



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Kasdi Merbah - Ouargla

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Mécanique



Mémoire présentée pour l'obtention du diplôme de

**Master Académique**

**Domaine** : Sciences et techniques

**Filière** : Génie mécanique

**Spécialité** : Génie productique

**Thème**

***CONCEPTION ET FABRICATION D'UN HELIOSTAT  
POUR UNE TOUR SOLAIRE***

Présenté par :

**Ahmed Yacine BELHANI**

**Oussama ARBAOUI**

Soutenu publiquement le : 29 Mai 2017

Devant le jury :

---

Président	Mr Rafik MAKHLOUFI	MCB	UKM Ouargla
Examineur	Mr Sid Ali KOURAS	MAA	UKM Ouargla
Encadreur	Mr Mehdi KHALFI	MAA	UKM Ouargla
Co-encadreur	Mr Abd Elfetah BELAID	Chercheur permanent	URAER-CDER

---

# *Dédicace*

*Nous dédions ce modeste travail :*

*Pour tous les professeurs*

*Toute la famille et tous les amis*

*Et à tous ceux qui ont contribué à ce modeste  
travail*

*Et à tous qui ont connu*

*O. ARBAOUI et Y. BELHANI*

---

# Remerciements

Nous présentons nos sincères remerciements à Mr. Abd Elfetah BELAID attaché de recherche au centre de Développement des Energies Renouvelables, qui nous a fait bénéficier de ses connaissances, son expérience et son soutien afin d'effectuer ce travail précieux.

Nous remercions aussi Mr. Rafik MAHKLOUFI, maitre de conférences à l'Université KASDI Merbah Ouargla pour avoir accepté de présidé le jury, ainsi que Mr. Sid Ali KOURAS, maitre assistant à l'Université KASDI Merbah Ouargla pour avoir accepté de jugé le présent travail.

Nous tenons à remercier aussi notre encadreur Mr. Mehdi KHALFI enseignant à l'Université KASDI Merbah Ouargla, pour l'aide compétente qu'il nous a apporté, pour ses conseils et son encouragement.

Nous remercions toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

---

## Table des matières

Table des figures .....	vi
<b>Introduction .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I L'énergie solaire .....</b>	<b>3</b>
I.1 Introduction .....	3
I.2 Généralités sur Le soleil.....	4
I.2.1 Le soleil.....	4
I.2.2 L'énergie solaire .....	5
I.2.3 Les projections solaires.....	7
I.2.4 La trajectoire solaire.....	7
I.2.5 La position de soleil .....	7
I.2.5.1 La hauteur du soleil .....	8
I.2.5.2 L'azimut solaire.....	8
I.3 Exploitation de l'énergie solaire .....	8
I.3.1 Toure solaire à effet de concentration.....	9
I.3.1.1 Les éléments de la tour solaire .....	10
I.3.1.2 Projets en cours de réalisation ou d'exploitation .....	11
I.3.2 Héliostat à central cylindro-parabolique.....	13
I.3.3 Tour solaire (cheminée).....	13
I.3.3.1 Le principe de la cheminée.....	14
I.3.3.2 Projets réaliser ou en cours d'exploitation.....	14
I.3.4 L'énergie photovoltaïque .....	16
I.3.4.1 Principe.....	16
I.3.4.2 Projets en cours de réalisation ou d'exploitation .....	16
I.4 Conclusion .....	17
<b>Chapitre II Les différents types d'héliostats .....</b>	<b>18</b>
II.1 Introduction.....	18
II.2 L'héliostat.....	18
II.2.1 Définition l'héliostat.....	18
II.2.2 Histoire de l'héliostat.....	18
II.2.3 Le champ d'héliostat.....	19
II.2.4 Type des mouvements de l'héliostat .....	19
II.2.5 Les positions de l'Héliostats.....	20

---

II.2.6	L'angle Héliostat/Récepteur .....	21
II.2.7	Paramètres influant sur le rondement de l'héliostat .....	21
II.2.8	Erreurs des héliostats .....	22
II.3	Type des héliostats .....	22
II.3.1	L'héliostat ponctuelle .....	22
II.3.1.1	L'héliostat à central à tour .....	23
II.3.1.2	Héliostat à central paraboliques: .....	23
II.3.2	L'héliostat linéaire .....	23
II.3.2.1	L'héliostat à central cylindro-parabolique .....	24
II.3.2.2	L'héliostat à central solaire à miroirs de Fresnel .....	24
II.4	Conception mécanique de l'héliostat .....	24
II.5	Les actionneurs .....	25
II.6	Etudes et travaux .....	26
II.7	Conclusion .....	29
<b>Chapitre III</b>	<b>Étude et conception d'un héliostat.....</b>	<b>30</b>
III.1	Introduction .....	30
III.2	Présentation de l'URAER .....	30
III.3	Prototype de la tour solaire .....	31
III.4	Diagnostic des défauts .....	31
III.5	Nouvelle conception proposée .....	32
III.5.1	Cahier de charge.....	32
III.5.2	Description de la conception proposé .....	32
III.5.3	Résistance de la structure .....	35
III.5.3.1	Sollicitations.....	35
III.5.3.2	Détermination du diamètre du pylône .....	37
III.5.4	Motoréducteur .....	41
III.5.5	Les câbles .....	41
III.5.6	Cylindres d'entraînement.....	42
III.5.7	Tendeur .....	43
III.6	Simulation de la conception .....	44
III.6.1	Logiciel SolidWorks .....	44
III.6.2	DAO de l'héliostat .....	45
III.6.3	Analyse sous sollicitations .....	49
III.7	Réalisation.....	51

---

---

III.8 Conclusion .....	53
<b>Conclusion .....</b>	<b>54</b>
Bibliographie .....	56
Annexes .....	58

---

## Table des figures

Figure I-1 : Une image proche du soleil.....	5
Figure I-2 : Irradiation solaire annuel .....	6
Figure I-3 : Répartition de l'énergie solaire reçue par le sol.....	6
Figure I-4 : Mouvement de la terre autour du soleil .....	7
Figure I-5 : Déterminations de la position de soleil.....	8
Figure I-6 : Tour solaire à effet de concentration.....	9
Figure I-7 : Le récepteur d'une centrale solaire à tour .....	10
Figure I-8 : Héliostat .....	11
Figure I-9 : Vue d'ensemble des centrales PS 10 et PS 20 .....	11
Figure I-10 : la tour de la centrales AORA.....	12
Figure I-11 : Les tours du module élémentaire Sierra Sun Tower .....	12
Figure I-12 : la tour de la centrale CSIRO .....	13
Figure I-13 : Les centrale cylindro-parabolique d'Ouarzazate (Maroc) .....	13
Figure I-14 : Principe de la tour solaire (cheminée).....	14
Figure I-15 : Le prototype de Manzanares .....	15
Figure I-16 : Projet de Borunga.....	16
Figure I-17 : Centrales solaire photovoltaïque de Kamuthi (India) .....	17
Figure I-18 : Centrale solaire d'El Hadjira.....	17
Figure II-1: Le champ d'héliostat.....	19
Figure II-2 : Type des mouvements de l'héliostat : A) Héliostat de mouvement azimut-élévation B) Héliostat de mouvement aligné cible C) Héliostat de mouvement parallèle .....	20
Figure II-3 : Les principaux paramètres influant sur le rendement de l'héliostat.....	22
Figure II-4 : l'héliostat à central à tour .....	23
Figure II-5 : Héliostat à central paraboliques.....	23
Figure II-6 : L'héliostat à central cylindro-parabolique .....	24
Figure II-7 : l'héliostat à central solaire à miroirs de Fresnel.....	24
Figure II-8 : Les mouvements de l'héliostat .....	25
Figure II-9 : le schéma cinématique de l'héliostat.....	25
Figure II-10 : Galerie d'images des entraînements à engrenages linéaires et rotatifs, des systèmes de transmission, des actionneurs et des tournecols .....	26
Figure II-11 : Vue du dispositif de poursuite AURESOLAR .....	27
Figure II-12 : Universel Solar Tracker .....	27

---

Figure II-13 : Google’s wire heliostat concept.....	28
Figure II-14 : L'héliostat à fil Solaflect qui utilise des fils d'acier sous tension comme structure de support.....	28
Figure II-15 : Prototype de l’URAER.....	29
Figure III-1 : Esquisse du mouvement d’élévation .....	32
Figure III-2 : Elimination automatique du jeu .....	33
Figure III-3 : Esquisse du mouvement azimut .....	34
Figure III-4 : Etude statique .....	37
Figure III-5 : Etude de première section .....	38
Figure III-6 : Etude de deuxième section .....	38
Figure III-7 : Le graphe des efforts internes .....	39
Figure III-8 : Motoréducteur lève vitre pour Aveo .....	41
Figure III-9 : Comparaison parcoure-étendu câbles.....	43
Figure III-10 : Les trois concepts de base (SOLIDWORKS). .....	44
Figure III-11 : L’ensemble des pièces principales du mécanisme .....	45
Figure III-12 : Pylône.....	46
Figure III-13 : Guide pour les câbles d’entraînement azimut .....	46
Figure III-14 : Fer carré de maintien en position du guide pour câbles .....	47
Figure III-15 : Répartition circulaire des sept fer-carrés.....	47
Figure III-16 : Structure porteuse.....	47
Figure III-17 : Butée.....	48
Figure III-18 : Cornière .....	48
Figure III-19 : Support miroirs.....	48
Figure III-20 : Assemblage des pièces de l’héliostat .....	49
Figure III-21 : Chargement de la pièce .....	49
Figure III-22 : Attribution du matériau .....	49
Figure III-23 : Fixation de la pièce.....	50
Figure III-24 : Application des forces .....	50
Figure III-25 : Maillage.....	50
Figure III-26 : Résultats de la simulation du pylône.....	51
Figure III-27 : Le demi-cercle de guidage des câbles .....	51
Figure III-28 : Assemblage des fer-carrés avec le tube rond. ....	52
Figure III-29 : L’une des poulies de renvoi.....	52

---



# Introduction

En hausse constante depuis le début du dix-neuvième siècle, soit le début de l'exploitation du charbon et de la révolution industrielle, la demande énergétique mondiale n'a pas cessé de d'augmenter depuis. L'apparition de la « société de consommation », après la seconde guerre mondiale, a entraîné une hausse spectaculaire de cette demande.

Les modes de vie des pays « développés » (Europe de l'Ouest, Amérique du Nord) ont évolué avec l'apparition de nouveaux besoins (modes de déplacement, de production de consommation de biens et de service, etc.). C'est une conséquence directe de l'utilisation de nouvelles sources d'énergie plus « performantes » et « concentrées » : le pétrole puis le gaz et l'uranium. Aujourd'hui, l'apparition de nouvelles puissances, à forte croissance économique et démographique, telles que les pays du Moyen Orient, le Brésil, l'Afrique du Sud, l'Inde ainsi que la Chine fait craindre une croissance toujours plus rapide de cette demande sans une prise de conscience collective.

La réduction de la consommation d'énergie et l'utilisation plus efficace de cette énergie étant une autre partie de la réponse que l'humanité doit s'apporter dans les plus brefs délais. Parmi ces énergies renouvelables (éolienne, hydraulique, géothermique), le recours à l'énergie solaire devrait permettre de combler une partie non négligeable des besoins en électricité.

Pour transformer l'énergie solaire en énergie utilisable, trois filières existent: (Le photovoltaïque, Le centrale tour à effet concentration, Le solaire thermodynamique). [1]

Ce modeste travail représente une contribution dans le domaine des centrales tours à effet concentration, où nous proposons une nouvelle conception d'un héliostat vu que plusieurs projets pour ce type d'exploitation de l'énergie solaire (centrales tours à effet concentration) ont vu le jour, et plusieurs d'autres sont en cours de réalisation. En plus, les héliostats sont l'élément le plus important d'une centrale à tour, pourtant se ne sont que des assemblages de miroirs motorisés qui suivent le Soleil de façon à réfléchir ses rayons sur le récepteur solaire.

L'idée de ce travail c'est révélée après une réalisation d'un prototype d'une centrale tour à effet de concentration au niveau de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER) sise à Ghardaïa, annexe du Centre de Développement des Energies Renouvelables

(CDER). Malgré que ce prototype a bien fonctionner, son rendement était faible car, lors de la réalisation des 17 héliostats, l'équipe de recherche n'était consciente des défauts qui prouvent être causés par le jeu dans les différents articulations, en conséquence, l'orientation des miroirs était imprécise, juste une partie des rayons du Soleil réfléchis par un héliostat est orientée vers le récepteur et la seule cause d'après l'équipe de recherche est le jeu dans les différents articulations.

Donc, notre travail consiste à explorer le prototype, de détecter les différents défauts, de les corriger, et de proposer une nouvelle conception, pour cela nous avons structuré le présent mémoire en trois chapitres, les deux premiers représentent une recherche bibliographique sur l'énergie solaire, le premier est consacré à la présentation du Soleil et l'importance de l'énergie reçue par cet astre sur Terre, nous présentons aussi dans ce chapitre quelques types d'exploitation de cette énergie ainsi que des projets déjà réalisés. Dans le deuxième chapitre, nous représentons les différents types d'héliostats, leurs mouvements, les paramètres influents sur leur rendement ...

Le troisième chapitre est consacré à l'étude et la conception d'un nouvel héliostat amélioré qui doit avoir un bon rendement, une surface de réflexion plus grande et un prix de revient relativement bas. Pour cela, des esquisses seront mises en place, une étude sera élaborée afin de répondre au cahier des charges reçu de la part de l'équipe de recherche, et finalement, la réalisation de la conception aura lieu au niveau de l'unité de recherche.

# Chapitre I

## L'énergie solaire

### I.1 Introduction

De nos jours, l'homme a à sa disposition sur la Terre de nombreuses sources d'énergie. Les plus utilisées sont les énergies dites fossiles (charbon, pétrole, gaz) car non renouvelables et issues d'un long processus de transformation de la matière organique, parce qu'elles sont faciles à exploiter, et rentables. Cependant, pour différentes raisons, il s'avère que ces énergies ne peuvent plus être utilisées. Tout d'abord, les réserves d'énergie fossiles commencent à s'amoinrir. Ensuite, en raison de la très forte demande en provenance des pays en voie de développement comme la Chine et l'Inde pour ne pas les citer, les prix de ces énergies ne cessent d'augmenter, les rendant inabordables pour certaines personnes. Et puis, lors de leur utilisation, ces énergies émettent une grande quantité de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone, notamment) qui participent fortement au réchauffement planétaire, qui devient un problème grandissant pour la Terre et les êtres vivants. [2]

D'une autre part, l'énergie nucléaire, même si elle a un fort rendement, elle produit des déchets très polluants et peu dégradables. De plus elle fait peur en raison des graves accidents qui peuvent se produire (catastrophe de Tchernobyl), et en raison du risque de prolifération nucléaire.

De nombreuses énergies non polluantes, ou renouvelables, ou abondantes partout à la surface du globe pourraient pourtant être utilisées par l'homme. Entre autres, on distingue l'énergie éolienne, l'énergie hydroélectrique et l'énergie solaire. Mais l'énergie éolienne n'est pas assez rentable, au sens qu'elle ne permet pas de produire beaucoup d'énergie par unité de surface. L'énergie hydroélectrique a un bon rendement mais, un fort impact écologique et humain, n'est pas disponible partout, et la plupart des espaces qui lui sont propices sont déjà saturés de barrages.

L'énergie solaire, elle est disponible partout à la surface du globe, en quantité variantes, et a un bon rendement grâce à la technologie actuelle. Elle est de plus facile à exploiter. Elle semble être l'énergie la plus prometteuse pour l'avenir.

C'est en 2006, avec l'inauguration de la centrale PS10 de 11 MW près de Séville en Espagne qu'est donné un nouveau départ à la filière. L'année suivante, c'est au tour des Etats-Unis de mettre en service Nevada Solar One, une centrale cylindro-parabolique de 64 MW. Le rythme des constructions s'accélère ensuite et c'est ainsi qu'en 2009, cinq centrales solaires thermodynamiques de forte puissance (PS20, Andasol 2, Puertollano, Entresol 1, La Risca One) commencent à injecter du courant sur le réseau électrique espagnol, portant à plus de 700 MW la capacité totale des centrales solaires thermodynamiques en fonctionnement dans le monde.

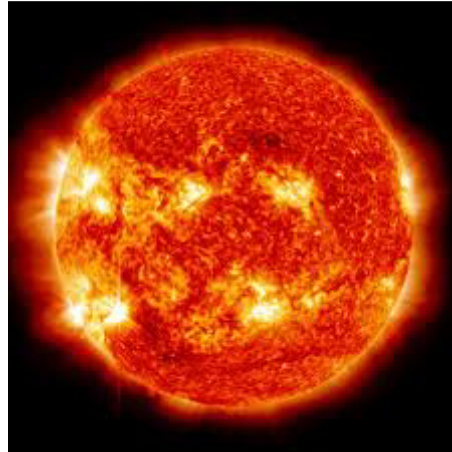
Aux côtés des développeurs industriels (Solar Millenium, Abengoa, Acciona, Iberdrola,...) responsables de ces projets de grande ampleur, de nouveaux acteurs de la filière proposent aujourd'hui des technologies innovantes pour des centrales de taille moindre (eSolar, AUSRA, Novatec Biosol, AORA, Kraftanlagen München...), montrant une volonté globale de participer activement au boom de développement de la filière dans le monde. [1]

## I.2 Généralités sur Le soleil

### I.2.1 Le soleil

Le soleil (Sol en latin, Helios en grec) est l'étoile du système solaire, c'est autour de lui que gravite la Terre et les autres planètes. Le soleil bien avant l'apparition du premier homme sur la terre à peu près quatre milliards d'années, cette étoile de l'univers inondait déjà de lumière toutes les planètes. Les rayons du soleil sont source de vie, ils nous fournissent la chaleur et la lumière. Une faible partie du rayonnement solaire parvient jusqu'à la surface de la terre, le reste est réfléchi dans l'atmosphère. [3]

Le Soleil se compose de 74 % d'hydrogène, de 24 % d'hélium et d'une fraction d'éléments plus lourds. Sa température superficielle moyenne est estimée à 5.800°K. La surface lumineuse habituellement visible, ou photosphère, est d'environ 100 km d'épaisseur. La distance moyenne de la Terre au Soleil est voisine de 150 millions de km. Le rayonnement solaire met environ 8 minutes pour nous parvenir. [3]



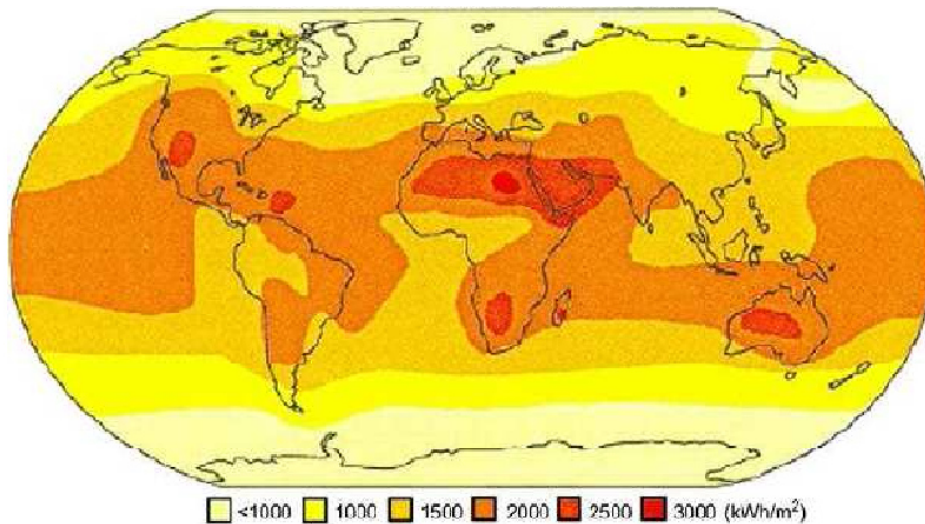
*Figure I-1 : Une image proche du soleil*

## **I.2.2 L'énergie solaire**

L'énergie solaire, transmise par ensoleillement, rend possible la vie sur terre par apport de chaleur et de lumière. Le rayonnement du soleil est responsable des climats et de la plupart des phénomènes météorologiques observés sur notre planète. Le soleil n'a pas une surface bien définie comme celle de la terre, sa composition faite essentiellement de gaz dont la température est très élevée, est à l'origine de l'activité intense de toutes ses couches, ce qui nous paraît comme étant sa surface est une couche de son atmosphère, la photosphère, qu'on appelle aussi sphère de lumière, elle représente la partie visible du soleil ou celle qui émet la lumière. [3]

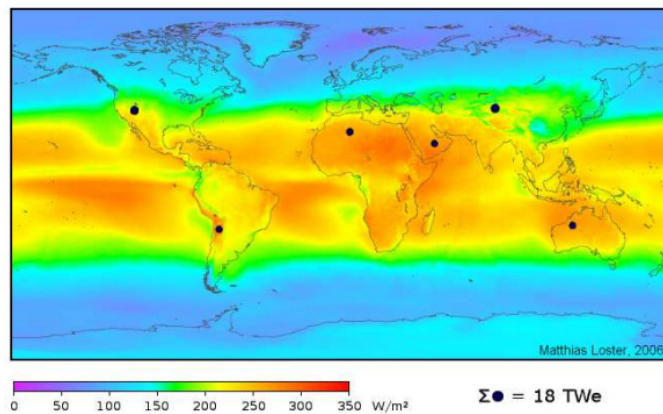
En plus, le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée dans le monde. La quantité d'énergie libérée par le soleil et captée par la planète terre en une heure, pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an [4]. Cette grande capacité énergétique, est une source d'énergie propre et inépuisable.

Une grande partie du continent africain fait partie des régions les plus prometteuses pour l'implantation des technologies solaires thermodynamiques car se trouvant dans la ceinture solaire, c'est à dire les régions où l'ensoleillement normale directe excède 2000 kWh/m<sup>2</sup>/an; il s'agit des régions telle que l'Algérie.



**Figure I-2 :** Irradiation solaire annuel

Selon une autre source, l'ensoleillement qui frappe les régions sous les points noirs présentés sur la figure I-3 pourrait alimenter en énergie le monde entier : si elles étaient installées dans les zones marquées par les six points sur la carte, des cellules solaires avec un rendement de conversion de seulement 8 % produiraient, en moyenne, 18 TW d'énergie électrique. C'est plus que l'énergie totale actuellement disponible grâce à toutes les sources d'énergie principales, y compris le charbon, le pétrole, le gaz, le nucléaire et l'hydraulique. En remarque que l'Algérie est l'une de ces six régions, ce qui montre l'importance de l'investissement dans le domaine de l'énergie solaire. [2]

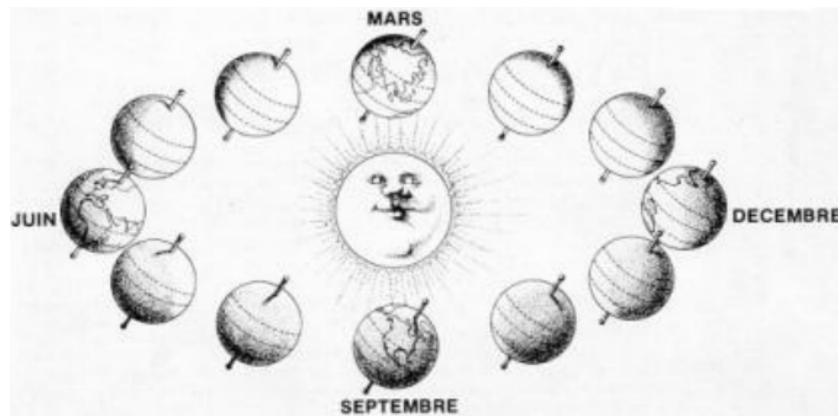


**Figure I-3 :** Répartition de l'énergie solaire reçue par le sol

Les couleurs indiquent le rayonnement solaire, en moyenne, sur trois ans, en tenant compte des nuits et de la couverture. Par conséquent, nous constatons que l'Algérie a un site important qui a stimulé l'investissement dans ce domaine et l'exploitation de l'énergie solaire, qui travaille pour aider la croissance économique. [2]

### I.2.3 Les projections solaires

La forme sphérique de la terre, sa rotation, l'inclinaison de son axe de rotation, son mouvement de rotation autour du soleil, déterminent la distribution du rayonnement solaire. Le rayonnement solaire qui atteint une région de la terre dépend de sa latitude, de la saison et de l'heure de la journée



*Figure I-4 : Mouvement de la terre autour du soleil*

Durant une année, le soleil va se lever et se coucher à des points différents de l'horizon décrivant chaque 24h une trajectoire dont l'évolution progressive, sous nos latitudes fixera les saisons.

Pendant les mois d'été, l'hémisphère nord est tourné vers le soleil, les jours alors sont plus longs que les nuits dans l'hémisphère nord et le rayonnement incident se rapproche de la verticale. Pendant les mois d'hiver, la situation est inversée, l'hémisphère nord voit la durée d'insolation décroître et le soleil monter moins haut dans le ciel, tandis que l'été règne sur l'hémisphère sud. [5]

### I.2.4 La trajectoire solaire

Les trajectoires solaires représentent le mouvement du soleil autour de la terre. Plus exactement, elles décrivent le mouvement apparent du soleil sur la voûte céleste pour un observateur situé en un point fixe de la terre. Pour cet observateur, les trajectoires apparentes figurent le chemin perceptible du soleil, du lever au coucher, tout au long de l'année. [5]

### I.2.5 La position de soleil

La position du soleil est exprimée par deux angles qui sont la hauteur du soleil et l'azimut solaire:

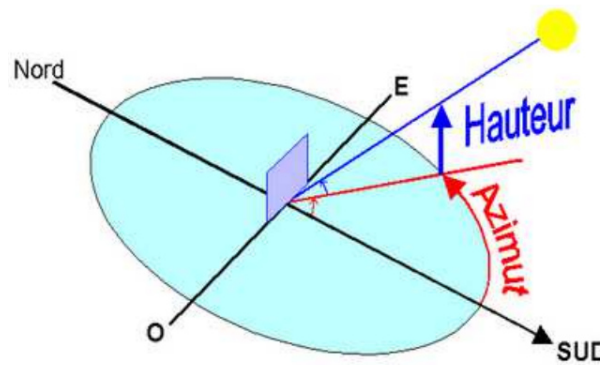


Figure I-5 : Déterminations de la position de soleil

### I.2.5.1 La hauteur du soleil

La hauteur solaire est l'angle entre la droite joignant le centre du disque solaire au point d'observation et le plan horizontal passant par le point d'observation. Le point le plus élevé de l'hémisphère céleste est Le Zénith, se trouvant directement à la verticale de l'observateur. [5]

### I.2.5.2 L'azimut solaire

C'est l'angle mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre entre le point cardinal Sud dans l'hémisphère nord ou Nord dans l'hémisphère sud et la projection sur le plan horizontal local de la droite reliant la terre au soleil.

L'azimut solaire est mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère nord et dans le sens contraire dans l'hémisphère sud, en utilisant les projections sur le plan horizontal du point d'observation. L'azimut solaire est négatif le matin (direction Est), nul ou égal à  $180^\circ$  à midi et positif l'après-midi (direction Ouest), sur tout le globe. [5]

## I.3 Exploitation de l'énergie solaire

Dès le premier choc pétrolier au milieu des années 1970, les concepts de centrales solaires thermodynamiques commencent à éveiller l'intérêt de centres de recherches nationaux et de grands groupes industriels. Après le deuxième choc pétrolier vers 1982, le gouvernement des Etats-Unis offrit des crédits d'impôts aux investisseurs sur des projets de centrales solaires et imposa l'obligation d'achat de l'électricité solaire à un tarif incitatif et garanti à long terme. La société Luz construisit alors entre 1984 et 1990 en Californie neuf centrales cylindro-paraboliques commerciales, toujours exploitées actuellement. Cependant au début des années 90 ces aides diminuèrent beaucoup, en même temps que le prix des énergies fossiles chutait. [6]

Après 15 années sans nouveaux projets, une centrale solaire thermodynamique commerciale, nommée PS10, a été inaugurée en 2006 à Sanlucar la Mayor, près de Séville,



suivie de près par l'installation Nevada Solar One aux USA en 2007. De nombreux projets sont en train de voir – ou revoir – le jour en Espagne et aux USA, et dans des pays en développement tels que l'Égypte, l'Iran, le Maroc et bien sûr l'Algérie.

Partout où l'ensoleillement direct atteint un niveau suffisant, les programmes de recherche concernant ces technologies sont relancés.

La hausse du prix des énergies fossiles, combinée à l'inquiétude croissante sur les conséquences de l'augmentation du taux de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère traduite par les accords de Kyoto (1997), incite la communauté scientifique à chercher de nouvelles sources d'énergie, ou à en revisiter certaines envisagées lors des précédents chocs pétroliers.

### **I.3.1 Toure solaire à effet de concentration**

Les centrales solaires à tour sont constituées de nombreux miroirs concentrant les rayons solaires vers une chaudière située au sommet d'une tour. Les miroirs uniformément répartis sont appelés héliostats. Chaque héliostat est orientable, et suit le soleil individuellement et le réfléchit précisément en direction du receveur au sommet de la tour solaire.

Le facteur de concentration peut dépasser 1000, ce qui permet d'atteindre des températures importantes, de 600 °C à 1000 °C. L'énergie concentrée sur le receveur est ensuite soit directement transférée au fluide thermodynamique (génération directe de vapeur entraînant une turbine ou chauffage d'air alimentant une turbine à gaz), soit utilisée pour chauffer un fluide caloporteur intermédiaire. Ce liquide caloporteur est ensuite envoyé dans une chaudière et la vapeur générée actionne des turbines.

La précision de la visée des héliostats, l'absorption du rayonnement entre un héliostat et le foyer et la hauteur de la tour sont les trois facteurs limitant la dimension de l'installation. [5]



*Figure I-6 : Tour solaire à effet de concentration*

### I.3.1.1 Les éléments de la tour solaire

#### a) La chaudière

La chaudière est un récepteur solaire qui se situe au sommet de la tour pour une meilleure réception des rayons solaire. La chaudière peut atteindre une température maximale de 500°C, cette température varie en fonction de métal utilisé pour les tubes.



*Figure I-7 : Le récepteur d'une centrale solaire à tour*

Le récepteur solaire contient plusieurs tubes chauffé grâce aux rayons réfléchi par le champ d'héliostats. Il réalise la fonction d'un échangeur de chaleur, ces tubes sont parcourus par un fluide caloporteur relativement froid qui évacue la chaleur de la chaudière en refroidissant ses tubes. [5]

#### b) Héliostat

Les héliostats (d bve helios, mot grec signifiant Soleil, et stat, racine de stationnaire) sont des miroirs positionnés sur les pylônes autour d'une tour dans les centrales solaires à concentration, permettant de réfléchir les rayons du soleil au sommet de la tour, durant la journée tout au long de l'année. [2]

L'héliostat se compose de deux éléments essentiels à sont fonctionnement, un panneau réflecteur, un dispositif mécanique à deux moteurs qui assure le mouvement de l'héliostat, ce dernier est considéré comme la pièce maîtresse dans un champ solaire. La figure ci-dessous représente un héliostat. [5]



*Figure I-8 : Héliostat*

### **I.3.1.2 Projets en cours de réalisation ou d'exploitation**

- a) **PS10, PS20** : Les centrales de production PS10 et PS20 situés à Abengoa en Espagne possèdent des absorbeurs surfaciques. Bien que le design des deux récepteurs soit différent, les deux sont placés au fond d'une large cavité. Ils sont constitués de tubes verticaux où circule de la vapeur d'eau. PS10 est constitué de 624 héliostats (surface au sol de 75 000 m<sup>2</sup>), et peut produire 11 MW, le récepteur se situant à 115 mètres de hauteur. Le champ solaire de 150 000 m<sup>2</sup> de PS20 est lui constitué de 1255 héliostats et peut produire 20 MW, le récepteur se situant à 165 m du sol. [1]



*Figure I-9 : Vue d'ensemble des centrales PS 10 et PS 20*

- b) **AORA** : Les centrales de démonstration d'Almeria dans le Sud de l'Espagne (site PSA) et de Kibboutz Smar dans le désert d'Arava en Israël possèdent un absorbeur volumétrique fermé fonctionnant à l'air pressurisé permettant de produire 100 kW d'électricité et 170 kW de chaleur par l'intermédiaire d'une micro-turbine à gaz installée au sommet d'une mini tour de 30 m de hauteur. [1]



*Figure I-10 : la tour de la centrales AORA.*

- c) **eSolar:** Construite en 2009 aux Etats Unis la centrale de la société eSolar propose l'assemblage de tours unitaires, de 6.5 MW de puissance thermique, couplées entre elles thermiquement sur une seule et même turbine. Le module élémentaire Sierra SunTower est composé de 2 champs collecteurs de  $190 \times 175$  m composés de 6090 héliostats de  $1,14 \text{ m}^2$  de surface chacun et une tour de 50 m de haut qui supporte 2 récepteurs. Le fluide caloporteur utilisé est l'eau-vapeur. Le bloc de conversion thermoélectrique se situe au sol permettant de l'alimenter par plusieurs tours afin d'augmenter la puissance de la turbine et réduire les coûts de production. [1]



*Figure I-11 : Les tours du module élémentaire Sierra Sun Tower*

- d) **CSIRO:** Située au Centre National de l'Energie Solaire à Newcastle en Australie, la tour CSIRO (2011) est un projet de centrale à tour de démonstration et propose une tour de 30 m de hauteur et un champ solaire de 450 héliostats. Le récepteur volumétrique de cette centrale a pour objectif de chauffer de l'air comprimé à  $900^\circ\text{C}$ . L'avantage du cycle de Brayton testé sur cette centrale est qu'il ne nécessite pas l'utilisation d'eau, avantage certain dans cette région australienne. [1]





*Figure I-12 : la tour de la centrale CSIRO*

### **I.3.2 Héliostat à central cylindro-parabolique**

Le principe est de concentrer les rayons solaires sur un tube récepteur horizontal parallèle au miroir cylindro-parabolique. L'un des projets réalisés dans ce concept est le projet Noor 1. En 2015, l'installation Noor située à Ouarzazate (Maroc) a commencé la production de l'électricité d'une puissance de 160 MW, elle consiste en un ensemble de long miroir rectangulaire de forme cylindro-parabolique.



*Figure I-13 : Les centrale cylindro-parabolique d'Ouarzazate (Maroc)*

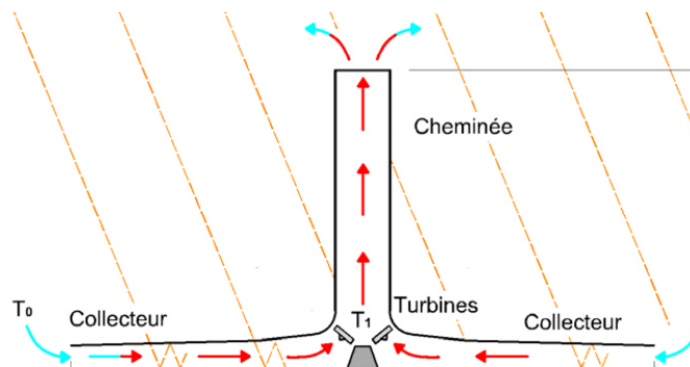
### **I.3.3 Tour solaire (cheminée)**

Une tour solaire est une centrale à énergie renouvelable, construite de manière à canaliser l'air chauffé par le soleil afin d'actionner des turbines pour produire de l'électricité. Le colonel Isidore Cabanes en a conçu le premier prototype en 1903. La première centrale à l'échelle a été construite en Espagne (Manzanares) par l'ingénieur allemand Jörg Schlich en 1981.

L'ingénieur français Edgard Nazaré (1914-1998) en a proposé un modèle amélioré dans les années 1950 sous le terme « centrale aérothermique » ou « tour à vortex », et sous la forme d'une tour métallique (brevet de 1956 et 1964) confinant un cyclone artificiel par différence thermique dont la puissance était captée par des éoliennes encastrées en périphérie de la tour. [7]

### I.3.3.1 Le principe de la cheminée

Les cheminées solaires sont des centrales électriques qui utilisent la force d'un courant d'air ascendant. L'air est chauffé par effet de serre dans un collecteur exposé au soleil. Sa masse volumique baisse et l'air est accéléré et amené vers le milieu du collecteur, où il monte dans la cheminée en passant par des turbines. Celles-ci transforment l'énergie de l'écoulement en énergie mécanique et actionnent des générateurs pour produire de l'électricité.



*Figure I-14 : Principe de la tour solaire (cheminée)*

### I.3.3.2 Projets réalisés ou en cours d'exploitation

- a) **Le prototype de Manzanares :** La tour solaire construite en 1982 à Manzanares, en Espagne, sous la direction de l'ingénieur allemand Jörg Schlaich. Elle restait en service jusqu'en 1989. Sa cheminée consistait en tubes de tôle d'une épaisseur de 1,25 mm, rigidifiés tous les 4 m par des poutres en treillis. Elle était tenue par des câbles en acier. Le prototype a démontré la viabilité technologique du projet. Il était utilisé à des fins de recherche et ne parvenait pas à produire de l'électricité à un prix compétitif. Il a produit pendant 8,8 heures par jour en moyenne. [7]



*Figure I-15 : Le prototype de Manzanares*

Sa tour est d'une hauteur de 194,6 m et d'un diamètre de 10,16 m. Le collecteur a un diamètre de 244 m d'une hauteur moyenne du toit équivalant à 1,85 m, ces dimensions ont permis d'atteindre une différence de température dans le collecteur  $\Delta T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , portant la puissance électrique nominale de la tour à 50 kW.

Le toit du collecteur est réalisé en membrane plastique d'une surface de 40 000 m<sup>2</sup>, et en verre d'une surface de 6 000 m<sup>2</sup>.

- b) Le projet de Borunga:** Le projet le plus ambitieux aujourd'hui est celui de Borunga, en Australie. Il est développé par la société EnviroMission en collaboration avec le bureau d'ingénierie civile allemand SBP (Schlaich Bergemann und Partner). La centrale aura une tour de 1000 m de hauteur et un diamètre de 120 m construite en béton armé et un diamètre du collecteur de 7000 m, avec une hauteur moyenne du toit égale à 1,85 m, cela permettra de chauffer l'air jusqu'à 70°C. Elle devrait fournir 200 MW de puissance électrique. Les coûts d'investissements sont estimés à 400 millions d'euros, ce qui correspond à environ 2 euros par Watt installé. Comme l'électricité produite par la tour solaire est estimée quatre fois plus chère que celle d'une centrale thermique au charbon, les développeurs d'EnviroMission comptent sur les revenus du tourisme, attiré par la plus haute structure du monde, pour rendre l'énergie produite compétitive. [7]



*Figure I-16 : Projet de Borunga*

## **I.3.4 L'énergie photovoltaïque**

### **I.3.4.1 Principe**

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancées sur le plan technologiques et industriel, en effet le silicium est l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique. En effet le mot "photovoltaïque" vient du grec "photo" qui signifie lumière et de "voltaïque" qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754 -1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité. [8]

### **I.3.4.2 Projets en cours de réalisation ou d'exploitation**

- c) **Centrales solaire photovoltaïque de Kamuthi:** est une centrale solaire située à Kamuthi, à 90 km de Madurai, dans l'état du Tamil Nadu, en Inde. La centrale est détenue par Adani Power. Avec une capacité de production de 648 MW sur un site unique la centrale est considérée à sa mise en service comme la plus grande centrale solaire photovoltaïque au monde sur un même site. Elle a été mise en service le 21 septembre 2016. Elle est constituée de 2 500 000 modules solaires, 576 onduleurs, 154 transformateurs et près de 7 500 km de câbles. [7]





*Figure I-17 : Centrales solaire photovoltaïque de Kamuthi (India)*

- d) Centrale solaire d'El Hadjira:** La centrale photovoltaïque d'El Hadjira dans la wilaya d'Ouargla fait partie du « Projet 400 MW » de la SKTM, filiale de Sonelgaz en charge du développement des énergies renouvelables, cette centrale est l'une parmi 23 centrales prévues. Dans la région des Hauts Plateaux Centre, quatre installations sont prévues, leur puissance cumulée sera 90 MW.



*Figure I-18 : Centrale solaire d'El Hadjira*

## I.4 Conclusion

L'énergie solaire est l'une des énergies renouvelables qui permet d'obtenir essentiellement de la chaleur et de l'électricité. Nous avons vu qu'à l'aide des nouvelles technologies, les panneaux solaires photovoltaïques ou thermiques, on peut obtenir de la chaleur grâce aux réactions transformant la lumière en chaleur ainsi que de l'électricité.

Donc, elle peut contribuer au remplacement des énergies fossiles puisqu'elle présente des intérêts positifs aux niveaux écologiste et social.

# Chapitre II

## Les différents types d'héliostats

### II.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons concentrer nos recherches sur les héliostats : les différents types existant, mode d'entraînement, le type des moteurs utilisé, les différentes conceptions élaborées et/ou réalisées, etc.

### II.2 L'héliostat

#### II.2.1 Définition l'héliostat

Les héliostats sont des assemblages de miroirs motorisés qui suivent le Soleil qui se déplace continuellement toute la journée en azimut et en élévation de façon à réfléchir ses rayons sur le récepteur solaire. [5]

#### II.2.2 Histoire de l'héliostat

La plus ancienne mention d'un héliostat se trouve dans un livre datant de 1742 du physicien néerlandais Willem Jacob's Gravesande, mais ce dernier n'en est pas l'inventeur. Dans cet héliostat, la rotation du miroir est assurée par un mécanisme d'horlogerie.

La première utilisation de la concentration solaire est attribuée à Archimède, qui réussit à incendier et détruire, depuis la terre ferme, les bateaux romains qui assiégeaient le port de Syracuse en Sicile (212-214 av JC). Pour cela, il aurait utilisé un grand nombre de petits miroirs plans manœuvrés par des soldats, qui réfléchissaient la radiation solaire sur un seul point de la coque en bois des bateaux ennemis, permettant ainsi l'inflammation du bois et préfigurant le principe de fonctionnement des centrales solaires à tour. [9]

Quelques siècles plus tard en 1515, Léonard de Vinci propose la concentration via un miroir parabolique pour produire de la chaleur industrielle, mais aucune réalisation concrète n'est alors réalisée.

La première réalisation de système concentrateur industriel arrive ensuite en 1747 avec Georges Louis Leclerc (1707-1788) qui développe et expérimente un miroir composé de 168 glaces d'environ 20 cm de côté. Chacune de ces glaces, mobile en tout sens, renvoyant la lumière vers un point unique défini par l'utilisateur. Il réussit ainsi à fondre un morceau d'argent (Température de fusion 1044°C).

### II.2.3 Le champ d'héliostat

Un champ d'héliostat se compose de plusieurs centaines d'héliostats implanté au pied de la tour. Leur fonction est de faire la réflexion de rayonnement solaire capté en le focalisant vers l'entrée du récepteur. L'énergie capté par les héliostats sera donc concentrer en haut de la tour.

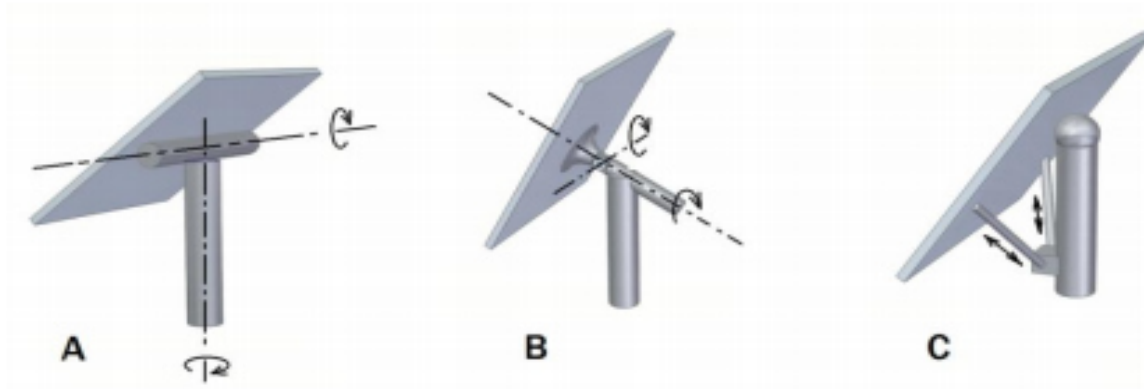


*Figure II-1: Le champ d'héliostat*

### II.2.4 Type des mouvements de l'héliostat

Les héliostats peuvent être classés en série ou en parallèle, selon le montage des actionneurs. En remarque l'existence de trois types, ce sont :

- a) Héliostat de mouvement azimut-élévation
- b) Héliostat de mouvement aligné cible
- c) Héliostat de mouvement parallèle



**Figure II-2 :** Type des mouvements de l'héliostat :  
 A) Héliostat de mouvement azimut-élévation  
 B) Héliostat de mouvement aligné cible  
 C) Héliostat de mouvement parallèle

Tous ces concepts ont été proposés pour la tour d'énergie solaire à échelle d'utilité, et jusqu'à présent, le mouvement azimut-élévation est le concept standard et le seul concept qui a été mis en œuvre dans des projets plus importants. [11]

## II.2.5 Les positions de l'Héliostats

Les héliostats d'une centrale solaire tour reflètent le rayonnement solaire incident direct sur leur surface de miroir et le concentrent sur un récepteur situé jusqu'à 1 km de distance. La surface de la cible du récepteur est faible par rapport à la distance des héliostats, exigeant une grande précision sur la forme du miroir et du système de poursuite.

Les charges pendant la phase d'opération, qui définissent le design du mécanisme de poursuite de l'héliostat sont principalement déterminées par les charges dues au vent pendant le fonctionnement. Les charges de tempête pour les héliostats en position "stow" définissent généralement la conception de la structure. Les fortes charges de tempête peuvent être évitées par une position d'arrêt avec le miroir au niveau du sol. Les positions "suivi" et "stow" peuvent être distinguées comme suit:

- Suivi: L'angle azimutal et d'élévation de l'héliostat est suivi en fonction de sa position dans le champ et les angles solaires. Pour maintenir l'efficacité optique à des niveaux élevés, les déformations et déviations du système de suivi ne doivent pas dépasser des petites tolérances.
- Stow: L'héliostat est situé dans une position « protégée », qui fournit au vent une surface d'attaque minimale. Cette position est prise une fois que la vitesse du vent dépasse la vitesse maximale admissible en opération. Les charges maximales se produisent à des

vitesses de vent élevées, ce qui explique la conception de la structure de telle sorte qu'aucune défaillance totale n'est prévue en cas de tempête

L'héliostat constitue l'élément le plus important du coût d'une centrale tour avec une part d'environ 40% du coût de revient de la centrale. Par conséquent, la réduction du coût de l'héliostat a un impact considérable pour atteindre les objectifs de réduction des coûts, difficilement atteignables avec les héliostats conventionnels actuels. [11]

### **II.2.6 L'angle Héliostat/Récepteur**

L'angle entre l'héliostat et la tour engendre une modification de la forme de la tâche solaire sur la cible ainsi que des pertes supplémentaires dues à l'accroissement des pertes par effet cosinus en comparaison avec un héliostat dans l'axe du récepteur. En effet, les héliostats des centrales solaires à tour ne pointent pas le soleil mais sont orientés de sorte à renvoyer le flux solaire vers le récepteur situé en haut de la tour solaire, offrant ainsi une surface apparente de miroir inférieure à la surface réelle de miroir. Les pertes par effet cosinus sont calculées à partir de l'angle entre le vecteur normal à l'héliostat et le vecteur solaire. [5]

### **II.2.7 Paramètres influant sur le rendement de l'héliostat**

Les paramètres influant sur le rendement de l'héliostat dans le flux solaire concentré sur le récepteur sont :

- La hauteur du récepteur
- La forme des héliostats du champ
- Les dimensions des héliostats du champ
- La précision de pointage des héliostats
- L'état de surface des héliostats
- La qualité du réglage des facettes des héliostats
- L'angle d'inclinaison de la cible
- Le dénivelé du champ d'héliostats
- La position des héliostats dans le champ
- La position du soleil dans le ciel en fonction de l'heure et du jour de l'étude
- La qualité de l'atmosphère

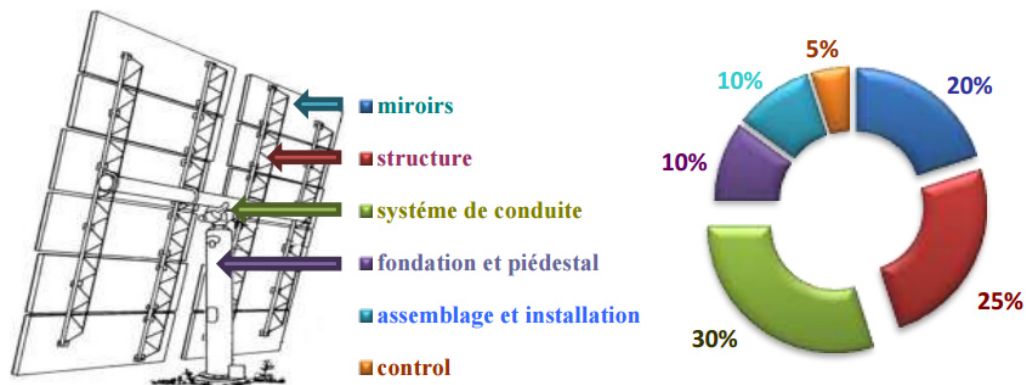


Figure II-3 : Les principaux paramètres influant sur le rendement de l'héliostat

## II.2.8 Erreurs des héliostats

Ce sont des imperfections de la surface réfléchissante des miroirs qui causent l'élargissement de la tâche solaire sur le plan focal d'un concentrateur héliostats tour. Elles se divisent en quatre grandes catégories : [6]

- **Les erreurs de pointage** sont issues des erreurs dues aux actionneurs (moteurs site et azimut), d'une part à cause du jeu dans les moteurs, et d'autre part à cause du temps de rafraîchissement des calculs de position effectués à un intervalle de quelques secondes. Ces erreurs entraînent un décalage du centre de la tâche par rapport à son point de visée théorique (le centre du récepteur).
- **Les erreurs de réglage** des miroirs sont commises au montage des modules qui constituent la surface réfléchissante de l'héliostat.
- **Les erreurs de courbure** reflètent les approximations sur la focale des facettes des héliostats.
- **Les erreurs microscopiques** sont dues aux imperfections de la surface du miroir, parfois appelées ondulations.

## II.3 Type des héliostats

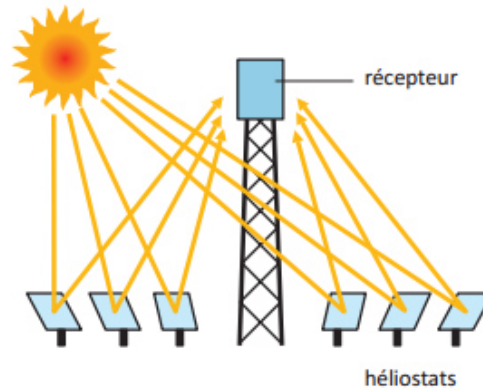
Il y a deux type d'héliostat qui réfléchit les rayonne solaire au récepteur : ponctuelle ou linéaire.

### II.3.1 L'héliostat ponctuelle

Ce type qui réfléchit précisément en direction en point du récepteur et nous avons deux systèmes de l'héliostat ponctuel

### II.3.1.1 L'héliostat à central à tour

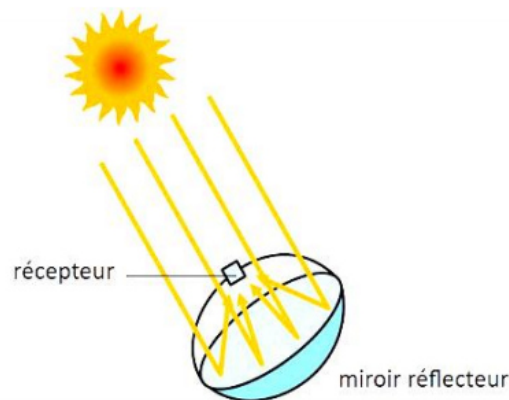
Sont des miroirs qui concentrent les rayons solaires vers une chaudière située au sommet d'une tour. Chaque héliostat est orientable, et suit le soleil individuellement et le réfléchit précisément en direction du receveur au sommet de la tour solaire. [11]



*Figure II-4 : l'héliostat à central à tour*

### II.3.1.2 Héliostat à central paraboliques:

Sont des miroirs (de la même forme que les paraboles de réception satellite) .Ils s'orientent automatiquement et suivent le soleil sur deux axes qui concentrent les rayons solaires vers un point de convergence appelé foyer. [11]



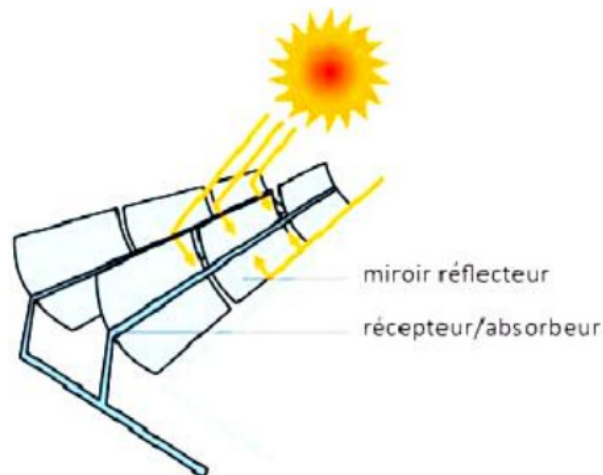
*Figure II-5 : Héliostat à central paraboliques*

## II.3.2 L'héliostat linéaire

Ce type qui réfléchit précisément en direction d'un récepteur linéaire et nous avons deux systèmes de l'héliostat linéaire:

### II.3.2.1 L'héliostat à central cylindro-parabolique

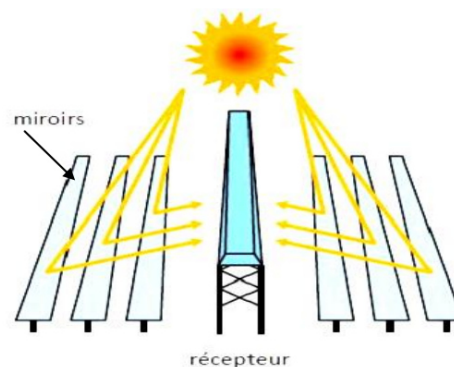
Sont des miroirs rangés parallèles de longs miroirs cylindro-paraboliques qui tournent autour d'un axe horizontal pour suivre la course du soleil. Les rayons solaires sont concentrés sur un tube récepteur horizontal.



*Figure II-6 : L'héliostat à central cylindro-parabolique*

### II.3.2.2 L'héliostat à central solaire à miroirs de Fresnel

Sont des miroirs plans, Chacun des miroirs peut pivoter en suivant la course du soleil pour rediriger et concentrer en permanence les rayons solaires vers un tube ou un ensemble de tubes récepteurs linéaires fixes [11]

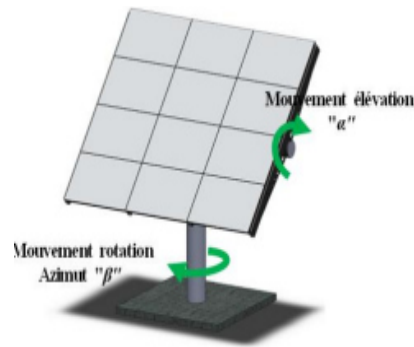


*Figure II-7 : l'héliostat à central solaire à miroirs de Fresnel*

## II.4 Conception mécanique de l'héliostat

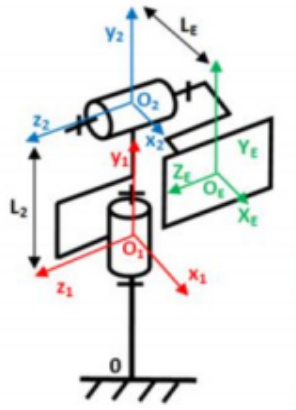
Lors de la conception d'un héliostat, en doit tenir compte de deux mouvements de rotation, le premier est le mouvement de rotation azimut effectué par le pylône qui permet aux miroirs de suivre le soleil horizontalement, et le deuxième mouvement de rotation c'est l'élévation des miroirs pour suivre le soleil verticalement





**Figure II-8 :** Les mouvements de l'héliostat

Le schéma cinématique de l'héliostat est présenté dans la figure suivante. Où le mouvement d'azimut est présenté par la liaison pivot d'élévation ( $O_1, y_1$ ) et le mouvement d'élévation est présenté par la liaison pivot d'élévation ( $O_2, z_2$ )



**Figure II-9 :** le schéma cinématique de l'héliostat

## II.5 Les actionneurs

La sélection des actionneurs est nécessaire car elle se centre autour de l'intégration du système de transmission sur une plate-forme mécanique adaptée au suivi solaire.

Il existe diverses lignes de systèmes de boîtes de vitesses modulaires disponibles pour les commandes de conception de suivi solaire. La figure suivante présente une galerie d'images aléatoires de différents engins linéaires et rotatifs et des entraînements dynamisés.



*Figure II-10 : Galerie d'images des entraînements à engrenages linéaires et rotatifs, des systèmes de transmission, des actionneurs et des tournesols*

## II.6 Etudes et travaux

On a trouvé un nombre très limité dans la littérature d'études théoriques et expérimentales sur la conception d'héliostats, ceux qu'on a trouvés sont cités dans la section suivante.

S. Abdallah et S. Nijmeh (2002), ont réalisé une étude expérimentale qui montre l'effet de l'utilisation du système de poursuite à deux axes sur l'énergie solaire collectée. Ils ont utilisé une méthode de programmation avec un système de boucle ouverte où un contrôleur logique programmable est utilisé pour contrôler l'orientation du système suivant la position du soleil. Ils ont atteint à un rendement de 41.43 % par rapport au système fixe. [12]

S. Abdallah, A. El-Qadan et V. Hamudeh (2004), ont conçu un système de poursuite solaire à deux axes. Pour la commande, ils ont utilisé une méthode de programmation à base d'un circuit intégré programmable PIC16F877. Ils ont constaté que la puissance délivrée par le système à deux axes augmente jusqu'à 37.24 % par rapport au système fixe. [13]

G.C. Bakos, 2005, a présenté une étude comparative de l'énergie solaire collectée entre un système de poursuite à deux axes et celui d'un système fixe où la poursuite solaire a été réalisée en se basant sur la comparaison des valeurs des résistances de deux photo résistances. [14]

T. Bendib et al. (2008) ont montré que l'énergie solaire collectée par le système à deux axes augmente jusqu'à 46.46 % par rapport au système fixe. Ils ont présenté un système de poursuite solaire à deux axes dit 'AureSolar'. Sa partie mécanique a été calculée et vérifiée pour assurer une transmission d'une faible puissance motrice via des mécanismes de réduction

appropriés. Ils ont développé une commande automatique à base de microcontrôleur PIC16F84A. Ils ont validé la commande par une étude expérimentale qui a donnée des gains énergétiques très significatifs de l'ordre de 50 %. [15,16,17]



**Figure II-11 :** Vue du dispositif de poursuite AURESOLAR

La figure suivant montre deux vues d'un concept téléchargé sur Youtube en 2010. Aucune organisation n'a prétendu se passer de ce modèle.

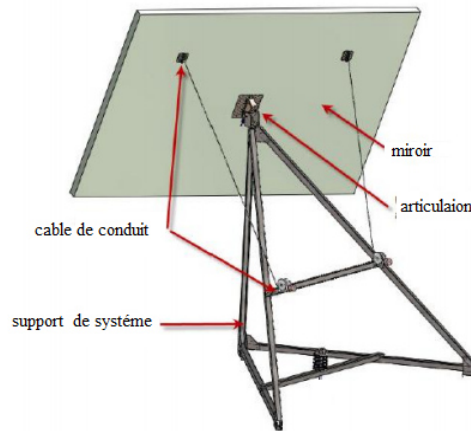


**Figure II-12 :** Universel Solar Tracker

L'idée se compose de deux actionneurs linéaires et de cinq joints universels. Les actionneurs sont fixés dans le plan incliné, de sorte que les joints forment un triangle. Un modèle simple a été construit pour étudier le mécanisme. Le mouvement semble bien fonctionner, lorsqu'il est réglé manuellement. Le plan supérieur pourrait être incliné librement à n'importe quelle direction (dans les limites), comme un joint universel. [12]

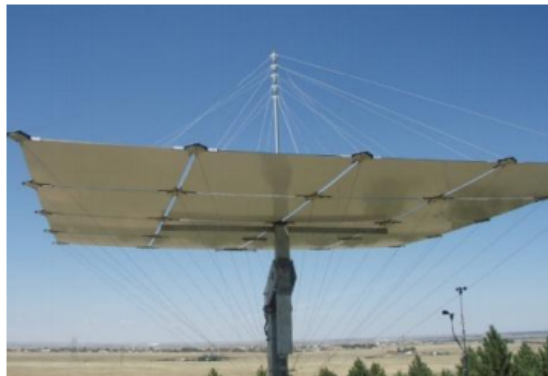
Google Corporation a mené son propre projet de développement d'héliostat en 2010-2011 dans le but de trouver de nouvelles solutions innovantes pour leur propre centrale à énergie solaire. Le projet a été arrêté en 2011, et ils ont publié leurs résultats. Leur proposition était un

héliostat de 6 m<sup>2</sup>, actionné par deux fils en acier inoxydable, entraînés par des moteurs à vis sans fin. [12]



**Figure II-13 :** Google's wire heliostat concept

Un projet soutenu par le ministère américain de l'Énergie vise à développer un héliostat ultra-léger, en utilisant des fils d'acier au lieu des grilles de faisceau. L'argument est que la force de l'acier est mieux utilisée en compression et en tension - pas en flexion - de sorte que le poids de la structure de support en acier peut être réduit de 65%. Une image de leur deuxième prototype est illustrée à la figure suivante. [12]



**Figure II-14 :** L'héliostat à fil Solaflect qui utilise des fils d'acier sous tension comme structure de support.

D'autres travaux n'ont pas concentrés sur la structure mais beaucoup plus sur la commande comme dans le cas du prototype de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER-CDER).

Nous avons visité l'URAER et nous avons remarqué que la conception réalisée par les chercheurs de l'URAER repose sur l'utilisation des actionneurs linéaires. La rotation et l'inclinaison sont assurées par des vérins.

À la mise en épreuve, les chercheurs ont constaté que les jeux dans les différentes articulations de chaque héliostat ont influencé négativement sur le rendement du prototype, le rayonnement solaire réfléchi par chacune des 17 héliostats n'est pas bien orienté vers le récepteur au sommet de la tour.



*Figure II-15 : Prototype de l'URAER*

## II.7 Conclusion

En conclusion, il y a différentes façons de concevoir un héliostat, mais le concept reposant sur un mouvement azimut et un autre d'élévation semble être le concept le plus simple pour la réalisation. L'emploi des actionneurs linéaires (vérins) limite la rotation des structures et engendre une mauvaise précision vu le jeu de fonctionnement des vérins.

# Chapitre III

## Étude et conception d'un héliostat

### III.1 Introduction

Au début de notre travail, il été prévu de visiter l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables et de voir quels sont les causes qui ont entraîné un mauvais rendement du prototype fabriqué au niveau de l'unité, pour les corriger ultérieurement. Cependant, dès la première vue, on a observé qu'il est quasiment impossible de corriger les défauts à détecter, puisque la majorité des liaisons sont des liaisons destructives. Même si on réussit à détecter les défauts, le mieux est de les éviter durant de nouvelles réalisations de ce prototype, l'option « correction » reste non disponible dans le cas de ce prototype.

Donc, dans ce chapitre nous allons présenter en premier lieu l'URAER, puis le prototype de la tour solaire, ensuite il y a le diagnostic que nous montrant à travers les différents défauts qu'on croit qu'ils sont source de l'imprécision des héliostats.

En propose aussi dans ce chapitre une nouvelle conception d'un héliostat qui doit être normalement plus simple et résistant, et moins coûteux, assurant en même temps une précision dans l'orientation des miroirs, améliorant ainsi le rendement de la tour. Enfin, nous allons réaliser un prototype de cette conception et effectuer des essais afin de valider ces hypothèses.

### III.2 Présentation de l'URAER

L'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER), inaugurée en 1999 et rattachée au centre de développement des énergies renouvelables (CDER) est située dans la ville de Ghardaïa. L'ambition de l'URAER est de devenir une plate-forme internationale d'expérimentation et un nœud de communication de toutes les réalisations régionales dans le

domaine des énergies renouvelables. L'URAER à travers ces programmes de recherches contribue à la maîtrise et au développement de ces technologies

Le potentiel humain existant au sein de l'unité peut apporter sa contribution à l'effort national de recherche et formation. Ceci d'une part en collaborant avec les universités et les autres centres de recherche, et d'autre part par la possibilité d'offrir au sein de l'unité une formation de qualité dans le domaine des énergies renouvelables, allant du niveau de maîtrise jusqu'au niveau de post-graduation spécialisé.

### III.3 Prototype de la tour solaire

L'équipe de recherche à réussi de fabriquer 17 héliostat représentant le champ d'héliostat qui concentre le rayonnement solaire descendant sur le site vers le sommet d'une tour de 5m d'hauteur.

### III.4 Diagnostic des défauts

Comme nous l'avons indiqué à l'introduction de ce chapitre, les structures des héliostats sont réalisées presque totalement par des liaisons destructives qui rend impossible le démontage des différentes parties des structures pour de probables corrections.

Une simple manipulation des héliostats permet de détecter des grands jeux au niveau des différentes articulations réalisées par des tubes ronds introduits les uns dans les autres sans emploi de bagues, ni roulements.

Le code établi pour commander les actionneurs (vérins) repose sur des équations linéaires pour décrire la variation entre l'angle d'élévation et la rotation du moteur du vérin qui assure ce mouvement d'un côté, et de l'autre côté la variation de l'angle azimut en fonction de la rotation du moteur du vérin qui assure ce mouvement.

Le modèle mathématique considère que le plan réflecteur du miroir coïncide avec l'axe de rotation horizontal, le temps que l'axe de rotation verticale le traverse au centre. En plus, les deux axes passent l'un à travers l'autre. Cependant, on remarque des décalages entre toutes ces références.

## III.5 Nouvelle conception proposée

### III.5.1 Cahier de charge

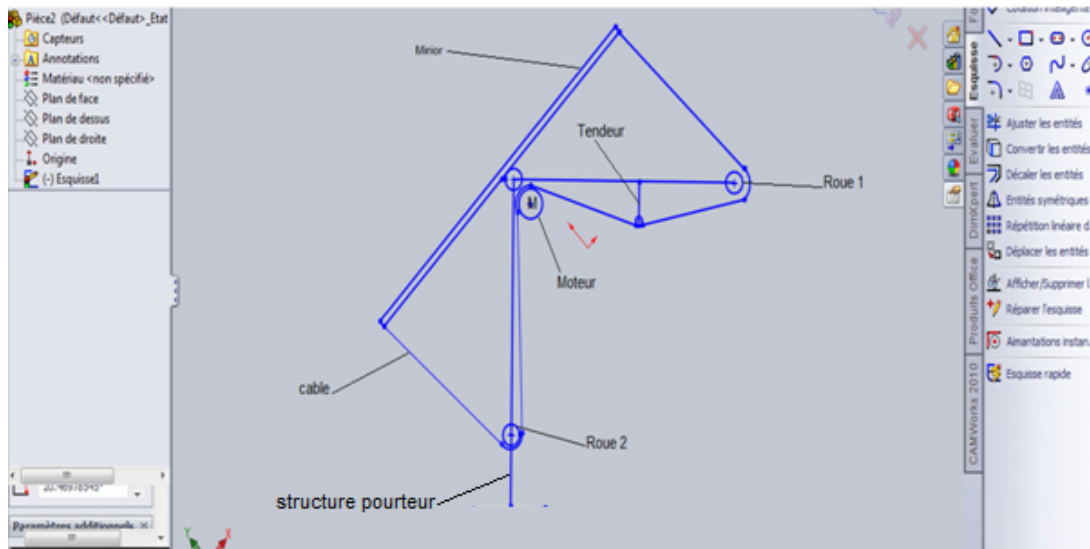
Lors de la visite à l'unité de recherche, et après avoir proposé de concevoir un nouvel héliostat, il nous a été indiqué que le nouvel héliostat doit respecter un cahier de charges. Ces charges sont résumées dans les points suivants :

- Doit travailler à des vitesses du vent allant jusqu'à 40 km/h,
- Doit assurer une position horizontale lorsque la vitesse des vents dépasse 40 km/h,
- Doit assurer une position verticale afin de pouvoir nettoyer les miroirs facilement,
- Doit assurer une rotation azimut de 180 °C,
- Doit assurer une élévation entre 0 et 90 °C,
- La surface de réflexion est égale à 4 m<sup>2</sup>.

### III.5.2 Description de la conception proposé

On propose un héliostat du type élévation-azimut où l'entraînement est assuré par des motoréducteurs à vis sans fin et à l'aide de câbles en acier.

La figure suivante représente une esquisse expliquant le mouvement d'élévation.



*Figure III-1 : Esquisse du mouvement d'élévation*

L'ensemble des composants représentés ici est supporté par une autre structure qui tourne autour de l'axe verticale.

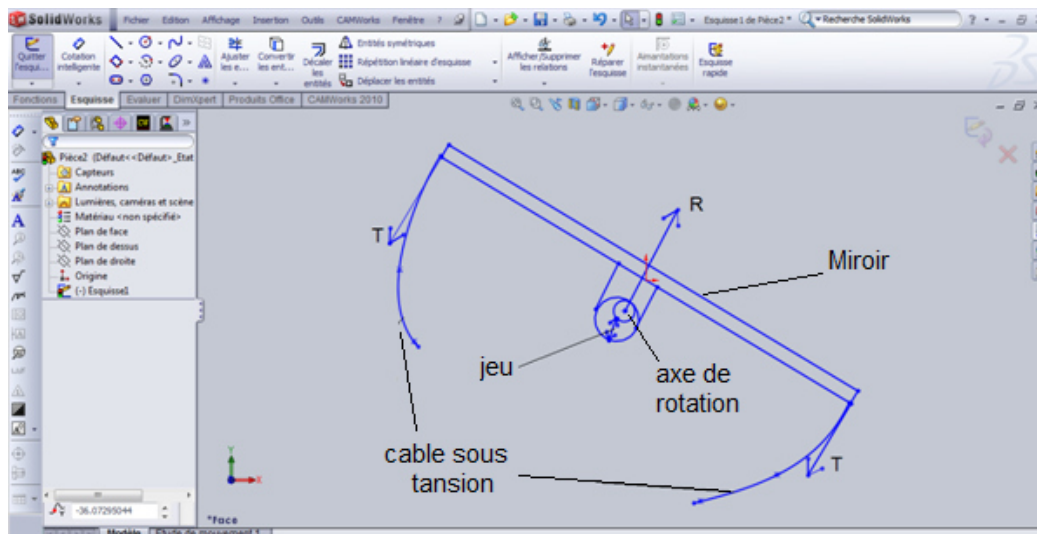


Le plan de réflexion est composé de quatre miroirs de  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$  disposés l'un à côté de l'autre, formant une surface carrée renforcée par quatre cornières croisées sous forme d'un plus, sur chaque coin de ce « plus » sera fixée l'un des quatre miroirs, et cela par trois vis de fixation.

L'intérêt de diviser la surface réfléchissante en quatre est que : le risque de caser un miroir va diminuer de 75%, dans ce cas seulement un des quatre miroirs sera remplacé au lieu de remplacer une surface plus grande de quatre fois. En plus, la fixation par trois vis permettra d'incliner chaque miroir par rapport au plan de réflexion de façon à simuler une parabole, ce qui doit probablement permettre de mieux concentrer les rayons réfléchies sur le récepteur.

Ce « plus » en cornière va être couplé avec la structure porteuse au moyen de deux articulations représentant l'axe de rotation horizontal.

Aux extrémités loin de l'axe de rotation seront fixés deux câbles. En manipulant ces deux câbles, le plan de réflexion pourra être incliné à n'importe quel degré entre  $0$  et  $90^\circ$ , toute en assurant l'élimination du jeu dans les articulations. Les tensions dans les deux câbles vont assurer le serrage des cornières sur l'axe de rotation.



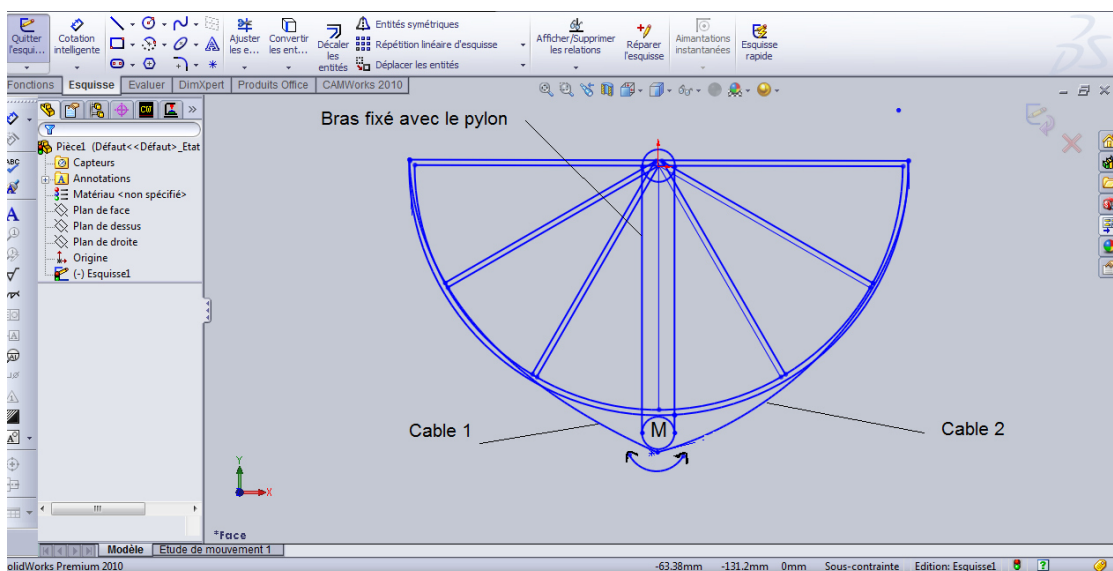
**Figure III-2 :** *Élimination automatique du jeu*

Chacun des deux câbles va être réorienté vers le cylindre dont le motoréducteur est couplé avec, et cela à travers une poulie fixée sur la structure porteuse. Les autres extrémités des câbles seront fixées sur un cylindre et même temps enroulés autour de lui de façon que lorsque on fait tourner le cylindre, l'un des câbles sera rouler, l'autre sera dérouler.

Et puisque le parcours d'une extrémité où le câble sera fixé représente un quart de cercle le temps que le câble reste rectiligne, on fera recourir à l'emploi d'un tendeur pour garder les câbles sous tension.

Les motoréducteur à utiliser seront à vis sans fin vu que ce type a l'avantage d'un grand rapport de réduction, en plus il assure une fonction « frein », deux propriétés indisponibles pour notre conception.

Le mouvement azimut sera assuré par un système similaire, cependant, l'intervalle de rotation doit être doublé, donc on utilisera un guide pour les câbles sous forme d'un demi-cercle fabriqué de fer en U. La figure suivante représente une esquisse pour expliquer comment assurer le mouvement.



**Figure III-3** : Esquisse du mouvement azimut

La structure porteuse est guidée en rotation sur le pylône, à l'extrémité du pylône sera fixé un bras qui doit maintenir en position le motoréducteur à sa position. Les deux câbles enroulés sur le cylindre vont être guidés à travers le demi-cercle en fer en U, et leurs extrémités seront fixées sur les extrémités du demi-cercle. Ceci est semblable à un couple d'engrenage où le rapport de réduction est vraiment important, et la liaison est assurée par les câbles au lieu des dents d'engrenages.

### III.5.3 Résistance de la structure

#### III.5.3.1 Sollicitations

On peut dire que seules les sollicitations suivantes auront action sur l'héliostat, et cela dans la situation la plus défavorable :

- La force des vents,
- Le poids des miroirs,
- Le poids de la structure et des motoréducteurs.

La force de vent peut être calculée par l'équation suivante :

$$F_{vent} = \frac{\rho S C_{\alpha}}{2} V^2$$

où :

- $\rho$  est la masse volumique de l'air,
- $S$  est la section s'opposant aux vents,
- $C_{\alpha}$  est un coefficient dépendant de l'orientation des vents par rapport à la section  $S$ ,
- $V$  est la vitesse des vents.

Selon le cahier des charges, la vitesse des vents peut atteindre  $40 \text{ km/h}$  en mode de fonctionnement « suivi », si la vitesse dépasse les  $40 \text{ km/h}$ , l'héliostat passe en mode « tempête » où la surface prend une position horizontale éliminant ainsi toutes forces des vents. Nous allons considérer une vitesse des vents égale à  $50 \text{ km/h}$  juste pour en assurer la résistance de la structure si un héliostat ne passe pas en mode « tempête », cela permettra de régler la situation avant que la vitesse des vents dépasse les  $50 \text{ km/h}$ .

$$V = 50 \text{ km/h} = \frac{50 \times 1000}{60 \times 60} = 13.89 \text{ m/s} \cong 14 \text{ m/s}$$

Concernant le coefficient  $C_{\alpha}$ , le cas le plus défavorable est quand les miroirs sont en position verticale pour la maintenance, ou proche de cette inclinaison en mode « suivi », dans ce cas le coefficient  $C_{\alpha} = 1$ .

La section s'opposant aux vents est celle des quatre miroirs, donc  $S = 4 \text{ m}^2$ .

Donc :

$$F_{vent} = \frac{1.341 \times 4 \times 1}{2} 14^2 = 525.67 \text{ N} \cong 530 \text{ N}$$

Le poids total de l'héliostat est la somme des poids des différents composants :

$$P_{tot} = (m_{miroirs} + m_{support-miroirs} + m_{structure})g$$

1m<sup>2</sup> d'un miroir d'épaisseur 3mm, pèse environ 10kg. [17]

Donc, dans notre cas :

$$m_{miroirs} = 40kg$$

Le support des miroirs est composé de quatre cornières 30×30 de section transversale :

$$S = (0.03 + 0.027) \times 0.003 = 1.71 \times 10^{-4}m^2$$

Sachant que la longueur totale des quatre cornières est égale à 7.2m, et la masse volumique du fer  $\rho_{Fe} = 7900kg/m^3$ , alors :

$$m_{support-miroirs} = \rho_{Fe} \times S \times l = 7900 \times 1.71 \times 10^{-4} \times 7.2 = 9.73kg \cong 10kg$$

La structure porteuse est formée d'un demi-cercle en fer en U d'une masse :

$$m_{FerU} = \rho_{Fe} \times S \times l$$

Avec une section  $S = (0.012 + 0.012 + 0.008) \times 0.003 = 0.9 \times 10^{-4}m^2$ , et une longueur égale au demi périmètre d'un cercle de rayon égale à 80 cm, donc :  $l = \pi r = 3.14 \times 0.8 = 2.512$  m, alors :

$$m_{FerU} = \rho_{Fe} \times S \times l = 7900 \times 0.9 \times 10^{-4} \times 2.512 = 1.79kg$$

On ajout à cette masse celle des sept renforcements en fer carré 10 × 10 dont la longueur de chacun est égale à 2 m. Alors :

$$m_{Renf} = 7 \times \rho_{Fe} \times S \times l = 7 \times 7900 \times 0.01^2 \times 2 = 11.06kg$$

On ajout aussi la masse d'un tube rond de diamètre extérieure égale à 60 mm estimer à être supérieur à celui du pylône, donc de diamètre imposé doit tenir compte du résultat qu'on va obtenir de la vérification de résistance du pylône. Sa longueur est égale à 1m, alors la masse de ce tube rond est égale à :

$$m_{tube} = \rho_{Fe} \times S \times l = 7900 \times \frac{\pi}{4} (0.06^2 - 0.054^2) \times 1 = 4.24kg$$

La masse des deux motoréducteurs est estimée à 1kg, donc ; la masse totale de la structure porteuse est :

$$m_{structure} = m_{FerU} + m_{Renf} + m_{tube} + m_{mot} = 1.79 + 11.06 + 4.24 + 1$$

$$m_{structure} = 18.09 \cong 20kg$$

On a négligé la masse du reste des composant, cependant, toutes les masse calculées sont majoré de quantités en plus.

Ainsi, le poids total de l'héliostat est la somme des poids des différents composants :

$$P_{tot} = (40 + 10 + 20) \times 9.81 \cong 687N$$

Ce poids sera supporter par une buté situé à 1m de l'extrémité du pylône, le temps que la force des vents va être concentrée au centre du plan réflecteur et par conséquent, sur l'extrémité supérieur du pylône.

### III.5.3.2 Détermination du diamètre du pylône

Pour déterminer le diamètre du pylône, une étude statique doit être effectuée. Nous avons donc une poutre encastrée dont la section transversale est constante et représentée par un annaux de diamètre extérieur D et de diamètre intérieur d, sollicitée par deux forces. La figure suivante représente les sollicitations ainsi que les différentes sections observées.

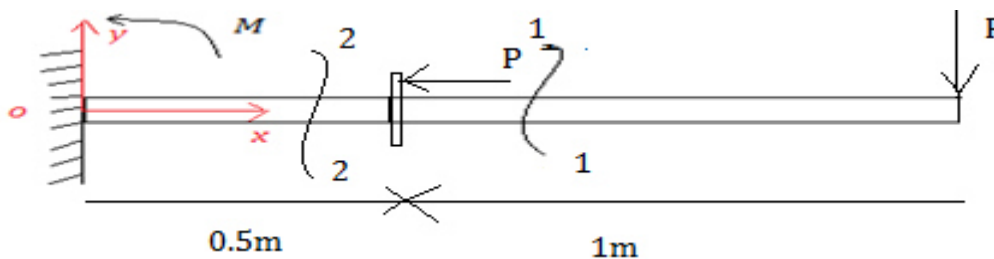


Figure III-4 : Etude statique

L'équilibre nous donne :

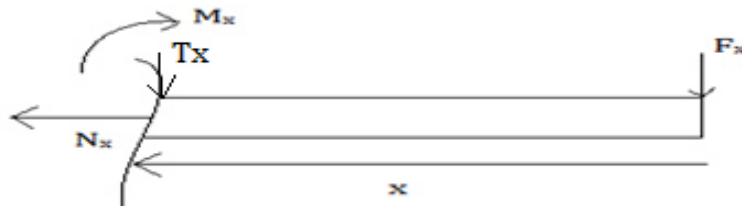
$$\sum F_x = 0 \Rightarrow R_x = P_{tot} = 687N$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow R_y = F_{vent} = 530N$$

$$\sum M_{Oz} = 0 \Rightarrow M = F_{vent} \times 1.5 = 530 \times 1.5 = 795N$$

Pour chacune des deux sections, on détermine les efforts internes comme suite :

**a) Section (1-1) :  $0 \geq x \geq 1$**



**Figure III-5 : Etude de première section**

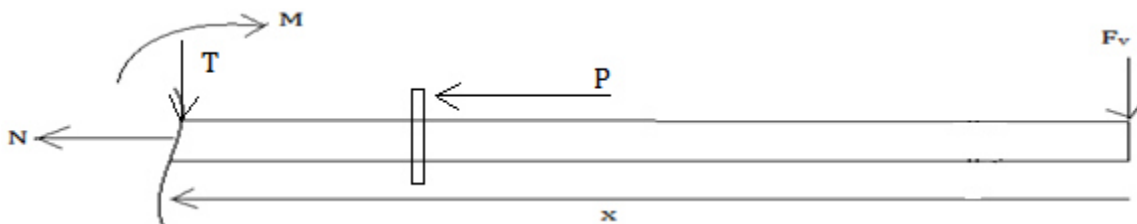
$$\sum F_x = 0 \Rightarrow N_1(x) = 0$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow T_1(x) = -F_{vent} = -530N = C^{te}$$

$$\sum M_z = 0 \Rightarrow M_{f1}(x) = -F_{vent} \cdot x = -530x \text{ (variation linéaire)}$$

$$\text{à } x = 0, M_{f1}(0) = 0, \text{ à } x = 1, M_{f1}(1) = -530 N \cdot m$$

**b) Section (2-2) :  $1 \geq x \geq 1.5$**



**Figure III-6 : Etude de deuxième section**

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow N_2(x) = -P_{tot} = -687N = C^{te}$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow T_2(x) = -F_{vent} = -530N = C^{te}$$

$$\sum M_z = 0 \Rightarrow M_{f2}(x) = -F_{vent} \cdot x = -530x \text{ (variation linéaire)}$$

$$\text{à } x = 1, M_{f2}(1) = -530 N \cdot m, \text{ à } x = 1.5, M_{f2}(1.5) = -795 N \cdot m$$

Ces résultats sont représentés par le graphe suivant :

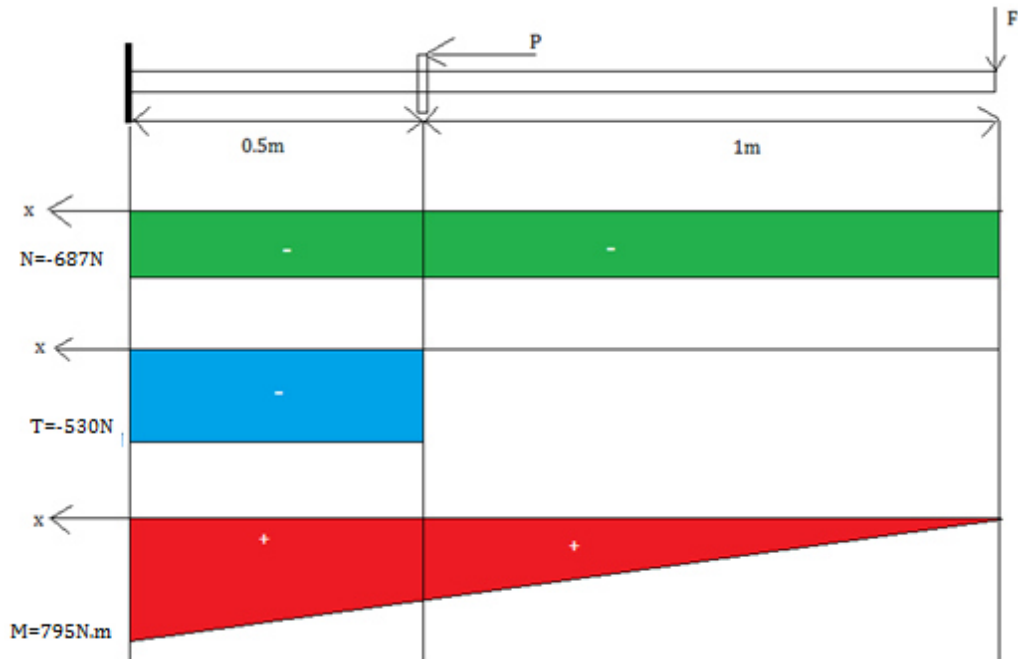


Figure III-7 : Le graphe des efforts internes

De ce graphe on peut tirer les efforts maximums suivants :

- $N_{max} = -687N < 0$  c'est donc le cas d'une compression
- $T_{max} = -530N$
- $M_{fmax} = 795N.m$

La résistance à ces efforts implique :

- $\sigma_{max}^{comp} = \frac{N_{max}}{S} \leq \sigma_{limite}^{comp} = \frac{\sigma_{rup}^{comp}}{k}$
- $\tau_{max} = \frac{T_{max}}{S} \leq \tau_{limite} = \frac{\tau_{rup}}{k}$
- $\sigma_{max}^{comp} = \frac{M_{fmax} y_{max}^{comp}}{I} \leq \sigma_{limite}^{comp} = \frac{\sigma_{rup}^{comp}}{k}$  et  $\sigma_{max}^{tra} = \frac{M_{fmax} y_{max}^{tra}}{I} \leq \sigma_{limite}^{tra} = \frac{\sigma_{rup}^{tra}}{k}$

Avec :  $k=2$  : coefficient de sécurité,

$^{tra}$  : l'indice « traction »,

$^{comp}$  : l'indice « compression »,

$_{rup}$  : l'indice « rupture »,

$\sigma$  et  $\tau$  : contraintes internes,

$I$  : moment quadratique  $I = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4)$

$y_{max}^{comp} = y_{max}^{tra} = D/2$

Le matériau qu'on prévoit pour la construction est un acier non allié dont les contraintes limites de traction, de compression et de cisaillement sont :

$$\sigma_{rup}^{tra} = 399.826 \times 10^6 \text{ N/m}^2, \sigma_{rup}^{comp} = 220.594 \times 10^6 \text{ N/m}^2, \tau_{rup} = 790 \times 10^8 \text{ N/m}^2$$

Les conditions de résistance deviennent :

- $S = \pi(D^2 - d^2) \geq k \frac{N_{max}}{\sigma_{rup}^{comp}}$
- $S = \pi(D^2 - d^2) \geq k \frac{T_{max}}{\tau_{rup}}$
- $\frac{\frac{M_{fmax}D}{2}}{\frac{\pi}{64}(D^4 - d^4)} \leq \frac{\sigma_{rup}^{tra}}{k} \Rightarrow \frac{\pi}{32}(D^4 - d^4) - \frac{k}{\sigma_{rup}^{tra}} M_{fmax}D \geq 0$
- $\frac{\frac{M_{fmax}D}{2}}{\frac{\pi}{64}(D^4 - d^4)} \leq \frac{\sigma_{rup}^{comp}}{k} \Rightarrow \frac{\pi}{32}(D^4 - d^4) - \frac{k}{\sigma_{rup}^{comp}} M_{fmax}D \geq 0$

Ces équations sont des équations à deux inconnus, pour les résoudre, on impose :  $d = D - 2e = D - 6$  (avec  $e = 3 \text{ mm}$ ), nous aurons alors :

- $D^2 - (D^2 - 4eD + 4e^2) \geq \frac{k \times N_{max}}{\pi \times \sigma_{rup}^{comp}} \Rightarrow D \geq \frac{1}{4e} \left( \frac{k \times N_{max}}{\pi \times \sigma_{rup}^{comp}} + 4e^2 \right) \cong 0.003165 \text{ m}$
- $D^2 - (D^2 - 4eD + 4e^2) \geq \frac{k \times T_{max}}{\pi \times \tau_{rup}} \Rightarrow D \geq \frac{1}{4e} \left( \frac{k \times T_{max}}{\pi \times \tau_{rup}} + 4e^2 \right) \cong 3 \text{ mm}$
- $\frac{\pi}{32}(D^4 - (D - 2e)^4) - \frac{k}{\sigma_{rup}^{tra}} M_{fmax}D \geq 0$   
 $\Rightarrow D^4 - (D - 0.006)^4 - \frac{64 \times 795}{\pi \times 220.594 \times 10^6} D \geq 0$   
 $\Rightarrow D^4 - (D - 0.006)^4 - 7.34 \times 10^{-5} D \geq 0$
- $\frac{\pi}{32}(D^4 - (D - 2e)^4) - \frac{k}{\sigma_{rup}^{comp}} M_{fmax}D \geq 0$   
 $\Rightarrow D^4 - (D - 0.006)^4 - \frac{64 \times 795}{\pi \times 399.826 \times 10^6} D \geq 0$   
 $\Rightarrow D^4 - (D - 0.006)^4 - 4.05 \times 10^{-5} D \geq 0$

Vu la complexité des deux dernières conditions, on a déterminé numériquement les valeurs du diamètre répondant à ces conditions (voir annexe B). Nous avons alors trouvé :

- $D = 60 \text{ mm}$
- $D = 50 \text{ mm}$

Donc pour résister aux sollicitations sus-indiquées, le pylône doit avoir au minimum un diamètre  $D = 60 \text{ mm}$ , donc, nous allons utiliser un tube rond de diamètre extérieur  $D = 60 \text{ mm}$ . Ainsi, et pour des raisons de conception, le tube rond de la structure porteuse aura un diamètre



intérieur plus grand que 60 mm, on va prendre un tube dont le diamètre extérieur est égale à 70 mm.

### III.5.4 Motoréducteur

On choisi des motoréducteur à vis sans fin pour assurer l'entraînement des cylindres dont les câbles seront attachés. Ces motoréducteur sont disponible sur le marché comme motoréducteur lève vitre du véhicule Chevrolet – Aveo. Ils sont alimentés en 12V et tournent dans les deux sens.



*Figure III-8 : Motoréducteur lève vitre pour Aveo*

La puissance n'est pas un paramètre très important car la structure est en état d'équilibre, donc les couples de torsion qui vont assure le fonctionnement sont moindres.

On doit rappeler qu'une vis sans fin est un cylindre comportant une cannelure hélicoïdale (parfois plusieurs), la faisant ressembler à une tige filetée. Associée à un pignon, elle constitue un engrenage gauche (les deux axes ne sont pas dans le même plan), dans lequel elle se comporte comme une roue à une dent (ou plus, selon le nombre de cannelures). On appelle aussi parfois ce système roue et vis sans fin.

### III.5.5 Les câbles

On va assurer l'entraînement du support miroirs ainsi que la structure porteuse par des câbles de diamètre 3 mm, il nécessaire de rappeler que ces câbles ne seront sollicités que par l'action d'un tendeur majoré par les couple de démarrage des motoréducteur. Leurs longueurs dépendent du mouvement correspondant.

Les deux câbles mis en place pour assurer l'entraînement du support miroirs doivent avoir une longueur minimale définie en position verticale du support miroirs, couvrant ainsi :

- Le rayon de rotation du point de fixation du câble autour de l'axe horizontal  $R_{\acute{e}lev} = 900mm$ ,
- L'étendu entre le point de fixation et la poulie de renvois  $\sqrt{2}R_{\acute{e}lev}$ ,
- Un demi tour sur la poulie de renvois de rayon  $r = 20mm$ ,
- Un tour sur le cylindre d'entraînement de rayon  $r_{cyl-\acute{e}lev} = 40mm$ .

$$l_{\acute{e}lev} \geq R_{\acute{e}lev}(1 + \sqrt{2}) + \pi r + 2\pi r_{cyl-\acute{e}lev}$$

$$l_{\acute{e}lev} \geq 900(1 + \sqrt{2}) + 20\pi + 80\pi = 2486.95mm$$

On prend  $l_{\acute{e}lev} = 2.5m$ .

Les deux câbles d'entraînement azimuth doivent avoir une longueur minimale définie par la longueur du demi-cercle fabriqué de fer en U ayant un rayon  $r = 0.8m$  majorée par un tour sur le cylindre d'entraînement de rayon  $r_{cyl-azimut} = 40mm$

$$l_{azimut} \geq \pi r + 2\pi r_{cyl-azimut}$$

$$l_{\acute{e}lev} \geq 800\pi + 80\pi = 2764.6mm$$

On prend  $l_{azimut} = 3m$ .

### III.5.6 Cylindres d'entraînement

Les deux cylindres d'entraînement qui seront couplés avec les motoréducteurs et dont les extrémités des câbles seront fixées sur, doivent avoir une hauteur minimale assurant d'enroulé presque la longueur totale d'un câble ( $l = 3m$  au maximum), donc :

$$h = n \times d$$

Avec  $d$  le diamètre du câble  $d = 3mm$  et  $n$  le nombre de tour pour l'enroulement du câble :

$$n \geq \frac{l_{azimut}}{2\pi r_{cyl-azimut}} = \frac{3000}{2\pi \times 40} = 11.94 \text{ tours}$$

On prend  $h = 12 \times 3 = 36 \text{ mm}$ .

### III.5.7 Tendeur

Sur le mouvement élévation, on prévoit l'utilisation d'un tendeur afin de garder les câbles tendus, vu que le parcours des points de fixation des câbles aux extrémités du support miroir (un quart de cercle), et la longueur des parties des câbles étendues entre les points de fixation et les poulies de renvois ne sont pas égaux.

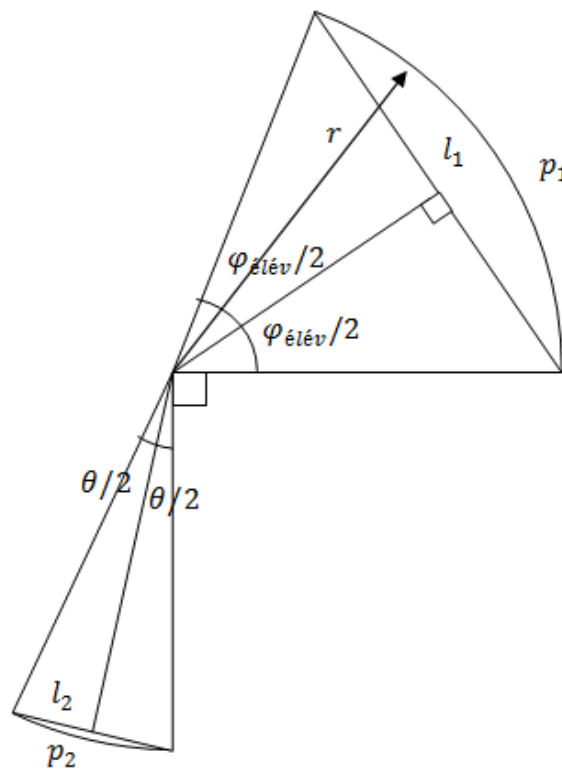


Figure III-9 : Comparaison parcours-étendu câbles

On a :

$$P = p_1 + p_2 = \varphi_{\text{élev}} \times r + \theta \times r = \varphi_{\text{élev}} \times r + \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_{\text{élev}}\right) \times r = \frac{\pi}{2} \times 900 = 1413.72 \text{ mm}$$

$$L = l_1 + l_2 = 2 \times r \times \sin \frac{\varphi_{\text{élev}}}{2} + 2 \times r \times \sin \frac{\theta}{2} = 2 \times r \left( \sin \frac{\varphi_{\text{élev}}}{2} + \sin \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_{\text{élev}}}{2} \right) \right)$$

Le maximum et le minimum de la différence entre  $P$  et  $L$  dépend alors de l'angle d'élévation (variant entre  $0^\circ$  et  $90^\circ$ ). Ces valeurs ont été déterminées à l'aide du tableur Excel où on a enregistré une valeur maximale de  $142 \text{ mm}$  correspondante à aux angles  $0^\circ$  et  $90^\circ$ , et une autre minimale de  $36 \text{ mm}$  correspondante à un angle de  $45^\circ$  (voir annexe A).

Donc un tendeur doit être installé pour récupérer la marge entre le min et le max, et puisqu'il sera formé d'une poulie, une course de  $(142 - 36)/2 < 55 \text{ mm}$  suffira largement.

Concernant le mouvement azimut, et suite à l'utilisation d'un demi-cercle comme guide pour les câbles, il n'y aura pas nécessité d'utiliser un tendeur.

## III.6 Simulation de la conception

Dans cette partie nous simulons notre conception à l'aide du logiciel SolidWorks, une mise en plan des différents composants du système sera établi.

### III.6.1 Logiciel SolidWorks

Le logiciel SolidWorks est un outil de conception et de modélisation volumique paramétrée sous Windows basée sur des fonctions associatif. Il permet d'enregistrer les dessins sous trois formats.

Créé en 1993 par l'éditeur américain éponyme, SolidWorks a été acheté le 24 juin 1997 par la société Dassault Systèmes. Parmi les plus grandes organisations utilisant SolidWorks, on peut citer Michelin, AREVA, PatekPhilippe, MegaBlocs, Axiome, ME2C, SACMO, Le Boulch et Robert Renaud.

SolidWorks est un modeleur 3D utilisant la conception paramétrique. Il génère 3 types de fichiers relatifs à trois concepts de base : la pièce, l'assemblage et la mise en plan. Ces fichiers sont en relation. Toute modification à quelque niveau que ce soit est répercutée vers tous les fichiers concernés.

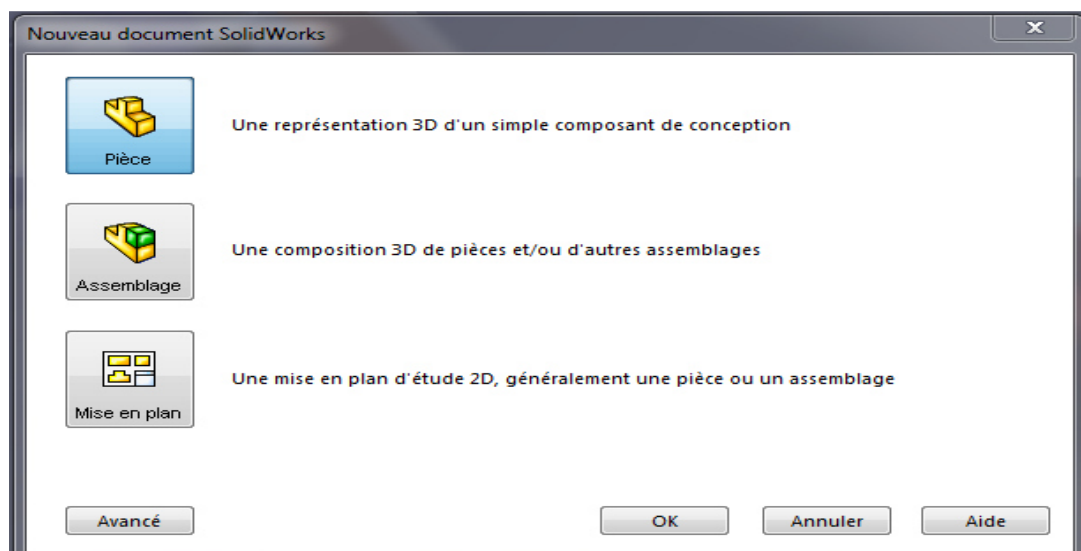
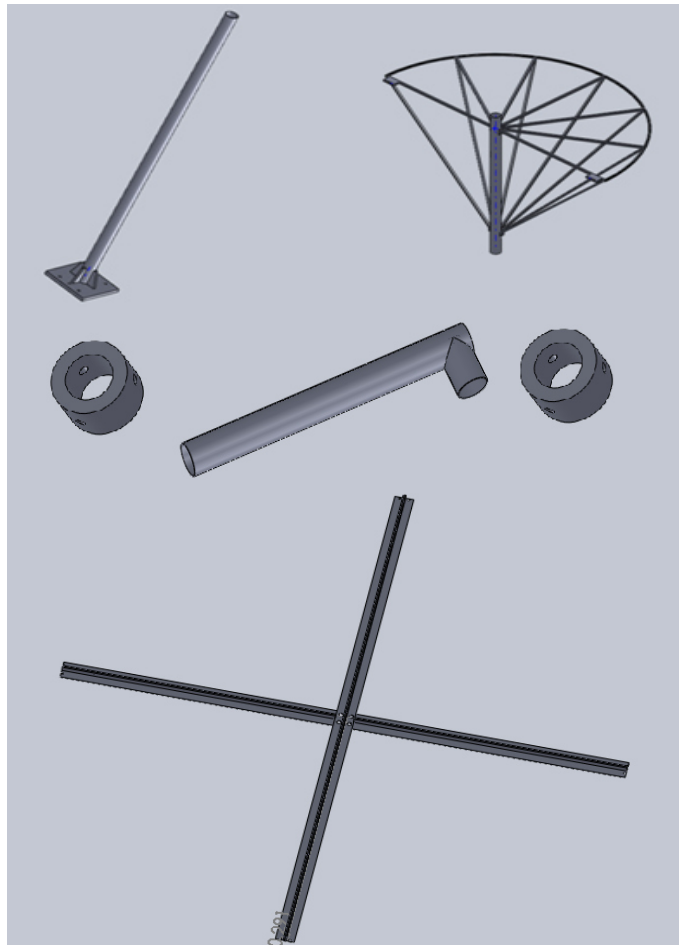


Figure III-10 : Les trois concepts de base (SOLIDWORKS).

### III.6.2 DAO de l'héliostat



*Figure III-11 : L'ensemble des pièces principales du mécanisme*

Le pylône qui est un tube rond est dessiné à partir d'une esquisse rectangulaire représentant la section longitudinale du tube, le tube est obtenu ensuite par une révolution. Une base carrée est ajoutée à l'extrémité du tube et renforcée par quatre nervures.

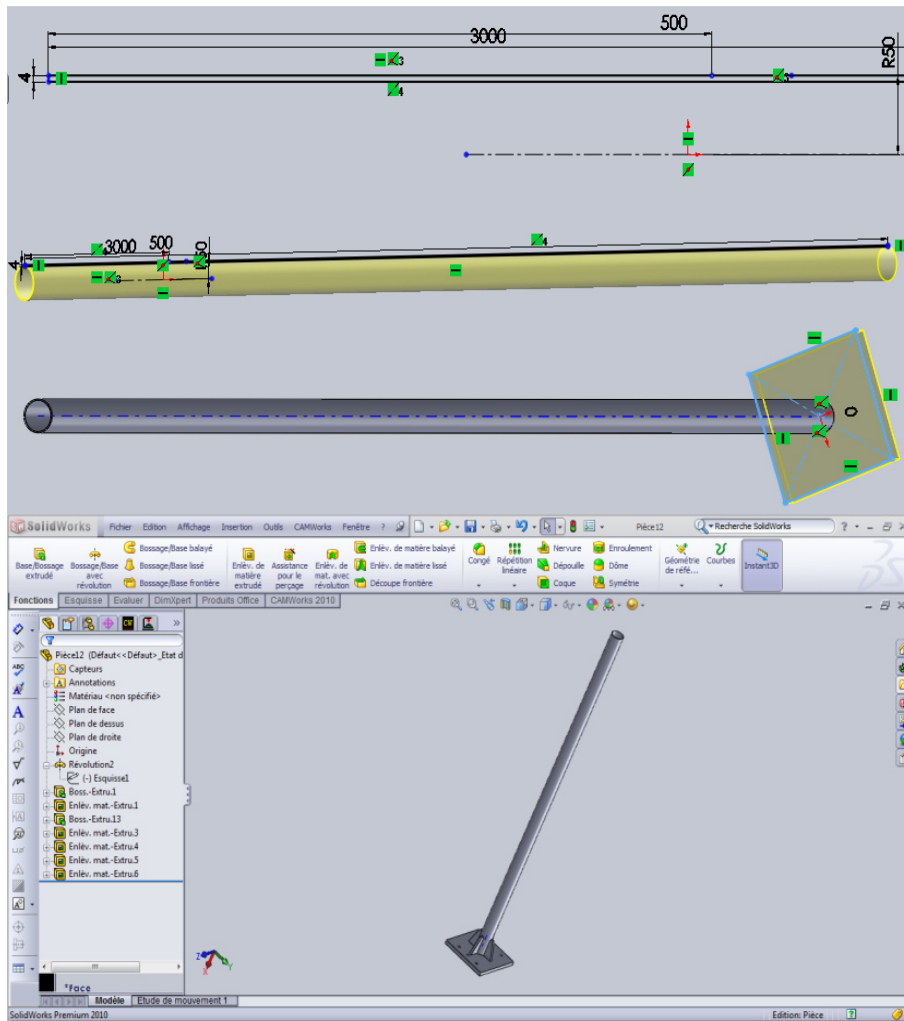


Figure III-12 : Pylône

Une esquisse sous forme d'un U permet d'obtenir après une révolution de 180° le guide pour les câbles d'entraînement azimuth.

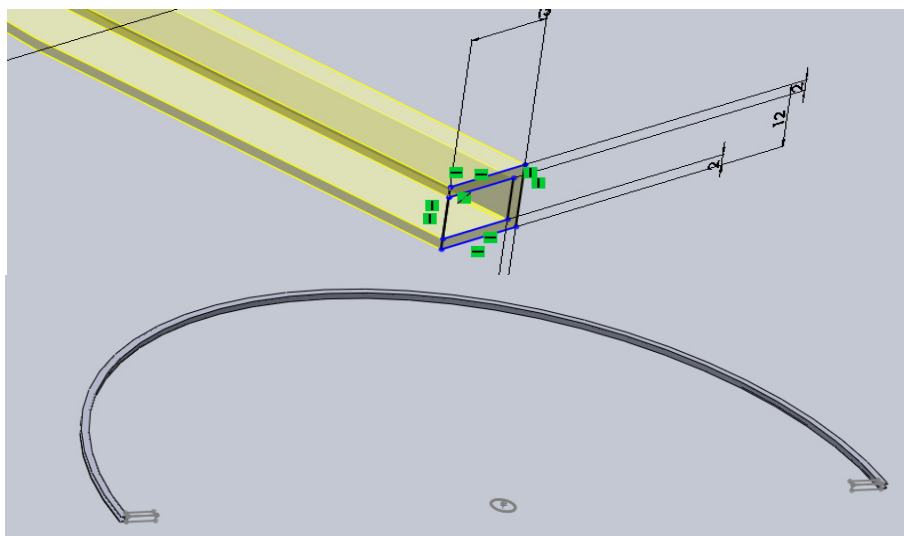
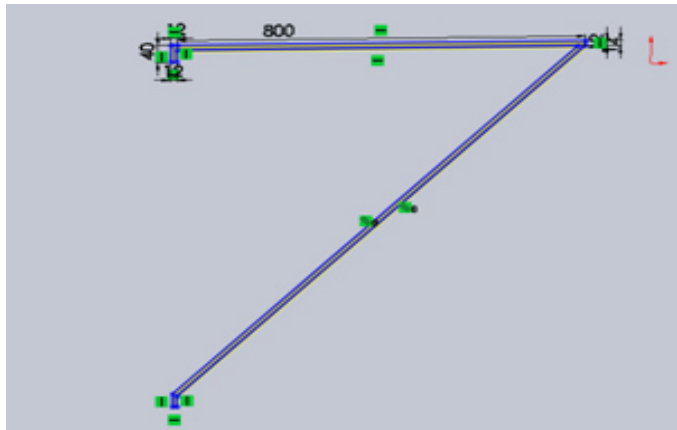


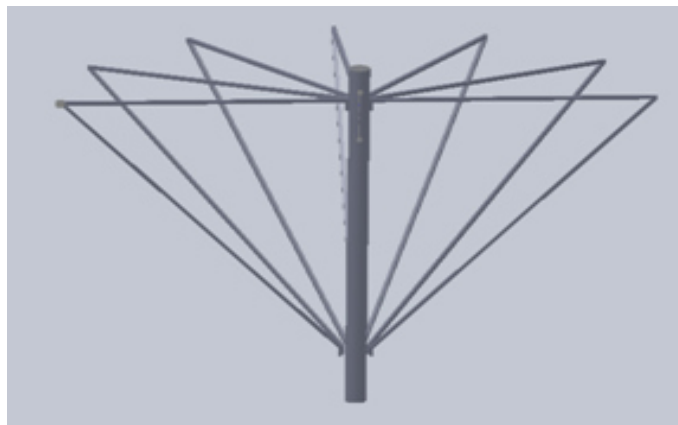
Figure III-13 : Guide pour les câbles d'entraînement azimuth

Ce guide est tenu en position par rapport au tube rond de 70 mm de diamètre au moyen de sept fer-carrés coudés sous la forme présentée dans la figure suivante :



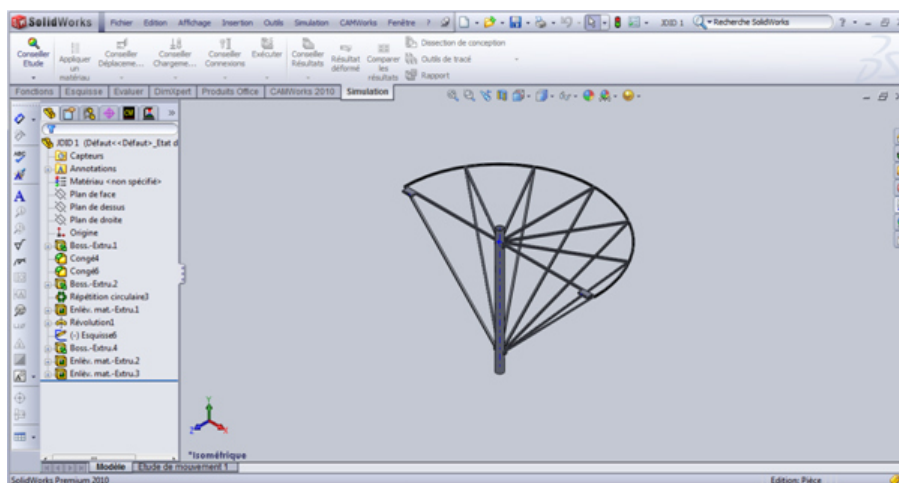
**Figure III-14 :** Fer carré de maintien en position du guide pour câbles

Après une répartition circulaire des sept fer-carrés autour du tube rond sur un intervalle de  $180^\circ$ , nous obtenant la forme de figure suivante.



**Figure III-15 :** Répartition circulaire des sept fer-carrés

A l'ajout du guide en demi-cercle, on obtient la structure porteuse



**Figure III-16 :** Structure porteuse

Deux butées assurant le guidage de la structure porteuse sur le pylône sont conçues par une esquisse de deux cercles extrudée par la suite.

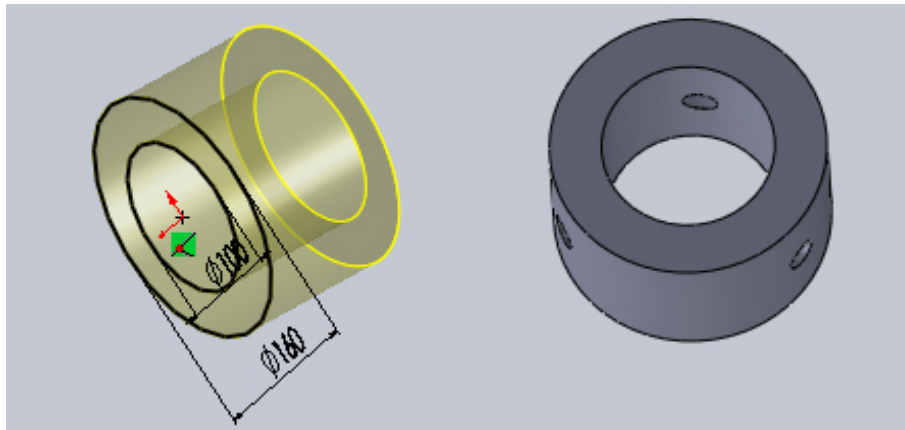


Figure III-17 : Butée

L'extrusion de l'esquisse présentée en gauche de la figure suivante donne une cornière.



Figure III-18 : Cornière

L'assemblage de quatre cornières donnera le support miroirs présenté dans la figure ci-dessous.

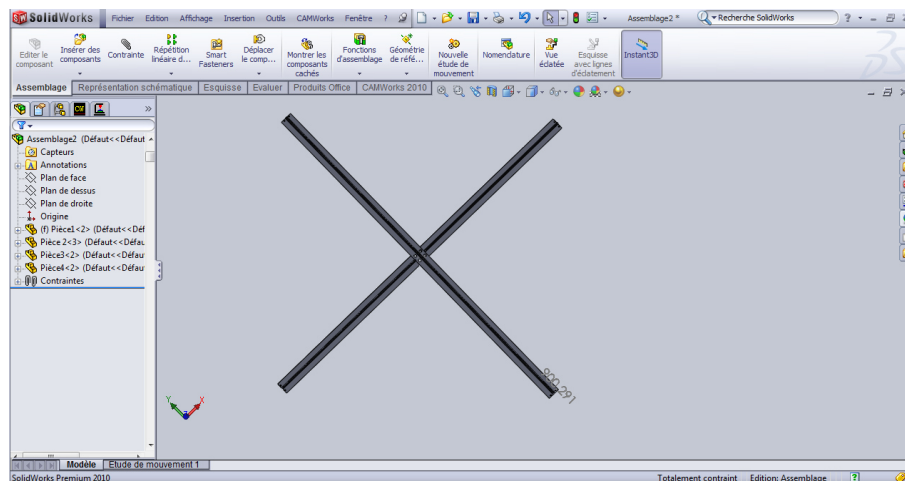


Figure III-19 : Support miroirs



Toutes ces pièces sont assemblées, le résultat est présenté par la figure suivante.

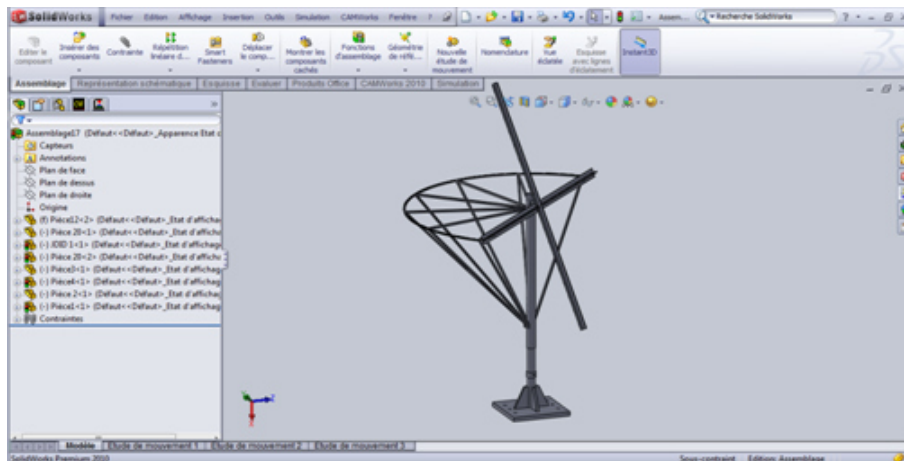


Figure III-20 : Assemblage des pièces de l'héliostat

### III.6.3 Analyse sous sollicitations

La première étape de l'analyse consiste à créer une étude

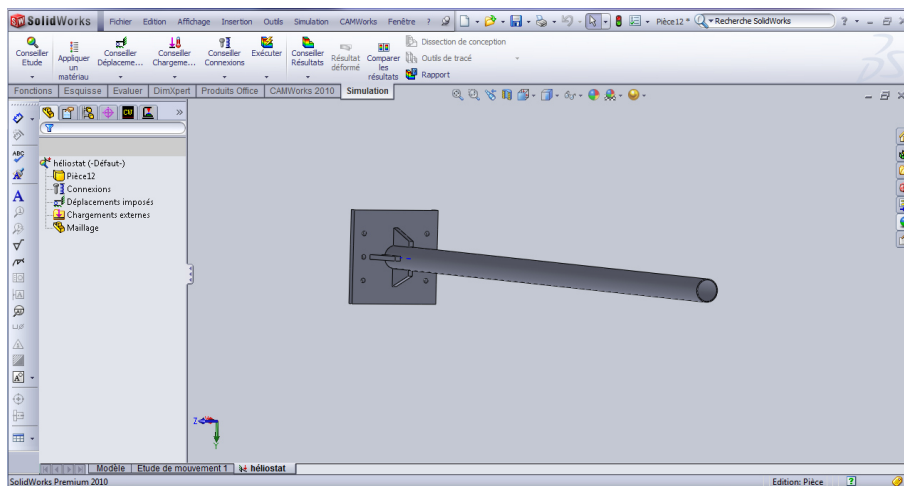


Figure III-21 : Chargement de la pièce

Ensuite, définir le matériau de la pièce.

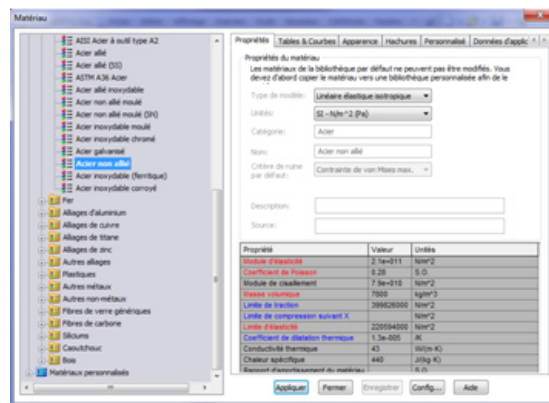


Figure III-22 : Attribution du matériau

L'étape suivante consiste à imposer des déplacements nuls pour encaster la pièce. Un simple clic droit sur déplacements imposés / géométrie fixe suffira dans ce cas.

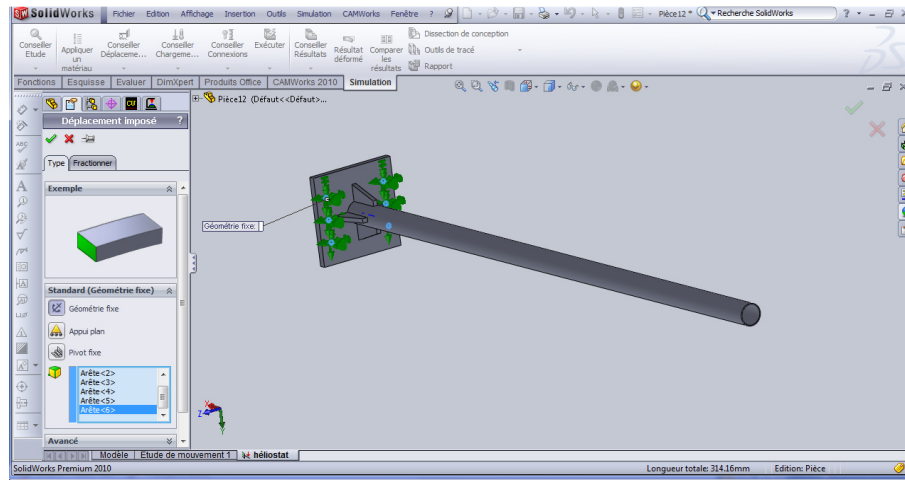


Figure III-23 : Fixation de la pièce

Puis, on applique les forces et on démarre les calculs après la création du maillage.

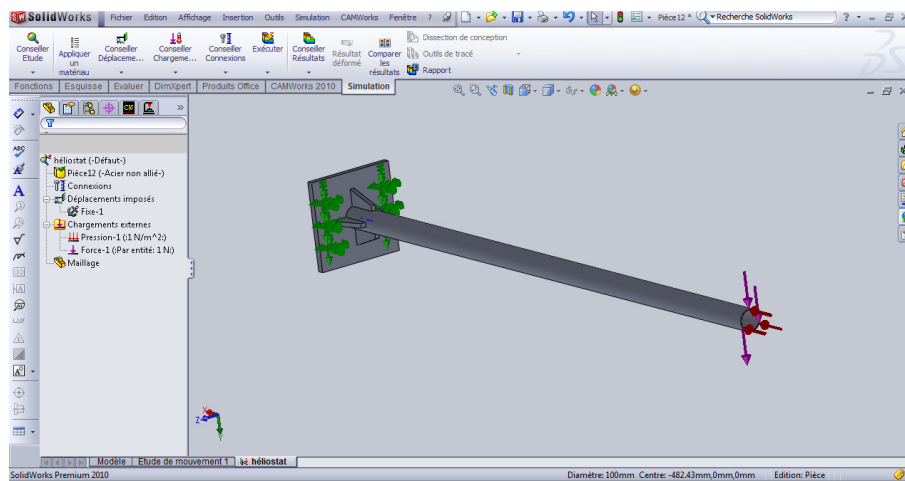


Figure III-24 : Application des forces

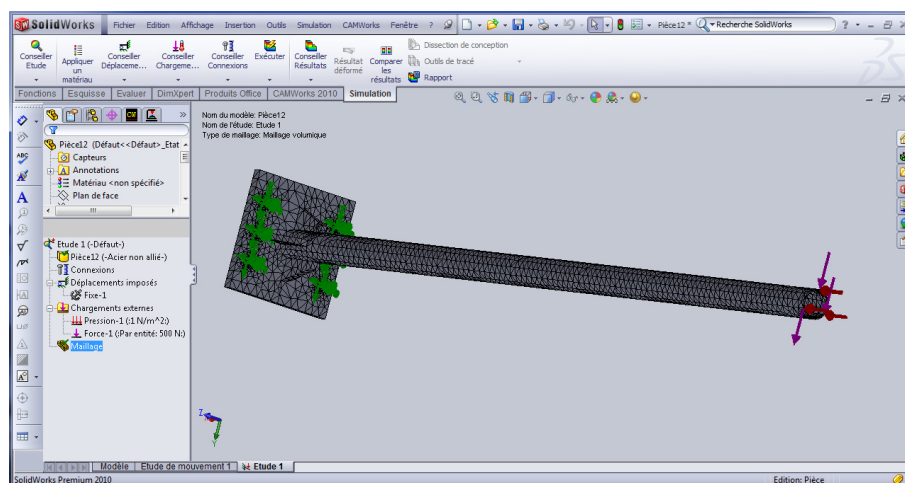
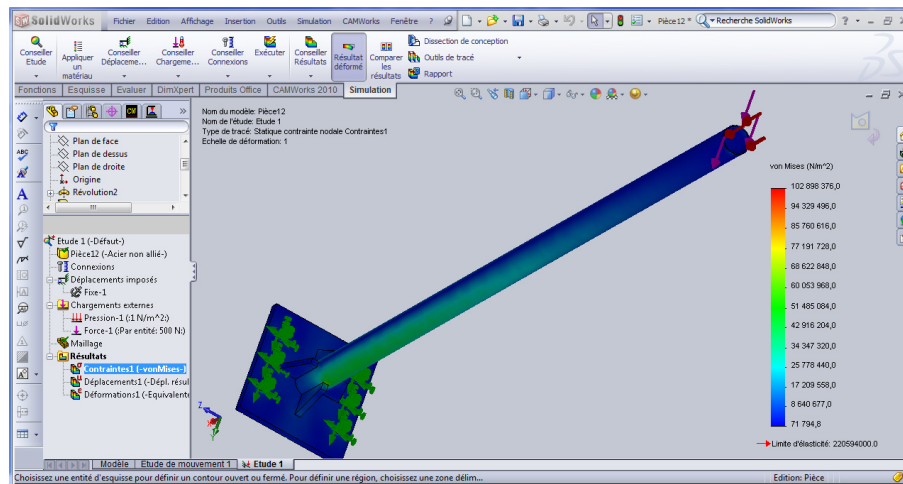


Figure III-25 : Maillage

Le résultat représenté sur la figure ci-dessous montre les déplacements, on remarque que le maximum est atteint proche de l'encastrement juste en dessus des nervures. Il est clair en plus que les déformations sont minimales et que le pylône résistera aux forces indiquées précédemment.

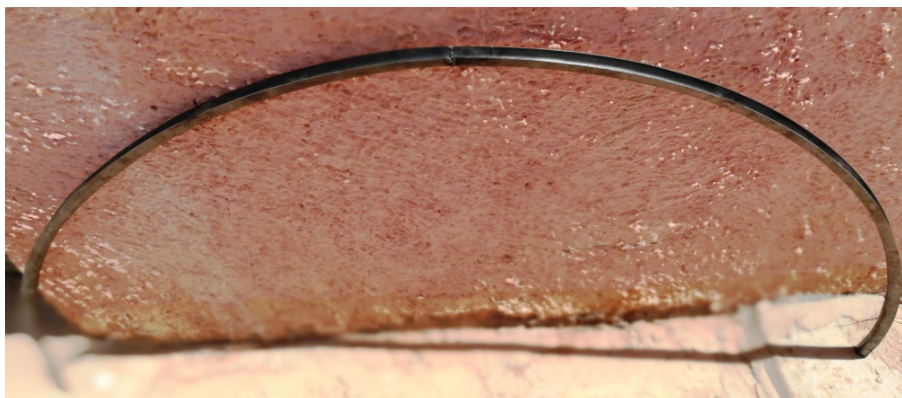


*Figure III-26 : Résultats de la simulation du pylône*

### III.7 Réalisation

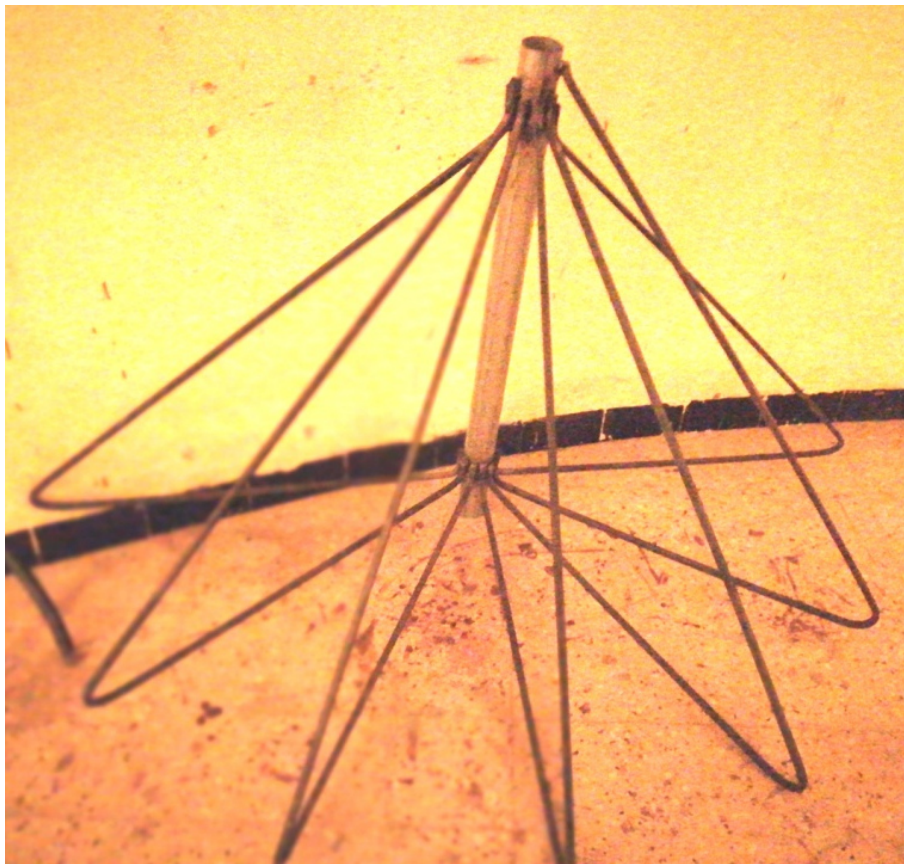
Malheureusement, et à cause à des contraintes de temps généralement, nous n'avons pu fabriquer que la structure porteuse en plus des huit poulies assurant le renvoi des câbles.

Par manque de moyens au niveau de l'atelier de génie mécanique, la fabrication du demi-cercle en fer en U a été confiée à un atelier privé situé à Ghardaïa près de l'URAER, sa réception a pris du temps (plus de 10 jours).



*Figure III-27 : Le demi-cercle de guidage des câbles*

Les sept fers carrés ont été découpés et coudés chez un soudeur à Touggourt et transportés par la suite avec le tube rond vers l'URAER où nous les avons assemblés au niveau l'atelier de l'unité.



*Figure III-28 : Assemblage des fer-carrés avec le tube rond.*

Le même atelier privé nous a fabriqué les huit poulies.



*Figure III-29 : L'une des poulies de renvoi.*



## III.8 Conclusion

En cours de ce chapitre nous avons présenté les différentes étapes d'étude qu'on a réalisées pour mettre en fin une conception répondant au cahier des charges.

Cette conception doit assurer théoriquement la fonction principale d'un héliostat qui est la réflexion des rayons solaires vers le récepteur au sommet de la tour. Le jeu dans les articulations sera éliminé automatiquement en cas de présence ou même après usure suite à un long temps de fonctionnement. C'est une propriété acquise suite à l'emploi du tendeur des câbles.

Les couples moteurs assurant le fonctionnement sont notablement réduits puisque le système d'entraînement par câble simule un couple d'engrenage dont le rapport de réduction est important.

En plus, le coût revient est estimé à être beaucoup plus petit par rapport aux autres modèles puisqu'il utilise des composants simples et faiblement sollicités au contraire des actionneurs connus dans ce domaine qui sont des éléments de précision.

# Conclusion

L'énergie solaire est l'une des énergies renouvelables qui permet d'obtenir essentiellement de la chaleur et de l'électricité. Nous avons vu qu'à l'aide des nouvelles technologies, les panneaux solaires photovoltaïques ou thermiques, on peut obtenir de la chaleur grâce aux réactions transformant la lumière en chaleur ainsi que de l'électricité.

Nous avons vu aussi que l'Algérie à l'avantage d'être située dans une zone dont l'irradiation solaire annuel est très importante. Ainsi, des recherches sont initiées dans le but d'exploiter cette source énergétique d'importance équivalente et même supérieure aux énergies fossiles.

Parmi ces recherches, une équipe de recherche de l'Unité de Recherches Appliquées en Energies Renouvelables filière du Centre de Développement des Energies Renouvelables a réalisé un prototype d'une centrale à tour solaire dont les héliostats assurent leur fonction de réflexion avec une précision réduite, un décalage des tâches des miroirs était le résultat de plusieurs jeux sur les différentes articulations réduisant ainsi le rendement du prototype.

Alors, nous avons visité l'unité de recherche pour essayer de corriger ces défauts. Malheureusement ; les liaisons entre les pièces des héliostats ont été réalisées par soudage, donc toute intervention de correction des jeux nécessite une destruction des liaisons et de l'héliostat par conséquent. La meilleure solution de notre point de vue était la proposition d'une nouvelle conception.

Dans ce but, on a étudié les différents types d'héliostats existants, il y avait différentes façons de concevoir un héliostat, mais le concept reposant sur un mouvement azimut et un autre d'élévation semble être le concept le plus simple pour la réalisation, c'est pourquoi il est le concept le plus utilisé dans les projets réalisés au niveau mondial.

La conception que nous proposons est du même concept, cependant ; elle peut être marquée par l'utilisation des motoréducteurs à vis sans fin couplés avec des cylindres et des câbles afin d'assurer l'entraînement pour les deux mouvements : celui d'élévation ainsi que le mouvement azimut, le principe est similaire à un mécanisme lève-vitre électrique.

La conception a été bien décrite dans un chapitre où l'assemblage ainsi que les pièces sont représentées par diverses figures. La résistance du pylône a été vérifiée lors du choix du diamètre et même validée par une simulation. Tous ce travail a été réalisé sous SolidWorks.

Malheureusement, et suite à des contraintes de temps principalement et suite à des difficultés diverses, nous n'avons pas complété la réalisation, seule la structure porteuse a été fabriquée. C'est pour cela qu'on propose de continuer avec la réalisation et d'effectuer des expériences afin de montrer l'intérêt de cette conception.

On recommande aussi d'ajouter des paramètres « décalages » au code de commande pour pouvoir adapter ce code à notre conception le mieux possible puisqu'il est difficile - pour ne pas dire impossible - de faire coïncider les axes de rotations avec le centre du miroir.

Un prototype réalisé sur la base de cette conception doit théoriquement assurer sa fonction principale de réflexion et avec une précision importante puisque l'élimination des jeux est assurée dans le concept utilisant les câbles pour l'entraînement. En plus, le coût de revient sera minimisé par rapport aux autres modèles puisqu'il utilise des composants simples et faiblement sollicités au contraire des actionneurs connus dans ce domaine qui sont des éléments de précision.

---

## Bibliographie

- [1] Adrien SALOMÉ, «*Développement d'un outil de contrôle de la répartition du flux solaire concentré sur un récepteur de centrale à tour : Application à la centrale de Thémis*» le 15 Octobre 2012
- [2] Olivier Farges, «*Conception optimale de centrales solaires à concentration : application aux centrales à tour et aux installations " beam down "*»
- [3] Mazerai E., «*The Passive Solar Energy Book, Rodale Press*», 1979.
- [4] Ozalp, N. Kogan, A. Epstein, M. (2009). «*Solar decomposition of fossil fuels as an option for sustainability* », International Journal of Hydrogen Energy
- [5] DOUFENE Belkacem et MEDKOUR Abd el Malek, «*étude d'un système de commande d'un héliostat d'une tour solaire.*», 2011/2012
- [6] Pierre GARCIA, «*Outils d'évaluation technico-économique et d'aide à la conception des centrales solaires thermodynamiques du futur* », Thèse de Doctorat, Université de Perpignan, 2007.
- [7] Quoilin Sylvain, «*Les Centrales Solaires à Concentration*», Mai 2007
- [8] Pablo González Gascón y Marín, Guillermo Gómez Fontecha, Ole Geise, «*Les tours solaires Deux approches pour utiliser l'énergie du soleil* »
- [9] Adrien SALOMÉ, «*Développement d'un outil de contrôle de la répartition du flux solaire concentré sur un récepteur de centrale à tour : Application à la centrale de Thémis* », Thèse de Doctorat, Université de Perpignan, 2007.
- [10] M. SLAMA Fateh, «*Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique* », Sétif, le 01 /04/2011
- [11] S. Abdallah and S. Nijmeh, «*Two Axes Sun Tracking System with PLC Control* », Energy Conversion and Management, Vol. 45, N°11-12, pp. 1931 – 1939, 2004. 532.
- [12] S. Abdallah, A. El-Qadan and V. Hamudeh, «*Two Axes Sun Tracking System with Feedback Control on the Basis of PIC Microcontrollers* », Jordan Journal Applied Science University, Amman 11931 Jordan, 2004.
- [13] G.C. Bakos, «*Design and Construction of a Two-Axis Sun Tracking System for Parabolic Trough Collector (PTC) Efficiency Improvement* », Renewable Energy, Vol. 31, N°15, pp. 2411 – 2421, 2006.

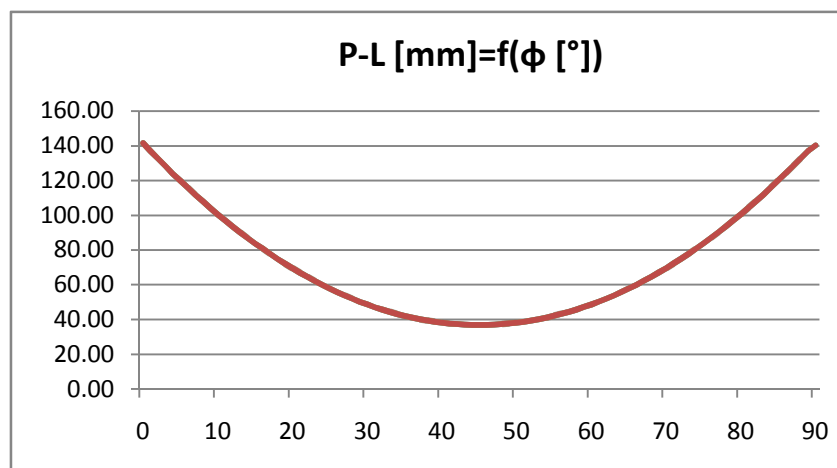


- [14] T. Bendib, B. Barkat, F. Djeflal, N. Hamia et A. Nidhal, « *Commande automatique d'un système de poursuite solaire à deux axes à base d'un microcontrôleur PIC16F84A* », Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°4 (2008) 523 – 532
- [15] B. Mohammedi, B. Barkat, H. Rehab and N. Nait Said, « *Mechanical Design and Command of the Azimut Mouvement of the Sun Tracking System Auresolar* », Sharjah Solar Energy Conference, University of Sharjah, UAE, 19-22 February 2001.
- [16] B. Barkat, B. Mohammedi et B. Azoui, « *Le Projet 'AureSolar': Résultats et Perspectives* », JEES'05 Bejaia, Mars 2005.
- [17] Guide de productions pour Société internationale "Saint-Gobain Glass".

## Annexes

### A. Variation de la différence P-L en fonction de $\phi$

$\phi$ [°]	P-L [mm]	$\phi$ [°]	P-L [mm]	$\phi$ [°]	P-L [mm]
0	141.53	30	48.57	60	48.64
1	136.99	31	47.05	61	50.26
2	132.54	32	45.64	62	51.99
3	128.18	33	44.34	63	53.82
4	123.93	34	43.13	64	55.75
5	119.77	35	42.04	65	57.79
6	115.71	36	41.05	66	59.93
7	111.75	37	40.16	67	62.17
8	107.89	38	39.37	68	64.52
9	104.13	39	38.69	69	66.97
10	100.47	40	38.12	70	69.52
11	96.91	41	37.65	71	72.18
12	93.45	42	37.29	72	74.93
13	90.09	43	37.03	73	77.79
14	86.83	44	36.87	74	80.75
15	83.67	45	36.82	75	83.81
16	80.61	46	36.88	76	86.98
17	77.66	47	37.04	77	90.24
18	74.80	48	37.30	78	93.60
19	72.05	49	37.67	79	97.07
20	69.40	50	38.14	80	100.64
21	66.86	51	38.72	81	104.30
22	64.41	52	39.41	82	108.07
23	62.07	53	40.20	83	111.93
24	59.83	54	41.09	84	115.90
25	57.69	55	42.09	85	119.96
26	55.66	56	43.19	86	124.12
27	53.73	57	44.39	87	128.38
28	51.91	58	45.70	88	132.74
29	50.18	59	47.12	89	137.19
<b>MIN</b>	<b>36.82</b>	<b>MAX</b>	<b>141.53</b>	90	<b>141.53</b>



## B. Détermination des valeurs du diamètre répondant aux conditions de résistance à la flexion

Nous avons deux condition dues à la flexion.

$$D^4 - (D - 0.006)^4 - 4.05 \times 10^{-5}D \geq 0$$

$$D^4 - (D - 0.006)^4 - 7.34 \times 10^{-5}D \geq 0$$

D [m]	Condition de résistance à la compression	Etat de la condition	Condition de résistance à la traction	Etat de la condition
0.01	-3.95256E-07	Non Vérifier	-7.24256E-07	Non Vérifier
0.015	-5.63436E-07	Non Vérifier	-1.05694E-06	Non Vérifier
0.02	-6.88416E-07	Non Vérifier	-1.34642E-06	Non Vérifier
0.025	-7.52196E-07	Non Vérifier	-1.5747E-06	Non Vérifier
0.03	-7.36776E-07	Non Vérifier	-1.72378E-06	Non Vérifier
0.035	-6.24156E-07	Non Vérifier	-1.77566E-06	Non Vérifier
0.04	-3.96336E-07	Non Vérifier	-1.71234E-06	Non Vérifier
0.045	-3.5316E-08	Non Vérifier	-1.51582E-06	Non Vérifier
0.05	4.76904E-07	Vérifier	-1.1681E-06	Non Vérifier
0.055	1.15832E-06	Vérifier	-6.51176E-07	Non Vérifier
0.06	2.02694E-06	Vérifier	5.2944E-08	Vérifier
0.065	3.10076E-06	Vérifier	9.62264E-07	Vérifier