

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION
AND SCIENTIFIC RESEARCH

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES
--T L E M C E N--

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
-تلمسان-



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
École Supérieure en
Sciences Appliquées

Centre de Développement des
Energies Renouvelables - CDER



Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur

Filière : Electrotechnique.

Spécialité : Energie et environnement.

Présenté par : **BENNESSAR Khadidja.**
BAHI Kheira.

Thème

**Etude expérimentale de poursuite
solaire d'un héliostat.**

Soutenu publiquement, le 26 / 10 / 2020 , devant le jury composé de :

M.Boukli Hacene Fouad.	Maitre de conferences Classe A.	ESSA. Tlemcen	Président
M. Bouaichaoui Sofiane.	Chercheur .	CDER.Alger	Directeur de mémoire
M. Chemidi Abdelkarim.	Maitre de conferences Classe B.	ESSA.Tlemcen	Co- Directeur de mémoire
M. Merad Lotfi.	Professeur.	ESSA.Tlemcen	Examineur 1
M. Ghouti Abdellaoui.	Maitre de conferences Classe B.	ESSA.Tlemcen	Examineur 2

Année universitaire :2019/2020

Remerciements

Nous exprimons notre profonde gratitude et remerciement à
notre grand Dieu à qui nous devons toute notre réussite

Nous adressons nos vifs remerciements à nos encadreur

M.Chemidi, M.Bouaichaouiet M.Takilalte qui nous ont
manifesté toute leurs attentions, leurs bienveillances et leurs
aides inestimables tout au long de l'élaboration de ce travail

Ainsi qu'à toutes nos familles particulièrement nos mères et
sœurs

Enfin, à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de
loin à notre réussite

Nous vous disons un chaleureux merci

B.Khadidja B.Kheira



Dédicace

Je dédié ce modeste travail à la femme qui m'a mis au monde,
celle qui m'as comblé d'amour et de tendresse : ma mère
A ma sœur qui m'as engendré, instruit et soutenu pendant
toutes mes années d'étude

khadidja

Dédicace

Je dédie ce travail.....

Tout d'abord à mes très chers parents ; ma mère Halima et mon père Abdelkader qui me soutiennent et m'encouragent depuis toujours ; j'espère qu'ils trouveront dans ce travail toute ma reconnaissance et mon amour. A ma sœur Naima et mes frères pour leur soutien moral et leurs encouragements. A mon binôme Khadîdja pour son amitié, sa présence et son soutien sans limite. A mes professeurs à l'école supérieure en sciences appliquées de Tlemcen qui m'ont enrichi les connaissances et m'ont orienté. A mes très chers collègues et à toute personnes qui a participé de proche ou de loin dans la réalisation de ce travail.

Kheira

PV : Photovoltaïque.

CSP : concentrated solar power.

CVP : concentrateur photovoltaïque.

HCPV : photovoltaïque à haute concentration.

MJ : jonction multiple.

MP : moteur à aimant permanent.

MRV : moteur à reluctance variable.

MH : moteur hybride.

RTC : real time clock.

LCD : liquid cristal display.

CAO : conception assistée par ordinateur.

TL : temps légal.

TLS : temps légal du lever du soleil.

TCS : temps légal du coucher de soleil.

TSV : temps solaire vrai

Figure1 : Structure de la production électrique d'origine renouvelable- 2012	1
Figure I.1 : Diagramme de comparaison entre la production avec suiveur et avec un système fixe	4
Figure I.2 : Installation avec traqueur solaire	4
Figure I.3 : suiveur à un axe	5
Figure I.4 : Suiveur à deux axes	5
Figure I.5 : les systèmes de concentration de l'énergie solaire.....	7
Figure I.6 : schéma simplifié d'une centrale à concentration cylindro-parabolique.	8
Figure I.7 : principe de fonctionnement d'un concentrateur à miroirs de Fresnel	9
Figure I.8: un schéma d'un capteur parabolique.	11
Figure I.9 : central à tour.....	11
Figure I.10 : schéma explicatif d'une installation d'une centrale à tour	12
Figure I.11 : Différentes configurations d'un champ d'héliostat.....	13
Figure I.12 : Composants d'un héliostat.	14
Figure I.13 : La monture altazimutale	14
Figure I.14: structure interne du moteur pas à pas Nema 17	16
Figure I.15: structure monophasée d'un m pap à reluctance variable	16
Figure I.16 : structure d'un mpap hybride.	17
Figure I.17 : stockage des sels fondus.....	19
Figure I.18 : Angles de longitude et latitude de la terre	20
Figure I.19 : Coordonnées équatoriales	21
Figure I.20 : Les coordonnées azimute a et hauteur h	22
Figure II.1 : Modèle géométrique développé au CDER	23
Figure II.2: Repérage du soleil lié au système de coordonnées, centre de la terre et surface de la terre	24
Figure II.3 : Rayons incident et réfléchi	26
Figure II.4: Définition des deux angles de poursuite AE	27
FigureII.5 : Organigramme de poursuite solaire, méthode (AE).....	28
Figure III.1 : schéma synoptique du système.....	30
Figure III.2 : branchement du PIC18F2685.	32

Figure III.3 : schéma interne du PIC18F2685.	32
Figure III.4 : le module DS1302.....	33
Figure III.5: un afficheur LCD.	33
Figure III.6: Capture d'interface d'ISIS.....	34
Figure III.7 : Capture d'interface d'ARES.....	35
Figure III.8 : résistance 572Ω	35
Figure III.9 : un transistor.	35
Figure III.10: un condensateur.	36
Figure III.11 : un moteur pas à pas.	36
Figure III.12: un potentiomètre.	36
Figure III.13 : Fenêtre du logiciel de simulation.	37
Figure III.14 : simulation de l'angle d'élévation d'un héliostat.	38
Figure III.15 : simulation de l'angle d'azimut d'un héliostat.....	39
Figure III.16 : variation des tensions en fonction du temps.	40
Figure III.17: variation du courant i_a à vide (bleu) et en charge (rouge) en fonction du temps.	41
Figure III.18 : variation du courant i_b en fonction du temps.	41
Figure III.19 : variation de la vitesse (rd/s).	41
Figure III.20 : variation du couple électromagnétique (N.m) en fonction du temps.	42
Figure III.21 : variation de la position (rd) en fonction du temps.	42

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Comparaison des traqueurs mono-axes et double axes.	6
Tableau I.2 : données actuelles sur les collecteurs cylindro-paraboliques. [12].....	8
Tableau I.3 : données actuelles sur les collecteurs à miroirs de Fresnel.[12].....	10
Tableau I.4 : données actuelles sur les collecteurs paraboliques.[12].....	10
Tableau I.5 : comparaison entre les trois types du moteur pas à pas.[23].....	17
Tableau I.6 : Coût en pourcentage des principaux constituants d'un héliostat par rapport au cout total d'un héliostat.....	18
Tableau III.1 : Données géographiques du site de Ghardaïa.....	36

Remerciements	I
Dédicace	II
Dédicace	III
Liste des acronymes	IV
Liste des figures	V
Liste des tableaux	VII
Sommaire	VIII
Résumé	XII
Introduction générale	1
I. Chapitre1 : système de poursuite solaire.	3
Introduction	3
1. système de poursuite solaire pour les CVP.	3
1.1.L'intérêt des panneaux mobile par rapport aux panneaux fixes	3
1.2.Les traqueurs.	4
1.2.1. types de traqueurs.	5
a. traqueurs à mono-axe.	5
b. traqueurs à double axes.	5
1.2.2. comparaison des traqueurs mono-axes et traqueurs double axes.	6
2. système de poursuite solaire pour les CSP.	7
2.1.cylindro-parabolique.	8
a. Principe de fonctionnement.	8
b. Avantages.	8
c. Inconvénients.	8
2.2.Centrale solaire à miroirs de Fresnel.	9
a. Principe de fonctionnent.	9
b. Avantages.	9
c. Inconvénients.	9
2.3.Parabolique.	10
a. Principe de fonctionnement.	10
b. Avantages.	10
c. Inconvénients.	10
2.4.Centrale solaire à tour.	11
2.4.1. le champ solaire	12
2.4.1.1. les composants d'un héliostat.	13
a. les miroirs réflecteurs.	14
b. structure métallique	14

c. système de poursuite	14
d. système de commande	15
2.4.1.2. moteur pas à pas.	15
2.4.1.2.1. Généralités sur le moteur pas à pas.	15
2.4.1.2.2. Types de moteurs pas à pas.	16
a. Moteur à aimant permanent.	16
b. Moteur à réluctance variable.	16
c. Moteur hybride.	16
2.4.1.2.3. Comparaison entre les trois types.	17
2.4.1.2.4. Inconvénients du moteur pas à pas.	17
2.4.1.3. le cout des héliostats	17
2.4.2. fluide caloporteur	18
a. les sels fondus	18
b. l'eau	18
c. l'air	18
2.4.3. stockage	18
a. sels fondus.	18
b. Air.	19
2.4.4. Bloc de puissance.	19
2.5. Les coordonnées célestes.	19
2.5.1. Les coordonnées graphiques.	19
2.5.1.1. L'attitude.	20
2.5.1.2. Longitude.	20
2.5.2. Coordonnées équatoriales.	20
2.5.2.1. L'ascension droite.	20
2.5.2.2. La déclinaison.	20
2.5.3. Coordonnées horaires.	21
2.5.3.1. Déclinaison du soleil	21
2.5.3.2. L'angle horaire du soleil	21
2.5.4. Coordonnées horizontales et azimutales.	21
2.5.4.1. Hauteur angulaire du soleil.	21
2.5.4.2. L'azimut.	22
Conclusion	22
3. Chapitre 2 : Modélisation du système de poursuite Azimute-Elévation.	23
Introduction	23

1. Modélisation mathématique du système de poursuite.	24
1.1.Les angles de soleil.	24
1.2.Les angles d'héliostat.	25
1.3.Organigramme du système de poursuite azimut- élévation.	28
Conclusion.	28
4. Chapitre3 : simulation d'un héliostat.	29
Introduction.	29
1. Schéma synoptique.	29
1.1.Le pic	29
1.1.1. Définition du pic microcontrôleur.	29
1.1.2. Classification des pic.	30
1.1.3. Identification des pic.	30
1.1.4. Choix du pic 18F2685.	30
1.1.5. Le brochage du pic.	31
1.2.L'horloge RTC.	32
1.3.Afficheur LCD.	32
2. Logiciel PROTEUS.	32
3. Composants du système.	34
3.1.Résistance	34
3.2.Transistor.	34
3.3.Condensateur.	35
3.4.Moteur pas à pas.	35
3.5.Un potentiomètre.	35
4. La simulation du circuit.	36
4.1.Principe de fonctionnement.	36
5. Résultats et interprétations.	37
6. Simulation d'un moteur pas à pas à aimant permanent par simulink/ Matlab	39
6.1 Résultats et interprétations.	39
a. Simulation du moteur pour une fréquence de $f=10$ Hz à vide ($C_r=0$ N.m) et en charge ($C_r= 1.2$ N.m).	39
Conclusion	46
Conclusion générale	47

Résumé

Dans le but d'améliorer les performances des centrales solaires à tour, plusieurs études et essais sont menés autour des héliostats. Dans notre travail, l'étude a été faite au niveau du centre de recherche des énergies renouvelables (CDER) de Bouzereah et elle a été dirigée dans ce sens ; le travail est une conception d'une commande d'un prototype d'héliostat pour centrale à tour. L'héliostat est doté de deux moteurs pas à pas (MPP) à aimant permanent qui permettent de suivre le soleil à l'aide des équations astronomiques et d'une carte de commande « le Pic 18F2685 » tel que le travail est mené par une simulation détaillée sous Proteus :ISIS.

ABSTRACT

In order to improve the performance of tower solar power plants, several studies and tests are carried out around heliostats. In our work, the study that we did at the center of research of renewable energies (CDER) of Bouzereah was directed in this direction; the work is a design of an order for a prototype heliostat for a tower power plant. The heliostat has two permanent magnet stepper motors (MPP) which allow following the sun using astronomical equations and a "Pic 18F2685" control board such that a detailed simulation on Proteus: ISIS adjusts the work.

ملخص

من أجل تحسين أداء محطات الطاقة الشمسية البرجية ، يتم إجراء العديد من الدراسات والاختبارات حول الهليوستات. في عملنا ، تم توجيه الدراسة التي قمنا بها في مركز أبحاث الطاقات المتجددة (CDER) في بوزريعة في هذا الاتجاه.

العمل عبارة عن تصميم يهدف إلى الحصول على نموذج هليوستات لمحطة طاقة برجية مرتبط بمحركين متدرجين مغناطيسيين (MPP) يسمحان بمتابعة الشمس باستخدام معادلات فلكية ولوحة تحكم Pic 18F2685 بغرض تحقيق مردود طاقي مرتفع مقارنة بالانظمة الطاقوية الكلاسيكية.

Introduction générale

Suite à une évolution démographique et à un développement économique mondial, le monde se trouve ces dernières années face à une demande énergétique qui croît sans cesse.

Une demande qui n'est pas facile à satisfaire car les réserves des énergies fossiles ont atteint leur seuil d'exploitation et tendent à décroître.

L'augmentation de la production d'électricité est synonyme d'amélioration de la qualité de vie et de création de richesse. Dans le souci de ce remédié à ce déficit, les énergies renouvelables apparaissent comme des sources très prometteuses, inépuisables, offertes par la nature et dont la maîtrise garantirait largement l'autonomie de la planète. Elle regroupent l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, l'énergie géothermique, biomasse et l'énergie marine.

Les progrès de chaque filière renouvelable peuvent ainsi être mesurés de manière absolue, grâce à l'évolution de leur production et de manière relative, grâce au calcul de leur part perspective dans la production d'électricité totale. Certaines, comme l'énergie hydraulique où éolienne connaissent déjà un développement technique et commercial important. D'autres, comme les énergies marines restent en phase de démonstration. [1]

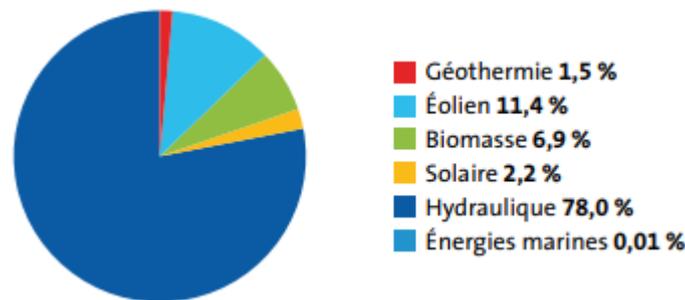


Figure I-1 : Structure de la production électrique d'origine renouvelable- 2012 [1].

Regroupé au sein d'une même catégorie, l'énergie solaire représente l'un des procédés les plus intéressants pour convertir le rayonnement solaire en énergie électrique. Elle rassemble deux technologies : les centrales photovoltaïques et les centrales solaires thermiques.

Les zones désertiques proches de l'équateur semblent les zones les plus favorables à l'énergie solaire. Dans beaucoup de ces régions 1Km² du terrain suffirait à générer de 100 à 130 GWh par an grâce à la technologie des centrales solaires thermiques et c'est l'équivalent d'une centrale de production classique (gaz- charbon) de 50 MW. [2]

La famille des concentrateurs thermique suit la méthode de concentration des rayonnements solaire en un seul endroit. Elle comprend quatre systèmes de concentration qui sont :

- Les concentrateurs cylindro- parabolique.
- Les miroirs à Fresnel.
- Les concentrateurs paraboliques.

- Les centrales à tour.

Dans le cadre de ce travail nous nous intéressons à la technologie des centrales solaires à tour où la structure du présent mémoire est la suivante :

- **Premier chapitre** : Ce chapitre vise à donner un aspect général sur les deux technologies de captation solaire :

- En première partie, nous allons parler sur les concentrateurs photovoltaïques qui englobent les traqueurs à mono-axe et les traqueurs à double-axe, une comparaison entre les deux ainsi que l'intérêt des panneaux mobiles par rapport aux panneaux fixes.

- En deuxième partie, nous allons parler sur concentrateurs thermodynamiques où les trois techniques concentrateurs cylindro-paraboliques, les miroirs à Fresnel et les concentrateurs paraboliques comporteront une brève présentation, les avantages et les inconvénients ainsi que le principe de fonctionnement, contrairement à la technique des centrales à tour qui comportera une étude bien détaillée.

- **Deuxième chapitre** : Ce chapitre comportera une modélisation mathématique des deux angles de poursuite « l'angle d'azimut et l'angle d'élévation »

- **Troisième chapitre** : Ce chapitre comportera une présentation générale sur le logiciel de simulation Proteus : ISIS, les composants entrant dans la simulation ainsi que la simulation suivie des résultats et interprétations.

Systemes de poursuite solaire

Introduction

La récupération de l'énergie solaire dispersée au niveau du sol exige deux systèmes de captation différents :

- Le système solaire photovoltaïque qui transforme l'énergie solaire directement en électricité.

- Le système solaire thermodynamique qui transforme l'énergie solaire directement en chaleur ; une variante du solaire thermodynamique est utilisée afin de transformer l'énergie solaire en électricité.

1. Système de poursuite solaire pour les CPV

Il s'agit d'une technologie photovoltaïque qui aide à produire de l'électricité à partir de la lumière solaire en utilisant des lentilles et des miroirs incurvés pour la concentration de la lumière solaire sur des petites cellules solaires à jonction multiples (MJ). De plus, les systèmes CPV utilisent souvent des trackers solaires et parfois ils accordent un système de refroidissement pour accroître leur efficacité. La recherche et le développement en cours améliorent leur compétitivité dans le segment des services publics et surtout dans les zones isolées.

Ce type de technique solaire est peut-être utilisé dans des zones plus petites et des zones qui sont loin de réseaux électriques.

Les systèmes utilisant le photovoltaïque à haute concentration (HCPV) ont le potentiel de devenir compétitifs car ils possèdent la plus grande efficacité par rapport aux autres technologies photovoltaïques existantes avec un réseau photovoltaïque plus réduit et moins coûteux. Actuellement le CPV n'est pas utilisé dans le segment des toits photovoltaïques et est moins courant que les systèmes PV conventionnels.

Pour les régions où l'éclairement énergétique annuel direct est de 2000 Kilowattheures (kWh) par mètre carré ou plus, en fait le coût moyen actualisé de l'électricité est entre 0.08 et 0.15 dollar par kWh et le coût de l'installation d'une centrale CPV de 10 mégawatts est défini entre 1.40 et 2.20 euros (environ 1.50 à 2.30 dollars) par watt-crête(wp).

1.1. L'intérêt des panneaux mobiles par rapport aux panneaux fixes

Le soleil se déplace continuellement pendant la journée ; le générateur photovoltaïque est fixé en prenant une seule position ce qui provoque la perte d'une quantité considérable d'énergie qui était disponible. Le panneau est fixé sur le sol et orienté vers le sud (implantation en hémisphère nord). Le rendement de la production énergétique n'est pas constant toute la journée (en début et en fin de journée) à cause du mauvais angle d'éclairement du panneau.

Lorsqu'un système suiveur oriente le panneau solaire en le faisant pivoter en direction du soleil et en maintenant en permanence un angle d'incidence des rayons idéal, voisin de 90° ; la production électrique par m² de panneau atteint alors son maximum.[3]

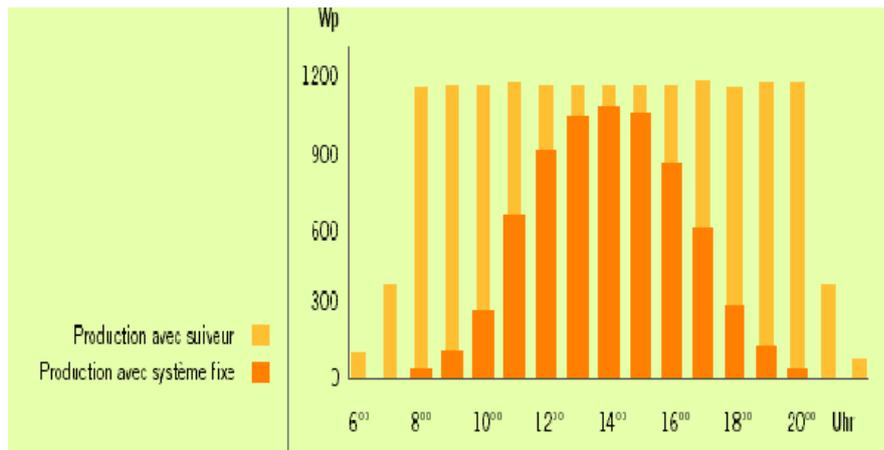


Figure I.1 : Diagramme de comparaison entre la production avec suiveur et avec un système fixe [4]

1.2. Les traqueurs

La technologie de la poursuite solaire ou de suivi est utilisée pour permettre aux modules solaires de suivre la trajectoire du soleil pour augmenter le rendement énergétique d'environ un tiers (à condition d'optimiser l'angle d'incidence du rayonnement solaire sur leur surface). La production d'électricité peut être augmentée jusqu'à 40 % dans certaines régions par rapport à des modules fixes.



Figure I.2 : Installation avec traqueur solaire [5]

Le placement des modules solaires est réalisé selon un angle optimal pour une latitude donnée. Cet angle est optimisé pour englober une année et il peut varier de 30° selon la latitude du lieu et les différentes hauteurs que peut prendre le soleil dans le ciel.

La fixation des modules solaires photovoltaïques à l'angle optimal est d'une bonne amélioration qui est environ de 15% par rapport à une pose à plat. Les traqueurs s'adaptent au passage quotidien du soleil et au changement de saison.

Chapitre I: Systèmes de poursuite solaire

Au niveau de nombreuses technologies solaires de concentration (photovoltaïque ou thermique), le suivi est une composante essentielle.

Dans les différentes applications solaires, le rendement de la conversion peut être amélioré lorsque la fixation des modules est ajustée selon l'angle optimal à la course du soleil, alors l'efficacité accrue signifie le rendement amélioré.

1.2.1. Les types de traqueurs

a. Traqueur à mono-axe

Au cours d'une journée, le panneau tourne autour d'un axe en suivant un déplacement azimutal d'est en ouest.

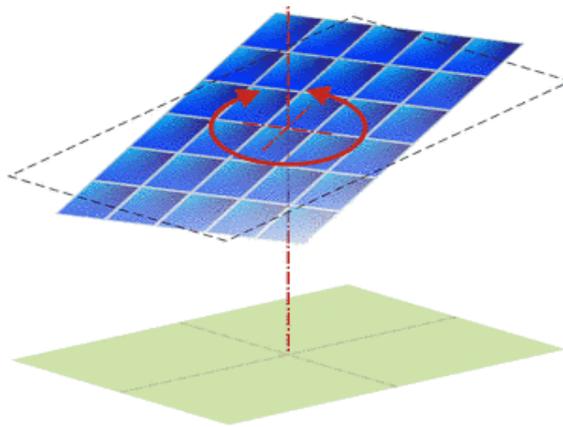


Figure I.3 : Suiveur à un axe [6]

b. Traqueur à double axes

Le panneau tourne selon un axe d'est en ouest et selon un axe vertical, ce type permet de faire la modification de l'orientation et de l'inclinaison.

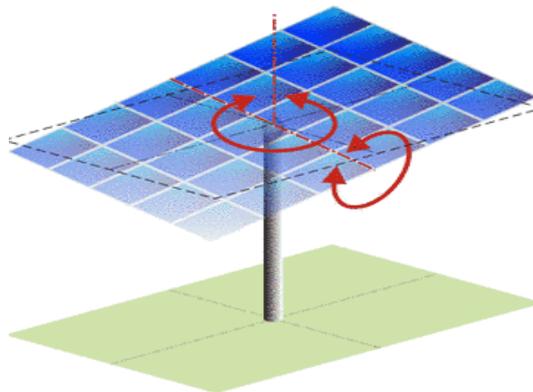


Figure I.4 : Suiveur à deux axes [6].

Par rapport aux modules solaires qui sont placés à un angle optimal, le traqueur mono-axe peut élever la production d'électricité de 27 % à 30%. Aussi le traqueur double axe peut

Chapitre I: Systèmes de poursuite solaire

ajouter en moyenne un bonus de 6 % de bonus et une amélioration variante entre 30% et 40% de la production d'énergie électrique par rapport aux modules solaires fixes.

✓ Il existe deux systèmes différents qui permettent de faire le tracking : *Le système actif* : muni d'une sonde d'éclairage, il permet de faire la recherche instantanée de la position optimale ; il se met à la position horizontale en cas de ciel couvert (rayonnement diffus). Cette position dans tel cas permet une production maximale.

✓ *Le système astronomique* : la position est alors directement fonction du parcours solaire préprogrammé. [6]

1.2.2. Comparaison des traqueurs mono-axe et traqueurs double axes

Le traqueur mono-axe est considéré comme le moyen le plus simple pour l'amélioration des performances d'une installation solaire commerciale en utilisant des dispositifs relativement simples.

Les systèmes à double axes contiennent plus de pièces mobiles que les traqueurs mono-axe. Leur conception est plus compliquée avec l'intégration des moteurs supplémentaires et de capteurs pour la poursuite du soleil. Le risque de défaillances et de dysfonctionnement est alors plus important.

Traqueur mono-axe	Traqueur double-axes
Suit le soleil d'est en ouest avec un seul point de pivotement	Suit le soleil s'est en ouest et du nord au sud en utilisant deux points de pivotements
Utilise un modèle prévisible basé sur le temps d'une année pour suivre le soleil	Utilise un « œil » du capteur pour suivre visuellement le soleil
Augmente le rendement solaire jusqu'à 34%	Augmente le rendement jusqu'à 37%
Conception simple et efficace	Conception plus complexe (plus de moteurs, de capteurs et plus d'entretien) mais plus précise.
Moindre cout par rapport au double axe	Cout plus élevé à cause de pièces supplémentaires et du temps d'installation.
Peu de pannes et de disfonctionnement	Pannes et disfonctionnement plus nombreux.

Tableau I.1 : Comparaison des traqueurs mono-axes et double axes.

L'inconvénient le plus connu au niveau des systèmes à double axe est que, par une journée nuageuse, nous pourrions les trouver en train de pointer dans le ciel ; tandis que les traqueurs à mono-axe et grâce à leur modèle de tracking ils seront là où ils devront être. Ce modèle permet donc d'éliminer les mouvements inutiles de suivi qui peuvent entraîner une usure supplémentaire et une perte de puissance.

2. *Système de poursuite solaire pour les CSP*

Sur une superficie qui dépasse les milliers de mètres carrés, les centrales solaires thermodynamiques regroupent une très grande quantité de miroirs qui visent à converger l'énergie rayonnante vers un fluide caloporteur. Ce fluide sera ainsi chauffé à une température élevée.

Selon le mode de concentration du rayonnement solaire, l'énergie thermique transmise par le fluide est transformée ensuite pour :

- La production de l'électricité.
- La production de vapeur pour procédé industriel.
- Apport solaire pour des installations utilisant des combustibles biomasses ou fossiles.

Ce système de poursuite engendre deux types de concentration :

La concentration linéaire : cette technologie utilise des tubes de grandes longueurs comme des récepteurs, situés sur une ligne focale afin de transformer l'énergie rayonnante en une énergie thermique qui va être portée par un fluide caloporteur. Les capteurs cylindro-paraboliques et les capteurs de Fresnel fonctionnent sur ce principe et c'est des capteurs qui suivent le soleil sur un seul axe.

La concentration ponctuelle (par foyer) : loin des tubes, cette concentration s'effectue sur un récepteur central. Cette technologie nécessite un suivi sur deux axes : en azimut et en élévation et c'est les capteurs paraboliques et les centrales à tour qui utilisent ce principe. [7]

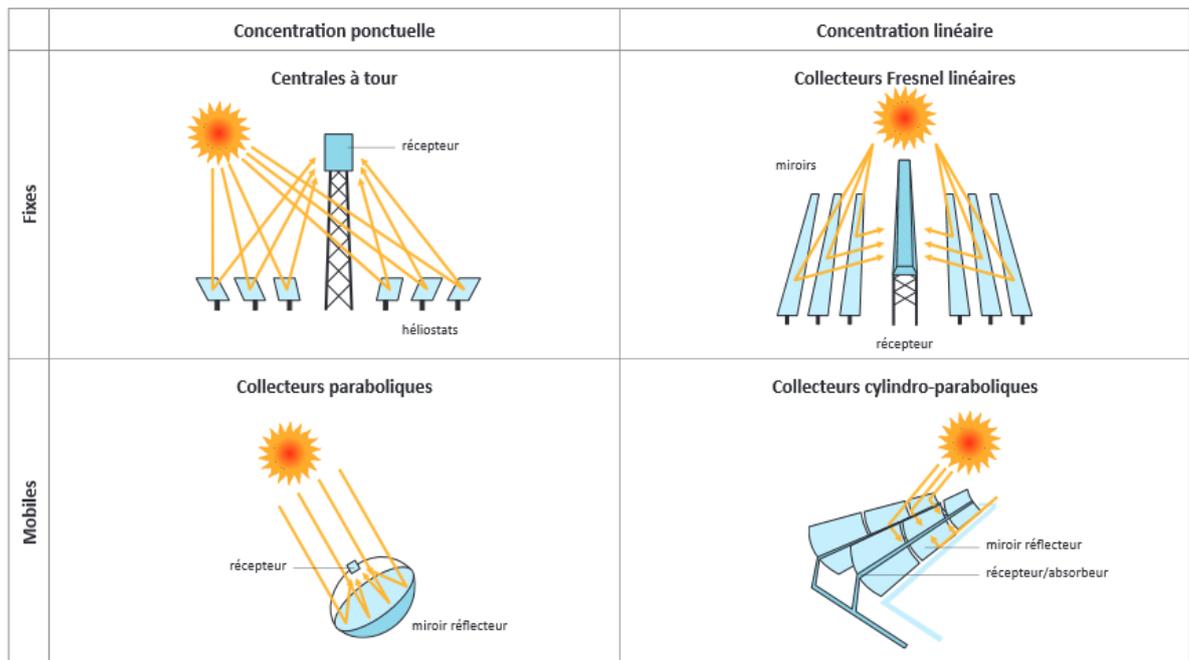


Figure I.5 : Les systèmes de concentration de l'énergie solaire.[8]

2.1. Cylindro-parabolique

La technologie de ces capteurs est actuellement la plus éprouvée des techniques de concentration solaire. Certains pays l'ont testée et commercialisée dès les années 80.[9]

a. Principe de fonctionnement

Ce type de centrale se compose de longs miroirs hémicylindriques qui sont alignés en parallèle et qui tournent autour d'un seul axe qui est l'horizontal.

Au centre de cet alignement se trouve un tube horizontal en verre sous vide comportant un tuyau métallique, où circule un fluide caloporteur (huile synthétique).

Ce fluide est chauffé à une température d'environ 400°C. Cette énergie est transférée à un circuit d'eau en produisant une vapeur qui actionne une turbine qui en retour actionne un générateur pour produire de l'électricité. [9]

Puissance :	Moyennes et grandes centrales :
Température de fonctionnement :	200 °C – 500 °C
Réflecteurs :	Parabolique (suivi 1 axe)
Récepteurs :	Linéaire mobile
Fluides caloporteurs :	Eau, sels fondus, huile, air.

Tableau I.2 : Données actuelles sur les collecteurs cylindro-paraboliques. [10]

b. Avantage

- Source d'énergie gratuite et inépuisable.
- Pas d'émission des gaz à effet de serre.
- Peu fonctionner sans intermittence.

c. Inconvénient

- Nécessite un fort ensoleillement et une zone chaude.
- Surface au sol importante.

La figure ci-dessous schématise la configuration d'une centrale à une concentration cylindro-parabolique :

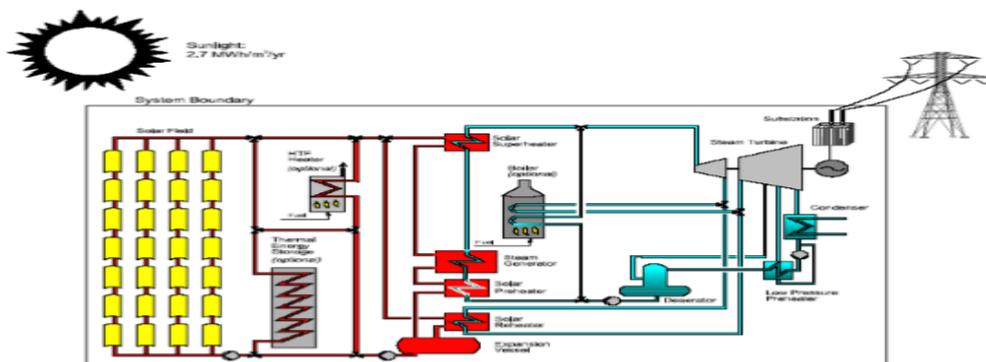


Figure I.6 : Schéma simplifié d'une centrale à concentration cylindro-parabolique. [9]

2.2. Centrale solaire à miroir de Fresnel

Ce sont des capteurs à récepteurs linéaires qui ne diffèrent pas des collecteurs cylindro-paraboliques. Ils reflètent le rayonnement solaire afin de le concentrer dans un récepteur.

a. Principe de fonctionnement

Ces collecteurs sont d'une construction différente. C'est une succession de longs miroirs parfaitement plans qui sont pivotés indépendamment les uns des autres en suivant la course du soleil.

Les rayons captés sont concentrés vers un seul ou un ensemble de tubes récepteurs linéaires fixes.

Le fluide caloporteur, ainsi, est chauffé à environ 500°C destiné à un circuit d'eau pour avoir une vapeur qui entraîne une turbine et un générateur par la suite. [11]

Ce fonctionnement est schématisé dans la figure ci-dessous :

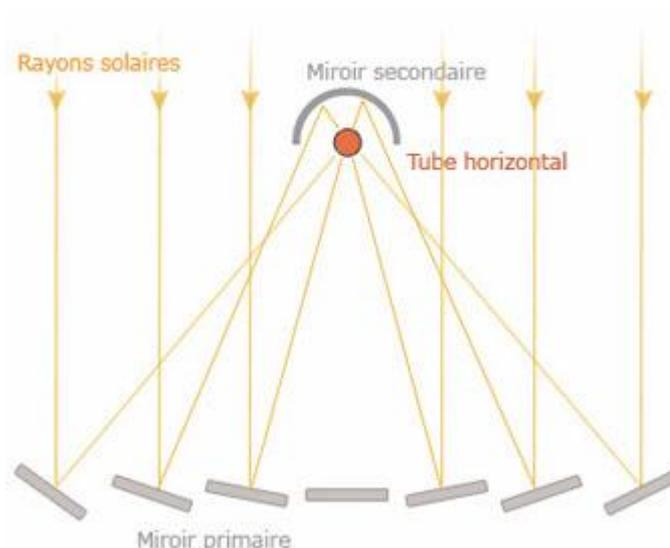


Figure I.7 : Principe de fonctionnement d'un concentrateur à miroirs de Fresnel [11].

b. *Avantage*

- Nombre de miroirs inférieur
- Durable grâce à l'absence du vide à l'intérieur du tube
- Réduction des contraintes mécaniques dues à la poussée du vent (plane)
- Coût inférieur.

c. *Inconvénients:*

- Performances optiques inférieures d'environ 30% par rapport aux collecteurs paraboliques et cylindro-paraboliques.[11]

Chapitre I: Systèmes de poursuite solaire

Puissance :	Moyennes et grandes centrales :
Température de fonctionnement :	200°C - 450°C
Réflecteurs :	Linéaire (suivi 1axe)
Récepteurs :	Linéaire fixe
Fluides caloporteurs :	Eau, sels fondus, huile.

Tableau I.3 : Données actuelles sur les collecteurs à miroirs de Fresnel.[10]

2.3. *Parabolique*

Ces capteurs ont la même forme de paraboles réceptrices de satellite et ils sont utilisés depuis de nombreuses années.

a. *Principe de fonctionnement*

Les capteurs paraboliques fonctionnent d'une manière autonome où ils sont orientés suivant deux axes (horizontal et vertical). La radiation captée est concentrée vers un point de convergence précis qui est appelé le foyer. C'est là où se trouve le récepteur du système.

Ce récepteur est généralement un gaz qui est fermé dans une enceinte. L'effet de concentration cause une montée de température de ce gaz qui entraîne par la suite un moteur Stirling qui convertit l'énergie solaire thermique en énergie mécanique qui est ensuite transformée en une énergie électrique. [12]

Puissance :	Moyennes et grandes centrales :
Température de fonctionnement :	300 °C- 1000°C
Réflecteurs :	Parabole (suivi 2 axes)
Récepteurs :	Centrale et mobile
Fluides caloporteurs :	Air

Tableau I.4 : Données actuelles sur les collecteurs paraboliques.[10]

b. *Avantage*

- Ce type de concentrateur peut être installé dans des endroits isolés non-raccordés au réseau électrique et c'est ce qui fait son principal avantage.
- Source d'énergie inépuisable et gratuite.
- Pas d'émission des gaz à effet de serre.
- Bon rendement.

c. *Inconvénient*

- Fonctionnement par intermittence.

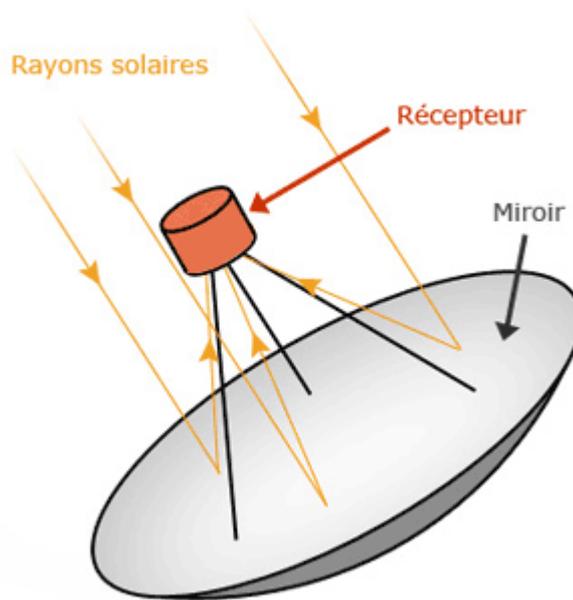


Figure I.8: Un schéma d'un capteur parabolique. [13]

2.4. Centrale solaire à tour

C'est la technologie la plus souple à l'utilisation. Elle contient deux blocs :

Bloc solaire qui comprend une succession de miroirs plans nommés héliostats en formant un champ qui est centralisé par une tour. Ces héliostats sont d'une orientation indépendante les uns des autres. Ils poursuivent le rayonnement solaire sur deux axes, afin de capter le rayonnement solaire et le réfléchir ainsi vers un récepteur situé au sommet d'une tour dans le but de convertir l'énergie solaire en chaleur.

Bloc puissance, il utilise un système à conversion thermoélectrique. Il est constitué d'un système d'eau sous forme de chaudière qui fait produire de la vapeur sèche. Cette vapeur actionne une turbine qui entraîne un générateur pour avoir à la fin de l'électricité.



Figure I.9 : Centrale à tour.[14]

Chapitre I: Systèmes de poursuite solaire

Ces deux blocs regroupent des sous-systèmes. Chaque système est lié à l'autre ; ce qui fait l'importance de chaque élément. Ils sont généralement classés comme suit [12] :

- Un système de collecte d'énergie, le champ solaire, qui contient des héliostats répartis en rangées. Ces miroirs poursuivent le soleil suivant deux axes.
- Le récepteur : pointé au sommet d'une tour, il arrive à absorber l'énergie solaire concentrée par les héliostats. Ce récepteur se manifeste sous forme d'un fluide caloporteur qui fait transmettre la chaleur à un bloc conventionnel.
- Echangeur de chaleur : dans cette partie le fluide caloporteur transmet son énergie thermique à un fluide de travail pour produire une vapeur sèche.
- Système de stockage thermique : il assure la production lors des perturbations nuageuses ou même dans la nuit.
- Système d'appoint : ce système se trouve dans les centrales hybrides. Son rôle est d'assurer la production lorsque la source solaire est très peu disponible. Dans ce cas le système de stockage thermique n'est plus nécessaire.
- Bloc de puissance :, là où se trouve le générateur de vapeur, la turbine, l'alternateur ainsi qu'un système de refroidissement.
- Système de contrôle.

Le schéma ci-dessous récapitule les deux blocs cités auparavant.

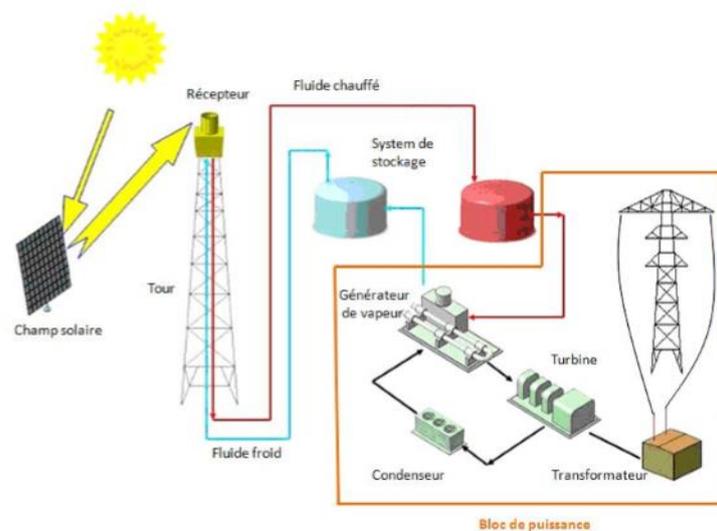


Figure I.10 : Schéma explicatif d'une installation d'une centrale à tour [12].

2.4.1. *Le champ solaire*

C'est la partie réceptrice de l'installation. Ce champ regroupe un nombre très important de collecteurs où il peut aller jusqu'à un millier. Guidés par des moteurs, les héliostats sont, donc, d'un mouvement automatisé qui dépend du calendrier solaire afin de réfléchir en permanence les rayons solaires vers la même cible.

La distance entre les collecteurs et le récepteur varie entre 100 et 1000m voire plus. Cette variation dépend de la taille du champ. La demande au niveau du bloc de puissance est directement proportionnelle avec la taille du champ.[15]

Chapitre I: Systèmes de poursuite solaire

En cas d'une forte pluie, les miroirs se positionnent en vertical contrairement au cas où le vent est très fort, les miroirs se positionnent en horizontal.

Le concept des champs solaires peut se manifester sous plusieurs configurations, dépendant essentiellement de l'implantation du récepteur:[15]

- Un champ d'héliostat en anneau ou circulaire pour un récepteur avec un absorbeur externe cylindrique de 360°. Ce type de champ est favorablement utilisé au niveau de l'équateur.
- Champ orienté nord/sud pour un récepteur à cavité qui contient une seule ouverture permettant la concentration des rayons. L'efficacité de cette configuration est maximale à midi.
- Champ elliptique où le récepteur inclut un concentrateur secondaire.

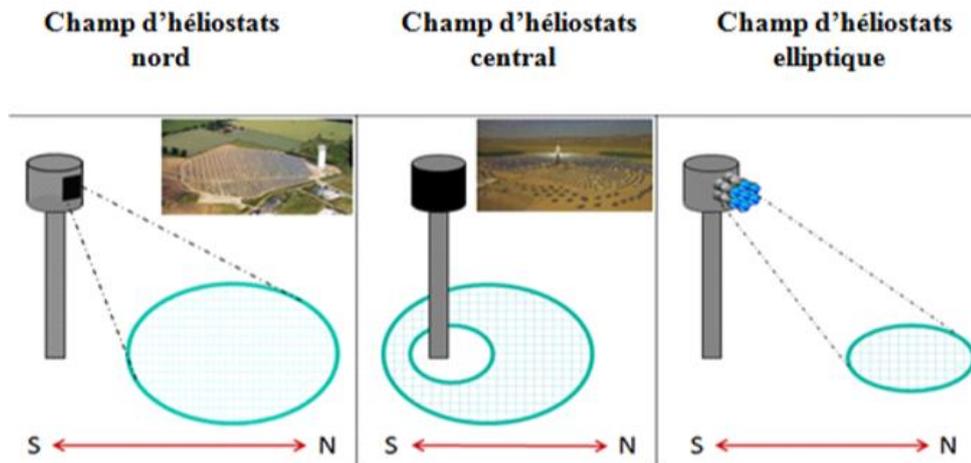


Figure I.11 : Différentes configurations d'un champ d'héliostat.[12]

2.4.1.1. Les composants d'un héliostat

L'héliostat comprend deux mots grec « helio » et « stat » qui signifient respectivement soleil et stationnaire. Stationnaire est dû au fait que les rayons solaires captés sont réfléchis au même point tout au long de la journée. Ce sont des miroirs presque plats avec une certaine courbure qui permet la focalisation des rayons solaires. Ces rayons sont concentrés vers un récepteur situé à la tête d'une tour de 100 à 1000 mètres de distance. [16]

Comme présenté dans la figure I.12 les principaux composants de ce dispositif sont [16] :

- Les miroirs réflecteurs.
- Une structure métallique.
- Un système de poursuite.
- Un système de commande.

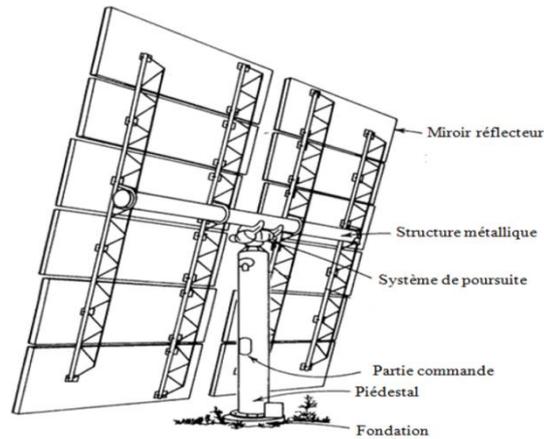


Figure I.12 : Composants d'un héliostat. [12]

a. Les miroirs réflecteurs

Afin de renforcer la transparence et d'améliorer le coefficient de réflexion par la suite, les miroirs sont fabriqués à partir d'un verre qui contient peu ou carrément pas de fer. C'est des verres qui ont une faible teneur en fer.

La deuxième façade des miroirs est recouverte d'un film réfléchissant à base d'argent et d'une peinture protectrice.[12][16]

b. La structure métallique

En plus de maintenir les héliostats avec précision et les diriger soigneusement vers le récepteur en haut de la tour, la structure métallique a pour but aussi de les protéger contre les charges du vent grâce à sa construction rigide. C'est une partie fixe dans la composition.

c. Système de poursuite

Les héliostats sont mouvementés à l'aide d'une monture. C'est la partie mécanique et il en existe trois types et c'est la monture altazimutale qui est la plus utilisée dans les systèmes de poursuite de l'astre solaire bien qu'elle possède une régulation très compliquée. Cette dernière est guidée sur deux axes comme on peut le constater sur la figure ci-dessous [17].

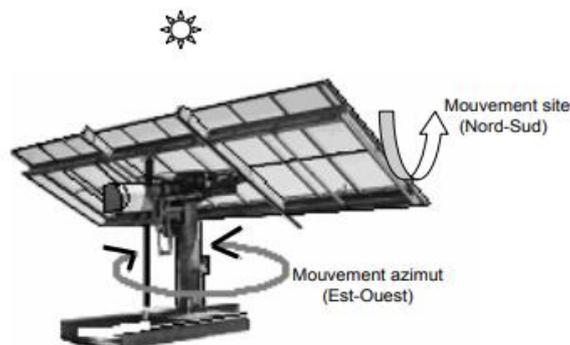


Figure I.13 : La monture altazimutale [17].

d. Système de commande

Le concentrateur doit être fixé à un point dans le ciel. Ce point représente la bissectrice entre le rayonnement solaire et le récepteur. Afin de maintenir cette position, l'héliostat est équipé d'un ensemble de composants électroniques et des algorithmes de commande qui font générer des signaux aux moteurs d'entrainements. C'est généralement un moteur à courant continu où un moteur pas-à-pas qui est utilisé à la commande.

Dans notre étude nous allons utiliser le moteur pas à pas.

2.4.1.2. Moteur pas à pas

2.4.1.2.1. Généralités sur le moteur pas à pas

C'est un convertisseur électromagnétique qui assure la transformation d'un signal électrique impulsionnel en un déplacement mécanique (angulaire ou linéaire). Il se compose de deux pièces séparées mécaniquement, le rotor et le stator, qui vont permettre à leur tour la rotation.

Ce moteur est caractérisé par le nombre de pas par tour. Un pas représente l'angle de rotation minimal entre deux modifications des impulsions électriques.

Application du moteur : Ce type de moteur est souvent utilisé dans:[18]

- Les distributeurs automatiques :
 - Banque.
 - Boissons- alimentations.
- Les péri-informatiques :
 - Imprimantes, scanner, machines à écrire...
- Orientation d'antennes.
- Accessoires automobiles.
- Certains appareils photo.
- Lecteurs de cartes magnétiques.
- Table de positionnement X, Y scanner médicaux.
- Horlogerie.

2.4.1.2.2. Types de moteurs pas à pas

Les moteurs sont classés selon le type d'alimentation et le nombre des bobines ainsi que la nature du rotor, on distingue alors, trois types de moteurs :

a. Moteur à aimant permanent

Cette famille des moteurs utilise le principe de l'action d'un champ magnétique sur un aimant (M.P) où on trouve les M.pap bipolaire contenant deux bobines (enroulements), ces enroulements permettent la commande du courant dans les deux sens (positif- négatif), par ailleurs le rotor possède plusieurs pôles nord-sud. [19]

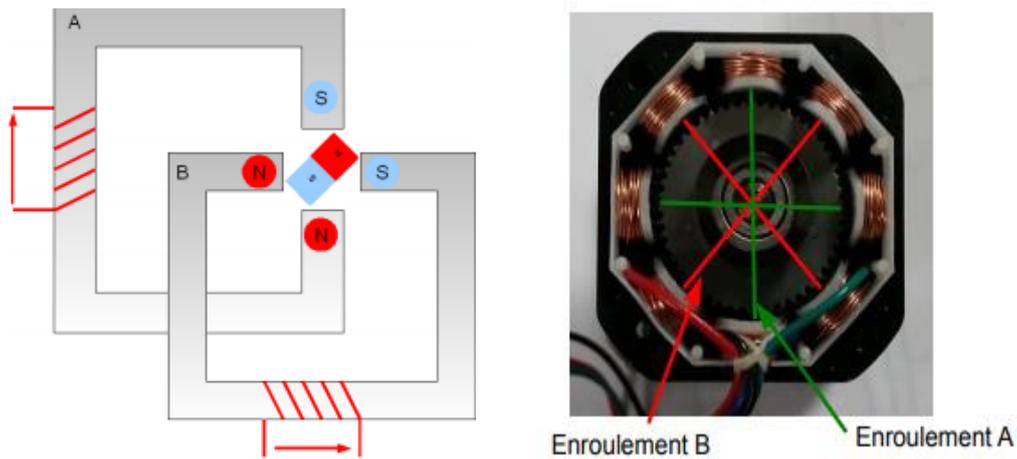


Figure I.14: Structure interne du moteur pas à pas Nema 17 [19].

b. Moteur à réluctance variable

Cette famille des moteurs utilise le principe du flux maximum (M.R.V), le rotor et le stator sont en fer doux.

Le stator comporte un nombre de pôles différents du rotor qui est un ferromagnétique sans aimant. Ce dernier se déplace pour que le flux le traversant soit maximal, dans le cas où les bobinages statoriques ne sont pas alimentés ce type de moteur ne présente pas de couple réactant.

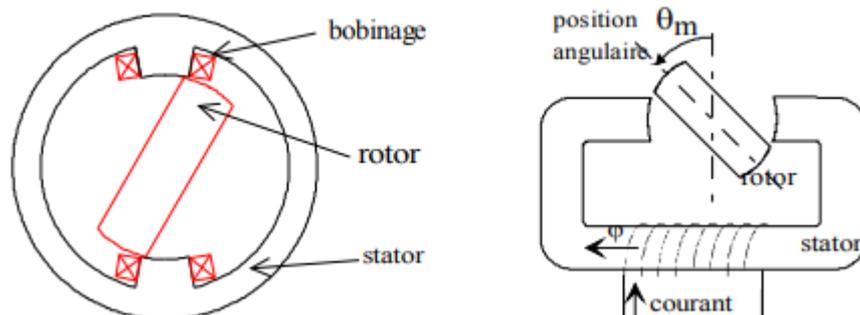


Figure I.15: Structure monophasée d'un m pap à réluctance variable [18]

c. Moteur hybride

C'est la combinaison des deux technologies (M.H), les aimants du moteur à aimant permanent sont placés dans un circuit ferromagnétique ce qui fait la naissance d'une nouvelle

Chapitre I: Systèmes de poursuite solaire

famille dans le groupe des moteurs pas à pas, c'est la famille des moteurs réductants polarisés où moteur hybride. Dans ce cas il existe un couple réductant dû à la variation de perméance propre associées à chaque aimant et à chaque bobine.

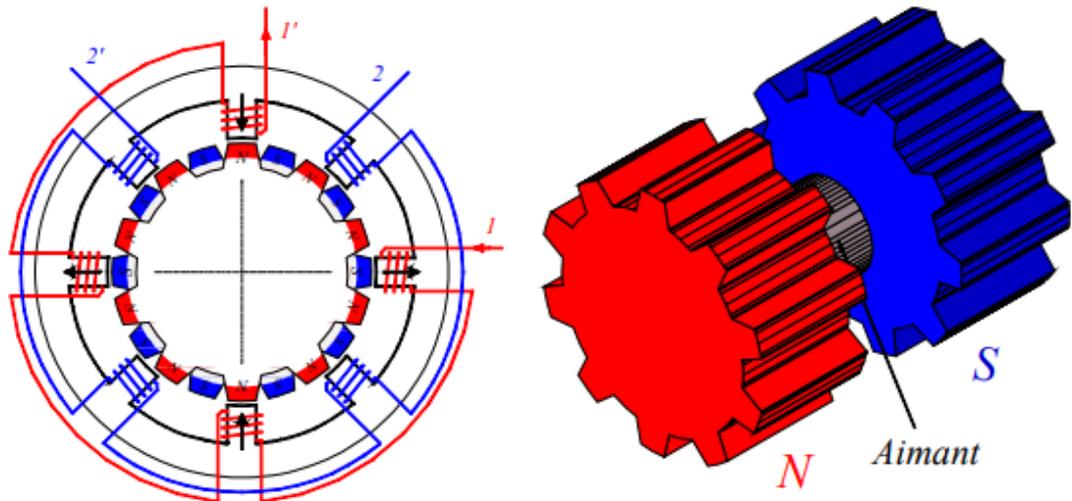


Figure I.16 : Structure d'un mpap hybride. [20]

2.4.1.2.3. Comparaison entre les trois types

Type de moteur	Moteur à aimant permanent	Moteur à réluctance variable	Moteur hybride
Résolution (Nombre de pas / tour)	Moyenne	Bonne	Elevée
Couple de moteur	Elevé	Faible	Elevé
Sens de rotation	Il dépend : - Du sens du courant pour le moteur bipolaire. - L'ordre d'alimentation des bobines.	Il dépend uniquement de l'ordre d'alimentation des bobines.	Il dépend : - Du sens du courant pour le moteur bipolaire. - De l'ordre d'alimentation des bobines.
Fréquence de travail	Faible	Grande	Grande

Tableau I.5 : Comparaison entre les trois types du moteur pas à pas.[20]

2.4.1.2.4. Inconvénients du moteur [18]

- Risque du dysfonctionnement de contrôle de position (perte de pas).
- Bruit acoustique

2.4.1.3. Le coût des héliostats

Le cout des héliostats représente 40 à 50% du coût total d'une centrale électrique solaire à récepteur central. Le tableau ci-dessous montre en pourcentage le coût des principaux composants [16] :

Constituants	Pourcentage
Système de poursuite et de guidage	30 à 35%
L'ensemble des miroirs	25 à 30%
La structure métallique	15 à 20%
L'installation et l'assemblage	10 à 15%
Piédestal et fondation	10 à 15%
Contrôles	5 à 10%

Tableau I.6 : Coût en pourcentage des principaux constituants d'un héliostat par rapport au coût total d'un héliostat.

2.4.2. *Fluide caloporteur*

La conversion de l'énergie solaire concentrée en une énergie thermique se fait tout en chauffant le fluide caloporteur. Cependant, le choix du fluide est très important pour déterminer la température maximale admissible. Trois types alors, sont cités :

a. Les sels fondus :

C'est un fluide synthétique qui se compose de 60% de nitrate de sodium (NaNO_3) et 40% de nitrate de potassium (KNO_3).

Ce fluide est caractérisé par une grande capacité thermique volumique et une faible conductivité thermique.[12]

b. L'eau : C'est un fluide idéal grâce à sa grande capacité

c. Air : l'air est souvent utilisé dans les turbines à vapeur, sa température de fonctionnement est de l'ordre de 850° avec une pression de 12 bar.

2.4.3. *Stockage :*

La centrale solaire est équipée d'un système de stockage thermique afin de combler le manque et d'assurer un fonctionnement continu lors d'une insuffisance ou d'une absence de la source solaire.

Deux types de stockage thermique sont distingués et qui dépendent essentiellement du fluide caloporteur utilisé.

a. Sels fondus :

Cette technologie ne présente particulièrement pas de difficultés de manipulation, elle consiste à stocker des sels fondus chauffés dans un réservoir qui les maintient à haute température et les libère pour produire de l'électricité en cas des pics de consommation, soit en général à la tombée de la nuit. Cette chaleur peut être stockée pendant plusieurs heures ou même jours.

La figure ci-dessous schématise le fonctionnement de cette technologie.

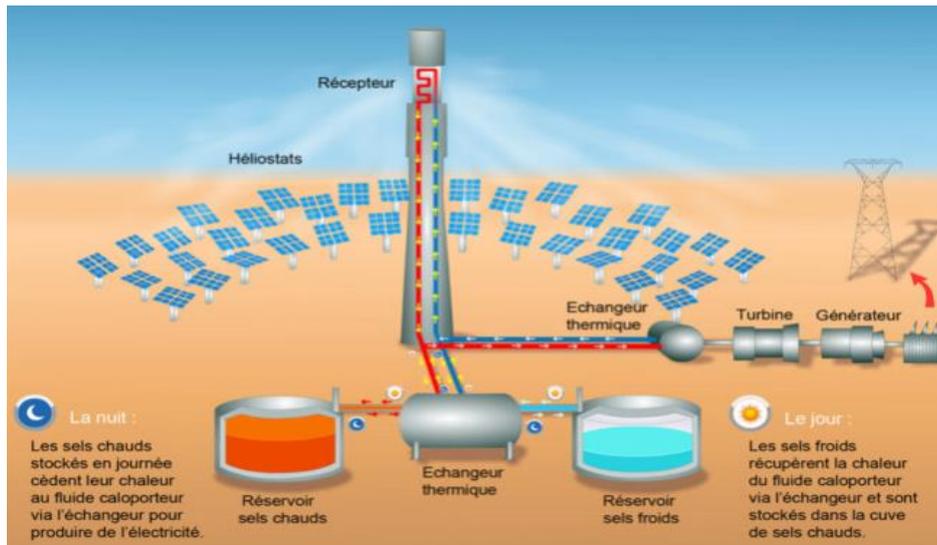


Figure I.17 : Stockage des sels fondus.[21]

b. Air

L'air est caractérisé par sa faible capacité calorifique. Par exemple, pour transporter une énergie thermique récoltée par un récepteur, un débit volumique d'air chaud (185-800°C) est environ 2000 fois plus grand que celui des sels fondus à (250-500°C)

et c'est là où des tuyauteries à sel de 32cm de diamètre devraient être remplacées par des conduites à air de 4.6m de diamètre. [22]

2.4.4. Bloc de puissance

Le couplage d'une turbine à vapeur d'eau et d'un alternateur permet une transformation thermo-électrique de l'énergie solaire. Cette transformation se fait d'une façon conventionnelle.

Passant par une série d'échangeurs, le fluide caloporteur chauffé au récepteur cède son énergie à l'eau afin de produire de la vapeur. La vapeur prend son chemin vers la turbine où elle se dilate, la turbine entraîne un alternateur qui convertit l'énergie mécanique en électricité.

Quant au fluide caloporteur froid, il retournera vers la chaudière pour se chauffer à nouveau.

2.5. Les coordonnées Célestes

2.5.1. Les coordonnées graphiques

Les coordonnées célestes sont des coordonnées angulaires ; ils permettent le repérage d'un point sur la terre. Ces coordonnées utilisent l'angle d'attitude et l'angle de longitude.

2.5.1.1. *L'attitude ϕ*

C'est une mesure angulaire ; caractérise l'angle que fait le plan de l'équateur avec la direction qui relie le centre de la terre au point considéré. L'attitude de l'équateur terrestre égale donc à 0° .

2.5.1.2. *Longitude λ*

Le méridien local passant par le point considéré fait cet angle avec le méridien d'origine qui passe par la ville Greenwich. On a choisi pour le méridien (Origine 0°) le plan qui passe par l'observatoire situé à Greenwich.

Le signe (+) est affecté au méridien qui se situe à l'est du méridien de référence

Le signe (-) est affecté au méridien qui se situe à l'ouest du méridien de référence

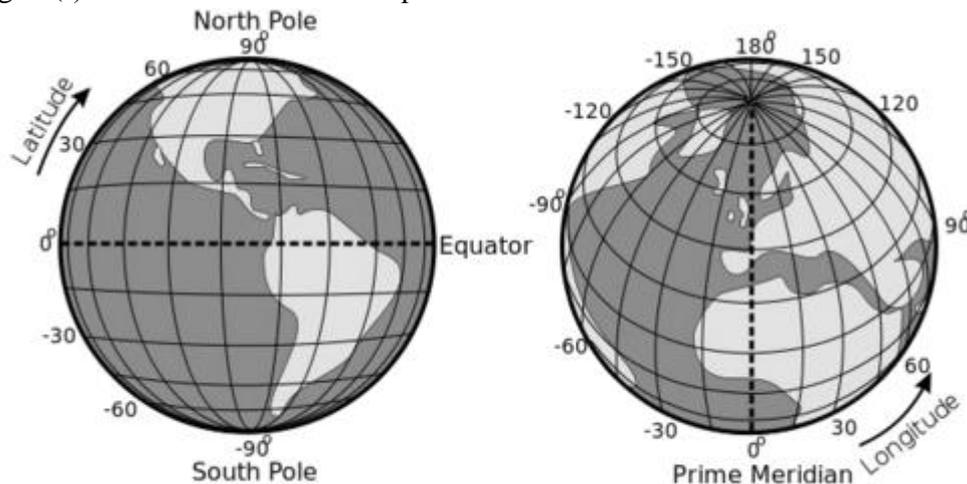


Figure I.18 : Angles de longitude et latitude de la terre [23]

2.5.2. *Coordonnées équatoriales*

2.5.2.1. *L'ascension droite*

A partir d'un point de référence, cet angle est mesuré sur l'équateur ; le point vernal qui caractérise l'intersection entre l'équateur céleste et l'écliptique. L'angle est mesuré vers l'est en comportant 24 divisions principales et 15 degrés chacune nommée heure (l'heure contient des minutes et secondes).

2.5.2.2. *La déclinaison*

C'est l'angle perpendiculaire entre l'équateur céleste et l'objet céleste observé ; cette mesure est en degrés :

Positif pour les objets qui se situent dans l'hémisphère nord

Négatif pour les objets qui se situent dans l'hémisphère sud

La variation de cette mesure varie dans l'intervalle $[-90^\circ, +90^\circ]$ en passant par 0° à l'équateur céleste.

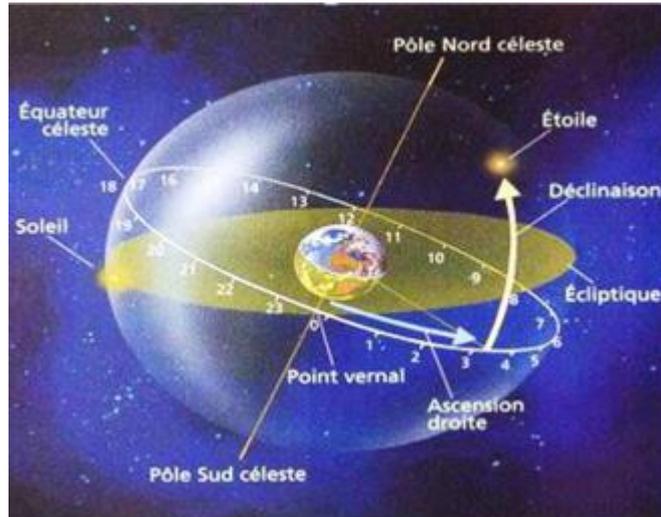


Figure I.19 : Coordonnées équatoriales [23]

2.5.3. Cordonnées horaires

2.5.3.1. Déclinaison du soleil δ

C'est l'angle mesuré entre la direction du soleil et le plan équatorial, sa variation pendant l'année varie entre $-23,45^\circ$ et $+23,45^\circ$, sa valeur est nulle aux équinoxes (21 Mars, 21 Septembre). La déclinaison atteint sa valeur maximale en solstice d'été (21 Juin) et sa valeur minimale en solstice d'hiver (21 Décembre) ; elle est calculée par la forme suivante : [24]

$$\delta = 23,45^\circ \sin[0.980(n + 284)] \dots \dots \dots (1)$$

Avec : n est le numéro du jour de l'année

2.5.3.2. L'angle horaire du soleil ω

Représente l'arc compris entre le plan méridien du lieu et le rayonnement solaire incident ; sa valeur est nulle à midi solaire, négative pendant le matin et positive dans l'après-midi et augmente de 15° par heure. [29]

$$\omega = 15(TSV - 12) \dots \dots \dots (2)$$

Avec **TSV** : temps solaire vrai

2.5.4. Coordonnées Horizontales et azimutales

2.5.4.1. Hauteur angulaire du soleil h

C'est l'angle entre la direction du soleil avec sa projection sur un plan horizontal. [24]

$$\sin(h) = \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \dots \dots \dots (3)$$

Avec : φ : latitude du lieu

Chapitre I: Systèmes de poursuite solaire

2.5.4.2. L'azimut a

C'est l'angle entre le méridien du lieu et le plan vertical qui passe par le soleil ; il est compté positif de 0 à 180° vers l'ouest et négatif de 0° à 180° vers l'est. [25]

$$\sin(a) = \cos(\delta) \cdot \frac{\sin(\omega)}{\sin(h)} \dots \dots \dots (4)$$

Avec :

ω : angle horaire, h : hauteur du soleil, δ : déclinaison du soleil

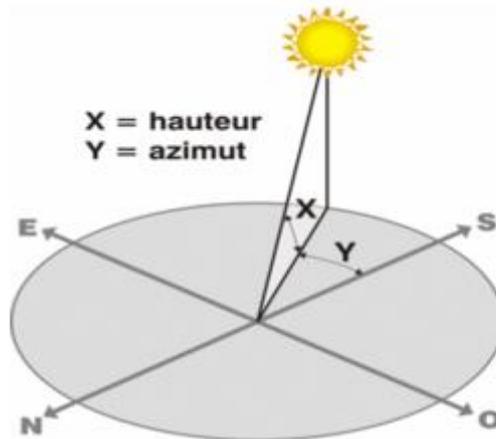


Figure I.20 : Les coordonnées azimute a et hauteur h [23]

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons récapitulé les deux méthodes privilégiées dans la captation de l'énergie solaire. Nous avons fait une étude détaillée sur les centrales à tour solaire et dans le chapitre qui suit nous allons faire une modélisation mathématique pour les héliostats.

Modélisation du système de poursuite Azimut-Élévation

Introduction

L'objectif de notre travail est de commander un héliostat (miroir de 1m^2 et qui pèse d'environ 30Kg), dédié à une centrale solaire à tour, réfléchissant le rayonnement solaire vers une cible fixe (le récepteur) à l'aide d'un système de poursuite solaire à deux axes.

Pour cela, des moteurs électriques sont utilisés afin de commander les deux axes de la monture de l'héliostat (soit deux moteurs pour chaque héliostat du champ).

Les performances seront liées principalement au choix juste de type et des caractéristiques du moteur

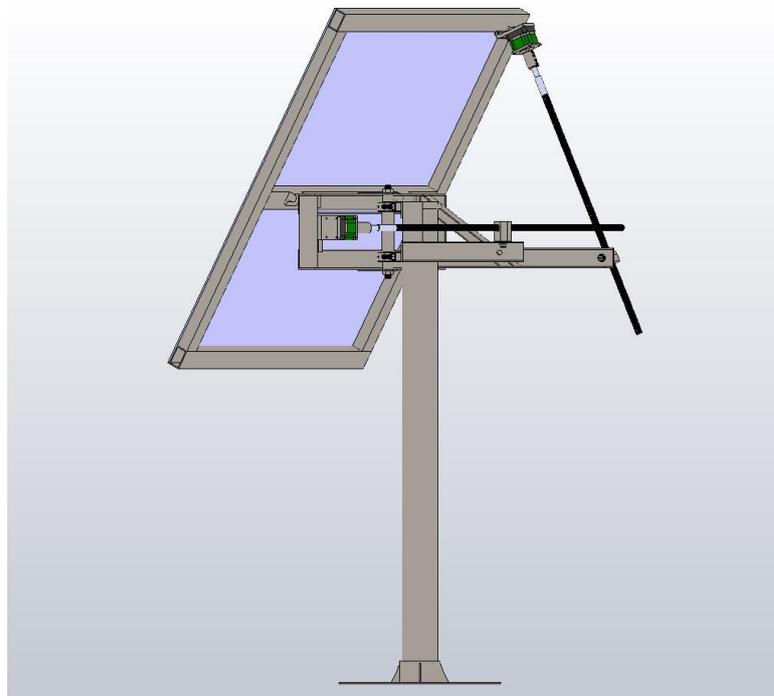


Figure II.1 : Modèle géométrique développé au CDER [25]

$$\omega = 15(TSV - 12) \quad (2)$$

TSV est le temps solaire en 24 heures. Il s'écrit sous la forme suivante [26] :

$$TSV = TL - DE + \left(\frac{E_t + 4L}{60} \right) \quad (3)$$

TL : Est le temps donné par la montre.

DE : Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich (Égale 1 pour l'Algérie).

L : Longitude du lieu.

E_t : La correction de l'équation de temps.

$$E_t = 9,87 \sin(2DJ) - 7,53 \cos(JD) - 1,5 \sin(JD) \quad (4)$$

Avec:

$$JD = (360/365)(N - 81) \quad (5)$$

Etant donné que l'observateur (Q) (Figure II.2) est situé sur la surface de la terre à la latitude (Φ), la position du vecteur solaire (S) est définie dans le système de coordonnées surface de la terre en fonction de l'angle d'altitude du soleil (α) et de l'angle azimutal du soleil (A).

Les angles d'altitude et azimutal du soleil sont définis respectivement comme suite [26,27] :

$$S1 \left\{ \begin{array}{l} \alpha = \text{Arcsin}(\sin\delta\sin\Phi + \cos\delta\cos\omega\cos\Phi) \quad (6) \\ A = \text{Arccos} \left[\frac{(\sin\delta\cos\Phi - \cos\delta\cos\omega\sin\Phi)}{\cos\alpha} \right] \quad (7) \end{array} \right.$$

Si $\sin \omega > 0$ donc : $A = 2\pi - A$

1.2. Les angles d'héliostat

Les positions des Héliostats par rapport à la tour peuvent être définies en utilisant l'angle de face (φ) et l'angle focal (λ).

Chapitre II: Modélisation du système de poursuite Azimut-Elévation

L'angle d'inclinaison θ se manifeste comme suite :

$$\theta = 0,5 \text{Arccos}(-\text{SinySin}\alpha + \text{CosySin}\varphi\text{CosaSinA} + \text{CosyCos}\varphi\text{CosaCosA}) \quad (8)$$

L'angle focal est d'une relation directe avec la distance (d) Héliostat-Tour, (voir la figure ci-après).

$$\lambda = \text{arctg}\left(\frac{H_t - r}{d}\right) \quad (9)$$

Où : H_t : Hauteur de la tour.

r : Hauteur d'Héliostat.

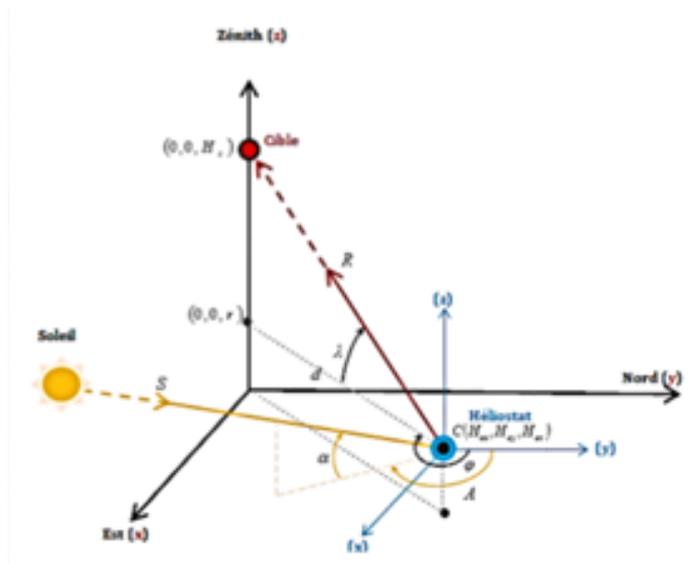


Figure II.3 : Rayons incident et réfléchi [26]

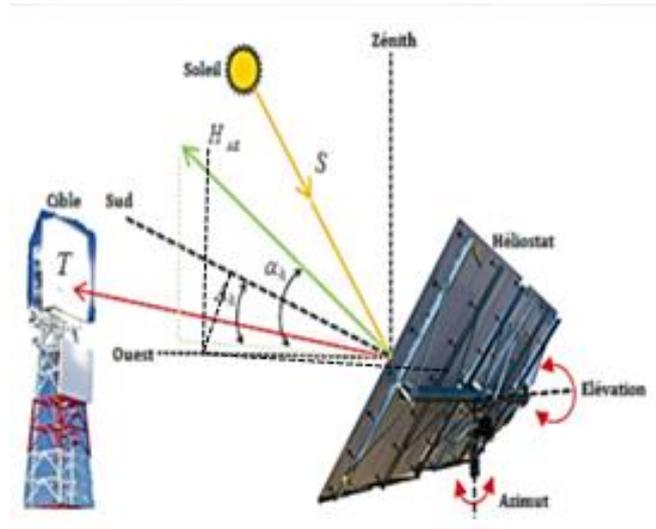


Figure II.4: Définition des deux angles de poursuite AE [26]

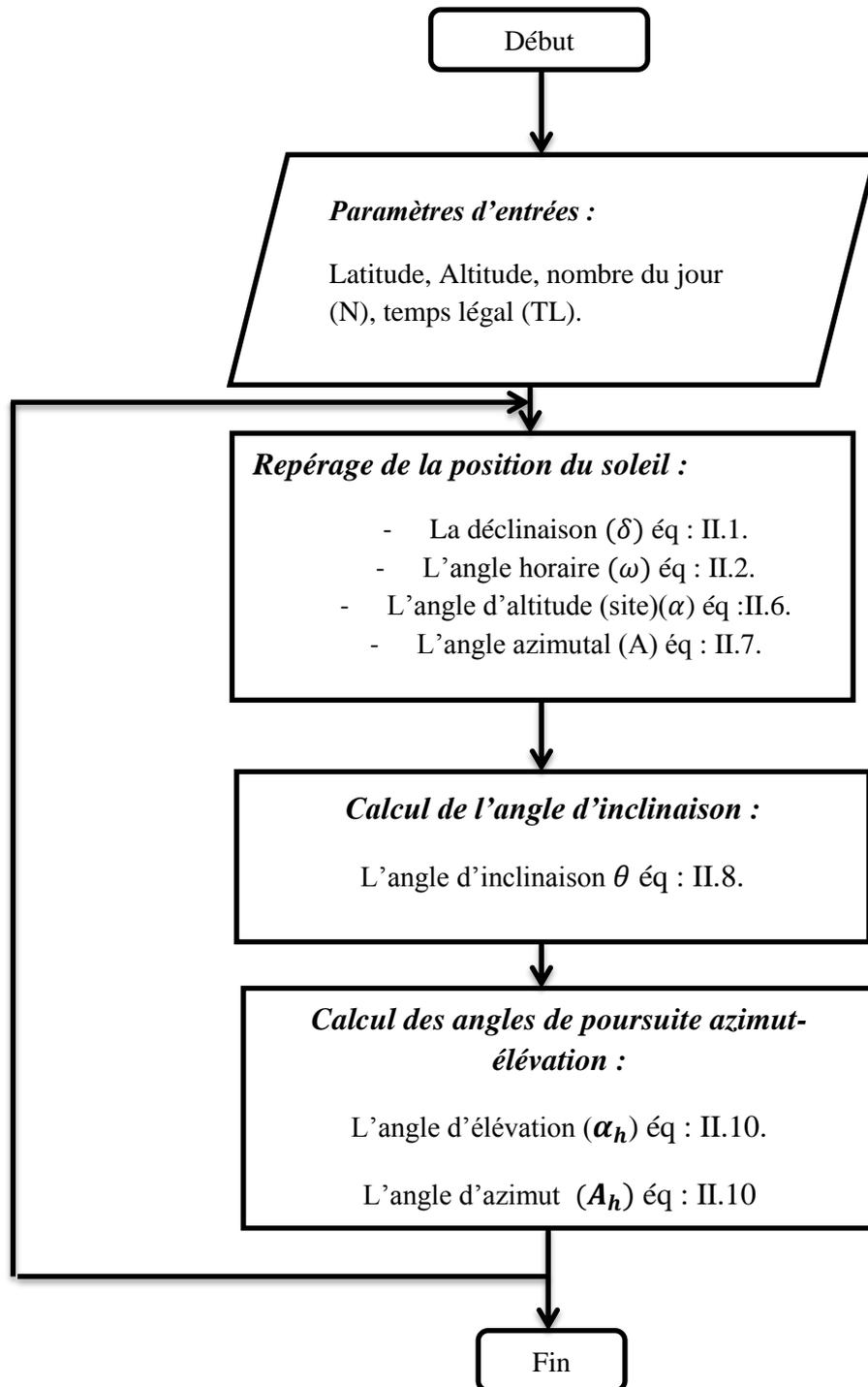
Pour la méthode de poursuite du soleil type Azimut-Elevation (AE), le système de coordonnées est lié au repère (surface-terre) où le vecteur normal de l'héliostat (H_{AE}) est défini en fonction de l'angle d'azimut (A_h) et de l'angle d'élévation (α_h) (voir figure II.4). Ces derniers peuvent être dérivés exclusivement à partir de la loi de réflexion concernant le vecteur de position du soleil (S), le vecteur de position de la cible (T) et le vecteur normal de l'Héliostat (H_{AE}). Ce qui donne :

$$S_2 \begin{cases} A_h = \sin^{-1} \left(\frac{\cos \alpha \sin A + \cos \lambda \sin \varphi}{\cos^2 \alpha + \cos^2 \lambda - 2 \cos \alpha \cos \lambda \cos(A + \varphi)} \right) \\ \alpha_h = \sin^{-1} \left(\frac{\sin \alpha + \sin \lambda}{\sqrt{2(1 + \sin \alpha \sin \lambda - \cos \alpha \cos \lambda \cos(A + \varphi))}} \right) \end{cases} \quad (10)$$

La position de repos de l'Héliostat est telle qu'il est dirigé vers le zénith ($\alpha_h = +\pi/2$) et orienté vers le sud ($A_h=0$). Le sens positif d'azimut est dirigé vers l'Ouest.

Les montures qui portent les héliostats assurent la rotation de ces derniers selon deux degrés de liberté et à partir des équations développées précédemment nous avons construit l'organigramme de poursuite à deux axes de l'héliostat.

1.3.Organigramme de système de poursuite Azimut – élévation



FigureII.5 : Organigramme de poursuite solaire, méthode (AE).

Conclusion

Ce chapitre contient une modélisation mathématique du système de poursuite solaire type azimut – élévation, en utilisant les différentes équations solaire et celle d'héliostat.

Cette combinaison a mené à construire l'organigramme de la poursuite solaire et de faire la simulation de l'héliostat qui aura lieu dans le chapitre suivant.

Simulation d'un héliostat

Introduction

Après avoir connu les différentes coordonnées et les manipuler en faisant la modélisation des angles de poursuite azimut et élévation, il est temps de passer à l'action et de voir le comportement d'un héliostat commandé par ce type de poursuite durant n'importe quelle journée de l'an.

Ce chapitre contiendra la simulation de ce capteur sous le logiciel Proteus : ISIS, c'est un logiciel qui permettra d'avoir des résultats proches de la réalité.

Dans un premier lieu, nous allons faire connaître les différents composants du système et dans seconde lieu, nous allons faire la simulation, voir les résultats et les interprétés.

1. Schéma synoptique :

En effet, le système regroupe trois composants important qui sont cités et schématisé comme suite:

- ❖ Une unité de contrôle et de traitement qui est un microcontrôleur de type PIC18F2685.
- ❖ Une horloge de temps réel en utilisant le module DS1302.
- ❖ Une unité d'affichage sous la forme d'un afficheur LCD.

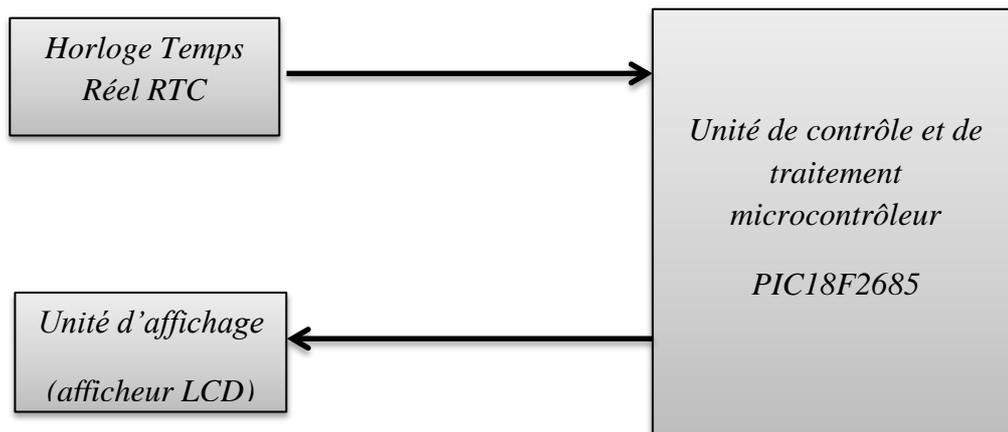


Figure III.1 : schéma synoptique du système.

1.1. Le PIC

1.1.1. Définition du pic microcontrôleur

De nos jours, les microcontrôleurs sont principalement implantés dans la plupart des applications grande public où professionnelles.

Un microcontrôleur représente une unité de traitement de l'information de type microprocesseur ; Ce microprocesseur est un circuit intégré complexe qui résulte son intégration par le biais d'une puce de fonctions logiques combinatoires (logique et/ou arithmétique) et séquentielles (registre, compteur,..) qui lui permettent d'interpréter et d'exécuter les instructions des différents programmes. [28]

Chapitre III: Simulation d'un héliostat

Des périphériques internes sont mis afin de faciliter la réalisation des montages et d'éliminer l'ajout des composants annexes. C'est ce qui fait l'autonomie d'exécution des programmes.

Dans les années 90, la société Américaine Microchip Technologie a mis au point un microcontrôleur CMOS : le PIC (Peripheral Interface Controller). Il représente un compromis entre simplicité d'emploi, rapidité et prix de revient.

1.1.2. Classification des PIC

A présent, les microcontrôleurs se répartissent en trois grandes familles, comportant chacune plusieurs références, on cite :

- Base-Line : où les instructions sont codées sur 12 bits.
- Mid-Line : où les instructions sont codées sur 14 bits.
- High-End : où les instructions sont codées sur 16 bits.

1.1.3. Identification des PIC's

Chaque PIC est principalement identifié une référence de forme : « xx(L)XXyy-zz » , ce qui représente :

- xx : Famille du composant, notamment « 12,14,16,17 et 18 »
- L : tolérance plus importante de la plage de tension.
- XX : type de mémoire programme :
- C : EPROM où EEPROM.
- CR : PROM.
- F : flash.
- yy : Identificateur.
- z : vitesse maximale du quartz de pilotage.

1.1.4. Choix du PIC 18F2685

Il est lié principalement aux ressources internes qu'il dispose. [28]

- Fonctionne à 40 Mhz maximum.
- Il possède 75 instructions.
- 96 Kb de la mémoire dédié au programme.
- 3328 Kb de RAM.
- 1024 bits d'EEPROM.
- 4 timers .
- 1 compteur.
- 19 sources d'interruptions.
- 25 entrées/ sorties configurables individuellement, dont 8 analogiques.
- Watchdog.

Chapitre III: Simulation d'un héliostat

1.1.5. Le brochage du PIC

➤ Le brochage de ce type de PIC est comme suite :

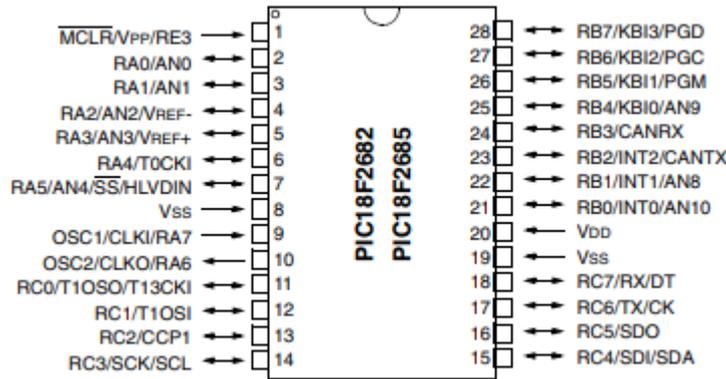


Figure III.2: Branchement du PIC18F2685.[28]

➤ Et son schéma fonctionnel est le suivant :

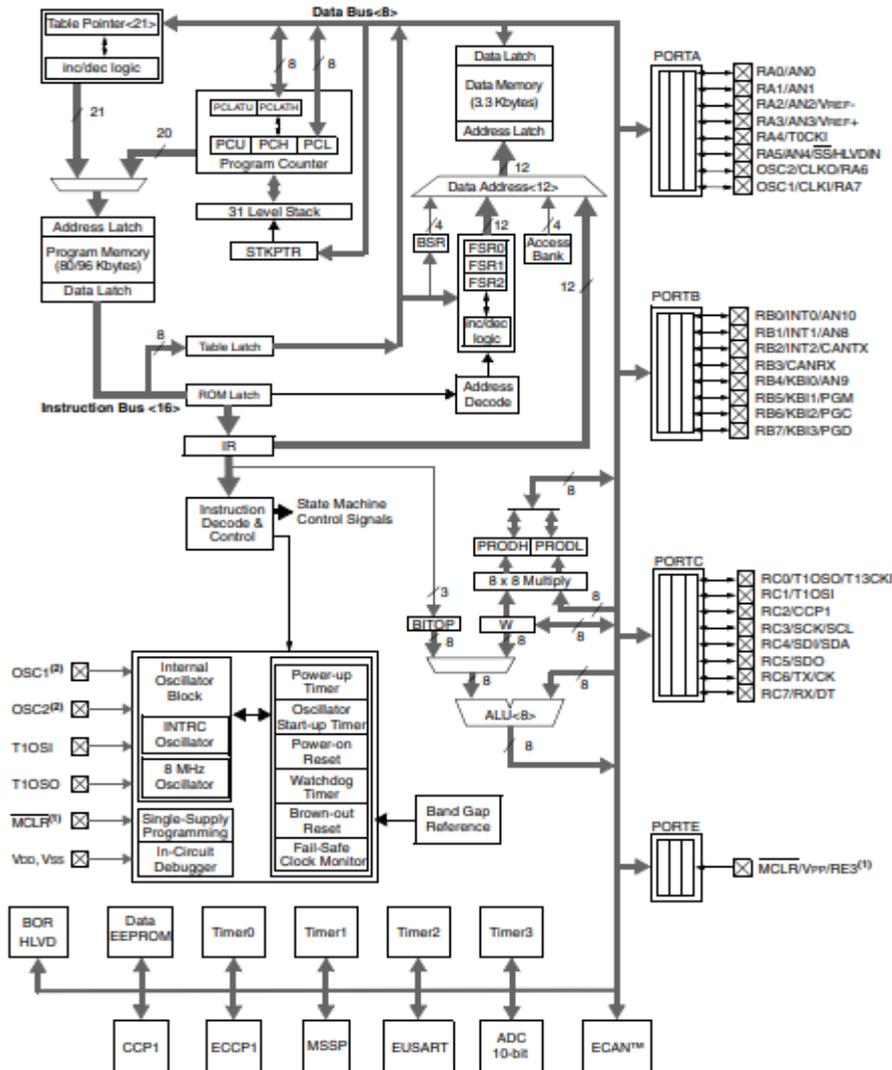


Figure III.3 : Schéma interne du PIC18F2685.[28]

1.2. l'horloge RTC

L'exécution d'une opération de poursuite solaire dépend de la date et de l'heure. Le calcul de ces derniers ne doit pas s'arrêter lorsque le système s'arrête, c'est pour cela il est nécessaire d'utiliser un module d'horloge en temps réel (RTC).

L'horloge RTC est un système capable de garder la trace de n'importe quelle heure à n'importe quel moment avec une très faible consommation d'énergie et une très haute précision. Cette horloge est reliée avec un oscillateur à cristal de 32.768 KHz qui lui représente une source d'alimentation lorsque la source d'alimentation principale est éteinte ou indisponible.

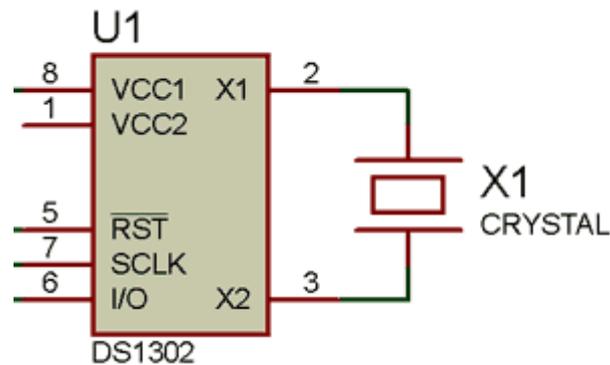


Figure III.4 : le module DS1302.

1.3. Afficheur LCD

Cet afficheur est l'interface visuelle entre l'utilisateur et le système. Il est chargé de transmettre les informations et affiche les données susceptibles d'être exploiter pas l'utilisateur d'un système.

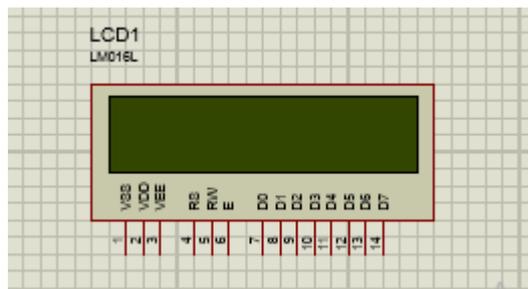


Figure III.5: un afficheur LCD.

2. Logiciel Proteus

Proteus est un logiciel qui est destinée à l'électronique, cette suite est développée par la société Labcenter Electronics ; les logiciels qui font partie du Proteus facilitent la CAO dans la filière d'électronique.

Proteus se compose de deux logiciels :

❖ ISIS : Permet la création, la modélisation et la simulation des schémas électriques

Chapitre III:Simulation d'un héliostat

- ❖ Ares : Permet la création des circuits imprimés

Ce logiciel est très utilisée dans le domaine d'électronique ; plusieurs entreprises et organismes l'intègrent dans leurs formations grâce à la fiabilité des résultats et aux avantages possédés dont :

- La facilité de l'utilisation des logiciels contenus dans le pack.
- Lors de la conception du projet, l'outil de création de prototype virtuel permet de réduire les couts matériels et logiciels.

- ❖ **1-ISIS :**

Le logiciel Isis de Proteus est utilisé pour l'édition des schémas électriques, il permet aussi de simuler ces schémas ce qui facilite de capter les erreurs conçus dès la première étape (conception).

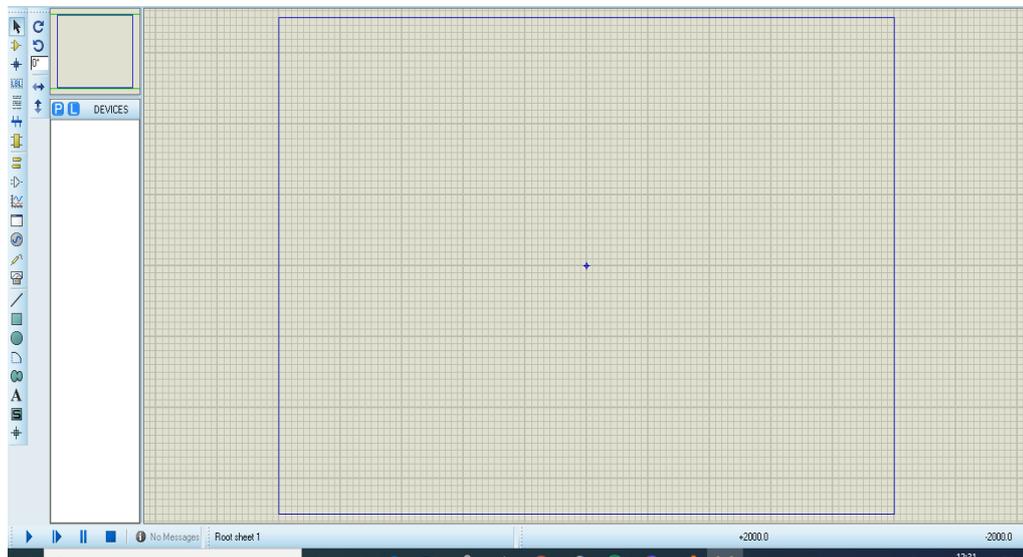


Figure III.6: Capture d'interface d'ISIS

- ❖ **2-ARES :**

Ce logiciel est un outil pour faire l'édition et le routage qui est en complicité avec Isis ; on peut importer facilement un schéma électrique réalisé sur Isis sur ARES pour la réalisation du PCB de la carte électronique.

L'édition manuelle d'un circuit imprimé est plus efficace, d'ailleurs ce logiciel permet le placement automatique des composants et la réalisation automatique du routage.



Figure III.7 : Capture d'interface d'ARES

3. Composants du système :

Suite aux composants principaux mentionnés auparavant, nous ajoutons aussi :

3.1. Résistances :

Huit résistances de 572Ω pour la protection des composants électroniques.

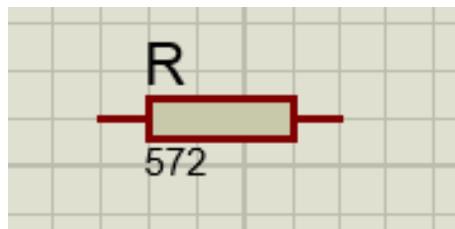


Figure III.8 : résistance 572Ω

3.2. Transistors :

Huit transistors sont utilisés dans notre prototype. C'est un dispositif semi-conducteur utilisé pour amplifier ou commuter des signaux électroniques.

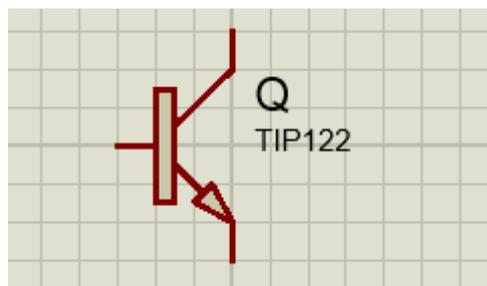


Figure III.9 : un transistor.

3.3. Condensateur :

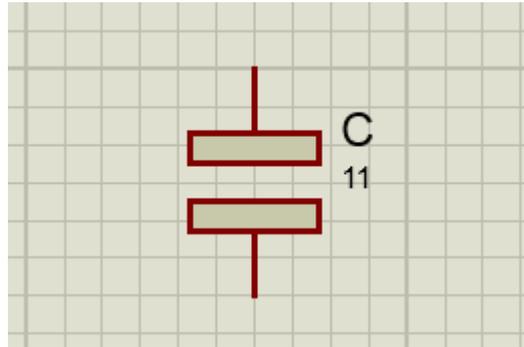


Figure III.10: un condensateur.

3.4. Moteur pas à pas

Deux moteurs pas à pas ont été utilisés afin de contrôler chacun un angle précis.

Dans ce système nous avons utilisé les moteurs pas à pas à aimant permanent suite aux avantages que présentent ces derniers:

- Moteurs de positionnement.
- Haute précision.
- Couple important.
- Coût très bas du moteur.
- Couple de maintien à l'arrêt même sans alimentation.

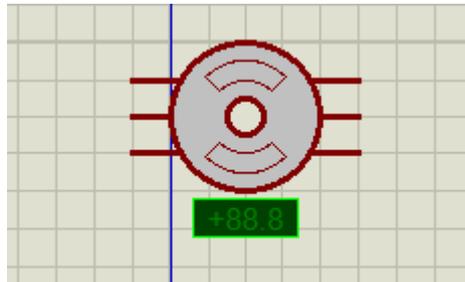


Figure III.11 : Un moteur pas à pas.

3.5. Un potentiomètre

C'est une résistance variable utilisée dans le branchement de l'afficheur LCD.

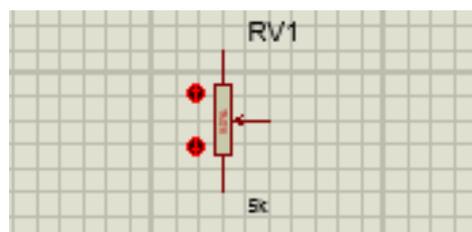


Figure III.12: Un potentiomètre.

Chapitre III: Simulation d'un héliostat

4. La simulation du circuit

Cette simulation a eu lieu du 6h de matin à 18h de soir par journée, pour trois journées différentes de l'année ; une journée du mois de Décembre (N=356), une journée du mois de Juin (N=173) et la 3^{ème} journée c'est l'équinoxe de Mars (N=81).

Dans le but d'avoir des résultats proches de la réalité, nous avons opté pour « Ghardaïa » comme lieu d'étude, c'est l'une des régions qui dispose d'un gisement solaire important dans le territoire Algérien, de telle sorte que son irradiation globale journalière sur un plan horizontal est de l'ordre de 6000 Wh/m² en moyenne annuelle. Ce qui fait de cette région, la zone parfaite pour faire une étude de poursuite solaire.

Ces coordonnées sont comme suite :

Latitude (φ)	Longitude (L)	Angle focal (γ)	Angle de face (\emptyset)
32.4 °	3.8 °	15 °	0 °

Tableau III.1 : Données géographiques du site de Ghardaïa.

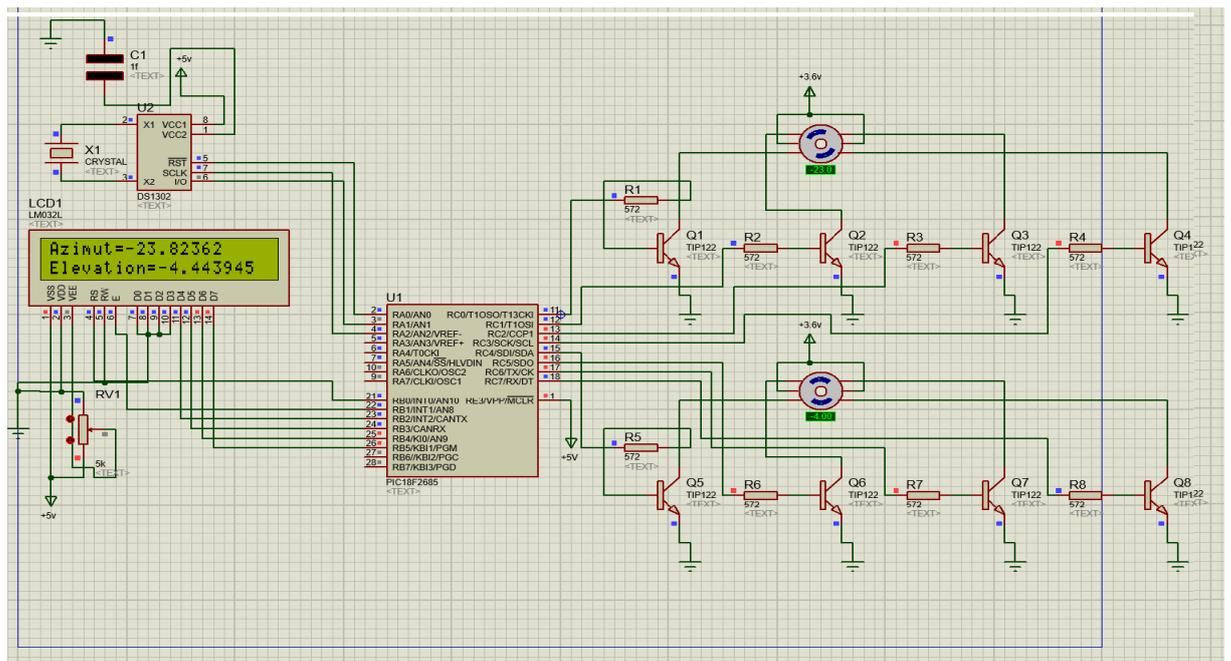


Figure III.13 : Fenêtre du logiciel de simulation.

4.1. Principe de fonctionnement

Le PIC représente le cerveau de ce système, une fois le système est mis sous-tension cette carte s'initialise et prend comme données de base:

- La position de l'héliostat par rapport à la surface de la terre, définit par:
 - La latitude.
 - La longitude.
- La position de l'héliostat par rapport à la tour, définit par:

Chapitre III: Simulation d'un héliostat

- L'angle focal et l'angle de face.

Ces données sont injectées directement dans le programme et considérées comme des constantes.

➤ Les données horaires :

- Le numéro de journée.

- Le temps légal.

Cela est directement lié à l'horloge RTC qui maintient le calcul du temps même lorsque le PIC est en mode OFF.

- Le temps du lever (TLS) et du coucher (TCS) de soleil, ces données sont injectées au programme.

Le programme calcule en premier lieu la différence entre TL et TLS et la différence entre TL et TCS et déclenche le Timer et le Watchdog.

Le Timer envoie une interruption interne qui va droit aux moteurs pas à pas.

En fin de journée où $TCS < TL < TLS$, l'héliostat prend sa position de repos qui est parallèle au sol et orientée vers l'EST afin de minimiser les frottements avec le vent.

5. Résultats et interprétations :

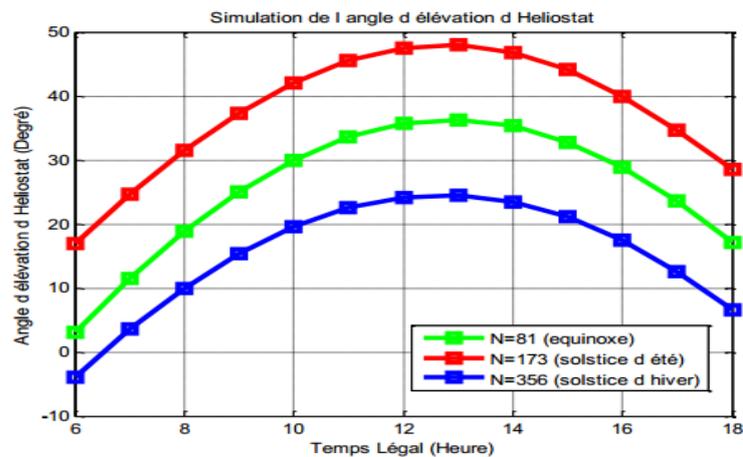


Figure III.14 : Simulation de l'angle d'élevation d'un héliostat.

Les courbes obtenues représentent la variation de l'angle d'élevation en degré en fonction du temps légal (par heure), nous remarquons que les trois courbes sont d'une même allure. De 6h à 13h, l'angle d'élevation augmente jusqu'à ce qu'il atteigne un pic.

Sauf que la plage de la variation de cet angle diffère d'une saison à une autre, pour :

- La saison d'hiver, N=356, l'angle varie de -5° à $+25^{\circ}$.

- La saison de printemps, N=81, l'angle varie de $+3^{\circ}$ à $+38^{\circ}$.

- La saison d'été, N=173, l'angle varie de $+18^{\circ}$ à $+49^{\circ}$.

Chapitre III: Simulation d'un héliostat

Durant cette période de la journée, le soleil prend une trajectoire de l'Est jusqu'à ce qu'il atteigne son point maximal et cela peut justifier le Pic qui apparaît dans la variation de l'angle d'élévation.

De 13h à 18h, l'angle d'élévation connaît une diminution remarquable :

- La saison d'hiver, N=356, l'angle varie de +25 ° à +8 °
- La saison de printemps, N=81, l'angle varie de +38 ° à +18 °
- La saison d'été, N=173, l'angle varie de +49 ° à +28 °

L'écart entre ces trois courbes est dû au changement d'ensoleillement connu pendant ces trois saisons.

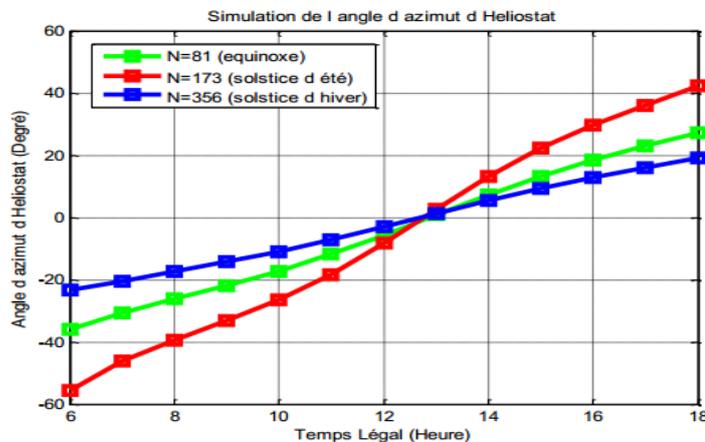


Figure III.15 : Simulation de l'angle d'azimut d'un héliostat.

Ces graphes représentent la variation de l'angle d'azimut en degré en fonction du temps légal (par heure).

Pour les trois courbes, la variation de l'angle d'azimut est en relation proportionnelle avec la variation du temps. Ces courbes sont d'une valeur négative de 6h à 13h et d'une valeur positive de 13h à 18h, pour :

- La saison d'hiver, N=356, l'angle varie de -21 ° à +20 °
- La saison de printemps, N=81, l'angle varie de -39 ° à 29 °
- La saison d'été, N=173, l'angle varie de -59 ° à 42 °

Ces variations dépendent directement de la position du soleil pendant la journée ainsi que quantité d'ensoleillement capté durant cette période, c'est évident que cette dernière n'est pas la même pour une journée d'hiver et une journée d'été.

6. Simulation des différents paramètres d'un moteur pas à pas à aimant permanent par Simulink/ Matlab :

La commande des moteurs pas à pas est une phase primordiale pour l'orientation correcte et précise des miroirs héliostats. Pour cela, il est important de connaître le fonctionnement de ces moteurs et de voir leurs comportements vis-à-vis de différents paramètres. Ce qui est donc possible en réalisant une simulation sous Simulink/ Matlab.

Dans cette simulation, les caractéristiques du moteurs pas à pas à aimant permanent (NEMA17) sont prises afin d'entraîner un héliostat qui pèse d'environ 6Kg où on pose comme hypothèses :

- La variation de réluctance liée à la rotation est négligeable.
- Entre fer très faible.
- Les aimants sont parfaits.

Le moteur est alimenté en mode deux, où les deux phases du moteurs sont alimentées en même temps sous une tension de 3.3 V.

6.1. Résultats et interprétations

On a Simulé le moteur pour une fréquence de $f=10$ Hz à vide ($C_r=0$ N.m) et en charge ($C_r=1.2$ N.m). Les résultats obtenus sont données pas les figures suivantes :

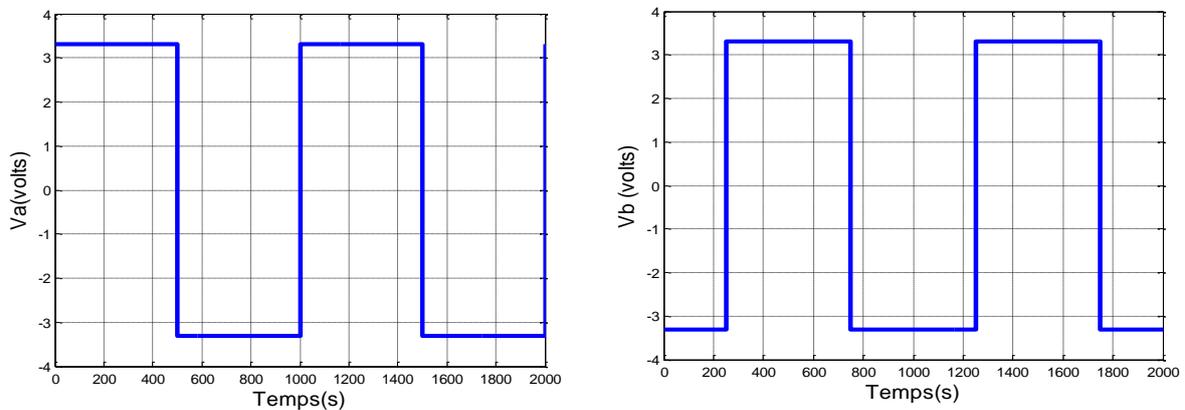


Figure III.16 : Variation des tensions en fonction du temps.

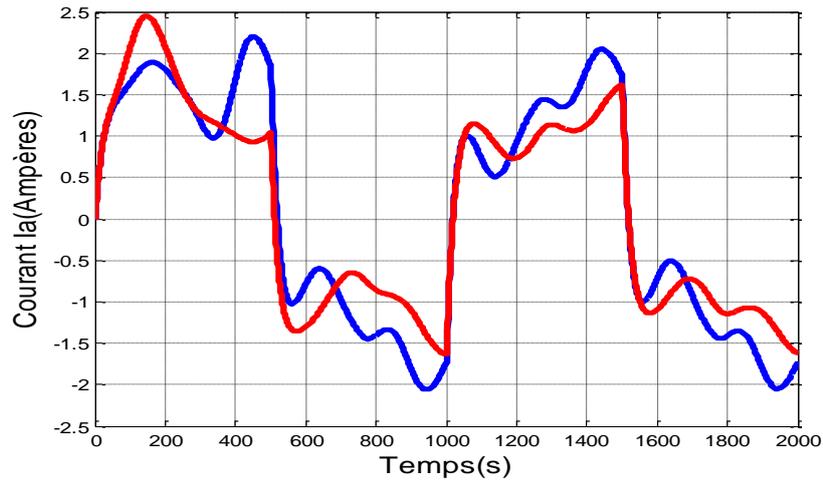


Figure III.17: Variation du courant i_a à vide (bleu) et en charge (rouge) en fonction du temps.

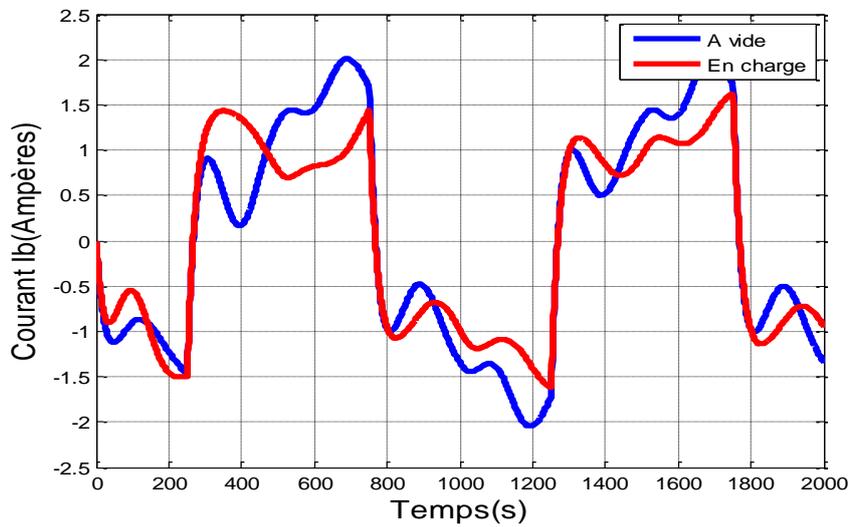
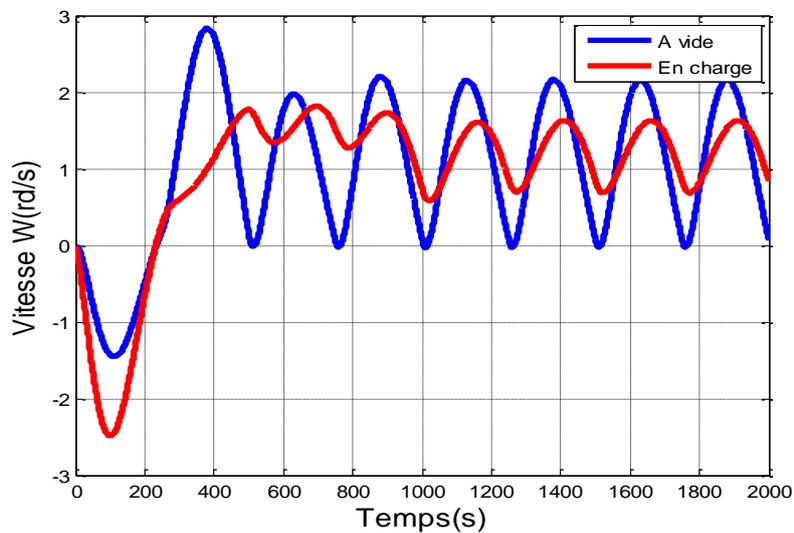


Figure III.18 : Variation du courant i_b en fonction du temps.



Chapitre III: Simulation d'un héliostat

Figure III.19 : Variation de la vitesse (rd/s).

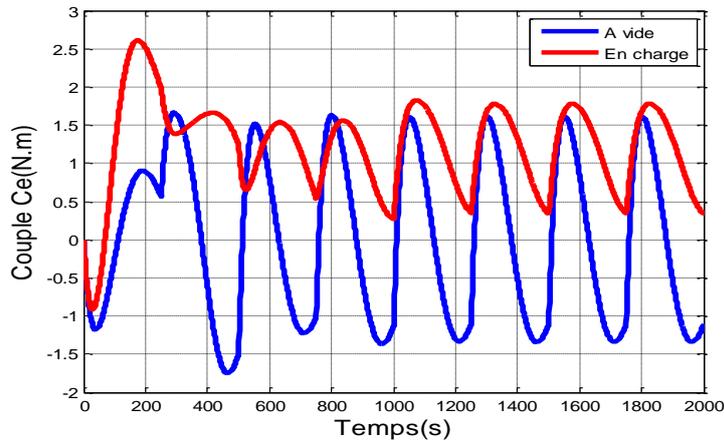


Figure III.20 : Variation du couple électromagnétique (N.m) en fonction du temps.

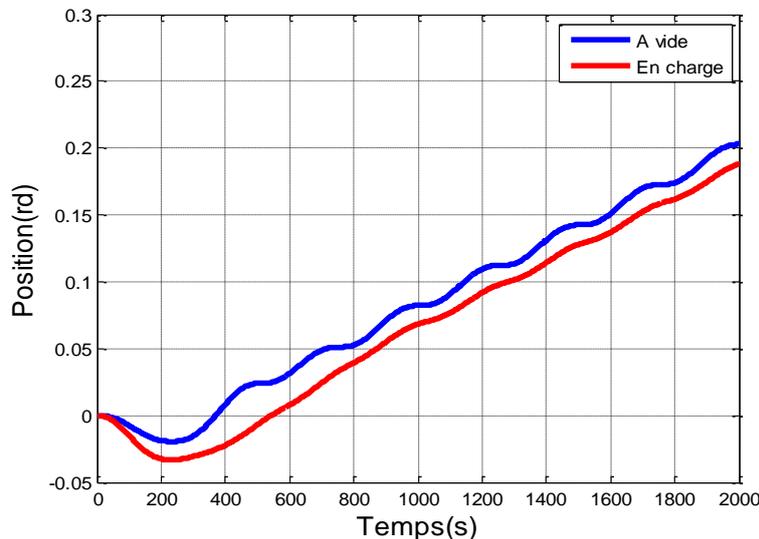


Figure III.21 : Variation de la position (rd) en fonction du temps.

Les signaux d'entrées V_a et V_b sont des signaux carrés périodiques déphasé de $\frac{\pi}{4}$, on note que les courants i_a et i_b suivent les tensions V_a et V_b respectivement que ça soit à vide ou en charge. On remarque que le courant en charge démarre fort en le comparant de celui à vide et il atteint les 2.5 A comme valeur maximale.

La vitesse prend un dépassement d'une valeur d'environ 3 rd/s à vide et d'environ 1.8 rd/s en charge puis elle se stabilise à une valeur moyenne de 1rd/s, en charge la vitesse prend plus de temps qu'à vide pour se stabiliser.

Le couple électromagnétique démarre fort puis se stabilise à une valeur précise. La position prend une allure croissante et stable.

Chapitre III:Simulation d'un héliostat

Conclusion :

Par cette simulation, nous avons pu voir le comportement d'un miroir héliostat durant une période de la journée ainsi que son comportement durant trois périodes de l'année.

Ce type de poursuite solaire dépend essentiellement de la modélisation correcte des deux angles azimut et élévation ainsi du choix du moteur qui répond avec précision à la consigne.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire qui entre dans le cadre de la préparation du diplôme d'ingénieur en électrotechnique option énergies et environnement, nous nous sommes concernées par la simulation d'un héliostat. L'objectif principal de ce travail est de commander un héliostat dédié à une centrale solaire à tour, réfléchissant le rayonnement solaire vers une cible fixe (le récepteur) à l'aide d'un système de poursuite solaire bi-axial.

L'étude théorique que nous avons effectuée nous a permis de choisir la meilleure technologie de moteurs de positionnement.

Les résultats de la simulation sous PROTEUS, nous montrent que les réponses suivent exactement la consigne même lors des variations de la charge où la position voulue est atteinte dans un temps de réponse convenable.

Ce travail nous a permis d'enrichir nos connaissances dans le domaine de poursuite des centrales à tour, ainsi que de renforcer nos compétences dans la simulation des cartes électronique notamment la carte de commande d'un système de poursuite solaire.

Perspectives :

Suite à ces résultats plusieurs perspectives peuvent être provoquées :

- Validation expérimentale des structures proposées dans ce travail.
- Intégration d'une commande à distance et par micro-ordinateur où les moteurs pas à pas s'adaptent merveilleusement avec cette commande.
- La prise en compte des changements climatiques (passage nuageux où vents violents).

Bibliographie

- [1] Quinzième inventaire- édition 2013, la production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde : collection chiffres et statistiques.
- [2] Richter C, Teske S, Nobrera J, Concentrating Solar Power.
- [3] Boujenane Samira, Tracker solaire à deux axes. Mémoire de projet de fin d'étude Master en genie électrique. Université Sidi M'hamed Ben Abdellah Maroc, 2016.
- [4] Brahmi rida et Souiou abderaouf. Réalisation d'un suiveur solaire à base de PIC, thèse de Master. Université El Arbi Ben M'hidi Oum el bouaghi 2013/2014.
- [5] BURGEAP, Etude d'impact environnementale et sociale cadre du projet de complexe solaire d'Ouarzazate (Maroc), 2011.
- [6] Boulahbal Amina Etude et simulation du fonctionnement du système suiveur des panneaux solaires, thèse de Master. Université Badji Mokhtar Annaba 2015 /2016.
- [7] Olivier Farges. Conception optimale de centrales solaires à concentration: application aux centrales à tour et aux installations "beam down". Génie des procédés. Ecole des Mines d'Albi-Carmaux, 2014.
- [8] Mihoub Sofiane, Contribution à la modélisation et à l'optimisation des concentrateurs solaires motorisés appliqués aux systèmes thermosolaires. Thèse de Doctorat en sciences. Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen, 2017.
- [9] Quoilin Sylvain 'Les Centrales Solaires à Concentration 'Université de Liège, 2007.
- [10] C.Dupont, P.Avavian ' QUESTIONS DE PHYSIQUE AUTOUR DE L'ÉNERGIE SOLAIRE'
- [11] Insa Rouen, Concentrateurs solaires et réalisation d'un mini concentrateur solaire. Institut nationale des sciences appliquées.
- [12] Berrah F, Conception et simulation d'une centrale à tour sur sites Algériens, thèse de Master, en énergies renouvelables, Université des sciences et de la technologie Houari Boumedienne, 2013.
- [13] Belkaid A, Sellame K, Dimensionnement d'un système de stockage pour une centrale solaire à concentration. Thèse de Master en énergies renouvelables. Université des sciences et de la technologie Houari Bouemdiene, 2018.
- [14] B. Brahimi, A. Bouketir, Etude expérimentale et simulation d'un concentrateur solaire parabolique Dish-Stirling. Thèse de Master en physique énergétique. Université M'hamed Bougara Boumerdes, 2017.
- [15] Arrif T, Etude numérique d'un récepteur solaire des systèmes avec effet de concentration. Thèse de Doctorat en génie mécanique. Université mohamed Khider, Biskra.
- [16] Solar paces, catalog of solar heliostats, technical report No. III - 1/00, juin 2000.

- [17] Haddadi M, Elaboration d'une commande pour héliostat, Laboratoire d'énergie solaire, département d'électronique, Ecole Nationale Polytechnique El Harrach Alger.
- [18] Bernard Multon. MOTEURS PAS A PAS: Structures électromagnétiques et alimentations électroniques. DEA. Préparation à l'agrégation de Génie Electrique, France. 2008, pp.39.
- [19] Modélisation multi physique et architecture, modélisation d'un moteur pas à pas.
- [20] B. Djedouani, Développement d'un Banc d'essai por l'étude est le diagnostic des moteurs à pas Hybrides. Thèse de Master en électrotechnique. Université de Tebessa, 2018.
- [21] Hazmoune Messaoud, la réception d'une centrale solaire à tour. Dévision solaire thermique et géométrie CDER.
- [22] article, filière solaire thermodynamique, Projet eLLO en cours de construction (Pyrénées-Orientale – Occitanie). Le Baromètre 2017 des énergies renouvelables électriques en France.
- [23]A. Takilalte, O. Mahfoud, M. Debbache, H. Karoua, S. Bouaichaoui « Modélisation et simulation de poursuite aveugle d'un Héliostat pour Centrale à Tour", 3ème Conférence Internationale des Energies Renouvelables (CIER-2015), Sousse - Tunisie, Décembre 21-23, 2015.
- [24] Khoudrane Ismail, Etude d'un système de poursuite solaire pour les panneaux photovoltaïques Master2 Université KASDI MERBAH-Ouargla 2017/2018
- [25] Rapport interne, projet intitulé « **Etude, Conception, et réalisation de concentrateurs solaires** » **CDER 2017**.
- [26]M. Debbache et al., "Mathematical modelization of an azimuthal - elevation tracking system of small scale heliostat," Int. J. Control Theory Appl. ., vol. 9, no. 38, pp. 111–120, 2016.
- [27] cours de pic Aspect materiel Toulon Var.
- [28] PIC18F2682/2685/4682/4685 Data Sheet 28/40/44-Pin Enhanced Flash Microcontrollers with ECAN™ Technology, 10-Bit A/D and nanoWatt Technology