

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدية
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الآلية والالكتروتقني
Département d'Automatique et Electrotechnique



Mémoire de Master

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et Informatique Industriel

&

Automatique et système

Présenté par

Hammouda Mohamed Rafik

&

Ahmed Serir Abd Elaziz

Suiveur astronomique de dé ombrage

Proposé par : Dr.N.Cheggaga

Année Universitaire 2022-2023

Remerciement

Je tiens par la présente à exprimer mes sincères remerciements pour votre soutien inestimable tout au long de la réalisation de mon mémoire de PFE sur le sujet du suiveur de dé ombrage. Votre contribution a grandement enrichi mon travail et a joué un rôle crucial dans sa réussite.

Tout d'abord, j'aimerais exprimer ma profonde gratitude envers mon directeur de recherche, Mme. Cheggaga, pour son encadrement constant et ses précieux conseils. Ses connaissances approfondies et son expertise ont été essentielles pour orienter mes recherches et pour m'aider à surmonter les obstacles rencontrés. Sa disponibilité et sa patience ont été une source d'inspiration et d'encouragement tout au long du processus.

Je tiens également à remercier chaleureusement mes collègues et camarades de classe qui ont partagé leurs idées et leurs connaissances avec moi. Leurs commentaires constructifs et leurs discussions animées ont contribué à approfondir ma compréhension du sujet et ont joué un rôle clé dans le développement de mon mémoire.

Enfin, je tiens à exprimer ma reconnaissance envers ma famille et mes amis qui m'ont soutenu tout au long de ce parcours. Leurs encouragements constants et leur soutien émotionnel m'ont donné la force de persévérer face aux défis rencontrés.

Ce mémoire de PFE n'aurait pas été possible sans l'apport de chacune de ces personnes, et je suis vraiment reconnaissant d'avoir été entouré d'une équipe aussi bienveillante et compétente.

Je vous remercie encore une fois pour votre précieuse contribution à la réalisation de mon mémoire de PFE. Votre soutien m'a été d'une aide inestimable, et je suis profondément reconnaissant de votre implication.

Cordialement,

Hammouda Mohamed Rafik.

Ahmed Serir Abd El Aziz

Dédicace

A tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce projet sur le suiveur de dé
ombrage,

Je dédie ce mémoire en témoignage de reconnaissance pour vos conseils et votre
soutien.

Merci pour votre collaboration, votre expertise et votre patience dans la conduite
de ce travail de recherche et développement. Ce projet ne serait pas possible
sans vous tous.

Je souhaite également exprimer ma gratitude envers ma promotrice pour leur
accompagnement et leur expertise tout au long de ce projet.

Enfin, cette dédicace est également dédiée à ma famille et mes proches pour leur
soutien et encouragement durant cette période de travail intensif.

Merci à tous pour cette expérience enrichissante.

ملخص:

يهدف هذا المشروع البحثي إلى تطوير نظام مبتكر للألواح الشمسية يتبع تلقائيًا مسار الشمس طوال العام مع تجنب المناطق المظللة، دون استخدام حساسات. الهدف الرئيسي هو تحسين امتصاص الطاقة الشمسية وزيادة إنتاجية الكهرباء الشمسية. لتحقيق هذا الهدف، يتم استخدام معادلات فلكية دقيقة لحساب موقع الشمس كل 15 دقيقة، مع مراعاة خط العرض وخط الطول لموقع اللوحة الشمسية وارتفاع العائق المسبب للظل. بناءً على هذه المعلومات، يتم ضبط اللوحة الشمسية لتظل عمودية تمامًا لأشعة الشمس مع الابتعاد عن الظل الناجم عن العائق، وبالتالي تعظيم امتصاص الطاقة الشمسية المتاحة. بالإضافة إلى ذلك، تم تطوير خوارزمية لتجنب ظل العوائق المحتملة مثل جدران الشرفات أو المداخل، وضبط وضع اللوحة الشمسية وفقًا لذلك لتجنب أي ظل. باستخدام محركين يتحكمان بواسطة بطاقة اردوينو ، يوفر أحدهما حركة مستقيمة لتحرير الألواح الشمسية من المنطقة المظللة، بينما يضمن الآخر حركة دوران المتتبع. تم تنفيذ جميع المكونات الإلكترونية والميكانيكية لإنشاء نموذج أولي يثبت نجاح النظام التلقائي.

Résumé :

Ce projet de recherche vise à développer un système PV innovant qui suit automatiquement la trajectoire du soleil tout au long de l'année, tout en évitant les zones ombragées, sans utiliser de capteurs. L'objectif principal est d'optimiser l'absorption de l'énergie solaire et d'augmenter la productivité de l'électricité solaire. Pour atteindre cet objectif, nous utilisons des équations astronomiques précises pour calculer la position du soleil chaque 15 minute, en prenant en compte la latitude et la longitude de l'emplacement du panneau solaire et la hauteur de l'objet qui cause l'ombrage. En se basant sur ces informations, le panneau solaire est ajusté pour rester perpendiculaire aux rayons solaires au même temps s'éloigne de l'ombre causé par l'obstacle pour maximisant ainsi l'absorption de l'énergie solaire disponible. De plus, un algorithme a été développé pour éviter l'ombrage des obstacles potentiels, tels que les murs de la terrasse des bâtiments ou les cheminé, et ajuster la position du panneau solaire en conséquence afin d'éviter toute ombre. Grace à deux moteurs commandés par carte Arduino l'un assure un mouvement de translation pour dégager le PV de la zone ombragée. Et l'autre assure un mouvement de rotation du tracker. Tous les parties électronique et mécanique ont été réalisés pour donner naissance à un prototype qui a permet de valider le système automatisé.

Resume:

This research project aims to develop an innovative PV system that automatically tracks the sun's trajectory throughout the year while avoiding shaded areas, without using sensors. The main objective is to optimize solar energy absorption and increase solar electricity productivity. To achieve this goal, precise astronomical equations are used to calculate the sun's position every 15 minutes, taking into account the latitude and longitude of the solar panel's location and the height of the object causing the shading. Based on this information, the solar panel is adjusted to remain perpendicular to the sunlight while moving away from the shadow caused by the obstacle, thus maximizing the absorption of available solar energy. Furthermore, an algorithm has been developed to avoid the shadow of potential obstacles such as building terrace walls or chimneys and adjust the position of the solar panel accordingly to avoid any shading. With the help of two motors controlled by an Arduino board, one provides translational movement to clear the PV from the shaded area, and the other ensures rotational movement of the tracker. All electronic and mechanical components have been implemented to create a prototype that validated the automated system.

NOMENCLATURE

NOMENCLATURE

AZ : Azimut

AL : altitude solaire

AD : la différence entre l'altitude et l'altitude précédente

C : L'équation du centre

D : la différence entre l'ombre et l'ombre précédant

Delta : la déclinaison du soleil

d : les jours écoulés depuis l'époque

G : l'anomalie moyenne du soleil

h : l'heure décimale

H : l'angle horaire

HS : la conversion de l'altitude vers la plage [0,180]

J : le jour julien

Lat : Latitude

Lon : Longitude

L : longitude moyenne du soleil

Lambda : La longitude écliptique

M_pas : le pas du moteur EM-154 H395005

Mt_pas : le pas du moteur 28BYJ-48

OB : La hauteur de l'objet qui fait l'ombrage (en mètre)

OFS : vecteur d'incertitude de l'altitude

P_shadow : l'ombre précédant

PAD : l'altitude précédente

shadow : longueur de l'ombre

TZ : fuseau horaire

UT : Temps universel

X : la projection du l'ombre sur l'axe des X

Y : la projection du l'ombre sur l'axe des Y

T : nombre de tour pour atteint la position désiré dans la translation

Tr : nombre de tour pour atteint la position désiré dans la rotatio

Liste des figures

Chapitre 01 : Généralité sur l'énergie solaire et la conversion photovoltaïque

Figure 1.1: Rayonnement solaire sur un panneau photovoltaïque5

Figure 1.2 : L'emplacement d'une cellule photovoltaïque dans un module panneau et un système6

Figure 1.3 : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque7

Figure 1.4 : image d'un module photovoltaïque9

Figure 1.5 : courbe de tension courant d'une association série10

Figure 1.6 : courbe de tension courant d'une association parallèle10

Figure 1.7 : courbe de caractéristique d'un module installé en parallèle11

Figure 1.8 : les diodes de protection en parallèle11

Figure 1.9 : effet des diodes de protection12

Figure 1.10 : une installation d'un système photovoltaïque avec ces composants14

Figure 1.11 : influence de température sur le rendement d'un pv16

Figure 1.12 : système de stockage local d'électricité produite d'un PV17

Figure 1.13 : panneau solaire ombragé par un arbre18

Figure 1.14 : explication de l'affectation de l'ombrage sur un panneau solaire en termes de puissance20

Chapitre 02: Les suiveurs solaires

Figure 2.1 : solaire à un axe26

Figure 2.2 : suiveur solaire à double axes26

Figure 2.3 : présentation d'une orientation vers le sud29

Figure 2.4 : Graphe d'inclinaison idéale pour les suiveurs solaires en France29

Figure 2.5 : image décrire défèrent paramètres de panneau solaire30

Figure 2.6 : Exemple de résultat d'un exercice visant à analyser l'impact de l'orientation et de l'inclinaison sur la production d'énergie d'une cellule solaire.31

Figure 2.7 : carte du monde de l'ensoleillement moyen en fonction de kWh/m/jr33

Figure 2.8 : diagramme de comparaison entre la production avec suiveur et la production avec système fixe36

Chapitre 03: Etude théorique et pratique

Figure 3.1 : image représentatif d'une sphère céleste et leurs paramètres42

Figure 3.2 : représentation de longitude et latitude dans le globe42

Figure 3.3 : l'élévation et l'azimut du soleil au sud44

Figure 3.4 : Diagramme solaire cylindrique pour Uccle en temps universel.46

Lise des figures

Figure 3.5 : Variation de la déclinaison du soleil et de l'inclinaison optimale en fonction du numéro de jour de l'année.....	47
Figure 3.6 : la longitude céleste (écliptique) et latitude céleste	48
Figure 3.7 : les anomalies d'une planète.....	51
Figure 3.8 : longueur d'ombre d'un bâtiment sur une dimension	54
Figure 3.9 : l'ombre de cheminée.....	55
Figure 3.10 : interface du calculateur de longueur d'ombre	59
Chapitre 04: Eléments de la conception	
Figure 4.1 : résultats de la Plateforme du site Planetcalc	63
Figure 4.2 : les résultats du calcul du Plantecalc et Matlab	64
Figure 4.3: le graphe du longueur d'ombre du Plantecalc vs du Matlab	65
Figure 4.4 : photo en temps réel des essais	66
Figure 4.5 : photo en temps réel de la rotation	66
Figure 4.6 : calculs sur Matlab	66
Figure 4.7 : Carte Arduino UNO.....	67
Figure 4.8 : Moteur pas à pas EM-154 H395005.....	69
Figure 4.9 : Moteur pas à pas 28BYJ-48	70
Figure 4.10 : Driver L298N.....	71
Figure 4.11 : Circuit électrique driver L298N	72
Figure 4.12 : Driver ULN2003AN	73
Figure 4.13 : Circuit électrique driver ULN2003AN.....	74
Figure 4.14 : Circuit électrique du système	74
Figure 4.15 : système de translation mécanique	76
Figure 4.16 : suiveur de dé ombrage avec panneau à inclinaison fixe	77
Figure 4.17 : système de la translation à courroie.....	77
Figure 4.18 : conception mécanique de la rotation plus translation	78
Figure 4.19 : conception finale du suiveur de dé ombrage	78

SOMMAIRE

Remerciement

Dédicace

NOMENCLATURE

Liste des figures

SOMMAIRE

Introduction générale	2
Chapitre01: Généralité sur l'énergie solaire et la conversion photovoltaïque	3
1.1 Introduction	4
1.2 Les domaines d'application de l'énergie solaire	4
1.2.1 Électricité résidentielle	4
1.2.2 Électricité commerciale	4
1.2.3 Électricité industrielle	4
1.2.4 Éclairage public	4
1.2.5 Chauffage solaire	4
1.2.6 Pompage d'eau	4
1.2.7 Véhicules électriques	4
1.2.8 Technologies portables	5
1.3 Le rayonnement solaire	5
1.4 La cellule photovoltaïque	5
1.4.1 Le principe de fonctionnement	6
1.4.2 Caractéristique d'une cellule photovoltaïque	7
1.4.3 Technologie d'une cellule photovoltaïque	8
1.5 Le module photovoltaïque	8
1.5.1 La constitution d'un module photovoltaïque	9
1.5.2 Caractéristique d'un module photovoltaïque	12
1.5.3 Le rendement d'un module photovoltaïque	13
1.6 Système photovoltaïque	13
1.6.1 les types de système photovoltaïque	14
1.6.2 Les composants d'un système photovoltaïque	15
1.7 L'influence des conditions météorologiques sur les paramètres d'un module photovoltaïque	15
1.7.1 Tension	16
1.7.2 Courant	16
1.7.3 Puissance	16
1.7.4 Efficacité	Erreur ! Signet non défini.

SOMMAIRE

1.8	Stockage de l'électricité produite d'un panneau solaire	17
1.9	l'ombrage de soleil	18
1.9.1	Introduction	18
1.9.2	l'effet ombrage	18
1.9.3	les facteurs qui causent l'ombrage	19
1.9.4	Les différents types d'ombrages :	19
1.9.5	Effet d'ombrage sur les performances du système de l'énergie solaire	19
1.10	Les avantages et les inconvénients d'énergie solaire	20
1.10.1	Les avantages	20
1.10.2	Les inconvénients	21
	Chapitre 02 :Les suiveurs solaires	23
2.1	Introduction	24
2.2	Historique de suivi de panneaux solaires	24
2.3	Le suiveur solaire.....	24
2.3.1	Définition.....	24
2.3.2	Le rôle d'un suiveur solaire	25
2.3.3	Étude comparative de la performance de différents types de suiveurs solaires	25
2.3.4	Conception et réalisation d'un système de suivi solaire pour l'optimisation de la production d'énergie photovoltaïque	27
2.4	Choix d'orientation et d'inclinaison des panneaux solaires	28
2.4.1	Choix d'orientation de module PV	28
2.4.2	Choix d'inclinaison de module PV	29
2.4.3	Analyse de l'impact de l'orientation et de l'inclinaison sur la production d'énergie solaire avec des suiveurs solaires.....	30
2.5	Étude des facteurs clés pour le choix du type de suiveur solaire pour une application spécifique	31
2.5.1	La géographie et le climat	32
2.5.2	L'application	32
2.5.3	La taille du système	32
2.5.4	Le coût	32
2.5.5	La maintenance.....	32
2.6	Analyse de l'efficacité énergétique des suiveurs solaires pour les zones géographiques à faible ensoleillement	32
2.7	Analyse de la fiabilité et de la durabilité des suiveurs solaires dans des conditions météorologiques extrêmes.....	34
2.7.1	Fiabilité des suiveurs solaires.....	34
2.7.2	Durabilité des suiveurs solaires	34

SOMMAIRE

2.8	Évaluation des coûts et des avantages économiques des systèmes de suivi solaire pour les applications résidentielles et commerciales	34
2.8.1	Avantages économiques.....	34
2.8.2	Coûts économiques	35
2.9	Comparaison entre les panneaux mobiles et les panneaux fixes	35
2.9.1	Flexibilité.....	35
2.9.2	Mobilité	35
2.9.3	Efficacité énergétique	35
2.9.4	Coût	36
2.9.5	Complexité	36
2.9.6	Fiabilité.....	36
2.10	Conclusion	36
	Chapitre 03:Etude théorique et pratique	38
3.1	Introduction	40
3.2	Etude théorique	40
3.2.1	Le mouvement du globe terrestre autour le soleil	40
3.2.2	La sphère céleste	40
3.2.3	Les cordonnés célestes	41
3.2.4	Cordonnés célestes géographiques	42
3.2.5	Cordonnés célestes horizontales	44
3.2.6	Cordonnés célestes horaires	46
3.3	La longueur d'ombre	53
3.3.1	Dans le cas d'une dimension	53
3.3.2	Dans le cas de deux dimensions	54
3.4	Divers paramètres	55
3.4.1	OFS	55
3.4.2	D	55
3.4.3	T	55
3.4.4	J	55
3.4.5	L'heure décimale	56
3.4.6	L'angle limite d'altitude solaire	56
3.5	Le simulateur 1D	56
3.6	Le simulateur 2D	57
3.7	L'interface	58
3.8	Conclusion	59
	Chapitre 04 :Eléments de la conception	60

SOMMAIRE

4.1	Introduction :	62
4.2	La validation des calculs :	62
4.2.1	Présentation du logiciel Planetcalc :	62
4.2.2	Comparaison entre Plantecalc et le simulateur MATLAB :	63
4.3	Validation en temps réel :	65
4.4	Matériels utilisés :	67
4.4.1	La carte Arduino UNO :	67
4.4.2	Deux moteurs pas à pas :	68
4.4.3	Deux Driver :	70
4.4.4	Le circuit électrique :	74
4.5	La communication entre Matlab et Arduino :	75
4.5.1	Étapes pour établir la communication	75
4.6	Le système mécanique et ces composants :	76
4.6.1	Le système mécanique :	76
4.7	Conclusion :	79
	Conclusion générale	80
	Références bibliographiques	80

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie solaire est devenue une source d'énergie renouvelable de plus en plus prisée dans le contexte mondial actuel, caractérisé par une sensibilisation croissante aux problèmes environnementaux et une demande énergétique croissante. Les systèmes de panneaux solaires, qui convertissent la lumière du soleil en électricité, sont devenus une solution efficace pour répondre à cette demande croissante d'énergie propre.

Cependant, l'efficacité des systèmes de panneaux solaires peut être améliorée grâce à l'utilisation de suiveurs solaires. Les suiveurs solaires sont des dispositifs mécaniques qui permettent aux panneaux solaires de suivre la trajectoire du soleil tout au long de la journée, maximisant ainsi l'exposition aux rayons solaires et augmentant la production d'électricité. Cette technologie permet d'exploiter pleinement le potentiel de l'énergie solaire et d'optimiser le rendement des systèmes photovoltaïques.

Par le passé, l'utilisation de panneaux solaires (suiveur/fixe) comportait des zones ombragées, que ce soit dans des zones agricoles ou urbaines, ce qui réduisait la production d'énergie électrique. Notre travail consiste à créer un système solaire qui suit le mouvement du soleil tout au long de l'année et s'éloigne simultanément de l'ombre, sans utiliser de capteurs, mais en utilisant des équations astronomiques précises. Tout cela vise à augmenter l'absorption de l'énergie solaire et à améliorer la productivité de l'électricité.

Dans notre approche, nous allons utiliser des calculs astronomiques précis pour déterminer la position du soleil à tout moment de l'année. Ces calculs tiennent compte de la latitude et de la longitude de l'emplacement du système solaire, ainsi que de la date et de l'heure et la hauteur de l'objet qui cause l'ombrage. En utilisant ces informations, nous pouvons ajuster l'angle et l'orientation des panneaux solaires afin qu'il soit toujours perpendiculaire aux rayons du soleil et le s'éloigner de l'ombre au même temps.

Grâce à cette approche, nous serons en mesure d'optimiser la production d'électricité solaire en minimisant les pertes dues aux zones ombragées. Cela permet d'augmenter considérablement l'efficacité des panneaux solaires et d'améliorer leur rendement tout au long de l'année, ce qui contribue à une production d'électricité plus propre et plus rentable.

Chapitre 1
**Généralité sur l'énergie
solaire et la conversion
photovoltaïque**

1.1 Introduction

L'énergie photovoltaïque est l'énergie électrique produite à partir de la conversion directe de la lumière du soleil en électricité à l'aide de cellules photovoltaïques. Les cellules photovoltaïques sont constituées de matériaux semi-conducteur qui absorbent la lumière du soleil et produisent des électrons, créant ainsi un courant électrique. Cette énergie est renouvelable, car elle est produite à partir d'une source d'énergie naturelle et inépuisable, le soleil. L'énergie photovoltaïque est utilisée dans de nombreuses applications, notamment pour alimenter les maisons, les entreprises, les véhicules électrique... [1]

1.2 Les domaines d'application de l'énergie solaire

L'énergie solaire peut être utilisée dans une grande variété de domaines d'application, notamment :

1.2.1 Électricité résidentielle

Les panneaux solaires peuvent être installés sur les toits des maisons pour produire de l'électricité pour une utilisation domestique.

1.2.2 Électricité commerciale

Les entreprises peuvent installer des panneaux solaires pour produire de l'électricité pour leurs locaux.

1.2.3 Électricité industrielle

Les installations industrielles peuvent utiliser l'énergie solaire pour produire de l'électricité pour les opérations de production.

1.2.4 Éclairage public

Les lampadaires et autres systèmes d'éclairage public peuvent être alimentés par l'énergie solaire, ce qui réduit les coûts d'exploitation et l'impact environnemental.

1.2.5 Chauffage solaire

Les systèmes de chauffage solaire peuvent être utilisés pour chauffer l'eau et l'air dans les bâtiments. Eau chaude : Les systèmes de chauffe-eau solaires peuvent être utilisés pour fournir de l'eau chaude dans les maisons, les entreprises et les installations industrielles.

1.2.6 Pompage d'eau

Les pompes solaires peuvent être utilisées pour pomper l'eau des puits et des réservoirs.

1.2.7 Véhicules électriques

L'énergie solaire peut être utilisée pour recharger les batteries des véhicules électriques, ce qui réduit les émissions de gaz à effet de serre.

1.2.8 Technologies portables

Les appareils électroniques portables tels que les montres, les téléphones portables et les ordinateurs portables peuvent être alimentés par l'énergie solaire.

L'énergie solaire est donc une source d'énergie polyvalente qui peut être utilisée dans de nombreux et différents domaines. [2]

1.3 Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est la lumière et la chaleur émises par le soleil. Cette énergie est essentielle pour la vie sur Terre car elle est à la base de la photosynthèse des plantes, du cycle de l'eau et du climat. Le rayonnement solaire est composé de différentes longueurs d'onde, allant des rayons gamma aux ondes radio en passant par la lumière visible. La plupart de cette énergie est absorbée par l'atmosphère terrestre, mais une partie atteint la surface de la Terre et est convertie en chaleur. Le rayonnement solaire est également responsable de la production d'énergie solaire, qui est de plus en plus utilisée comme source d'énergie propre et renouvelable. Les panneaux solaires utilisent les photons du rayonnement solaire pour créer un courant électrique [3]. Voici une image explicative de rayonnement solaire et ces types :

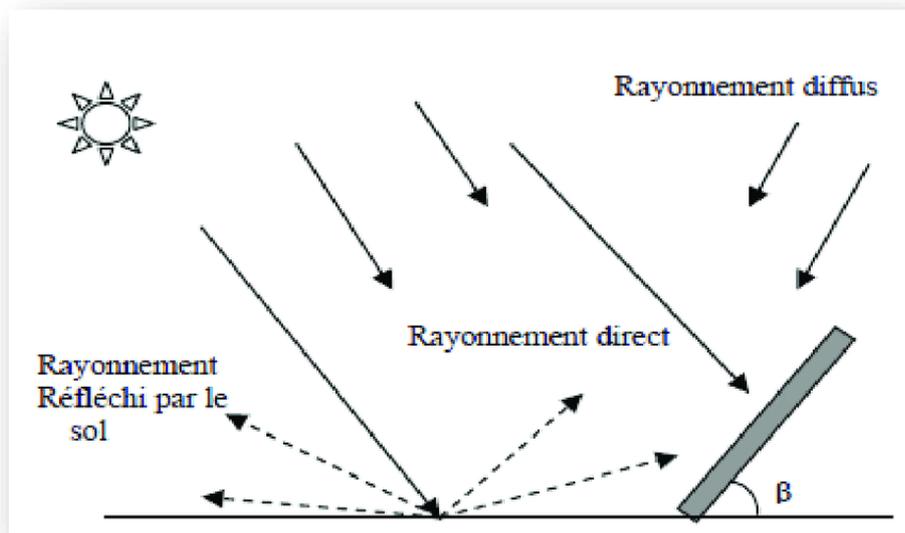


Figure 1.1: Rayonnement solaire sur un panneau photovoltaïque

1.4 La cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif électronique qui convertit la lumière solaire en électricité. Elle est composée de couches de matériaux semi-conducteurs qui sont chargées électriquement différemment. Lorsque la lumière du soleil frappe la cellule photovoltaïque, elle est absorbée par les électrons du matériau semi-conducteur, ce qui les fait sauter d'une couche à l'autre, créant ainsi un courant électrique. Les cellules photovoltaïques sont utilisées dans les

panneaux solaires pour produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire [4]. Ci-dessous vous pouvez observer une illustration qui présente de manière explicite la relation entre une cellule un module un panneau et système photovoltaïque :

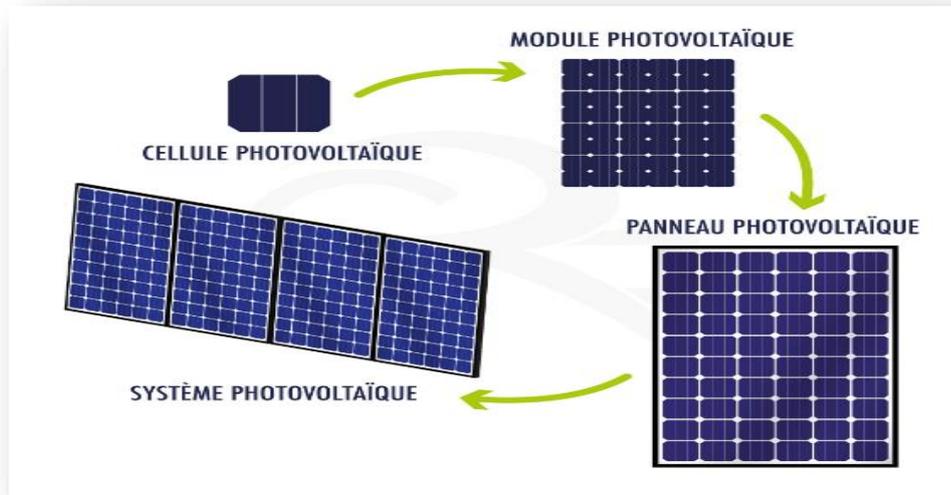


Figure 1.2 : L'emplacement d'une cellule photovoltaïque dans un module panneau et un système

1.4.1 Le principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est basé sur l'effet photoélectrique. Les cellules photovoltaïques sont constituées de deux couches de semi-conducteurs dopés de signes opposés, formant une jonction P-N. Lorsque la lumière du soleil frappe la cellule, elle est absorbée par le matériau semi-conducteur, ce qui provoque l'éjection d'électrons de la couche N vers la couche P, créant ainsi un courant électrique. Ce courant électrique peut être utilisé pour alimenter des appareils électriques ou stocké dans une batterie. Le processus de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique peut être expliqué en quatre étapes principales :

- a) **Absorption de la lumière** : La lumière du soleil est absorbée par la couche N de la cellule photovoltaïque.
- b) **Création de paires électron-trou** : L'énergie de la lumière est utilisée pour libérer des électrons de la couche N, créant des paires électron-trou.
- c) **Séparation de charges** : Les électrons libérés sont attirés par la couche P, créant un courant électrique.
- d) **Flux de courant** : Le courant électrique est collecté par des électrodes conductrices placées sur les couches N et P de la cellule photovoltaïque.

La figure ci-jointe fournit une représentation de principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

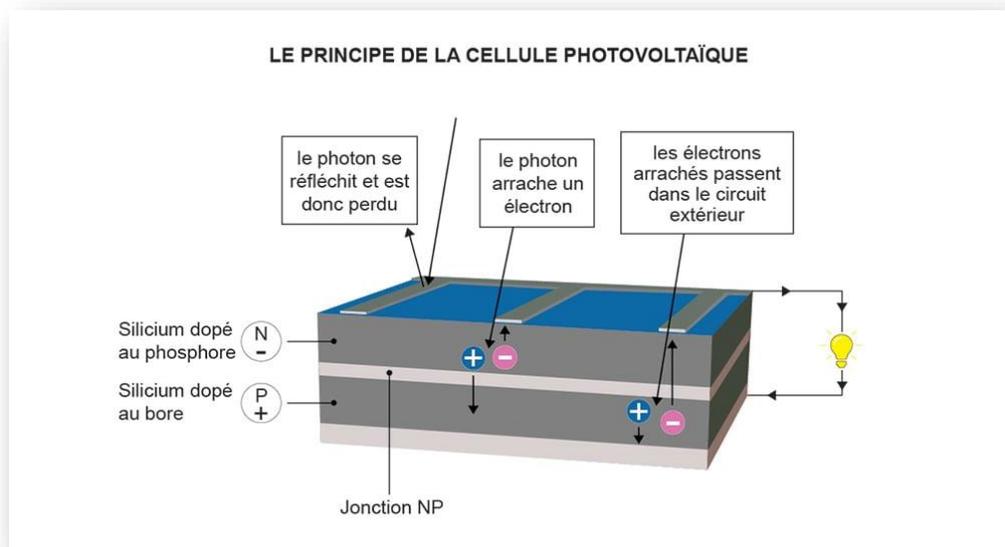


Figure 1.3 : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Le courant électrique produit par une cellule photovoltaïque dépend de plusieurs facteurs, tels que l'intensité de la lumière solaire, la surface de la cellule photovoltaïque, la température et l'efficacité de la cellule photovoltaïque elle-même [5].

1.4.2 Caractéristique d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif électronique qui convertit la lumière du soleil en électricité en utilisant un processus appelé effet photovoltaïque. Voici quelques-unes de ses caractéristiques :

- a) **Tension** : La tension de sortie d'une cellule photovoltaïque dépend de la conception de la cellule et du matériau utilisé. Elle est généralement faible et se situe entre 0,5 et 1 volt.
- b) **Courant** : Le courant de sortie de la cellule dépend de la quantité de lumière qui frappe la cellule et de sa conception. Il est mesuré en ampères (A).
- c) **Puissance** : La puissance de sortie de la cellule photovoltaïque est le produit de la tension et du courant. Elle est mesurée en watts (W).
- d) **Efficacité** : L'efficacité d'une cellule photovoltaïque est le rapport entre l'énergie électrique produite par la cellule et l'énergie solaire qui lui est fournie. Les cellules photovoltaïques actuelles ont une efficacité de conversion allant de 15 à 25 %.
- e) **Matériaux** : Les cellules photovoltaïques peuvent être fabriquées à partir de différents matériaux, tels que le silicium, le tellure de cadmium et le CuInGaSe₂ (CIGS).

f) **Durée de vie** : Les cellules photovoltaïques ont une durée de vie de plus de 20 ans et peuvent résister à des conditions météorologiques extrêmes.

g) **Coût** : Le coût des cellules photovoltaïques dépend de leur efficacité, de leur conception et de la technologie utilisée pour les fabriquer. Cependant, les coûts ont considérablement diminué ces dernières années, les rendant plus abordables pour les consommateurs. [6]

1.4.3 Technologie d'une cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont généralement fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs, principalement du silicium. Il existe deux principaux types de cellules photovoltaïques : les cellules à base de silicium cristallin et les cellules à couche mince.

a) **Les cellules à base de silicium cristallin** : Ces cellules sont les plus couramment utilisées et représentent la majorité des installations photovoltaïques dans le monde. Elles sont fabriquées à partir de plaquettes de silicium monocristallin ou poly cristallin, qui sont découpées en fines tranches pour former des cellules. Les cellules à base de silicium cristallin peuvent avoir une efficacité de conversion allant jusqu'à 25 %.

b) **Les cellules à couche mince** : Ces cellules sont fabriquées en déposant une fine couche de matériau semi-conducteur sur un substrat en verre, en métal ou en plastique. Les matériaux semi-conducteurs couramment utilisés pour les cellules à couche mince sont le tellurure de cadmium (CdTe), le CuInGaSe₂ (CIGS) et l'arséniure de gallium (GaAs). Les cellules à couche mince ont généralement une efficacité de conversion plus faible que les cellules à base de silicium cristallin, mais elles sont moins chères à produire. [7]

1.5 Le module photovoltaïque

Un module photovoltaïque est un dispositif électronique qui utilise des cellules photovoltaïques pour convertir l'énergie solaire en électricité. Les cellules photovoltaïques sont généralement fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs tels que le silicium, qui ont la capacité de convertir la lumière solaire directement en électricité. Les modules photovoltaïques peuvent être utilisés pour produire de l'électricité à petite échelle pour des applications résidentielles ou commerciales, ou à grande échelle pour des centrales solaires. Ils sont souvent regroupés en panneaux solaires pour maximiser la production d'énergie. Les modules photovoltaïques sont une technologie propre et renouvelable qui ne produit pas de gaz à effet de serre ou de pollution atmosphérique. [8]

Vous pouvez visualiser sur cette image un Exemple d'un module photovoltaïque :

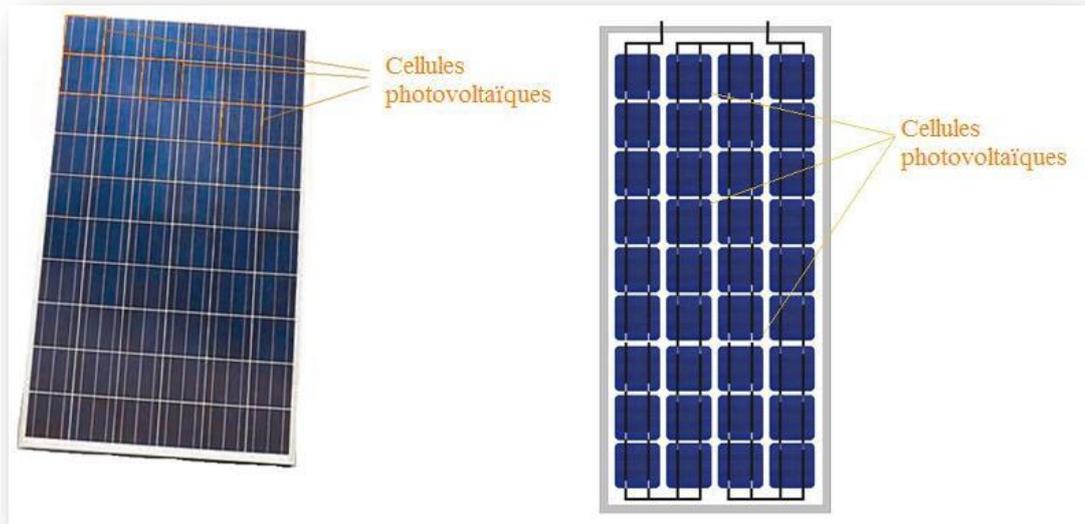


Figure 1.4 : image d'un module photovoltaïque

1.5.1 La constitution d'un module photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est l'unité de base d'un module photovoltaïque. Pour créer un module photovoltaïque, plusieurs cellules photovoltaïques sont assemblées en série et en parallèle pour former un panneau solaire. Les cellules sont généralement encapsulées entre des couches de verre et de plastique pour les protéger des éléments extérieurs. Le panneau solaire est ensuite relié à un onduleur, qui convertit le courant continu produit par les cellules photovoltaïques en courant alternatif utilisable pour l'alimentation électrique des bâtiments et des maisons. Le module photovoltaïque est conçu pour être durable et résistant aux intempéries, capable de produire de l'énergie pendant plusieurs décennies avec un entretien minimal.

Dans les conditions standardisées de test, la puissance maximale pour une cellule Si (silicium) de 100 cm^2 (10 sur 10) tourne aux alentours de 1,25 Watt. Cette cellule constitue donc un générateur de très faible puissance, insuffisant pour les applications électriques courantes. Les modules sont donc réalisés par association, en série et/ou en parallèle, de cellules élémentaires. La connexion en série augmente la tension pour un même courant alors que la connexion en parallèle augmente le courant pour une tension identique. Pour que l'électricité générée soit utilisable pour nos applications électriques, il est donc nécessaire d'associer entre elles un grand nombre de cellules. Les modules (généralement présentés sous forme de panneaux) sont constitués d'un certain nombre de cellules élémentaires placées en série afin de rendre la tension à la sortie utilisable. Ces modules sont ensuite associés en réseau (série-parallèle) de façon à obtenir les tensions/courants désirés.

a) **Association en série :** Par association en série (appelée "String"), les cellules sont traversées par le même courant et la tension résultante correspond à la somme des tensions générées par chacune des cellules. Dans ce graphique, vous pouvez observer la courbe de tension courant d'une association série :

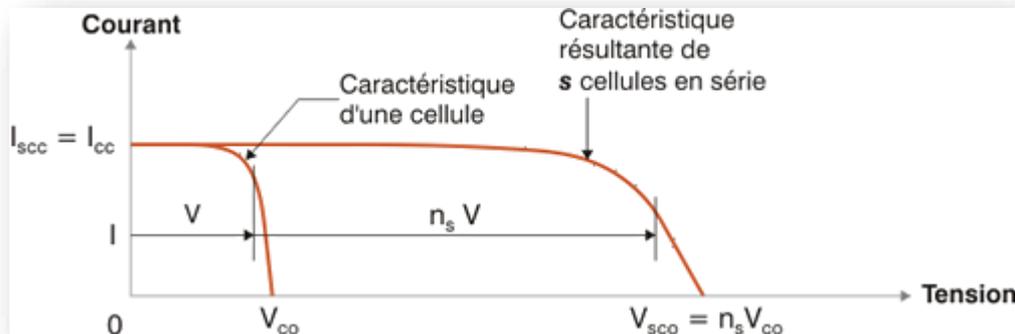


Figure 1.5 : courbe de tension courant d'une association série

b) **Association en parallèle :** Par association en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et le courant résultant correspond à la somme des courants générés par chacune des cellules. Comme la figure précédente on a le graphe de tension courant maintenant dans une association parallèle

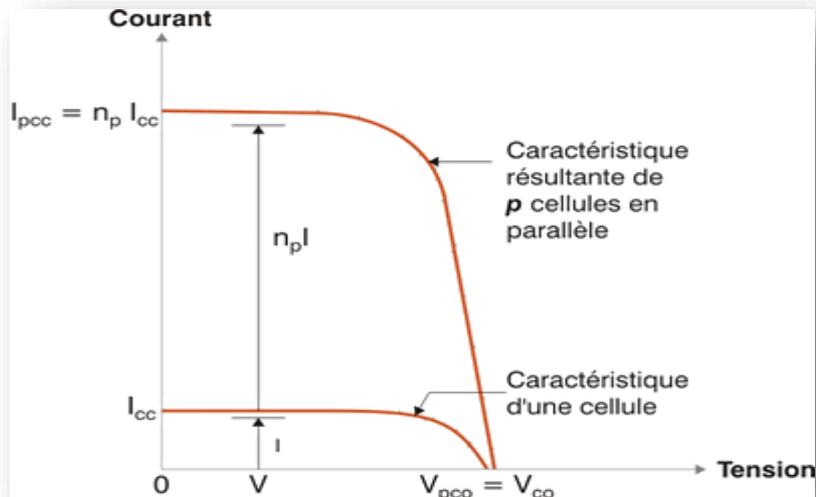


Figure 1.6 : courbe de tension courant d'une association parallèle

Les caractéristiques globales d'une installation se déduisent donc d'une combinaison des caractéristiques des constituants des $n_s \cdot n_p$. Ce graphe montre les caractéristiques d'un module installé en parallèle :

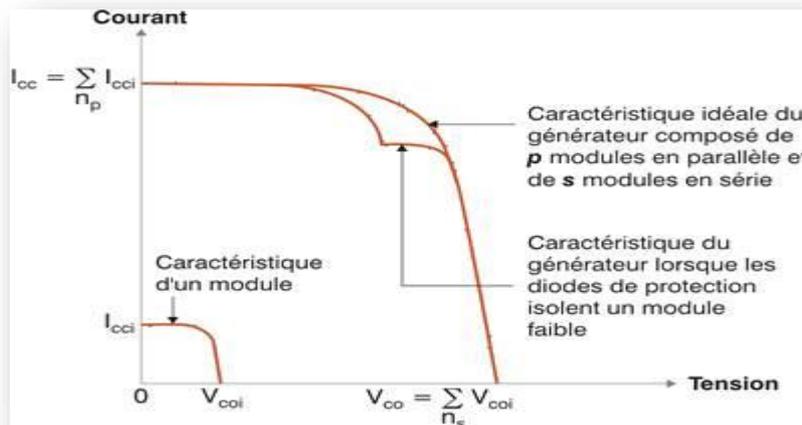


Figure 1.7 : courbe de caractéristique d'un module installé en parallèle

c) **Les diodes de by-pass** : Il arrive fréquemment que les cellules élémentaires qui composent le module ne présentent pas toutes la même courbe caractéristique au même moment. Les raisons peuvent être multiples : variété inévitable de fabrication, défaillance, différence d'éclairement ou de température (dus par exemple à un ombrage non uniforme du module, un encrassement...). Sous certaines conditions, la cellule la plus faible peut alors se comporter comme une cellule réceptrice, dissipant la puissance générée par la cellule la plus forte. Celle-ci peut même être détruite si la contrainte ou la température devient trop importante. Pour éviter ce phénomène, on place des diodes de by-pass (empêchant tout courant ou tension inverses). Celles-ci sont placées en série lorsque les cellules sont connectées en parallèle et en parallèle lorsque les cellules sont connectées en série. Les modules aujourd'hui commercialisés comprennent généralement des diodes de protection situées en parallèle des différents strings qui le composent. Cette image ci-dessus montre l'installation des diodes de protections en parallèle :

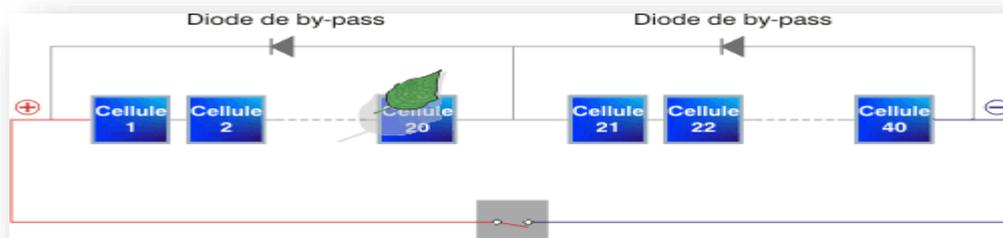


Figure 1.8 : les diodes de protection en parallèle

L'utilisation de ces by-pass induit néanmoins des perturbations de la courbe caractéristique, modifiant le point de puissance maximal du module voici le graphique qui démontre ça :



Figure 1.9 : effet des diodes de protection

Pour ne pas induire inutilement ces pertes, il est donc très important que ces diodes de by-pass soient utilisées et placées en cohérence avec les ombres générées par l'environnement du module. [9]

1.5.2 Caractéristique d'un module photovoltaïque

Les caractéristiques d'un module Photovoltaïque dépendent de nombreux facteurs, tels que la qualité des matériaux utilisés, la technologie de fabrication, les conditions environnementales et les spécifications de conception. Voici les principales caractéristiques d'un module photovoltaïque :

- Puissance nominale** : la puissance nominale est la puissance maximale que peut produire le module dans des conditions standards, généralement mesurée en watts crête (Wc).
- Tension et courant de sortie** : la tension et le courant de sortie varient en fonction des conditions de fonctionnement, notamment de l'ensoleillement, de la température et de la charge connectée.
- Efficacité** : L'efficacité d'un module photovoltaïque est la mesure de sa capacité à convertir l'énergie lumineuse en électricité utilisable. Elle dépend des caractéristiques du matériau semi-conducteur utilisé et des techniques de fabrication.
- Coefficient de température** : le coefficient de température mesure la variation de la puissance nominale du module en fonction de la température ambiante.
- Taux de dégradation** : le taux de dégradation mesure la diminution de la puissance nominale du module au fil du temps en raison de l'exposition aux éléments environnementaux.

f) **Dimensions et poids** : les dimensions et le poids du module sont importants pour déterminer la facilité d'installation et les charges structurelles sur les bâtiments ou les structures de support.

g) **Certifications** : les certifications telles que les normes de sécurité et de qualité sont importantes pour garantir que le module est conforme aux réglementations et aux normes de l'industrie. [10]

1.5.3 Le rendement d'un module photovoltaïque

Le rendement d'un module photovoltaïque (PV) mesure l'efficacité de la conversion de l'énergie solaire en électricité. Il s'exprime en pourcentage et représente le rapport entre la puissance électrique produite par le module et la puissance solaire reçue par le module. Le rendement des modules photovoltaïques dépend de plusieurs facteurs, tels que la qualité des matériaux utilisés, la conception du module, l'intensité lumineuse, la température ambiante, la direction et l'angle d'incidence des rayons solaires. En général, les modules photovoltaïques commerciaux ont un rendement compris entre 15% et 22%. Cela signifie qu'ils peuvent convertir environ 15% à 22% de l'énergie solaire qu'ils reçoivent en électricité utilisable. Il est important de noter que le rendement d'un module photovoltaïque diminue avec l'âge et l'exposition aux éléments environnementaux, tels que les rayons UV, la chaleur, l'humidité et les intempéries. C'est pourquoi il est important de choisir des modules de qualité et de les entretenir régulièrement pour maintenir leur rendement optimal. [11]

1.6 Système photovoltaïque

Un système photovoltaïque (PV) est un ensemble de composants électroniques qui utilise des modules photovoltaïques pour convertir l'énergie solaire en électricité. Les systèmes photovoltaïques peuvent être raccordés au réseau électrique pour fournir de l'électricité lorsque les modules produisent plus d'énergie que nécessaire, ou être utilisés en mode autonome pour les applications hors-réseau. Les systèmes photovoltaïques sont une technologie propre et renouvelable qui peut contribuer à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à améliorer la sécurité énergétique [12]. Cette illustration montre une installation de système photovoltaïque comprenant ces composants :

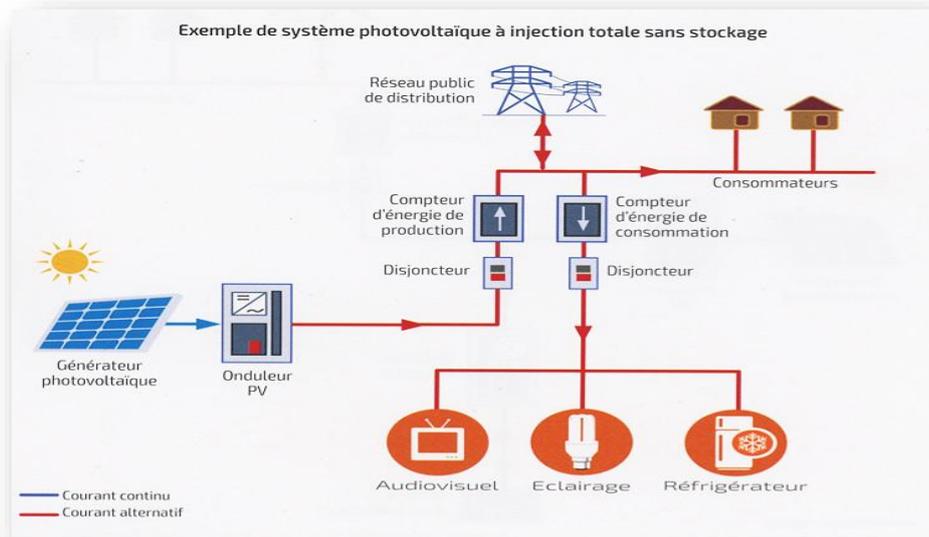


Figure 1.10 : une installation d'un système photovoltaïque avec ces composants

1.6.1 Les types de système photovoltaïque :

Il existe plusieurs types de systèmes photovoltaïques, chacun ayant ses propres caractéristiques et applications. Voici les principaux types de systèmes photovoltaïques :

a) **Systèmes photovoltaïques autonomes** : Ces systèmes sont conçus pour alimenter des charges électriques autonomes, telles que des lumières, des pompes, des appareils électroniques, etc. Ils sont généralement utilisés dans des endroits éloignés où il n'y a pas d'accès à l'électricité du réseau. Ces systèmes sont composés d'un ou plusieurs panneaux solaires, d'un régulateur de charge, d'une batterie et d'un convertisseur de tension.

b) **Systèmes photovoltaïques connectés au réseau** : Ces systèmes sont conçus pour produire de l'électricité qui est injectée dans le réseau électrique de distribution. Ils sont généralement utilisés dans des zones urbaines où l'électricité du réseau est disponible et où les propriétaires peuvent vendre leur surplus d'énergie solaire à leur fournisseur d'électricité. Ces systèmes sont composés de panneaux solaires, d'un onduleur de réseau et d'un système de mesure pour suivre la production et la consommation d'électricité.

c) **Systèmes photovoltaïques hybrides** : Ces systèmes combinent l'énergie solaire avec d'autres sources d'énergie, telles que l'énergie éolienne ou l'énergie de secours. Ils sont généralement utilisés dans des endroits où il y a des coupures de courant fréquentes ou où l'énergie solaire seule ne suffit pas à répondre à la demande énergétique. Ces systèmes sont composés de panneaux solaires, d'une ou plusieurs éoliennes, d'une batterie et d'un système de gestion de l'énergie.

Systèmes photovoltaïques portables : Ces systèmes sont conçus pour être transportables et sont généralement utilisés pour les activités de plein air, telles que le camping,

la randonnée ou les chantiers de construction temporaires. Ils sont composés d'un ou plusieurs panneaux solaires, d'une batterie intégrée et de ports USB pour charger des appareils électroniques.

En résumé, les systèmes photovoltaïques sont disponibles dans plusieurs configurations différentes pour répondre aux besoins spécifiques de l'utilisateur, qu'il s'agisse d'un système autonome pour des applications hors réseau, d'un système connecté au réseau pour la production d'énergie solaire ou d'un système hybride pour une alimentation électrique fiable. [13]

1.6.2 Les composants d'un système photovoltaïque

Un système photovoltaïque (PV) convertit l'énergie solaire en électricité utilisable. Les principaux composants d'un système photovoltaïque typique sont les suivants :

- a) **Les panneaux solaires** : ces dispositifs sont constitués de cellules photovoltaïques qui convertissent la lumière du soleil en électricité. Les panneaux solaires sont souvent montés sur un support pour les maintenir en place.
- b) **L'onduleur** : cet équipement convertit le courant continu (CC) produit par les panneaux solaires en courant alternatif (CA) utilisable pour l'alimentation électrique de la maison.
- c) **Les batteries** : ces dispositifs stockent l'énergie produite par les panneaux solaires pour une utilisation ultérieure. Les batteries sont souvent utilisées dans les systèmes autonomes, tels que les systèmes de secours ou les systèmes de pompage d'eau.
- d) **Les régulateurs de charge** : ces dispositifs régulent la charge de la batterie en empêchant la surcharge ou la décharge excessive, ce qui peut endommager la batterie.
- e) **Les câbles et les connecteurs** : ces composants permettent de connecter les différents éléments du système ensemble et de transférer l'énergie produite par les panneaux solaires vers les batteries et l'onduleur.
- f) **Les dispositifs de mesure et de surveillance** : ces équipements surveillent les performances du système et aident à diagnostiquer les éventuels problèmes.
- g) **Le compteur d'électricité** : cet équipement mesure la quantité d'électricité produite par le système et peut être utilisé pour suivre les économies d'énergie réalisées.

En fonction de la taille et de la complexité du système photovoltaïque, d'autres composants peuvent être nécessaires, tels que des régulateurs de tension, des inverseurs de charge et des disjoncteurs de protection. [14]

1.7 L'influence des conditions météorologiques sur les paramètres d'un module photovoltaïque

Les conditions météorologiques ont un impact significatif sur les performances des modules photovoltaïques. Les principaux paramètres des modules photovoltaïques qui sont

affectés par les conditions météorologiques sont la tension, le courant, la puissance et l'efficacité. Voici comment chaque paramètre est affecté par les conditions météorologiques :

1.7.1 Tension

La tension de sortie d'un module photovoltaïque diminue lorsque la température augmente. En outre, la tension de sortie diminue également lorsque la quantité de lumière solaire diminue.

1.7.2 Courant

Le courant de sortie d'un module photovoltaïque est directement proportionnel à la quantité de lumière solaire reçue. Par conséquent, le courant de sortie diminue lorsque la quantité de lumière solaire diminue.

1.7.3 Puissance

La puissance de sortie d'un module photovoltaïque est le produit de la tension et du courant de sortie. Par conséquent, lorsque la tension et le courant diminuent, la puissance de sortie diminue également.

1.7.4 Efficacité

L'efficacité d'un module photovoltaïque est la mesure de sa capacité à convertir l'énergie solaire en énergie électrique. L'efficacité diminue lorsque la température augmente et lorsque la quantité de lumière solaire diminue. La figure 11 explique comment la température influence sur le rendement de panneau solaire :

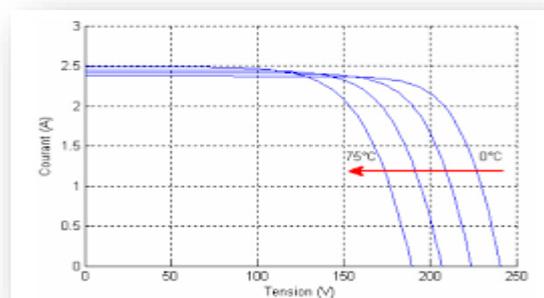


Figure 1.11 : influence de température sur le rendement d'un pv

En résumé, les conditions météorologiques, telles que la température et la quantité de lumière solaire, ont un impact significatif sur les performances des modules photovoltaïques. Les fabricants de modules photovoltaïques doivent tenir compte de ces facteurs lors de la conception et de la fabrication de leurs produits. Les installateurs et les utilisateurs de systèmes photovoltaïques doivent également tenir compte de ces facteurs lors de l'installation et de l'utilisation de leurs systèmes pour maximiser leur production d'énergie solaire. [15]

1.8 Stockage de l'électricité produite d'un panneau solaire

Le stockage de l'électricité produite par un panneau solaire peut se faire de différentes manières, en fonction des besoins et des contraintes de l'utilisateur. L'une des solutions les plus courantes est l'utilisation de batteries de stockage, qui permettent de stocker l'électricité produite par le panneau solaire pendant la journée et de l'utiliser la nuit ou lorsque le panneau ne produit pas suffisamment d'électricité. Les batteries peuvent être de différents types, comme les batteries au plomb-acide, les batteries au lithium-ion, les batteries au nickel-cadmium, etc. Les batteries au lithium-ion sont les plus courantes pour le stockage d'énergie solaire en raison de leur efficacité et de leur durée de vie.

Une autre option de stockage est le pompage de l'eau. Cette méthode utilise l'énergie électrique produite par le panneau solaire pour pomper de l'eau dans un réservoir à un niveau supérieur. Lorsque l'électricité est nécessaire, l'eau est relâchée et fait tourner une turbine qui génère de l'électricité. Un système de stockage local est représenté dans la figure ci-dessus :



Figure 1.12 : système de stockage local d'électricité produite d'un PV

Enfin, il existe d'autres technologies de stockage de l'énergie, telles que les super condensateurs, les volants d'inertie, les piles à combustible, etc. qui sont encore en développement ou qui sont utilisées dans des applications spécifiques.

Le choix de la méthode de stockage dépendra des besoins en énergie, de la taille du système, du coût, de l'efficacité et des contraintes spécifiques de chaque projet. [16]

1.9 L'ombrage de soleil

1.9.1 Introduction

La technologie photovoltaïque (PV) a gagné en maturité au cours des deux dernières décennies et a été déployée massivement dans le monde entier en tant que source d'énergie sécurisée et fiable. Malgré la réduction significative des coûts des composants des systèmes PV, l'optimisation de la récupération d'énergie reste un problème important pour les rendre compétitifs en termes de coût et d'efficacité. C'est la principale raison pour laquelle ces systèmes doivent inclure des contrôleurs de suivi du point de puissance maximale (MPPT). Cependant, la réalisation du MPPT reste une tâche difficile en raison du comportement dynamique du générateur photovoltaïque, qui est considérablement influencé par les conditions environnementales. Ce défi devient encore plus compliqué dans le cas des conditions d'ombrage partiel (PSC), qui se produisent lorsque l'ensemble du générateur photovoltaïque ne reçoit pas une insolation homogène, ce qui peut résulter de plusieurs facteurs, comme les nuages, les arbres, les bâtiments ou même la poussière. [17]

1.9.2 L'effet ombrage

L'ombrage est une réduction de l'ensoleillement reçu par des cellules, il peut réduire jusqu'à 90% des performances du panneau. La cellule ombragée devient réceptrice d'énergie au lieu d'être productrice. L'énergie se transforme en chaleur et risque de dégrader la cellule masquée, c'est l'effet <<hot spot>> ou <<point chaud>>. Le courant de l'ensemble de la chaîne de cellules en série qui est limité. L'emploi de diodes de dérivation by-pass est fortement recommandé. Connectée en parallèle sur chaque connexion série des multiples cellules photovoltaïques. Si une telle diode by-pass était connectée dans chaque cellule alors le problème induit par l'ombrage serait fortement réduit. Cependant, ce n'est pas une solution envisageable d'un point de vue commercial. On l'image placer la bas représente un panneau solaire ombragé par un arbre :



Figure 1.13 : panneau solaire ombragé par un arbre

L'effet ombrage intéresse beaucoup les scientifiques qui travaillent dans le domaine de l'énergie photovoltaïque. Puisqu'il est l'ennemi imprévisible du bon fonctionnement d'un panneau photovoltaïque. Nous citons dans la bibliographie quelques études récentes [18]

L'énergie produite par une chaîne de cellules est déterminée par celle qui produit le moins. Lorsqu'une cellule est ombragée, l'ensemble de la série est impacté. Pour éviter les pertes d'énergie, l'installation comprend généralement des diodes de dérivation câblées en parallèle aux cellules solaires. Lorsqu'une cellule solaire est ombragée, la diode de dérivation permet de « contourner » une partie des cellules et les autres cellules peuvent ainsi générer de l'énergie à tension réduite. [19]

1.9.3 Les facteurs qui causent l'ombrage

Ombrage, généralement causé par les nuages, les obstacles environnementaux tels que les arbres ou les bâtiments à proximité, l'auto-ombrage entre les panneaux en rangées parallèles, la saleté, la poussière, d'autres déjections d'oiseaux semblables à des déchets, etc. Ces effets d'ombrage sont également statiques en raison de la position de l'obstruction ou, dans certains cas, dynamiques, par nuages en mouvement. [20]

1.9.4 Les différents types d'ombrages :

- a) **Ombrage temporaire :** L'ombrage temporaire résulte de nuages, de déjections d'oiseaux, de poussières ou de feuilles mortes.
- b) **Ombrage proche :** Les ombres causées par les obstacles proches sont directes. Les cheminées, supports d'éclairage, antennes paraboliques, saillies de toit et de façade, structures de bâtiment décalées, superstructures de toit, pour ne citer que quelques exemples.
- c) **Ombrage lointain :** L'ombrage lointain provient de l'environnement du bâtiment. Des montagnes, des arbres, des câbles passant au-dessus des bâtiments, des bâtiments voisins ou des bâtiments distants pourraient également être source d'ombre.
- d) **Auto-ombrage :** Avec les systèmes de montage en tables, une rangée de modules peut entraîner un ombrage sur la rangée voisine. Dans ce cas de figure, il est nécessaire d'optimiser l'inclinaison et l'espacement entre les rangées de modules.
- e) **Ombrage direct :** L'ombrage direct peut entraîner de grandes pertes d'énergie, car la proximité de l'objet provoquant l'ombre empêche le panneau solaire photovoltaïque de capter la lumière [21].

1.9.5 Effet d'ombrage sur les performances du système de l'énergie solaire

Les panneaux solaires sont connectés en combinaison série-parallèle en fonction de la plage de tension d'entrée de l'onduleur. Si l'ombre d'un arbre ou d'une cheminée tombe même sur un panneau de la chaîne, la sortie de l'ensemble de la chaîne sera presque nulle pendant la

période d'ombre. S'il y a une chaîne séparée et non ombrée, elle tournera toujours la puissance de sortie comme d'habitude. L'impact de l'ombre sur l'ensemble du système dépend de la manière dont les panneaux sont câblés ensemble [22]. La figure 14 explique comment l'ombrage affecte la performance d'un panneau solaire :

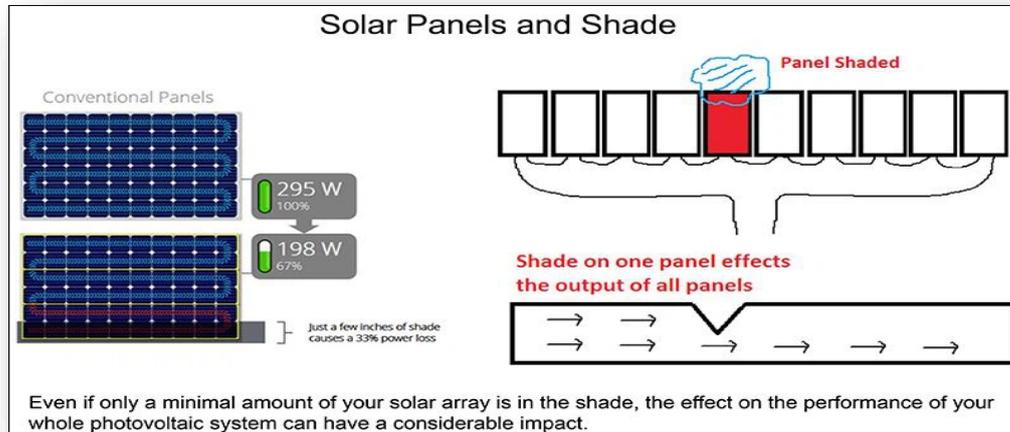


Figure 1.14 : explication de l'affectation de l'ombrage sur un panneau solaire en termes de puissance

1.10 Les avantages et les inconvénients d'énergie solaire

1.10.1 Les avantages

L'énergie photovoltaïque présente de nombreux avantages :

- a) **Énergie propre et renouvelable** : L'énergie solaire est une source d'énergie renouvelable et non polluante. Elle ne produit pas de gaz à effet de serre ni de pollution atmosphérique, ce qui la rend très attrayante pour les personnes soucieuses de l'environnement.
- b) **Faible coût de fonctionnement** : Une fois que les panneaux solaires sont installés, il n'y a pas de coût d'exploitation significatif, car l'énergie solaire est gratuite et illimitée. Il y a des coûts associés à l'entretien et à la maintenance des panneaux, mais ils sont généralement faibles.
- c) **Longue durée de vie** : Les panneaux solaires ont une durée de vie moyenne de 25 à 30 ans, et certains fabricants offrent même des garanties de performance allant jusqu'à 25 ans. Cela signifie que l'énergie solaire est une source d'énergie fiable et durable.
- d) **Indépendance énergétique** : L'installation de panneaux solaires sur un toit permet aux propriétaires de produire leur propre électricité. Cela peut réduire leur dépendance aux services publics et les protéger contre les augmentations de prix de l'énergie.
- e) **Installation facile** : Les panneaux solaires peuvent être installés sur des toits plats ou inclinés, sur des sols, des murs et même des structures flottantes. Les systèmes solaires peuvent

être facilement installés sur des sites éloignés où il est difficile ou coûteux d'apporter de l'électricité.

f) **Flexibilité** : Les systèmes solaires peuvent être configurés de différentes manières pour répondre aux besoins énergétiques de différents bâtiments. Les installations peuvent varier en taille, en fonction de l'espace disponible et de la quantité d'électricité nécessaire.

En somme, l'énergie photovoltaïque est une source d'énergie renouvelable, propre, durable, facile à installer, flexible et indépendante des services publics, qui présente des avantages économiques et environnementaux significatifs.

1.10.2 Les inconvénients

Bien que l'énergie solaire soit une source d'énergie renouvelable et propre, elle présente également certains inconvénients, notamment :

a) **Coûts élevés initiaux** : l'installation de panneaux solaires et de systèmes de stockage d'énergie peut être coûteuse, ce qui peut rendre l'énergie solaire moins accessible pour les personnes à faible revenu.

b) **Dépendance à la météo** : la production d'énergie solaire dépend de la disponibilité de la lumière du soleil, ce qui signifie qu'elle peut fluctuer en fonction de la météo. Les nuages, la pluie et la neige peuvent réduire l'efficacité des panneaux solaires.

c) **Occupation des terres** : les panneaux solaires nécessitent de grandes surfaces pour être installés, ce qui peut entraîner une occupation des terres, une perte d'habitats naturels et une réduction de la biodiversité.

d) **Élimination des déchets** : les panneaux solaires peuvent contenir des produits chimiques toxiques, tels que le cadmium et le plomb, qui doivent être éliminés correctement à la fin de leur durée de vie. Le manque d'infrastructures pour le recyclage des panneaux solaires peut entraîner une accumulation de déchets solaires dangereux pour l'environnement.

e) **Variabilité géographique** : l'énergie solaire n'est pas également répartie dans le monde entier. Les endroits qui reçoivent moins de lumière du soleil peuvent avoir une production d'énergie solaire moins rentable. [23]

1.11 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a exploré les généralités sur l'énergie solaire et la conversion photovoltaïque. De plus, nous avons étudié le processus de conversion photovoltaïque, qui permet de transformer directement l'énergie lumineuse du soleil en électricité utilisable.

Au cours de ce chapitre, nous avons également abordé les différents composants d'un système photovoltaïque, tels que les cellules solaires, les onduleurs et les dispositifs de stockage. Pour conclure, l'énergie solaire et la conversion photovoltaïque représentent une voie prometteuse

vers un avenir énergétique durable. Avec des avancées technologiques continues, une politique favorable et une sensibilisation accrue, nous pouvons exploiter pleinement le potentiel de cette ressource inépuisable pour répondre à nos besoins énergétiques tout en préservant notre environnement.

Chapitre 2

Les suiveurs solaires

2.1 Introduction

On a vu dans le chapitre précédent que le rendement d'un panneau solaire dépend de son orientation et inclinaison par rapport au rayonnement solaire au long de la journée d'où on a besoin d'un suiveur solaire astronomique (sans capteurs) qui s'éloigne de l'ombre dans le but de maximiser l'énergie solaire absorbée.

2.2 Historique de suivi de panneaux solaires

Le suivi de panneaux solaires est une technique qui existe depuis plusieurs décennies. Les premiers systèmes de suivi de panneaux solaires ont été développés dans les années 1970, principalement pour les applications de recherche et de développement. Au fil des années, la technologie a évolué pour rendre les systèmes de suivi de panneaux solaires plus fiables, plus précis et plus abordables. Dans les années 1980 et 1990, ces systèmes ont commencé à être utilisés dans les installations solaires commerciales et industrielles. Au cours des dernières années, les avancées technologiques ont permis de rendre les systèmes de suivi de panneaux solaires encore plus efficaces et rentables. Les systèmes à deux axes sont devenus plus courants, offrant une orientation optimale des panneaux solaires tout au long de la journée. Aujourd'hui, les systèmes de suivi de panneaux solaires sont largement utilisés dans les installations solaires de grande envergure, comme les centrales électriques solaires et les installations commerciales. Ils sont également de plus en plus populaires dans les installations solaires résidentielles, car ils peuvent augmenter la production d'énergie solaire et aider les propriétaires à économiser sur leur facture d'électricité. [24]

2.3 Le suiveur solaire

2.3.1 Définition

Un suiveur solaire est un dispositif qui permet à un panneau solaire de suivre la trajectoire du soleil tout au long de la journée afin de maximiser la quantité d'énergie solaire qu'il peut capter. Les panneaux solaires fixes ont une position statique et peuvent manquer d'énergie solaire en raison de l'angle d'incidence du soleil, en particulier lorsqu'il est bas sur l'horizon. Les suiveurs solaires sont conçus pour suivre le soleil à travers le ciel et maintenir les panneaux solaires perpendiculaires aux rayons du soleil, ce qui permet une production d'énergie plus efficace. Il existe deux principaux types de suiveurs solaires : les suiveurs à axe unique et les suiveurs à deux axes. Les suiveurs à axe unique suivent le soleil d'est en ouest, tandis que les suiveurs à deux axes suivent à la fois l'élévation et l'azimut du soleil, permettant une production d'énergie encore plus efficace. [25]

2.3.2 Le rôle d'un suiveur solaire

Le rôle d'un suiveur solaire est de maximiser la production d'énergie solaire d'un système photovoltaïque. Un suiveur solaire est un dispositif mécanique qui suit le mouvement du soleil tout au long de la journée pour maintenir les panneaux solaires orientés vers le soleil. Cela permet d'optimiser la quantité d'énergie solaire captée par les panneaux solaires, car l'angle d'incidence des rayons solaires est maintenu à son maximum tout au long de la journée. Les suiveurs solaires peuvent être utilisés dans les installations solaires résidentielles, commerciales et industrielles. Ils peuvent être équipés de capteurs qui suivent la position du soleil et ajustent la position des panneaux solaires en conséquence. Les suiveurs solaires peuvent également être équipés de moteurs pour effectuer les ajustements nécessaires. En maximisant la production d'énergie solaire, les suiveurs solaires peuvent contribuer à réduire les coûts d'énergie et à réduire la dépendance aux combustibles fossiles. Cependant, les suiveurs solaires peuvent également être coûteux à installer et à entretenir, et leur efficacité peut être limitée dans les régions où il y a peu de lumière solaire disponible. [26]

2.3.3 Étude comparative de la performance de différents types de suiveurs solaires

Les suiveurs solaires sont des systèmes qui permettent de maximiser la production d'énergie solaire en ajustant la position des panneaux solaires pour qu'ils suivent la trajectoire du soleil dans le ciel tout au long de la journée. Il existe plusieurs types de suiveurs solaires, chacun avec ses avantages et ses inconvénients en termes de coût, de fiabilité et de performances

a) **Suiveur solaire à un axe** : Les suiveurs à axe unique sont les plus simples et les plus couramment utilisés, il suit la trajectoire du soleil en se déplaçant autour d'un axe horizontal ou vertical vers l'est ou l'ouest et suivent le soleil pendant la journée, ce qui permet d'optimiser l'angle d'incidence des rayons solaires sur le panneau solaire.

Bien qu'ils augmentent la production d'énergie solaire par rapport à des panneaux fixes, leur capacité à suivre la trajectoire exacte du soleil est limitée, ce qui peut réduire leur efficacité. De plus, les suiveurs à axe unique sont généralement moins chers que les autres types de suiveurs solaires. Voici une image qui illustre comment le suiveur solaire un axe capture le soleil [27] :

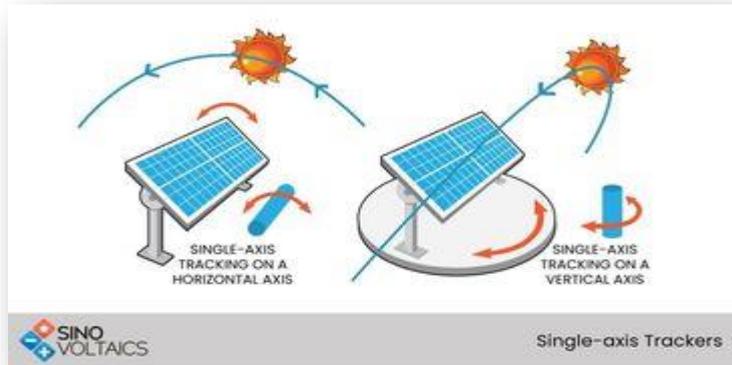


Figure 2.1 : solaire à un axe

b) **Suiveur solaire à deux axes** : ce type de suiveur solaire suit la trajectoire du soleil en se déplaçant à la fois autour de l'axe horizontal et de l'axe vertical. Cette méthode est plus précise et permet d'optimiser davantage l'angle d'incidence des rayons solaires, Ils ont une efficacité supérieure à celle des suiveurs à axe unique, mais elle est plus complexe et plus coûteuse que le suiveur à un axe. Les suiveurs à deux axes sont souvent utilisés dans les grands projets solaires commerciaux. Voici une illustration montrant comment le suiveur solaire à deux axes capte le mouvement du soleil [28] :

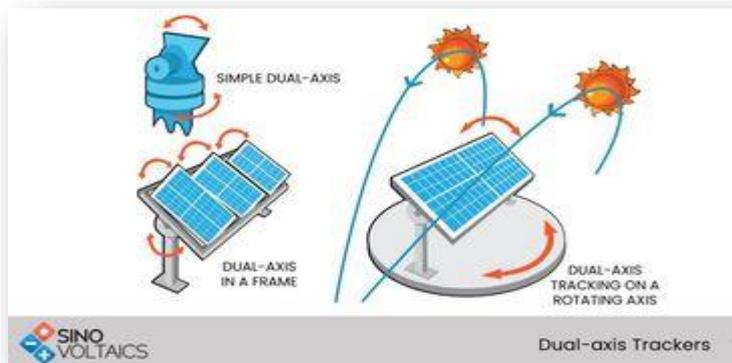


Figure 2.2 : suiveur solaire à double axes

c) **Suiveur solaire hybride** : ce type de suiveur solaire combine une orientation à un axe avec une inclinaison manuelle du panneau solaire pour maximiser la production d'énergie solaire en fonction des conditions météorologiques. Ce type de suiveur est simple et peu coûteux à fabriquer, mais il nécessite une intervention manuelle pour ajuster l'angle d'inclinaison.

d) **Suiveur solaire astronomique** : ce type de suiveur solaire suit la trajectoire du soleil en se basant sur des calculs astronomiques précis, plutôt que sur des capteurs ou des moteurs.

Cette méthode est très précise, mais elle est également très coûteuse et nécessite un équipement spécialisé.

e) **Suiveurs à concentration** : Les suiveurs à concentration sont utilisés pour les systèmes de concentration solaire qui utilisent des miroirs pour concentrer la lumière solaire sur des cellules photovoltaïques. Ils sont conçus pour suivre la position exacte du soleil dans le ciel pour maximiser la concentration de la lumière solaire sur les cellules photovoltaïques. Les suiveurs à concentration sont très efficaces mais coûtent plus cher que les autres types de suiveurs solaires.

f) **Suiveurs à inclinaison réglable** : Les suiveurs à inclinaison réglable sont utilisés pour les systèmes solaires installés sur des toits ou des murs. Ils permettent aux panneaux solaires de suivre l'inclinaison du toit ou du mur pour maximiser l'exposition au soleil. Ils sont moins coûteux que les autres types de suiveurs solaires, mais leur efficacité est moindre

Chaque type de suiveur solaire a ses avantages et ses inconvénients en termes de coût, de complexité, de performance, de maintenance et d'efficacité énergétique, et doit être choisi en fonction des besoins spécifiques de chaque projet.

Les suiveurs à deux axes et les suiveurs à concentration sont les plus performants, mais aussi les plus chers, tandis que les suiveurs à axe unique et les suiveurs à inclinaison réglable sont plus abordables mais moins efficaces. Le choix du type de suiveur solaire dépend des besoins spécifiques de chaque projet solaire, notamment de la taille, du budget et de l'emplacement géographique. [29]

2.3.4 Conception et réalisation d'un système de suivi solaire pour l'optimisation de la production d'énergie photovoltaïque

La conception et la réalisation d'un système de suivi solaire pour l'optimisation de la production d'énergie photovoltaïque implique plusieurs étapes importantes. Voici quelques éléments clés à prendre en compte :

a) **Analyse du site** : Il est essentiel de réaliser une étude du site où le système de suivi solaire sera installé, en prenant en compte des facteurs tels que la latitude, la topographie, l'orientation, l'inclinaison et la végétation environnante.

b) **Choix du type de suiveur solaire** : Il existe plusieurs types de suiveurs solaires, tels que les suiveurs à un axe et à deux axes, qui ont des avantages et des inconvénients spécifiques. Il est important de sélectionner le type de suiveur solaire qui convient le mieux aux conditions du site et aux besoins de production d'énergie.

- c) **Conception mécanique** : La conception mécanique comprend la sélection des matériaux, la conception des supports pour les panneaux solaires et le suiveur solaire, ainsi que le choix des moteurs et des systèmes de commande pour les mouvements du suiveur solaire.
- d) **Conception électrique** : La conception électrique comprend la sélection des composants électriques, tels que les panneaux solaires, les onduleurs et les batteries, ainsi que la conception du système de contrôle et de surveillance.
- e) **Installation et mise en service** : L'installation implique la mise en place des supports et du suiveur solaire, le montage des panneaux solaires, le câblage électrique, l'installation des onduleurs et des batteries, ainsi que la mise en service et la calibration du système.
- f) **Maintenance et suivi** : Pour garantir des performances optimales du système de suivi solaire, il est important de mettre en place un plan de maintenance régulière et de surveillance de la performance.

La conception et la réalisation d'un système de suivi solaire nécessite une analyse approfondie du site, le choix du type de suiveur solaire adapté, une conception mécanique et électrique précise, une installation et une mise en service soigneuses, ainsi qu'un suivi régulier pour assurer une performance optimale du système. [30]

2.4 Choix d'orientation et d'inclinaison des panneaux solaires

2.4.1 Choix d'orientation de module PV

Le choix de l'orientation d'un module photovoltaïque (PV) dépend principalement de la localisation géographique du site et de l'objectif du système PV. En général, il existe deux orientations principales pour les modules PV : l'orientation vers le sud et l'orientation vers l'ouest.

- a) **L'orientation vers le sud** : c'est la plus courante pour les systèmes PV, car elle permet de maximiser la production d'énergie solaire sur une journée complète. Cette orientation est particulièrement efficace dans l'hémisphère nord, où le soleil est plus au sud pendant les mois d'hiver et plus au nord pendant les mois d'été. Ci-dessous se trouve une représentation visuelle décrivant comment le suiveur solaire à orientation vers le sud [31] :

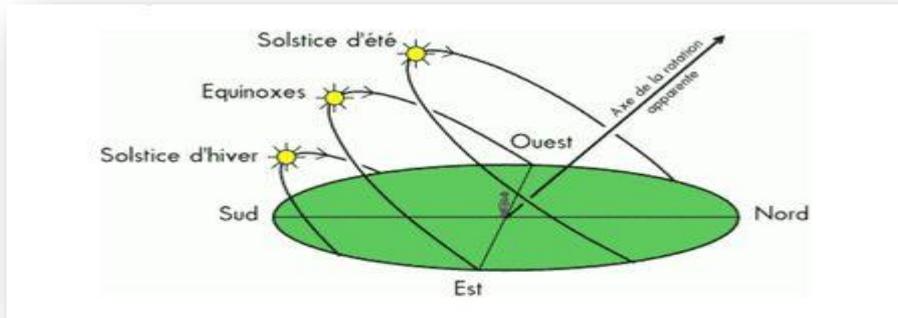


Figure 2.3 : présentation d’une orientation vers le sud

b) **L'orientation vers l'ouest :** cette orientation peut également être efficace dans certains cas, notamment dans les zones où l'électricité est plus chère pendant les heures de pointe de la fin de journée. Dans ce cas, les modules PV sont orientés vers l'ouest pour maximiser la production d'électricité pendant les heures de pointe.

Enfin, l'orientation vers l'est peut être utile pour les bâtiments ou les installations qui ont une consommation d'énergie plus importante le matin.

2.4.2 Choix d'inclinaison de module PV

Le choix de l'inclinaison du module PV dépend de plusieurs facteurs, notamment l'emplacement géographique du système PV, la saison de l'année, l'orientation du toit ou de la surface d'installation, et le but du système PV. En général, pour maximiser la production d'énergie, il est recommandé d'installer les panneaux solaires avec une inclinaison qui correspond à l'angle de la latitude du site. Par exemple, pour un site situé à 45 degrés de latitude, l'inclinaison optimale serait de 45 degrés [32]. Voici un graphe qui indique l'inclinaison idéale moyenne pour les suiveur solaire les mois de l'année [33] :

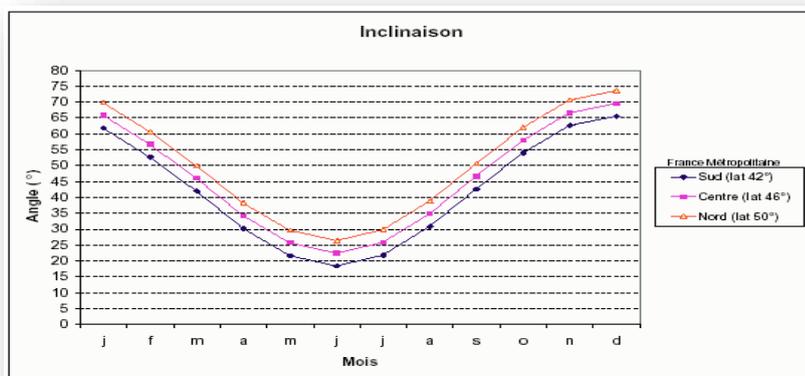


Figure 2.4 : Graphe d’inclinaison idéale pour les suiveurs solaires en France

Cependant, dans certains cas, il peut être plus avantageux d’incliner les panneaux solaires davantage pour augmenter la production d’énergie pendant les mois d’hiver ou de les incliner moins pour augmenter la production d’énergie pendant les mois d’été. Enfin, si l’objectif

principal du système PV est de fournir de l'ombre ou de la protection contre les intempéries, l'inclinaison des panneaux solaires peut être choisie en fonction de ces besoins plutôt que de la production d'énergie maximale. Ci-dessous se trouve une représentation visuelle décrivant est l'inclinaison de suiveur solaire ou beta représente l'angle d'inclinaison [34] :

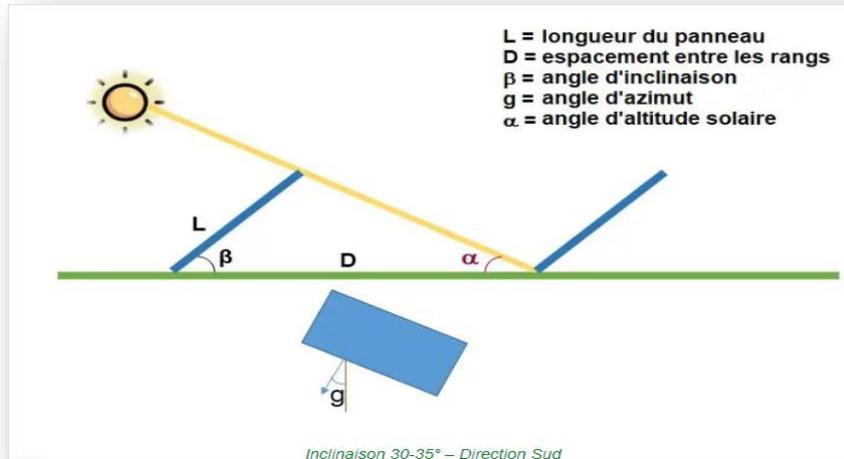


Figure 2.5 : image décrire différent paramètres de panneau solaire

2.4.3 Analyse de l'impact de l'orientation et de l'inclinaison sur la production d'énergie solaire avec des suiveurs solaires

L'orientation et l'inclinaison des panneaux solaires ont un impact significatif sur la production d'énergie solaire. Les panneaux solaires doivent être placés de manière à maximiser leur exposition au soleil afin de produire de l'électricité de manière efficace. Les suivis solaires sont une solution qui permettent de maximiser cette exposition, en ajustant automatiquement l'orientation et l'inclinaison des panneaux pour suivre le mouvement du soleil tout au long de la journée.

L'orientation des panneaux solaires est importante car elle détermine la quantité de lumière solaire qui frappe la surface des panneaux. Dans l'hémisphère nord, les panneaux doivent être orientés vers le sud pour maximiser leur exposition au soleil. Dans l'hémisphère sud, les panneaux doivent être orientés vers le nord.

L'angle d'inclinaison des panneaux est également important car il détermine la quantité de lumière solaire qui est absorbée par les panneaux. Le meilleur angle d'inclinaison dépend de la latitude géographique, ainsi que des conditions météorologiques locales.

Les suivis solaires peuvent aider à maximiser la production d'énergie solaire en ajustant automatiquement l'orientation et l'inclinaison des panneaux solaires en temps réel pour suivre le mouvement du soleil tout au long de la journée. Cela permet aux panneaux de rester constamment orientés vers le soleil, maximisant ainsi l'exposition aux rayons du soleil et augmentant la production d'énergie solaire.

L'impact de l'orientation et de l'inclinaison sur la production d'énergie solaire peut varier considérablement en fonction de l'emplacement géographique et des conditions météorologiques locales. Les suivis solaires peuvent aider à minimiser ces variations en ajustant constamment l'orientation et l'inclinaison des panneaux pour optimiser la production d'énergie solaire.

En résumé, l'orientation et l'inclinaison des panneaux solaires ont un impact important sur la production d'énergie solaire, et les suivis solaires peuvent aider à maximiser cette production en ajustant constamment l'orientation et l'inclinaison des panneaux pour suivre le mouvement du soleil tout au long de la journée. Cependant, le choix de la solution la plus adaptée dépend de nombreux facteurs tels que la géographie, les conditions météorologiques, les coûts et les objectifs de production d'énergie solaire [35]. Ces graphiques permettent d'extraire les valeurs optimales de l'orientation et de l'inclinaison pour maximiser la production d'énergie du capteur solaire [36] :

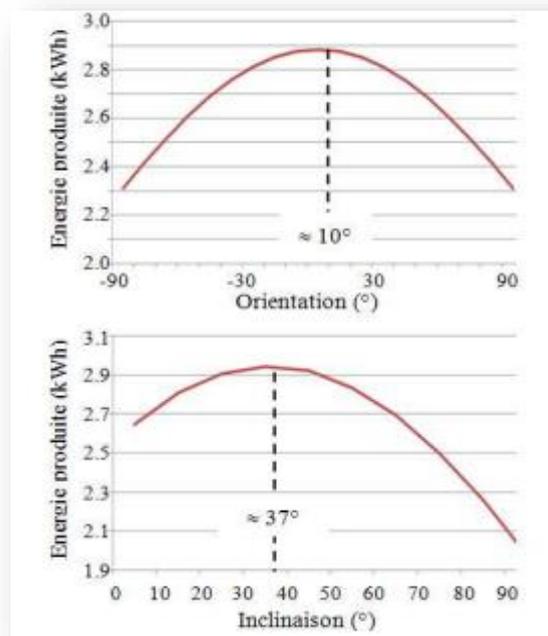


Figure 2.6 : Exemple de résultat d'un exercice visant à analyser l'impact de l'orientation et de l'inclinaison sur la production d'énergie d'une cellule solaire.

2.5 Étude des facteurs clés pour le choix du type de suiveur solaire pour une application spécifique

Le choix du type de suiveur solaire pour une application spécifique dépend de plusieurs facteurs clés, tels que :

2.5.1 La géographie et le climat

Le choix du type de suiveur solaire dépendra de l'emplacement géographique et du climat de l'endroit où il sera installé. Par exemple, dans les zones où il y a peu de nuages et beaucoup de soleil, un suiveur solaire à un axe peut être suffisant. Dans les zones où il y a beaucoup de nuages ou où les conditions météorologiques sont instables, un suiveur solaire à deux axes peut être plus approprié.

2.5.2 L'application

Le choix du type de suiveur solaire dépendra également de l'application pour laquelle il sera utilisé. Par exemple, un suiveur solaire à un axe peut être utilisé pour les systèmes photovoltaïques résidentiels, tandis qu'un suiveur solaire à deux axes peut être utilisé pour les grandes centrales solaires.

2.5.3 La taille du système

La taille du système solaire joue également un rôle important dans le choix du type de suiveur solaire. Pour les petits systèmes solaires, un suiveur solaire à un axe peut être suffisant, tandis que pour les grands systèmes solaires, un suiveur solaire à deux axes peut être plus approprié.

2.5.4 Le coût

Le choix du type de suiveur solaire dépendra également du coût du système. Un suiveur solaire à deux axes est généralement plus cher qu'un suiveur solaire à un axe, mais il peut être plus efficace dans certains cas.

2.5.5 La maintenance

La maintenance du suiveur solaire est également un facteur important à considérer. Un suiveur solaire à deux axes nécessite plus de maintenance qu'un suiveur solaire à un axe en raison de sa complexité. [37]

2.6 Analyse de l'efficacité énergétique des suiveurs solaires pour les zones géographiques à faible ensoleillement

Les suiveurs solaires sont des dispositifs qui permettent de maximiser la production d'énergie solaire en orientant les panneaux solaires de manière optimale en fonction de la position du soleil dans le ciel. Toutefois, leur efficacité énergétique peut varier en fonction des conditions météorologiques, de la latitude et de l'ensoleillement des différentes zones géographiques.

Dans les zones géographiques à faible ensoleillement, l'efficacité des suiveurs solaires peut être limitée. En effet, leur efficacité dépend en grande partie de la quantité de lumière

solare disponible. Dans les régions où l'ensoleillement est limité, les suiveurs solaires peuvent ne pas être en mesure de fournir suffisamment d'énergie pour compenser les coûts énergétiques nécessaires pour leur fabrication, leur installation et leur maintenance.

Cependant, certaines technologies de suivi solaire, telles que les systèmes de suivi de deux axes, peuvent être plus efficaces dans les zones géographiques à faible ensoleillement. Ces systèmes permettent aux panneaux solaires de suivre la trajectoire du soleil dans les deux dimensions, ce qui permet d'optimiser la production d'énergie même lorsque la lumière solaire est indirecte ou diffuse. En outre, il convient de noter que même dans les zones géographiques à faible ensoleillement, les suiveurs solaires peuvent être efficaces lorsqu'ils sont associés à des panneaux solaires à haut rendement. Les panneaux solaires à haut rendement sont capables de convertir une plus grande partie de la lumière solaire en électricité, ce qui peut compenser en partie les effets de l'ensoleillement limité.

En conclusion, l'efficacité énergétique des suiveurs solaires dans les zones géographiques à faible ensoleillement peut être limitée, mais certaines technologies de suivi solaire peuvent être plus efficaces que d'autres dans ces conditions [38]. Il est également important de considérer les panneaux solaires à haut rendement pour compenser les effets de l'ensoleillement limité. Dessous on trouve une figure qui comprend la moyenne de l'ensoleillement annuel dans les régions du monde, on remarque que l'Algérie a une zone très forte d'ensoleillement entre 5 et plus de 6 kWh/m par jour.

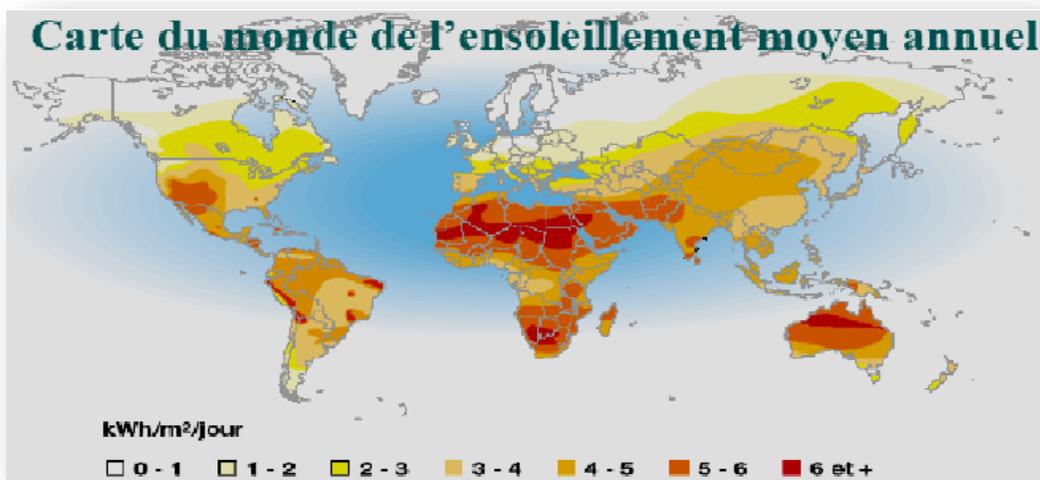


Figure 2.7 : carte du monde de l'ensoleillement moyen en fonction de kWh/m/jr

2.7 Analyse de la fiabilité et de la durabilité des suiveurs solaires dans des conditions météorologiques extrêmes

La fiabilité et la durabilité des suiveurs solaires sont des aspects clés à considérer lors de l'installation de systèmes solaires dans des conditions météorologiques extrêmes.

2.7.1 Fiabilité des suiveurs solaires

La fiabilité des suiveurs solaires dépend principalement de la qualité des composants utilisés et de la conception globale du système. Les composants tels que les capteurs, les moteurs et les systèmes de contrôle doivent être conçus pour fonctionner dans des conditions extrêmes telles que des températures élevées, des vents forts et des tempêtes de sable. Les composants de qualité supérieure sont plus résistants aux chocs et à la corrosion et ont une durée de vie plus longue. Les suiveurs solaires doivent également être dotés de systèmes de protection pour prévenir les dommages causés par la foudre, les surtensions et les courts-circuits. Les systèmes de surveillance doivent être installés pour détecter les pannes et les erreurs de fonctionnement et pour permettre une maintenance préventive.

2.7.2 Durabilité des suiveurs solaires

La durabilité des suiveurs solaires dépend de la résistance du système aux conditions météorologiques extrêmes. Les suiveurs solaires doivent être conçus pour résister aux températures élevées, aux vents forts et aux tempêtes de sable. Les composants doivent être protégés contre la corrosion et les chocs, et les systèmes de contrôle doivent être étanches à l'eau. Les suiveurs solaires doivent également être dotés de mécanismes de sécurité pour résister aux conditions de vent extrêmes et aux tempêtes de sable. Les systèmes de freinage doivent être conçus pour empêcher les mouvements incontrôlés en cas de panne ou de défaillance du système. [39]

2.8 Évaluation des coûts et des avantages économiques des systèmes de suivi solaire pour les applications résidentielles et commerciales

Cependant, ces systèmes sont également plus coûteux et complexes à installer et à entretenir. Voici une évaluation des coûts et des avantages économiques des systèmes de suivi solaire pour les applications résidentielles et commerciales :

2.8.1 Avantages économiques

a) **Production d'énergie accrue :** Les systèmes de suivi solaire peuvent augmenter la production d'énergie solaire de 20 à 40 % par rapport aux systèmes fixes, ce qui peut se traduire par des économies d'énergie et des revenus supplémentaires pour les propriétaires.

b) **Augmentation de la durée de vie des panneaux solaires** : Les systèmes de suivi solaire permettent une exposition plus uniforme des panneaux solaires au soleil, ce qui peut réduire l'usure des panneaux et prolonger leur durée de vie.

c) **Valorisation immobilière** : L'ajout d'un système de suivi solaire peut augmenter la valeur immobilière d'une propriété, en particulier dans les régions où l'énergie solaire est populaire.

2.8.2 Coûts économiques

a) **Coût initial plus élevé** : Les systèmes de suivi solaire sont plus coûteux que les systèmes fixes en raison de leur complexité et de leur installation plus difficile.

b) **Coûts de maintenance plus élevés** : Les systèmes de suivi solaire nécessitent une maintenance régulière pour assurer un fonctionnement optimal, ce qui peut entraîner des coûts supplémentaires pour les propriétaires.

c) **Perte de rendement à long terme** : Bien que les systèmes de suivi solaire puissent offrir une production d'énergie accrue, leur durée de vie peut être réduite par rapport aux systèmes fixes en raison de l'usure accrue des composants mobiles, ce qui peut entraîner des coûts de remplacement supplémentaires. [40]

2.9 Comparaison entre les panneaux mobiles et les panneaux fixes

Les panneaux solaires mobiles ont plusieurs avantages par rapport aux panneaux fixes :

2.9.1 Flexibilité

Les panneaux mobiles peuvent être orientés vers le soleil tout au long de la journée pour maximiser la production d'énergie solaire. Les panneaux fixes sont généralement fixés en position et ne peuvent pas être déplacés pour suivre la trajectoire du soleil.

2.9.2 Mobilité

Les panneaux mobiles peuvent être déplacés et transportés facilement, ce qui les rend idéaux pour une utilisation sur des sites temporaires ou pour les activités de plein air telles que le camping ou la randonnée. Les panneaux fixes sont généralement plus difficiles à déplacer et sont conçus pour être installés de manière permanente.

2.9.3 Efficacité énergétique

Les panneaux mobiles peuvent être ajustés pour maximiser leur exposition au soleil, ce qui permet d'augmenter l'efficacité énergétique et de produire plus d'énergie que les panneaux fixes.

2.9.4 Coût

Les panneaux mobiles sont souvent moins chers que les panneaux fixes, car ils sont fabriqués à partir de matériaux moins coûteux et nécessitent moins d'installations.

Cependant, les panneaux solaires mobiles ont également quelques inconvénients, notamment :

2.9.5 Complexité

Les panneaux mobiles sont souvent plus complexes à installer et à utiliser que les panneaux fixes, car ils nécessitent des mécanismes de pivotement et de suivi du soleil.

2.9.6 Fiabilité

Les panneaux mobiles peuvent être plus sujets aux pannes et à l'usure en raison de leur conception plus complexe et de leur utilisation plus fréquente. En résumé, les panneaux solaires mobiles sont une option intéressante pour ceux qui cherchent une solution énergétique flexible, mobile et rentable, mais ils peuvent ne pas être adaptés à tous les besoins et circonstances. [41] Dessus on a une étude comparative entre un panneau solaire fixe et mobile (suiveur solaire) en terme de production énergétique en Wp [42]

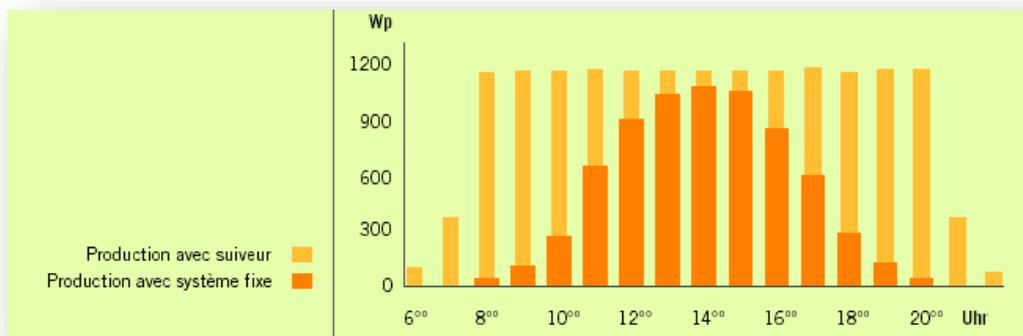


Figure 2.8 : diagramme de comparaison entre la production avec suiveur et la production avec système fixe

2.10 Conclusion

En conclusion le choix de l'orientation d'un module PV dépend de nombreux facteurs, tels que la localisation géographique, les tarifs d'électricité et les objectifs du système PV. La fiabilité et la durabilité des suiveurs solaires sont essentielles pour assurer une production d'énergie solaire maximale et une longue durée de vie du système. Les composants de qualité supérieure, les systèmes de protection et les mécanismes de sécurité sont des éléments clés pour garantir la fiabilité et la durabilité des suiveurs solaires dans des conditions météorologiques extrêmes. Les systèmes de suivi solaire peuvent offrir des avantages économiques tels qu'une

production accrue d'énergie solaire, une durée de vie prolongée des panneaux solaires et une valorisation immobilière accrue.

Chapitre 3
Etude théorique et
pratique

3.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons examiné les différents types de suiveur solaires ainsi que leurs avantages et inconvénients. Nous avons également étudié leur efficacité en termes de production d'énergie. Nous avons constaté que l'Algérie dispose d'un fort potentiel pour exploiter l'abondante quantité d'ensoleillement qu'elle reçoit afin de produire plus d'énergie électrique. Parmi les types de suiveurs nous allons nous intéresser au suiveur solaire astronomique car il est facile à installer et donne des résultats très bien et a un rendement important. Dans ce chapitre on va présenter comment on va réaliser un suiveur astronomique théoriquement et pratiquement.

3.2 Etude théorique

3.2.1 Le mouvement du globe terrestre autour le soleil

Le mouvement du globe terrestre autour du soleil est appelé révolution. La Terre suit une orbite elliptique autour du soleil, avec une période d'environ 365 jours et un quart (une année). Cette révolution est à l'origine de plusieurs phénomènes astronomiques importants, tels que les saisons, les équinoxes et les solstices. L'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport à son orbite autour du Soleil est également un élément important à prendre en compte. Cette inclinaison est d'environ 23,5 degrés par rapport au plan de l'écliptique (le plan défini par l'orbite de la Terre autour du Soleil). Cela signifie que pendant une partie de l'année, l'hémisphère Nord est incliné vers le soleil, tandis que pendant une autre partie de l'année, c'est l'hémisphère Sud qui est incliné vers le soleil. C'est cette inclinaison qui est à l'origine des saisons. Au cours de la révolution de la Terre autour du Soleil, la distance entre la Terre et le Soleil varie également légèrement. Le point le plus proche du Soleil est appelé périhélie et se produit autour du 3 janvier de chaque année. Le point le plus éloigné est appelé aphélie et se produit autour du 4 juillet de chaque année. Le mouvement de la Terre autour du Soleil est un élément clé de notre système solaire et a des répercussions importantes sur la vie sur Terre. [43]

3.2.2 La sphère céleste

La sphère céleste est un modèle de référence utilisé en astronomie pour représenter la position des étoiles dans le ciel. Elle est imaginée comme une sphère imaginaire qui entoure la Terre, sur laquelle sont projetées les positions des étoiles, des planètes et des autres corps célestes. Le centre de la sphère céleste est considéré comme étant l'observateur, c'est-à-dire la personne qui regarde le ciel. L'axe de rotation de la Terre est considéré comme passant par le centre de la sphère céleste. Les étoiles sont réparties sur la surface de la sphère céleste en fonction de leur position réelle dans l'espace. La sphère céleste est divisée en plusieurs cercles imaginaires, tels que l'équateur céleste (qui correspond au plan de l'équateur terrestre), les

cercles de déclinaison et les cercles horaires. Ces cercles sont utilisés pour décrire la position des corps célestes dans le ciel et pour repérer des objets spécifiques. La sphère céleste est un outil important pour les astronomes car elle permet de représenter les positions des étoiles et des planètes de manière cohérente et de suivre les mouvements apparents des corps célestes dans le ciel. [44]

3.2.3 Les coordonnées célestes

Les coordonnées célestes sont utilisées pour localiser des objets dans le ciel en utilisant un système de coordonnées qui est basé sur la position de l'observateur sur Terre. Il existe deux types de coordonnées célestes : les coordonnées géographiques et les coordonnées horizontales. Les coordonnées équatoriales (géographiques) sont basées sur l'emplacement de l'équateur céleste, qui est une projection de l'équateur terrestre sur la sphère céleste. L'angle entre l'équateur céleste et le plan de l'écliptique, qui est le plan de l'orbite de la Terre autour du Soleil, est connu sous le nom d'obliquité de l'écliptique. Les coordonnées équatoriales sont mesurées en ascension droite et en déclinaison. L'ascension droite est mesurée en heures, minutes et secondes d'arc, et est équivalente à la longitude sur la Terre. La déclinaison est mesurée en degrés, minutes et secondes d'arc, et est équivalente à la latitude sur la Terre. Les coordonnées horizontales sont basées sur la position de l'observateur sur Terre. Elles sont mesurées en azimut et en hauteur. L'azimut est l'angle entre le nord et l'objet céleste, mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre. La hauteur est l'angle entre l'objet céleste et l'horizon, mesuré en degrés. Les coordonnées célestes sont utilisées pour localiser des étoiles, des planètes, des comètes, des astéroïdes et d'autres objets célestes dans le ciel. Elles sont également utilisées en astronomie pour étudier la position, la distance et le mouvement des objets célestes [45]. On a dessus une image que représente la sphère céleste la déclinaison et l'écliptique :

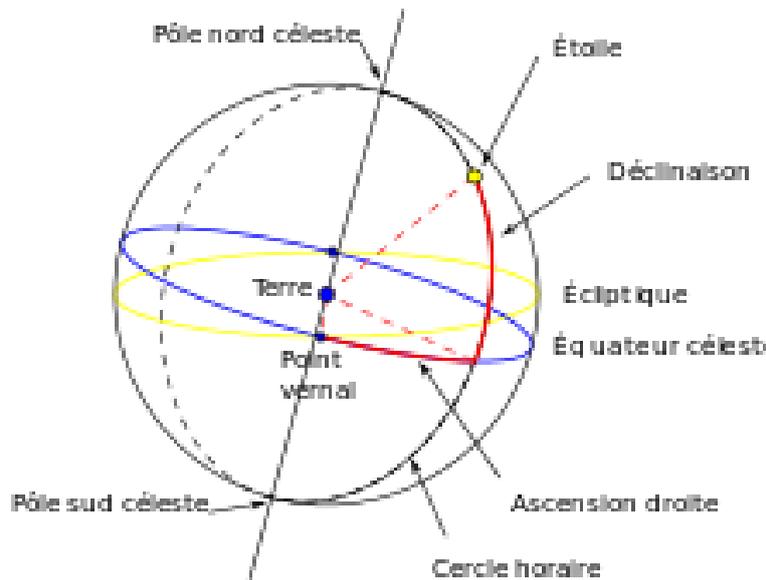


Figure 3.1 : image représentatif d'une sphère céleste et leurs paramètres

3.2.4 Cordonnés célestes géographiques

La longitude et la latitude sont des coordonnées géographiques terrestres utilisées pour localiser un point sur la surface de la Terre. La longitude mesure la distance angulaire entre un point et le méridien de Greenwich, mesurée en degrés à l'est ou à l'ouest de ce méridien. La latitude mesure la distance angulaire entre un point et l'équateur, mesurée en degrés nord ou sud de l'équateur.

En combinant ces deux coordonnées, on peut déterminer la position exacte d'un point sur la Terre. Les systèmes de navigation par satellite utilisent les coordonnées de longitude, latitude pour déterminer la position d'un utilisateur sur la surface de la Terre. Les cartes et les applications de navigation utilisent également ces coordonnées pour afficher la position de l'utilisateur et des points d'intérêt sur une carte [46]. Et voici une figure sur longitude et latitude :

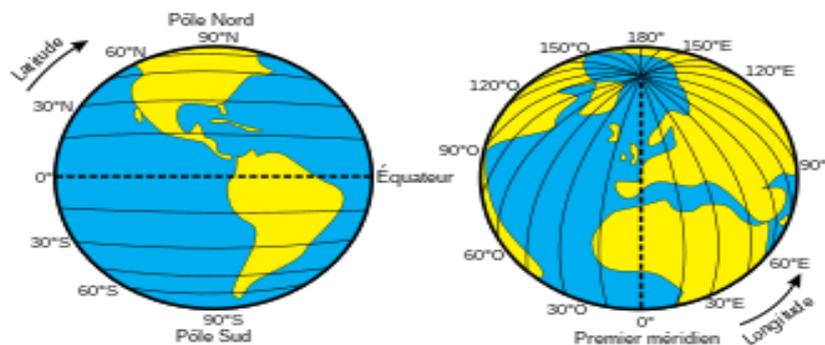


Figure 3.2 : représentation de longitude et latitude dans le globe

a) **Longitude :** La longitude est un concept important en géographie et en navigation. Elle permet de localiser avec précision un point sur la surface terrestre en spécifiant sa position est-ouest par rapport au méridien d'origine.

La mesure de la longitude est basée sur le mouvement de la Terre autour de son axe, qui effectue une rotation complète en 24 heures. Ainsi, le méridien d'origine est défini comme le méridien qui passe par l'Observatoire royal de Greenwich, car c'est à cet endroit que l'heure moyenne de Greenwich est définie comme référence pour le monde entier. L'heure locale de tout point sur la Terre peut être déterminée en fonction de son éloignement par rapport à Greenwich.

La longitude est mesurée en degrés, minutes et secondes, et elle varie de 0° à 180° vers l'est et de 0° à -180° vers l'ouest, en fonction de la position du point par rapport au méridien d'origine. Par convention, on utilise la lettre E pour indiquer les longitudes à l'est du méridien d'origine, et la lettre W pour les longitudes à l'ouest.

La longitude est utilisée pour définir les fuseaux horaires, qui sont des zones de la surface terrestre qui ont la même heure. Chaque fuseau horaire couvre une plage de longitudes de 15 degrés, soit une différence d'une heure entre deux fuseaux horaires consécutifs. Il existe donc 24 fuseaux horaires, qui se succèdent de manière régulière de l'est à l'ouest, en suivant le mouvement de la Terre. [47]

b) **Latitude :** La latitude est une mesure de l'angle entre un point situé sur la surface de la Terre et l'équateur, qui est considéré comme le plan de référence pour la latitude. Les latitudes sont généralement exprimées en degrés, minutes et secondes, et elles sont positives pour les points situés au nord de l'équateur et négatives pour les points situés au sud de l'équateur.

La latitude est mesurée à l'aide d'instruments tels que des sextants ou des GPS, qui permettent de mesurer l'angle entre l'horizon et l'étoile polaire (dans l'hémisphère Nord) ou l'étoile du Sud (dans l'hémisphère Sud). Cela permet de déterminer la latitude du point d'observation.

La latitude est utilisée pour définir les climats de la Terre, car elle est étroitement liée à la quantité de rayonnement solaire reçue par une région donnée. Les régions situées près de l'équateur reçoivent plus de rayonnement solaire que les régions situées près des pôles, ce qui se traduit par des climats plus chauds et plus humides. Les zones polaires ont des climats plus froids en raison de l'angle plus faible auquel le rayonnement solaire frappe la surface de la Terre.

La latitude est également utilisée pour définir les fuseaux horaires, qui sont des régions de la Terre où l'heure est la même. Chaque fuseau horaire est défini par une bande de longitude

qui s'étend de 15 degrés à l'est et à l'ouest du méridien de Greenwich. Les fuseaux horaires sont décalés d'une heure par rapport à leur voisin, ce qui permet de maintenir une heure de référence globale pour les communications et les voyages internationaux. [48]

3.2.5 Cordonnés célestes horizontales

Les coordonnées célestes horizontales sont utilisées pour localiser des objets célestes à partir d'un point d'observation sur la Terre. Elles se composent de deux mesures principales l'azimut et l'élévation (ou l'angle d'élévation).

L'azimut mesure l'angle entre le nord vrai et la direction de l'objet céleste, mesuré en tournant dans le sens des aiguilles d'une montre à partir du nord vrai. Il est généralement mesuré en degrés, allant de 0 à 360 degrés.

L'élévation mesure l'angle entre l'horizon et l'objet céleste, mesuré en degrés. Elle varie de -90 degrés (pour un objet situé directement sous l'observateur) à 90 degrés (pour un objet situé directement au-dessus de l'observateur).

Les coordonnées célestes horizontales sont particulièrement utiles pour les astronomiques à l'œil nu, car elles reflètent la manière dont nous percevons le ciel depuis la surface de la Terre. Cependant, elles ne sont pas aussi précises que d'autres systèmes de coordonnées célestes, tels que les coordonnées équatoriales [49]. Cette image représente l'azimut et l'élévation du soleil par rapport à le disque terrestre :

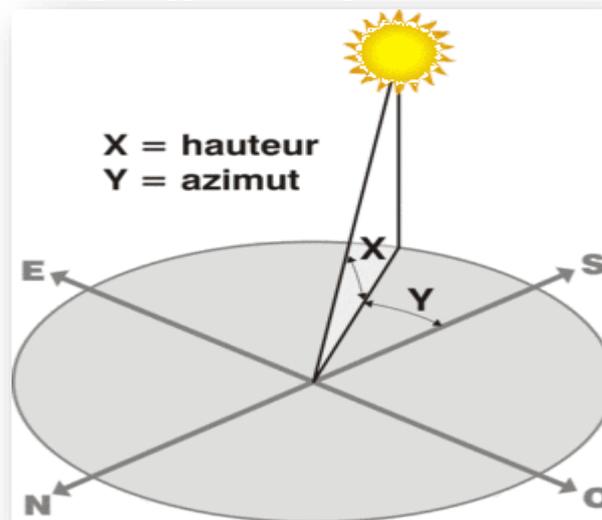


Figure 3.3 : l'élévation et l'azimut du soleil au sud

a) **L'élévation (Altitude Solaire) :** Est t'appelé aussi la hauteur angulaire du soleil, il est une mesure importante en astronomie et en navigation car elle peut être utilisée pour déterminer la position de l'observateur sur Terre. Elle est également utilisée pour déterminer la durée du jour et de la nuit, ainsi que pour prédire les éclipses solaires et lunaires.

La hauteur angulaire du soleil est mesurée à partir de la ligne d'horizon, qui est la ligne imaginaire qui sépare le ciel de la terre. Pour mesurer la hauteur angulaire du soleil, un instrument appelé sextant est utilisé. Le sextant est un instrument optique qui mesure l'angle entre deux objets, tels que le soleil et l'horizon.

La hauteur angulaire du soleil varie tout au long de la journée en raison du mouvement apparent du soleil dans le ciel. Au lever du soleil, sa hauteur angulaire est de zéro degré et elle augmente progressivement jusqu'à atteindre son maximum à midi solaire. Ensuite, elle diminue progressivement jusqu'au coucher du soleil.

La hauteur angulaire du soleil varie également en fonction de la latitude de l'observateur sur Terre. À l'équateur, la hauteur angulaire du soleil varie entre 0 degré au lever du soleil et 90 degrés à midi solaire. Aux pôles, le soleil ne se lève pas pendant une partie de l'année, et sa hauteur angulaire est toujours inférieure à 45 degrés pendant le reste de l'année. [50]

$$AL = \text{asin} \left(\sin(\text{lat}) \times \sin(\text{delta}) + \cos(\text{lat}) \times \cos(\text{delta}) \times \cos(15 \times (\text{h} - 13)) \right) \times (180/\pi) \dots \text{eqt (1)}$$

Où :

AL : est l'élévation (en radians)

Delta : est la déclinaison du soleil (en radians)

lat : est la latitude de l'observateur (en radians)

15*(h-13) : est l'angle horaire local du soleil (en radians) ((h-12) pour UTC (h-13) pour Algérie Blida temps (temps offset)

b) **Azimut** : En astronomie, l'azimut est une mesure angulaire utilisée pour décrire la direction horizontale d'un objet céleste par rapport à un observateur. Il est souvent utilisé en conjonction avec l'élévation pour spécifier la position d'un objet dans le ciel. L'azimut est mesuré à partir du nord vrai dans le sens des aiguilles d'une montre, en utilisant une échelle allant de 0 à 360 degrés. Lorsque l'azimut est de 0 degré, cela signifie que l'objet se trouve exactement au nord du point d'observation, tandis qu'un azimut de 90 degrés indique que l'objet est à l'est, 180 degrés signifie qu'il est au sud, et ainsi de suite. L'azimut peut être utilisé pour localiser des objets célestes tels que le Soleil, la Lune, les planètes, les étoiles et les constellations. Il est particulièrement utile pour les astronomes amateurs et les navigateurs qui veulent repérer des objets spécifiques dans le ciel ou se repérer en fonction de la position des étoiles. Il convient de noter que l'azimut peut varier en fonction de la latitude et de l'heure de la journée, car il est influencé par la rotation de la Terre sur son axe [51]. Ce diagramme ce dessus représente l'état d'azimut pendant une année en fonction du temps universelle.

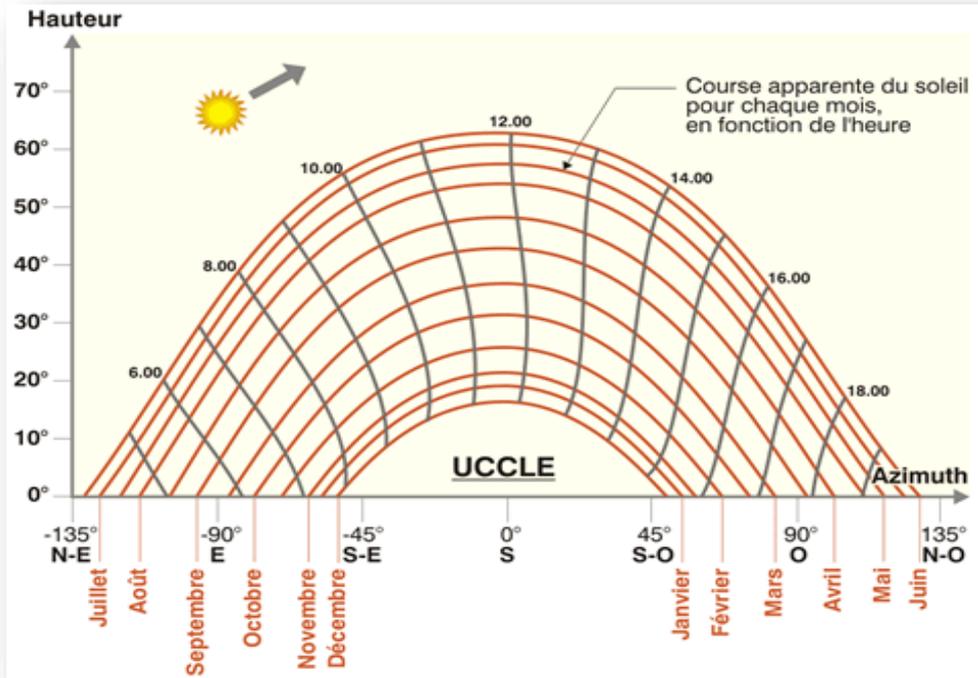


Figure 3.4 : Diagramme solaire cylindrique pour Uccle en temps universel. Par conséquent, la mesure de l'azimut doit être ajustée en fonction de ces facteurs pour obtenir une localisation précise des objets célestes. On peut le calculer l'azimut avec cette équation

$$AZ = \text{atan}(\sin(15 \times (h - 13)) / (\cos(15 \times (h - 13)) \times \sin(\text{lat}) - \tan(\text{delta}) \times \cos(\text{lat}))) \times (180/\pi) \dots \text{eqt}(2)$$

3.2.6 Cordonnés célestes horaires

Les coordonnées célestes horaires sont une manière de localiser un objet dans le ciel en utilisant la rotation de la Terre. Les coordonnées horaires sont souvent utilisées en astronomie pour décrire la position des étoiles, des planètes et d'autres objets célestes.

Les coordonnées célestes horaires sont définies en termes de longitude horaire et de déclinaison. La longitude horaire mesure l'angle entre le méridien du lieu d'observation et le méridien céleste passant par l'objet. La déclinaison mesure l'angle entre l'équateur céleste et la position de l'objet le long du cercle horaire.

La longitude horaire est généralement mesurée en heures, minutes et secondes, avec 24 heures correspondant à un tour complet de la Terre. Les heures sont divisées en 60 minutes et les minutes en 60 secondes. La déclinaison est mesurée en degrés, minutes et secondes, avec 360 degrés correspondant à un tour complet du ciel.

Pour localiser un objet dans le ciel en utilisant les coordonnées célestes horaires, il faut connaître la longitude horaire et la déclinaison de l'objet à un moment donné. Ces coordonnées

peuvent être obtenues à partir de cartes du ciel, de logiciels d'astronomie ou de télescopes équipés de systèmes de suivi informatisés. [52]

a) **Déclinaison solaire (Delta) :** La déclinaison solaire peut être définie comme l'angle entre le plan de l'équateur céleste et le plan de l'écliptique, qui est l'orbite apparente du Soleil autour de la Terre. Le plan de l'écliptique est incliné de 23,5 degrés par rapport au plan de l'équateur céleste, en raison de l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre. La déclinaison solaire varie au cours de l'année en raison de la position de la Terre dans son orbite autour du Soleil. Au moment des équinoxes, la déclinaison solaire est de zéro degré, car le Soleil est situé sur l'équateur céleste. Au solstice d'été dans l'hémisphère nord, qui se produit vers le 21 juin, la déclinaison solaire est d'environ +23,5 degrés, car le Soleil est situé au point le plus élevé de l'écliptique au-dessus de l'équateur céleste. Au solstice d'hiver dans l'hémisphère nord, qui se produit vers le 21 décembre, la déclinaison solaire est d'environ -23,5 degrés, car le Soleil est situé au point le plus bas de l'écliptique sous l'équateur céleste. La déclinaison solaire a des applications pratiques dans de nombreux domaines, notamment en astronomie, en navigation, en agriculture et en énergie solaire. En astronomie, la déclinaison solaire est utilisée pour déterminer la position du Soleil dans le ciel à un moment donné, ce qui est important pour la localisation des étoiles et des planètes [53]. Dans le graphe situé dessous on trouve la variation de déclinaison pendant 365 jours :

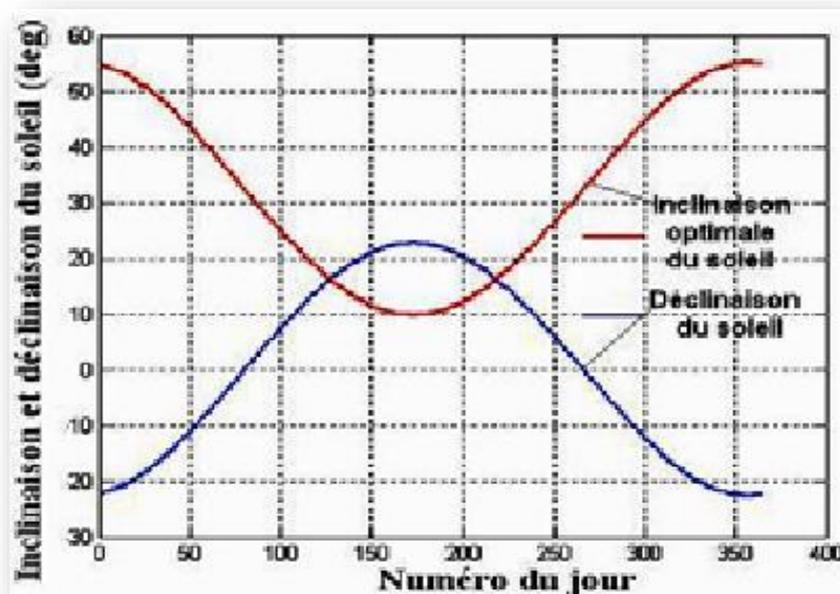


Figure 3.5 : Variation de la déclinaison du soleil et de l'inclinaison optimale en fonction du numéro de jour de l'année

En énergie solaire, la déclinaison solaire est utilisée pour calculer l'angle d'incidence des rayons solaires sur les panneaux solaires, ce qui peut affecter leur efficacité. On donne l'équation mathématique de déclinaison solaire par :

$$\Delta = \sin(\sin(23.439) \times \sin(\lambda)) \times (180/\pi) \dots \text{eqt (3)}$$

(23.439) représente : obliquité de l'écliptique

Lambda représente : la longitude écliptique

b) **La longitude écliptique (Lambda) :** La longitude écliptique est la mesure de la position d'un objet céleste (comme une planète) sur la "ligne de l'écliptique". L'écliptique est le plan imaginé dans le ciel qui représente le parcours apparent du Soleil autour de la Terre. La figure ci-dessus représente les coordonnées écliptiques d'un astre

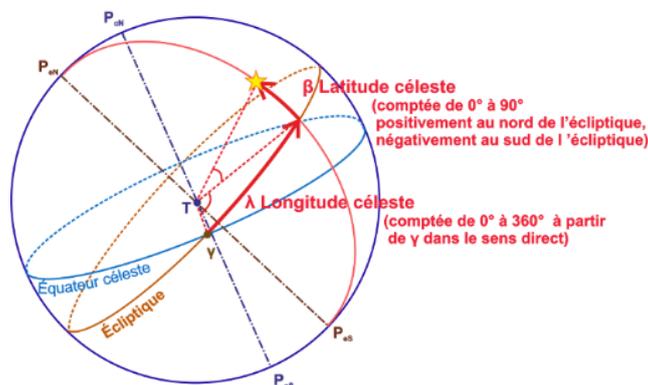


Figure 3.6 : la longitude céleste (écliptique) et latitude céleste

La longitude écliptique est mesurée en degrés, de 0 à 360 degrés, le long de l'écliptique, à partir d'un point de référence appelé "point vernal" (également appelé "point gamma"). Le point vernal est l'endroit où l'équateur céleste et l'écliptique se croisent, et il marque la position du Soleil au moment de l'équinoxe de printemps (autour du 20-21 mars).

Ainsi, la longitude écliptique est un moyen de localiser un objet céleste dans le ciel en utilisant la position du Soleil comme référence [54]. Les astronomes utilisent souvent la longitude écliptique pour suivre la position des planètes et d'autres objets du système solaire par rapport à la Terre. On donne ça formula :

$$\lambda = \text{mod} (L + lon + C, 360) \dots \text{eqt (4)}$$

Où :

C est l'équation du centre du soleil, une correction à la longitude moyenne du soleil due à l'excentricité de l'orbite terrestre.

L représente : longitude moyenne du soleil

G représente : l'anomalie moyenne du soleil

c) **Longitude moyenne du soleil (L)** : La longitude moyenne du soleil est une mesure de la position apparente moyenne du soleil par rapport à la Terre, qui est utilisée pour calculer le temps solaire moyen. Cette mesure est obtenue en considérant la position moyenne du soleil par rapport à un plan de référence appelé l'écliptique, qui est le plan de l'orbite de la Terre autour du soleil.

La longitude moyenne du soleil varie au cours de l'année en raison de l'orbite elliptique de la Terre autour du soleil. C'est-à-dire que la distance Terre-Soleil varie au cours de l'année, ce qui affecte la vitesse apparente du soleil dans le ciel. La longitude moyenne du soleil augmente généralement d'environ un degré par jour et revient à sa position initiale après une année complète.

Il est important de noter que la longitude moyenne du soleil n'est pas la même chose que la longitude vraie du soleil, qui est la position réelle du soleil dans le ciel à un moment donné. La différence entre la longitude moyenne et la longitude vraie du soleil est appelée l'équation du temps, qui varie également au cours de l'année en raison de l'orbite elliptique de la Terre et de l'inclinaison de son axe [55]. On peut le calculer par :

$$L = \text{mod} (280.460 + 0.9856474 * d , 360) \dots \text{eqt} (5)$$

Ou **280, 460** est la longitude du soleil le 01 JAN 2000 à 12h00 en degrés.

Et le terme (0.9856474) représente le taux de variation moyenne de la longitude écliptique du soleil par jour.

d représente combien de jour écoulés depuis l'époque.

$$d = J - 2451545.$$

d) **L'équation du centre (C)** : L'équation du centre en astronomie est une formule mathématique utilisée pour décrire la variation de la position apparente d'un objet céleste, comme une planète, par rapport à sa position moyenne. Cette équation est principalement utilisée dans le cadre de l'orbite elliptique d'une planète autour du Soleil. Lorsqu'une planète se déplace le long de son orbite, sa vitesse orbitale n'est pas constante en raison de l'interaction gravitationnelle avec les autres corps célestes du système solaire. Cela entraîne des variations dans la vitesse de déplacement apparente de la planète par rapport aux étoiles fixes en arrière-plan. L'équation du centre prend en compte ces variations et permet de corriger la position apparente de la planète pour obtenir sa position réelle. Elle est généralement exprimée sous la forme d'un angle, mesuré en degrés, minutes et secondes d'arc. L'équation du centre peut être calculée à partir des éléments orbitaux de la planète, tels que l'excentricité de l'orbite et l'anomalie moyenne. Elle peut être déduite à partir des lois du mouvement planétaire formulées par Johannes Kepler et Isaac Newton. Il convient de noter que l'équation du centre n'est pas

spécifique à une planète en particulier et peut également être appliquée à d'autres objets célestes en mouvement le long d'orbites elliptiques, tels que les comètes ou les astéroïdes. Il est important de souligner que les calculs astronomiques complexes utilisant l'équation du centre sont souvent effectués avec des logiciels spécialisés et des algorithmes sophistiqués, plutôt que manuellement. Ces outils tiennent compte de divers facteurs et perturbations gravitationnelles pour obtenir des prévisions précises de la position des objets célestes [56]. On donne l'équation du centre :

$$C = 1.9148 \times \sin(G) + 0.02 \times \sin(2 \times G) + \sin(3 \times G) \quad \dots \text{eqt(6)}$$

Où les coefficients numériques (1.9148, 0.020 et 0.0003) dans l'équation du centre sont déterminés à partir des calculs basés sur les lois de la gravitation et des observations astronomiques précises. Ces coefficients sont spécifiques à chaque planète et sont déterminés en fonction des caractéristiques de son orbite et de son interaction avec les autres objets célestes. Et G représente l'anomalie moyenne du soleil.

e) **L'anomalie moyenne du soleil (G) :** L'anomalie moyenne du Soleil est une mesure de la position moyenne du Soleil dans son orbite, par rapport à sa position théorique si son orbite était parfaitement circulaire. Elle est calculée en multipliant la période orbitale du Soleil par sa vitesse angulaire moyenne.

L'anomalie moyenne du Soleil change de manière prévisible au fil du temps, car l'orbite du Soleil autour du centre de la galaxie n'est pas parfaitement circulaire, mais légèrement elliptique. Cette variation est connue sous le nom d'"anomalie" en astronomie.

L'anomalie moyenne du Soleil peut être utilisée pour calculer la position actuelle du Soleil dans le ciel à un moment donné. C'est un paramètre important pour les observations astronomiques, les éphémérides solaires et la navigation spatiale. Les éphémérides solaires sont des tables de données qui fournissent la position du Soleil dans le ciel pour chaque jour de l'année, et elles sont utilisées pour la navigation spatiale, le positionnement des satellites et d'autres applications [57]. Voici une figure qui décrit l'anomalie moyenne :

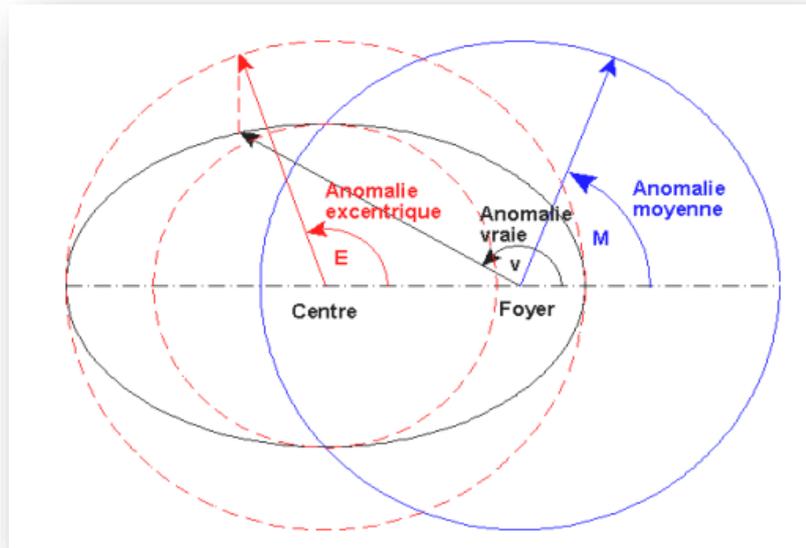


Figure 3.7 : les anomalies d'une planète

Il est important de noter que l'anomalie moyenne du Soleil n'est pas la même chose que l'anomalie vraie ou l'anomalie excentrique, qui sont des mesures de la position réelle du Soleil dans son orbite à un moment donné. L'anomalie moyenne est une mesure de la position moyenne du Soleil dans son orbite sur une période de temps plus longue. On peut le calculer par :

$$G = \text{mod} (357.528 + 0.98560028 * d , 360) \quad \dots \text{eqt}(7)$$

Ou

357,528 : est l'anomalie moyenne du soleil depuis l'époque en degrés.

le terme (0.98560028) : représente le taux de variation de l'anomalie moyenne du soleil par jour.

d : représente combien de jour écoulés depuis l'époque.

$$d = J - 2451545 - - - \text{eqt}(8)$$

f) **Le jour julien (J)** : Le jour julien est une mesure de temps qui est utilisée en astronomie pour suivre les positions des corps célestes. Il s'agit d'un comptage continu des jours depuis le midi du 1er janvier de l'année -4712, à l'époque julienne, c'est-à-dire avant la réforme grégorienne du calendrier.

Le jour julien est important en astronomie car il fournit un moyen standardisé de mesurer les intervalles de temps, ce qui permet de comparer facilement les observations faites à différentes époques. Les astronomes utilisent le jour julien pour enregistrer les moments précis

de leurs observations, pour calculer les orbites des planètes et des comètes, pour prédire les éclipses et pour suivre le mouvement des étoiles et des galaxies.

g) **Temps universel (UT) :** Le temps universel coordonné (UTC) est le temps standard international de référence pour la mesure du temps à l'échelle mondiale. Il est défini comme étant la moyenne du temps atomique international (TAI), qui est basé sur la fréquence de l'horloge atomique, et du temps universel (TU1), qui est basé sur la rotation de la Terre.

Le temps atomique international est mesuré en utilisant des horloges atomiques précises qui fonctionnent en comptant les vibrations des atomes. La durée de la seconde est définie comme étant égale à la durée de 9 192 631 770 périodes de radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'atome de césium 133. Cela permet d'avoir une mesure très précise et constante du temps, indépendamment de la rotation de la Terre.

Le temps universel est basé sur la rotation de la Terre, qui ralentit légèrement au fil du temps en raison de l'interaction gravitationnelle avec la Lune et le Soleil. La durée d'une journée solaire varie donc légèrement d'un jour à l'autre. Pour maintenir une cohérence avec le temps atomique international, des ajustements sont régulièrement effectués sur le temps universel afin de maintenir la même différence de temps entre les deux échelles.

Le temps universel coordonné est donc une combinaison des deux échelles de temps, utilisant des ajustements réguliers pour maintenir une différence constante de temps avec le temps atomique international. Cela permet de maintenir une référence de temps universelle cohérente et précise pour les communications, la navigation et les applications scientifiques. [58]

$UT = \text{datetime}(\text{time}(i), 'TimeZone', 'UTC') \dots \text{eqt} (14)$

h) **L'angle horaire :** L'angle horaire est un concept essentiel en astronomie et en navigation. Il représente la position angulaire du Soleil par rapport à un observateur à un moment donné de la journée. L'angle horaire est utilisé pour déterminer la hauteur du Soleil dans le ciel et son azimut, ce qui peut être crucial pour diverses applications telles que la planification des activités extérieures, la navigation maritime et la conception de systèmes de suivi solaire.

L'angle horaire est mesuré en degrés et est généralement exprimé par rapport au méridien local. Il indique la distance angulaire parcourue par le Soleil depuis son passage au méridien local, qui correspond au midi solaire, lorsque le Soleil atteint son point le plus élevé dans le ciel. L'angle horaire est positif avant le midi solaire (le matin) et négatif après le midi solaire (l'après-midi).

La valeur de l'angle horaire dépend de plusieurs facteurs, notamment l'heure locale, le décalage horaire par rapport à l'heure UTC (temps universel coordonné), et la longitude de

l'observateur. La longitude détermine la référence du méridien local par rapport au méridien de Greenwich, qui est le méridien de référence pour l'heure UTC.

L'angle horaire est souvent utilisé conjointement avec l'azimut pour déterminer la position du Soleil dans le ciel à un moment donné. L'azimut représente l'angle horizontal entre le nord vrai et la direction du Soleil, mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre. En combinant l'angle horaire et l'azimut, il est possible de déterminer avec précision la position du Soleil dans le ciel à tout moment, ce qui peut être utile pour l'orientation des panneaux solaires, le calcul des heures de lever et de coucher du Soleil, et la navigation terrestre et maritime.

L'angle horaire est également utilisé pour calculer la durée du jour et de la nuit à une latitude donnée. La durée du jour est maximale lorsque l'angle horaire est nul (midi solaire), et diminue à mesure que l'angle horaire devient plus grand ou plus petit. La différence entre les angles horaires du lever et du coucher du Soleil donne la durée du jour. [59]

$$H = 15 * (h - 12 - TZ) \dots \text{eqt}(13)$$

Où :

h est l'heure décimale et TZ c'est le fuseau horaire.

Le terme (h - 12) c'est pour center le calcul au midi qui est le moment où le soleil atteint son point le plus élevé.

Le 15 c'est pour convertir l'heure de base 60 en degrés (le mouvement apparent du soleil est d'environ 15 degrés par heure).

3.3 La longueur d'ombre

Après tous les calculs précédents on peut finalement calculer la longueur d'ombre :

3.3.1 Dans le cas d'une dimension

Si l'ombre est présent dans une seule dimension (comme un mur) on peut le calculer avec cette équation :

$$Shadow = \frac{OB}{\tan(AL)} \dots \text{eqt}(9)$$

Où OB représente la longueur d'objet dans notre cas un mur de 0.6 mètre dans une terrasse d'un bâtiment.

Et AL représente l'altitude solaire qui on a calculer dans l'équation (1)

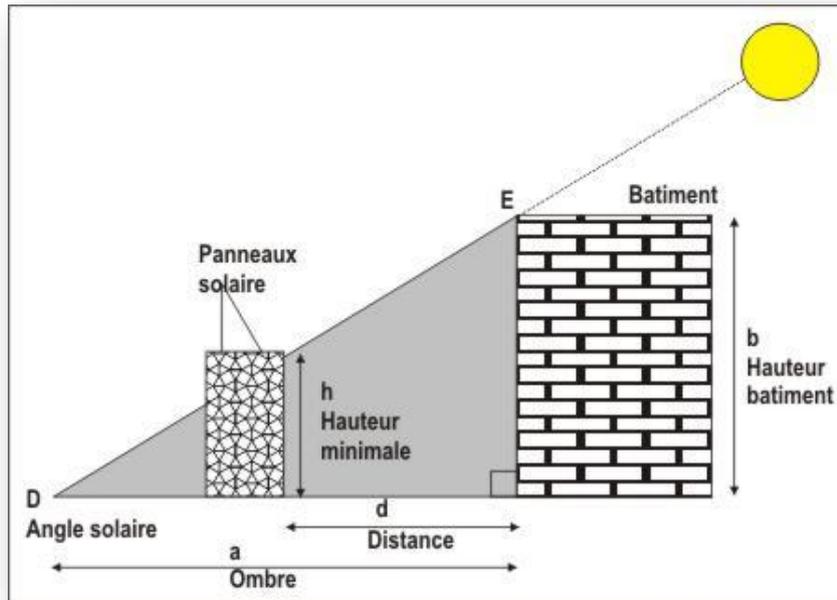


Figure 3.8 : longueur d'ombre d'un bâtiment sur une dimension

3.3.2 Dans le cas de deux dimensions

Si l'ombre est présent sur deux dimensions x et y (comme un cheminé) on peut calculer la longueur d'ombre par ces équations :

$$X = OB * \left(\frac{\text{sind} (AZ - 180)}{\text{tand} (AL)} \right) \dots \text{eqt}(10)$$

$$Y = OB * \left(\frac{\text{cosd} (AZ - 180)}{\text{tand} (AL)} \right) \dots \text{eqt}(11)$$

$$\text{shadow} = \sqrt{x^2 + y^2} \dots \text{eqt}(12)$$

Ou OB ici représente la longueur de cheminé dans une maison de 0.4 m

Et AL représente l'altitude solaire qui on a calculer dans l'équation (1)

Et AZ représente l'azimut qui est calculer dans l'équation (2)

Ici dans cette figure on a 2 photo d'un ombrage de cheminé dans 2 heures différents pendant la journée ,cette figure illustre la variation de la longueur d'ombre en fonction du temps.



Figure 3.9 : l'ombre de cheminée

3.4 Divers paramètres

Le code MATLAB qui on a développé calculer d'autre paramètres et utilise autres on va les présenter par ordre :

3.4.1 Variabl OFS

Un vecteur qui représente l'offset d'altitude solaire chaque une semaine causée par l'incertitude de calcul et le paramètre d'altitude de l'endroit, ce vecteur est une correction d'altitude solaire (élévation) pour obtenir des calculs de longueur d'ombre plus précis.

3.4.2 Variabl D

Ce paramètre représente la différence entre chaque longueur d'ombre et la longueur précédente, D nous permet de commander le moteur avec cette différence.

3.4.3 Variabl T

Ce paramètre nous permet de connaitre combien de tour notre moteur a de tourner pour atteint la valeur de différence, cette paramètre va transmettre pour le code Arduino qui contrôle notre moteur.

$$T = D / M_pas$$

Ou D c'est la différence Et M_pas c'est la distance le moteur atteint dans une tour.

3.4.4 Variabl J

C'est une fonction dans Matlab qui converti le jour à un jour de type julien

$$J = \text{juliendate} (UT) \quad \dots \text{eqt}(15)$$

3.4.5 L'heure décimale

C'est la conversion de l'heure de format heure minute seconde en format décimale par exemple 06:30:00 devient 6.5, pour permettre Matlab de faire des opérations sur l'heure correspondante.

$$h = \left(\text{hour}(UT) + \text{minute} \frac{UT}{60} + \text{second} \frac{UT}{3600} \right) \dots \text{eqt}(16)$$

3.4.6 L'angle limite d'altitude solaire

Le rayonnement du lever et de coucher de soleil n'a pas une efficacité énergétique, alors un certain angle on doit le considérer pour limiter les calculs ou l'efficacité énergétique est élevée. Cet angle est de 14° qui donne $4 \cdot OB$ (la longueur d'objet).

3.5 Le simulateur 1D

C'est l'algorithme du simulateur 1D qui calcule la longueur d'ombre dans une localisation définie par sa latitude et longitude. Avec une longueur d'objet large comme un mur pendant une plage horaire prédéfinie et afficher les résultats :

Initialisations (p_shadow, AZ, AL, AD...)

Introduire les coordonnées géographiques (latitude et longitude) du lieu d'observation.

Introduire la longueur de l'objet qui produit l'ombrage.

Introduire le fuseau horaire.

Définir l'intervalle de temps de 30 minutes.

Définir le vecteur OFS.

Créer le vecteur d'affichage pour les variables de sorties (Altitude, Azimut, Déflexion, Tour)

Boucler pendant les temps d'observation pour calculer la hauteur solaire et l'azimut correspondants.

| Convertir le temps en temps universel coordonné UTC. Par Eq (14)

| Calculer le jour julien correspondant au temps UTC. Suivant Eq (16)

| Calculer l'heure décimale correspondant au temps UTC. D'après Eq (15)

| Calculer la différence entre le jour julien correspondant au temps UTC et le jour julien de référence (1er janvier 2000 à midi UTC). Avec Eq (8)

| Calculer la longitude solaire. Selon Eq (5)

| Calculer l'anomalie moyenne du Soleil. A partir de Eq (7)

| Calculer l'équation du centre. Suite à Eq (6)

| Calculer l'écliptique longitudinale du Soleil. En vu de Eq (4)

| Calculer la déclinaison du Soleil. En concordance avec Eq (3)

- | Calculer l'angle horaire. Eqt (13)
- | Calculer l'azimut. Eqt (2)
- | Calculer la hauteur solaire. Eqt (1)
- | Calculer la longueur d'ombre. Eqt (9)
- | Calculer la différence.
- | Calculer nombre de tour de moteur.
- | Afficher les résultats du calcul.

End

Désigner la longueur d'ombre en fonction du temps.

On a essayé ce simulateur 1D avec les coordonnées de Blida Oulad Yaich et il donne des résultats très fiables on a pu les valider avec planetcalc et en temps réels avec des incertitudes de 10 cm dans la longueur d'ombre dans le coucher et lever du soleil et moins de 10 cm dans la journée. La difficulté que l'on a trouvée dans ce simulateur est de bien calculer l'altitude selon les coordonnées géographiques et aussi comment on entre le fuseau horaire et garder les calculs de la longueur d'ombre juste. Une autre difficulté que l'on a trouvée est de comment faire les calculs de tracking et le backtracking pour suivre la trajectoire du soleil.

3.6 Le simulateur 2D

C'est l'algorithme du simulateur 2D qui calcule la longueur d'ombre dans une localisation définie par sa latitude et longitude. Avec une longueur d'objet long et mince (comme un cheminé) pendant une plage horaire prédéfinie et afficher les résultats :

Introduire les coordonnées géographiques (latitude et longitude) du lieu d'observation.

Introduire la longueur de l'objet qui produit l'ombrage.

Introduire le fuseau horaire.

Définir l'intervalle de temps de 30 minutes.

Définir le vecteur OFS.

Initialiser les variables de sortie (Altitude, Azimut, Déflexion, Tour)

Boucler sur les temps d'observation et calculer la hauteur solaire et l'azimut correspondants.

- | Convertir le temps en temps universel coordonné UTC. Eqt (14)
- | Calculer le jour julien correspondant au temps UTC. Eqt (16)
- | Calculer l'heure décimale correspondant au temps UTC. Eqt (15)
- | Calculer la différence entre le jour julien correspondant au temps UTC et le jour julien de référence (1er janvier 2000 à midi UTC). Eqt (8)
- | Calculer la longitude solaire. Eqt (5)
- | Calculer l'anomalie moyenne du Soleil. Eqt (7)

- | Calculer l'équation du centre. Eqt (6)
- | Calculer l'écliptique longitudinale du Soleil. Eqt (4)
- | Calculer la déclinaison du Soleil. Eqt (3)
- | Calculer l'angle horaire. Eqt (13)
- | Calculer l'azimut. Eqt (2)
- | Calculer la hauteur solaire. Eqt (1)
- | Calculer X et Y. Eqt (10) Eqt (11)
- | Calculer la résultante (la longueur d'ombre). Eqt (12)
- | Calculer la différence.
- | Calculer nombre de tour de moteur.
- | Afficher les résultats du calcul.

End

Désigner la longueur d'ombre en fonction du temps.

On a essayé ce simulateur 2D avec les mêmes coordonnées et il donne des résultats très fiable aussi on a les valider avec planetcalc et en temps réels avec des incertitudes de 8 cm dans la longueur d'ombre dans le lever et le coucher du soleil et mois de 8 dans le reste dans la plage de la journée. La difficulté qui on a trouvé dans ce simulateur c'est les mêmes avec le simulateur 1D car il dépend du même paramètre globalement mais l'idée pour le construire prend le temps.

3.7 L'interface

On a construit une interface sous MATLAB 2015b, qui permet à l'utilisateur d'introduire les coordonnées géographiques et la longueur d'objet et le fuseau horaire pour calculer la longueur d'ombre dans n'importe quel emplacement géographique. Voici la figure de l'interface dans Matlab :

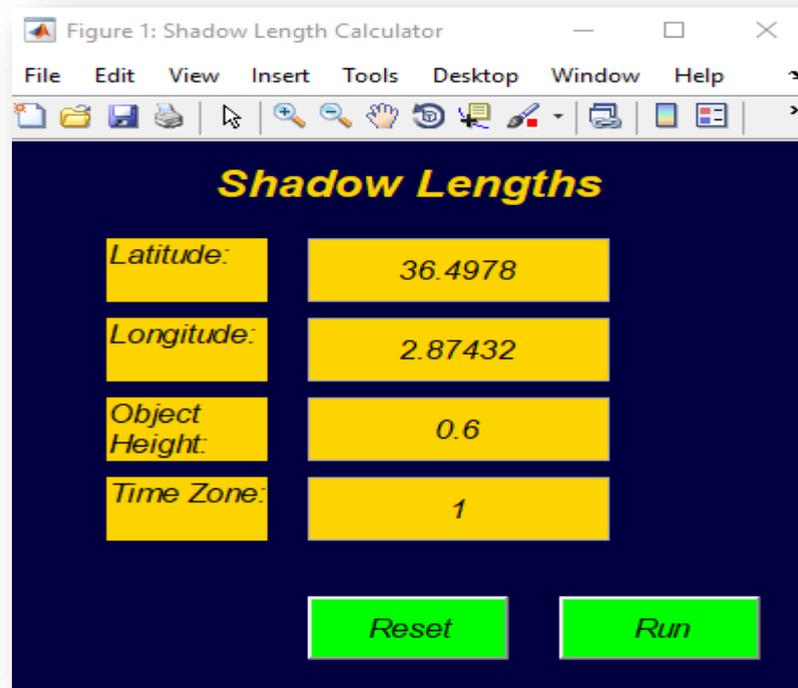


Figure 3.10 : interface du calculateur de longueur d'ombre

3.8 Conclusion

En conclusion on est arrivé finalement à développer un programme sous MATLAB qui calcule la longueur d'ombre en fonction du temps et l'emplacement géographique en utilisant des calculs astronomiques, le prochain chapitre on va présenter la partie mécanique et les composants utilisés ainsi la carte ARDUINO qui contrôle le fonctionnement général.

Chapitre 4
Eléments de la conception

4.1 Introduction

Dans ce qui a précédé nous avons démontré comment nous sommes arrivés à calculer la longueur d'ombre dans n'importe quel emplacement géographique pendant une année avec des calculs basés sur des équations astronomiques. Finalement dans ce chapitre on va valider les calculs et présenter la conception électrique et mécanique et ces composants ainsi qu'une description du fonctionnement du produit semi fini. Le principe de fonctionnement du suiveur astronomique de dé-ombrage consiste à commander deux moteurs par une carte à microcontrôleur afin de dégager le panneau solaire de l'ombrage pendant toute la journée. La carte d'acquisition procure les valeurs de l'ombre calculée suivant le chapitre 03.

4.2 La validation des calculs

Pour la validation de nos calculs on a utilisé un site très commun Planetcalc, qui offre un calculateur en ligne de la longueur d'ombre.

4.2.1 Présentation du logiciel Planetcalc

Planetcalc est un site web qui propose une large gamme de calculateurs et d'outils en ligne pour différentes utilisations. Il offre aux utilisateurs des moyens pratiques pour effectuer des calculs complexes et résoudre différents problèmes sans avoir besoin d'un logiciel spécialisé ou de connaissances approfondies en programmation.

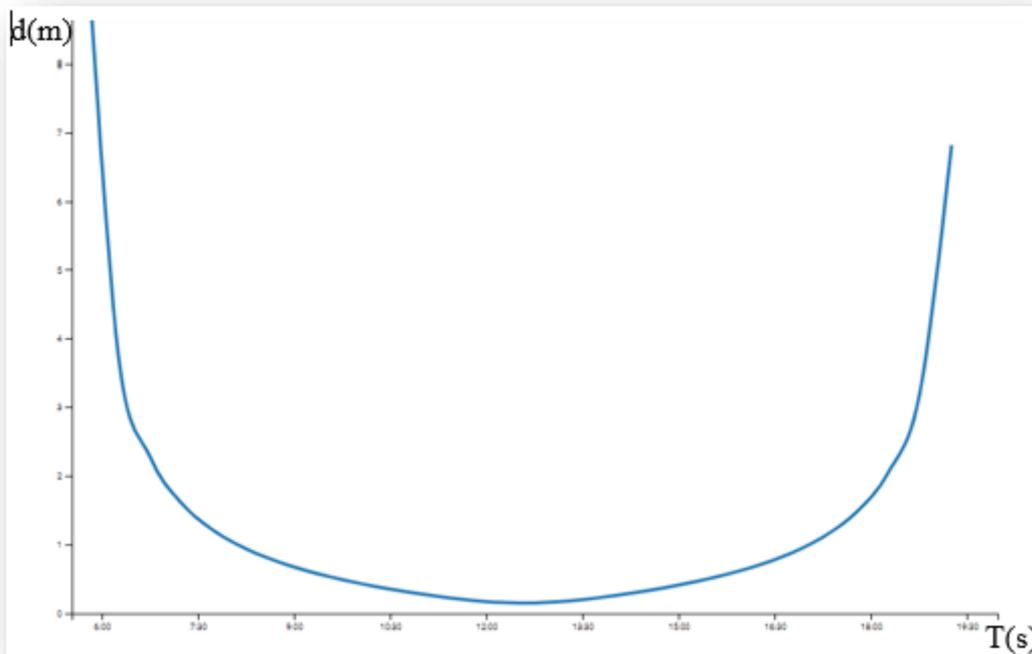
Planetcalc propose une collection diversifiée de calculateurs couvrant divers domaines tels que les mathématiques, la physique, la finance, l'ingénierie, les statistiques et bien d'autres encore. Ces calculateurs peuvent être consultés directement depuis leur site web et sont disponibles gratuitement pour toute personne disposant d'une connexion Internet.

La figure ci-dessus, montre deux fenêtres de la plateforme de ce site et un exemple sur le résultat quand on a obtenu pour les paramètres entrés.

The image shows a screenshot of the Planetcalc website's input form. The form is organized into several sections:

- Hauteur de l'objet:** A text input field containing the value "0.6".
- Date:** A date selector showing "sam. 1", "juin", and "2023".
- Siècle:** A dropdown menu showing "21e".
- Time Zone:** A time zone selector showing "22", "11", and "11".
- Fuseau horaire:** A text input field containing the value "1".
- Latitude:** A latitude selector showing "36°", "4'", and "9\"", with radio buttons for "N" (selected) and "S".
- Longitude:** A longitude selector showing "2°", "8'", and "7\"", with radio buttons for "E" (selected) and "O".
- Précision de calcul:** A slider control for "Chiffres après la virgule décimale : 2".
- Button:** An orange button labeled "CALCULER".

dans cette représentation graphique l'axe (y) représente la distance d(m) en mètre , l'axe (x) représente le temps T(s) en seconde



Planetcalc	
le temps T(s) en seconde	la distance d(m) en mètre
7:00	2.27
7:30	1.59
8:00	1.20
8:30	0.94
9:00	0.75
9:30	0.60
10:00	0.49
10:30	0.39

Figure 4.1 : résultats de la Plateforme du site Planetcalc

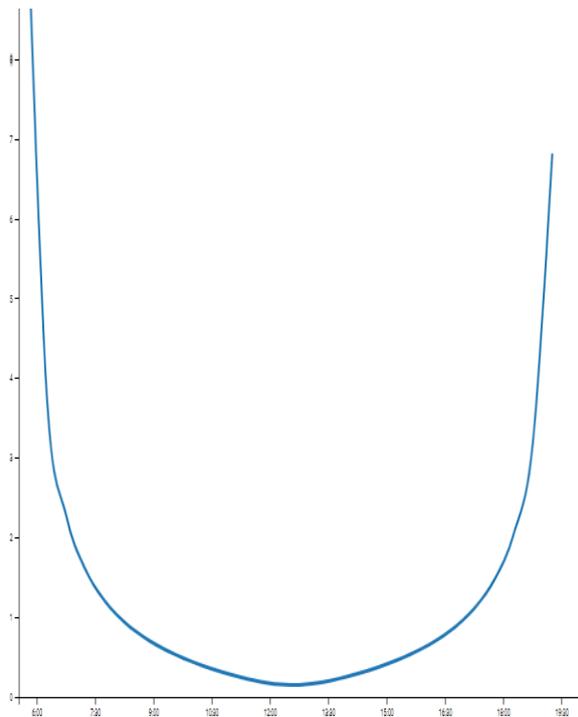
4.2.2 Comparaison entre Plantecalc et le simulateur MATLAB

Dans ce tableau on va présenter les résultats qui on a obtenue avec le code qui on a développé sur Matlab et les résultats du planetcalc avec les mêmes paramètres (01 Juin 2023) et on va faire une petite comparaison entre eux :

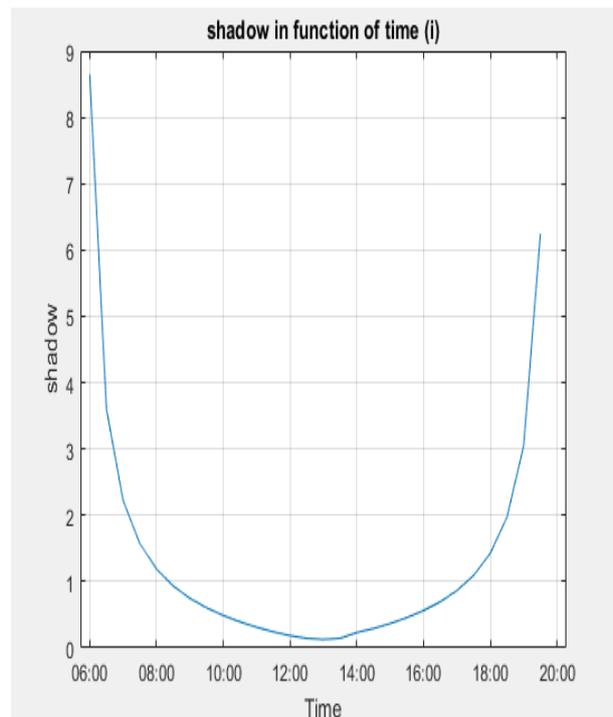
Planetcalc		MATLAB
le temps T(s) en seconde		la distance d(m) en mètre
7:00	2.27	2.22
7:30	1.59	1.56
8:00	1.20	1.19
8:30	0.94	0.93
9:00	0.75	0.75
9:30	0.60	0.60
10:00	0.49	0.49
10:30	0.39	0.39
11:00	0.31	0.31
11:30	0.25	0.24
12:00	0.19	0.19
12:30	0.16	0.14
13:00	0.15	0.13
13:30	0.18	0.14
14:00	0.23	0.23
14:30	0.29	0.29
15:00	0.37	0.37
15:30	0.46	0.46
16:00	0.57	0.56
16:30	0.70	0.70
17:00	0.88	0.86
17:30	1.11	1.09
18:00	1.46	1.43
18:30	2.03	1.97

Figure 4.2 : les résultats du calcul du Planetcalc et Matlab

Comme nous avons vu en haut les figures représentent les calculs de Planetcalc et le tableau à droite représente les résultats du Matlab, les résultats sont en mètres, on peut remarquer qu'il y a une différence de 5 cm à 07 : 00 du matin et 6 cm à 18 : 30 et ça peut revenir aux chiffres après les virgules, l'incertitude des calculs, l'altitude de la zone géographique. Dans cette plage de temps toutes les différences sont soit nulles ou moins de 3 cm. Donc on peut dire que notre programme a une grande fiabilité de calcul. Et voici le graphique de longueur d'ombre en fonction du temps :



A



B

Figure 4.3: le graphe de longueur d'ombre du Planetcalc vs du Matlab

4.3 Validation en temps réel

On va présenter quelque figure qui illustre comment notre suiveur de dé ombrage dégage de l'ombre et suivre la trajectoire du soleil :

Il est 13 : 30 le 11 Juin l'ombre est 19 cm dans la photo à gauche, la photo à droite est à 13 : 45 dans le même jour



Figure 4.4 : photo en temps réel des essais

Le panneau fait la même chose chaque itération jusqu'à il atteint à l'extrémité, maintenant on va présenter comment la rotation en temps réel :

La photo à gauche elle est à 13 :45 l'altitude solaire est 72° et la photo à droite est à 15 : 00 l'altitude solaire est 59.



Figure 4.5 : photo en temps réel de la rotation

Et voilà les calculs de Matlab correspondant à ces 2 figures :

11-Jun-2023 13:30:00	Altitude: 76.77°.	HS: 76.77°	Azimuth: 208.14°.	Shadow Length: 0.19 m.	Differences: 0.19 m.
11-Jun-2023 13:45:00	Altitude: 72.09°.	HS: 107.91°	Azimuth: 219.38°.	Shadow Length: 0.26 m.	Differences: 0.07 m.
11-Jun-2023 14:00:00	Altitude: 70.00°.	HS: 110.00°	Azimuth: 228.52°.	Shadow Length: 0.29 m.	Differences: 0.03 m.
11-Jun-2023 14:15:00	Altitude: 67.61°.	HS: 112.39°	Azimuth: 235.91°.	Shadow Length: 0.33 m.	Differences: 0.04 m.
11-Jun-2023 14:30:00	Altitude: 65.03°.	HS: 114.97°	Azimuth: 241.96°.	Shadow Length: 0.38 m.	Differences: 0.04 m.
11-Jun-2023 14:45:00	Altitude: 62.31°.	HS: 117.69°	Azimuth: 247.00°.	Shadow Length: 0.43 m.	Differences: 0.05 m.
11-Jun-2023 15:00:00	Altitude: 59.49°.	HS: 120.51°	Azimuth: 251.28°.	Shadow Length: 0.48 m.	Differences: 0.05 m.

Figure 4.6 : calculs sur Matlab

4.4 Matériels utilisés :

Pour mener à bien cette tâche , nous avons utilisé une variété de matériels essentiels :

4.4.1 La carte Arduino UNO :

Arduino est une plateforme open-source populaire utilisée pour le développement de projets électroniques. Cela comprend la conception et la création de systèmes interactifs et d'objets physiques, tels que des capteurs, des robots, des dispositifs de contrôle, des systèmes d'automatisation domestique et bien plus encore.

Arduino se compose d'une carte de circuit imprimé avec un microcontrôleur et d'un environnement de développement intégré (EDI) convivial. L'EDI Arduino permet aux utilisateurs de programmer le microcontrôleur à l'aide d'une variante simplifiée du langage de programmation C/C++. Les débutants en électronique et en programmation peuvent facilement apprendre à utiliser Arduino en raison de sa facilité d'utilisation et de la grande quantité de ressources disponibles, telles que des tutoriels, des exemples de code et une communauté active. L'une des caractéristiques clés d'Arduino est sa polyvalence. Les utilisateurs peuvent ajouter des modules et des capteurs supplémentaires à la carte Arduino pour étendre ses fonctionnalités et l'adapter à leurs besoins spécifiques. De plus, Arduino est compatible avec une large gamme de périphériques et d'interfaces, ce qui le rend adaptable à de nombreux projets.

Grâce à sa popularité et à sa communauté active, Arduino est devenu un outil largement utilisé dans le domaine de l'électronique et de l'Internet des objets (IoT). Que ce soit pour des projets scolaires, des prototypes de produits ou des installations artistiques interactives, Arduino offre une solution abordable et accessible pour créer des projets électroniques personnalisés [60]. Dans notre projet on va utiliser la carte Arduino UNO pour commander notre moteur pas à pas. Voici une image qui la décrit :

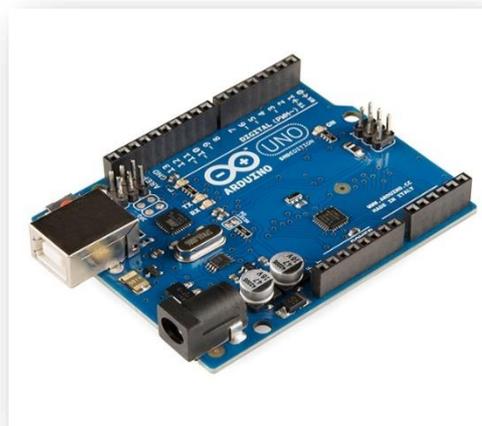


Figure 4.7 : Carte Arduino UNO

4.4.2 Deux moteurs pas à pas :

Pour réaliser cette tâche, nous avons utilisé les deux moteurs suivants :

a) **EM-154 H395005 :**

Le moteur pas à pas EM-154 H395005 est un dispositif mécanique extrêmement utile et largement utilisé dans de nombreuses applications. Il est apprécié pour sa précision, sa fiabilité et sa facilité d'utilisation.

Tout d'abord, il est important de comprendre ce qu'est un moteur pas à pas. Un moteur pas à pas est un type de moteur électrique qui convertit des impulsions électriques en mouvement mécanique discret, généralement sous forme de rotation. Contrairement aux moteurs à courant continu traditionnels, les moteurs pas à pas effectuent des mouvements angulaires précis plutôt que des mouvements continus.

Le moteur pas à pas EM-154 H395005 se distingue par ses spécifications techniques avancées. Il offre un angle de pas de 1,8 degré, ce qui signifie qu'il effectue un pas angulaire de 1,8 degré à chaque impulsion électrique reçue. Cette précision permet un positionnement précis et un contrôle fin du mouvement du moteur. De plus, il a une tension nominale de 3,6 V et un courant nominal de 0,67 A, ce qui le rend adapté à une variété d'applications.

Une des caractéristiques clés du moteur pas à pas EM-154 H395005 est son couple élevé. Le couple d'un moteur représente sa capacité à tourner une charge et est mesuré en newton-mètre (Nm). Ce moteur pas à pas offre un couple de maintien de 0,22 Nm, ce qui lui permet de faire face à des charges importantes sans perte de pas ni de précision de mouvement. Cela en fait un choix idéal pour les applications qui nécessitent un couple élevé, telles que les imprimantes 3D, les robots industriels et les systèmes de positionnement.

Un autre avantage du moteur pas à pas EM-154 H395005 est sa facilité d'utilisation. Il est conçu pour être compatible avec divers contrôleurs et microcontrôleurs, ce qui facilite son intégration dans différents systèmes. De plus, il ne nécessite pas de capteurs de position supplémentaires, car son mouvement est basé sur le nombre d'impulsions électriques reçues. Cela simplifie la conception et réduit les coûts associés à la mise en œuvre du moteur.

Les utilisations du moteur pas à pas EM-154 H395005 sont vastes et variées. Il est couramment utilisé dans les imprimantes 3D pour contrôler les mouvements précis de l'extrudeuse ou du plateau d'impression. Dans les robots industriels, il peut être utilisé pour le positionnement précis des bras robotisés ou des axes de mouvement. De plus, il est utilisé dans les systèmes de contrôle de mouvement, tels que les machines-outils à commande numérique, où il assure des mouvements précis de l'outil ou de la pièce à usiner. [61]

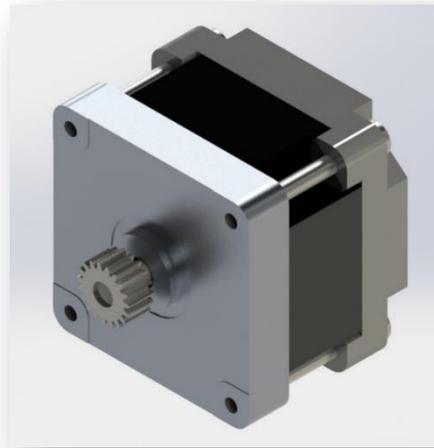


Figure 4.8 : Moteur pas à pas EM-154 H395005

b) 28BYJ-48 :

Rated voltage :	5VDC
Number of Phase :	4
Speed Variation Ratio :	1/64
Stride Angle :	5.625° /64
Frequency :	100Hz
DC resistance :	50Ω±7%(25°C)
Idle In-traction Frequency :	> 600Hz
Idle Out-traction Frequency :	> 1000Hz
In-traction Torque :	>34.3mN.m(120Hz)
Self-positioning Torque :	>34.3mN.m
Friction torque :	600-1200 gf.cm
Pull in torque :	300 gf.cm
Insulated resistance :	>10MΩ(500V)
Insulated electricity power :	600VAC/1mA/1s
Insulation grade :	A
Rise in Temperature :	<40K(120Hz)
Noise :	<35dB(120Hz,No load,10cm)
Model :	28BYJ-48 – 5V [62]

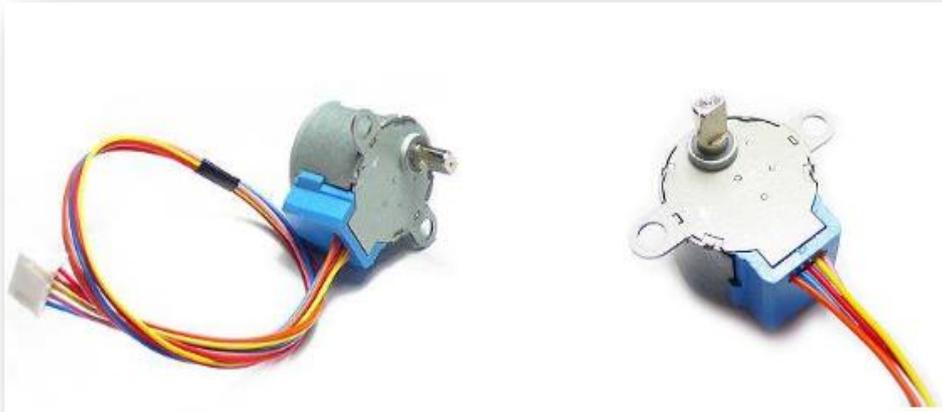


Figure 4.9 : Moteur pas à pas 28BYJ-48

4.4.3 Deux Driver :

a) L298N :

Le pilote L298N est un circuit intégré (CI) de commande de moteur à double pont en H qui offre un contrôle bidirectionnel pour les moteurs à courant continu et les moteurs pas à pas. Développé par SGS-Thomson Microélectroniques, maintenant connu sous le nom de STMicroelectronics, le L298N offre des capacités de commande de moteur robustes dans un boîtier compact. Il peut gérer une large gamme de tensions (jusqu'à 50V) et de courants (jusqu'à 2A par canal) tout en gérant efficacement le flux de puissance vers les moteurs.

Caractéristiques et fonctionnalités : Le pilote L298N intègre plusieurs fonctionnalités qui en font un choix fiable pour les applications de commande de moteur. Il se compose de deux ponts en H, permettant le contrôle indépendant de deux moteurs ou le contrôle d'un seul moteur dans une configuration de moteur pas à pas bipolaire. Chaque pont en H comprend quatre transistors de puissance (deux pour chaque direction) et des diodes associées pour la protection contre les courants.

Le pilote fonctionne avec une double tension d'alimentation, avec une tension logique (V_{ss}) généralement comprise entre 4,5V et 7V et une tension d'alimentation du moteur (V_{cc}) comprise entre 4,8V et 46V. En séparant les alimentations logiques et moteur, le L298N assure des performances optimales et protège les circuits de commande contre les bruits induits par le moteur ou les surtensions potentielles. Le L298N offre différents modes de contrôle, notamment les modes avant, arrière, frein et veille. Les entrées d'activation (EN) permettent le contrôle indépendant de chaque moteur, tandis que les entrées de direction (IN1 et IN2) déterminent la direction de rotation. Les mécanismes de protection intégrés, tels que l'arrêt

thermique, la détection de surintensité et la protection des diodes, améliorent la sécurité et la fiabilité du pilote.

Le pilote L298N s'est imposé comme une solution polyvalente et fiable pour la commande de moteurs dans divers domaines, allant de la robotique et de l'automatisation à l'automobile et à l'automatisation domestique. Sa robustesse, son efficacité et ses mécanismes de protection intégrés en font un choix privilégié pour le contrôle des moteurs à courant continu et des moteurs pas à pas bipolaires. La capacité du pilote à gérer des tensions et des courants plus élevés, associée à sa facilité d'intégration et à son rapport coût-efficacité, renforce encore son attrait. À mesure que la technologie continue de progresser, le pilote L298N continue de jouer un rôle essentiel dans l'alimentation et la commande des systèmes entraînés par des moteurs, permettant l'innovation et l'automatisation dans divers secteurs. Grâce à ses performances exceptionnelles et à son potentiel d'application étendu, le pilote L298N reste un outil indispensable pour libérer la puissance de la commande de moteur . Et voilà c'est le driver L298N : [63]

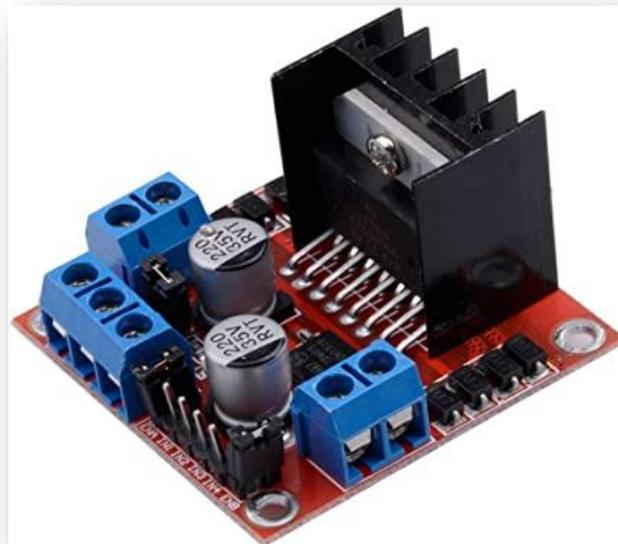


Figure 4.10 : Driver L298N

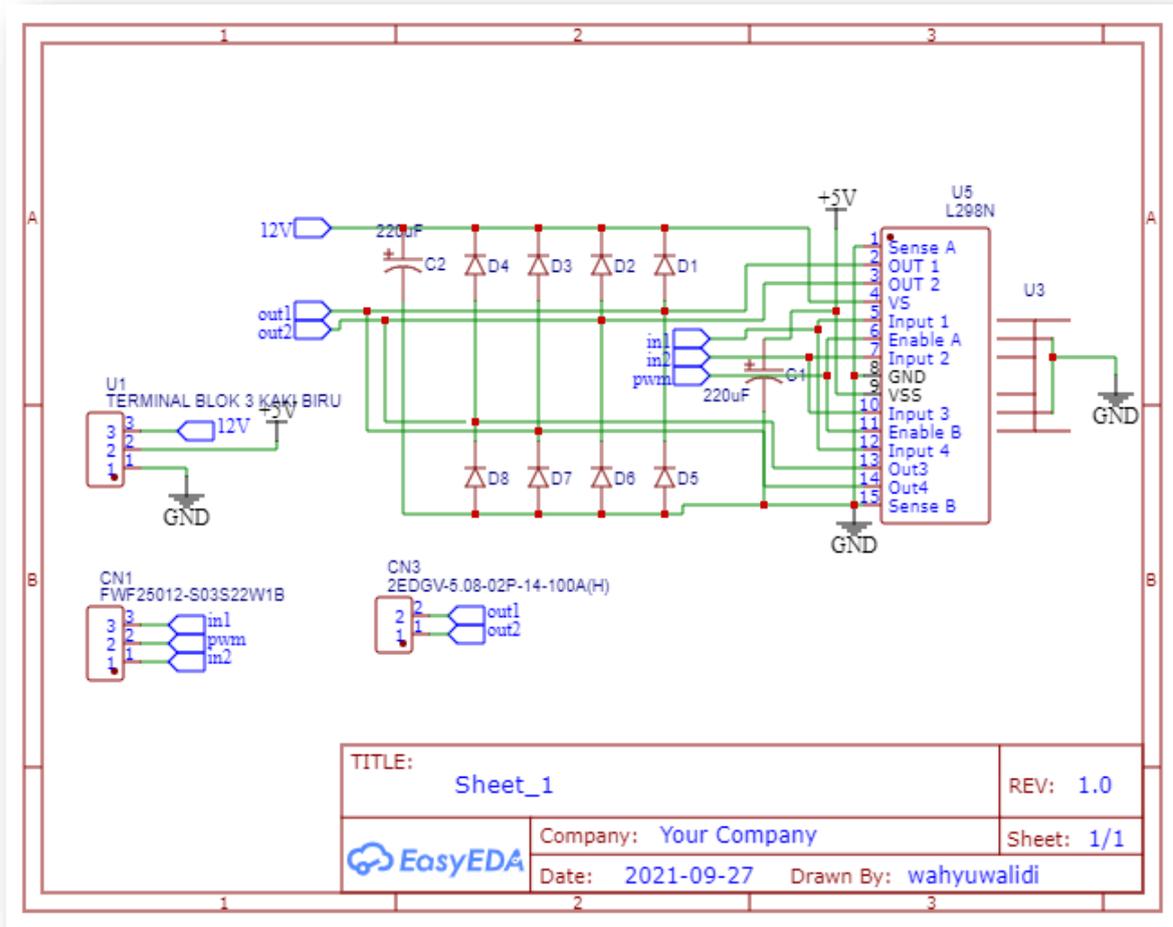


Figure 4.11 : Circuit électrique driver L298N

b) **ULN2003AN :**

L'ULN2003AN est un circuit intégré (IC) couramment utilisé qui sert de réseau de transistors Darlington haute tension et haute intensité. Il est souvent utilisé comme pilote pour les charges inductives telles que les relais, les moteurs, les solénoïdes et les moteurs pas à pas. L'ULN2003AN est conçu pour simplifier l'interface entre les signaux numériques ou de microcontrôleur de bas niveau et les dispositifs de puissance supérieure.

• **caractéristiques de l'ULN2003AN :**

Matrice de transistors Darlington : L'ULN2003AN se compose de sept paires de transistors Darlington. Une paire Darlington est une configuration de deux transistors bipolaires qui fournissent un gain de courant élevé et une amplification de tension.

Capacité haute tension et courant : l'ULN2003AN est capable de gérer des tensions élevées (jusqu'à 50 V) et des courants importants (jusqu'à 500 mA par canal). Cela le rend approprié pour piloter une large gamme de charges inductives.

Diodes de roue libre intégrées : Chaque paire Darlington de l'ULN2003AN comprend une diode de roue libre intégrée. Ces diodes aident à protéger le circuit des pointes de tension générées lorsqu'une charge inductive est désactivée, minimisant ainsi les dommages potentiels au pilote et aux autres composants.

Broches d'entrée et de sortie : L'ULN2003AN possède sept broches d'entrée (IN1 à IN7) et sept broches de sortie correspondantes (OUT1 à OUT7). Chaque broche d'entrée est utilisée pour contrôler la broche de sortie respective, vous permettant d'activer ou de désactiver la paire Darlington correspondante.

Configuration de collecteur commun : L'ULN2003AN utilise une configuration de collecteur commun (également appelée émetteur suiveur), qui fournit une faible impédance de sortie et une impédance d'entrée élevée.

Compatibilité : L'ULN2003AN peut être piloté directement par des signaux logiques TTL (Transistor-Transistor Logic) ou CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor), ce qui le rend compatible avec une large gamme de systèmes numériques et de microcontrôleurs. [64]

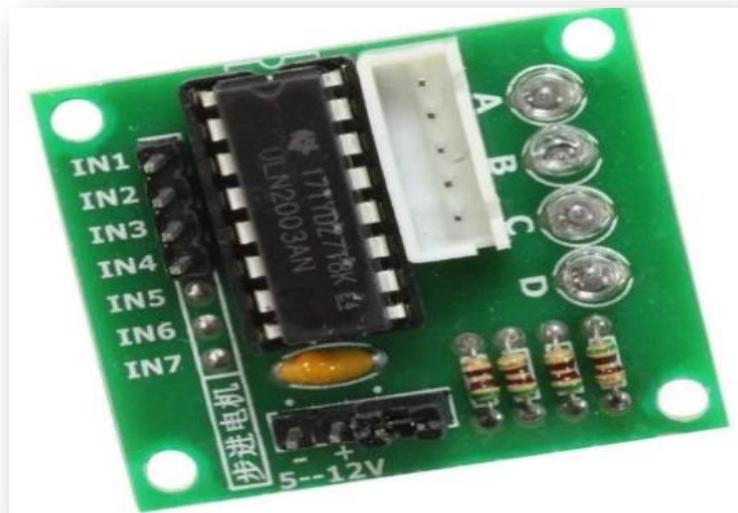


Figure 4.12 : Driver ULN2003AN

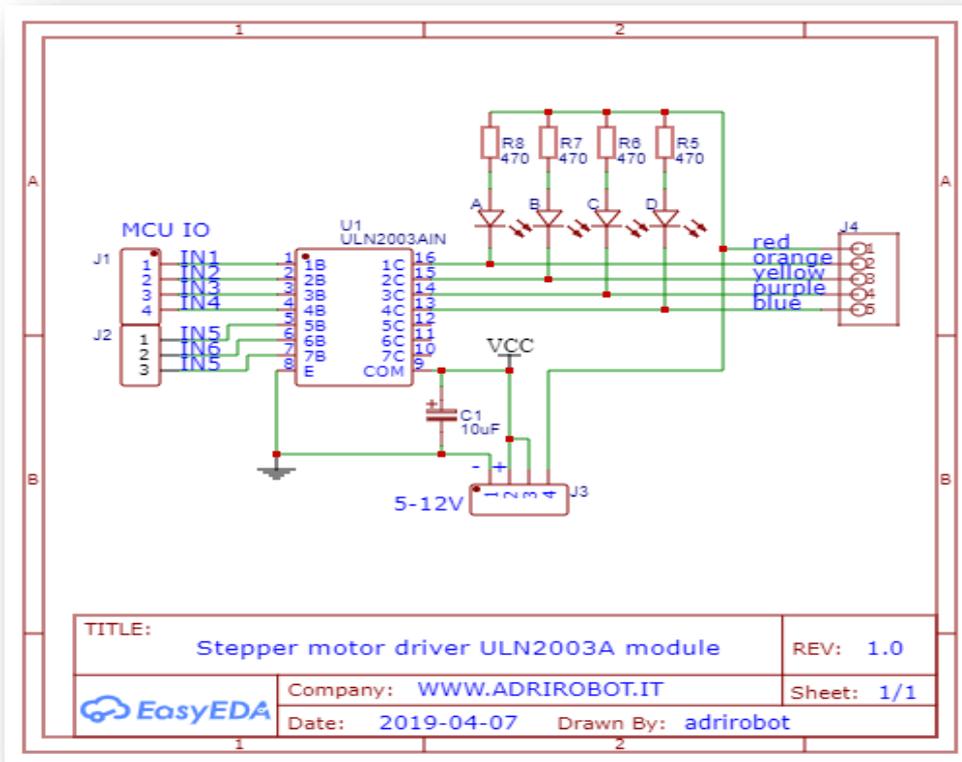


Figure 4.13 : Circuit électrique driver ULN2003AN

4.4.4 Le circuit électrique

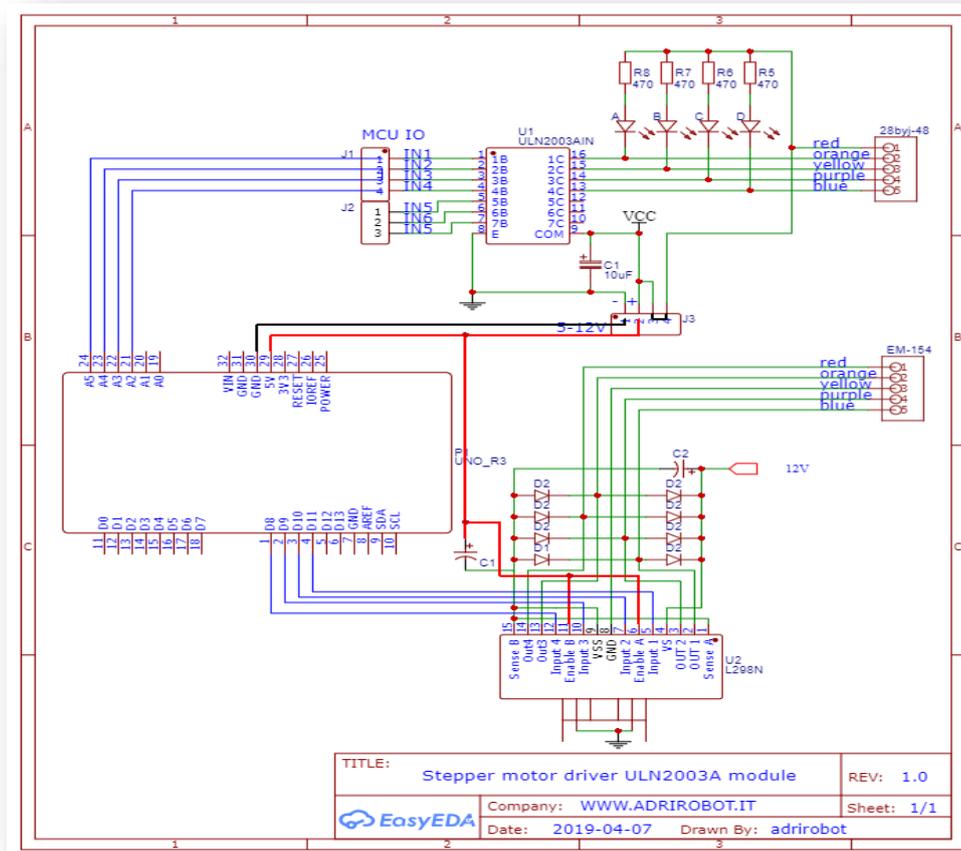


Figure 4.14 : Circuit électrique du système

4.5 La communication entre Matlab et Arduino

La communication entre Matlab et Arduino est un domaine passionnant qui permet d'intégrer les capacités de traitement avancées de Matlab avec les fonctionnalités de contrôle et de capteurs d'Arduino. Grâce au package matériel Arduino, il est possible d'établir une communication bidirectionnelle entre les deux plates-formes, ouvrant ainsi un large éventail de possibilités pour la réalisation de projets interactifs et de systèmes embarqués. Dans cet essai, nous allons explorer les avantages et les étapes nécessaires pour établir cette communication efficacement.

4.5.1 Étapes pour établir la communication

a) Installation du package matériel Arduino :

Pour commencer, il est nécessaire d'installer le package matériel Arduino dans Matlab. Ce package permet d'interfacer Matlab avec Arduino et fournit des fonctions et des outils pour établir la communication.

b) Connexion physique :

Une fois le package installé, nous devons connecter physiquement l'Arduino à l'ordinateur à l'aide d'un câble USB. Assurez-vous que l'Arduino est correctement alimenté et reconnu par l'ordinateur.

c) Configuration de la communication :

Dans Matlab, il faut configurer les paramètres de communication tels que le port série et le débit de transmission. Ces informations permettent à Matlab de communiquer avec Arduino.

d) Programmation d'Arduino :

Utilisez l'environnement de développement Arduino pour écrire le code nécessaire pour lire les capteurs, contrôler les actionneurs ou effectuer toute autre tâche spécifique à votre projet. Arduino exécute ce code pour interagir avec le monde physique.

e) Programmation de Matlab :

Dans Matlab, utilisez les fonctions fournies par le package matériel Arduino pour envoyer et recevoir des données vers et depuis Arduino. Vous pouvez écrire des scripts ou des fonctions qui utilisent ces données pour effectuer des calculs avancés ou des opérations complexes.

f) Échange de données :

Une fois la communication établie, vous pouvez échanger des données entre Matlab et Arduino. Par exemple, vous pouvez envoyer des commandes de contrôle à Arduino depuis Matlab, puis recevoir des données de capteurs en retour. Vous pouvez également envoyer des

données de Matlab à Arduino pour contrôler des actionneurs ou effectuer des opérations en temps réel.

La communication entre Matlab et Arduino grâce au package matériel Arduino ouvre de nouvelles perspectives pour la conception de systèmes embarqués interactifs et la réalisation de projets de contrôle. En combinant les capacités de calcul de Matlab avec les fonctionnalités de contrôle d'Arduino, les utilisateurs peuvent créer des applications sophistiquées, des expériences interactives et des prototypes rapidement et efficacement. [65]

4.6 Le système mécanique et ces composants :

4.6.1 Le système mécanique :

On a développé un système mécanique on utilise le logiciel Solid-Works, Le système mécanique consiste en une voie sur laquelle se déplace le panneau solaire afin de s'éloigner le panneau solaire de l'ombre. La figure illustre le premier modèle proposé :

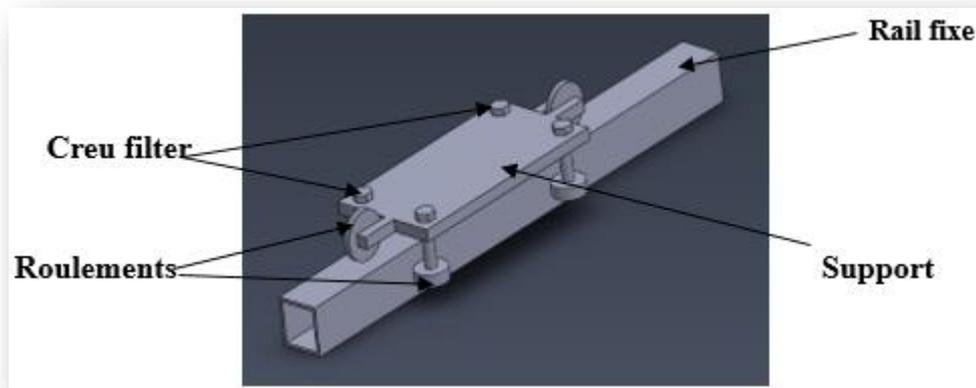


Figure 4.15 : système de translation mécanique

Les 4 roulements dans la voie sont pour fixer le support du panneau solaire et garantir qu'il ne fasse aucun mouvement de dérive indésirable, et les 2 roulements au-dessus du rail sont pour faciliter le mouvement sur cette dernière. Après on a développé ce modèle avec une inclinaison de 36 degrés qui est le même degré de latitude de la zone géographique (Blida) pour maximiser la production d'énergie et nous avons obtenu un suiveur de dé-ombrage avec panneau à inclinaison fixe :

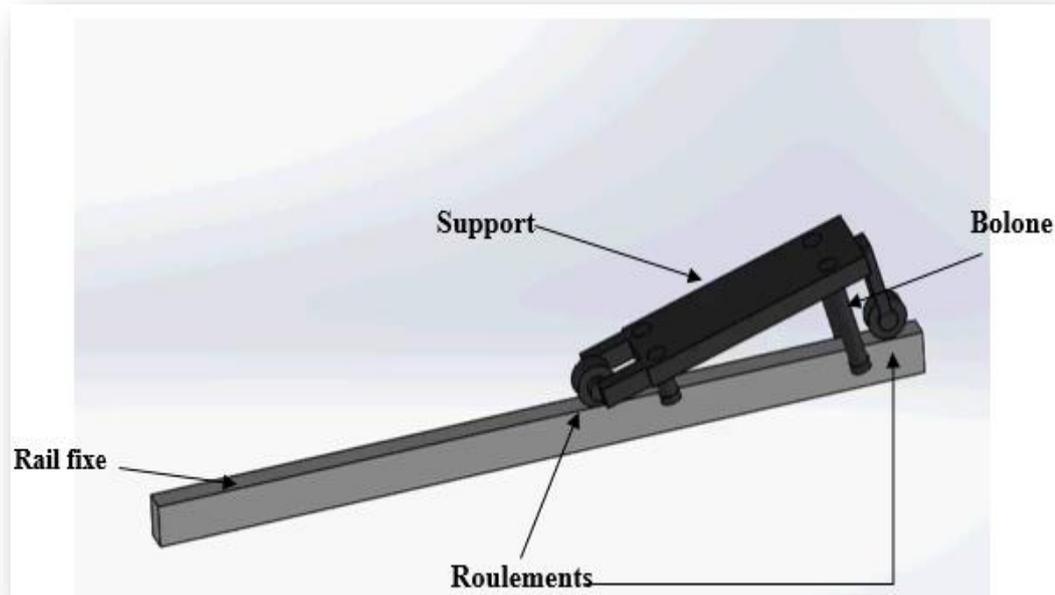


Figure 4.16 : suiveur de dé ombrage avec panneau à inclinaison fixe

Après on a discuté comment on va de rotation du moteur à une translation avec un système simple et efficace et on a arrivé à ce modèle :

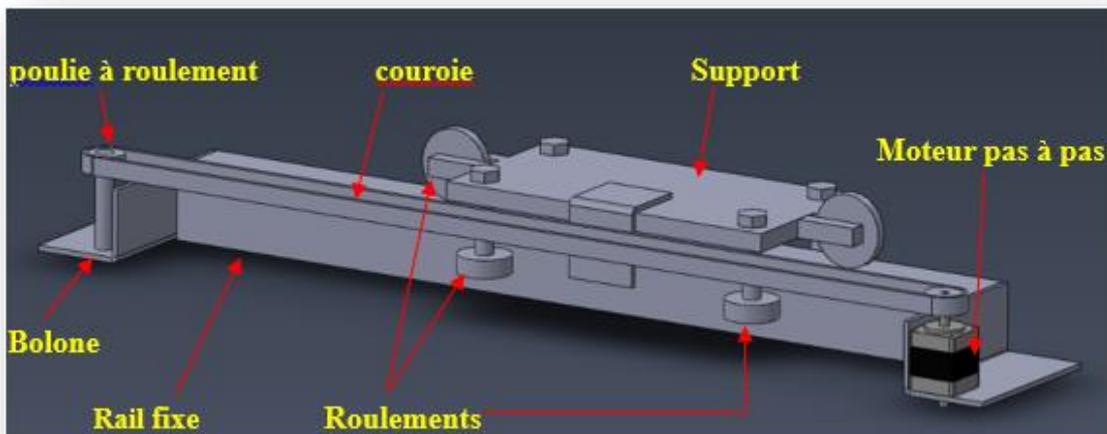


Figure 4.17 : système de la translation à courroie

Dans ce modèle on a une courroie qui est relié avec le moteur pas à pas et deux pignons avec une longueur du 2 mètre (1 mètre aller et 1 mètre retour) qui est lié à un L métallique, et ce L lié avec le support incliné du panneau solaire. Quand le moteur tourne le support déplace avec une translation sur le rail.

Maintenant on va commencer de construire le mécanisme du suiveur (la rotation), on a proposé du changé le mécanisme précédent pour adapter le de faire une rotation et au même temps une translation et on a ce modèle-là :

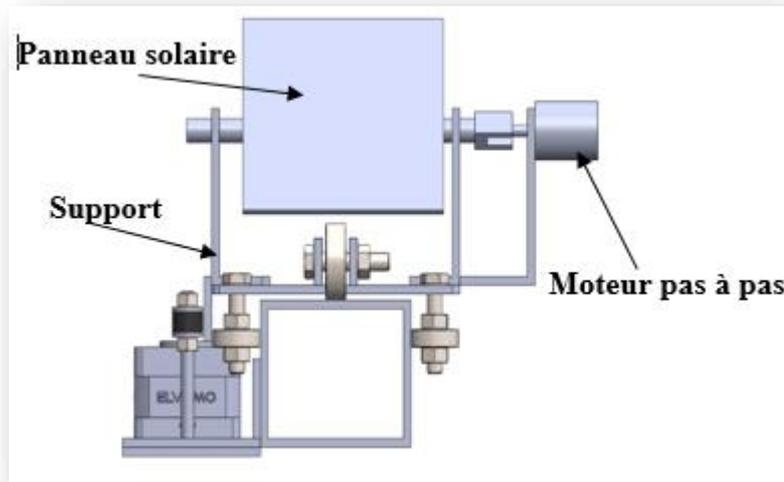


Figure 4.18 : conception mécanique de la rotation plus translation

Comme on a vu dans la figure 4.12 quand le moteur tourne il faire tourner la tige filtrée qui a un panneau solaire fixé avec elle. Donc il reste de commander le moteur selon l'altitude solaire pour créer un suiveur, et voilà une figure qui illustre notre produit final qui on a réalisé :

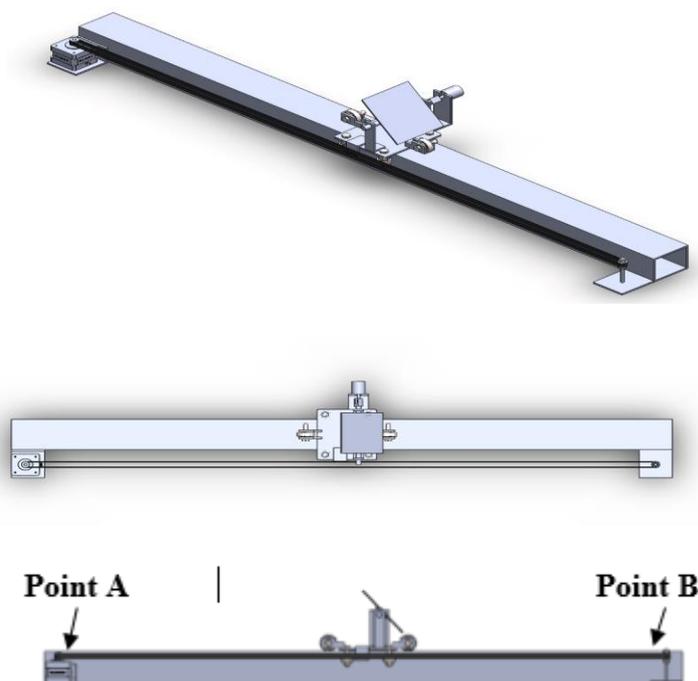


Figure 4.19 : conception finale du suiveur de dé ombrage

Notre suiveur va placer sur le point B dans le lever du soleil et durant le matin jusqu'à midi, dans cette plage du temps le suiveur de dé ombrage est en face le soleil et l'ombrage commence grand et diminué en fonction du temps jusqu'à il est nulle dans le midi, donc il reste au long du cette plage dé ombragé, alors il fait seulement de la rotation pour suivre la trajectoire du soleil. Après-midi le soleil dépasse l'azimut et l'ombrage commence à tomber sur notre panneau de dé ombrage alors il commence de faire des translations sur la voie de la façon que l'ombrage ne tombe jamais sur lui, jusqu'à il arrive à point A dans le coucher du soleil. Dans le coucher il termine le parcours et il faire une initialisation pour retourner à position B pour faire la même chose dans le jour prochain.

4.7 Conclusion :

Après plein de problèmes mécanique on est enfin arrivé à réaliser notre suiveur de dé ombrage électriquement et mécaniquement et le commander avec succès, et on a atteint notre objectif. On peut encore développer ce travail-là et l'améliorer dans le futur.

Conclusion générale

Conclusion générale

En conclusion, nous avons atteint notre objectif de création d'un système solaire suiveur qui suit le mouvement du soleil et s'éloigne de l'ombre sans utiliser des capteurs. En se basant sur des équations astronomiques précises, ce qui offre une solution innovante pour maximiser l'absorption de l'énergie solaire et augmenter la productivité de l'électricité solaire. En évitant les zones ombragées, notre système solaire peut fonctionner de manière optimale tout au long de l'année, ce qui permet d'optimiser la production d'électricité et de maximiser le rendement énergétique.

Cette technologie a le potentiel de révolutionner l'industrie de l'énergie solaire en évitant les obstacles qui limitent la productivité des panneaux solaires dans les zones où l'ombre est un problème fréquent. En utilisant des calculs astronomiques précis et un algorithme, le système PV peut s'ajuster en temps réel pour suivre le mouvement du soleil et s'éloigne de l'ombre, garantissant ainsi une absorption maximale de l'énergie solaire disponible.

En plus de son impact positif sur la production d'électricité, cette solution contribue également à la transition vers une source d'énergie propre et renouvelable. En réduisant les pertes causées par les zones ombragées, nous pouvons exploiter plus efficacement l'énergie solaire, réduisant ainsi notre dépendance aux combustibles fossiles et réduisant les émissions de gaz à effet de serre.

En somme, notre système de suivi solaire basé sur des équations astronomiques précises représente une avancée technologique majeure dans le domaine de l'énergie solaire. Il offre une solution pratique et efficace pour augmenter l'absorption d'énergie solaire et améliorer la productivité de l'électricité solaire, tout en favorisant une transition énergétique plus durable et respectueuse de l'environnement.

**Références
bibliographiques**

Références bibliographiques

- [1]-<<ACTU-ENVIRONNEMENT>>https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/energie_solaire_photovoltaique.php4 date de consultation : février 2023
- [2]-<<DS-New_ENERGY>><https://www.dsnsolar.com/info/application-field-of-solar-energy-28409034.html> date de consultation : février 2023
- [3]-<<KARTABLE>><https://www.kartable.fr/ressources/enseignement-scientifique/cours/le-rayonnement-solaire/51271> date de consultation : février 2023
- [4]-<<CEA>><https://www.cea.fr/comprendre/Pages/energies/renouvelables/essentiel-sur-cellules-photovoltaiques.aspx> date de consultation : février 2023
- [5]-<<CONNAISSANCE_des_ENERGIES>><https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaique#:~:text=Les%20cellules%20photovolta%C3%AFques%20exploitent%20l,conducteur%20transportant%20les%20charges%20%C3%A9lectriques>. date de consultation : février 2023
- [6]-<<EDF_ENR>><https://www.edfenr.com/lexique/cellule-photovoltaique/#:~:text=Quelle%20est%20la%20composition%20d,de%20l'ordre%20du%20millim%C3%A8tre>. date de consultation : février 2023
- [7]-<<PHOTOVOLTAIQUE>><https://www.photovoltaique.info/fr/realiser-une-installation/choix-du-materiel/caracteristiques-des-panneaux-photovoltaiques/technologies-de-cellules-solaires-photovoltaiques/#:~:text=Le%20photovolta%C3%AFque%20organique-.Les%20cellules%20photovolta%C3%AFques,en%20plus%20sur%20le%20march%C3%A9>. date de consultation : février 2023
- [8]-<<ORYGEEN>><https://www.orygeen.eu/docs-actus/glossaire/module-photovoltaique/> date de consultation : février 2023
- [9]-<<JADE_TECHNOLOGIE>><https://www.jade-technologie.com/composition-dun-panneau-solaire/#:~:text=La%20composition%20du%20panneau%20solaire,panneau%20solaire%20%C3%A0%20l'installation>. date de consultation : février 2023
- [10]-<< JADE_TECHNOLOGIE >><https://www.jade-technologie.com/caracteristiques-dun-panneau-solaire/#:~:text=La%20tension%20de%20puissance%20maximale,Volts%2C%20puissance%20maximale%20140%20watts>. date de consultation : mars 2023

Références bibliographiques

- [11]-<<HELLIO>><https://particulier.hellio.com/blog/conseils/rendement-panneau-solaire#:~:text=En%20pratique%2C%20le%20rendement%20r%C3%A9el,15%20%25%20de%20la%20lumi%C3%A8re%20re%C3%A7ue>. date de consultation : mars 2023
- [12]-<<ACTU_ENVIRONNEMENT>>https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/energie_solaire_photovoltaique.php4#:~:text=D%C3%A9signe%20l'%C3%A9nergie%20r%C3%A9cup%C3%A9r%C3%A9e%20et,d'un%20photon%20en%20%C3%A9lectron. date de consultation : mars 2023
- [13]-<<ONTARIO>>http://omafra.gov.on.ca/french/engineer/facts/sol_elec.htm. date de consultation : mars 2023
- [14]-<<IFOAD>><http://www.foad.uadb.edu.sn/mod/book/view.php?id=2448&chapterid=1537#:~:text=Un%20syst%C3%A8me%20photovolta%C3%AFque%20est%20g%C3%A9n%C3%A9ralement,c%C3%A2bles%20et%20de%20r%C3%A9cepteurs%20%C3%A9lectriques.&text=Il%20permet%20de%20donner%20des,%C3%A9tat%20actuel%20du%20syst%C3%A8me%20solaire>. date de consultation : mars 2023
- [15]-<<>><http://bib.univ-ueb.dz:8080/jspui/handle/123456789/10300>. date de consultation : mars 2023
- [16]-<<EDF_ENR>><https://www.edfenr.com/guide-solaire/batterie-stockage-electricite-solaire/#:~:text=L'autoconsommation%20avec%20stockage%20%3A%20lorsque,de%20recharge%20pour%20v%C3%A9hicule%20%C3%A9lectrique>. date de consultation : mars 2023
- [17]-<<NATURE>><https://www.nature.com/articles/s41598-022-14733-6> date de consultation : mars 2023
- [18]-OUZERI Leila Mémoire de fin d'étude << master en énergies renouvelables >> << simulation de l'ombrage d'un panneau photovoltaïque à l'aide de la méthodologie de la recherche expérimentale (plans d'expériences)>>. Université saad sahlab-blida1-septembre 2017.
- [19]-<<TRACESOFTWER>><https://www.trace-software.com/fr/les-effets-dombrage-sur-la-performance-des-panneaux-solaires> date de consultation : mars 2023
- [20]-<<DS_NEW_ENERGY>><https://www.dsnsolar.com/info/shading-effect-on-output-of-solar-pv-system-50734327.html?fbclid=IwAR0ymYnxXCRU-gR4jnUlaM9U0Ib1vhbLlyq3gao7Mv0CAhXk1P5tbwwMXbg> date de consultation : mars 2023

Références bibliographiques

- [21]-<<TRACESOFTWER>><https://www.trace-software.com/fr/les-effets-dombrage-sur-la-performance-des-panneaux-solaires> date de consultation : mars 2023
- [22]-<<DS_NEW_ENERGY>><https://www.dsnsolar.com/info/shading-effect-on-output-of-solar-pv-system-50734327.html?fbclid=IwAR0ymYnxXCRU-gR4jnUlaM9U0Ib1vhbLlyq3gao7Mv0CAhXkIP5tbwwMXbg> date de consultation : mars 2023
- [23]-<<CALCULEO_par_EFFY>><https://www.calculeo.fr/eco-travaux/les-travaux-d-economies-d-energie/energie-solaire-avantages-inconvenients> date de consultation : mars 2023
- [24]-<<SINO_VOLTAICS>><https://sinovoltaics.com/learning-center/csp/single-axis-trackers/> date de consultation : mars 2023
- [25]-<<SINO_VOLTAICS >><https://sinovoltaics.com/learning-center/csp/dual-axis-trackers/> date de consultation : avril 2023
- [26]-<<ENGIE_my_POWER>><https://mypower.engie.fr/conseils/energie-solaire/materiel-solaire/qu-est-ce-qu-un-tracker-solaire-comment-fonctionne-t-il> date de consultation : mars 2023
- [27]-<<BIBLUS>><https://biblus.accasoftware.com/fr/orientation-des-panneaux-photovoltaiques-comment-la-definir-correctement/> date de consultation : mars 2023
- [28]-<<DIO_FOUDATION>><http://dx.doi.org/10.1051/j3ea/2013021> date de consultation : mars 2023
- [29]-<<RESEARCHGATE>>https://www.researchgate.net/figure/Carte-du-monde-de-lensoleillement-moyen-annuel-11_fig1_267720997 date de consultation : mars 2023
- [30]-<<CONOLOGIE>><https://www.econologie.com/inclinaison-ideale-panneaux-solaires/> date de consultation : mars 2023
- [31]<<Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Siliana >><https://p.21-bal.com/buhgaleriya/6383/index.html?page=5> date de consultation : mars 2023
- [32]-<<EUROPE_ENERGIE>><https://www.europe-energie.com/blog/petite-histoire-du-photovoltaique/#:~:text=Apr%C3%A8s%201913%2C%20naissent%20les%20premi%C3%A8res,les%20chercheurs%20des%20laboratoires%20Bell.> date de consultation : mars 2023
- [33]-<<E+NERGIE>><https://energieplus-lesite.be/techniques/photovoltaique3/suiveurs-solaires/> date de consultation : mars 2023
- [34]-<<ENGIE_my_POWER>><https://mypower.engie.fr/conseils/energie-solaire/materiel-solaire/qu-est-ce-qu-un-tracker-solaire-comment-fonctionne-t->

Références bibliographiques

- [48]-<<RESEARCHGATE>>https://www.researchgate.net/figure/Variation-de-la-declinaison-du-soleil-et-de-linclinaison-optimale-en-fonction-du-numero_fig1_268431057 date de consultation : mai 2023
- [49]-<<ASSOCIATION_MERIDIENNE_NANTES>>
<http://www.meridienne.org/atelier/glossaire/coordonnees-ecliptiques/> date de consultation : mai 2023
- [50]-http://www.heliodon.net/downloads/Beckers_2010_Helio_006_fr_2.pdf date de consultation : mai 2023
- [51]-<<ECLECTICSITE>><https://www.eclecticsite.fr/soleil/zonSchaduw.htm> date de consultation : mai 2023
- [52]<https://www.bricozone.be/t/photovoltaique-et-ombre-de-cheminee.114402/> date de consultation : mai 2023
- [53]-<https://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2018/05/BOULAHBAL-AMINA.pdf> date de consultation : mai 2023
- [54]-<http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/14986/1/Ms.GM.ZEDDOUNE.pdf> date de consultation : avril 2023
- [55]-<<OSOLOREA>><https://blog.solorea.com/tracker-solaire> date de consultation : mai 2023
- [56]-<<LUMIO>><https://blog.lumioo.com/2019/11/26/tracker-solaire-ou-installation-fixe-lequel-choisir/> date de consultation : mai 2023
- [57]-<<TECHNO-SCIENCE>><https://www.techno-science.net/definition/5724.html> date de consultation : mai 2023
- [58]-<<SESP>>http://sesp.esep.pro/fr/pages_nanosats/systemes-de-coordonnees-celestes.html date de consultation : mai 2023
- [59]-<<SESP>>http://sesp.esep.pro/fr/pages_nanosats/systemes-de-coordonnees-celestes.html date de consultation : mai 2023
- [60]-<<COLLEGE_CHANTE_CIGALE>>
http://www.collegegujan.fr/sites/technopc/img/2016_2017/4eme/sequence1/activite14/4emeactivite14/fonction_traitement_de_linformation_carte_de_prototypage_rapide_arduino_uno.html#:~:text=La%20carte%20Arduino%20UNO%20est,d'ex%C3%A9cuter%20un%20programme%20informatique. date de consultation : mai 2023

Références bibliographiques

[61]-<<EDUSCOL>><https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr/sti/files/ressources/pedagogiques/7572/7572-modelisation-dun-moteur-pas-pas-v2.pdf> date de consultation : mai 2023

[62]-<<MOUSER_ELECTRONICS>><https://www.mouser.com/datasheet/2/758/stepd-01-data-sheet-1143075.pdf> date de consultation : mai 2023

[63]-<https://www.aranacorp.com/fr/utilisation-dun-module-l298n-avec-arduino/> date de consultation : mai 2023

[64]-<<TEXAS_INSTRUMENTS>><https://www.ti.com/lit/ds/symlink/uln2003a.pdf> date de consultation : mai 2023

[65]-<<MATHWORKS>><https://fr.mathworks.com/discovery/arduino-programming-matlab-simulink.html> date de consultation : mai 2023