance PV pour un GPV mobile et fixe.....	39
Figure.III.5: Evolution du courant en fonction de la tension pour un panneau fixe et un panneau mobile.....	41

Figure.III.6: Evolution de la puissance en fonction de la tension pour un panneau fixe et un panneau mobile.....	41
Figure.III.7: Evolution du courant en fonction de la tension pour panneau fixe et un panneau mobile à 12h.....	42
Figure.III.8: Evolution de la puissance en fonction de la tension pour un panneau fixe et un panneau mobile.....	43
Figure.III.9: Evolution du courant en fonction de tension pour un panneau fixe et un panneau mobile.....	44
Figure.III.10: Evolution de la puissance en fonction de la tension pour un panneau fixe et un panneau mobile.....	44
Figure.III.11: Evolution de la caractéristique de puissance en fonction de la tension pour le panneau mobile à trois périodes différentes de la journée.....	46
Figure.III.12: Evolution de la caractéristique de puissance en fonction de la tension pour le panneau Fixe à trois périodes différentes de la journée.....	46
Figure.III.13: Courbe de courant en fonction du temps pour les deux systèmes PV.....	47
Figure.III.14 : Courbe de tension en fonction du temps pour les deux systèmes PV.....	48
Figure.III.15 : évolution de l'éclairement au cours de la journée d'étude.....	49
La Figure III.16 représenté l'évolution de la température ambiante durant de la journée du 14 février 2023.....	49
Figure.III.17: Courbe de la puissance produite pour les deux systèmes PV.....	50
Chapitre IV : Conception d'un suiveur solaire à base d'une carte Arduino	
Figure IV.1 : Schéma synoptique.....	52
Figure IV.2 : Une photorésistance et son circuit équivalent.....	53
Figure IV.3 : La relation entre la résistance d'une photorésistance et l'éclairement.....	54
Figure IV.4 : Les catégories d'Arduino.....	54
Figure IV.5 : Constitution de la carte Arduino UNO.....	56
Figure IV.6 : Câble USB type A vers B.....	56
Figure IV.7 : Fils de prototypage.....	57
Figure IV.8 : Plaque d'essai.....	57
Figure IV.9: Le servo moteur utilisé.....	59
Figure IV.10: La cellule solaire utilisée.....	59

Figure IV.11 : Schéma représentatif de l'assemblage du suiveur solaire.....	60
Figure IV.12 : La connexion des différents composants.....	60
Figure IV.13 : Suiveur solaire réalisé.....	61
Figure IV.14:Différents positions du suiveur solaire réalisé.....	61

LISTE DES TABLEAUX :

Chapitre II: Caractéristiques et propriétés des panneaux solaires au fil de la journée

Tableau II.1 : Résultats et performances pour les quatre directions.....23

**Chapitre III : Étude expérimentale d'un panneau solaire
fixe et d'un panneau solaire mobile**

Tableau III.1: Données géographiques du site.....37

Tableau III.2: Caractéristiques du panneau solaire utilisé.....38

Tableau III.3 : Résultats et performances pour les deux modes d'orientation.....45

Chapitre IV : Conception d'un suiveur solaire à base d'une carte Arduino

Tableau IV.1 : Caractéristiques du servomoteur utilisé.....58

Introduction générale

Introduction générale:

Actuellement, la production de l'énergie dans l'industrie est basée, en grande partie, sur une ressource limitée: le pétrole. Les sources du pétrole deviennent de plus en plus rares, pendant que les demandes énergétiques du monde s'élèvent continuellement.

Il est estimé que les réserves mondiales seront épuisées vers 2030 si la consommation n'est pas radicalement modifiée, et au maximum vers 2100 si des efforts sont produits sur la production et la consommation [1]. En plus ce sont des sources qui mette la santé humaine en jeu et aussi l'environnement à son tour a été longuement touché par la pollution à cause de l'émission de CO₂ qui produit l'effet de serre et on a vu leur influences sur le climat et les maladies à cause du Versus dans l'air, l'eau

Etant donné que cette forme d'énergie couvre une grosse partie de la production énergétique actuelle, il s'avère nécessaire de trouver une autre solution pour prendre le relais. La contrainte imposée est d'utiliser une source d'énergie économique et peu polluante car la protection de l'environnement est devenue un point important.

La recherche des ressources d'énergie alternatives est devenue donc une question cruciale de nos jours. Beaucoup de recherches scientifiques ont été menées, non seulement, dans le domaine de la production d'énergie nucléaire, mais également dans le secteur des sources d'énergie illimitées, telles que la production d'électricité par le vent et la transformation d'énergie solaire.

Le soleil est une source d'énergie inépuisable, qui émet chaque jour sous forme de lumière l'équivalent de 27 années de consommation électrique. Il existe plusieurs moyens d'utiliser l'énergie du soleil, l'une d'entre elles est de transformer sa lumière en électricité grâce à des cellules photosensibles ; c'est ce que l'on appelle l'énergie solaire photovoltaïque [2].

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du

matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules (PV) en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) [3].

Les générateurs photovoltaïques sont modulaires, facile à mettre en œuvre et à entretenir, ils n'ont que très peu d'usure intrinsèque leur durée de vie est de 20 à 30 ans ; cette industrie minimise les déchets toxiques car est une technologie qui favorise la santé publique et le développement humain et qui améliore le niveau de vie des habitants.

Les traqueurs solaires sont conçus et construits pour optimiser le rendement de puissance des modules de PV en s'assurant qu'ils sont inclinés vers le soleil à tout moment pendant la journée. Les multi systèmes de suiveurs solaires ont été utilisées pour une large application incluant : des cellules solaires photovoltaïques, des concentrateurs solaires et des télescopes.

Dans ce travail on a traité une étude expérimentale d'un générateur photovoltaïque fixe et mobile, avec une conception d'un prototype de suiveur solaire, c'est pour cela on va organiser notre mémoire en quatre chapitres :

D'abord, nous commençons par la Modélisation d'un capteur solaire. Dans ce chapitre, nous présentons l'effet photovoltaïque, les équations qui régissent le fonctionnement du capteur solaire et l'effet des conditions climatiques sur la productivité des capteurs solaires.

Ensuite, on va considérer les caractéristiques et les propriétés des panneaux solaires au fil de la journée. Dans ce chapitre nous présentons les facteurs qui influent sur la qualité de la conversion d'un capteur solaire, les normes d'installation de panneaux solaires et les différents types de suiveurs solaires.

Le troisième chapitre sera consacré à l'étude expérimentale d'un panneau solaire fixe et d'un panneau solaire mobile, dans des conditions de rayonnement solaire et de température variables à un site situé dans la ville d'Annaba en Algérie.

En plus, le dernier chapitre traite la conception d'un suiveur solaire à base d'une carte Arduino dans lequel on procède à la réalisation pratique de notre projet, où on présente la procédure adoptée afin de réaliser un suiveur solaire à base d'une carte Arduino.

Enfin on clôture notre mémoire par une conclusion générale.

***Modélisation d'un capteur
solaire photovoltaïque***

Introduction

L'énergie solaire est une source d'énergie renouvelable qui dépend du soleil. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires. Il faut savoir qu'il y a quatre types de cette énergie et nous mettons en valeur l'énergie solaire photovoltaïque.

Dans ce chapitre, nous présentons d'abord l'effet photovoltaïque puis les équations qui régissent le fonctionnement du capteur solaire, et enfin l'effet des facteurs climatiques sur la productivité des capteurs solaires.

I.1 L'effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule.

Le dopage d'un semi-conducteur pur va permettre d'amener des charges excédentaires qui améliorent la conductivité du matériau. Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium (le silicium possède quatre électrons dans la couche externe qui sont chacun lié à quatre atomes de silicium voisins) :

- **Dans la première couche :** en le dopant avec des atomes de phosphore qui ont cinq électrons sur leurs couches externes, un électron par atome de phosphore ne pourra pas se lier avec ses correspondants du silicium, il y aura alors un excédent de charges négatives dans le cristal. Le matériau sera donc potentiellement « donneur » d'électrons pour la conduction électrique et le silicium ainsi dopé est appelé silicium de type N.
- **Dans la deuxième couche :** on peut également doper le silicium avec du bore qui a seulement trois électrons par atome dans la bande de valence, le résultat est l'apparition d'un atome excédent de trous, donc de charges positives puisqu'il manque un électron à chaque atome de bore pour compléter les quatre électrons de

siliciums ,le matériau est à l'inverse du précédent « accepteur » d'électrons, ce matériau ainsi dopé est appelé silicium de type P.

Lorsque la première est mise en contact avec la seconde(Le type P et le type N), les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P, une jonction PN a été formée [7]. Et dans une cellule photovoltaïque, Les électrons « décrochés » créent une tension électrique continue faible. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. A travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs[4].

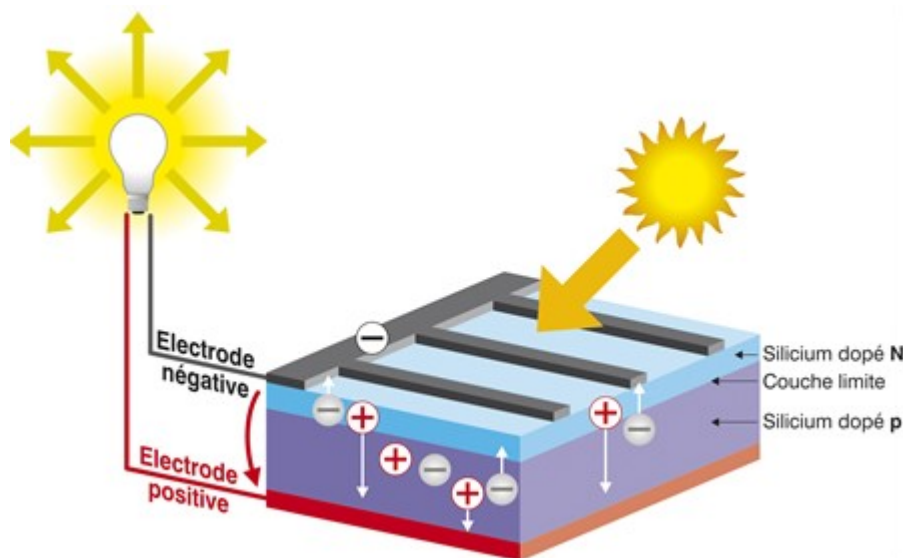


Figure I.1 : Coupe transversale d'une cellule PV typique.

I.2. Modélisation de la cellule photovoltaïque :

Réellement il existe plusieurs influences des résistances parasites dans la production d'énergie électrique, et la cellule photovoltaïque est représentée généralement par le schéma suivant [9] :

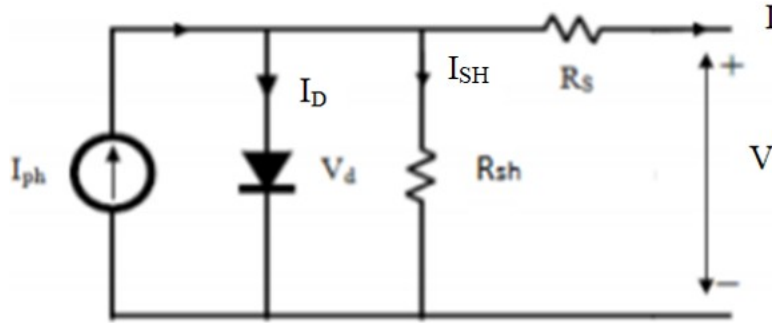


Figure I.2 : schéma équivalent d'une cellule solaire.

C'est le modèle le plus classique dans la littérature, il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes physique dépolarisation et deux résistances (série et shunt). Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I-V de la cellule:

- la résistance série est la résistance interne de la cellule; qui est celle du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.
- la résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi de Kirchhoff :

$$I = I_{PH} - I_D - I_{SH} \quad (I.1)$$

Le courant de la diode est donné par :

$$I_D = I_{PH} - I_0 \left(e^{\frac{q(V+R_s I)}{AKT}} - 1 \right) \quad (I.2)$$

Le courant I_{PH} est proportionnel à l'éclairement réel G , avec une faible variation selon la température :

$$I_{PH} = \frac{G}{G_{STC}} * (I_{PH,STC} + K_C(T - T_{STC})) \quad (I.3)$$

Avec :

G et G_{STC} : éclairement effective et de référence [W/m^2] ;

T et T_{STC} : température effective et de référence en Kelvin [K] ;

$I_{PH,STC}$: Photo-courant sous condition de référence [A] ;

K_C : Coefficient de température de I_{PH} [A/K].

-Le potentiel thermique est donné par l'expression suivante :

$$V_t = \frac{kT}{q} \quad (I.4)$$

Où :

T : La température effective ou réelle

q : La constante de charge d'électron, égale à $1.6 \cdot 10^{-19}$ C

k : la constante de Boltzmann, égale à $1.38 \cdot 10^{-23}$ j/k

A : Le facteur d'idéalité de diode (1 à 2).

En remplaçant l'équation (I.2) dans l'équation (I.1), on obtient :

$$I = I_{PH} - I_0 \left(e^{\frac{q(V+R_S I)}{AKT}} - 1 \right) - I_{SH} \quad (I.5)$$

Le courant dérivé par la résistance shunt I_{SH} prend l'expression :

$$I_{SH} = \frac{V+R_S I}{R_{SH}} \quad (I.6)$$

Le courant de saturation inverse de la diode est supposé variable avec la température selon l'expression :

$$I_0 = I_{0,STC} * \left(\frac{T}{T_{STC}} \right)^3 * \exp \left[\left(\frac{qE_g}{AKT} \right) * \left(\frac{1}{T_{STC}} \right) - \left(\frac{1}{T} \right) \right] \quad (I.7)$$

I.3. Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque:

La caractéristique courant-tension, illustrée dans la figure (I.3), décrit le comportement de la cellule photovoltaïque sous l'influence des conditions standard STC (niveau d'éclairement en 1000W/m^2 et température ambiante 25°C) [9].

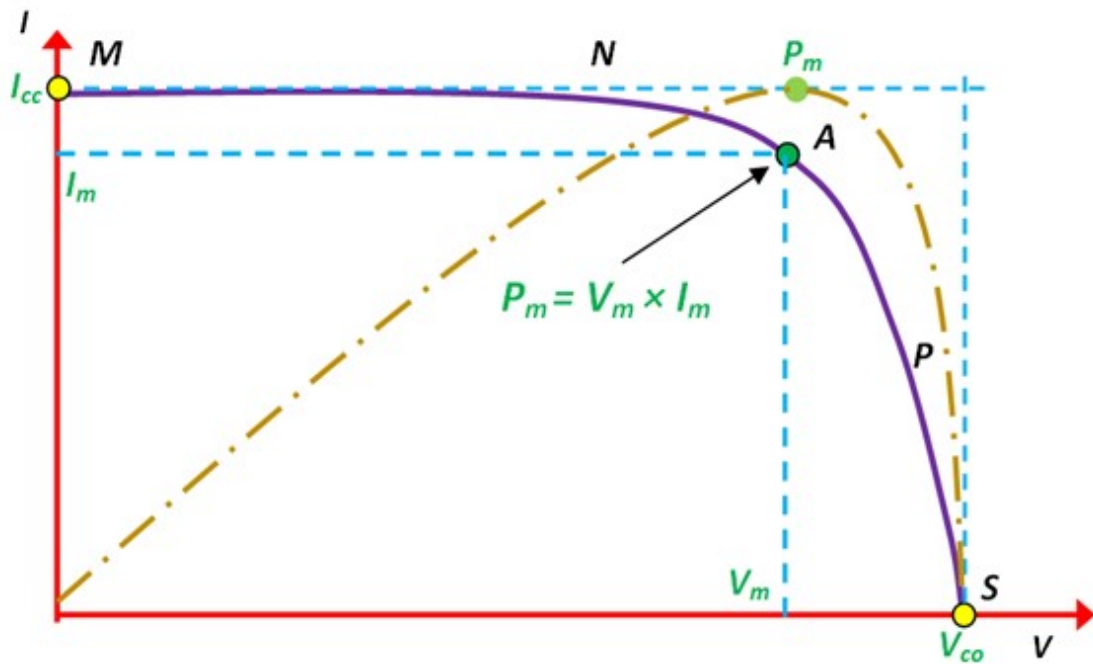


Figure I.3 : Caractéristique courant-tension et puissance-tension.

La courbe caractéristique d'une cellule PV (figure I.3) représente la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension à ses bornes, depuis le court-circuit, point M jusqu'au circuit ouvert, point S. La courbe de la cellule solaire $I=f(V)$ passe par trois points essentiels qui sont:

- Le courant de court-circuit I_{cc} en M
- La tension de circuit ouvert V_{co} en S.
- La puissance maximale en A.

En effet, la caractéristique de la cellule solaire $I(V)$, se divise en trois parties [9] :

- La zone horizontale (MN) est caractérisée par un courant constant pour n'importe quelle tension et le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- La zone verticale(PS) est spécifiée par une tension constante pour n'importe quelle variation de courant et le générateur photovoltaïque est comme un générateur de tension.
- La zone du coude de la courbe(NP) est une région intermédiaire entre les deux zones précédentes, et elle représente la région préférée pour le fonctionnement c'est le point optimal [3].

I.3.1. Le courant de court-circuit (I_{cc}):

Il s'agit du courant qui traverse la cellule photovoltaïque lorsque celle-ci est en court-circuit, c'est-à-dire lorsque le pôle (+) est relié au pôle (-) (la tension à ses bornes est alors nulle). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule $P = V \times I$ est nulle.

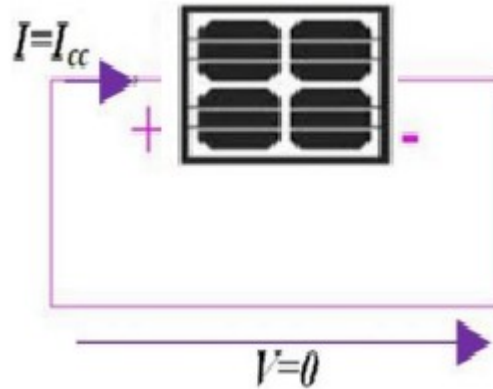


Figure I.4 : Générateur PV en court-circuit

I.3.2. La tension en circuit ouvert (V_{co}):

Il s'agit de la tension aux bornes de la cellule lorsque celle-ci est en circuit ouvert, c'est-à-dire lorsque le pôle (+) et le pôle (-) sont isolés électriquement de tout autre circuit électrique (le courant la traversant est alors nul). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule $P = V \times I$ est nulle.

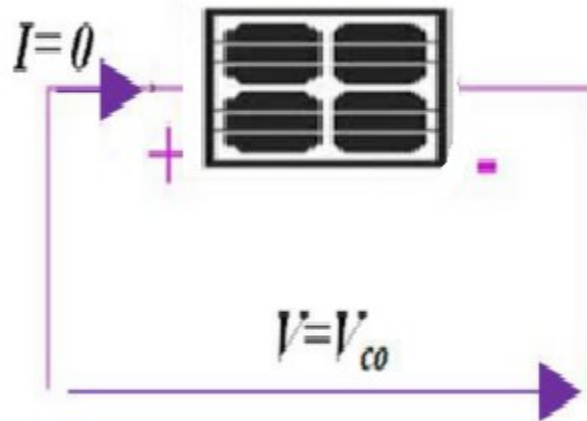


Figure I.5 : Générateur PV en circuit ouvert

La puissance fournie par la cellule est tout simplement le produit du courant et de la tension. A partir de la caractéristique courant-tension, il est intéressant de dessiner le graphe de la

puissance ($P = V \times I$) en fonction de la tension V , qu'on appelle aussi caractéristique puissance-tension :

La courbe P-V de la figure I.3 passe par un maximum de puissance (P_m). A cette puissance correspond, une tension V_m et un courant I_m que l'on peut aussi repérer sur la courbe $I = f(V)$. Il y a un compromis entre la tension et le courant du panneau pour avoir une puissance maximale.

I.4. Rendement de conversion d'énergie (η):

C'est le rapport de la puissance générée et de la puissance du rayonnement solaire incident P_{inc} . On appelle rendement rapport de la puissance maximale fournie (P_{max}) sur la puissance du rayonnement solaire incident (P_{inc}) [2]:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{max} \times V_{max}}{A \times G} \quad (I.8)$$

Avec :

A : Surface de la cellule solaire en (m^2).

G: éclairement (W/m^2).

I.5. Facteur de forme F_F :

Appelé aussi facteur de remplissage (fill factor), le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule P_{max} et la puissance maximale d'une cellule idéale P_{ideal} le produit du courant de court-circuit I_{cc} par la tension de circuit-ouvert V_{co} . Il indique la qualité de la cellule ; Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes il diminue avec l'élévation de la température. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites R_s et R_{sh} [3].

$$F_F = \frac{P_{max}}{P_{ideal}} = \frac{I_{max} \times V_{max}}{V_{co} \times I_{cc}} \quad (I.9)$$

I.6. Influence de la Température :

La figure I.6 présente un exemple des courbes courant-tension et puissance-tension pour différentes températures de fonctionnement de capteur solaire. On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement. Lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement prise en compte [9].

La figure. I.6 présente des courbes I-V et P-V pour différentes températures de fonctionnement du capteur PV :

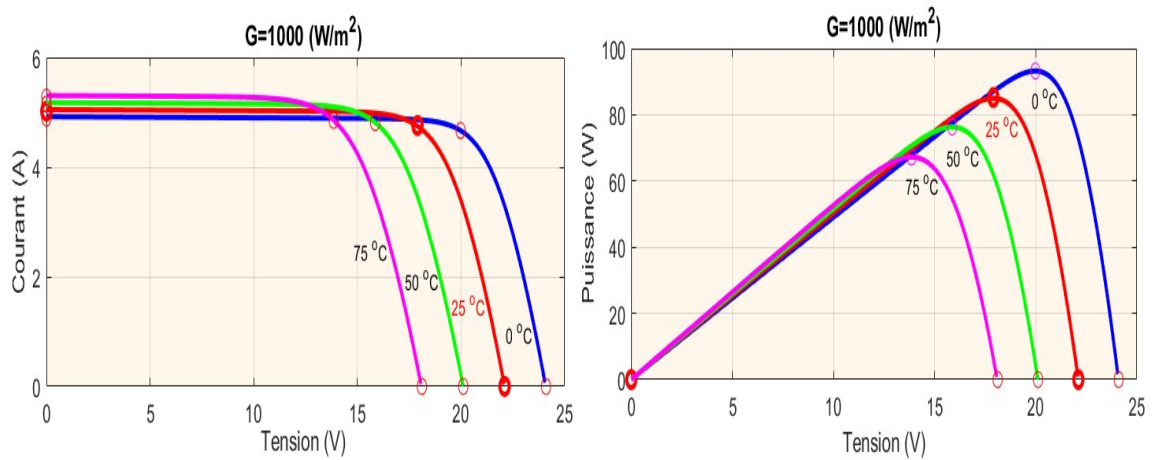


Figure I.6 : Caractéristiques I-V et P-V du module PV selon la température.

I.7. Influence de l'éclairement:

La figure I.7 présente un exemple des courbes pour différents niveaux de rayonnements :

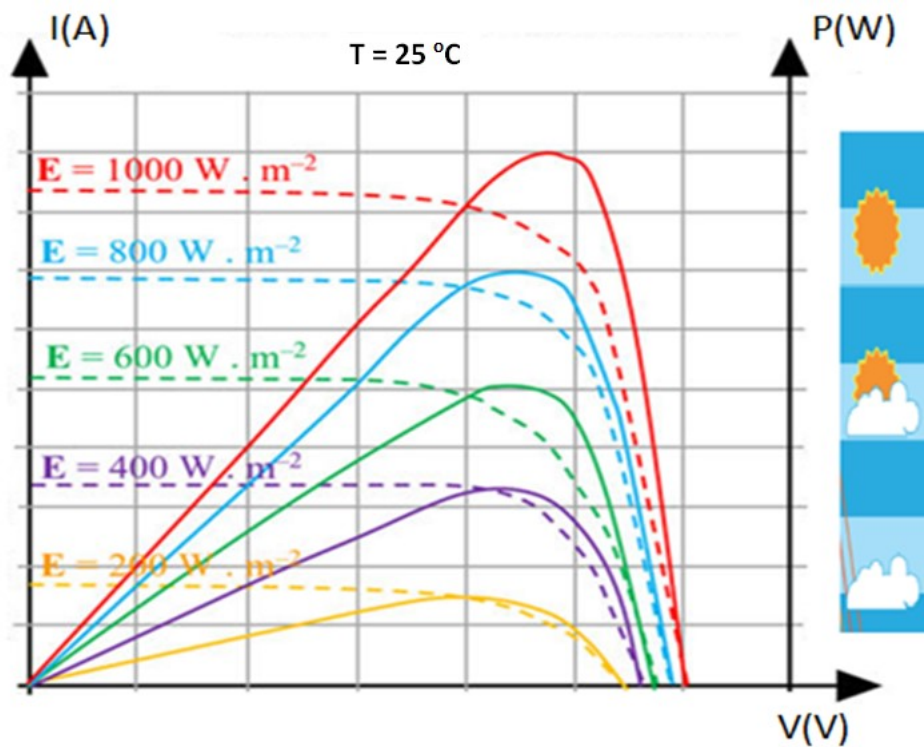


Figure I.7 : Caractéristiques P-V et I-V du module PV selon l'éclairement.

On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement [3]. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les équations décrivant le modèle mathématique du capteur solaire, en expliquant brièvement le phénomène photovoltaïque. Aussi, nous avons montré l'influence des différents paramètres climatiques sur ses caractéristiques essentielles (I-V) et (P-V). Dans le chapitre suivant nous étudierons les caractéristiques et propriétés des panneaux solaires au fil de la journée.

***Caractéristiques et
propriétés des panneaux
solaires au fil de la journée***

Introduction

Comme on le sait, Le soleil n'est pas fixe dans le ciel et ce, durant la journée ou au cours de l'année. La conversion de l'énergie solaire dépend fortement de la quantité de rayonnement solaire interceptée par le collecteur solaire. Cette quantité est influencée par plusieurs facteurs parmi lesquels la position de la surface réceptrice par rapport au rayonnement solaire. En effet, la position idéale des collecteurs est que le rayonnement doit tomber verticalement sur la surface du collecteur afin de maximiser la quantité de rayonnement reçu. Pour cela, les collecteurs solaires munis de systèmes de poursuite de la trajectoire du soleil (suiveurs solaires) sont mieux placés que les collecteurs fixes. Dans ce chapitre nous présentons les facteurs qui influent sur la qualité de la conversion d'un capteur solaire, les normes d'installation de panneaux solaires et les différents types de suiveurs solaires.

II.1.Mouvements de la terre :

La Terre tourne autour de son axe imaginaire tous les jours pendant environ 4,6 milliards d'années, et la rotation de la Terre sur elle-même provoque le phénomène d'alternance du jour et de la nuit, où il faut 23 h 56 min et 4,1 s pour compléter un cycle. Il est mentionné. que la vitesse de rotation de la Terre est à son niveau le plus élevé à l'équateur, et diminue chaque fois que sa circonférence se courbe vers le haut ou vers le bas, jusqu'à ce qu'elle atteigne ses niveaux les plus bas aux pôles sud et nord; Par conséquent, la vitesse de la Terre est relativement élevée dans les régions situées au milieu de la Terre, telles que : l'Europe, le Japon et certaines parties des États-Unis d'Amérique, où sa vitesse est proche de 0,447 km/s [1,3].

rotation de la terre

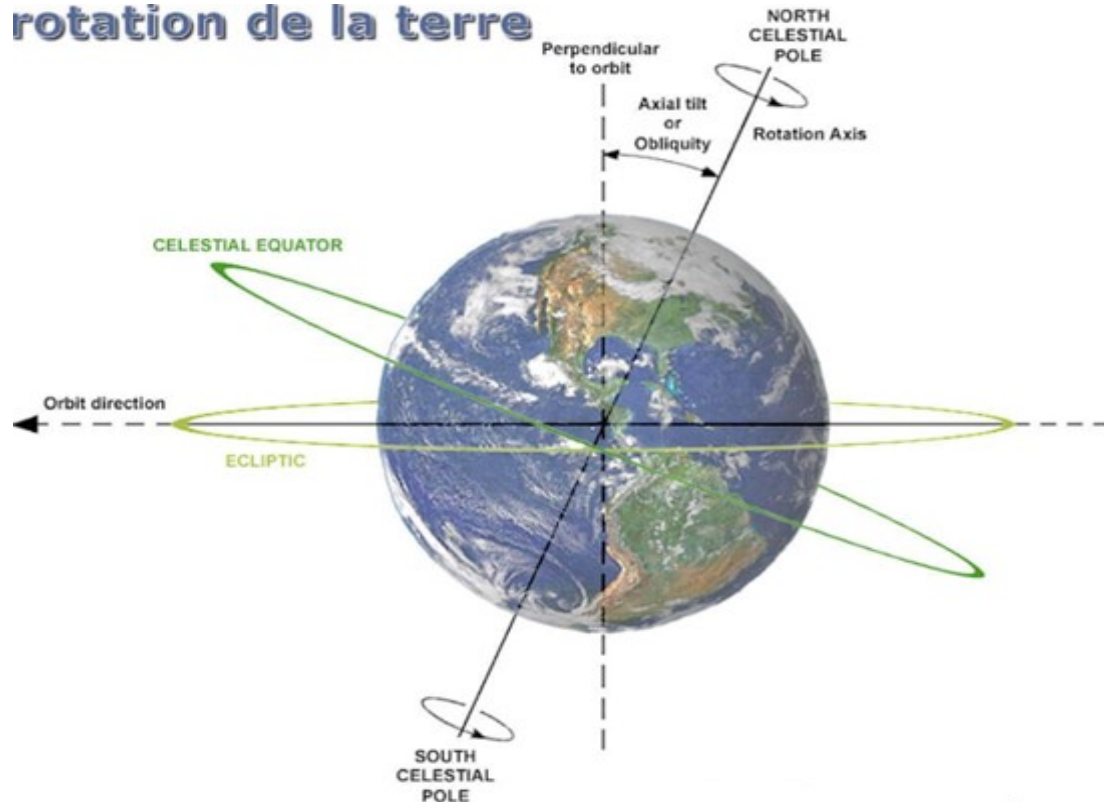


Figure. II.1: la rotation de la Terre sur elle-même

La terre tourne autour du soleil sur une orbite dont la forme est la plus proche de l'elliptique, et la forme elliptique de l'orbite provoque une différence de distance de la terre au soleil lors de sa rotation autour de lui ; Dans certaines parties de l'orbite, la terre est aussi loin que possible du soleil, car elle les sépare d'une distance égale à environ $1,53 \times 10^8$ km, et dans les parties opposées, elle est aussi proche que possible du soleil, comme ils sont séparés par une distance égale à environ $1,46 \times 10^8$ km, c'est ce qui provoque la succession des quatre saisons, et la terre doit effectuer un cycle complet autour du soleil d'environ 365 jours et 5 heures.

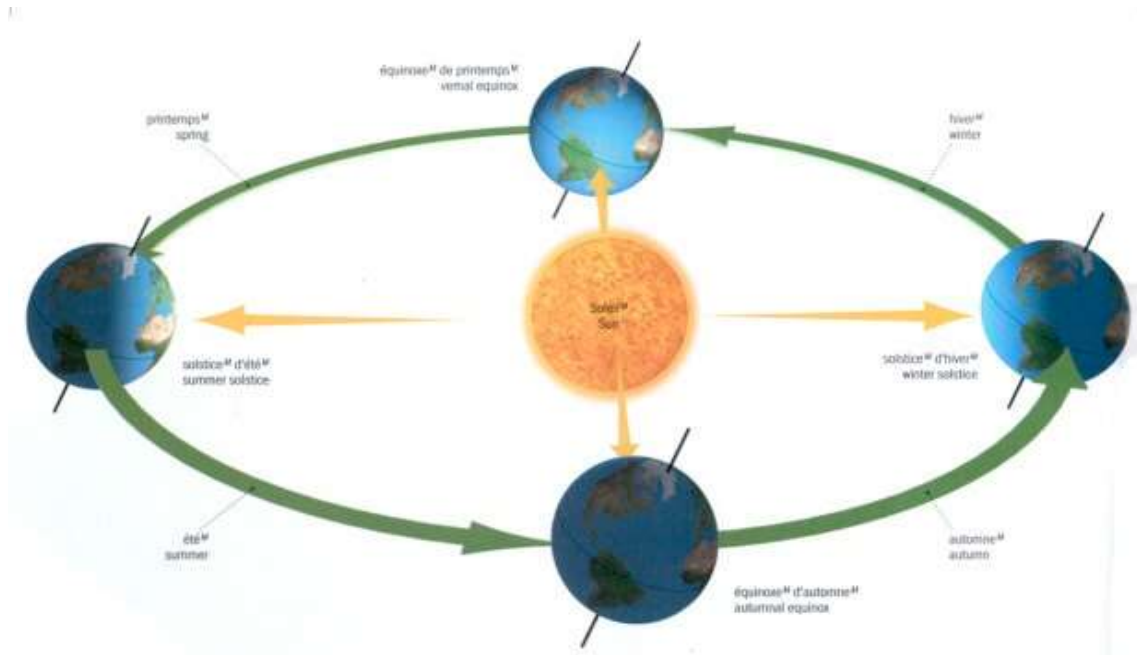


Figure. II.2: la rotation de la Terre autour de soleil

II.2.Trajectoire du soleil :

La trajectoire du soleil varie d'une saison à une autre et l'inclinaison est plus réduite en été qu'en hiver ce qui fait que les mouvements du soleil sur sa trajectoire dépendent de la latitude, de la longitude et l'altitude [3].

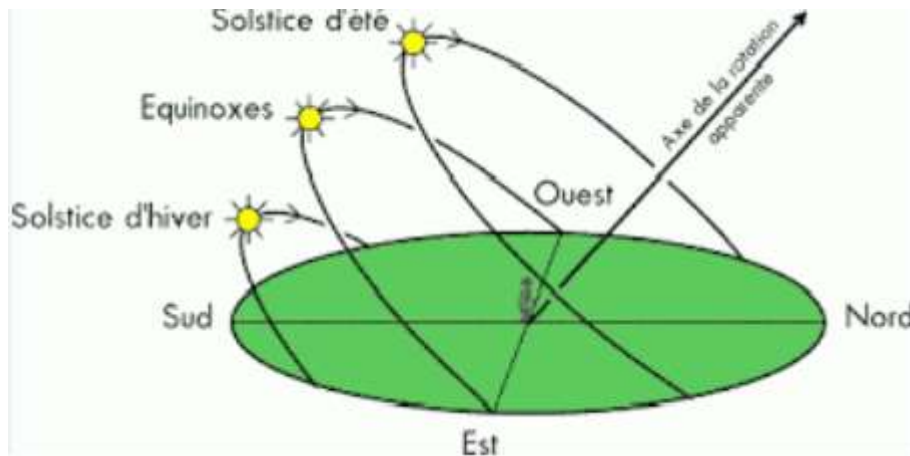


Figure.II.3: la trajectoire du soleil.

II.2.1.La latitude :

Une latitude donne la localisation d'un point par rapport à l'équateur, elle varie entre 0 et 90°, positivement vers le pôle Nord et négativement vers le pôle Sud (Figure II.4). D'un point de vue mathématique, la latitude d'un point est l'angle au centre que forme la normale (verticale) en ce point avec le plan équatorial (voir la Figure II.4).

II.2.2. Longitude:

La longitude (Figure II.4) représente le positionnement est-ouest d'un point sur Terre (ou sur une autre sphère), exprimée en valeur angulaire par rapport à la longitude de référence qui est le méridien de Greenwich. Le méridien est la ligne épousant la courbure terrestre, reliant tous les points de même longitude du pôle Nord au pôle Sud et coupant l'équateur à angle droit. La longitude est comptée de 0° à 180°, positivement vers l'est et négativement vers l'ouest. Par convention, le méridien de Greenwich (référence) a la longitude 0° [4].

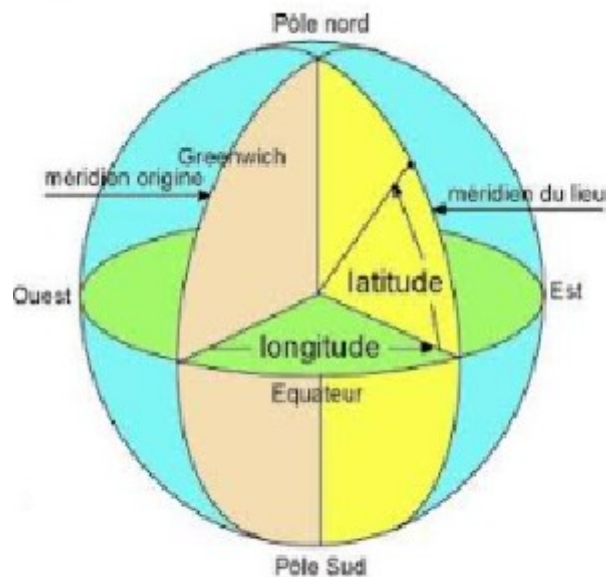


Figure. II.4: la latitude et longitude.

II.2.3. Altitude :

L'altitude est l'élévation verticale d'un lieu par rapport à un niveau de base. En d'autres termes ; c'est sa distance à une surface de niveau de référence ; le plus souvent le niveau de la mer (ou niveau zéro) est pris comme surface de référence. L'altitude est mesurée en mètre (m) [3].

II.3. Normes d'installation de panneaux solaires fixes :

Avant d'installer des panneaux solaires, les points importants suivants doivent être abordés et appliqués afin d'assurer la meilleure production d'énergie électrique :

II.3.1. La direction du panneau solaire :

Afin de prouver que la direction optimale pour orienter les panneaux solaires est le sud, nous avons mené l'expérience suivante :

Nous avons utilisé quatre panneaux solaires. Le premier orienté vers le nord, le deuxième vers le sud, le troisième vers l'est et le quatrième vers l'ouest. Puis, nous avons mesuré le courant, la tension et l'éclairement pour chaque panneau solaire à 9h 30, 12h 30 et à 15h 30 pendant la journée du 26 avril 2023, pour un angle d'inclinaison de 38°. Ce processus nous permet d'élaborer les Courbes G (temps) et P (temps), pour les quatre panneaux qui peuvent être représentées comme suit :

Direction Est :

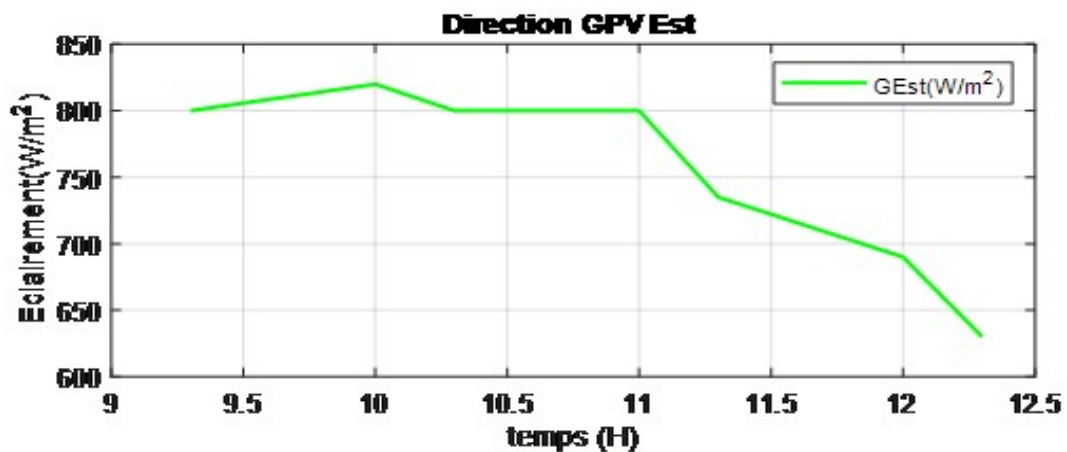


Figure. II.5: Evolution de l'éclairement en fonction de temps pour un panneau fixe orienté à l'Est

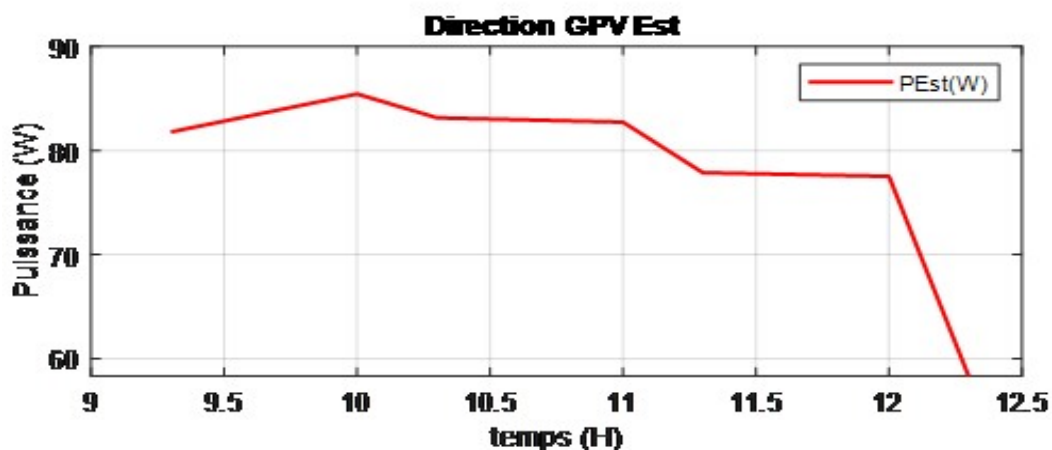


Figure. II.6: Evolution de la puissance en fonction de la tension pour un panneau fixe orienté à l'Est

Les Figures II.5 et II.6 donnent les résultats surveillés et mesurés pour le jour du 26 avril 2023 pour le panneau fixe orienté à l'Est.

Direction Ouest :

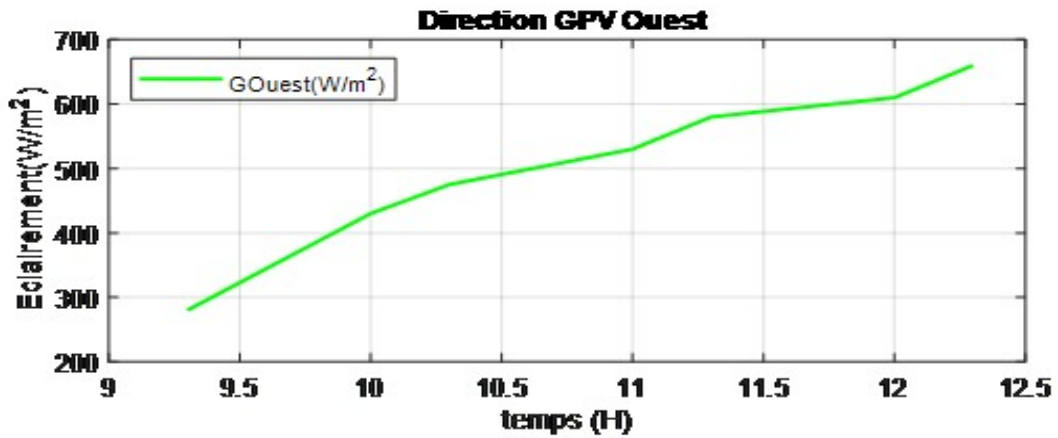


Figure.III.7: Evolution de l'éclaircement en fonction de temps pour un panneau fixe orienté à l'Ouest.

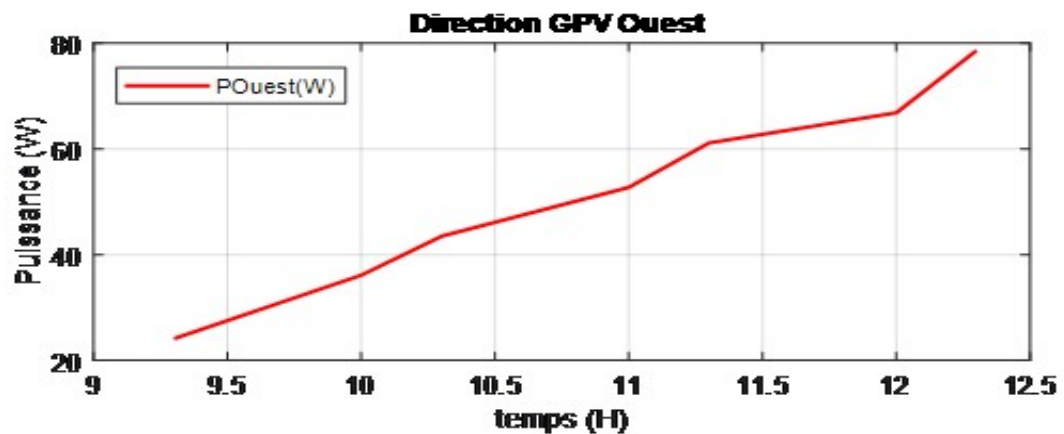


Figure. II.8: Evolution de la puissance en fonction de la tension pour un panneau fixe orienté à l'Ouest

Les Figures II.7 et II.8 donnent les résultats surveillés et mesurés pour le jour du 26 avril 2023 pour le panneau fixe orienté à l'Ouest.

Direction Nord :

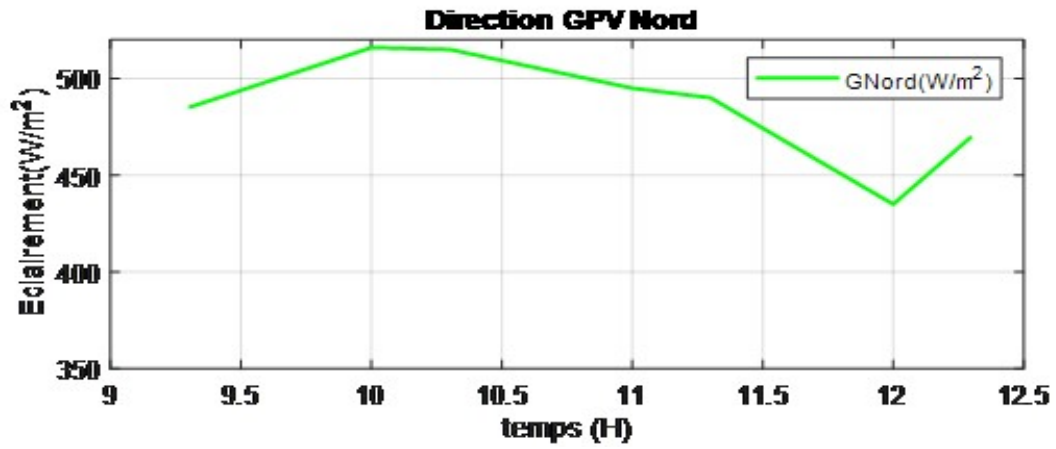


Figure. II.9: Evolution de l'éclairement en fonction de temps pour un panneau fixe orienté au Nord.

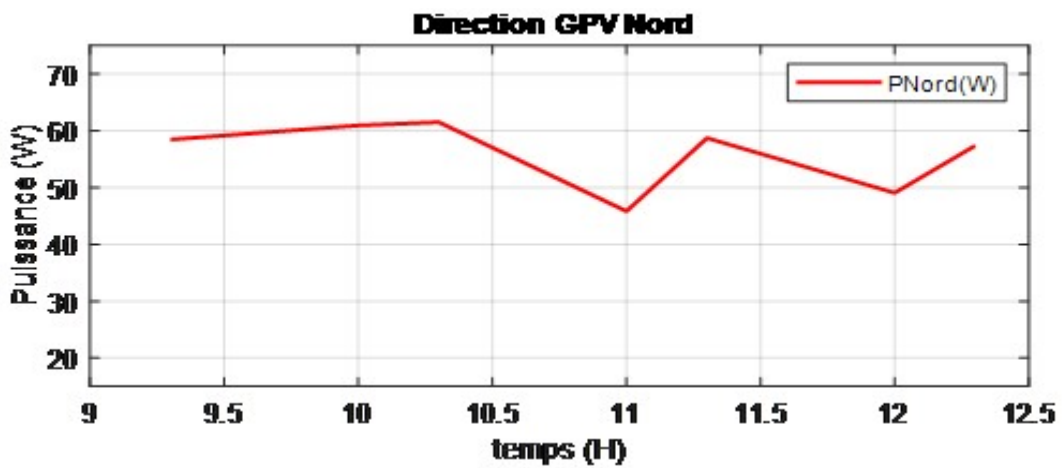


Figure. II.10: Evolution de la puissance en fonction de la tension pour un panneau fixe orienté au Nord.

Les Figures II.9 et II.10 donnent les résultats surveillés et mesurés pour le jour du 26 avril 2023 pour le panneau fixe orienté au Nord.

Direction Sud:

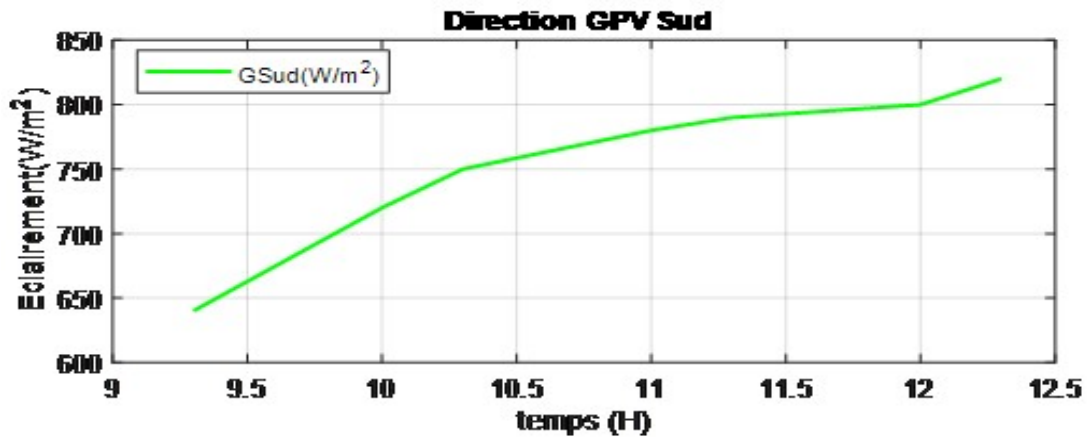


Figure. II.11: Evolution de l'éclairement en fonction de temps pour un panneau fixe orienté au Sud.

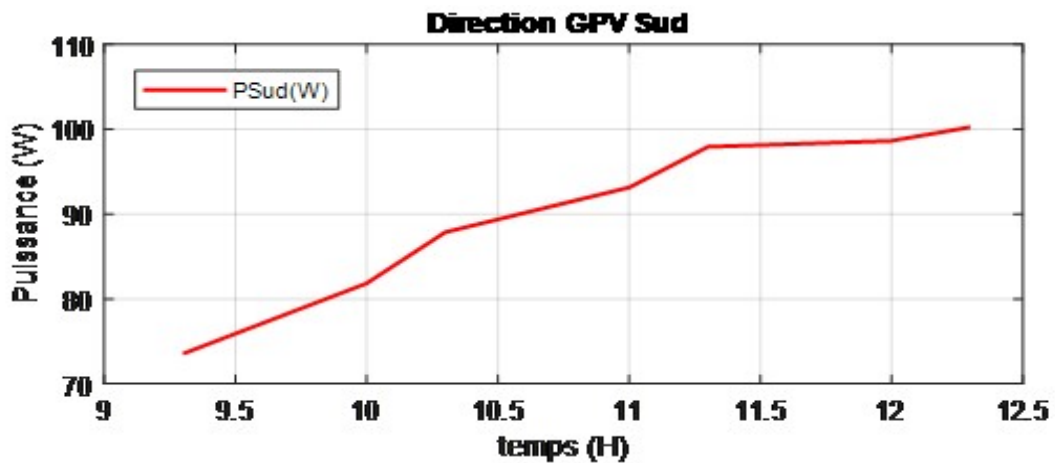


Figure. II.12: Evolution de la puissance en fonction de la tension pour un panneau fixe orienté au Sud.

Les Figures II.11 et II.12 donnent les résultats surveillés et mesurés pour le jour du 26 avril 2023 pour le panneau fixe orienté au Sud.

II.3.1.1. Comparaison entre les résultats :

La comparaison entre ces quatre directions, pour extraire les performances de chaque direction, peut être déterminée dans le tableau ci-dessous.

Direction	Horaires 26/04/2023	Eclairement (W/m²)	Tension (V)	Courant (A)	Puissance (W)
Est	9 :30	800	18.8	4.35	81.78
	12 :30	630	18	3.24	58.32
	15 :30	290	19.05	1.45	27.62
Ouest	9 :30	280	18.40	1.31	24.10
	12 :30	660	20.05	3.92	78.59
	15 :30	725	20.10	4.61	92.66
Nord	9 :30	485	20.5	2.85	58.42
	12 :30	470	20.7	2.77	57.33
	15 :30	420	20.00	2.17	43.4
Sud	9 :30	640	19.3	3.81	73.53
	12 :30	820	19.5	5.14	100.23
	15 :30	645	19.8	3.87	76.62

Tableau II.1 : Résultats et performances pour les quatre directions.

II.3.2. Choix de l'angle d'inclinaison du panneau solaire :

Si l'on s'en réfère uniquement à la théorie, l'inclinaison parfaite de nos futurs panneaux solaires doit être comprise entre 30° et 35° par rapport à une ligne horizontale. Car comme on le sait, le soleil voit son angle par rapport à l'horizon fluctuer au fil des saisons. En hiver, il faudrait que nos panneaux soient inclinés à 60° environ, contre 45° au printemps et 20° en hiver. Par conséquent, le plus simple, c'est de faire une moyenne entre toutes ces inclinaisons. Cela donne 30° environ, et cela tombe bien [1].

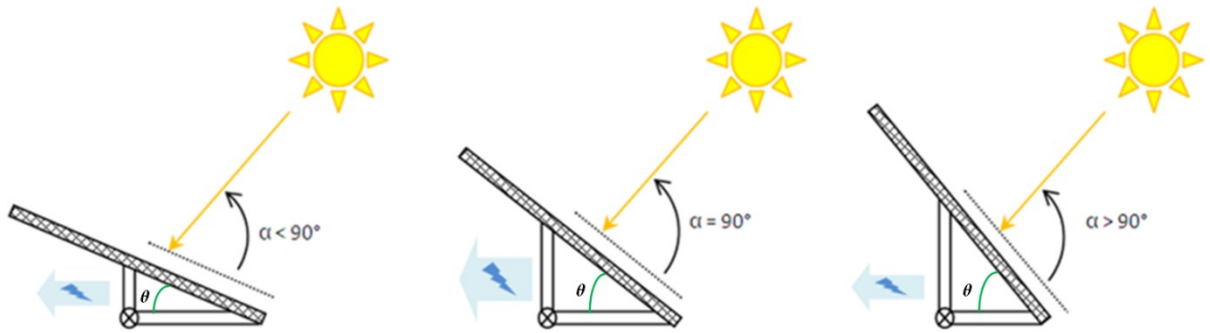


Figure II.13: L'angle d'incidence des rayons solaires.

II.3.3. Installation de panneaux en parallèle ou en série ou mixte :

Selon le courant, la tension et la puissance désirés d'une installation PV les concepteurs peuvent lors adoptées les topologies énumérées ci-dessous:

- **Installation série :**

Lorsque l'on branche des modules photovoltaïques en série, cela additionne les voltages, tout en conservant un ampérage identique. Il s'effectue normalement entre des modules de même ampérage. Dans le cas contraire, l'ensemble s'aligne sur l'ampérage le plus faible.

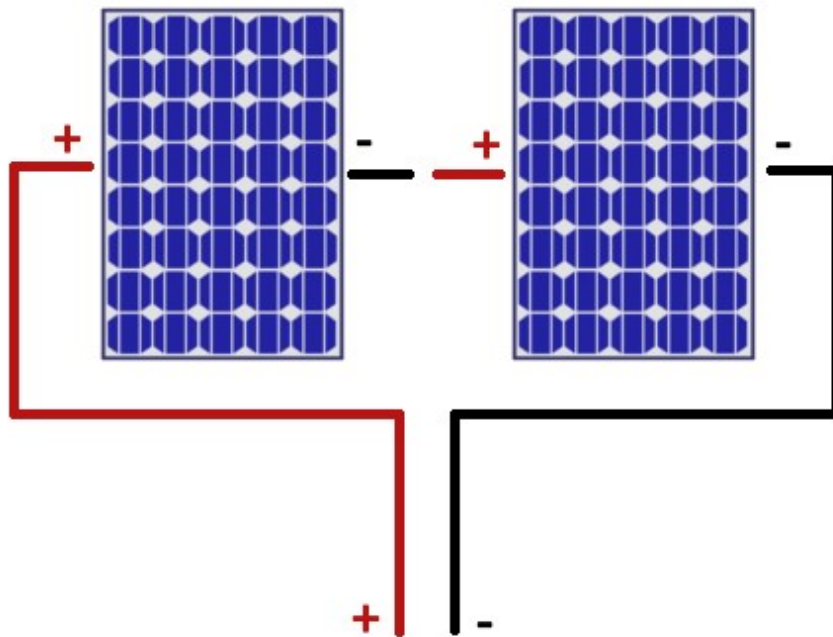


Figure. II.14: Le montage de modules photovoltaïques en série.

- **Installation parallèle :**

Lors d'un montage de modules en parallèle, ce sont les intensités (ampérage) qui s'additionnent, tandis que la tension (voltage) reste identique. Le résultat est donc inverse d'un branchement en série. Il s'effectue normalement entre des modules de même voltage, et ce, afin d'éviter tout risque de surtension ou de court-circuit. Les intensités peuvent quant à elles être différentes, puisqu'elles s'additionnent. Ce type de branchement est utilisé lorsqu'on souhaite une forte intensité.

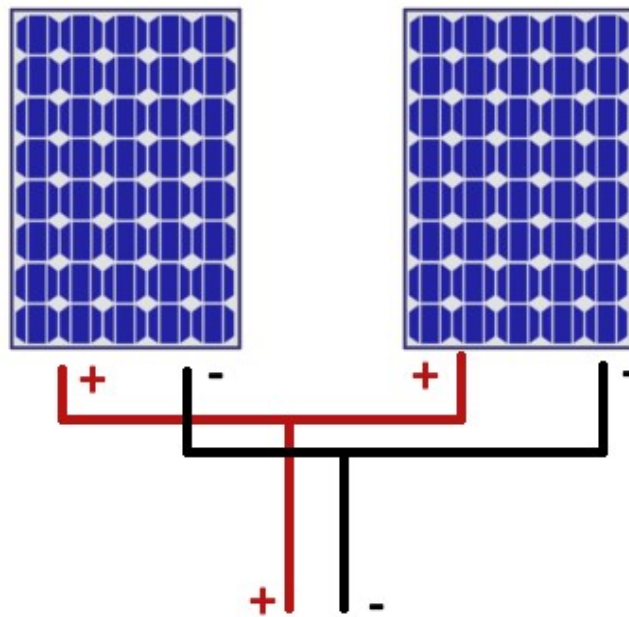


Figure. II.15: Le montage de modules photovoltaïques en parallèle.

- **Installation mixte :**

Une installation mixte est possible, à partir de quatre panneaux solaires, dont le nombre doit toujours être pair. Ce type d'installation permet d'augmenter la valeur de la tension et du courant aussi.

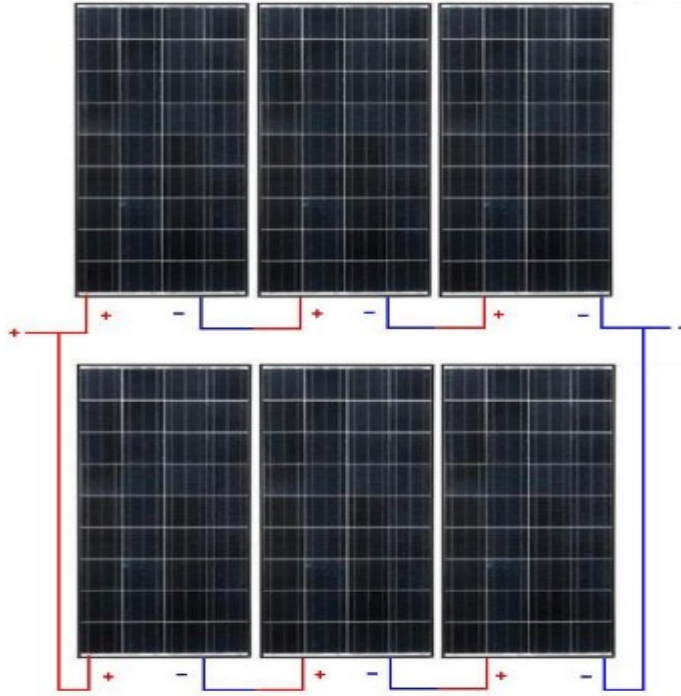


Figure. II.16: Le montage de modules photovoltaïques en mixte.

II.3.4. Distance entre les panneaux solaires :

C'est l'un des points les plus importants à prendre en compte, car le non-respect de la distance nécessaire entre les rangées conduit à ombrager les rangées qui suivent. Cela conduit à une diminution du rendement, surtout si l'ombrage est sur les cellules qui composent la boîte de jonction et le pôle négatif.

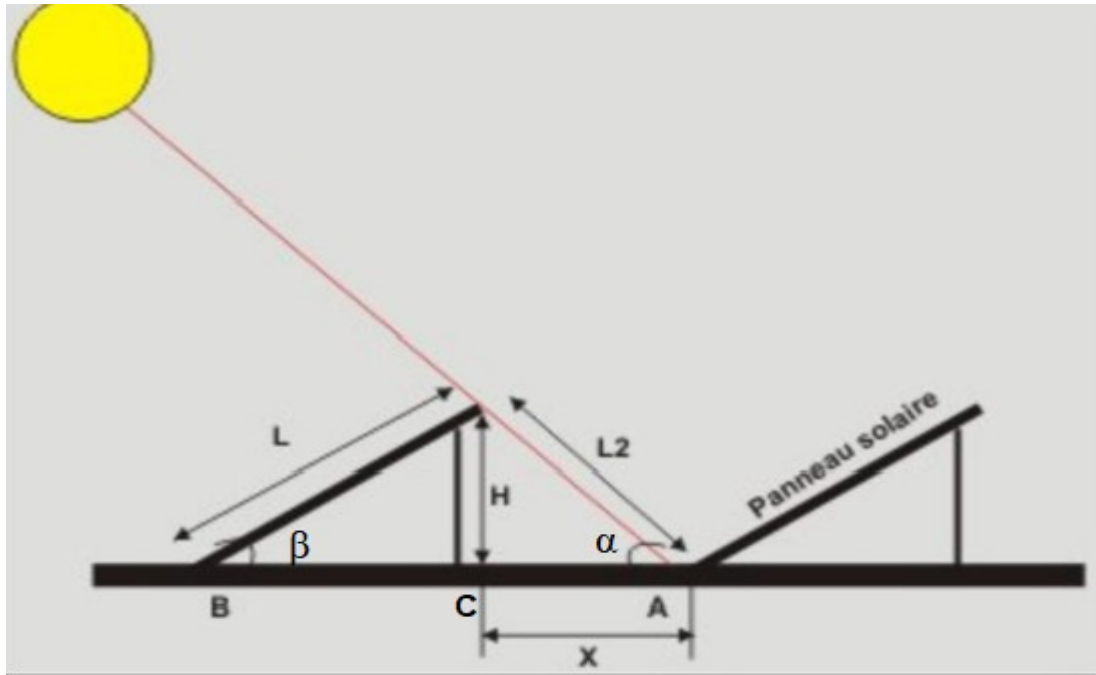


Figure. II.17: Calcul de la distance entre les panneaux solaires.

- **Méthode de calcul :**

La distance entre les rangées de panneaux est calculée de la manière suivante :

L=longueur de panneau ;

H=hauteur ;

α =l'angle du soleil le 21 décembre ;

β =l'angle d'inclinaison du panneau ;

$$[BC]=L \cdot \cos (\beta) \quad (\text{II.1})$$

$$H=L \cdot \sin (\beta) \quad (\text{II.2})$$

$$AC=x=\frac{L \cdot \sin (\beta)}{\tan (\alpha)} \quad (\text{II.3})$$

II.4. Les types d'installations :

II.4.1.installation On grid(couplée au réseau):

L'expression on-grid vient de l'anglicisme grid, signifiant « réseau » en anglais. Les panneaux solaires connectés on-grid sont en réalité des panneaux solaires connectés au réseau de distribution classique sans batteries.

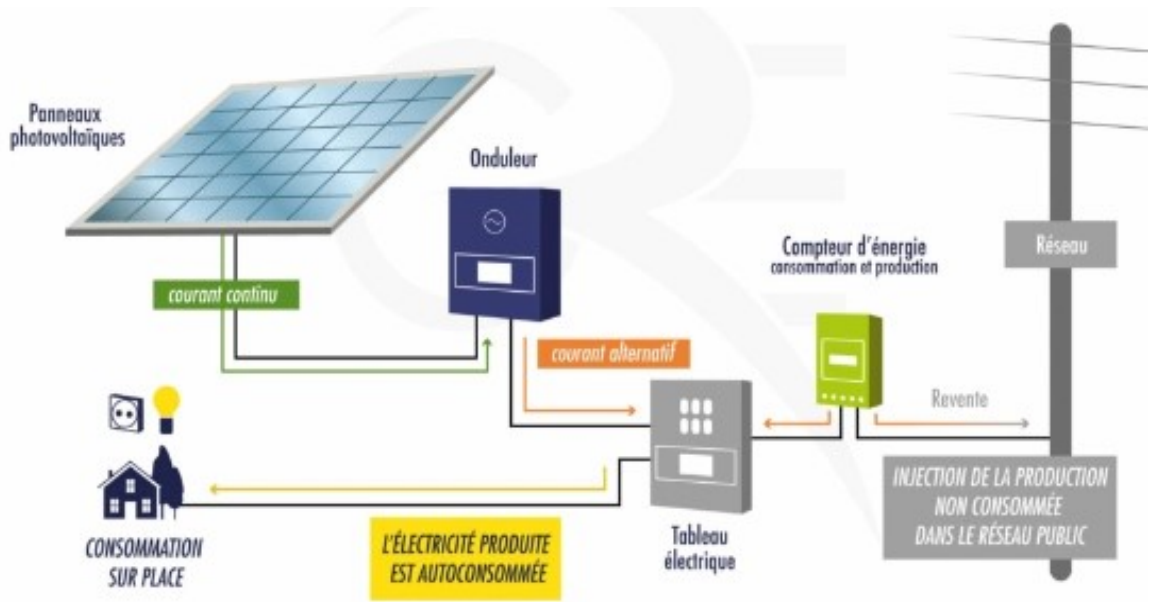


Figure. II.18: Installation on grid.

II.4.2.Installation Off grid(hors réseau):

Dans ce type d'installation d'autoconsommation énergétique, les panneaux solaires ne sont pas connectés au réseau. Le système électrique fonctionne en autonomie sur batterie ou alimente directement les appareils électriques qui y sont reliés.

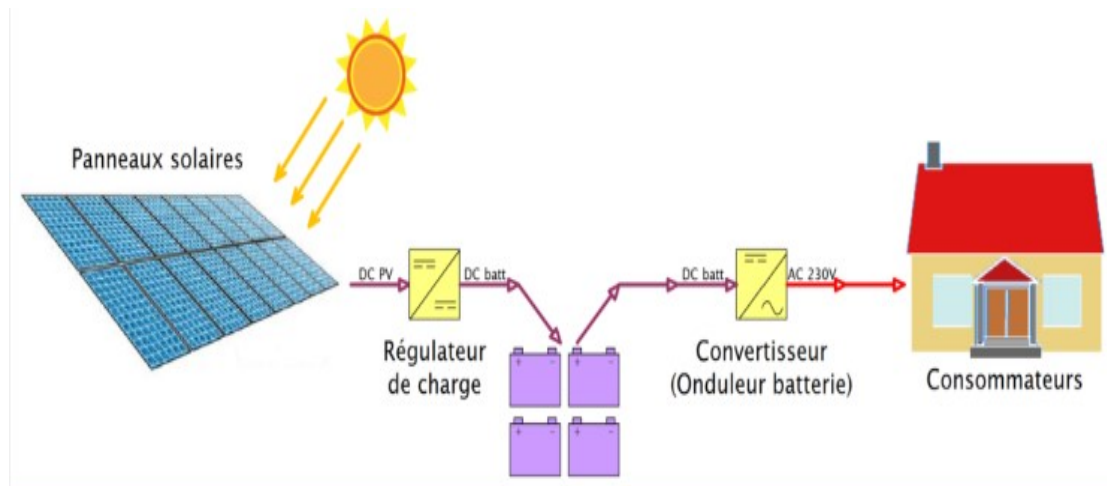


Figure.II.19: installation off grid.

Et pour les sites isolés : on parle de site isolé quand le lieu concerné n'est pas relié au réseau de distribution électrique. Les panneaux qui sont présents sur ce site sont non reliés au réseau, donc dits off-grid.

II.5.Le suiveur solaire :

Le soleil émet beaucoup d'énergie vers la terre, où si nous pouvons exploiter l'énergie émise par le soleil pendant une journée, nous aurions atteint une production

d'électricité suffisante pour toute une année, alors les fabricants cherchent à améliorer l'efficacité des panneaux solaires qui ne dépasse pas 30%, d'où l'idée d'un tracker solaire pour suivre le soleil et améliorer la production d'énergie électrique [7].

II.5.1. Définition d'un suiveur solaire :

Un suiveur solaire est un dispositif utilisé pour orienter un panneau solaire photovoltaïque ou une lentille vers le soleil en utilisant les capteurs solaires ou de lumière connectés à la machine (ex : moteur pas à pas, servomoteur, piston rempli de gaz). Par conséquent, les systèmes de suivi du soleil peuvent collecter plus d'énergie que ce qu'un système à panneaux fixes collecte [8].

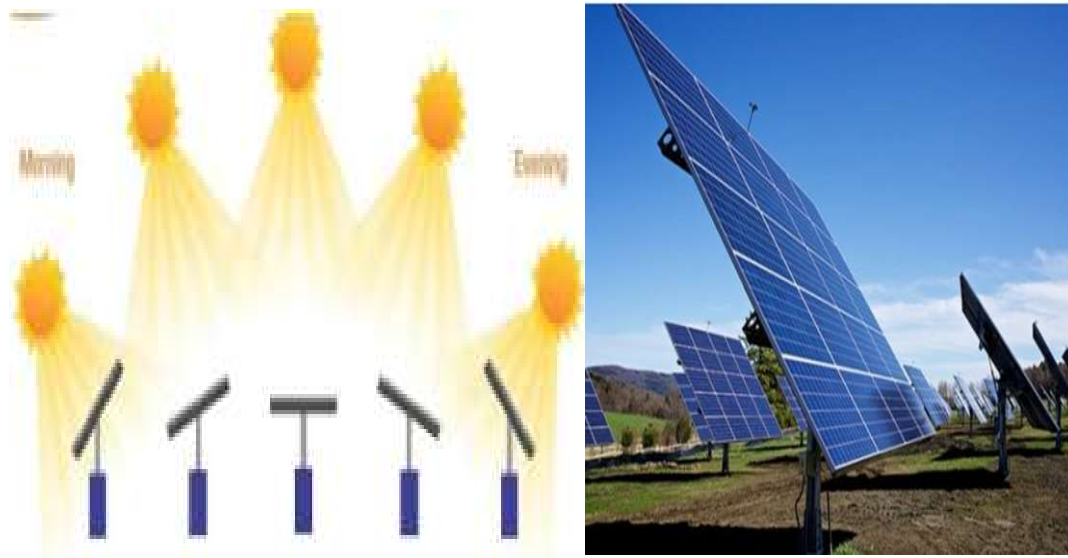


Figure II.20 : suiveur solaire.

II.5.2. Types des suiveurs solaires :

La façon dont un système de suivi solaire se déplace dépend du type de système dont il s'agit. Il existe trois types de suiveurs solaires :

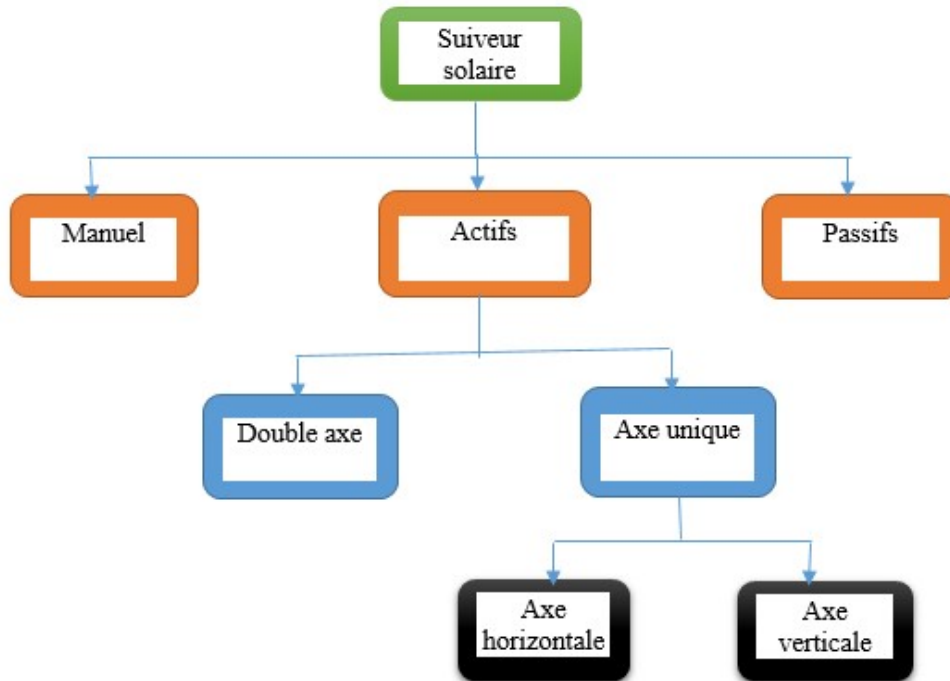


Figure. II.21: classification des suiveurs solaires.

II.5.2.1. Suiveurs solaires manuels :

Les trackers manuels sont généralement orientés vers le nord dans l'hémisphère sud. La composante manuelle exige qu'une personne ajuste physiquement les panneaux en fonction des variations saisonnières, comme l'hiver et l'été. Ceci n'est pas pratique pour les gros systèmes et, par conséquent, cette forme de tracker n'est pas souvent employée dans les installations commerciales [7].

II.5.2.2. Suiveurs solaires passifs :

Les suiveurs passifs consiste dans son architecture de deux tubes en cuivre montés sur les faces Est et Ouest du panneau PV. Le tube en cuivre est plein de fluide chimique qui peut se vaporiser à basse température.

En effet, pendant l'exposition au soleil, la température sur un côté du panneau solaire augmente, ce qui mène à la vaporisation du fluide dans le tube en cuivre. La partie du liquide vaporisé occupe donc un volume intérieur plus important, et sa partie liquide est déplacée vers le côté ombré. , le système d'inclinaison devient déséquilibré. Ce déséquilibre fait basculer les panneaux dans le sens des rayons du soleil. Ce type de

tracker ne consomme pas d'énergie lors du repositionnement du panneau, est très rare et peu utilisé [2].

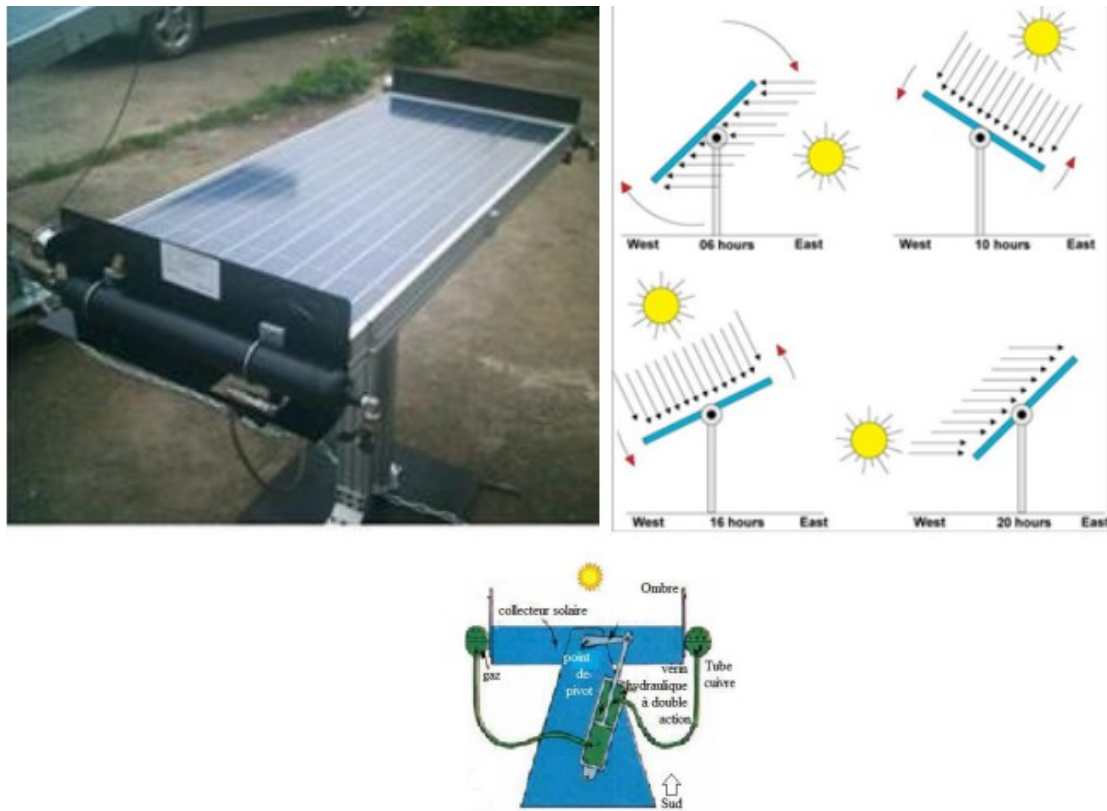


Figure. II.22: Suiveur passif.

II.5.2.3. Suiveurs solaires actifs :

Les systèmes de suivi solaire actifs reposent sur des moteurs ou des vérins hydrauliques pour changer de position. Les moteurs des trackers actifs déplacent les panneaux PV de manière à ce qu'ils soient face au soleil et absorbent un maximum de rayonnement à tout moment de la journée. A partir de là, les trackers solaires sont classés, selon le mode de leur mouvement.

II.5.2.3.1. Tracker solaire à axe unique :

Comme son nom l'indique, les trackers à axe unique suivent la position du soleil lorsqu'il se déplace d'Est en Ouest. Ces trackers peuvent augmenter la production entre 25% et 35%. Le système de poursuite mono axial est la solution la plus simple et la plus utilisée, mais la moins précise. Ceux-ci sont généralement utilisés dans des projets commerciaux et industriels. A cette catégorie appartiennent les suiveurs à axe horizontal et les suiveurs à axe vertical [8].

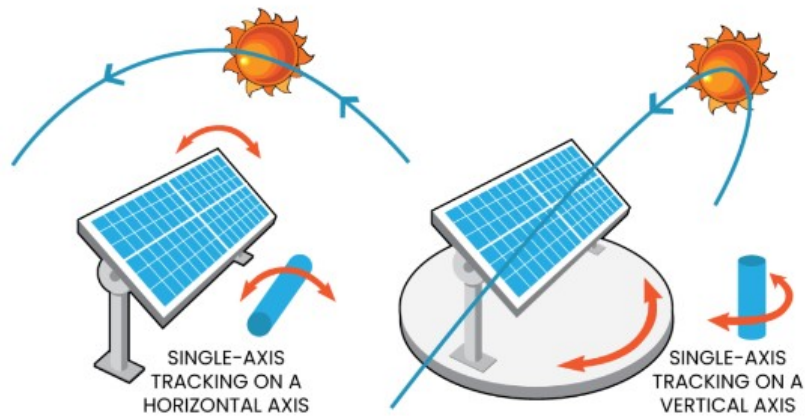


Figure. II.23 : Tracker solaire à axe unique.

- **Suiveurs à axe horizontal :**

Leur conception simple. Ce type de suiveurs tourne d'Est en Ouest tout au long de la journée sur un axe fixe, qui est parallèle au sol, et il est considéré comme la configuration de suivi la plus rentable dans de nombreuses applications PV. Voir la figure II.23.

- **Suiveur solaire à axe vertical :**

Ces systèmes peuvent être installés dans une orientation Nord/Sud ou Est/Ouest pour suivre davantage le mouvement « de haut en bas » du soleil dans le ciel. Ce type de suiveurs tourne tout au long de la journée selon un axe fixe, qui est vertical par rapport au sol, voir la figure II.23. Ceux-ci sont le plus souvent observés dans des endroits de haute altitude/montagneux ou à des latitudes plus extrêmes [8].

II.5.2.3.2. Tracker solaire à double axe :

Ce suiveur solaire possède deux axes de rotation (Est-Ouest/ et Nord-Sud), ce qui lui permet de suivre les mouvements du soleil en azimut et en inclinaison au cours de la journée (Figure II.24). Ainsi, le capteur, doté du suiveur à double axes, reste constamment dirigé vers le soleil. Ce type de suiveurs est très imposant et fournit de meilleures performances par rapport au suiveur mono-axe [3].

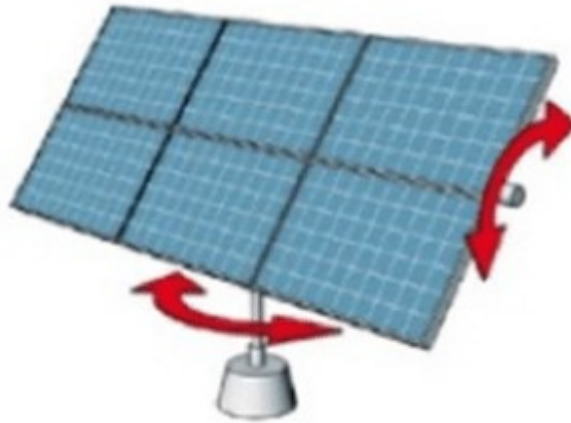


Figure. II.24 : Tracker solaire à double axe.

II.5.3. Avantages et inconvénients d'un suiveur solaire :

II.5.3.1. Avantages :

- ❖ Les trackers solaires sont très bénéfiques dans les installations utilitaires ou commerciales à grande échelle.
- ❖ L'installation d'un système de suivi solaire permettra de produire plus d'énergie dans une zone limitée (+ 40 % de production à surface de panneaux solaires égale).
- ❖ Excellent investissement : Toute centrale solaire développée ajoutera à la valeur de la propriété et de l'entreprise à long terme. Alors que les périodes de récupération varient entre 5 et 8 ans, selon la structure de financement, les centrales solaires produisent de l'énergie pendant 20 à 25 ans.
- ❖ Augmente le nombre de cas d'implantation quand les solutions classiques ne sont pas possibles.
- ❖ Peut valoriser les espaces de terrains perdus.

II.5.3.2. Inconvénients :

- ❖ Le principal inconvénient des traqueurs solaires est leur faible résistance aux vents. En effet, ceux-ci se replient lorsque le vent atteint des vitesses supérieures à 11m/s (11 à 13.88 m/s).
- ❖ Nécessité d'un permis communal.
- ❖ Encombrant et demande un grand terrain.

Chapitre II: Caractéristiques et propriétés des panneaux solaires au fil de la journée

- ❖ Risque de panne du suiveur, l'intervention est difficile ou délicate.
- ❖ Les systèmes de suivi sont légèrement plus chers que leurs homologues fixes, en raison de la technologie plus complexe et des pièces mobiles nécessaires à leur fonctionnement [4].
- ❖ Les suiveurs solaires sont généralement conçus pour les climats avec peu ou pas de neige, ce qui en fait une solution plus viable dans les climats plus chauds. Le rayonnement fixe s'adapte plus facilement aux conditions environnementales difficiles que les systèmes de suivi [4].

Conclusion :

De par l'étude de ce chapitre nous avons pu faire le point sur plusieurs facteurs tels que : la latitude, l'angle d'inclinaison et le mouvement du soleil au cours de la journée. En effet ces paramètres influent sur la production d'énergie électrique d'un capteur solaire. Entre autres, l'étude expérimentale faite sur un panneau fixe orienté selon le Nord, l'Est l'Ouest puis le Sud a montré que la direction optimale pour orienter les panneaux solaires est le Sud. Puis, les normes d'installation de panneaux solaires et les différents types de suiveurs solaires ont été considérés.

*Étude expérimentale d'un
panneau solaire fixe et d'un
panneau solaire mobile*

Introduction :

Ce chapitre présente l'étude et l'analyse des caractéristiques électriques d'un capteur solaire photovoltaïque fixe et celui muni d'un suiveur solaire, dans des conditions de rayonnement solaire et de température variables à un site situé dans la ville d'Annaba en Algérie. En déduisant et en comparant les caractéristiques, telles que : le courant, la tension et la puissance restitués à différents moments de la journée. Ce qui nous conduira par la suite à des observations intéressantes et conclusions essentielles concernant l'évaluation des performances du capteur photovoltaïque et ses applications.

III.1.Position du soleil :

Il est bien connu que la terre tourne sur elle-même et autour du soleil, mais l'observateur à la surface de la terre voit que le soleil est celui qui tourne autour de la terre d'est en ouest, ceci est connu comme le mouvement apparent du soleil qui change à chaque instant de la journée.

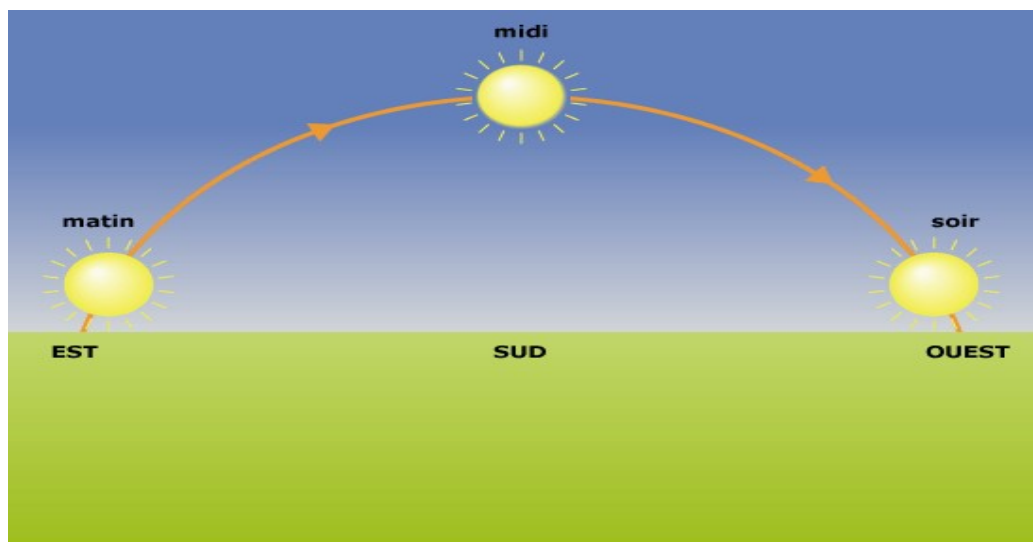


Figure III.1 : Position du soleil pour une journée

III.2. Objectif d'un suiveur soleil :

Pour produire un maximum d'électricité, un module photovoltaïque doit être incliné de façon perpendiculaire aux rayons du soleil. Ceci est très généralement impossible à obtenir car la position du soleil varie en fonction de l'heure de la journée et aussi en fonction des saisons. L'orientation optimale de l'angle d'inclinaison des modules photovoltaïques, s'avère la méthode idéale pour optimiser la production du générateur photovoltaïque.

L'objectif d'un suiveur solaire est de pouvoir suivre le soleil tout au long des mois et de la journée. En suivant continuellement la position du soleil, ce système permet d'assurer une production maximum.

III.3. Caractéristiques géographiques du site :

L'emplacement exact utilisé pour l'étude expérimentale est l'Innovation Center (GRP Cluster Annaba innovation center A.I.C) bâti de la commune d'Elbouni dans la ville d'Annaba, au nord de l'Algérie. Les détails géographiques et météorologiques de ce site, pour un *Azimuth 0° (vrai sud)* sont représentés sur le Tableau III.1.

<i>Caractéristiques géographiques du site</i>				
Nom du site	Latitude en degrés	Longitude en degrés	Altitude en mètre	Albédo
Annaba	36.9	7.76	23	0.3

Tableau.III.1:Données géographiques du site

III.4. Description du banc d'essais expérimental :

C'est un système PV qui n'est pas reliée au réseau électrique et se comporte essentiellement de deux systèmes photovoltaïques, le premier est fixe par rapport à la position du soleil, et le second se déplace en fonction de la position du soleil. Ces deux systèmes sont deux modules PV utilisés durant notre étude jouent le rôle d'un capteur solaire de type *Dimel Solar-100M(36)*, existant au niveau du site cité précédemment (voir Figure (III.3)) et dont les caractéristiques électriques sont illustrées dans le tableau ci-dessous.



Figure.III.2: Capteur solaire photovoltaïque.

<i>Paramètres électriques</i>	<i>Module solaire de type : Dimel Solar-100M(36)</i>
-Puissance maximale (P_{max}) :	100W(WP)
-Tension à P_{max} (V_{mp}) :	18.35 V
-Courant à P_{max} (I_{mp}) :	5.45A
-Tension en circuit ouvert (V_{oc}) :	22.7V
-Courant en court-circuit (I_{sc}):	5.8A
-Type de cellules:36Pcs, 94mm×156mmSilicone Monocristallin	

Tableau.III.2: Caractéristiques du panneau solaire utilisé.

III.4.1. Les instruments de mesure utilisés :

Pour déterminer les performances thermiques et électriques des capteurs solaires photovoltaïques dont les dimensions et les caractéristiques géométriques sont indiquées au tableau III.2, on doit mesurer un certain nombre de paramètres indispensables pour le déroulement des manipulations, pour ce faire nous avons utilisé les instruments énumérés ci-dessous:

- 1-Pyranometer électronique pour mesurer le rayonnement global.
- 2-Thermomètre pour mesurer la température.
- 3-Appareils de mesure de courant et tension (I-V) du module PV.
- 4-Resistance variable.
- 5-Niveau d'angle pour mesurer l'angle.

III.5.Méthode de déroulement du processus expérimentale:

Le banc expérimental pour l'étude se compose de deux systèmes PV, chacun d'eux se compose d'un module PV avec les bornes de système appliquées au circuit électrique de la figure III.3.

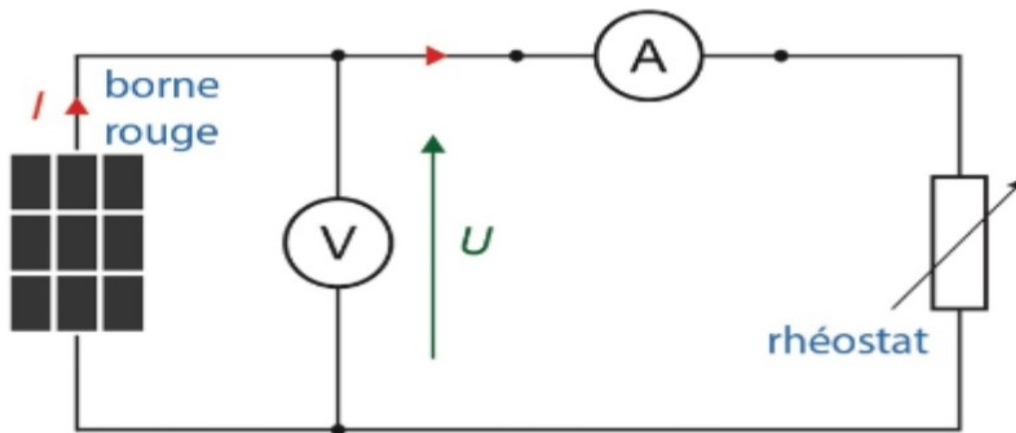


Figure III.3. Circuit de mesure du système PV

Le premier système a été installé pour avoir la même orientation, sud face à des azimuts nuls avec une inclinaison de module de 38° Sud (ce qui se rapproche de la latitude de l'emplacement), et le deuxième système a été orienté suivant la position du soleil, ayant tout deux des paramètres thermiques et électriques similaires, à savoir : une tension nominale en circuit ouvert de condition de test standard (STC) de 22,7 V, un courant de court-circuit de 5,8 A et une puissance de crête de 100W. Où STC est une abréviation pour la "**condition de test standard**" par laquelle le module PV est testé et calibré qui est : un niveau d'insolation de 1000 W/m^2 , une masse d'air de 1,5 AM et une température de cellule de 25°C .

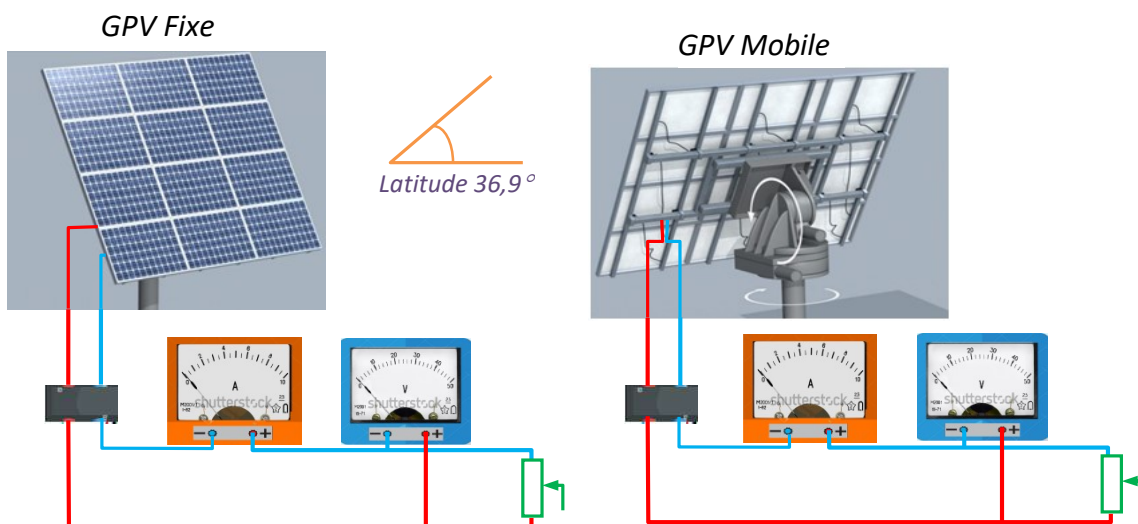


Figure III.4. Schéma de mesure de puissance PV pour un GPV mobile et fixe.

Les deux systèmes PV sont connectés en circuit fermé sur une charge qui n'est autre qu'un rhéostat de type potentiomètre (Figure III.4), et ce, afin d'acquérir l'ensemble des paramètres tels que : le courant et la tension correspondants à chaque point. Ce qui permet de

tracer les caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ et comparer leurs performances électriques. Ce processus a été effectué toutes les 1 h pendant 1 jours entre la fenêtre solaire de 9h00 à 14h00 (correspondant au 18 mars 2023).

L'un des principaux problèmes rencontrés lors des mesures était le changement/baisse spectaculaire des valeurs observées dans certains cas en raison de changements soudains de l'éclairement. En effet, contrairement à d'autres mois de l'année, le mois de Mars a un gradient d'insolation très variable car le ciel est souvent nuageux dans la zone côtière (ville d'Annaba), de sorte que chaque changement d'insolation implique une grande différence dans les valeurs observées.

III.5.1. Procédure expérimentale :

Les paramètres du panneau solaire photovoltaïque, à savoir le courant en court-circuit I_{cc} , la tension en circuit ouvert V_{co} , la puissance maximale P_m , le facteur de forme F_F et le rendement η , démontrés au chapitre I, permettent d'évaluer les performances du capteur éclairé dans des conditions météorologiques identiques.

III.5.2. Résultats et discussion :

On faisant varier la résistance (rhéostat) et à chaque fois nous mesurons le potentiel et le courant électrique aux bornes du générateur PV pour les deux systèmes étudiés. Nous avons choisi d'effectuer nos essais selon trois périodes au cours de la journée du 18 mars 2023; à savoir : à 10 heures, à 12 heures et à 14 heures, ce qui divisent la journée en trois phases. Ce processus nous a permis d'enregistrer les données de mesures qui nous ont aboutis aux tracés des courbes $I-V$ et $P-V$, des deux systèmes PV mis à l'étude.

- **La première période** : à 10h du matin.

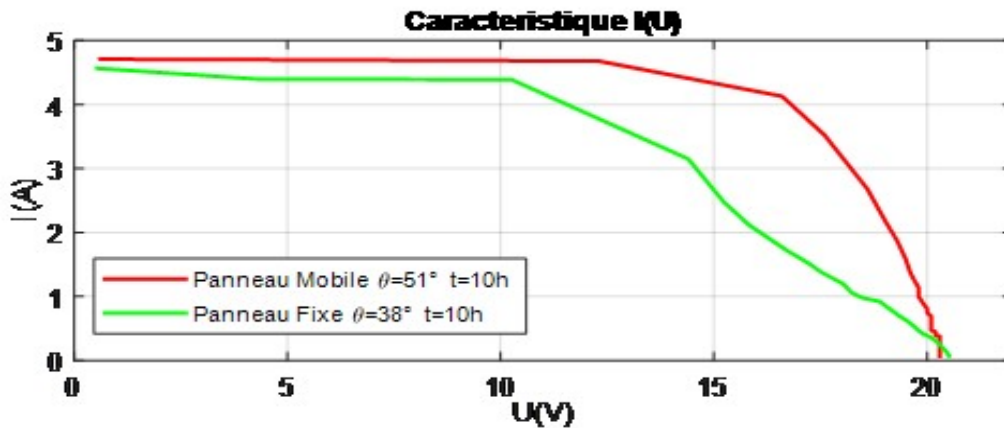


Figure.III.5: Evolution du courant en fonction de la tension pour un panneau fixe et un panneau mobile.

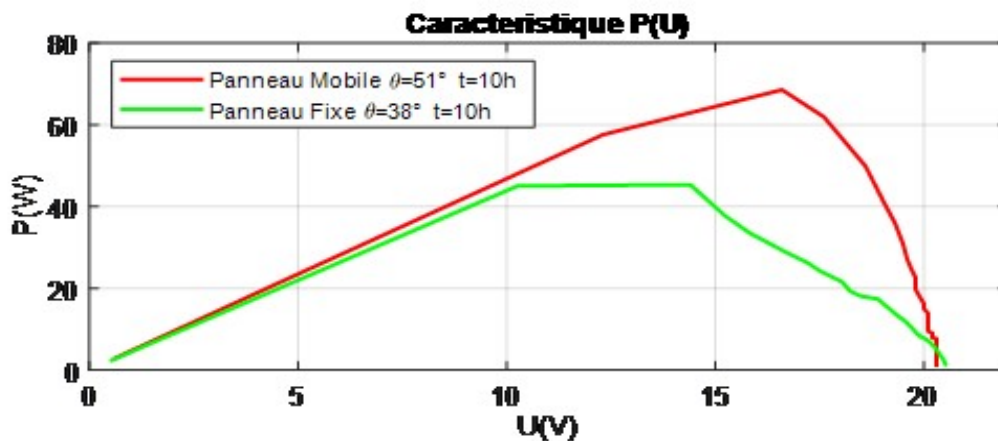


Figure.III.6: Evolution de la puissance en fonction de la tension pour un panneau fixe et un panneau mobile.

Les Figures III.5et III.6 donnent les résultats surveillés et mesurés pour le jour du 18 mars 2023 à 10h, sous les conditions climatiques suivantes :

- Eclairement $G= 800\text{W/m}^2$ pour le panneau mobile
- Eclairement $G= 770\text{W/m}^2$ pour un panneau fixe.
- Température ambiante $T=31.4$ °C.

En mode fixe, à 10h la puissance maximale produite (45.36W) sous éclairage 740 W/m^2 est inférieure à la puissance nominale du module PV conçu par le constructeur (85W) sous conditions de test standard de fonctionnement STC: 1000W/m^2 , 25°C , AM 1.5.

Ceci explique que l'angle (38°) ne permet pas au capteur d'être positionnés perpendiculairement aux rayons du soleil. En d'autres termes, la position fixe ne peut pas contenir une grande quantité d'irradiation car la surface du module PV n'est pas perpendiculaire au soleil à chaque instant.

La figure 6 montre qu'en mode mobile, à la même heure (10h), le système de suivi du soleil permet de maintenir un flux d'irradiation (800W/m^2). Par conséquent, la puissance maximale produite augmente jusqu'à 68.56W avec un rendement de 16,17%, et donnant un gain de 39,87%.

- **Deuxième période** : à 12h (midi).

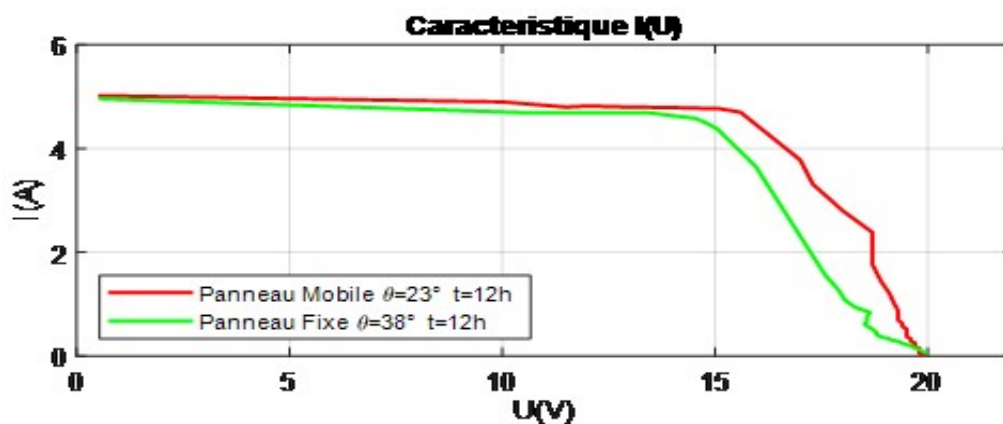


Figure.III.7: Evolution du courant en fonction de la tension pour panneau fixe et un panneau mobile à 12h.

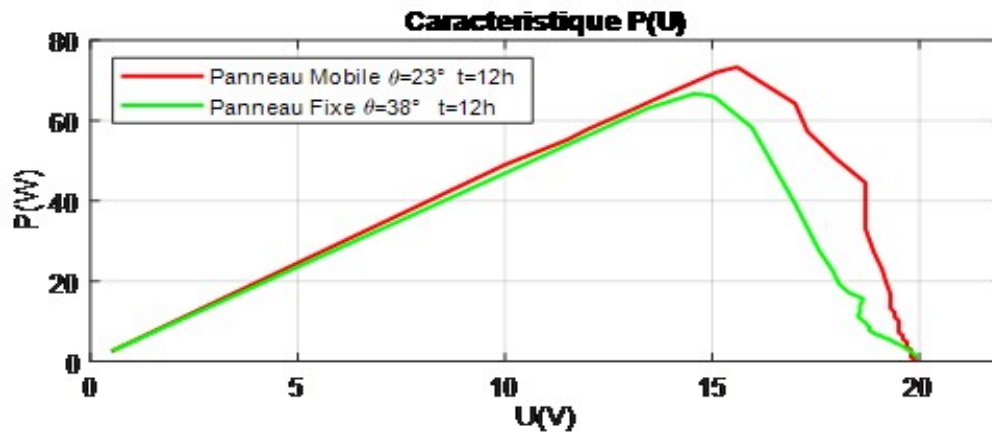


Figure.III.8: Evolution de la puissance en fonction de la tension pour un panneau fixe et un panneau mobile.

Les Figures III.7 et III.8 donnent les résultats surveillés et mesurés pour la journée du 18 mars 2023 à 12h, sous les conditions climatiques ci-dessous :

- Eclairement $G= 980\text{W/m}^2$ pour le panneau mobile
- Eclairement $G= 970\text{W/m}^2$ pour un panneau fixe.
- Température ambiante $T=34.1\text{ }^\circ\text{C}$.

Les figures III.7 et III.8 montrent qu'au temps 12h, le module PV fixe collectait une énergie importante de 66.64W tandis que l'éclairement solaire avait augmenté jusqu'à 970 W/m^2 et était verticale sur sa surface. Cependant, le système de suivi du soleil a généré 73,32 W/m^2 sous un éclairage de 980 W/m^2 .

Dans ce cas, l'irradiation est verticale sur la surface du module PV dans les deux modes, et les puissances sont presque identiques. Il en résulte que, le rendement et le gain sont très proches (voir tableau.III.3).

- **Troisième période** : à 14h après midi.

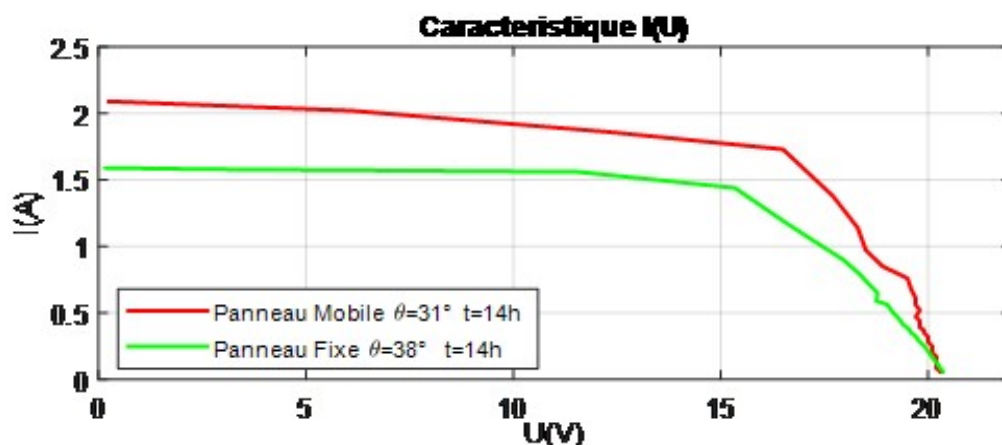


Figure.III.9: Evolution du courant en fonction de tension pour un panneau fixe et un panneau mobile.

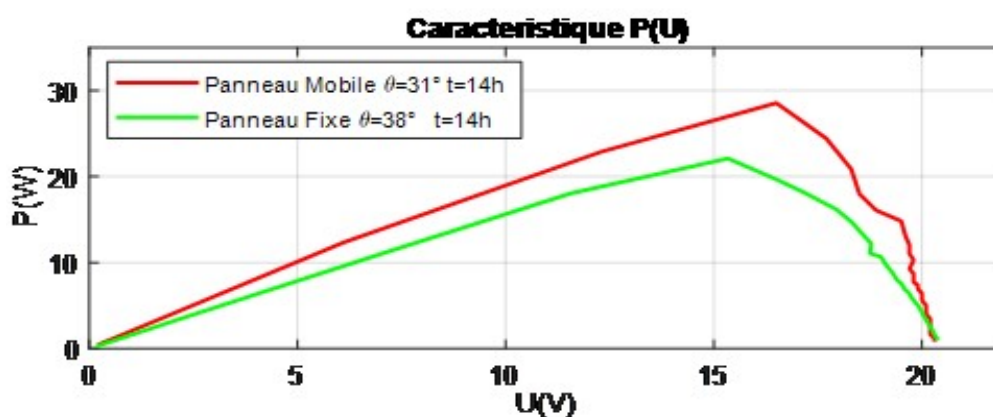


Figure.III.10: Evolution de la puissance en fonction de la tension pour un panneau fixe et un panneau mobile.

Les Figures III.9et III.10 donnent les résultats surveillés et mesurés pour le jour du 18 mars 2023 à 14h, sous les conditions climatiques énumérées ci-dessous :

- Eclairement $G= 397W/m^2$ pour le panneau mobile
- Eclairement $G= 337W/m^2$ pour un panneau fixe.
- Température ambiante $T=21.4$ °C.

L'après-midi, à 14 h 00, le module PV fixe fournit une puissance de sortie de 22,09 W, en fonction de la diminution de l'irradiation sur la surface $G=337W/m^2$. Le système de poursuite solaire maintient sa production de 28,24 W avec $G=397 W/m^2$. Cela est dû au fait que le ciel était couvert de nuage qui empêchait les rayons solaires de frapper les deux systèmes PV mis en étude. Si non on aurait constaté dans ce cas, des caractéristiques de fonctionnement

similaires à ceux enregistrées aux courbes caractéristiques de 10h du matin. Les caractéristiques courant-tension et puissance pour ce cas sont représentées sur les figures III.9 et III.10.

III.5.2.1. Comparaison entre les deux modes de fonctionnement:

La comparaison entre ces deux modes, pour y extraire les performances optimales est déterminée dans le tableau ci-dessous.

Mode d'orientation	Paramètres	10h	12h	14h
Mode fixe	Eclairement (W/m^2)	740	970	337
	Tension (V)	14.4	14.55	15.34
	Courant(A)	3.15	4.58	1.44
	Puissance (W)	45.36	66.64	22.09
	Rendement (%)	11.56	12.96	12.36
Mode mobile	Eclairement (W/m^2)	800	980	397
	Tension (V)	16.6	15.6	16.5
	Courant(A)	4.13	4.70	1.73
	Puissance (W)	68.56	73.32	28.54
	Rendement (%)	16.17	14.12	13.56
	$Gain = \frac{\eta_{Mobile} - \eta_{Fixe}}{\eta_{Fixe}}$	39.87	8.95	9.70

Tableau III.3 : Résultats et performances pour les deux modes d'orientation.

Il est a noté qu'on peut en déduire la variation du rendement instantané en fonction du rayonnement selon la relation :

$$\eta = \frac{V \times I}{A \times G} = \frac{P_m}{A \times G} \tag{III.1}$$

Avec $A = L \times l$ est l'air du panneau solaire étudié, et G : Rayonnement incident

$$A = 0,528m^2$$

Ou : L est la longueur de la cellule et l est la largeur d'une cellule qui sont indiquées sur le tableau.III.3 :

Le gain peut être obtenu par le biais de la formule suivante :

$$Gain = \frac{\eta_{Mobile} - \eta_{Fixe}}{\eta_{Fixe}} \tag{III.2}$$

Ou : η_{Mobile} est le rendement du panneau mobile et η_{Fixe} est le rendement du panneau fixe.

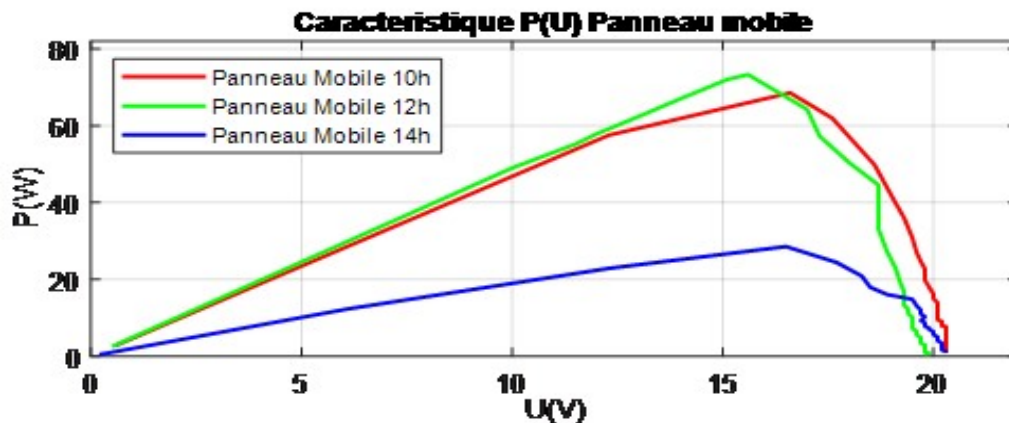


Figure.III.11: Evolution de la caractéristique de puissance en fonction de la tension pour le panneau mobile à trois périodes différentes de la journée.

La figure III.11 présente les caractéristiques de mesure de la puissance convertie par les deux systèmes PV, à savoir : GPV mobile et GPV fixe, à trois périodes différentes de la journée.

Les deux graphiques celui des périodes de 10h et de 12h sont presque confondus. De cela, nous pouvons conclure que l'expérimentation du système de suivi a prouvé rendement quotidien d'environ 1,2 fois de plus que le système PV fixe orienté à 40° vers le sud.

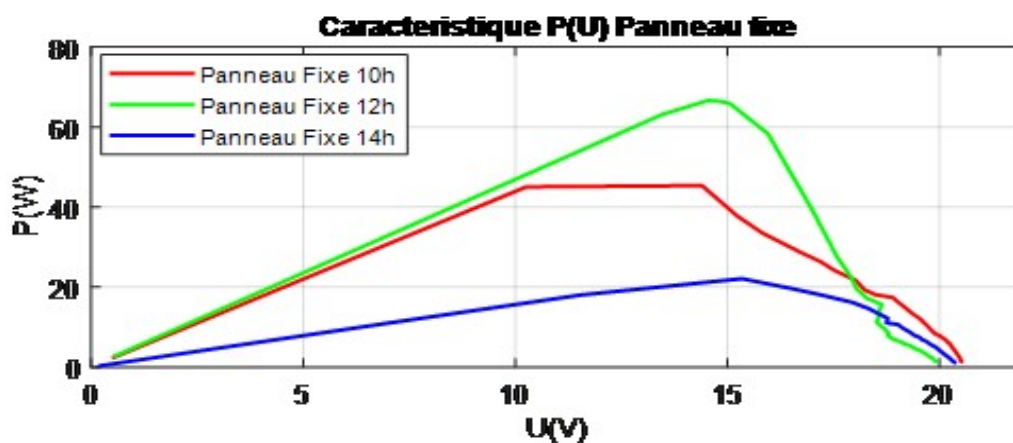


Figure.III.12: Evolution de la caractéristique de puissance en fonction de la tension pour le panneau Fixe à trois périodes différentes de la journée.

Notons que, les résultats enregistrés à 14h ne coïncident pas avec les deux autres périodes, car les systèmes PV fonctionnait à ciel couvert, donc un éclaircissement Faible soit : 337W/m^2 pour le GPV fixe et 397W/m^2 pour le GPV mobile.

Le gain en puissance du système de poursuite s'élève à 39,87% par rapport au mode fixe. Par contre le gain s'affaiblit à mesure qu'on atteint la période de 12h.

III.5.3.Variation du courant et de la tension en fonction du temps:

-Le courant I_{cc} obtenu en court-circuitant les bornes du capteur solaire et donné par l'équation(I.5)(du chapitre I) lorsque la résistance de charge est nulle. Ainsi, le courant dans le circuit de la figure III.3devient maximum ($I_{cc} = I(V = 0) = I_{ph}$, courant de court-circuit), et la tension du panneau solaire est $V = 0$.Ce courant croît linéairement avec l'intensité d'illumination du capteur et dépend de la surface éclairée, et de la température ambiante.

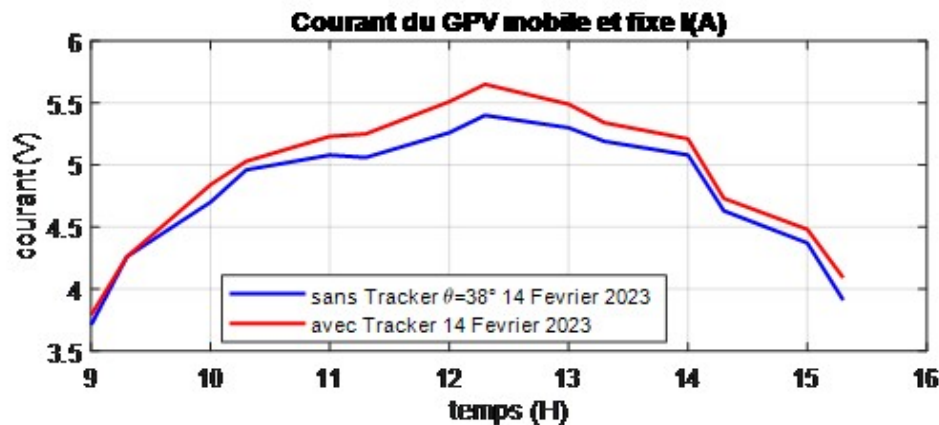


Figure.III.13: Courbe de courant en fonction du temps pour les deux systèmes PV.

Les figures III.13 et III.14 illustre les mesures de la tension à circuit ouvert V_{co} et le courant de court-circuit I_{cc} aux bornes des deux capteurs solaires mis en études durant la journée du 14 février 2023. Le module est orienté vers le sud (Angle d'azimut= 0°).

-La tension à circuit ouvert V_{co} est obtenue quand le courant qui traverse le panneau solaire est nul. Elle varie peu avec l'intensité lumineuse et décroît avec la température. Ainsi, en annulant le courant I débité par le capteur solaire, de l'équation (I.5) (du chapitre I) On obtient :

$$V_{co} = \left(\frac{nkT}{q}\right) \times \ln\left(\frac{I_{PH}}{I_o} + 1\right) \quad (\text{III.4})$$

Cette relation théorique entre le potentiel et le courant électrique est une fonction logarithmique. C'est la tension maximale d'un générateur photovoltaïque pour laquelle le courant I débité par le panneau solaire photovoltaïque est nul.

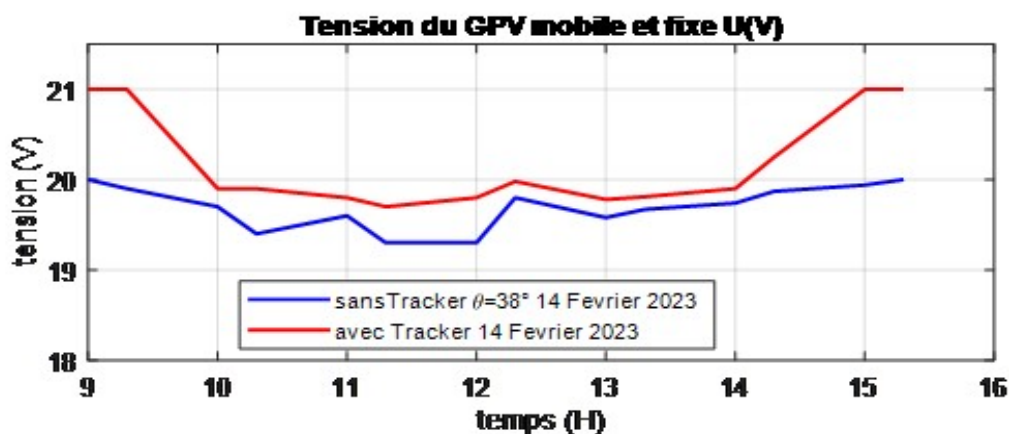


Figure.III.14 : Courbe de tension en fonction du temps pour les deux systèmes PV.

De par l'examen des figures.III.13 et III.14, on observe:

- **Pour le panneau fixe:**

- Une tension qui démarre d'une valeur initiale de 20V à 9h, ensuite elle décroît pour atteindre une valeur minimale de 19.3V à 12h.
- Un courant qui prend une valeur initiale de 3.71A à 9h, puis il enregistre une valeur maximale qui vaut 5.08A vers 11h, ensuite il décroît progressivement.

- **Pour le panneau mobile:**

- Une tension qui démarre d'une valeur initiale de 21V à 9h, ensuite elle décroît pour atteindre une valeur minimale de 19.7V à 11h30min.
- Un courant qui prend une valeur initiale de 3.79A à 9h, puis il enregistre une valeur maximale qui vaut 5.51A vers 12h, ensuite il décroît progressivement.
- Une variation de courant directement proportionnelle à deux paramètres, à savoir : l'intensité du rayonnement solaire reçue et la position du capteur solaire.

III.5.4. Variation de l'éclairement et la température au cours de la journée :

La figure III.15 présente l'évolution de l'éclairement solaire global journalier au cours de la journée du 14 février 2023. L'éclairement est 620 W/m^2 en début de journée (9h00), au environ de midi, il atteint une valeur de 959 W/m^2 . Ensuite, en fin de journée il décroît pour atteindre 657 W/m^2 à 15h 30.

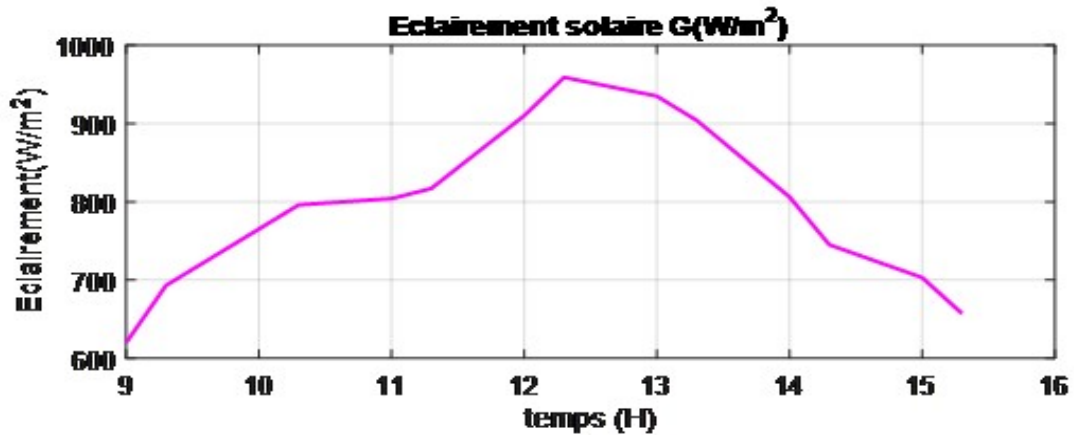


Figure.III.15 : évolution de l'éclairement au cours de la journée d'étude.

La Figure III.16 représenté l'évolution de la température ambiante durant de la journée du 14 février 2023.

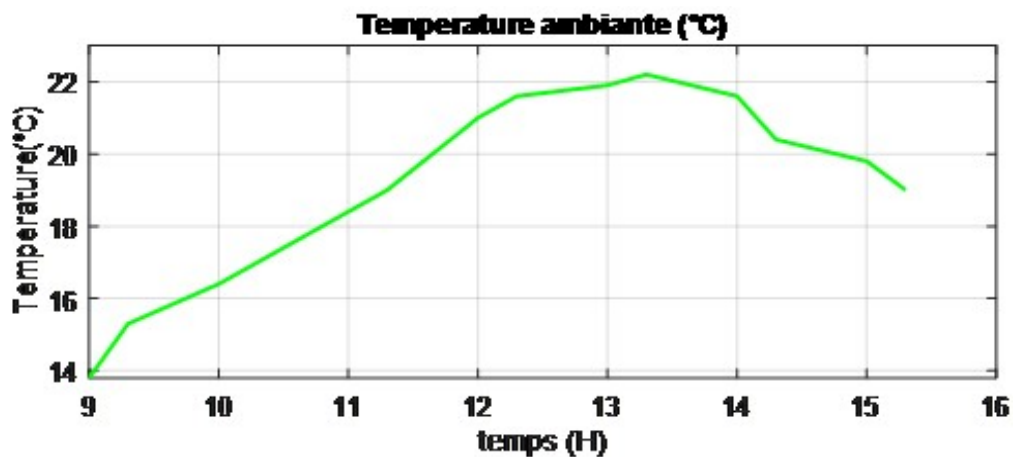


Figure.III.16 : évolution de la température au cours de la journée d'étude.

III.5.5. Variation de la puissance au cours de la journée :

La puissance fournie au circuit extérieur par le panneau solaire photovoltaïque sous éclairement et température définis, dépend de la résistance de charge. Cette puissance est maximale P_m pour un point de fonctionnement (I_m, V_m) de la courbe courant-tension (courants compris entre 0 et I_{cc} et tension comprise entre 0 et V_{co}). Ainsi, $P_m = V_m \times I_m$ donne la

puissance maximale qui représente 80% environ du produit ($V_{co} \times I_{cc}$) [12]. La figure.III.17 représente son évolution en fonction de temps.

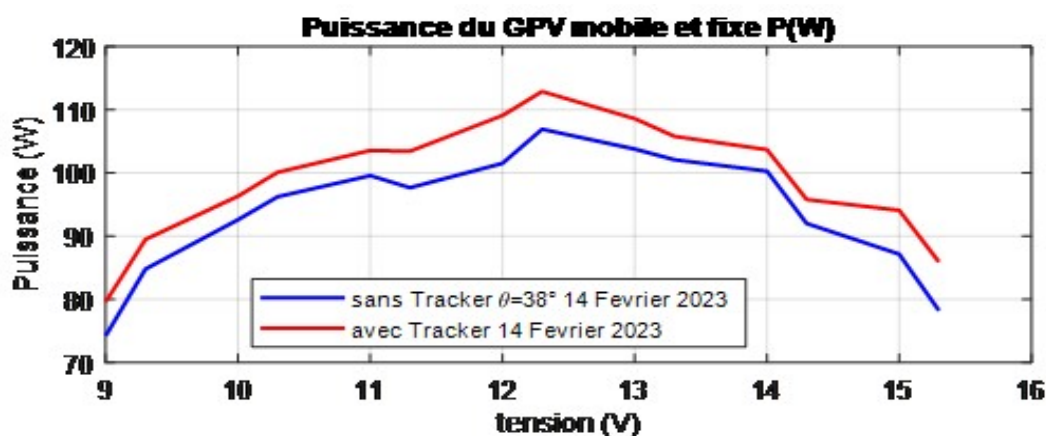


Figure.III.17: Courbe de la puissance produite pour les deux systèmes PV.

D'après la figure ci-dessus, la puissance produite par les deux modules est variable tout au long de la journée. Il peut être conclu à partir du graphique que :

- La puissance maximale quotidienne moyenne de ce capteur solaire, augmente à partir du lever du soleil et culmine vers midi, puis diminue progressivement vers le coucher du soleil.
- L'influence de l'orientation et de l'angle d'inclinaison est importante, la fixation panneau ne peut pas fournir le maximum d'énergie électrique.
- Les caractéristiques $P(t)$, $I(t)$ et $V(t)$ du panneau mobile illustrent l'amélioration de la puissance maximale par rapport au panneau fixe.

Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'étude de deux systèmes PV, à savoir : un GPV mobile et un GPV fixe. En effet, il a été démontré que le système muni d'un suiveur solaire fonctionnait correctement, et assurant une poursuite de la trajectoire du soleil. Cela est dû au fait que, pour un suiveur solaire l'inclinaison et l'orientation sont variables automatiquement selon le mouvement du soleil à chaque instant, garantissant un rayonnement incident reçu par le mode mobile plus important qu'en mode fixe. Ainsi, ce système permet de récupérer le maximum d'énergie possible et d'augmenter le rendement du panneau solaire comparativement au GPV fixe.

***Conception d'un suiveur
solaire à base d'une carte
Arduino***

Introduction :

Ce dernier chapitre concerne la réalisation pratique de notre projet, où on présente la procédure adoptée afin de réaliser un suiveur solaire à base d'une carte Arduino. Ce dernier comprend le corps du suiveur (partie mécanique) et la commande de mise en mouvement (partie électronique). Le suiveur solaire réalisé, se base principalement sur un automate capable de suivre une source lumineuse en s'orientant de façon optimale en direction des rayons lumineux et ce, suivant à un seul axe de rotation (horizontal).

Notre projet porte sur la réalisation d'un prototype de suiveur solaire mono axe pour un générateur photovoltaïque, l'orientation de ce dernier vers l'Est et l'Ouest pour capter le maximum d'énergie solaire pendant la journée. Ce système est commandé par une carte Arduino UNO d'un microcontrôleur qui sert à manipuler les différents composants de ce système.

IV.1. Schéma synoptique :

Le schéma synoptique descriptif du prototype de suiveur solaire à base d'une carte Arduino est représenté à la figure ci-dessous :

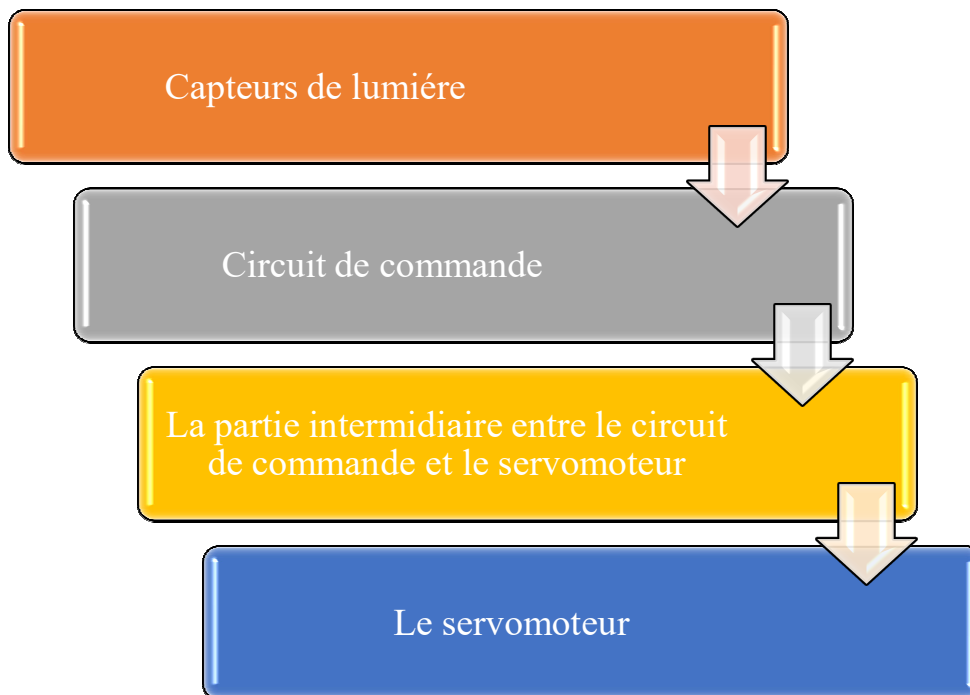


Figure IV.1 : Schéma synoptique.

IV.2. Description des différents composants utilisés :

IV.2.1. Capteur de lumière (LDR) :

Le capteur qu'on a utilisé est la photorésistance ou LDR (Light Dependent Resistor). 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 (voir figure IV.3). Le choix s'est porté sur cette dernière vu que son temps de réponse est beaucoup plus court par rapport à la photodiode.

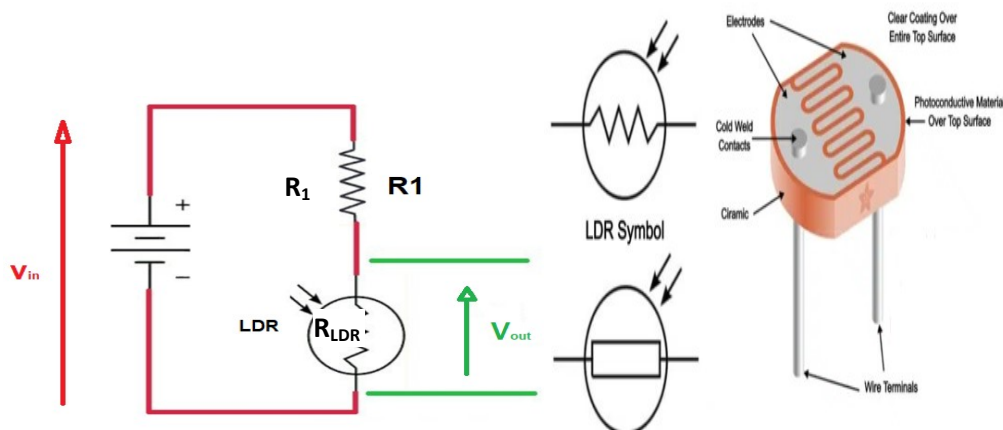


Figure IV.2 : Une photorésistance et son circuit équivalent.

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

$$V_{out} = V_{in} \times R_{LDR} / (R_{LDR} + R_1) \quad (IV.1)$$

Sachant que:

V_{out} : est la tension de sortie de la photorésistance(LDR) en (V).

V_{in} : tension de batterie (tension d'alimentation) (V).

R_{LDR} : résistance de la LDR (Ω).

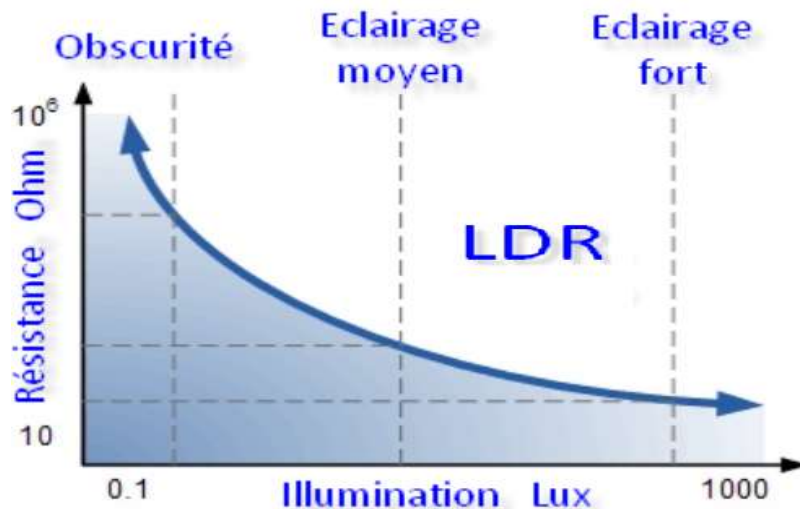


Figure IV.3 : La relation entre la résistance d'une photorésistance et l'éclairage.

IV.2.2. Le circuit de commande :

Dans ce système, on utilise un circuit programmable dit « Arduino », l'avantage de ce dernier est de minimiser la surface des cartes électriques afin de minimiser l'utilisation d'une grande quantité des composants électroniques.

IV.2.2.1. Définition :

Arduino est une carte électronique programmable destinée pour réaliser des différentes applications et des projets dans des différents domaines comme la robotique. On trouve plusieurs catégories d'Arduino et chaque carte Arduino se différencie par rapport à l'autre par le nombre de pins d'entrées/sorties analogiques / numériques ou analogiques. Les différents types sont présentés dans la figure suivante :

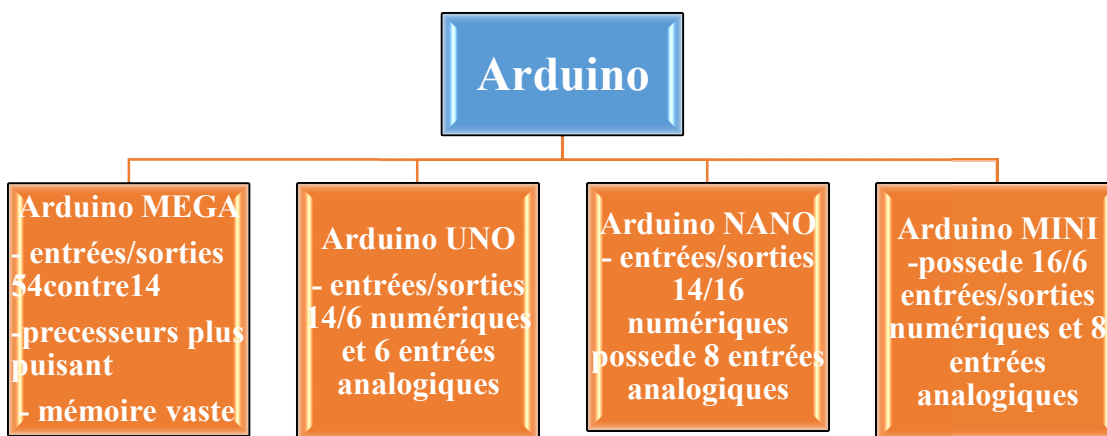


Figure IV.4 : Les catégories d'Arduino.

Dans notre projet on utilise une carte Arduino de type UNO.

IV.2.2.2. Description de la carte Arduino UNO :

L'Arduino UNO est une petite carte électronique (5,33 x 6,85 cm), c'est une carte microcontrôleur basée sur l'ATmega328 qui reçoit le programme et le stocke dans sa mémoire puis l'exécute. Les composants de cette carte sont:

- **14 broches Entrées/Sorties numériques** dont **6 en PWM** et **6 configurables en entrées analogiques**,
- **un Oscillateur à quartz 16 MHz**,
- **une Connexion USB**,
- **un Connecteur Jack d'alimentation DC** (l'alimentation via ce connecteur (2) doit être comprise entre 5 et 12 V),
- **un Connecteur ICSP** (connecteur de programmation)
- **un Bouton reset** pour redémarrer un Arduino, il permet de redémarrer votre programme depuis le début (figure IV.5),
- **un Régulateur de tension** dont sa fonction est de contrôler la tension d'alimentation de l'Arduino pour la stabiliser à la bonne tension du microcontrôleur et de chaque élément de la carte.

Entre autres, la carte peut être alimentée en 5V par le port USB ou bien par une alimentation externe qui est comprise entre 7V et 12V. Cette tension doit être continue et peut être par exemple fournie par une pile de 9V.

L'Arduino est utilisé dans plusieurs applications comme l'électrotechnique industrielle, le pilotage de robots, etc. Les projets Arduino peuvent être autonomes, comme ils peuvent communiquer avec d'autres logiciels installés sur ordinateur, tels que Flash, Processing ou MaxMPS, Matlab[4,5].

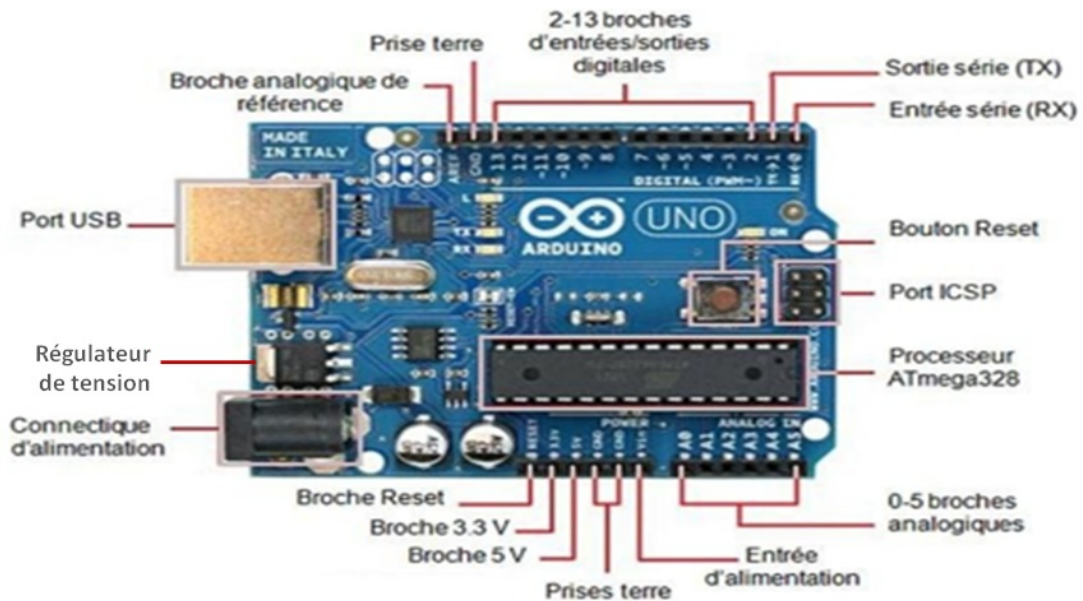


Figure IV.5 : Constitution de la carte Arduino UNO.

IV.2.3.Câblages :

IV.2.3.1.Câble USB :

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 [3].



Figure IV.6 : Câble USB type A vers B.

IV.2.3.2.Fils de prototypage:

Ce sont des câbles et fils dédiés au prototypage. Ces fils sont utilisés pour relier, brancher et connecter les différents pins d'Arduino à la plaque d'essai.



Figure IV.7 : Fils de prototypage.

IV.2.4. Plaque d'essai :

La plaque d'essai est un dispositif qui permet de réaliser le prototype d'un circuit électronique elle est utilisée dans la plupart des expériences d'Arduino. Ces trous permettent d'enfoncer des composants sans passer par la soudure afin de les relier entre eux.

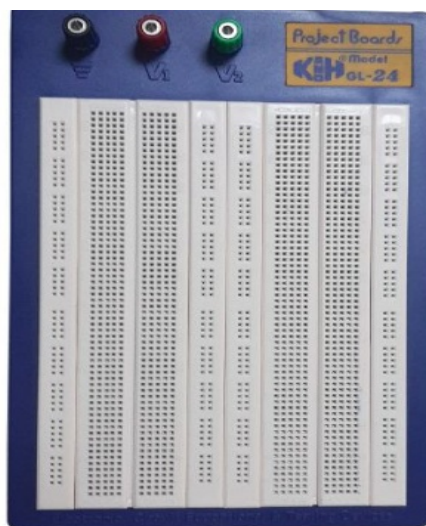


Figure IV.8 : Plaque d'essai.

IV.2.5. Le servomoteur :

Un servomoteur est un système qui vise à 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. Il est composé d'un moteur à courant continu avec deux caractéristiques spéciales: au lieu d'avoir une rotation constante, il est asservi en position angulaire, cela signifie que l'axe de sortie du servomoteur respectera la consigne d'instruction que vous lui avez envoyée et maintiendra sa position fixe permettant de contrôler la vitesse de rotation.

Chapitre IV : Conception d'un suiveur solaire à base d'une carte Arduino

Le modèle SG90 est un des plus populaires à cause de son prix réduit. Il s'agit d'un servo très petit et il est souvent utilisé dans la construction de robots ou à niveau éducationnel. Le système d'engrenages de ce servo est en plastique, raison pour laquelle il se dégrade rapidement. Il est idéal pour des petits projets ou pour faire des tests. Il est tout à fait compatible avec la carte Arduino.

Les principales caractéristiques d'un servomoteur sont: le couple et la vitesse. Le couple est la force qui est capable de produire sur son axe, et se mesure en Kg/cm. De façon proportionnelle si le couple augmente, la consommation d'énergie augmente également. La vitesse est la vitesse angulaire ou de rotation. Les caractéristiques du SG90 sont indiquées dans le tableau suivant [6]:

Caractéristiques	Valeur
Dimensions	(26.7×11.8×22.5 mm)
Modulation	Analogique
Force	4.8V (1.6 kg/cm)
Vitesse	4.8V 0.1sec/60°)
Poids	9g
Angle de rotation	180°
connectique	Connecteur 3 points

Tableau IV.1 : Caractéristiques du servomoteur utilisé.



Figure IV.9:Le servomoteur utilisé.

IV.2.6. Cellule solaire utilisée :

Cellule solaire pouvant délivrer de 0,5V à 6V avec un courant de 50mA à 800mA suivant les modèles sont spécialement conçue pour des applications électroniques, robotiques et expérimentations autonomes.



Figure IV.10: La cellule solaire utilisée.

IV.3. Description et réalisation du suiveur solaire :

Ce projet présente un banc de test open hardware/software pour un suiveur solaire. Le prototype proposé est basé sur un tracker solaire à un seul axe contrôlé avec Arduino Uno qui est une plate-forme de prototypage open-source basée sur du matériel et des logiciels faciles à utiliser. Le suiveur solaire peut être contrôlé automatiquement à l'aide de capteurs Light Dependent Resistor (LDR). Le matériel utilisé a été choisi pour être peu coûteux, compact et polyvalent. Le banc d'essai proposé est conçu pour aider les étudiants à développer leur compréhension de la théorie du contrôle et de son application.

IV.3.1. Assemblage des éléments constitutifs du suiveur :

On a assemblé les éléments constitutifs du suiveur pour obtenir sa structure finale, qui a la capacité d'être facilement positionnée pour suivre le mouvement du soleil. En effet, la figure IV.11 montre le suiveur solaire à l'état assemblé. Comme présenté, toute la structure a été fabriquée à l'aide de plaques de bois et polystyrène, et il est clair que tous les composants mentionnés ont été utilisés pour construire le suiveur solaire automatique (capteurs LDR, Arduino Uno, servomoteurs et le petit panneau PV).

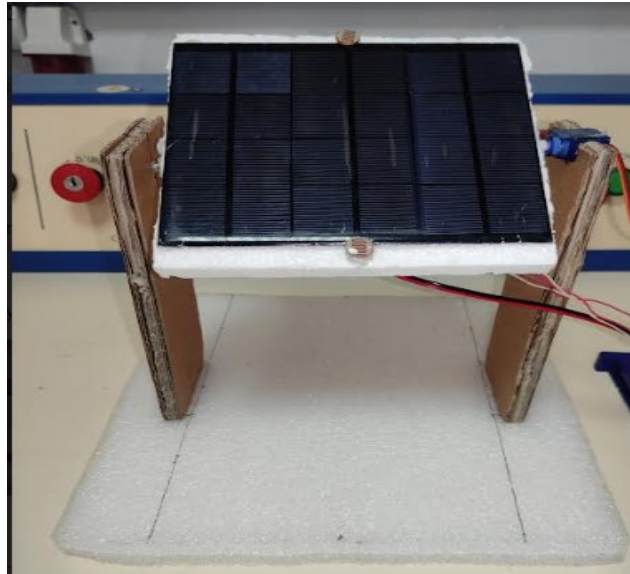


Figure IV.11 : Schéma représentatif de l'assemblage du suiveur solaire.

IV.3.2. Assemblage électronique :

La figure ci-dessous présente la connexion des différents composants sur la carte Arduino et la plaque d'essai qui est l'intermédiaire entre l'Arduino, les composants et la carte électronique.

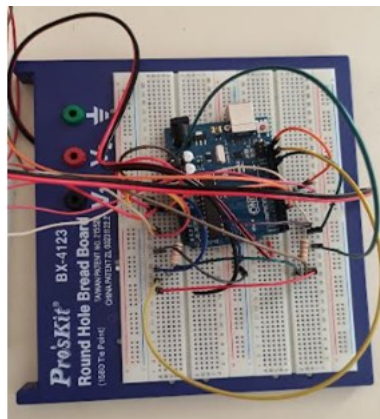


Figure IV.12 : La connexion des différents composants.

Le prototype final réalisé est présenté sur la figure. IV.13, qui illustre le suiveur solaire proposé. Le microcontrôleur convertit les valeurs analogiques des capteurs LDR en valeurs numériques. Ensuite, il contrôle le servomoteur (haut-bas) à l'aide d'un signal de modulation de largeur d'impulsion (PWM) pour suivre le soleil. Les mouvements de rotation se

produisent selon l'axe, en azimut d'Est en Ouest selon la course quotidienne du soleil (figure. IV.14). Ainsi, le suiveur solaire augmente la puissance générée par le panneau solaire d'environ 10% à 50%.

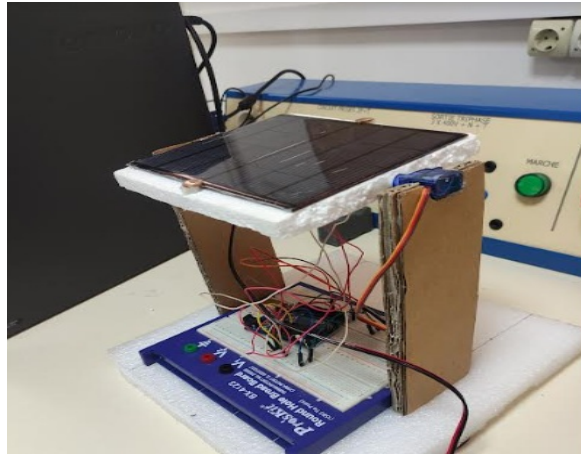


Figure IV.13 : Suiveur solaire réalisé.

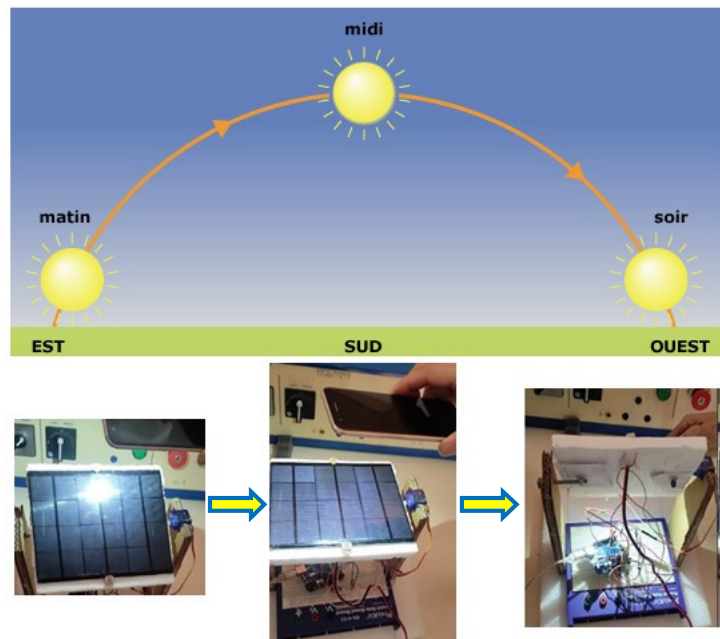


Figure IV.14: Différents positions du suiveur solaire réalisé.

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les composants utilisés pour réaliser notre projet, tels que les photorésistances, servomoteur, plaque d'essai, fils, câbles USB, résistances et carte arduino. Nous avons réussi à réaliser le principal objectif de ce projet, soit monté et faire fonctionner un suiveur solaire, s'adaptant aux trajectoires du soleil afin de récupérer le maximum d'énergie possible.

Conclusion générale

Conclusion générale:

Ce projet de fin d'étude a été effectué au sein de l'Innovation Center à EL Bouni dans la ville d'Annaba. En effet, il a trait à l'étude expérimentale d'un capteur solaire fixe et mobile et réalisation d'un suiveur solaire à base d'une carte Arduino.

On a traité dans le premier chapitre la modélisation d'un capteur solaire PV et ses caractéristiques de fonctionnement, où nous avons montré l'influence des conditions climatiques sur ses caractéristiques (I-V) et (P-V).

Ensuite, dans le deuxième chapitre nous avons pu faire le point sur plusieurs facteurs tels que: la latitude, l'angle d'inclinaison et le mouvement du soleil au cours de la journée. Nous avons montré que ces paramètres influent sur la production d'énergie électrique d'un capteur solaire. Puis, on a effectué des mesures expérimentales sur un panneau solaire fixe orienté selon le Nord, l'Est l'Ouest et le Sud, ainsi, on a pu déduire que la direction optimale pour orienter les panneaux solaires est le Sud.

En outre, dans troisième chapitre nous avons abordé une étude expérimentale sur un capteur solaire photovoltaïque fixe (GPV fixe) et celui muni d'un suiveur solaire (GPV mobile). En effet, il a été démontré que le système muni d'un suiveur solaire fonctionnait correctement, en assurant une poursuite de la trajectoire du soleil. Cela est dû au fait que, pour un suiveur solaire l'inclinaison et l'orientation sont variable automatiquement selon le mouvement du soleil à chaque instant, garantissant un rayonnement incident reçu par le mode mobile plus important qu'en mode fixe, et ce, du fait que l'inclinaison de 38° adoptait pour ce dernier, est presque égal à la latitude du lieu d'expérience qui demeure désormais fixe. Ainsi, le GPV mobile permet de collecter le maximum d'énergie possible et améliorer son rendement comparativement au GPV fixe.

En fin, le dernier chapitre portait sur la réalisation d'un prototype de suiveur solaire mono axe pour un panneau solaire photovoltaïque, assurant une orientation de ce dernier vers l'Est et l'Ouest pour capter le maximum d'énergie solaire au fil de la journée. Ainsi, nous avons réussi à monter et faire fonctionner ce suiveur solaire qui s'adaptait judicieusement aux trajectoires du soleil afin de récupérer le maximum d'énergie possible.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Tsamda, K. Mahmoud «Développement d'un logiciel de dimensionnement des installations photovoltaïques », Mémoire d'Ingénieur d'Etat En Electrotechnique, Département de Génie Electrique, Promotion Juin 2007, Ecole Nationale Polytechnique Alger.
- [2] Khellout, A., « Etude et Réalisation d'un Tracker solaire autopiloté Commande via une carte Arduino », Mémoire de master, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, 2018.
- [3] Aouine, A, « Conception et Réalisation d'un tracker solaire intelligent à Bas d'une Carte Arduino-UNO », Mémoire de Master professionnel, Université de TiziOuzou, 2017.
- [4] S. Bensaoucha, S. Djloud «Réalisation d'un suiveur solaire à base d'Arduino», Mémoire de Master, Université de Mohammed Boudiaf M'sila, 2019/2020.
- [5] S.Kahila, I. Bouakline «Etude conception et réalisation d'un suiveur solaire bi axial», Mémoire de Master, Université Akli Moand Oulhadj de Bouira, 2018/2019.
- [6] <https://ledisrupteurdimensionnel.com/arduino/servo-sg90-micro-servo-9g/>
- [7] <https://newsouthernenergy.com/solar-tracking-systems-a-rising-trend/>
- [8] <https://sinovoltaics.com/learning-center/csp/single-axis-trackers/>
- [9] M. Rebhi, M. Sellam, A. Belghachi and B. Kadri «Conception and realization of sun tracking system of photovoltaic array in the south west Algerian » L.P.D.S.E. Laboratory, University Bechar, Algeria 2 L.P.D.S.E. Laboratory, University of Bechar, Algeria (reçu le 24 Août 2009 accepté le 25 Décembre 2009).
- [10] Michel Tissot « L'énergie Solaire, Thermique et photovoltaïque». 2eme édition, EYROLLES, Paris, 2012.
- [11] Anne labouret et Michel Viloz, « Energie solaire photovoltaïque ». 4eme édition, DUNOD, Paris, 2009.
- [12] Anne Labouret, Pascal Cumunel, Jean-Paul Braun et Benjamin Faraggi, « Cellules solaires les bases de l'énergie photovoltaïque ». 5^{ème} édition ETSF, Dunod, Paris, 2010.
- [13] Guy Isabel, « les capteurs solaires à air ». 2^{ème} édition, EYROLLES, Paris, 2014.
- [14] M.D. Draou et B. Draoui, « Etude, conception et expérimentation d'un système de contrôle pour système suiveur de soleil », Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°2 (2007) 229-238, Unité de Recherche en Energie Renouvelable en Milieu Saharien, 'URERMS', Centre Universitaire de Béchar, Juin 2008.