



**Mémoire de Master Spécialisé
'Génie Energétique et Energies Renouvelables'**

**Montage et expérimentation d'un système de
tracking en chaîne des héliostats pour une centrale à
tour de petite puissance**

Présenté en décembre 2011 par Jérémy ZMUDA

Jury d'évaluation du stage :

Président : Albert SUNNU

Membres et correcteurs : Yao AZOUMAH
Henri KOTTIN
Daniel YAMEUGEU

Laboratoire d'accueil :

Laboratoire Energie
Solaire et Economie
d'Energie
Fondation ZiE
KAMBOINSE

Directeur de stage :

Yao AZOUMAH
Responsable du LESEE
Enseignant chercheur

Encadreur :

Henri KOTTIN
Enseignant chercheur

CITATION

« J'invente d'abord l'idée, sans savoir si c'est possible et réalisable parce que si vous commencez seulement à réfléchir avec la faisabilité, vous n'inventez rien. Vous posez à vous-même des interdits techniques, pécuniaires ; avec un peu de temps, très souvent on trouve des solutions. »

Claude Dumas, 214 inventions, 96 médailles au Concours Lépine

DEDICACES

A mon grand-père Stéphane ZMUDA,

Ton courage et ta détermination me marqueront à jamais.

A mon père,

En toi, je vois un père dévoué à sa famille. Ta présence en toute circonstance m'a maintes fois rappelé le sens de la responsabilité.

A ma mère,

En toi, je vois la maman parfaite, toujours prête à se sacrifier pour mon bonheur.

A ma famille,

Qui m'a encouragé tout au long des études, et pour qui ma réussite est très importante.

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je souhaiterais témoigner toute ma reconnaissance.

Je voudrais tout d'abord adresser toute ma gratitude à mon encadrant Monsieur Yao AZOUMAH, responsable du laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie, qui m'a offert l'opportunité de participer à ce projet de concentration solaire. Je tiens aussi à le remercier pour son soutien et la confiance dont il a fait preuve à mon égard.

Je désire aussi remercier mon second encadreur, l'enseignant chercheur Monsieur Henri KOTTIN qui m'a fourni les outils nécessaires à la réussite de ce mémoire et surtout pour les judicieux conseils, qui ont permis de mener à bien cette étude.

Sans oublier les ingénieurs Baptiste LAVIGNE et Gaye MADIEUMBE qui, par leurs expériences respectives et leurs conseils avisés, ont contribué à alimenter ma réflexion.

Mes remerciements à Emmanuel CLERC mon collègue avec qui j'ai partagé les réussites et les difficultés relatives au suivi de la formation ; pour sa motivation et la pertinence de ses propositions.

Je remercie toute l'équipe de l'atelier de mécanique de l'université du 2^{ie} de Kamboinsé, ainsi que Athanase pour l'aide qu'ils m'ont apporté lors de la réalisation du prototype.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers les amis et collègues Nicolas THIERRY, Vincent GIOAN et Faïcal KANDIA qui m'ont apporté leur support moral et intellectuel tout au long de ma démarche.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de cette étude.

RESUME

La centrale solaire à tour est l'un des moyens de production décentralisée d'électricité pouvant contribuer au développement de l'électrification des pays Africains, surtout en zone rurale. Pour rendre plus accessible cette technologie, il a fallu cibler la partie la plus coûteuse : le champ solaire. Son rôle est de concentrer les rayons solaires en un point appelé récepteur. Le champ est composé d'héliostats, ces derniers disposent d'un système de conduite individuel pour s'orienter correctement et refléter les rayons du soleil sur le récepteur durant toute la journée. Cette partie est la plus chère et la plus complexe de l'héliostat. Pour réduire le coût du champ solaire, un système d'orientation commun à plusieurs héliostats a été fabriqué. La méthodologie utilisée pour la construction de l'héliostat permet de mettre en commun le mouvement des héliostats grâce à une régulation simple de suivi du soleil. La conception et la réalisation de ce modèle sur le logiciel Solidworks ont été indispensables à la réalisation et à l'expérimentation du prototype.

Mots clés:

- 1 – Centrale solaire à tour**
- 2 – Champ solaire**
- 3 – Héliostat**
- 4 – Refléter**
- 5 – Système d'orientation commun**

ABSTRACT

The solar plant is a way of decentralized electricity production which can contribute to the development of African countries electrification, especially in rural zone. In order to make this technology more accessible, the most expensive part has been targeted : the solar field. Its role is to concentrate the sun's rays at a point called the receiver. Being composed of heliostats, they use a single control system to orient themselves correctly and reflect the sun's rays on the receiver throughout the day. This part is the most expensive and the most complex of the heliostat. In order to reduce the cost of a solar field orientation, a common system to several heliostats was made. The method used to build the heliostat enables to share heliostats movement thanks to a simple control tracking the sun. The conception and the realization of this model on the Solidworks software have been essential to the realization and the experimentation of the prototype.

Keys words:

- 1 – Solar plant**
- 2 – Solar field**
- 3 – Heliostat**
- 4 – Reflect**
- 5 – Common system**

LISTE DES ABREVIATIONS

2iE : Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

ATS : Advanced Thermal System

DNI : Direct Normal Irradiation

LESEE : Laboratoire Energie Solaire et d'Economie d'Energie

PV : Photovoltaïque

SNL : Sandia National Laboratories

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Comparaison entre l'ATS 150, le carrousel et le micro-héliostat..... 6

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Présentation de la structure d'accueil	1
Figure 2 : Schéma de principe du champ solaire	2
Figure 3 : Concepts d'héliostats développés aux États-Unis entre 1975 et 1982 [2].....	3
Figure 4 : Évolution des héliostats durant les années 1980 [2]	4
Figure 5 : Représentations du stressed membrane (1), du carrousel (2) et des micros héliostats (3)	4
Figure 6 : Constitution d'un Héliostat conventionnel	6
Figure 7 : Répartition du prix [5]	6
Figure 8 : Diagramme d'Ishikawa	7
Figure 9 : Vue de dessus d'un héliostat à deux instants (t_1 et t_2) au cours de la matinée [6]	9
Figure 10 : Vue de dessus du système en orientation azimut	9
Figure 11 : Photographies des tâches focales durant la première expérience	10
Figure 12 : Captures d'écran des rayons réfléchis sur la cible durant une matinée	11
Figure 13 : Vue de dessus de l'héliostat à deux instants (t_1 et t_2) durant l'expérimentation [7].....	11
Figure 14 : Principe du système de conduite	13
Figure 15 : Construction du vecteur n dans le plan $(0, x, y, z)$	14
Figure 16 : Projeté des vecteurs V_{ref} et V_{rec} dans le repère $(0, x, y, z)$	14
Figure 17 : Projeté des vecteurs V_{ref} et V_{rec} dans le plan entre le miroir et le récepteur	14
Figure 18 : Projeté du vecteur V_{inc} dans le repère $(0, x, y, z)$	15
Figure 19 : Projeté du vecteur V_{inc} dans le plan du miroir et du soleil.....	15
Figure 20 : Disposition 1 : héliostat/cible	18
Figure 21 : Disposition 2 : héliostats/cible.....	18
Figure 22 : Trajectoire de la pointe du vecteur n le 1 ^{er} juin 2011	18
Figure 23 : Trajectoires de deux héliostats décalés au 1 ^{er} juin 2011	19
Figure 24 : Courbes du premier jour de chaque mois de l'année 2011	19
Figure 25 : Systèmes développés par Esolar appliquant la conchoïde de Nicomède	20
Figure 26 : Exemple de modèle de conception	21
Figure 27 : Les quatre cadrans et le miroir central.....	22
Figure 28 : Vue de gauche des cadrans 1 et 2	22
Figure 29 : Vue de droite du modèle idéal.....	24
Figure 30 : Représentation de l'héliostat	25
Figure 31 : Représentation de l'ensemble du système	25
Figure 32 : Ecart de position.....	26
Figure 33 : Résultat des simulations.....	26
Figure 34 : Porche du modèle idéal (1), réaliste (2) et réel (3)	28
Figure 35 : Liaison A du modèle idéal (1), réaliste (2) et réel (3).....	29

Figure 36 : Vue de droite du modèle réaliste	30
Figure 37 : Héliostat du prototype	30
Figure 38 : Liaison C du modèle idéal (1), réaliste (2) et réel (3).....	30
Figure 39 : Liaison B du modèle idéale (1), réaliste (2) et réel (3).....	31
Figure 40 : Photographies de la fabrication (1) et des réglages (2) et (3).....	31
Figure 41 : Photographies de la cible (1), du prototype (2) et de la disposition de l'ensemble (3)	32
Figure 42 : Photographies (1), (2) et (3) de la partie défectueuse.....	34
Figure 43 : Deux systèmes d'orientation d'un miroir par rotation à vitesse constante autour d'un axe	36
Figure 44 : Schéma d'un système à deux héliostats utilisant la conchoïde.....	37
Figure 45 : Répartition du DNI au Burkina Faso	42
Figure 46 : Vue de gauche d'un héliostat à deux instants (t_1 et t_2) au cours de la matinée [6]	43
Figure 47 : Disposition du premier prototype.....	44
Figure 48 : Photographie de l'ensemble du premier prototype et de la cible	44
Figure 49 : Vue de face d'un modèle de conception.....	45
Figure 50 : Vue globale d'un modèle de conception	45
Figure 51 : Vue du modèle idéal (1) et vue globale du système (2).....	46
Figure 52 : Modèle réaliste en vue avant (1) et arrière (2).....	47
Figure 53 : Modèle réel en vue avant (1) et arrière (2)	48
Figure 54 : Nouveau type de bras (1) et (2).....	49
Figure 55 : Exemple de motorisation sur le modèle réaliste	50
Figure 56 : Dispositions de 4 (1), 9 (2), 16 (3), 25 (4) et 36 (5) héliostats.....	51

SOMMAIRE

<i>Citation</i>	<i>i</i>
<i>Dédicaces</i>	<i>ii</i>
<i>Remerciements</i>	<i>iii</i>
<i>Résumé</i>	<i>iv</i>
<i>Abstract</i>	<i>v</i>
<i>Liste des abréviations</i>	<i>vi</i>
<i>Liste des tableaux</i>	<i>vii</i>
<i>Liste des figures</i>	<i>viii</i>
I. INTRODUCTION GENERALE	1
1. PRESENTATION DU LIEU DE STAGE	1
2. CONTEXTE.....	2
3. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	3
4. PROBLEMATIQUE.....	6
5. OBJECTIF DU STAGE.....	7
6. METHODE.....	7
II. PREMIER PROTOTYPE	7
1. INTRODUCTION	7
2. OBJECTIF	7
3. HYPOTHESE DES PLANS SEPARES	8
4. EXPERIMENTATIONS.....	9
5. RESULTATS.....	10
6. ANALYSES	11
7. CONCLUSION	12

III. SECOND PROTOTYPE.....	12
1. INTRODUCTION	12
2. OBJECTIF	13
3. MÉTHODE.....	13
4. CONCEPTION DU PROTOTYPE	20
5. REALISATION DU PROTOTYPE.....	27
6. EXPERIMENTATION	32
7. RESULTAT	32
8. ANALYSE.....	33
9. RECOMMANDATIONS	34
10. CONCLUSION	38
11. PERSPECTIVES	39
IV. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	40
V. ANNEXES.....	41

I. INTRODUCTION GENERALE

1. Présentation du lieu de stage

Constitution

Le Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie (LESEE) du 2iE, dirigé par Dr Yao AZOUMAH, est créé en novembre 2008. L'équipe de recherche actuelle est composée de trois enseignants chercheurs, un enseignant-doctorant, trois doctorants, sept ingénieurs de recherche, deux techniciens de laboratoire, et annuellement une vingtaine de stagiaires internes et externes au 2iE sont accueillis (figure 1).

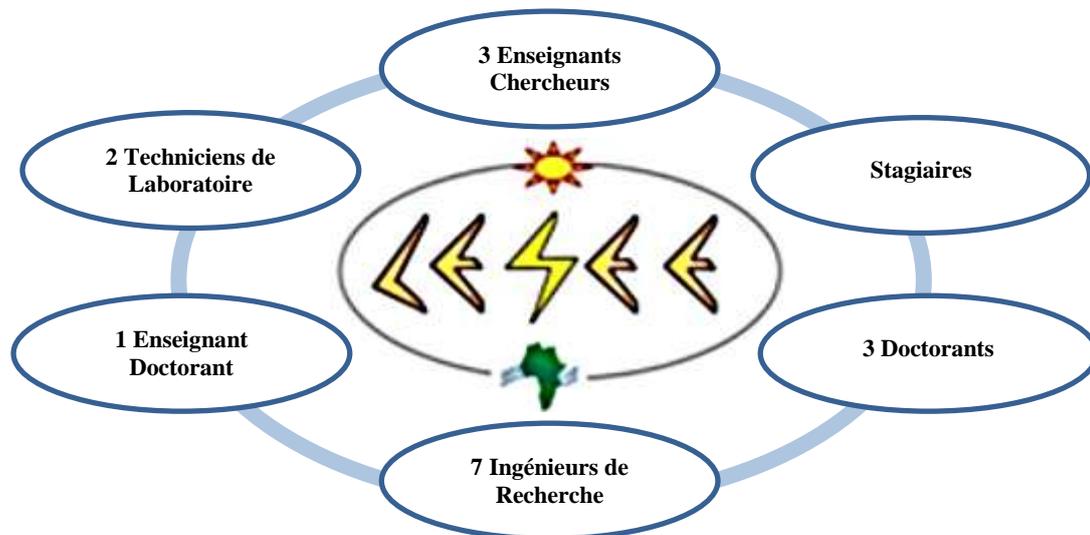


Figure 1 : Présentation de la structure d'accueil

Rôle

Le LESEE entend contribuer au développement des capacités d'innovation industrielle en Afrique dans le domaine du solaire (PV, thermique basse et haute températures) pour une production et une utilisation rationnelle d'énergies électrique/thermique (à petite et grande échelle).

Les orientations de recherche dudit laboratoire sont regroupées en quatre grands axes :

- ✚ Axe 1 : Evaluation « précise et continue » de la ressource solaire et des besoins en énergie en Afrique.
- ✚ **Axe 2 : Centrales solaires à concentration (thermodynamiques).**
- ✚ Axe 3 : Habitat, architecture bioclimatique & systèmes solaires PV/thermique (basse température).
- ✚ Axe 4 : Conception optimale et optimisation thermodynamique des systèmes énergétiques.

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans l'axe d'orientation de recherche numéro 2.

2. Contexte

Le soleil constitue la ressource la plus abondante au Burkina Faso, avec 8,3 heures d'insolation par jour et un DNI supérieur à 3,9 kWh/m²/jour (annexe 1). Malheureusement, la technologie solaire à concentration est encore très coûteuse actuellement, et demeure moins mûre comparée au solaire PV. En effet, le coût d'installation pour une puissance d'un mégawatt est estimé à 3,2 milliards de F CFA (4,87 millions d'euros), contre 800 à 950 millions de F CFA (1,219 à 1,44 millions d'euros) pour le mégawatt thermique d'origine fossile [1]. Pour exploiter cette ressource d'énergie naturelle, nous avons le choix entre plusieurs technologies. Celle choisie ici est la centrale solaire à tour pour laquelle le champ solaire constitue la part la plus importante de l'investissement. En effet cette partie absorbe entre 30 et 50% du prix de la centrale solaire et représente de ce fait le premier axe d'étude pour réduire le coût des centrales à tour.

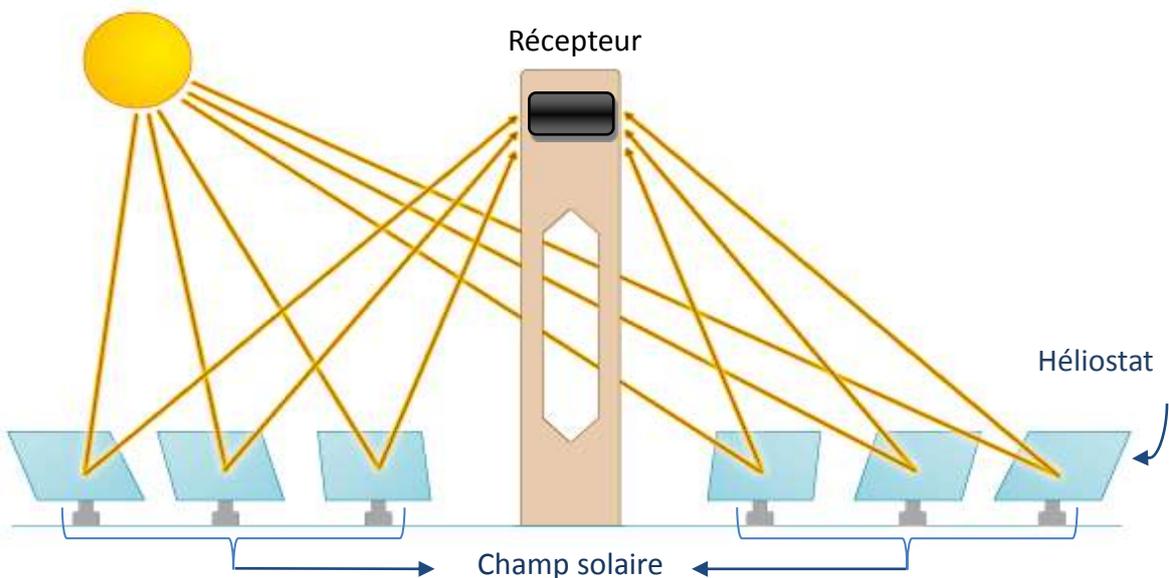


Figure 2 : Schéma de principe du champ solaire

La figure 2 illustre le rôle du champ solaire dans une centrale solaire à tour. Celui-ci est composé d'héliostats (figure 6). Au cours de la journée, les héliostats renvoient le rayonnement solaire en un point fixe où est placé le récepteur, au sommet de la tour. Comme nous pouvons le constater à la figure 7, le système d'entraînement représente la partie la plus onéreuse de l'héliostat. Des efforts dans ce domaine permettraient de réduire les coûts. C'est dans cette optique que s'inscrit ce mémoire, dont le but est de démontrer la possibilité d'abaisser le coût du champ solaire par la mise en place d'un système d'entraînement commun aux héliostats.

Afin de garantir l'originalité du prototype, la partie suivante fait l'historique et l'état de l'art des héliostats.

3. Synthèse bibliographique

3.1 Historique du développement des héliostats

Durant la bataille de Syracuse (Italie) en 213 avant Jésus-Christ, les Grecs aveuglaient les navires ennemis Romains pour se défendre grâce aux hexagones de bronze inventés par Archimède. Le développement des héliostats aux Etats-Unis a été lancé en 1975 lorsque quatre équipes de l'industrie ont été financées afin de réaliser des études de conception pour héliostats de première génération [2]. Il existe cinq différents concepts illustrés ci-dessous : (1) fixé sur piédestal (À gauche), (2) membrane bulle-joint (en haut), (3) couplés (à droite), (4) carrousel (au centre) et (5) champ tournant (en bas). Il a été démontré après une évaluation approfondie que l'héliostat monté sur le pylône avait un avantage sur les autres approches. Il a d'ailleurs été choisi comme modèle dans une usine pilote de Général Motors en 1982.

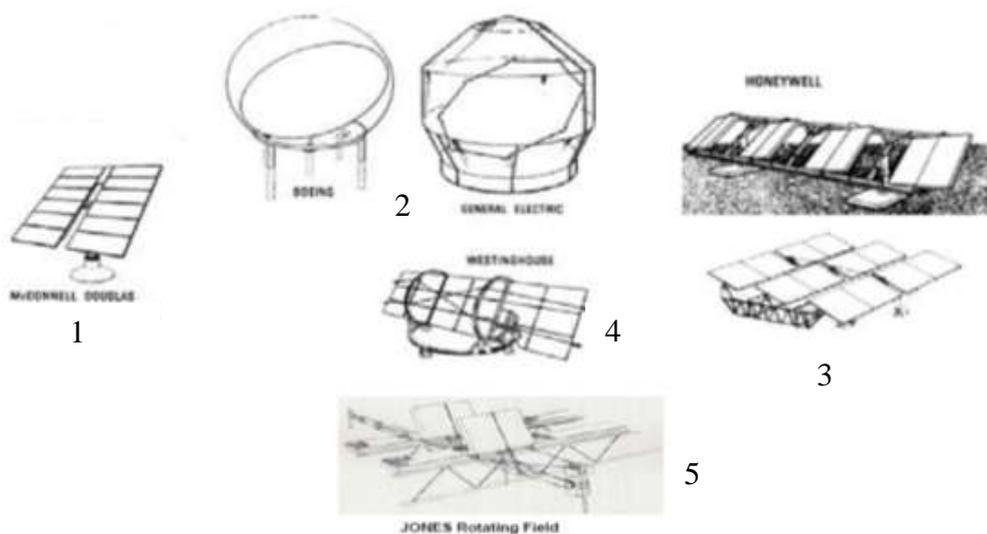


Figure 3 : Concepts d'héliostats développés aux États-Unis entre 1975 et 1982 [2]

Peu de temps après, McDonnell Douglas a continué à optimiser ses héliostats. Il a examiné de nombreuses variables de conception et a conclu que la meilleure façon de réduire le coût était d'augmenter la taille de l'héliostat à au moins 100m². Pour réduire davantage les coûts, Sandia National Laboratories proposa l'héliostat « Advanced Thermal System » de 150m² dont le coût s'élevait à 140\$/m² (figure 4). Au même moment était testé un concept de membrane tendue (Stressed Membrane). Légères, ces membranes ont permis de réduire les coûts à 80\$/m² (figure 5 (1)). Cependant leur précision est insuffisante pour une utilisation en centrale à tour et leur durée de vie est très limitée.

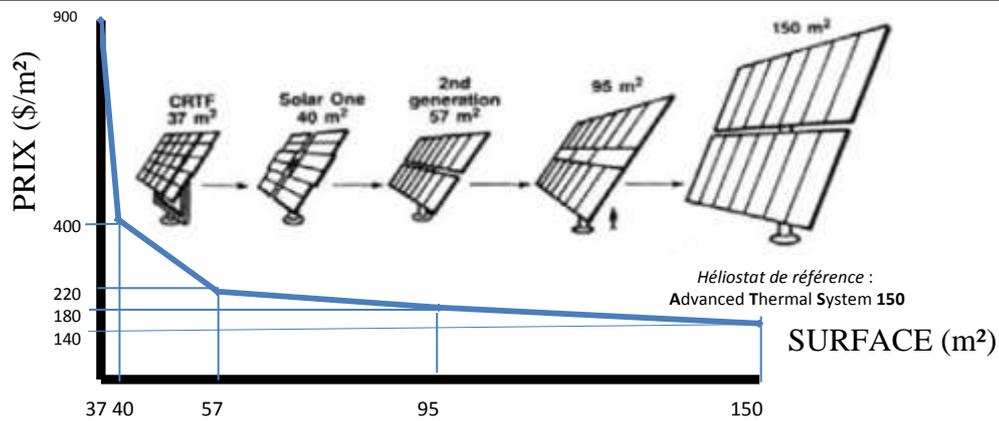


Figure 4 : Évolution des héliostats durant les années 1980 [2]

L'augmentation de la taille n'est pas possible en tant que stratégie de réduction des coûts pour les héliostats à support central. En 2006 une autre famille apparaît : le «carrousel» (figure 5 (2)). Ce concept a été commercialisé par TITAN Tracker [3]. Avec sa structure, il devient plus stable et son système de suivi indépendant lui permet d'atteindre 112\$/m². Pourtant, ce modèle n'a pas été adapté pour être utilisé dans les centrales à tour mais plutôt pour les dish Stirling et les modules PV. En 2009 une nouvelle famille d'héliostat va elle aussi à l'encontre de la démarche 'toujours plus grand'. Esolar développe des petits héliostats de 1,4m² (figure 5 (3)). En profitant de l'économie d'échelle en produisant en masse ses héliostats préfabriqués en usine, cette entreprise a pour ambition de devenir leader du marché des centrales solaires à tour [9].

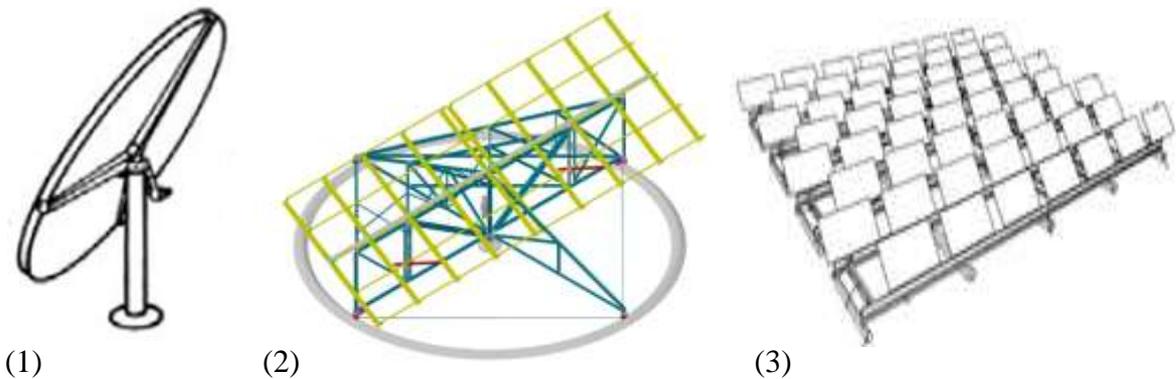


Figure 5 : Représentations du stressed membrane (1), du carrousel (2) et des micros héliostats (3)

3.2 Etat de l'art des systèmes de tracking

Depuis 1975, les héliostats les plus utilisés sont caractérisés par un piédestal (figure 6). Pour diminuer leur prix, les centres de recherche ont développé des héliostats de plus en plus grands afin de réduire la part du système de conduite dans le coût de l'héliostat (figure 4 et 7). Cette tendance a engendré de nombreux problèmes, notamment sur la structure. Étant donné que ces héliostats ont un support unique et central, ils sont plus sensibles aux contraintes mécaniques dues au vent et leurs déformations sont très élevées, même des vents faibles peuvent affecter la précision. Le système d'entraînement est soumis à des charges élevées qui

déterminent sa pérennité puisqu'il travaille aussi comme une composante structurelle. Dans de nombreux cas, il est très difficile à réparer ou à remplacer. Malgré les inconvénients qu'il comporte, l'héliostat à support unique ATS 150 a été la référence à faible coût aux États-Unis pendant 30 ans et reste utilisé dans pratiquement toutes les centrales solaires à tour (figure 4 et 6) [2]. Ainsi dans notre approche, les caractéristiques du modèle ATS 150 sont présentées à titre comparatif dans le tableau 1. En 2006 le carrousel est commercialisé pour les dish Stirling et les modules PV (figure 5 (2)) [3]. Ce type de système est caractérisé par la rotation azimut roulant sur une piste généralement faite de béton. Le concept de carrousel résout le problème lié au lecteur azimut représentant la plus grande difficulté du système de tracking à support unique. L'entraînement et la structure sont totalement indépendants. Le lecteur azimut est situé sur les côtés extérieurs, permettant le suivi du soleil avec un mouvement continu de très haute précision (sans démarrages ni arrêts fréquents). Leur géométrie peut travailler avec un disque en azimut d'environ 50 fois supérieur que celui d'un tracker pour support central de la même taille (ce qui équivaut à 50 fois plus de précision avec un besoin de 50 fois moins de puissance pour le même moteur). Ses caractéristiques intéressantes mettent en avant les problèmes rencontrés avec les héliostats à support unique. Elles seront donc présentées dans le tableau 1. En 2009, le concept de micro-héliostat a commencé à être développé par l'entreprise Esolar et permet une grande économie d'échelle grâce à la production en masse d'héliostats préfabriqués en usine [9]. La taille du miroir ($1,4\text{m}^2$) de chaque héliostat donne lieu à de nombreux avantages par rapport aux deux autres modèles. Ils sont présentés dans le tableau 1 (figure 5 (3)). Les comparaisons suivantes mettent en avant l'influence que peut avoir chaque paramètre sur l'héliostat. En premier lieu, la taille du récepteur peut être adaptée à celle du miroir du micro-héliostat. Ce procédé permet de focaliser directement le miroir vers le récepteur, alors que pour l'ATS 150 l'ensemble des miroirs qui le composent doivent être concentrés sur le récepteur, ce qui rend le réglage de l'ensemble du champ solaire complexe à mettre en œuvre. Concernant l'occupation du terrain, l'avantage est aux petits héliostats. Grâce à ses dimensions, le miroir du micro-héliostat peut s'installer sur une structure de petite taille et permet d'avoir une faible prise au vent, comparé à l'ATS 150. Ce type de structure aide ainsi à réduire le coût de l'héliostat, et à le rendre plus robuste. Elle offre la possibilité d'utiliser du matériel standard pour le système de conduite alors que les héliostats conventionnels utilisent des pièces complexes à fabriquer et difficiles à remplacer. De plus, cette partie subit de fortes contraintes mécaniques entraînées par le poids de la structure et de la prise au vent. L'utilisation de matériel standard permet ainsi de fabriquer en masse les héliostats et d'effectuer des économies d'échelle en réduisant le prix de

la partie la plus coûteuse de l'héliostat (figure 6 et 7). Lors de l'installation des micros-héliostats, la dimension du miroir et de la structure permet une mise en place rapide et une bonne accessibilité (maintenance facilitée). En comparaison, il s'agit d'opérations très difficiles pour l'héliostat ATS et le carrousel où des grues et des camions avec nacelles sont nécessaires. De plus, la méthode de nettoyage pour chaque héliostat ATS consiste à arroser la surface réfléchissante par projection d'eau et d'énormes quantités sont ainsi gaspillées. La disposition en ligne des micros-héliostats permet un nettoyage automatisé [4].

Tableau 1 : Comparaison entre l'ATS 150, le carrousel et le micro-héliostat.

Paramètre	ATS	Carrousel	Micro-héliostat
Surface réfléchive	150m ²	220m ²	1,4m ²
Occupation	Grande		Optimisé
Réglage	Complexes		Simple
Structure	Imposante	Stable	Petite
Système de conduite	Particulier	Standard	
Précision	0,05°	0,01	Non renseigné
Installation, maintenance	Délicate		Accessible
Nettoyage	Mal maîtrisé		Automatisé
Prix	140\$/m ²	112\$/m ²	Non renseigné

Alors que la tendance est aux héliostats de grandes dimensions, les micros-héliostats semblent présenter un meilleur potentiel technico-économique. Cependant, dans les trois cas, chaque héliostat possède son propre système de conduite.

4. Problématique

Malgré les efforts des constructeurs durant les trente dernières années pour réduire les coûts, le système de conduite constitue toujours la plus grande part du prix d'un héliostat, car chaque héliostat possède deux moteurs. Pour y remédier, assurer l'orientation des héliostats avec un système moins coûteux semble être une voie de recherche prometteuse.

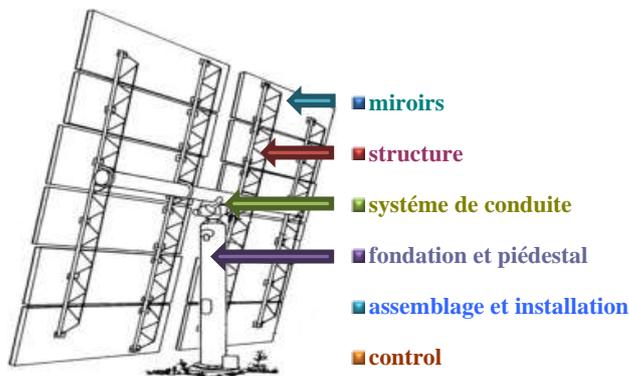


Figure 6 : Constitution d'un Héliostat conventionnel

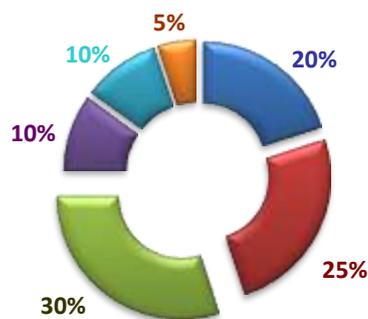


Figure 7 : Répartition du prix [5]

5. Objectif du stage

L'objectif principal de ce stage est de démontrer la possibilité d'utiliser un système d'entraînement commun aux héliostats, ce concept devrait à terme à une réduction du coût du champ solaire.

6. Méthode

Remplacer un système de suivi propre à chaque héliostat par un système d'orientation commun réduisant le nombre de moteurs utilisés.

II. PREMIER PROTOTYPE

1. Introduction

Dans le cadre du projet intégrateur de Mars 2011, un premier prototype a été présenté [6]. Il fut construit dans le but de démontrer la possibilité de mettre en commun le mouvement des héliostats pour n'utiliser qu'un seul système de suivi. Après avoir construit ce premier prototype, le travail de ce mémoire est de l'expérimenter.

2. Objectif

L'objectif fixé est le montage et l'expérimentation d'un héliostat avec un système de tracking en chaîne des miroirs. Pour atteindre cet objectif, la méthode d'Ishikawa a été utilisée (figure 8).

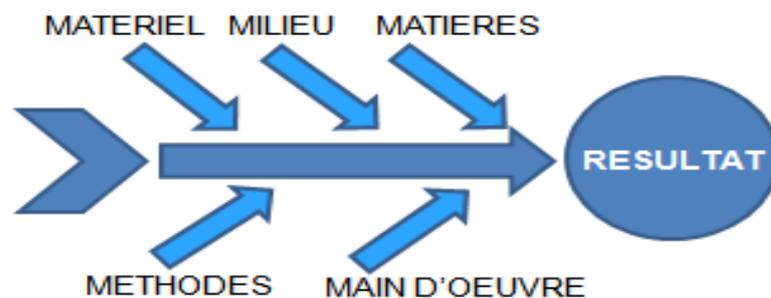


Figure 8 : Diagramme d'Ishikawa

Matériel : Favoriser l'utilisation du matériel disponible dans le pays.

Milieu : L'atelier au sein du 2ie est accessible tous les jours.

Matières : Éviter le surplus de matière en utilisant le strict nécessaire.

Méthodes : Utiliser un seul système de suivi pour plusieurs héliostats associé à une régulation simple.

Main d'œuvre : Employer des compétences locales.

3. Hypothèse des plans séparés

Durant la journée, les rayons du soleil arrivant sur le miroir sont réfléchis vers le récepteur. L'héliostat a donc besoin d'être positionné par le système de conduite pour pouvoir s'orienter dans la bonne direction. Nous exposerons dans un premier temps la méthode de calcul de l'orientation des héliostats. Les deux plans de rotation sont considérés de manière indépendante. Le premier plan est l'axe azimut (Est-Ouest) et le second l'axe d'élévation (bas-haut). Pour positionner l'héliostat, on applique la loi de la réflexion (Snell-Descartes) indépendamment suivant le premier ou le deuxième plan. La figure 9 décrit l'orientation d'un héliostat dans le plan azimut en vue de dessus. Pour orienter l'héliostat dans cette configuration, on dirige la normale à l'héliostat comme la bissectrice de l'angle formé entre le projeté au sol du rayon incident et le projeté au sol du rayon réfléchi. Pour le plan de l'élévation, la relation appliquée entre la normale, le projeté du rayon incident et le projeté du rayon réfléchi est similaire à l'exception que les projections sont effectuées dans le plan héliostat-récepteur (annexe 2). Prenant en compte ces considérations, le déplacement de la normale et du rayon incident durant la journée dans le plan azimut s'effectue de la manière illustrée par la figure 9. Au cours d'une matinée à un instant t_1 , le rayon incident t_1 est réfléchi sur l'héliostat t_1 de normale t_1 . A l'instant t_2 le rayon incident t_2 suit le même cheminement avec l'héliostat t_2 et sa normale associée t_2 . L'écart angulaire entre les deux rayons incidents est noté Δ_{sol} et l'écart angulaire compris entre les deux normales est noté Δ_{hel} . Le rayon réfléchi est fixe durant toute la journée et la normale de l'héliostat reste bissectrice de l'angle formé entre le rayon incident et le rayon réfléchi. A tout moment Δ_{sol} vaut deux fois la valeur de Δ_{hel} ($\Delta_{sol} = 2\Delta_{hel}$). Autrement dit la vitesse angulaire de l'héliostat est égale à la moitié de la vitesse angulaire (azimutale) du soleil. Cette démarche est également valable dans le plan de l'élévation où la vitesse de l'héliostat correspond à la demi-vitesse angulaire du soleil suivant le plan de l'élévation (annexe 2). La vitesse de déplacement d'un héliostat n'est donc pas la même dans les deux plans : en effet le soleil ne se déplace pas avec la même vitesse d'Est en Ouest et de l'horizon vers le zénith. Toutefois la vitesse angulaire du soleil est commune à tous les héliostats d'un champ solaire, on en déduit que tous les héliostats d'un champ solaire tournent à la même vitesse que ce soit suivant l'axe azimut ou suivant l'axe de l'élévation. Ainsi, le mouvement des héliostats peut être mis en commun [6]. Dès lors, un système simple de régulation de la vitesse de rotation peut être mis en place pour tous les héliostats. Comme précisé dans le rapport de projet intégrateur, l'utilisation d'un système doté d'un capteur direct (capable de fonctionner sans programme)

est envisageable pour assurer l'entraînement (pages 9-12 [6]). La vitesse de rotation recherchée peut être obtenue grâce à une réduction de la vitesse de suivi du soleil par deux. Ainsi la régulation de la vitesse de ce système d'orientation se fait proportionnellement à la vitesse du soleil suivant chaque axe de rotation.

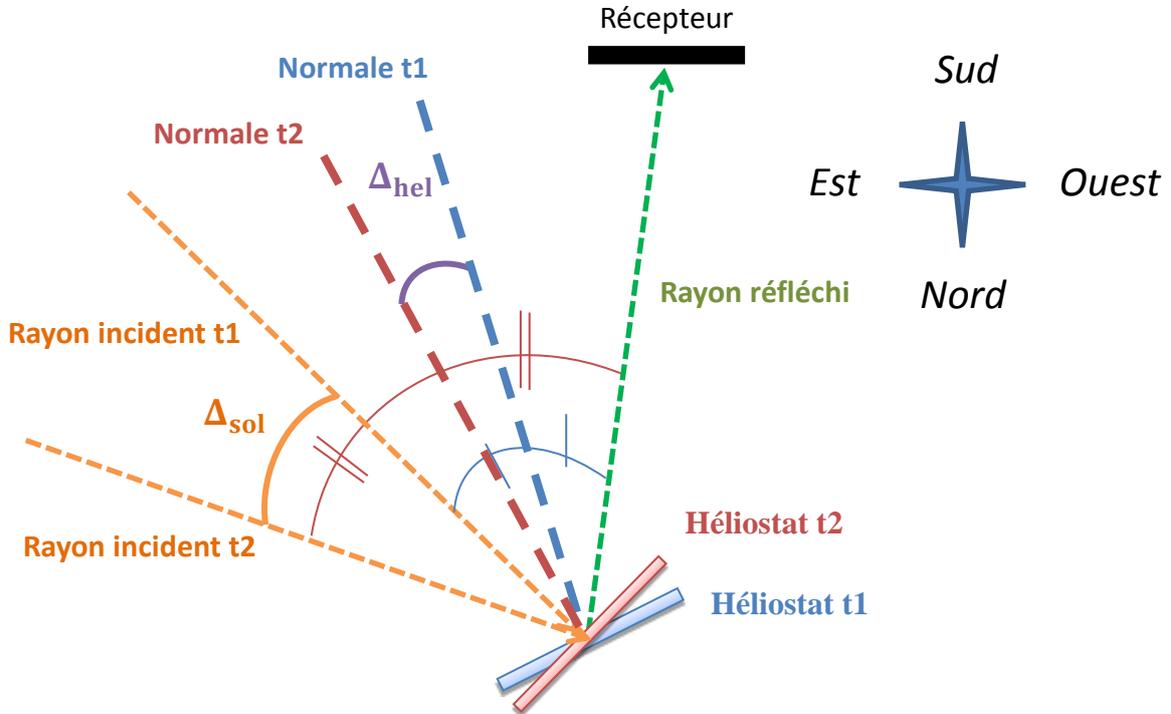


Figure 9 : Vue de dessus d'un héliostat à deux instants (t1 et t2) au cours de la matinée [6]

4. Expérimentations

Pour tester l'hypothèse des plans séparés plusieurs expérimentations ont été mises en place : la construction d'un prototype sur le terrain et une simulation avec le logiciel de conception Solidworks. Pour effectuer les tests, le prototype a été réalisé avec deux miroirs (figure 10 et annexe 3).

Protocole 1 :

- Distance entre le récepteur et l'héliostat 1 : 2m.
- Cible carré de 20cm de côté (tracée à la craie).
- Distance entre les deux héliostats : 1m.
- Hauteur du récepteur : 2m.

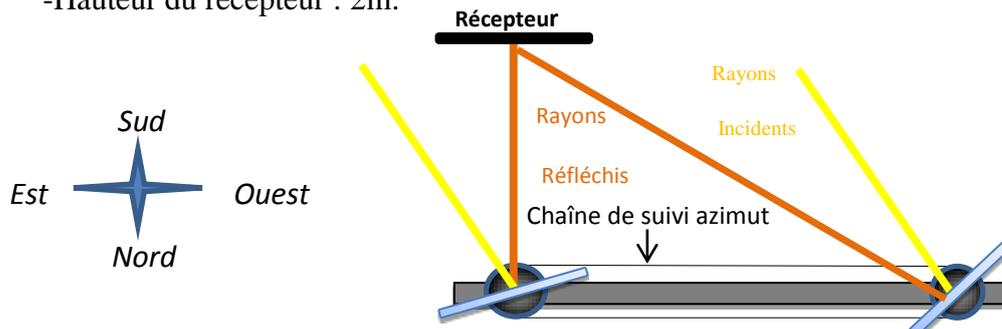


Figure 10 : Vue de dessus du système en orientation azimut

- **Première expérimentation :**

En début d'expérience, les deux héliostats sont réglés individuellement jusqu'à obtenir une focalisation satisfaisante. Par la suite, seuls les axes communs sont manipulés et la réflexion du premier héliostat est replacée au milieu de la cible. Ce procédé permet de mettre en évidence toutes dispersions de la tâche focale et ainsi confirmer ou infirmer l'hypothèse de calcul.

- **Deuxième expérimentation (simulation) :**

La première expérience a été simulée avec le logiciel Solidworks pour confirmer les résultats obtenus. Ainsi le modèle créé est presque parfait, il n'y a ni influences extérieures sur le système, ni de défauts de construction pouvant entraîner des imprécisions (assemblage imparfait). Sur cette simulation, la cible est représentée en bleu.

Protocole 2

- Distance entre le récepteur et l'héliostat : 20m.
- Le récepteur et l'héliostat sont alignés suivant l'axe azimut.
- Hauteur du récepteur : 5m.

- **Troisième expérimentation :**

Dans cette expérience, l'héliostat du LESEE est réglé pour réfléchir la lumière en direction de la cible à un instant t_1 , puis à un deuxième instant t_2 . En orientant l'héliostat de l'instant t_1 à l'instant t_2 , on vérifie que le mouvement de la normale correspond à celui calculé [7].

5. Résultats

- **Résultats de la première expérience :**

Cette expérience met en évidence une dispersion de la tâche focale au cours de la journée. En positionnant l'image du premier miroir au centre de la cible on constate que l'image du second s'éloigne vers le coin supérieur droit (figure 11).

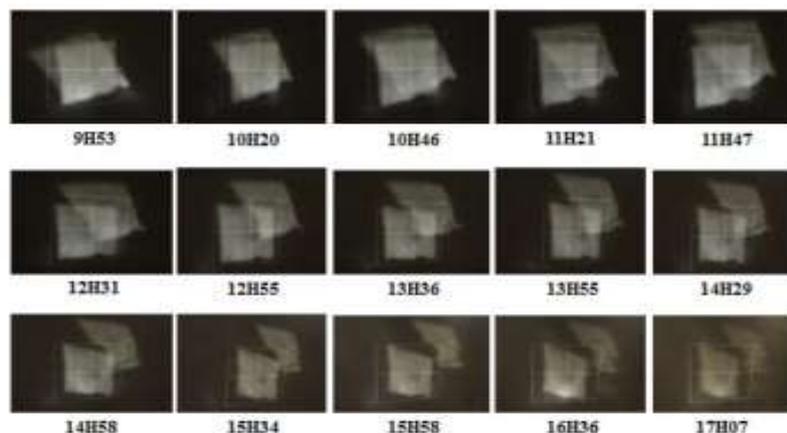


Figure 11 : Photographies des tâches focales durant la première expérience

- **Résultats de la deuxième expérience :**

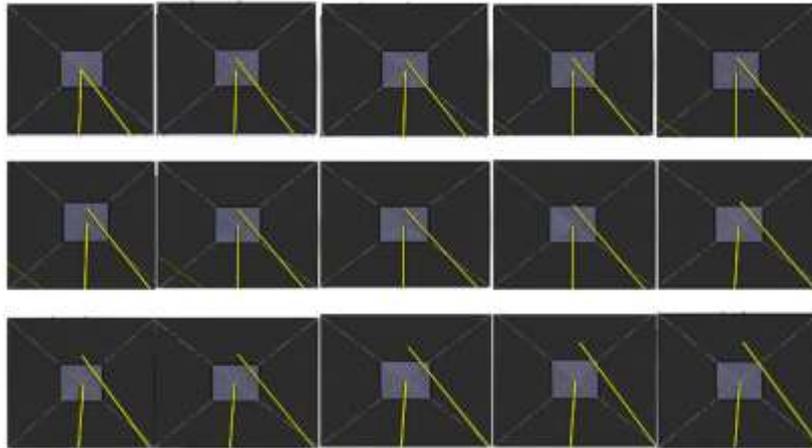


Figure 12 : Captures d'écran des rayons réfléchis sur la cible durant une matinée

Ces images illustrent l'évolution des rayons réfléchis au cours d'une matinée (figure 12). Comme dans la première simulation, le rayon de l'héliostat de droite s'écarte du centre de la cible vers le haut.

- **Résultats de la troisième expérience :**

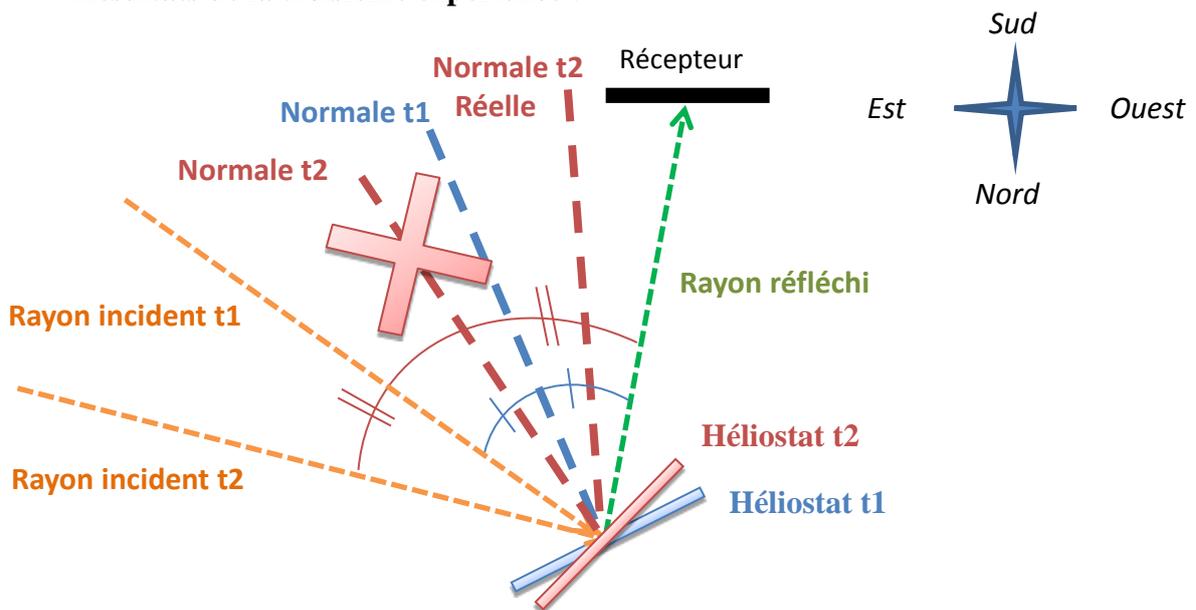


Figure 13 : Vue de dessus de l'héliostat à deux instants (t_1 et t_2) durant l'expérimentation [7]

Alors que l'azimut solaire augmentait, il a fallu diminuer l'azimut de la normale de l'héliostat pour repositionner l'image du miroir sur la cible. Autrement dit l'héliostat et le rayonnement solaire tournent en sens opposé (figure 13), ce qui est impossible selon l'hypothèse des plans séparés.

6. Analyses

La trajectoire des rayons réfléchis sur le logiciel Solidworks confirme les résultats de la première expérience. Ces deux expériences montrent clairement une dé-focalisation des

deux rayons réfléchis. Le premier rayon étant redirigé de façon à être au centre de la cible contraint (par la synchronisation des héliostats) le second rayon à en sortir. Au vu de ces deux résultats, l'hypothèse de base devait être réexaminée pour déterminer si les résultats correspondaient ou non à une mauvaise interprétation de l'optique géométrique. La troisième expérience découlait directement de l'observation réalisée sur l'héliostat du LESEE [7]. L'algorithme de positionnement de cet héliostat utilisait l'hypothèse des plans séparés : c'est en fait sur cet algorithme que fut basée toute la conception du prototype synchronisé. L'infirmité de cette hypothèse fût à l'origine d'une perte de temps conséquente dans le déroulement du stage. Les faits furent établis lorsque le vendredi 16 juin à 9H45, alors que l'azimut solaire diminuait, l'azimut de l'héliostat a dut être augmenté pour replacer la tâche focale dans la cible (ce qui était clairement impossible selon l'hypothèse des plans séparés). C'est en appliquant les lois de l'optique géométrique directement dans le plan formé par le rayon incident et la normale à l'héliostat, qu'un nouvel algorithme de positionnement fut établi. Cet algorithme fut programmé dans le microprocesseur de l'héliostat : la focalisation obtenue permis cette fois de confirmer la mise en équation. C'est donc à cette nouvelle hypothèse que nous ferons référence dans la suite sous le nom de « l'hypothèse des plans associés » et sur laquelle sera développé le deuxième prototype.

7. Conclusion

Cette deuxième partie a ainsi permis de démontrer expérimentalement que l'hypothèse des plans séparés utilisée pour la conception du premier prototype était erronée. Nous exposons dans la suite toutes les méthodes exploitables pour réaliser la mise en commun du système d'entraînement des héliostats. Toutes ces techniques sont basées sur l'application correcte des lois de l'optique géométrique et des explications détaillées sont données dans la troisième partie.

III. SECOND PROTOTYPE

1. Introduction

La démarche suivie pour le second prototypage fut décomposée en trois étapes :

- Recensement et analyse de toutes les techniques susceptibles de permettre la mise en commun de l'entraînement des héliostats.
- Conception et validation sur logiciel du second prototype.
- Construction du second prototype.

Ces étapes constituent le plan général de cette troisième partie.

2. Objectif

L'objectif principal est d'adapter la loi de la réflexion pour les héliostats, afin de concevoir et d'expérimenter un second prototype fonctionnel.

3. Méthode

La méthode utilisée pour générer le nouvel algorithme de positionnement de l'héliostat du LESEE et à l'origine de la conception du second prototype est détaillée ci-dessous. Deux techniques de mise en commun du système d'entraînement ont été validées et comparées :

-Une technique de transmission directe : le mouvement de l'élément commun d'orientation (une barre ou une grille) est transmis directement à l'héliostat. On y exploite notamment la conchoïde de Nicomède.

-Une technique de transmission indirecte : le mouvement de l'élément commun d'orientation est transformé localement par un système puis transmis à l'héliostat.

Les deux techniques ont été comparées sur plusieurs critères avant d'opérer le choix de conception du prototype.

3.3 Description du calcul de position

La figure 14 illustre la méthode utilisée pour le calcul de positionnement de l'héliostat : la normale au miroir doit être la bissectrice de l'angle formé par le rayon incident et le rayon réfléchi tout en étant contenue dans le même plan.

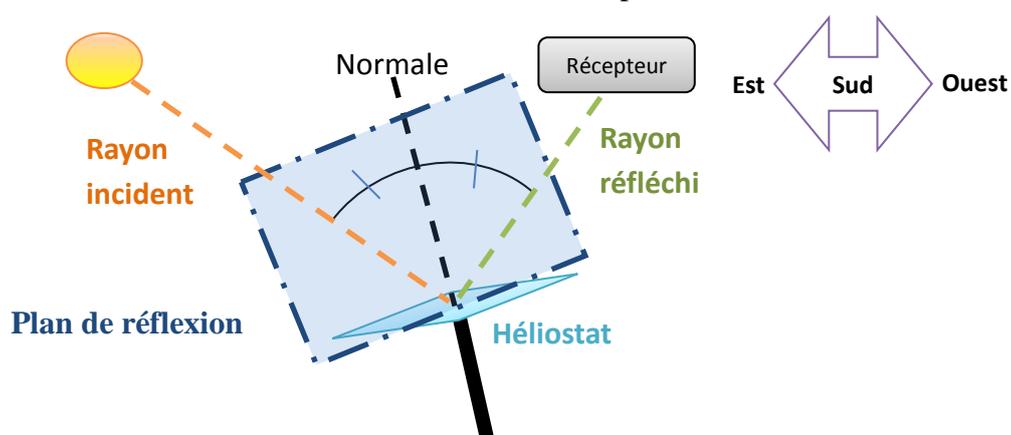


Figure 14 : Principe du système de conduite

3.4 Mise en équation de la normale

La position d'un héliostat est déterminée par l'orientation de sa normale. Pour déterminer son équation, la méthode suivante a été utilisée. L'origine du repère est placée au

centre de l'héliostat et orientée comme indiqué sur la figure 15. Le rayon incident et le rayon réfléchi sont convertis en deux vecteurs unitaires ($\|\vec{V}_{inc}\| = \|\vec{V}_{ref}\| = 1$). La somme des deux vecteurs de même norme et de 'sens opposé' permet d'obtenir directement l'équation du vecteur \vec{n} . Celui-ci correspond à la normale recherchée car il est bissecteur aux deux vecteurs unitaires et compris dans leur plan.

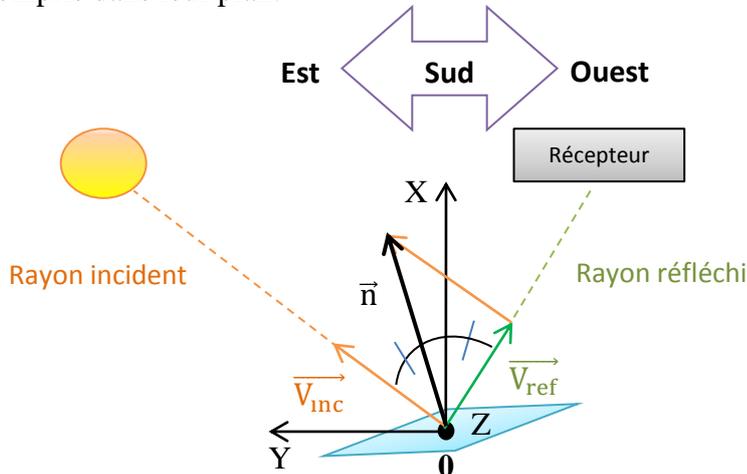


Figure 15 : Construction du vecteur \vec{n} dans le plan $(0, x, y, z)$

Détermination du vecteur réfléchi \vec{V}_{ref}

Sur les figures 16 et 17 : e représente l'angle d'élévation et a l'angle azimut.

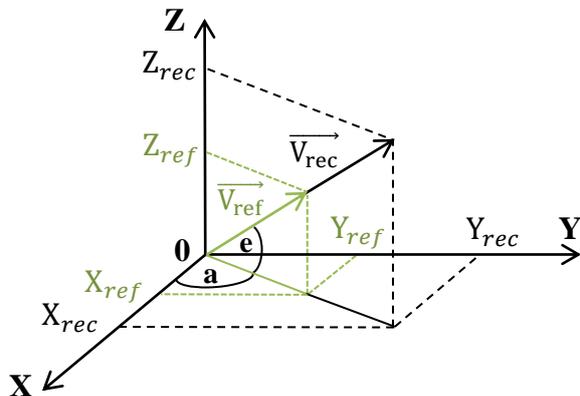


Figure 16 : Projeté des vecteurs \vec{V}_{ref} et \vec{V}_{rec} dans le repère $(0, x, y, z)$

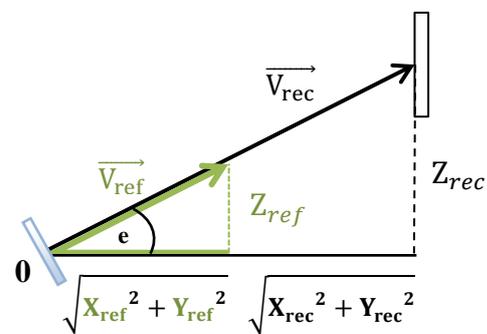


Figure 17 : Projeté des vecteurs \vec{V}_{ref} et \vec{V}_{rec} dans le plan entre le miroir et le récepteur

Conditions :

Ce vecteur est fixe pour chacun des héliostats (les héliostats dans le champ visent un point fixe : le récepteur). Les angles e et a ne varient pas.

$$\text{Donc d'après les figures 16 et 17 : } \frac{Z_{\text{rec}}}{\sqrt{X_{\text{rec}}^2 + Y_{\text{rec}}^2}} = \frac{Z_{\text{ref}}}{\sqrt{X_{\text{ref}}^2 + Y_{\text{ref}}^2}} = \tan e = C_1 \quad (1)$$

$$\frac{Y_{\text{rec}}}{X_{\text{rec}}} = \frac{Y_{\text{ref}}}{X_{\text{ref}}} = \tan a = C_2 \quad (2)$$

Le vecteur \vec{V}_{ref} doit être unitaire :

$$\text{Cela implique : } X_{\text{ref}}^2 + Y_{\text{ref}}^2 + Z_{\text{ref}}^2 = 1 \quad (3)$$

Grâce aux équations (1), (2) et (3) les coordonnées $X_{\text{ref}}, Y_{\text{ref}}, Z_{\text{ref}}$ sont déterminées :

$$X_{\text{ref}} = \frac{1}{\sqrt{1 + C_1^2 + C_2^2 + C_1^2 C_2^2}} \quad (4)$$

$$Y_{\text{ref}} = \frac{C_2}{\sqrt{1 + C_1^2 + C_2^2 + C_1^2 C_2^2}} \quad (5)$$

$$Z_{\text{ref}} = C_1 \sqrt{\frac{1 + C_2^2}{1 + C_1^2 + C_2^2 + C_1^2 C_2^2}} \quad (6)$$

Détermination du vecteur incident \vec{V}_{inc}

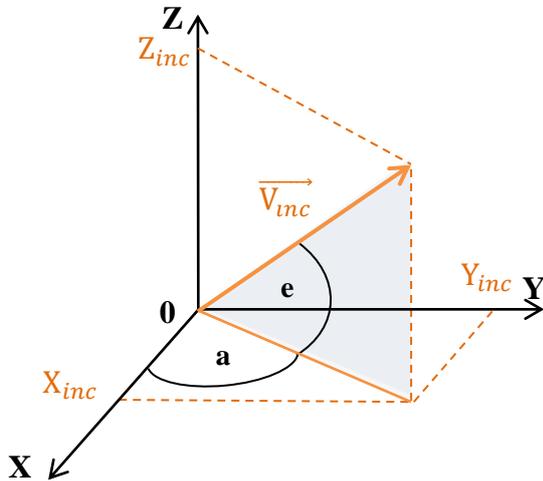


Figure 18 : Projeté du vecteur \vec{V}_{inc} dans le repère $(0, x, y, z)$

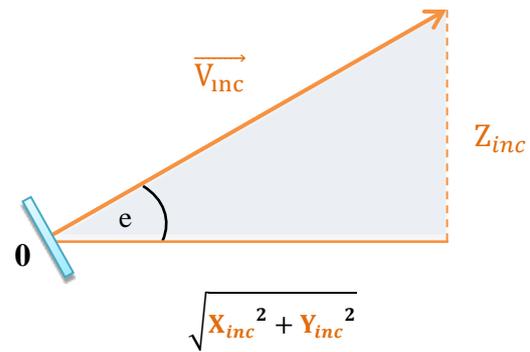


Figure 19 : Projeté du vecteur \vec{V}_{inc} dans le plan du miroir et du soleil

$$\text{D'après les figures 18 et 19 : } \frac{Z_{\text{inc}}}{\sqrt{X_{\text{inc}}^2 + Y_{\text{inc}}^2}} = \tan e \quad (7) \quad \text{avec} \quad 0 \leq e \leq 90$$

$$\text{De plus : } -\frac{Y_{\text{inc}}}{X_{\text{inc}}} = \tan a \quad (8) \quad \text{avec} \quad 0 \leq a \leq 360$$

Le vecteur \vec{V}_{inc} doit être unitaire :

$$\text{Cela implique : } X_{inc}^2 + Y_{inc}^2 + Z_{inc}^2 = 1 \quad (9)$$

Grâce aux équations (7), (8) et (9) les coordonnées X_{inc} , Y_{inc} , Z_{inc} sont déterminées :

$$X_{inc} = \frac{1}{\sqrt{(1 + \tan e^2)(1 + \tan a^2)}} \quad (10)$$

$$Y_{inc} = \frac{-\tan a}{\sqrt{(1 + \tan e^2)(1 + \tan a^2)}} \quad (11)$$

$$Z_{inc} = \frac{\tan a^2}{1 + \tan e^2} \quad (12)$$

Equation du vecteur \vec{n}

En additionnant le vecteur incident \vec{V}_{inc} avec le vecteur réfléchi \vec{V}_{ref} on obtient le vecteur \vec{n} .

$$X_n = X_{inc} + X_{ref} \quad (13)$$

$$Y_n = Y_{inc} + Y_{ref} \quad (14)$$

$$Z_n = Z_{inc} + Z_{ref} \quad (15)$$

Les coordonnées cartésiennes du vecteur normal représentent l'équation paramétrée d'une conchoïde de Nicomède. Cette courbe porte le nom du mathématicien grec qui l'a découvert. L'équation obtenue est donnée ci-dessous :

$$\vec{n} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{(1+\tan e^2)(1+\tan a^2)}} + X_{ref} \\ \frac{-\tan a}{\sqrt{(1+\tan e^2)(1+\tan a^2)}} + Y_{ref} \\ \frac{\tan a^2}{1+\tan e^2} + Z_{ref} \end{pmatrix} \quad (16)$$

3.5 Description de l'équation de la normale

Cette équation est l'équation paramétrée d'une conchoïde dans un espace tridimensionnel. Le vecteur normal est composé de deux termes. Le premier est une fraction

faisant intervenir l'angle azimut et l'angle de l'élévation solaire (**a** et **e**). Considérant que dans l'étendue d'un champ solaire (centaines de mètres) tous les héliostats reçoivent le même rayonnement (**a** et **e** sont identiques pour tous les héliostats du champ), le premier terme ne peut varier que de manière identique pour tous les héliostats. Le deuxième terme est la composante du rayon réfléchi (différent d'un héliostat à un autre) restant fixe dans le temps. En conclusion le vecteur de la normale ne diffère d'un héliostat à l'autre que par les coordonnées spécifiques sous lesquelles l'héliostat voit le récepteur. Le fait que ces coordonnées soient fixes dans le temps implique que toutes les variations exprimées en coordonnées cartésiennes (et non angulaires) de la normale à l'héliostat sont rigoureusement les mêmes. Ainsi la pointe de la normale dessine systématiquement la même trajectoire : une conchoïde de Nicomède. Les coordonnées du récepteur par rapport à l'héliostat ont pour effet de décaler cette conchoïde par rapport à l'origine de la normale. Ainsi en décrivant une courbe similaire placée d'une manière particulière par rapport à l'axe de rotation de l'héliostat (l'origine de la normale), il est possible de transmettre une orientation différente et adaptée à chaque héliostat. On peut facilement imaginer un système pour exploiter cette particularité. Ce qui suit n'est qu'un exemple parmi plusieurs variantes possibles :

Chaque héliostat est muni d'une queue télescopique qui lui est perpendiculaire (représentant la normale). Une barre ou une grille s'étend le long des éléments que l'on souhaite guider sous un axe commun. Sur cette barre (ou cette grille) figurent des points d'attaches décalés d'un héliostat à l'autre (pour assurer le décalage de la conchoïde). Il suffit ensuite d'appliquer à la barre le mouvement conchoïdal correspondant au jour où l'on souhaite effectuer le suivi. Cette courbe est obtenue en traçant au cours de la journée les premiers termes du vecteur normal.

$$\text{Trajectoire : } \left(\begin{array}{c} \frac{1}{\sqrt{(1+\tan e^2)(1+\tan a^2)}} \\ - \tan a \\ \frac{\tan a^2}{1+\tan e^2} \end{array} \right) \quad (17)$$

3.6 Simulations de la trajectoire du vecteur \vec{n}

Protocole :

- ✓ Première simulation

Le but de cette simulation est d'analyser l'allure de la courbe. La courbe a été tracée sous le programme Matlab (logiciel de calcul mathématique) avec les paramètres suivants :

- Unité des trois axes : le mètre.
- Distance entre l'héliostat et la cible : 20m.

- L'héliostat et la cible sont alignés et orientés plein sud.
- Hauteur de la cible : 5m.
- La plage horaire est comprise entre 7h et 17h (plage de fonctionnement).
- Chaque point a été calculé pour tous les quarts d'heure de la plage.
- Disposition : 1

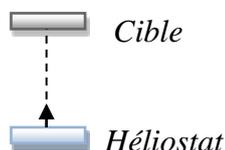


Figure 20 : Disposition 1 : héliostat/cible

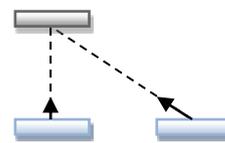


Figure 21 : Disposition 2 : héliostats/cible

- ✓ Deuxième simulation :

Le but de cette simulation est de mettre en évidence le décalage. Les conditions restent les mêmes que pour la première simulation en ajoutant dans le repère la trajectoire d'un héliostat décalé de un mètre vers l'ouest par rapport au premier (disposition 2).

- ✓ Troisième simulation :

Pour cette simulation, l'objectif est de savoir comment la trajectoire de la normale d'un héliostat évolue durant l'année. La trajectoire de la normale a été tracée pour le premier jour de chaque mois durant l'année 2011 dans la disposition 1.

Résultats :

- ✓ Première simulation :

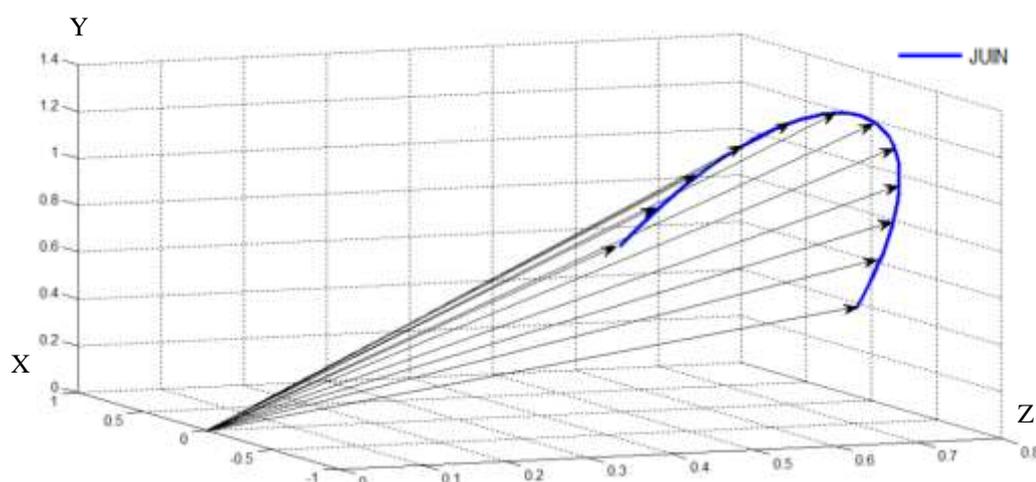
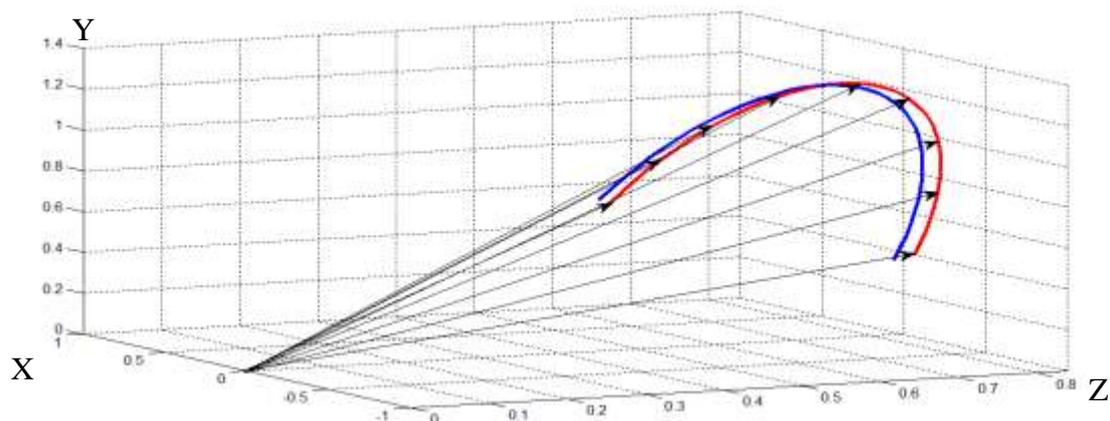


Figure 22 : Trajectoire de la pointe du vecteur \vec{n} le 1^{er} juin 2011

La courbe tracée en bleu sur ce repère en trois dimensions (0, X, Y, Z) représente la trajectoire (conchoïde) suivie par la pointe de la normale \vec{n} calculée pour le 1 juin 2011. Cette trajectoire est quasiment plane. L'évolution de la normale est représentée par des flèches noires. La norme de ce vecteur varie au cours de la journée (figure 22).

✓ Deuxième simulation :

Figure 23 : Trajectoires de deux héliostats décalés au 1^{er} juin 2011

La courbe bleue et la courbe rouge représentent respectivement la trajectoire d'un héliostat aligné avec le récepteur (suivant l'axe Nord-Sud) et la trajectoire d'un héliostat situé à un mètre plus à l'ouest. En plaçant ces deux courbes dans le même repère, on remarque entre elles un décalage à droite de la courbe rouge et dont la conséquence est une différence d'orientation des héliostats (figure 23).

✓ Troisième simulation

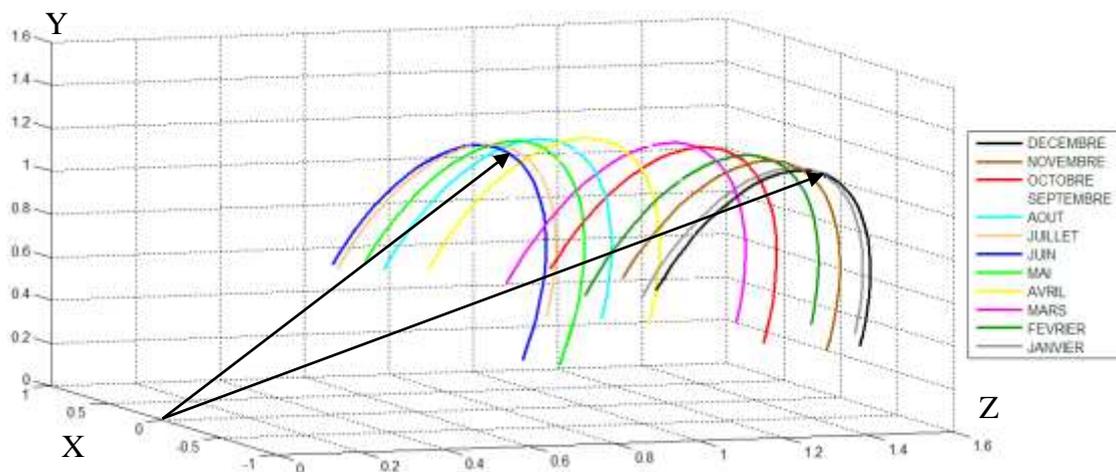


Figure 24 : Courbes du premier jour de chaque mois de l'année 2011

Chaque courbe représente la trajectoire de la pointe du vecteur \vec{n} tracée le premier jour de chaque mois pour l'année 2011. Ces trajectoires se décalent au cours de l'année suivant l'axe (0, Z) et l'axe (0, Y). Ce décalage a une influence directe sur l'inclinaison de l'héliostat. Elle sera de ce fait maximale en juin et minimale en décembre (figure 24).

3.7 Analyse de la trajectoire du vecteur \vec{n}

Le point de départ de la normale (0 ; 0 ; 0) est le centre de rotation de l'héliostat. Au cours d'une journée la trajectoire a une amplitude de l'ordre du mètre sur les trois axes (figure 22). D'après la deuxième simulation, la trajectoire est décalée pour chaque héliostat (figure

23). De plus, cette trajectoire se déplace au cours de l'année. En effet l'origine du vecteur est toujours identique (l'axe de rotation de l'héliostat), mais les trajectoires de la pointe du vecteur translatent au cours de l'année (figure 24).

4. Conception du prototype

4.1 Choix du concept

- ✓ Concept d'Esolar

L'entreprise Esolar a mis au point un système d'entraînement commun exploitant la conchoïde. Toutefois cette application directe de la courbe a été adaptée pour un petit champ solaire carré de 4m^2 . L'installation permet de concentrer les rayonnements sur un panneau photovoltaïque à haut rendement (figure 25). Ce système fonctionne grâce à une grille située en dessous du petit champ solaire. Cette grille transmet sa trajectoire conchoïdale à l'ensemble des normales placées en dessous de leur miroir respectif. Télescopique, la pointe de chaque normale est fixée à la grille commune aux normales. Une motorisation reliant la structure fixe et la grille permet de forcer la grille à décrire la courbe recherchée sur la base d'un entraînement en deux dimensions (dans le plan horizontal), comme illustré à la figure 25. La structure peut ainsi être dirigée suivant deux axes et retranscrire la conchoïde en trois dimensions. La grille permet donc de ramener le tracking à un mouvement plan horizontal. Sa petite dimension permet d'appliquer facilement cette technique. Mais elle sera plus difficile à mettre en œuvre dans le cas d'un champ solaire de dimension réelle. En effet pour parer aux déformations de la structure dues à son propre poids, une grille de grande dimension nécessiterait de nombreux points de soutien. La conchoïde n'est pas une courbe sphérique, ce qui implique une motorisation de chaque point de soutien. Il sera donc indispensable d'augmenter le nombre de moteurs utilisés pour le tracking (bien qu'il reste inférieur à un système classique). On pourrait également proposer un système permettant aussi d'orienter les héliostats par lots.



Figure 25 : Systèmes développés par Esolar appliquant la conchoïde de Nicomède

✓ Concept du prototype

Après avoir fait de nombreuses recherches sur le sujet, nous sommes arrivés à la conclusion qu'il n'existe actuellement aucun champ solaire pour centrale à tour doté d'un système d'entraînement commun. Le problème posé par l'utilisation du concept de la conchoïde est la taille du système. En effet, si la structure est de grande taille, soit on multiplie le nombre de points de soutien (et donc de moteurs), soit on s'expose à des déformations de la structure pouvant générer des erreurs dans l'orientation des héliostats. La deuxième méthode permet de transmettre la bonne orientation aux héliostats sur la base d'un entraînement commun sans utiliser la conchoïde de Nicomède. Le rayonnement incident est un point commun à tous les héliostats. Le rayonnement réfléchi est propre à chaque héliostat : il différencie leur mouvement mais reste fixe dans le temps. Si l'on matérialise le rayon incident et le rayon réfléchi par deux barres, on peut imaginer un système simple permettant de maintenir la normale à l'héliostat en leur milieu. Ainsi deux barres articulées de même longueur, attachées sur la structure suivant l'alignement des rayons incidents et réfléchis et à la même distance de l'axe de rotation de l'héliostat peuvent remplir cette fonction (figure 26). Le seul mouvement à communiquer à un tel système est celui du rayon incident (le rayon réfléchi étant immobile). L'illustration de base du système est donnée figure 26 et annexe 4.

- 1 : Miroir
- 2 : Barre horizontale du suivi de l'élévation
- 3 : Support fixe de la barre
- 4 : Fer plat de suivi Est-Ouest
- 5 : Normale à l'héliostat
- 6 : Tube rond fixe visant le récepteur

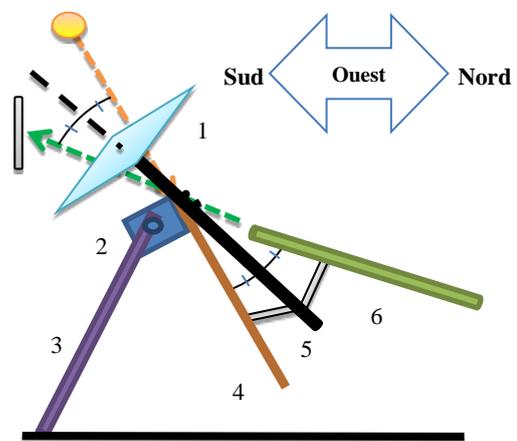


Figure 26 : Exemple de modèle de conception

En l'état, ce système ne peut convenir à une centrale à tour pour les raisons suivantes :

-Le pied supportant l'héliostat ne peut pas être fixé verticalement car à certaines périodes de l'année le soleil passe dans l'hémisphère Nord. La barre simulant le rayon incident croiserait le pied au cours du suivi.

-Le rayon incident et la normale à l'héliostat n'ont pas le même mouvement. Il est impossible de faire coïncider deux mouvements différents sur un même axe de rotation. En conséquence l'axe de rotation de l'héliostat et du rayon incident devraient dans la pratique être séparés (de quelques centimètres au moins), ce qui générerait une erreur d'angle. L'héliostat ne pourra pas être orienté de la bonne manière.

-La précision du système augmente avec l'angle séparant le rayon incident et le rayon réfléchi. Par exemple, un défaut de positionnement des attaches induit une erreur sur le plan de réflexion dans lequel se positionne l'héliostat. Cette erreur est d'autant plus faible que la distance entre les attaches (l'angle entre l'incident et le réfléchi) est importante. Une illustration est donnée figure 27 et 28.

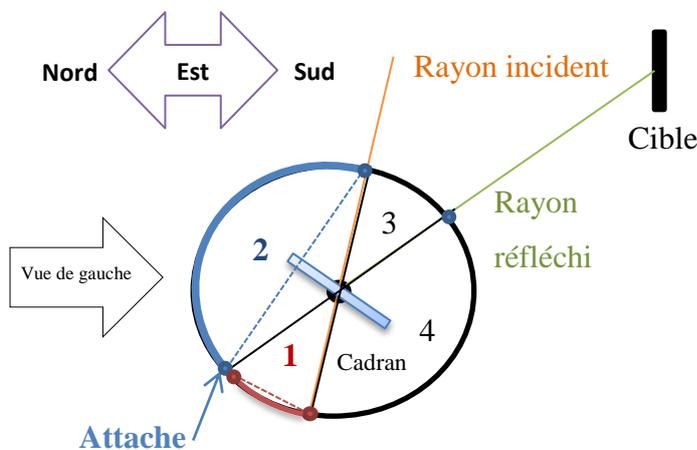


Figure 27 : Les quatre cadrans et le miroir central

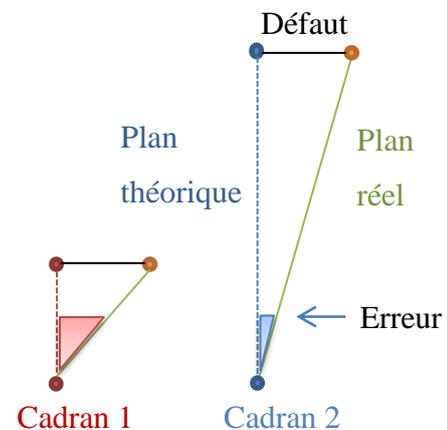


Figure 28 : Vue de gauche des cadrans 1 et 2

Des solutions sont trouvées pour résoudre ces problèmes :

- ✓ Choix du cadran

La figure 27 représente les quatre cadrans. Un cadran est une plage d'évolution entre le rayon incident et le rayon réfléchi permettant d'orienter le miroir de l'héliostat. Au cours du temps la zone de chaque cadran s'agrandit ou se rétrécit. Mais le rayon incident venant majoritairement du sud, on considère que la proportion de chaque cadran reste la même que sur la figure 27. Au cours du temps les angles des cadrans associés 1 et 3 restent identiques l'un à l'autre et les cadrans 2 et 4 réagissent de la même manière. En observant la répartition des cadrans, on constate que les cadrans 1 et 3 sont petits devant les cadrans 2 et 4. Dans le premier modèle le choix s'est porté sur le cadran 1 de la figure 28. L'angle entre le rayon incident et le rayon réfléchi étant petit, si une attache n'est pas bien positionnée, le défaut aura une grande incidence sur l'orientation du plan de réflexion de la figure 30. Si au contraire l'angle entre les deux rayons est grand, le défaut de positionnement de l'attache aura un plus

faible impact sur l'orientation du plan. Il est représenté par le cadran 2 de la figure 28. Aussi, plus la plage angulaire d'orientation sera grande et plus le système sera précis. En positionnant le miroir avec un grand angle d'orientation le réglage pourra être plus fin qu'avec un petit angle. En résumé, plus un cadran est grand, plus le système est précis et plus on limite les erreurs de positionnement du plan de réflexion. Avec ces deux avantages, il était donc nécessaire de prendre un cadran plus grand pour concevoir un autre modèle. En lui étant associé, le cadran 3 a la même plage angulaire que le cadran 1. Donc le cadran 3 ne sera pas exploité. Le cadran 4 pourrait être utilisé car son angle est grand. Si l'on se met dans ce cadran, la mise en place du système d'orientation commun va gêner les rayons réfléchis et l'attache du rayon incident va parcourir le dessous de l'héliostat durant le suivi de l'élévation vers le nord. Le choix du nouveau cadran s'est donc porté sur le cadran 2 associé au cadran 4. En passant du cadran 1 au cadran 2 on augmente la distance entre les deux attaches. Et en se plaçant derrière l'héliostat, le système ne pourra pas perturber les rayons réfléchis. On aura l'attache du rayon réfléchi vers le sol et l'attache du rayon incident au-dessus de l'héliostat. Le cadran choisi est matérialisé par les liaisons **A**, **C** et l'angle β de la figure 29.

✓ Choix du porche

Contrairement au premier modèle, le porche est situé au-dessus de l'héliostat. Cette disposition lui permet de ne pas interférer avec d'autres éléments du système. Le suivi du rayon incident sera possible durant toute l'année, même au passage du soleil dans l'hémisphère nord. Ce porche pourra ainsi transmettre le suivi du rayon incident à plusieurs héliostats disposés devant, derrière et à côté de lui. On pourra ainsi envisager la mise en commun d'un groupement de plusieurs héliostats (annexe 10). Le mouvement du rayon incident peut s'inscrire dans une sphère, les points de soutien n'ont pas besoin d'être motorisés, donc le porche sera soutenu par des pieds fixés au sol (figure 31). Ce qui n'est pas le cas dans le modèle d'Esolar, car l'étendu de la grille suspendu par une motorisation, est limitée par son propre poids. Le porche étant placé au-dessus des héliostats, devrait quelque peu ombrager les miroirs durant son fonctionnement. Pour limiter cet effet la barre choisie devra être assez fine et suffisamment résistante pour ne pas se tordre sur la distance séparant au moins deux héliostats.

✓ Choix des pieds

L'héliostat et le porche sont articulés sur des pieds verticaux assurant une bonne stabilité. Chaque pied devra être mis sous terre et si possible monté sur une fondation en béton (annexe 6).

✓ Choix des attaches

La normale, les rayons incidents et réfléchis ne sont pas matérialisés par des barres mais par des attaches, ce qui évite de poser des problèmes de blocage entre les pièces. Grâce à cela les axes peuvent être orientés dans la bonne direction et se croiser au centre de rotation de l'héliostat (figure 29), ce qui évitera les erreurs d'angle durant le fonctionnement du système.

4.2 Description du concept

En prenant en compte les remarques faites plus haut, le choix du concept a abouti au modèle suivant :

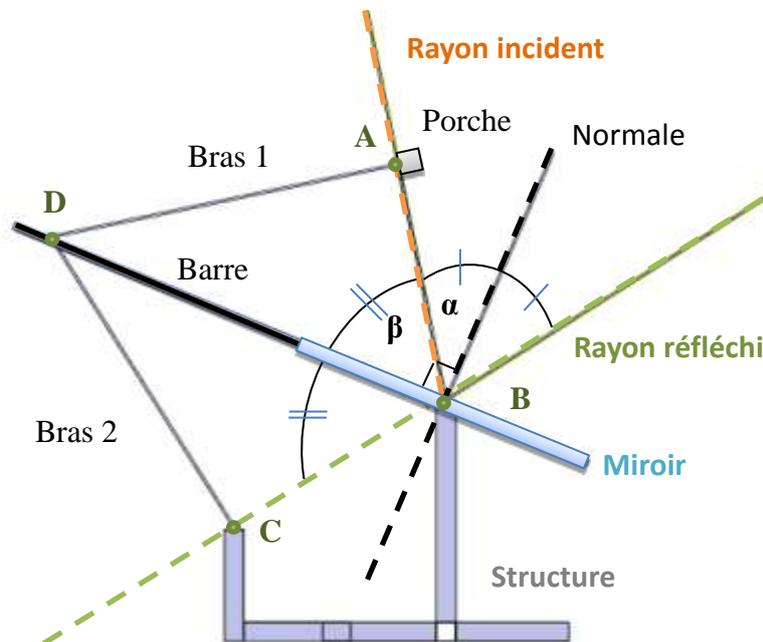


Figure 29 : Vue de droite du modèle idéal

Le rayon réfléchi passe par le point d'attache **C** et par le centre de rotation du miroir **B**. La structure supportant ces deux attaches reste fixe à tout moment. Les bras 1 et 2 sont de la même longueur et sont reliés en **D**. On a $[DA] = [DC]$ et $[BA] = [BC]$ avec **A** et **D** mobiles. Le fonctionnement de l'ensemble du système relié par les liaisons **A**, **B**, **C** et **D** ressemble à celui d'un pantographe (outil permettant de reproduire un dessin à plusieurs échelles). Effectivement en glissant le long de la barre d'orientation de l'héliostat (barre noire de la figure 29) perpendiculaire à la normale, les bras 1 et 2 la maintiennent bissectrice de l'angle β . Comme β est complémentaire à l'angle α , la normale se positionne comme étant la bissectrice de l'angle α . La normale à l'héliostat est alors la bissectrice de l'angle formé entre le rayon incident et le rayon réfléchi afin d'assurer la bonne orientation de l'héliostat. Sur le porche sont placées à intervalles réguliers des attaches **A** et **A'**. Pour le bon fonctionnement du

système, les droites reliant les attaches et les axes de rotations des héliostats (AB) et ($A'B'$) doivent être orientées parallèlement au rayonnement incident (figure 31). L'information mécanique contenue dans le rayon incident est donc transmise au bras 1 par l'intermédiaire de l'attache A et A' . Le deuxième rôle de ce porche est aussi de communiquer le mouvement d'un héliostat à un autre. Il est lui-même relié à ses extrémités par les tiges 1 et 2 au niveau des liaisons E et E' (figure 31). Ces tiges sont parallèles au rayon incident, elles suivent directement le soleil. Cela permettra plus tard d'envisager un système simple pour la régulation du prototype comme indiqué dans le rapport du projet intégrateur [6]. Avec cette configuration, il sera possible d'augmenter le nombre d'héliostats sur une rangée, et même de combiner plusieurs rangées ensemble. On note d'ailleurs qu'une structure en forme de grille présenterait une plus grande résistance qu'une structure linéaire. Les tiges 1 et 2 sont articulées en F et F' sur leur pied fixe respectif et les distances $[EF]$, $[E'F']$, $[BC]$ et $[B'C']$ sont identiques. Ainsi la distance $[BC]$ est égale à $[BA]$ et $[B'C']$ est égale à $[B'A']$. Ce système théorique a d'abord été simulé avec le logiciel Solidworks, ce qui a permis de valider le concept avant d'entamer la construction.

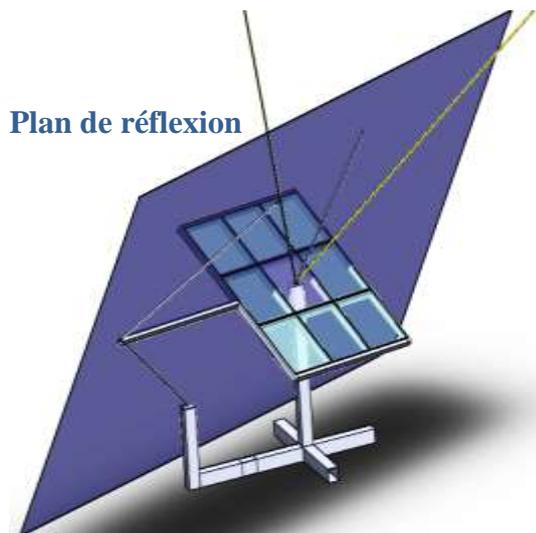


Figure 30 : Représentation de l'héliostat

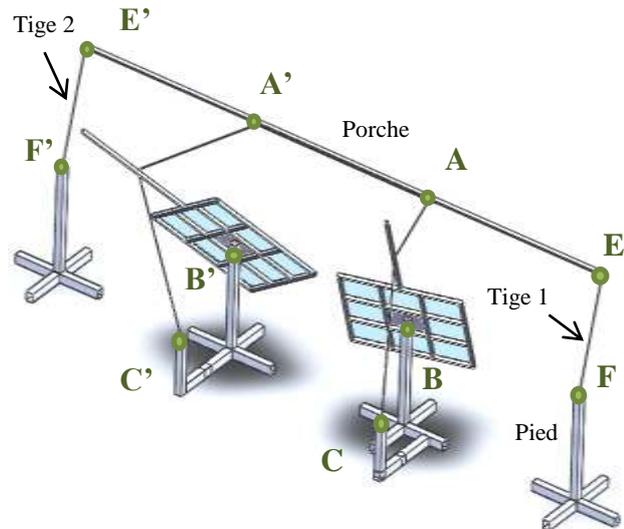


Figure 31 : Représentation de l'ensemble du système

4.3 Simulations

✓ Protocole

Pour chaque simulation, le système sera placé comme dans la disposition 2 (figure 21) avec les distances suivantes :

- Distance horizontale entre le récepteur et l'héliostat de gauche : 3m.
- Distance horizontale entre les deux héliostats : 1m.
- Hauteur du récepteur : 3m.

✓ **Première simulation :**

Dans ce modèle les liaisons sont parfaites, la surface réfléchissante de chaque héliostat est au même niveau que leur centre de rotation **B** (figures 29 et 39 (1)). Les rayons incidents passant par le centre de chaque héliostat sont reliés par une barre (annexe 5). Ce modèle n'est pas constructible, son but est de mettre à l'épreuve l'hypothèse sur laquelle se base le deuxième prototype.

✓ **Deuxième simulation :**

Dans ce modèle, un espace entre le centre de l'articulation **B** et la surface du miroir permet de simuler l'influence de l'erreur de positionnement (figure 32 et 39 (2) et (3)). L'introduction de ce défaut de position va permettre d'anticiper les résultats de l'expérimentation du prototype.

Description du défaut de position :

Comme le montrent les figures 29 et 39 (1) la surface du miroir central coïncide avec la liaison **B** modélisée dans le logiciel Solidworks. En réalité il ne sera pas possible de faire correspondre la surface du miroir central comme l'indique les figures 32 et 39 (2). Un défaut de position est créé à cause de l'écart de position. Cet écart de position doit normalement se répercuter sur la cible. Le rayon est réfléchi avec la bonne orientation mais il ne part pas exactement du bon endroit (l'axe de rotation de l'héliostat), en conséquence l'image réfléchie se déplace au cours de la journée sur la cible dans un rayon correspondant à la distance entre l'axe de rotation et la surface réfléchissante (figure 32). Cet écart de position sera fixé à 4cm dans le modèle simulé, à l'instar du modèle réel.

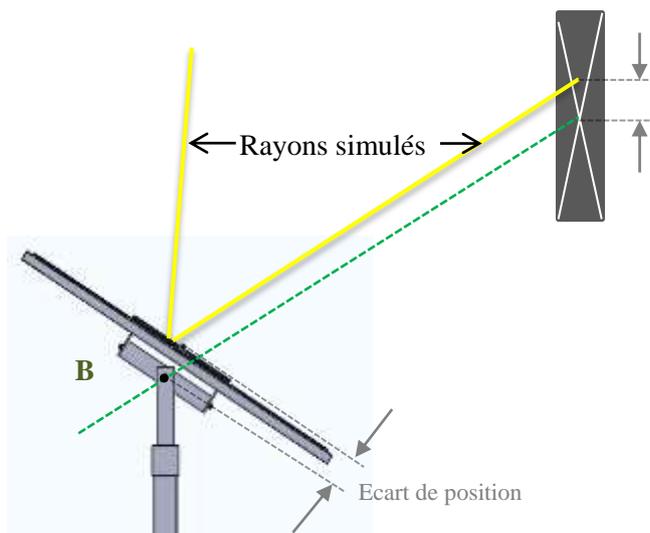


Figure 32 : Ecart de position



Figure 33 : Résultat des simulations

4.4 Résultats

✓ **Première simulation :**

Les héliostats réfléchissent les rayons exactement au milieu de la cible pour toute la plage angulaire de fonctionnement du prototype. C'est-à-dire de 30° à 110° pour l'élévation et sur une plage d'angle de 120° en azimut.

✓ **Deuxième simulation :**

Comme prévu les rayons réfléchis tirent 4cm au-dessus du centre de la cible (figure 33). Les rayons atteignent la cible au même endroit. Les tâches se déplacent durant toute la durée de l'expérience. Elles restent néanmoins comprises à l'intérieur d'un cercle de 4cm de diamètre. Cela correspond bien au défaut de position entre le miroir et l'articulation. En augmentant la distance entre l'héliostat et la cible de 3m à 50m, le défaut reste égal à 4cm.

4.5 Analyse

La première expérimentation montre que l'hypothèse est validée puisqu'en l'appliquant directement sur le modèle (conçu sur Solidworks), les deux rayons réfléchis sont projetés au centre de la cible dans toute la plage de fonctionnement du système quel que soit l'emplacement de l'héliostat dans le champ. Dans la deuxième expérience les deux rayons se déplacent, mais le système garde une bonne précision (4cm) durant la simulation même en augmentant la distance entre la cible et les héliostats le défaut reste identique.

4.6 Conclusion

Avec le logiciel Solidworks, le système reste tout de même encore théorique car il ne prend pas en compte les défauts mécaniques de construction, les frottements et les blocages. La réalisation du second prototype commença donc après avoir validé le fonctionnement du modèle idéal grâce aux études de mouvement du logiciel Solidworks. Une autre solution aurait été d'effectuer d'autres simulations se rapprochant de la réalité (modèle réaliste) pour continuer à anticiper le fonctionnement du prototype et ainsi éviter les erreurs de réalisation. Le temps imparti pour finir ce prototype a aussi favorisé le lancement rapide de la construction, cela a permis d'adapter, de tester et d'améliorer les solutions techniques.

5. Réalisation du prototype

5.1 Achat du matériel

Le matériel aurait pu être importé d'ailleurs offrant ainsi une plus grande gamme de produits avec des qualités différentes. Mais d'après les objectifs fixés au début du stage, le matériel devait être facilement disponible au Burkina Faso et être assemblé avant la fin du stage. Le choix s'est donc porté sur le fournisseur local HAGE Matériaux.

5.2 Fabrication des pièces

Une fois le matériel arrivé sur place, l'atelier, les outils et les machines du 2^{ie} ont été sollicités et la majeure partie de la fabrication y a été réalisée (figure 40 (1)).

5.3 Assemblage

Durant cette phase, pour passer du modèle de conception à la fabrication du prototype il a fallu trouver des solutions techniques adaptées, disponibles et faciles à mettre en œuvre.

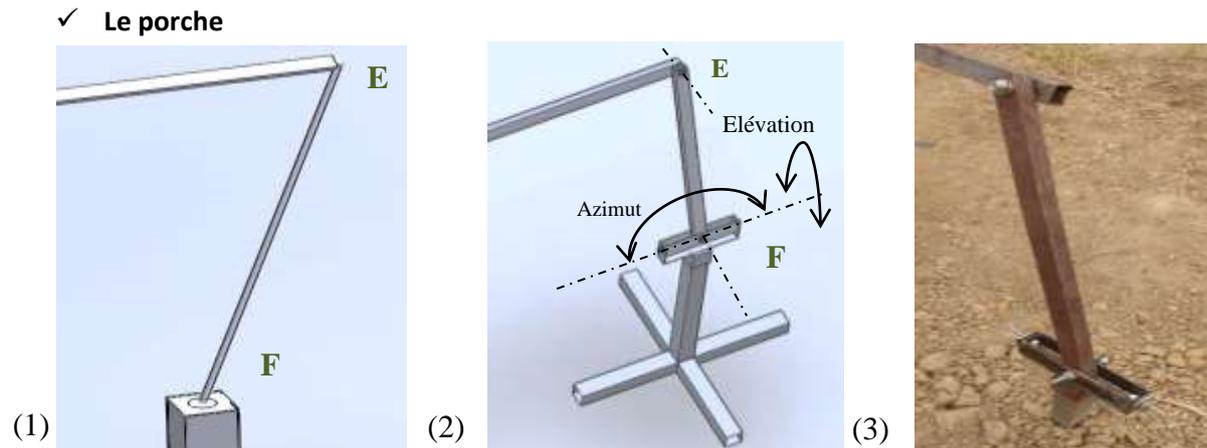


Figure 34 : Porche du modèle idéal (1), réaliste (2) et réel (3)

Le rôle du porche est de suivre le soleil afin de transmettre l'orientation du rayon incident à l'axe (**AB**). Le centre de rotation **F** est placé au même niveau et dans l'alignement du centre de rotation des héliostats (**BB'**) (figure 31). Les tiges 1 et 2 sont parallèles et de même longueur que la distance [**AB**]. Les deux tiges pourront simuler le rayon incident passant par (**AB**) (figure 29). Dans le modèle idéal, les liaisons **E** et **F** (correspondantes à **A** et **B**) ont été matérialisées par des pointes coïncidentes permettant au porche de faire toutes les rotations possibles (figure 34 (1) et 35 (1)). Puisque pour pouvoir suivre les rayons incidents, le porche n'a besoin que de deux degrés de liberté (azimut et élévation), le modèle réaliste fut conçu (figure 34 (2)). En associant des barres rectangulaires avec des fers plats on obtient le modèle réel (figure 34 (3)).

✓ Liaison A

Le rôle de cette attache est de s'orienter dans l'axe du rayon incident grâce au porche et de transmettre la position du plan de réflexion au bras 1. Pour cela l'attache doit pouvoir effectuer deux mouvements de rotation (figure 35 (1)) et être comprise dans le plan formé par les points **E**, **F** et **B**. En faisant correspondre deux cylindres, le bras 1 peut effectuer les mouvements transmis par la liaison **A** autour des axes 1 et 2 de la figure 35 (1) et (2). Pour

réaliser cette liaison un fer plat plié associé à deux vis plates furent assemblés (figure 35 (3)).

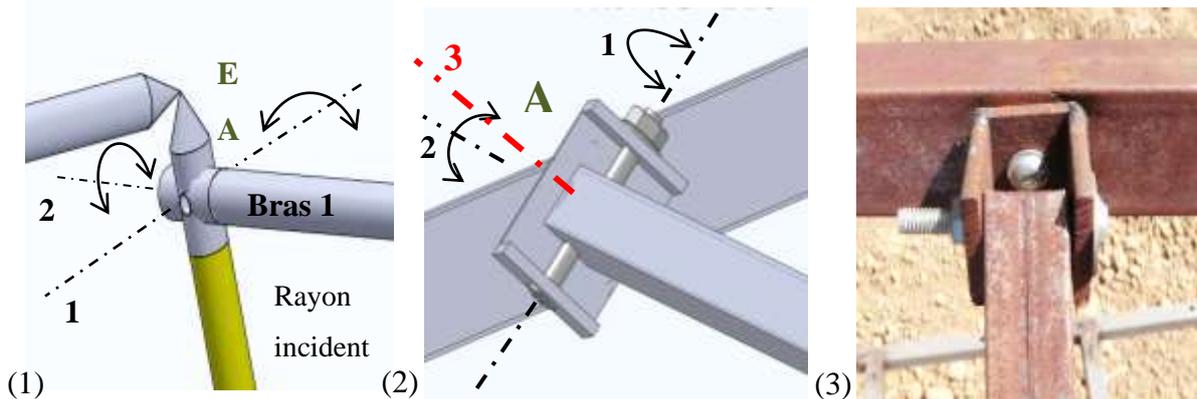


Figure 35 : Liaison A du modèle idéal (1), réaliste (2) et réel (3)

✓ Liaison D

La liaison **D** a été retravaillée pour que les bras puissent faire pivoter la barre (perpendiculaire à la normale) et son héliostat associé avec un plus grand couple que celui du modèle idéal (figure 29). Pour ce faire, la barre perpendiculaire à la normale a été remplacée par un cadre (figure 36). Celui-ci sépare la liaison **D** en deux autres liaisons **D1** et **D2**, diminuant de ce fait la taille des deux bras associés. En augmentant la distance entre l'axe de la barre (passant par **D** et **B**) et les attaches **D1** et **D2** des deux bras on augmente en même temps le couple pour faire pivoter l'héliostat autour de l'axe (0, Z). De plus, avec un petit déplacement du porche et du bras vers l'ouest, l'héliostat pourra se positionner. La précision sera donc améliorée. Pour réaliser la liaison **D1** et **D2**, une barre est fixée sur une pièce ayant la forme d'une pince (figure 37). Les deux extrémités de la pince (liaison **D1** ou **D2**) sont traversées par une vis plate permettant de maintenir au centre de la pince les deux fers plats ainsi qu'un roulement (figure 41 (2)). La pince assurant la liaison **D1** (et **D2**) est composée d'une vis transperçant ses deux côtés. En partant du roulement, il y a de chaque côté une rondelle, le fer plat, un morceau de tube, la pince, et l'écrou comme indiqué à la figure 42 (2). Les fers plats maintiennent l'axe (**D1D2**) perpendiculaire à l'axe (**BD**) et les roulements de **D1** et **D2** sur le cadre. Les roulements roulent sur le cadre, ce qui permet de faire glisser les bras le long du cadre tout en croisant les axes (**AD1**) et (**CD2**) en **D** (figure 36 et 37).

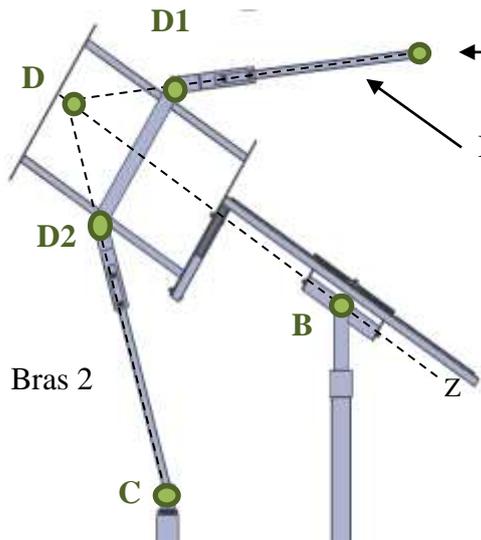


Figure 36 : Vue de droite du modèle réaliste

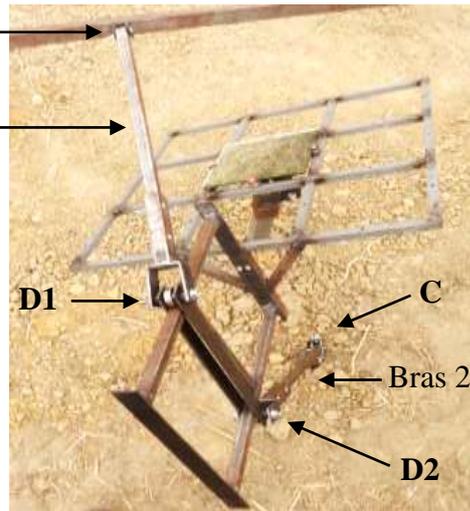


Figure 37 : Héliostat du prototype

Le rôle de cette liaison est de maintenir l'ensemble du cadre dans le plan de réflexion. La fixation **C** fut placée dans l'alignement du centre de rotation de l'héliostat **B** (ou **B'**) et du centre de la cible. De cette manière la liaison permet de faire reposer le cadre et ses bras tout en l'orientant dans le plan de réflexion. Cette liaison a besoin de trois degrés de liberté suivant les trois axes de rotation (figure 38 (2)). Pour le modèle idéal il a simplement fallu faire correspondre deux pointes (figure 38 (1)). Pour le modèle réaliste et réel, un jeu de fers plats pliés et percés reposant sur un roulement a été nécessaire (figure 38 (2) et (3)).

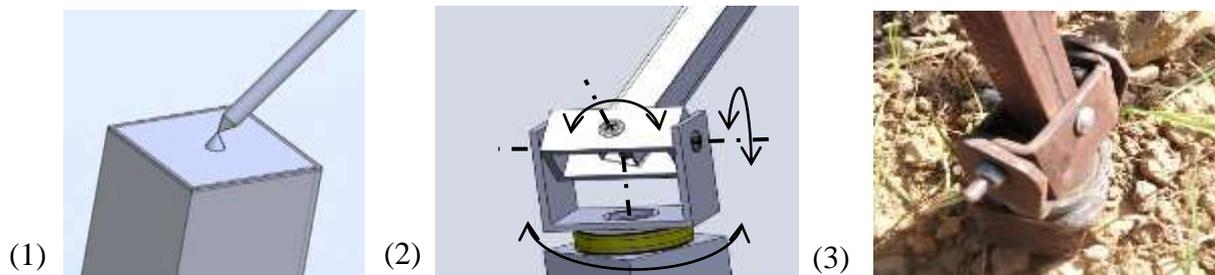


Figure 38 : Liaison C du modèle idéal (1), réaliste (2) et réel (3)

✓ **Liaison B**

La liaison **B** située au centre de rotation de l'héliostat ne pouvait pas être réalisée comme dans le modèle idéal. Cette liaison a besoin de trois degrés de liberté de mouvement suivant les trois axes de rotation (X, Y, Z). La figure 39 (1) montre la liaison rotule en **B** du modèle idéal matérialisée par le miroir dont la surface (représentée en bleu) coïncide avec une pointe en **B**. Pour assurer les mêmes degrés de liberté que pour le modèle idéal, la liaison du modèle réaliste et réel est matérialisée par une succession de fers plats assemblés avec des vis comme le montre la figure 39 (2) et (3). Ainsi la liaison rotule **B** est décomposée en trois rotations.

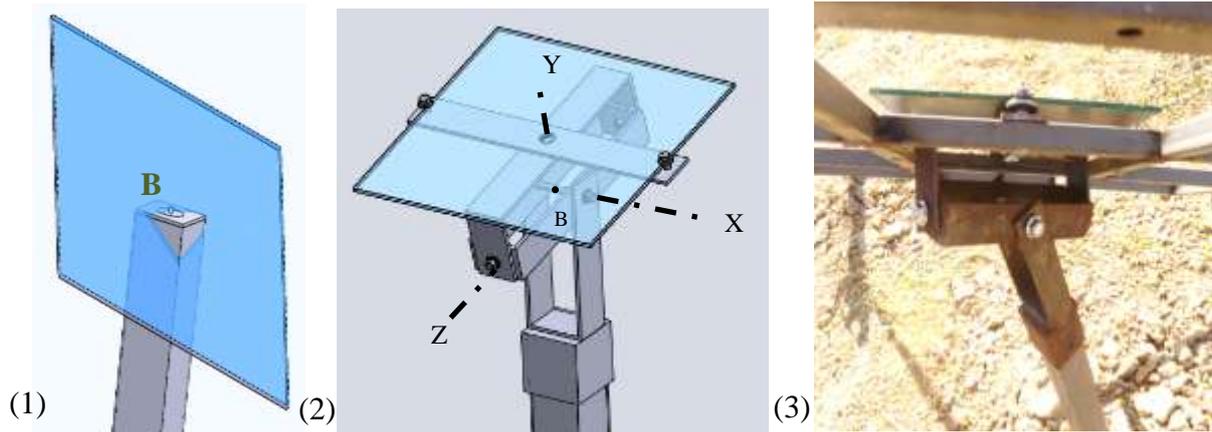


Figure 39 : Liaison B du modèle idéale (1), réaliste (2) et réel (3)

5.4 Installation et réglage du prototype

Une fois la construction terminée, un emplacement sur le terrain de l'institut a été choisi pour installer le prototype. Cet emplacement se situe au niveau de la station météo du campus de Kamboinsé en face de l'amphithéâtre n°2. Il a fallu défricher le terrain, mettre en place la cible (construite par Vincent GIOAN) sur l'échafaudage du 2^{ie} (figure 41 (1)) [7]. Le centre de cette cible est placé à 3m de distance de l'héliostat de gauche dans le plan horizontal et à 3m de hauteur orienté vers le nord. Les pieds des héliostats ont été placés à environ 15cm sous la terre pour permettre de rester stable durant les essais. Pour pouvoir mettre les centres des liaisons du porche et des deux héliostats dans le même alignement, un fil a été tendu à travers les centres des liaisons **F**, **B**, **B'** et **F'** (figure 41 (3)). Pour placer l'attache du rayon réfléchi **C**, un fil passant par le centre de la cible et le centre de la liaison **B** du premier héliostat a été tendu (figure 41 (2)). La manipulation pour installer l'attache du rayon réfléchi **C'** du deuxième héliostat a suivi la même démarche.

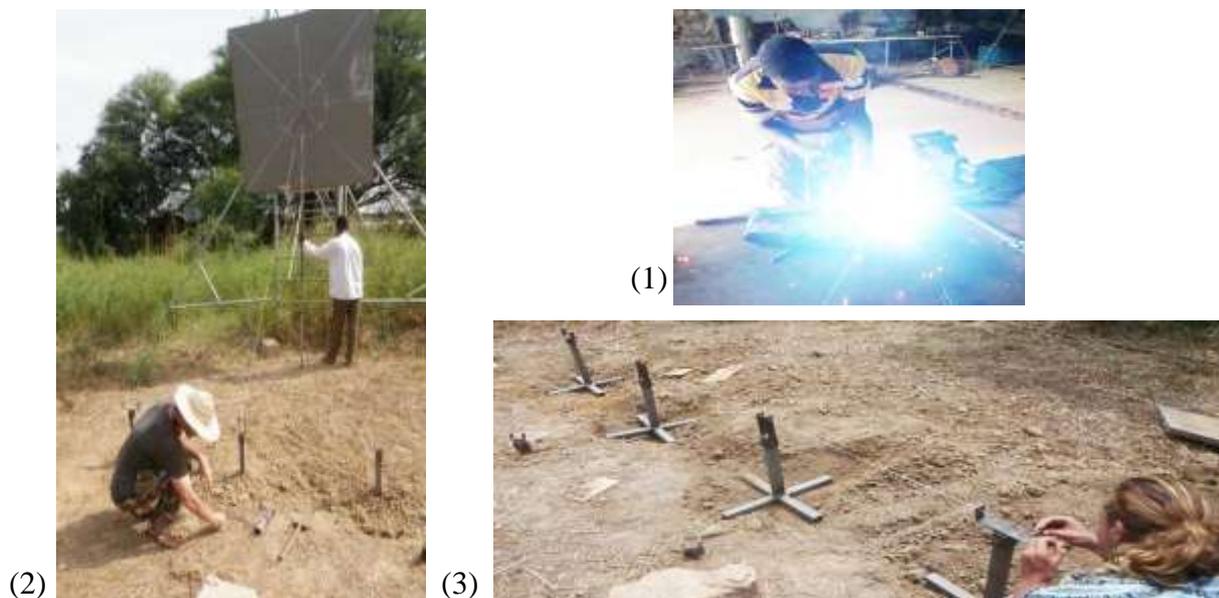


Figure 40 : Photographies de la fabrication (1) et des réglages (2) et (3)

6. Expérimentation

Ce test manuel a pour but d'observer le comportement du prototype durant toute une journée de fonctionnement afin de le diagnostiquer et de l'améliorer. Pour observer le centre de la tâche focale et être plus précis, seul le miroir central a été placé sur la structure (figure 41 (2)). Notre cible est tracée à la craie et représente un octogone de 0,7m de diagonale (figure 41 (1)). Cette dimension est un peu plus grande que la surface réfléchissante carrée de 0,6m, de manière à faire correspondre la tâche focale dans la cible sans débordement quand les autres miroirs seront placés.

Dans cette expérience la disposition du système est la suivante (figure 41 (3)) :

- Distance horizontale entre le récepteur et l'héliostat de gauche : 3m.
- Distance horizontale entre les deux héliostats : 1m.
- Distance entre le pied du porche et le pied de l'héliostat : 1m.
- Inclinaison de la cible : 15°.
- Hauteur du centre de la cible par rapport au sol : 3m.
- Hauteur du centre de rotation des héliostats et du porche : 0,3m.

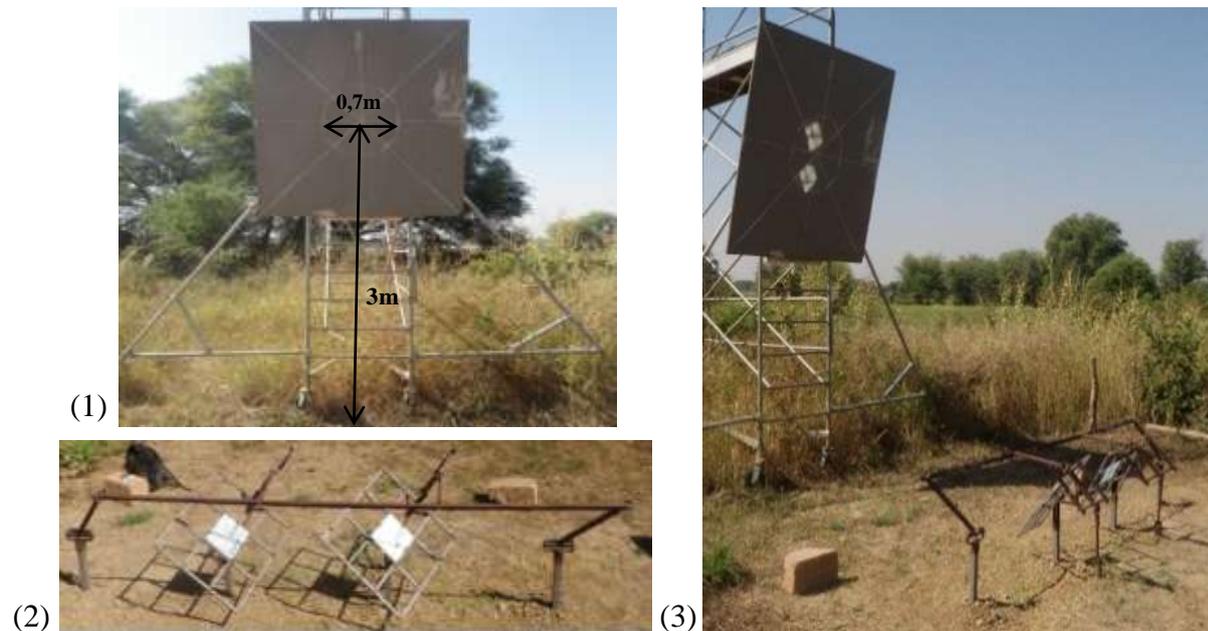


Figure 41 : Photographies de la cible (1), du prototype (2) et de la disposition de l'ensemble (3)

7. Résultat

Au début de la journée du 8 novembre vers 9h30 les héliostats ont été réglés de manière à viser le centre de la cible. Pour régler les héliostats le mieux possible il a fallu orienter le porche et agir avec force sur le cadre pour le débloquent. En réglant le système pendant une demi-heure les tâches focales ne se placent pas au milieu de la cible. De plus, la

barre du porche transmet les défauts de positionnement car si un héliostat est mal positionné cela entraîne une erreur sur le second. Durant la matinée le prototype se règle de plus en plus facilement. En effet le soleil étant à son zénith il est ainsi plus facile de diriger les rayons réfléchis dans la bonne direction. Vers 14H30 le système se bloque complètement et devient impossible à orienter, ce qui provoque l'arrêt de l'expérience. En réglant manuellement le porche et les héliostats individuellement, il été très difficile d'orienter le système convenablement. Ainsi les résultats n'ont pas été mis en avant car cela prouve simplement que le système peut se positionner mais seulement avec beaucoup d'aide extérieure.

8. Analyse

8.1 Diagnostic du système

Malgré toutes les précautions prises lors de la réalisation du second prototype, le mécanisme s'est bloqué. On peut d'abord observer que le cadre ne se comporte pas comme prévu. En effet comme indiqué sur la figure 42 (3), le fer plat liant **D1** à **D2** ne reste ni perpendiculaire à l'axe $(0, Z)$ ni dans le plan de réflexion (figure 42 (1)). Il y a plusieurs causes qui expliquent ce phénomène. Premièrement l'attache **A** est mal adaptée au système. Au lieu de pivoter autour de l'axe 1 et 2, le mécanisme autorise un troisième degré de liberté autour de l'axe 3 (figure 35 (2)). En effectuant ce mouvement supplémentaire, l'attache en **A** ne transmet pas la bonne information et bloque le bras 1. Ce défaut se répercute alors sur le cadre, le bras 2 et le point d'attache **C** (figure 37). De plus, les jeux créés dans les liaisons **D1** et **D2** influencent le positionnement. Les liaisons **D1** et **D2** ont été construites rapidement et n'ont pas respectées les règles de l'art de la mécanique ce qui engendre des possibilités de mouvements non prévus (figure 42 (1) et (2)). L'écart entre le diamètre de la vis et celui du roulement qu'elle traverse créé un premier défaut. La pince étant plus grande que l'espace entre les deux fers plats, l'écart créé a dû être compensé par des morceaux de tube de mauvaise qualité ce qui créé un autre défaut. Ces erreurs offrent la possibilité aux bras de se désaxer par rapport au plan de réflexion et aussi aux fers plats de ne pas rester perpendiculaires au cadre. Les bras ne peuvent donc plus transmettre correctement le mouvement au cadre et à l'héliostat (**D1** et **D2** figure 42 (1)). Les défauts perturbent de ce fait tout le sous-système contenant le cadre, les deux bras et leurs attaches **A** et **C**. Ce sous-ensemble n'est donc plus contenu dans le plan de réflexion $(0, Y, Z)$ (figure 30 et 41 (1)) et par conséquent l'héliostat ne peut plus être orienté dans la bonne direction. Conclusion, des modifications sont encore à apporter au niveau de l'attache **A** et des liaisons **D1** et **D2** pour pouvoir débloquent le système. Après avoir comparé le modèle idéal et le modèle réel, il a été

observé que la liaison **A** n'avait pas été fabriquée de la bonne manière. En effet sur le modèle idéal figure 35 (1) le cylindre permet d'abord au bras 1 de tourner autour de l'axe 1 fixé sur le porche et dans un second temps de le faire pivoter autour de l'axe 2. Alors que dans le modèle réaliste et réel l'attache **A** permet d'abord de faire pivoter le bras 1 autour de l'axe 2 par rapport au porche puis de le faire tourner autour de l'axe 1. Cette interversion perturbe le système et l'empêche de fonctionner correctement.

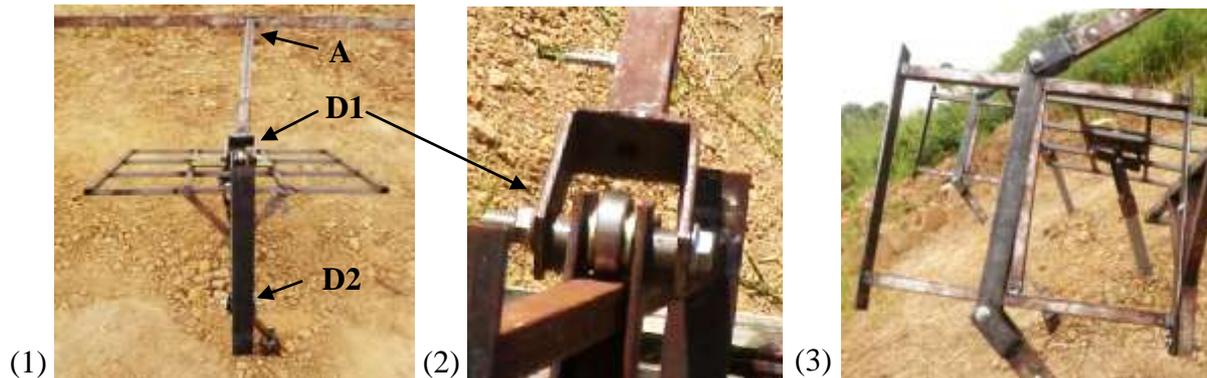


Figure 42 : Photographies (1), (2) et (3) de la partie défectueuse

9. Recommandations

9.1 Corrections

Pour réaliser la liaison **A** une vis traversant le porche et l'attache autorise la rotation autour de l'axe 3 (figure 35 (2) et (3)). Cela engendre des frottements et le blocage entre la surface du porche et l'attache. Pour faciliter la rotation et limiter les frottements il serait préférable de placer un roulement avec un tube pour remplacer l'attache **A** (annexe 8 (1)).

Pour éviter à l'attache **A** de basculer autour de l'axe 3, celle-ci peut être placée verticalement au lieu d'être dans le prolongement du porche comme indiqué sur la figure 35 (2) et (3). En tournant l'attache de 90° on la place dans une position facilitant la rotation du bras 1 autour de l'axe 1 (annexe 8 (1)).

Pour que l'attache en **A** puisse assurer son rôle comme dans le modèle idéal, il faudra la remplacer par un fer plat plié en forme de U plus large soudé au porche. Cette pièce pourra accueillir un autre fer plat plié et soudé à un tube. Ce tube passera à l'intérieur d'un roulement afin de relier le porche au bras. Cette pièce présentée en annexe 8, remplacera l'attache **A** du modèle réaliste et du prototype (figure 35 (2) et (3)).

Les liaisons **D1** et **D2** autorisent un grand jeu entre les bras et le cadre, ce qui a pour conséquence de ne pas aligner les bras et le cadre dans le plan de réflexion. En rétrécissant la pince, l'écart entre les fers plats et la pince pourra être supprimé. De ce fait, la taille de la pince correspondra à l'espace entre les deux fers plats. La pince aura un meilleur appui pour maintenir les deux fers plats. Les roulements de ces deux liaisons doivent aussi être remplacés par des rouleaux plus larges dont le diamètre intérieur sera ajusté au diamètre des vis plates les traversant.

9.2 Propositions

Une autre configuration permettrait de résoudre ce problème et d'autres techniques méritent d'être étudiées pour atteindre l'objectif de ce mémoire. Ces techniques sont décrites dans les parties suivantes :

✓ **Systèmes d'orientation sur monture équatoriale**

Ces deux systèmes sont basés sur le même principe que notre prototype (figure 43) [8]. En effet, puisque la normale de l'héliostat est orientée de manière à rester bissectrice de l'angle formé par le rayon incident et le rayon réfléchi (fixe). En se plaçant dans la direction du soleil la vitesse de déplacement pour orienter l'héliostat reste constante (15°/heure). L'avantage principal se trouve donc dans la simplicité de leur système de régulation. Un seul capteur de suivi direct du soleil est nécessaire pour assurer cette régulation. En contrepartie ce qui est gagné en simplicité de régulation rend plus complexe la transmission du mouvement d'orientation des héliostats. La transmission du mouvement étant indirect, le mécanisme d'orientation doit transformer l'information du rayon incident en un mouvement d'orientation de la normale. En s'inspirant de ces deux modèles il serait possible de trouver d'autres solutions pour notre prototype.

Premier modèle :

Dans ce système le miroir n'est pas placé au niveau du croisement des rayons incident et réfléchi mais déplacé sur le côté **c** du losange formé par les quatre points d'articulation **a**, **b**, **c** et **d** (figure 43). La normale correspond à la diagonale [**ac**] du losange et reste à tout moment bissectrice de l'angle du sommet (**d**) qu'elle traverse. En alignant le côté [**ab**] du losange avec le rayon incident et le côté [**ad**] en direction du récepteur, la normale est orientée dans la bonne direction. Pour s'orienter durant toute la journée, ce losange doit être contenu dans le plan de réflexion (figure 30) grâce à un suivi azimut. Pour effectuer ce suivi, cette

monture qui ressemble à un « pantographe » tourne autour de l'axe (**ad**) visant le récepteur. Pour le suivi de l'élévation une seconde motorisation (vérin) peut incliner la monture vers le haut ou vers le bas. Etant porté par sa monture, le miroir va donc se déplacer avec elle d'Est en Ouest, ce qui va engendrer un déplacement de la tâche focale au niveau du récepteur. Néanmoins, la mise en commun du mouvement d'orientation est possible en reliant par une barre l'articulation **b** de plusieurs héliostats d'une même rangée. Un autre avantage de ce système, est qu'il ne reçoit pas l'ombre de son système de suivi [8].

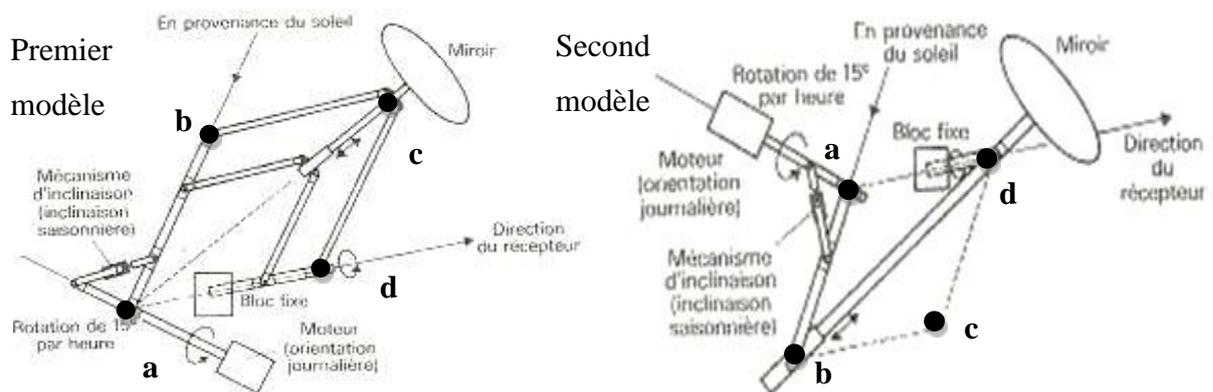


Figure 43 : Deux systèmes d'orientation d'un miroir par rotation à vitesse constante autour d'un axe

Second modèle :

Ce système d'orientation fut inventé et développé par le professeur Giovanni FRANZIA dans de petites centrales solaires au cours des années 1970 [8]. Le principe de fonctionnement reste le même que pour le premier modèle, la normale de l'héliostat est maintenue comme la diagonale du losange **abcd** (figure 43). De ce fait, en plaçant le côté [**ab**] dans l'alignement du rayon incident et le côté [**bc**] parallèle à l'axe (**ad**) dirigé vers le récepteur, la normale de l'héliostat est placée comme étant la bissectrice des rayons incident et réfléchi. Le losange doit être compris dans le plan de réflexion pour être orienté dans la bonne direction. Ainsi pour effectuer le suivi azimut, la normale est guidée en **b** par une barre montée sur un arbre motorisé en **a**. Celui-ci permet de faire pivoter l'ensemble d'Est en Ouest durant la journée. Un vérin reliant l'arbre du moteur à la barre supportant la normale permet d'obtenir la bonne élévation. En étant articulé sur un bloc fixe en **d**, le miroir peut s'orienter tout en évitant le problème de déplacement de la tâche focale du modèle précédent. Sur ce modèle il est aussi possible de mettre en commun le mouvement d'orientation de plusieurs héliostats d'une même rangée. Pour cela on peut relier l'articulation **b** de chaque héliostat par une barre jouant le rôle du porche dans notre cas.

✓ Système conchoïdale

Ce système devra retranscrire directement la trajectoire de la conchoïde à la pointe de la normale télescopique de chaque héliostat. L'avantage de ce système est la transmission directe du mouvement d'orientation à la normale de chaque héliostat. Pour se faire, chaque héliostat est articulé le long d'une barre. Ces barres seront parallèles entre elles et fixées sur un support stable (figure 44). Les normales télescopiques pourront être guidées par une grille placée en dessous des barres. Cette grille mobile reposera sur quatre points de soutien motorisés capables de lui appliquer la trajectoire conchoïdale. En utilisant trois vérins par point il sera possible de décrire cette trajectoire en trois dimensions. Le système devra être sophistiqué puisque cette motorisation nécessite un programme de déplacement tridimensionnel pour effectuer la trajectoire conchoïdale. De plus, la grille de guidage devra être positionnée précisément par rapport aux normales qu'elle dirige.

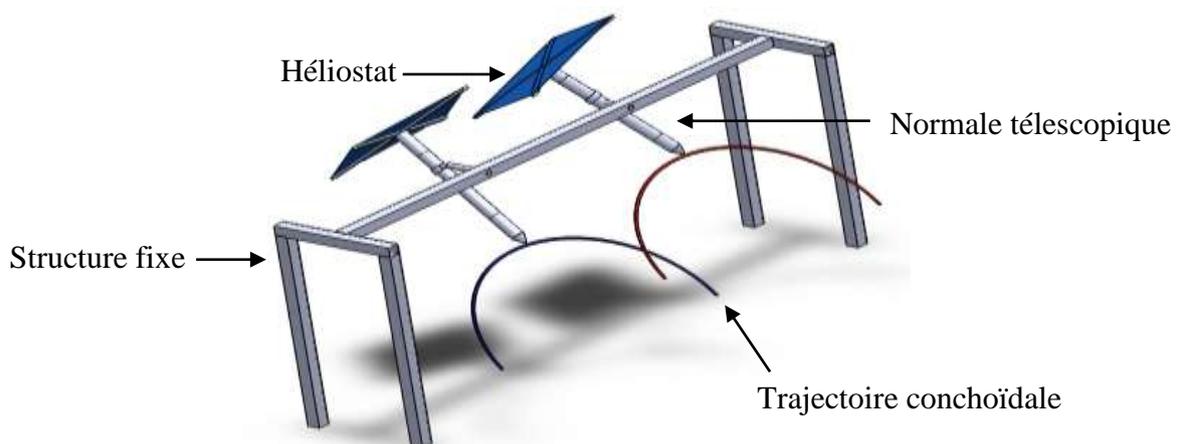


Figure 44 : Schéma d'un système à deux héliostats utilisant la conchoïde

9.3 Retour d'expérience

Dans le développement du second prototype certaines étapes auraient pu suivre un ordre différent. Le stage arrivant à sa fin, la réalisation a commencée avant la simulation du modèle réaliste (annexe 6) sur Solidworks, ce qui entraîna des erreurs de fabrication. Pour améliorer cette démarche le processus suivant est proposé :

- Faire une étude préalable des simulations de la trajectoire (pour le modèle conchoïdal).

- Concevoir un système permettant de résoudre les problèmes techniques en effectuant les corrections proposées et en s'inspirant des modèles de la figure 43. La mise en place de la motorisation devra être prise en compte.

-Etablir un cahier des charges complet (technique). Une étude électromécanique permettra d'améliorer la qualité du dimensionnement et le choix des pièces et des matériaux utilisés.

-Effectuer une étude éco-environnementale afin d'optimiser le coût et l'impact environnemental de la construction du système.

-Fabriquer les pièces avec des outils et des techniques de fabrication plus adaptés, car ce type de système demande une réalisation plus précise que celle choisie durant ce stage.

-Fabriquer un système simple de manière à standardiser les pièces pour faciliter l'installation, le réglage et l'entretien.

-Effectuer les tests durant une plus longue période et à différent moment de l'année en faisant varier plusieurs configurations et plusieurs paramètres comme la distance entre les héliostats et la cible, ou encore l'emplacement des héliostats dans le champ.

10. Conclusion

Le montage et l'expérimentation du premier prototype a permis d'infirmer l'hypothèse des plans séparés sur laquelle était aussi basé l'héliostat du LESEE. Dans la seconde partie du stage la méthode de la réflexion fut réadaptée pour orienter l'héliostat et un second prototype fut simulé (annexe 5) et mis en place (annexe 7)). Au terme de cette étude le second prototype n'est pas encore fonctionnel pour le moment. Premièrement la liaison **A** n'a pas respecté l'ordre des degrés de liberté comme dans le modèle idéal simulé sous le logiciel Solidworks. Le bras a été la dernière pièce de l'assemblage à être fabriqué, et par manque de temps les corrections n'ont pas encore été réalisées. De plus cette pièce est importante, puisque c'est elle qui va directement placer l'héliostat dans le plan de réflexion et donner la bonne inclinaison (figure 30). Les blocages seront normalement éliminés dès que les corrections seront mises en place.

11. Perspectives

Après avoir rendu le prototype fonctionnel manuellement les étapes suivantes pourront être effectuées :

- Régulation

La régulation pourra être mise en place grâce à un capteur plan monté sur le porche. N'utilisant aucun programme, ce capteur plan sera inspiré du modèle construit dans le projet intégrateur [6]. Ce capteur transmettra la position du soleil à la motorisation par l'intermédiaire de la partie commande. Avec ce système, la régulation pourra s'effectuer à vitesse constante, comme pour les systèmes d'orientation sur monture équatoriale présentés plus haut (figure 43).

- Motorisation

La motorisation pourra diriger le porche en direction du soleil à l'aide de la partie commande. Deux vérins montés au même niveau que les articulations du porche (liaisons **F** et **F'**) pourront assurer la motorisation. Pour répartir les efforts de manière homogène sur le porche, les vérins seront placés au milieu ou à plusieurs extrémités du prototype (annexe 9).

- Disposition des héliostats

Comme précisé dans ce mémoire, les héliostats pourront être disposés par groupements (lots). Les héliostats seront aux nombres de 4, 9, 16, 25, ou même 36, de manière à former un carré (annexe 10). Cette disposition permettra aussi d'équilibrer les charges supportées par le porche. De cette manière la motorisation pourra être placée aux quatre coins du groupement d'héliostats. La répartition de l'emplacement des héliostats sera effectuée grâce au logiciel d'optimisation du champ solaire développé par Emmanuel CLERC.

- Evaluation économique

En effectuant l'analyse économique de chaque groupement d'héliostats un optimum technico-économique pourra être déterminé. Les paramètres pour trouver cet optimum devra prendre en compte le choix de la motorisation pour un groupe d'héliostats donné.

IV. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Ouvrages et articles

[1] Direction de la Prospective et de l'Intelligence Economique.

[2] **Gregory J. Kolb, Scott A. Jones, Matthew W. Donnelly, David Gorman, Robert Thomas, Roger Davenport, and Ron Lumia**, Sandia National Laboratories. Heliostat Cost Reduction Study, Juin 2007.

[3] **Juan Pablo Cabanillas, Carlos Garcia**, Low-cost and high performance heliostats The TITAN TRACKER concept, 2006.

[4] **Gregory Chris, Coleman Brian, Greaney Alan, Luconi Gregg, Blair Jason**, Esolar, International Publication, Solar collector system for solar thermal applications, WO2008154521A1, 11 Septembre 2008.

[5] **Thomas R. Mancini**, SolarPACES. Catalog of Solar Heliostats, Juin 2000.

[6] **Lebongo onana Achille, Clerc Emmanuel, May aya Salaou, Oubda Benjamin, Zmuda Jérémy**, Rapport de projet intégrateur de master spécialisé en génie énergétique et énergies renouvelables, Système de tracking en chaîne pour centrale à tour, Avril 2011, Pages (6-8).

[7] **Vincent Gioan**, Rapport de stage master énergie solaire : Montage et expérimentation d'un héliostat de petite dimension, Août 2011, Pages (26-30).

[8] **Wolfgang PALZ**, L'électricité solaire, 1981, Pages (167-172).

Site internet

[9] <http://www.esolar.com>, Juin 2011.

V. ANNEXES

Sommaire des annexes

ANNEXE I : POTENTIEL SOLAIRE DU BURKINA FASO	42
ANNEXE II : HYPOTHESE DU PREMIER PROTOTYPE	43
ANNEXE III : DISPOSITION DU PREMIER PROTOTYPE.....	44
ANNEXE IV : EXEMPLE DE CONCEPTION	45
ANNEXE V : MODELE IDEALE DU SECOND PROTOTYPE	46
ANNEXE VI : MODELE REALISTE DU SECOND PROTOTYPE.....	47
ANNEXE VII : MODELE REEL DU SECOND PROTOTYPE.....	48
ANNEXE VIII : CORRECTION DU SECOND PROTOTYPE	49
ANNEXE IX : MOTORISATION DU SECOND PROTOTYPE.....	50
ANNEXE X : DISPOSITIONS DU SECOND PROTOTYPE	51

Annexe I : Potentiel solaire du Burkina Faso

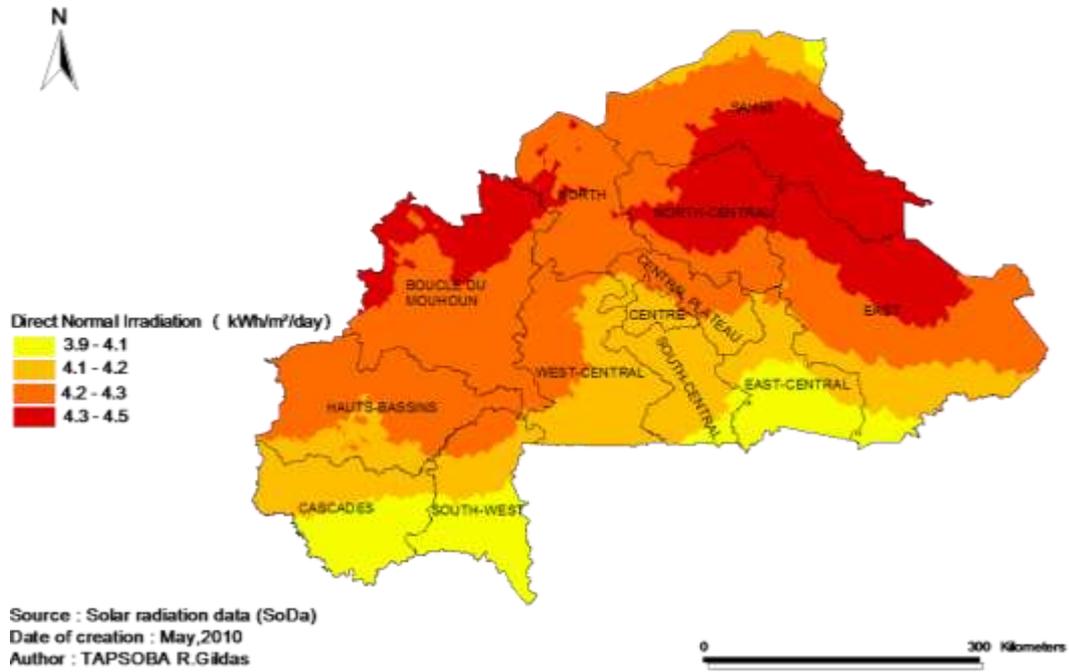


Figure 45 : Répartition du DNI au Burkina Faso

Annexe II : Hypothèse du premier prototype

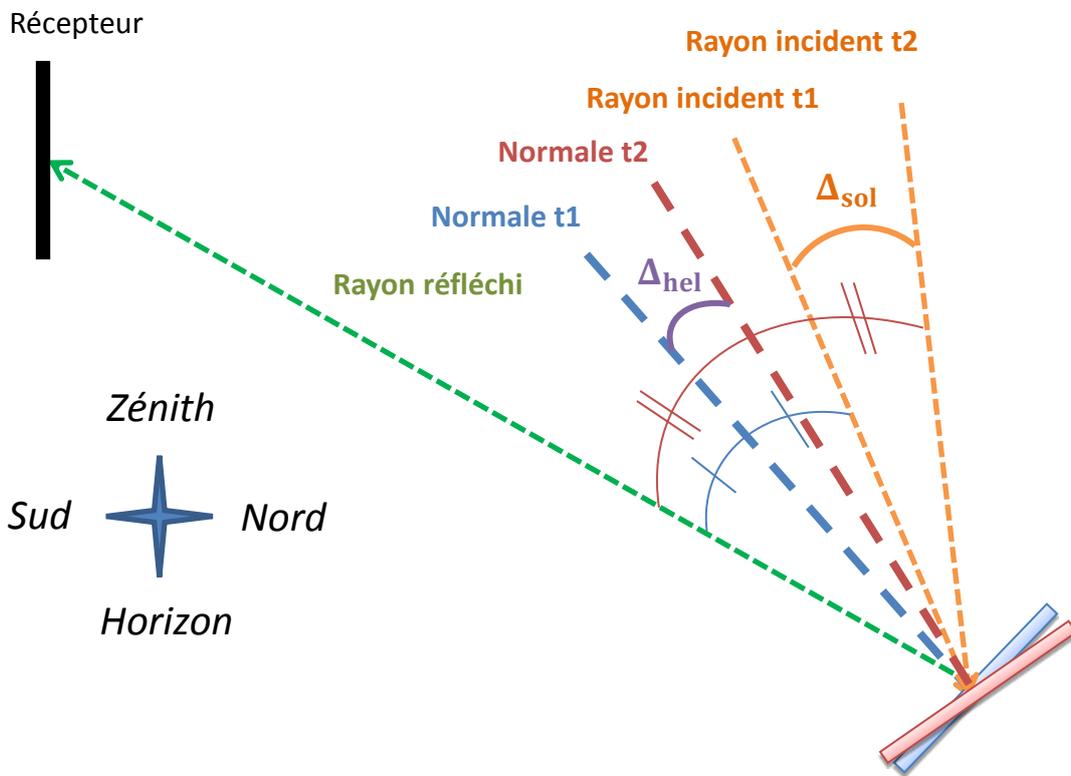


Figure 46 : Vue de gauche d'un héliostat à deux instants (t_1 et t_2) au cours de la matinée [6]

Annexe III : Disposition du premier prototype

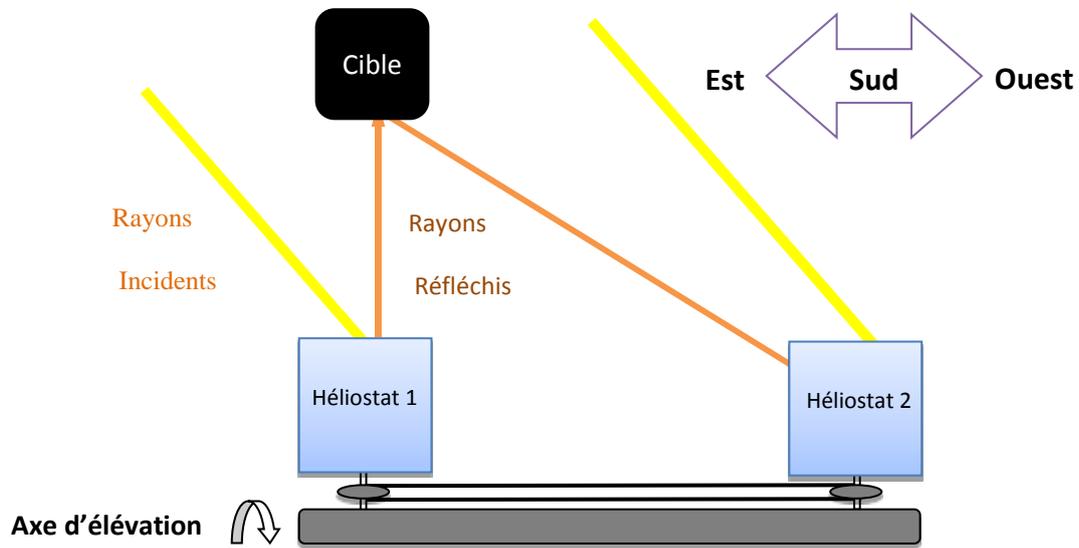


Figure 47 : Disposition du premier prototype



Figure 48 : Photographie de l'ensemble du premier prototype et de la cible

Annexe IV : Exemple de conception

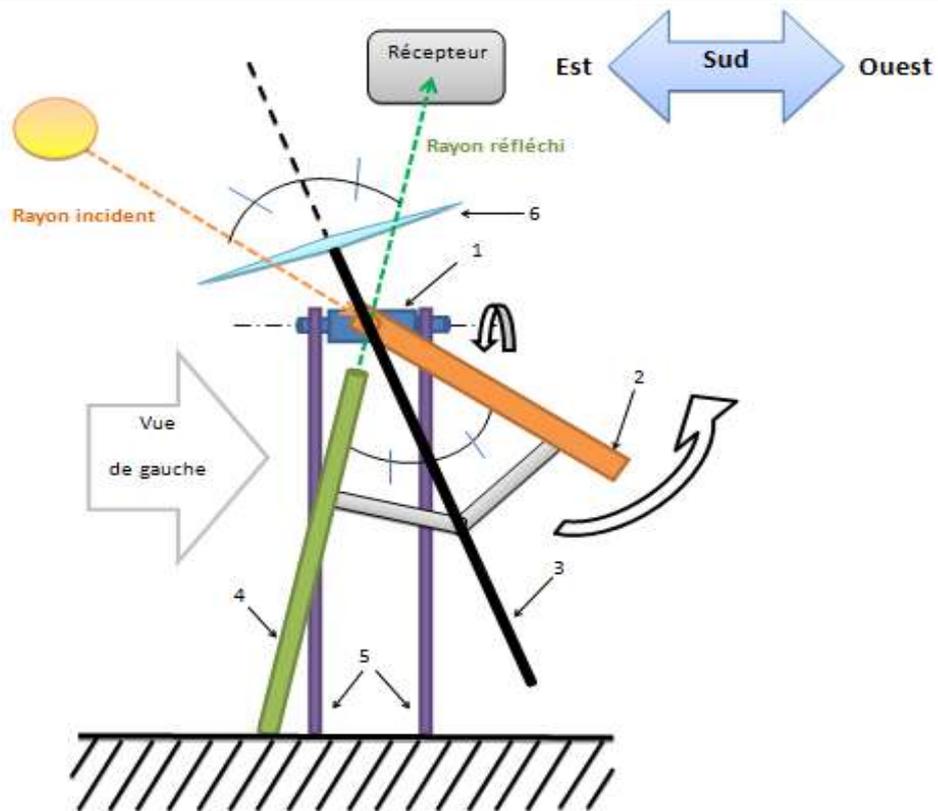


Figure 49 : Vue de face d'un modèle de conception

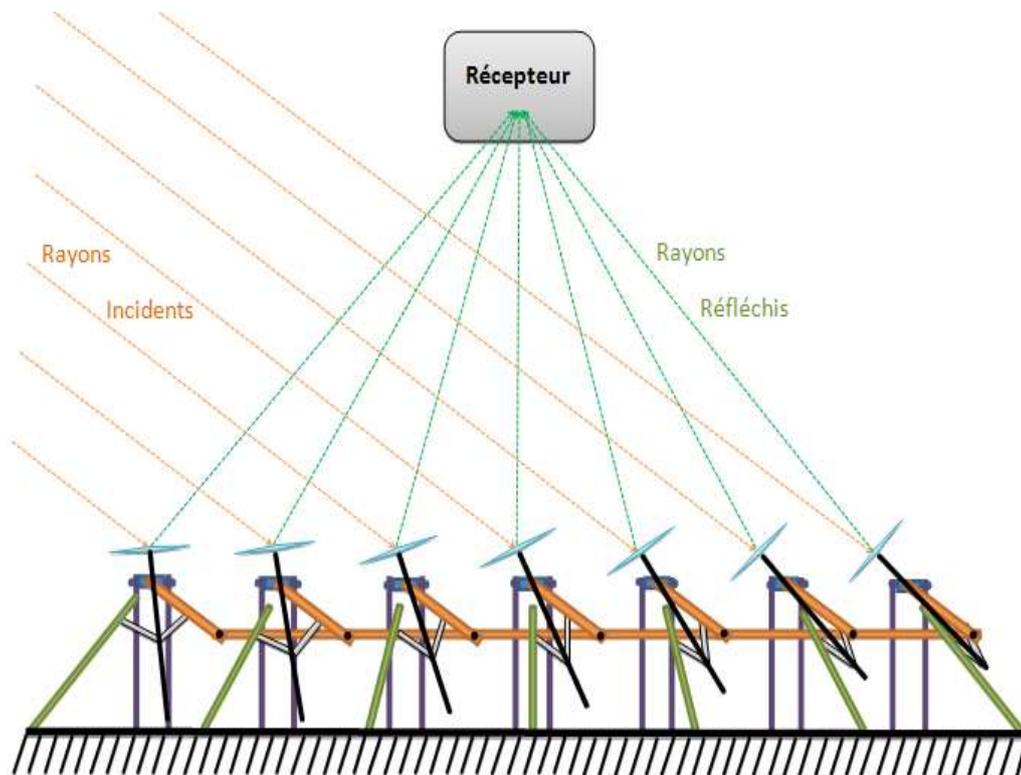


Figure 50 : Vue globale d'un modèle de conception

Annexe V : Modèle idéal du second prototype

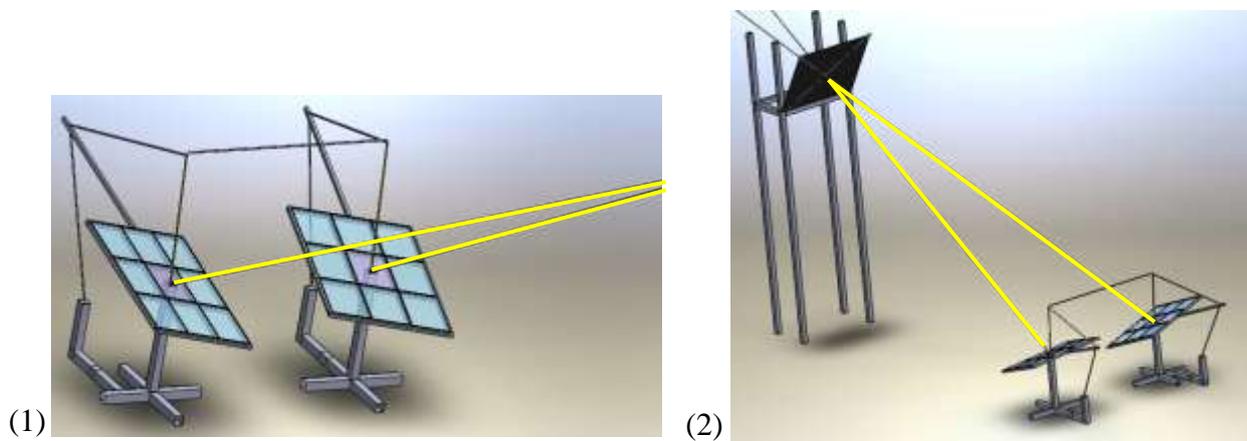


Figure 51 : Vue du modèle idéal (1) et vue globale du système (2)

Annexe VI : Modèle réaliste du second prototype

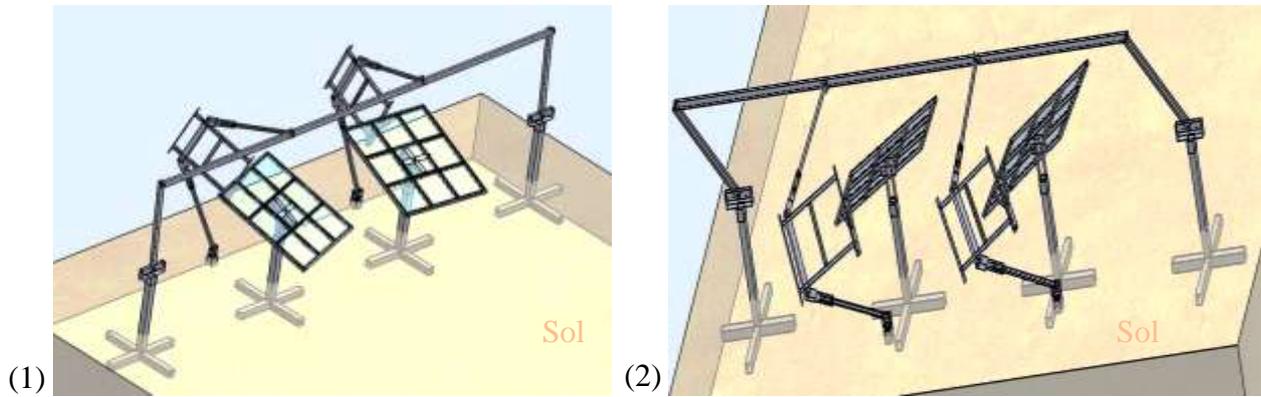


Figure 52 : Modèle réaliste en vue avant (1) et arrière (2)

Annexe VII : Modèle réel du second prototype



Figure 53 : Modèle réel en vue avant (1) et arrière (2)

Annexe VIII : Correction du second prototype

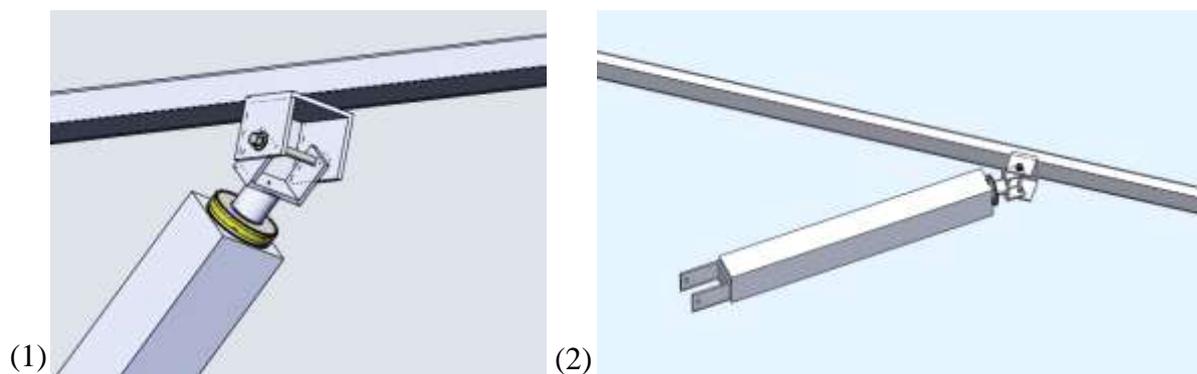


Figure 54 : Nouveau type de bras (1) et (2)

Annexe IX : Motorisation du second prototype

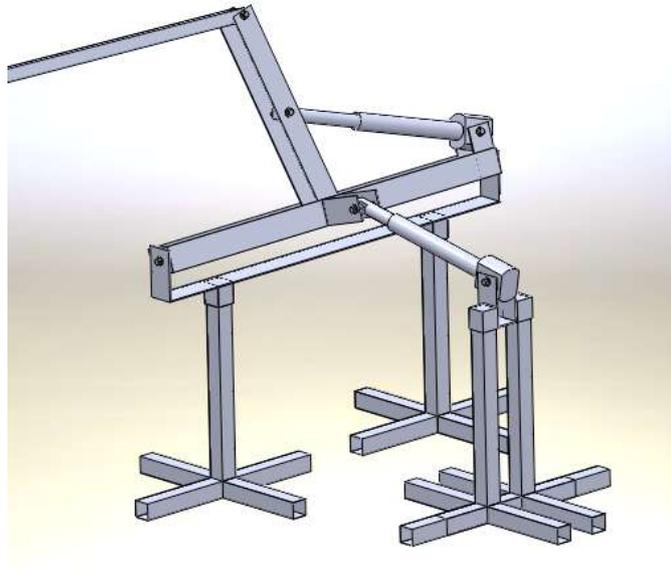


Figure 55 : Exemple de motorisation sur le modèle réaliste

Annexe X : Dispositions du second prototype

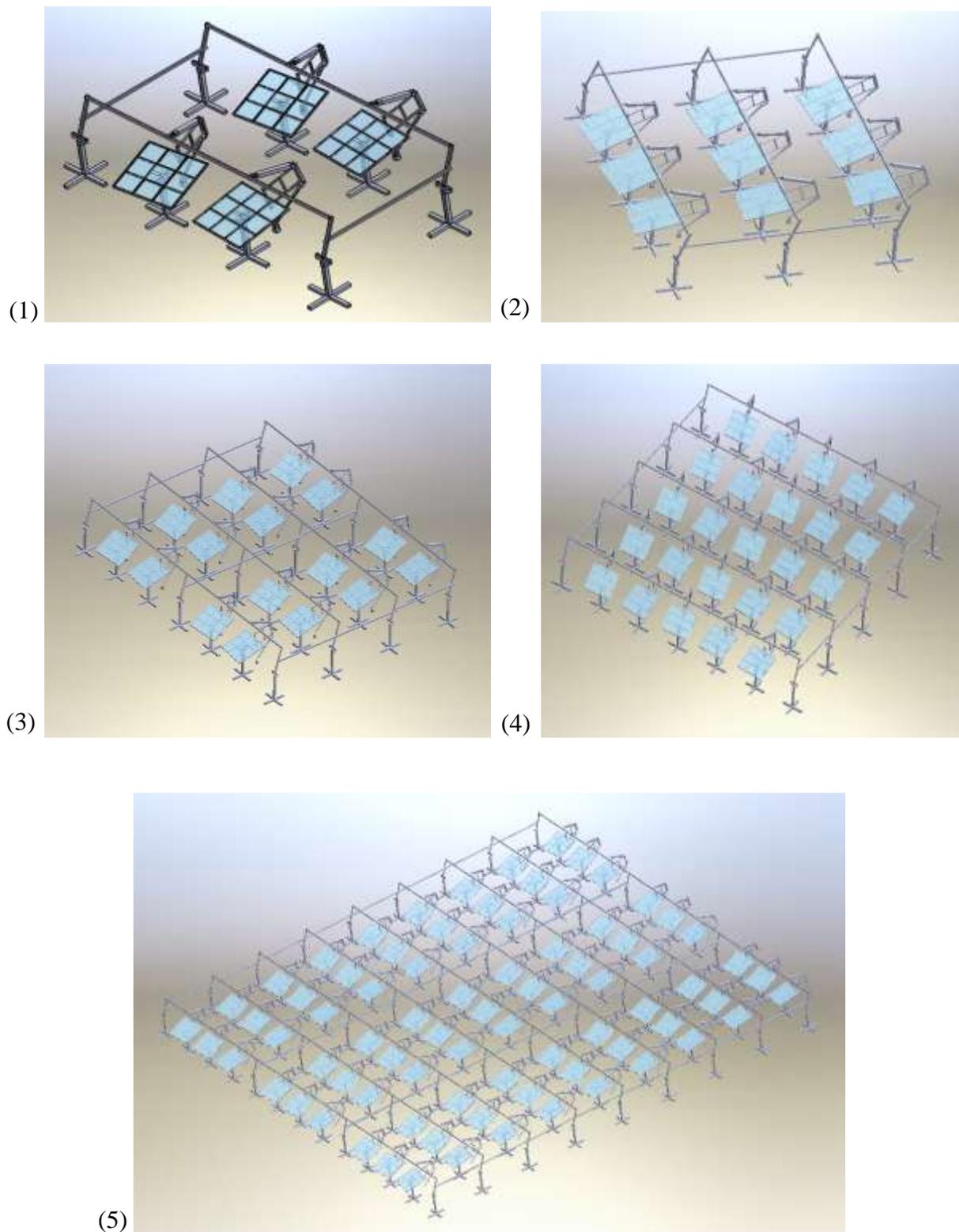


Figure 56 : Dispositions de 4 (1), 9 (2), 16 (3), 25 (4) et 36 (5) héliostats