



Mise en place et diagnostic du prototype d'héliostat de la plateforme CSP4Africa

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER ENERGIE

OPTION : Génie énergétique et procédés industriels

Présenté et soutenu publiquement le 24 juin 2014 par

Jean Claude LEOSGHO

**Travaux dirigés par le Docteur Kokouvi Edem N'TSOUKPOE
et l'Ingénieur Jeremy ZMUDA**

Jury d'évaluation du stage :

Président : Yao AZOUMAH

Membres et correcteurs : Souleymane BARRO
Jeremy ZMUDA
Eric NOUMI

Promotion [2013/2014]



Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

· *Mes parents :*

Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venus de toi.

A mon frère qui n'a cessé d'être pour moi un exemple de persévérance, de courage et de générosité.

Mes professeurs qui doivent voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis.

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à mes encadreurs de stage au LESEE, l'ingénieur Jeremy ZMUDA et Docteur Kokouvi Edem N'TSOUKPOE, pour tout le temps qu'ils m'ont consacré, leurs directives précieuses, et pour la qualité de leur suivi durant toute la période de mon stage.

Je tiens aussi à remercier vivement le responsable du LESEE, Professeur Yao AZOUMAH qui a accepté de m'accueillir en stage au sein de son laboratoire.

Je voudrais remercier également tout le personnel du LESEE pour sa gentillesse et son soutien notamment l'ingénieur Emmanuel Clerc pour ses explications et sa disponibilité.

Mes profonds remerciements vont à mon camarade et grand frère Aboubakar GOMNA avec qui j'ai partagé les difficultés et qui était toujours disponible pour des conseils.

Mes plus vifs remerciements s'adressent aussi à tous les stagiaires du LESEE pour ces moments passés ensemble, avec qui aussi j'ai partagé les réussites et les difficultés.

Mes remerciements vont enfin à toute personne qui a contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Résumé

Dans le cadre du projet CSP4Africa, le laboratoire LESEE du 2iE a pour ambition de développer une centrale à tour à petite échelle (100 kW thermique). Cette technologie reste cependant très chère. Pour la rendre plus accessible financièrement et techniquement, des innovations ont été apportées sur la partie la plus onéreuse de la centrale: le champ solaire. Les ingénieurs du LESEE ont conçu un prototype d'héliostat V1, puis une version améliorée nommée V2 a vu le jour. C'est sur ce modèle que mon travail porte, nous avons eu pour objectifs de mettre en place ce prototype, d'effectuer des tests de fonctionnement et un diagnostic. Premièrement, nous avons mis en place le prototype V2 sur la plateforme CSP4Africa, deuxièmement nous avons effectué plusieurs tests. Au terme de notre travail, des erreurs mécaniques, optiques et d'automatisme ont été corrigées. Ainsi, le prototype V2 fonctionne correctement sur une grande partie de la journée.

Abstract

In the framework of the CSP4Africa project, the laboratory LESEE 2ie aims at developing a solar power tower system on a small scale (100 kW thermal). However, this technology is still very expensive. In order to make it more accessible financially and technically, innovations have been made on the most expensive part of the system: solar field. LESEE engineers have designed a heliostat's prototype named V1. After that, they have designed an improved version named V2 on which I worked. Our goals were to implement this prototype, to perform the functioning with tests and to do a diagnosis. Firstly, we implemented the prototype V2 on CSP4Africa experimental platform, secondly we conducted several tests. At the end of our work, mechanic, automatism and optical errors were corrected, and V2 prototype works correctly on a large portion of the day.

Liste des abréviations

A : Distance entre l'axe d'application de la force et l'axe de guidage

cm : Centimètre

D : Epaisseur de la surface de guidage

\vec{F} : Vecteur Force appliqué au système

h : Heure

L : Longueur de guidage

m : Mètre

min : Minute

mm : Millimètre

\vec{P} : Vecteur poids

\vec{R} : Vecteur Résistance

θ : Coefficient de frottement (lubrification, autre matériaux, compenser le jeu)

α : Angle entre la direction du soleil et l'axe Est-Ouest

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

CSP: Concentrated Solar Power Plant

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

PV: Photovoltaïque

Liste des tableaux

Tableau 1 : Comparaison héliostat avant 1980 19

Liste des figures

Figure 1 : Schéma illustrant le fonctionnement d'une centrale à tour [2]	14
Figure 2 : Principe de positionnement de l'héliostat [6]	15
Figure 3 : Schéma d'un héliostat classique [7].....	16
Figure 4 : Schéma d'un héliostat Solar One	17
Figure 5 : Concept des héliostats de première et de deuxième génération	18
Figure 6 : Evolution des héliostats durant les années 1980	18
Figure 7 : Deux technologies de la famille Carrousel.....	20
Figure 8 : Structure en treillis triangulaire Esolar	20
Figure 9 : Répartition des prix suivant les éléments de l'héliostat	21
Figure 10 : Schéma de l'héliostat V1	22
Figure 11 : Schéma d'un réflecteur	22
Figure 12 : Schéma du châssis	23
Figure 13 : Schéma de la grille	23
Figure 14 : Principe d'une carte de commande d'un héliostat.....	24
Figure 15 : Image illustrant la différence entre V1 et V2	25
Figure 16 : Image illustrant la différence entre le châssis V2 et le châssis V1.....	25
Figure 17 : Schéma illustrant la différence entre la grille V1 et V2	26
Figure 18 : Modification de la longueur de guidage.....	27
Figure 19 : Présence de coussinets sur les glissières de V2.....	27
Figure 20 : Comparaison entre les glissières V1 et V2.....	27
Figure 21 : Détermination de la position du soleil et tracé	29
Figure 22 : Illustration de la détermination de la position Est-Ouest	29
Figure 23 : Illustration du placement de l'héliostat par rapport à la cible.....	30
Figure 24 : Ajustement de l'héliostat suivant l'axe horizontal	31
Figure 25 : Présentation de la tâche focale après l'orientation des miroirs	31
Figure 26 : Image illustrant la détermination de la verticalité des bras	32
Figure 27 Schéma illustrant l'automatisation du système de suivi	33
Figure 28 : Image montrant l'axe Est-Ouest et l'axe Nord-Sud	34
Figure 29 : Première journée de test	34
Figure 30 : Chariot assurant le déplacement Est-Ouest	35
Figure 31 : Deuxième journée de test	36
Figure 32 : Illustration des forces appliquées sur la motorisation	36
Figure 33 : Troisième journée de test.....	37

Figure 34 : Quatrième journée de test	38
Figure 35 : Schéma illustrant les mouvements haut et bas de la grille	38
Figure 36 : Blocage de la grille contre le châssis.....	39
Figure 37 : Cinquième journée de test	40
Figure 38 : Sixième journée de test.....	40
Figure 39 : Test avec le réflecteur central.....	41
Figure 40 : Septième journée de test.....	42
Figure 41 : Ajustement du miroir central par rapport à la normal au réflecteur	42
Figure 42 : Huitième journée de test.....	43
Figure 43 : Prototype V1.....	46
Figure 44 : Prototype V2.....	47
Figure 45 : Motorisation V2.....	48
Figure 46 Illustration de l'effet cosinus.....	49
Figure 47 : Test à vide de la motorisation V2.....	50
Figure 48 : Illustration des glissières	55
Figure 49 : Moteur pas à pas	56
Figure 50 Carte Phidget	56
Figure 51 Connexion avec la batterie et local de supervision.....	56

Table des matières

Dédicace.....	ii
---------------	----

Remerciements.....	iii
Résumé.....	iii
Abstract	iv
Liste des abréviations.....	v
Liste des tableaux.....	vi
I) Introduction.....	13
1) Présentation du lieu de stage.....	13
2) Contexte.....	13
II) Les différentes technologies d'héliostat	14
1) Description d'un héliostat classique	14
2) Principe de fonctionnement d'un héliostat	15
3) Les différentes technologies d'héliostats.....	16
III) Héliostat CSP4Africa.....	21
1) Description de l'héliostat	21
a) Les réflecteurs	22
b) Le châssis.....	23
c) La grille.....	23
d) La motorisation.....	24
2) Comparaison entre le prototype V1 et le prototype V2	25
a) Réflecteur	25
b) Châssis	25
c) La grille.....	26
d) La motorisation.....	26
IV) Mise en place du prototype.....	28
1) Objectif.....	28
2) Installation et réglages du prototype	28

3) Protocole de démarrage du système de suivi.....	32
V) Diagnostic mécanique et électronique du prototype.....	33
1) Objectif.....	33
2) Méthode.....	33
3) Tests et diagnostic	33
a) Premier jour d'expérimentation	34
b) Deuxième jour d'expérimentation	35
c) Troisième jour d'expérimentation.....	37
d) Quatrième jour d'expérimentation	37
e) Cinquième jour d'expérimentation.....	39
f) Sixième jour d'expérimentation	40
g) Septième jour d'expérimentation	40
h) Huitième journée de test	43
VI) Conclusion	43
VII) Perspectives	44
VIII) Références bibliographiques.....	44
IX) Annexes	45
1) Annexe 1 : Prototype V1	45
2) Annexe 2 : Prototype V2	46
3) Annexe 3 : motorisation V2.....	47
4) Annexe 4 : Effet cosinus.....	49
5) Annexe 5 : Test de la motorisation V2	50
6) Annexe 6 : Etude motorisation de l'HELIOSTAT	51
7) Annexe 7 : Les glissières suivant l'axe Est-Ouest	55
8) Annexe 8 : Démarrage du système de suivi	56



I) Introduction

1) Présentation du lieu de stage

Notre stage s'est déroulé au laboratoire d'énergie solaire et d'économie d'énergie (LESEE) du 2iE dirigé par le Pr. Yao AZOUMAH, il a été créé en novembre 2008. L'équipe de recherche actuelle est composée de trois enseignants-chercheurs, sept ingénieurs de recherche, un post-doctorant et quatre doctorants.

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.

2) Contexte

« L'électricité, c'est la lumière qui permet aux écoliers d'étudier, l'énergie qui permet de transformer une simple idée en entreprise, et la connexion qui permet de brancher l'Afrique sur le réseau de l'économie mondiale ». Ces mots sont ceux du Président américain Barack Obama. Le déficit d'accès à l'énergie est l'un des principaux freins au développement du continent africain et fait de l'accès universel à l'électricité un objectif prioritaire. Dans le souci de remédier à ce déficit, l'énergie solaire apparaît comme une source très prometteuse. L'un des procédés les plus intéressants pour convertir le rayonnement solaire direct en énergie électrique est la centrale solaire à tour, une technologie du solaire à concentration [1]. Ce type de centrale est composé d'un champ d'héliostats, d'un récepteur solaire situé au sommet d'une tour et d'une boucle thermodynamique de conversion de la chaleur en électricité, le principe est décrit dans la Figure 1.

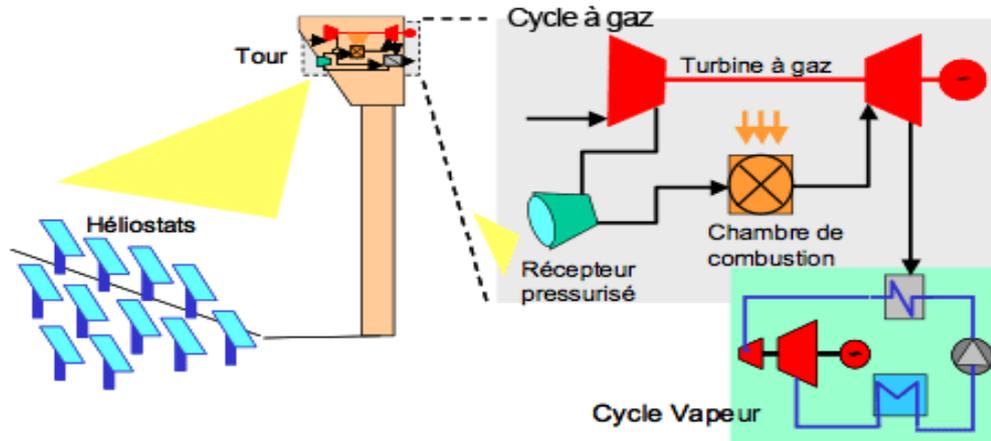


Figure 1 : Schéma illustrant le fonctionnement d'une centrale à tour [2]

Des recherches sont toujours effectuées sur le CSP, car la technologie est complexe et le coût d'investissement est très élevé, près de $2\,000\,000\text{ F CFA.kW}^{-1}$ [3]. Ce qui a conduit le LESEE à mettre en place le projet CSP4Africa, dont le principal objectif est de mettre en place et de tester une centrale solaire à tour pilote de 100 kW thermique sur le site de Kamboinse. Les objectifs de ce projet sont l'utilisation des matériaux disponibles sur le marché locale, la décentralisation la production d'électricité. Afin de diminuer le coût d'investissement, les ingénieurs du LESEE ont développé des héliostats multi-facettes. En effet, le champ solaire représente près de 40% du coût d'investissement total [4] de la centrale.

II) Les différentes technologies d'héliostat

1) Description d'un héliostat classique

Héliostat provient du mot helios (en grec) signifiant soleil et du mot stat signifiant stationnaire du fait que les rayons réfléchis sont maintenus à une position fixe tout au long de la journée. Les héliostats sont des miroirs plats (certains avec une courbure) qui recueillent et concentrent l'énergie solaire sur un récepteur située en haut d'une tour [5].

Afin de maintenir la tâche focale sur le récepteur solaire, les héliostats doivent suivre en permanence un point dans le ciel qui correspond au milieu entre le soleil et le récepteur.

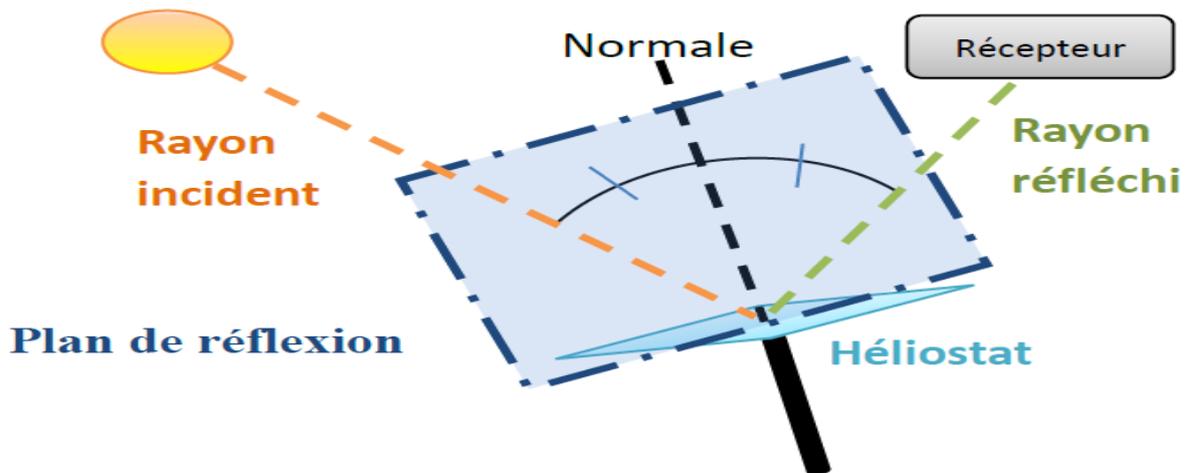


Figure 2 : Principe de positionnement de l'héliostat [6]

La Figure 2 illustre la méthode de positionnement des héliostats. 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 [6]. Il y a plusieurs technologies d'héliostats, cependant la majorité a le même principe de fonctionnement comme décrit ci-dessous.

2) Principe de fonctionnement d'un héliostat

La commande donne les ordres aux moteurs via une carte de programmable, en envoyant des signaux électroniques. Ces moteurs convertissent ensuite les signaux en mouvement mécanique. Ces moteurs permettent d'effectuer un déplacement d'Est en Ouest et du bas vers le haut afin de se positionner par rapport au soleil. La Figure 3 illustre les éléments qui composent un héliostat classique.

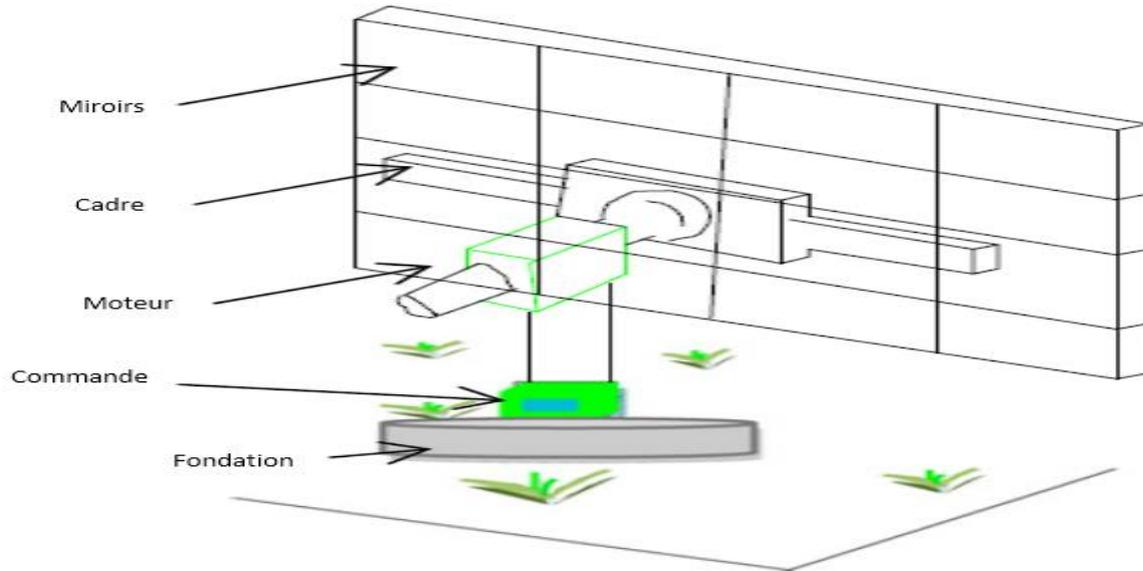


Figure 3 : Schéma d'un héliostat classique [7]

Fondation : Elle correspond à l'ouvrage qui supporte toutes charges de l'héliostat

Moteur : Il est un mécanisme produisant le mouvement mécanique

Cadre : Il est la structure qui supporte les miroirs

Miroirs : Ils réfléchissent les rayonnements directs vers le récepteur.

3) Les différentes technologies d'héliostats

L'effort du développement des héliostats a été initié aux Etats-Unis en 1975, lorsque quatre groupes d'industries ont été financés pour réaliser des études de conception d'héliostats de première génération. De grandes centrales telles que Solar One (Figure 4) furent construites avec cette technologie, ces héliostats ont une surface réfléchive de 40 m^2 [4].

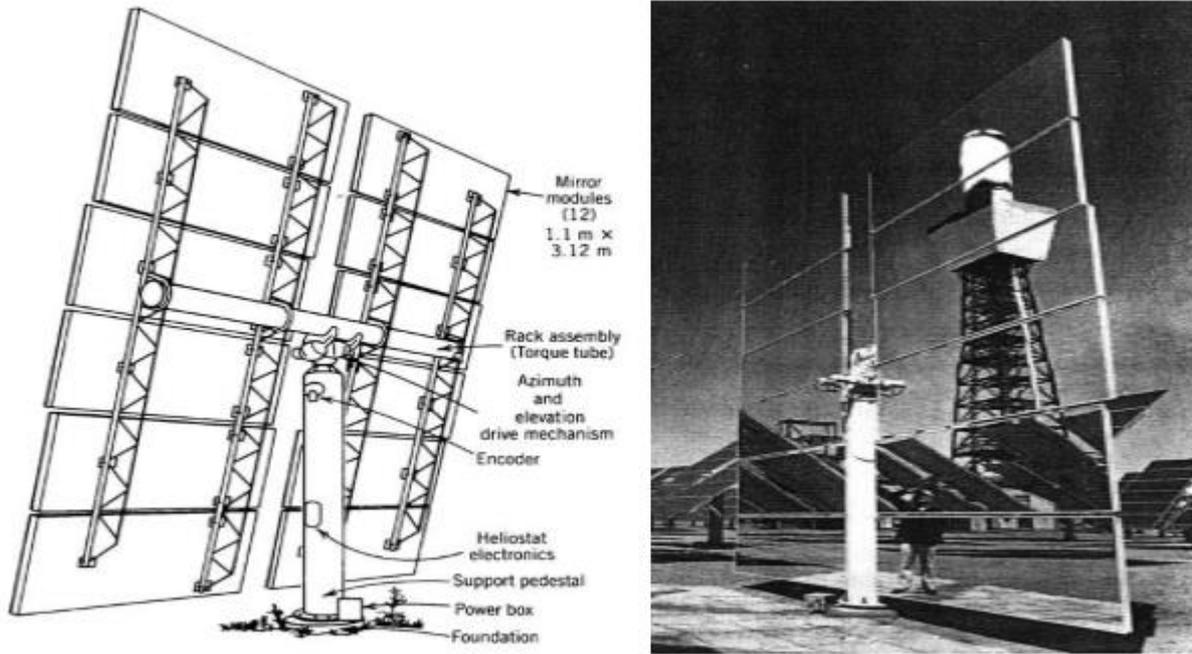


Figure 4 : Schéma d'un héliostat Solar One

Afin de considérablement réduire le coût et d'augmenter les performances, des héliostats de deuxième génération ont été réalisés [4]. Il existe cinq différents concepts illustrés dans la Figure 5: (1) fixé sur piédestal, (2) membrane bulle-joint, (3) couplés, (4) et (5) carrousel. Il a été démontré après une évaluation approfondie que l'héliostat monté sur le pylône avait un avantage sur les autres approches [8]. Il a d'ailleurs été choisi comme modèle dans une usine pilote de Général Motors en 1982 [8].

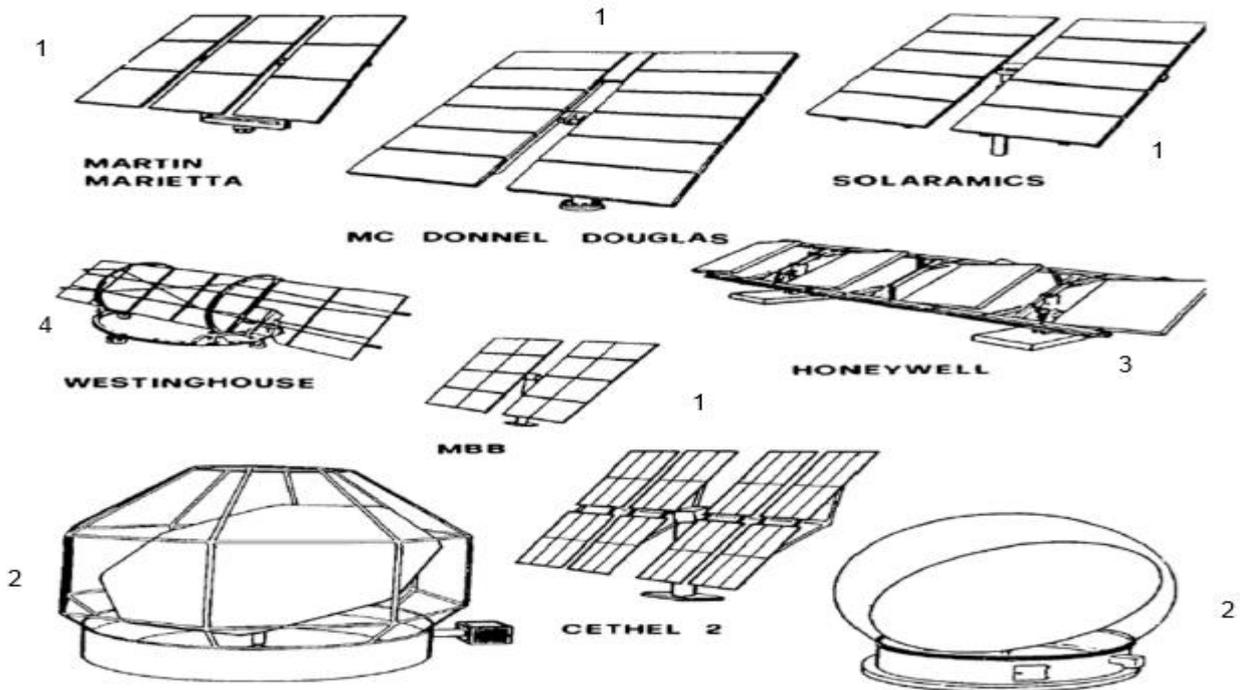


Figure 5 : Concept des héliostats de première et de deuxième génération [8]

Après le concept, des héliostats de première et de deuxième génération (Figure 5), 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 (Figure 6) à au moins 100 m² [4].

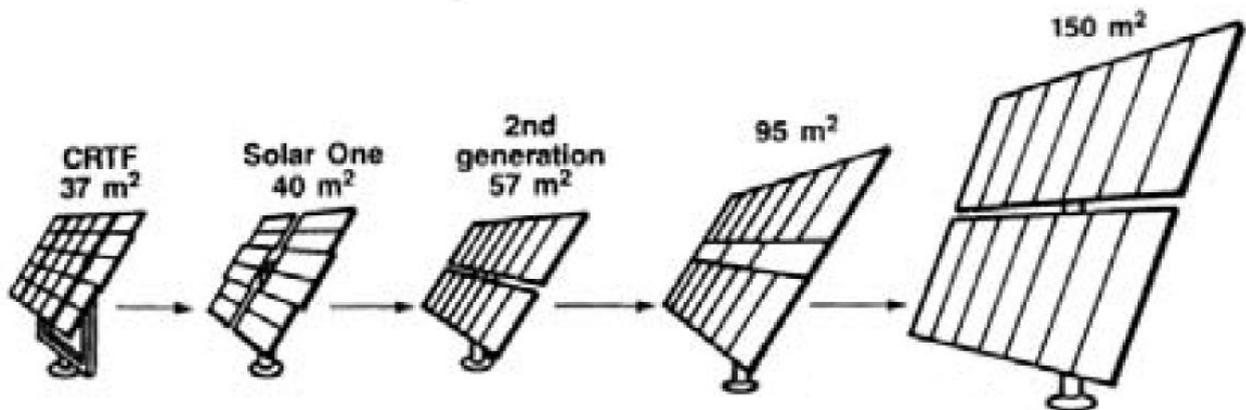


Figure 6 : Evolution des héliostats durant les années 1980

Le tableau suivant illustre une comparaison entre les technologies avant 1980.

Le Tableau 1 illustre les avantages et les inconvénients des héliostats de première et de deuxième génération.

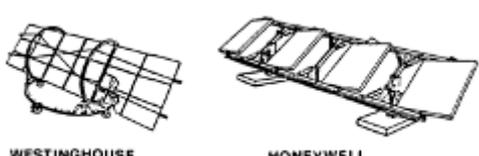
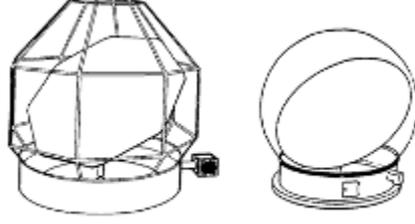
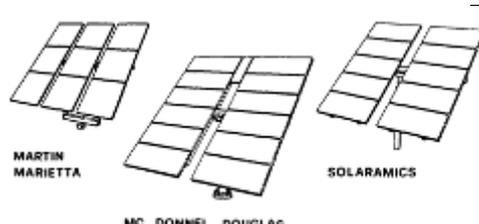
HELIOSTAT	AVANTAGES	INCONVENIENT
 <p>WESTINGHOUSE HONEYWELL</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Près du sol - Moins de contraintes au vent - Mutualisation du système de suivi 	<ul style="list-style-type: none"> - Structure complexe - Système de rotation complexe
 <p>GENERAL ELECTRIC BOEING</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Miroirs protégés du vent 	<ul style="list-style-type: none"> - Structure complexe
 <p>MARTIN MARIETTA SOLARAMICS</p> <p>MC DONNELL DOUGLAS</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Structure simple - Héliostats communs 	<ul style="list-style-type: none"> - Forte prise au vent - Moteur soumis à de fortes charges et à des charges temporaires

Tableau 1 : Comparaison héliostat avant 1980

En 2006, une nouvelle famille d'héliostat apparaît, il s'agit du carrousel (Figure 7). Il est caractérisé en ce que la rotation azimut est réalisé en roulant sur une piste [4]. Le concept de carrousel évite la plupart des inconvénients de la famille des héliostats à support central unique. Ils ont plusieurs points d'appui et par conséquent, la tenue mécanique est plus stable. L'autre avantage se porte sur le système d'entraînement. En effet, cette partie est indépendante du reste de la structure contrairement à l'héliostat piédestal [9]. Dans la Figure 7, le plus grand inconvénient de l'héliostat (2) porte sur la zone d'ombre et, par conséquent, inutilisable. L'héliostat (1) est une version améliorée, la zone d'ombre y est supprimée.

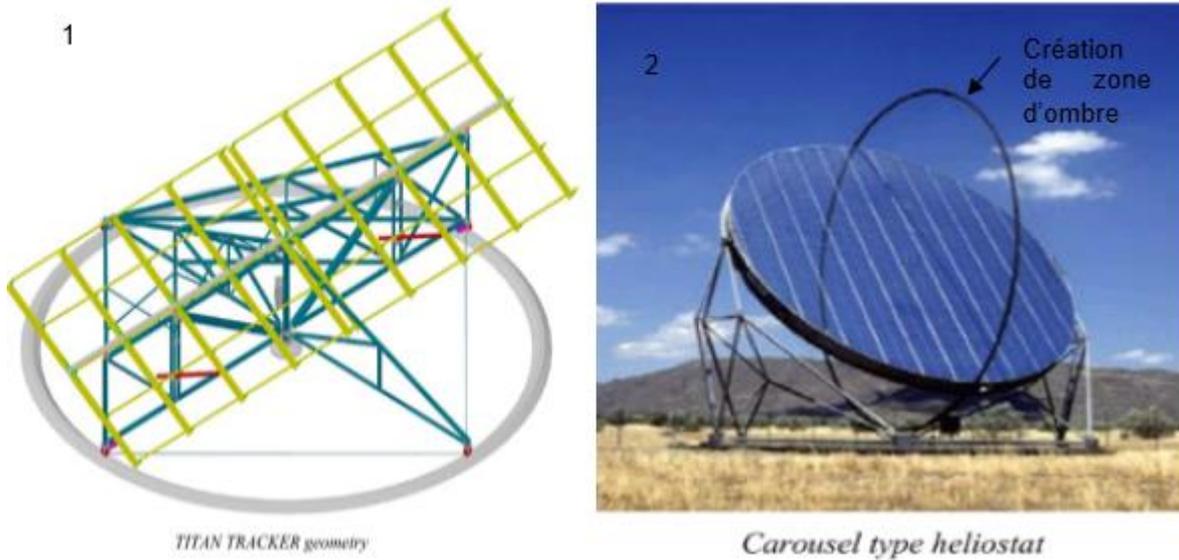


Figure 7 : Deux technologies de la famille Carousel

En 2009 une nouvelle famille d'héliostat va elle à l'encontre de la démarche « toujours plus grand », ainsi Esolar développe des petits héliostats (Figure 8) de 1,4 m² [10].



Figure 8 : Structure en treillis triangulaire Esolar

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. Tous les composants de l'héliostat sont conçus pour tirer parti des techniques de fabrication à haut volume éprouvées dans les industries comme la fabrication automobile. Cela permet à la fois une conception rentable ainsi qu'une production et un déploiement rapide du matériel. La structure en treillis triangulaire optimisée offre une plus grande rigidité avec moins d'acier consommée. Alors que la

tendance est aux héliostats de grandes dimensions, les petits héliostats de petite taille semblent présenter un meilleur potentiel technico-économique [10].

III) Héliostat CSP4Africa

1) Description de l'héliostat

Malgré les efforts des constructeurs pour réduire les coûts, le système de conduite constitue toujours la plus grande part du prix d'un héliostat (Figure 9), car chaque héliostat possède deux moteurs.

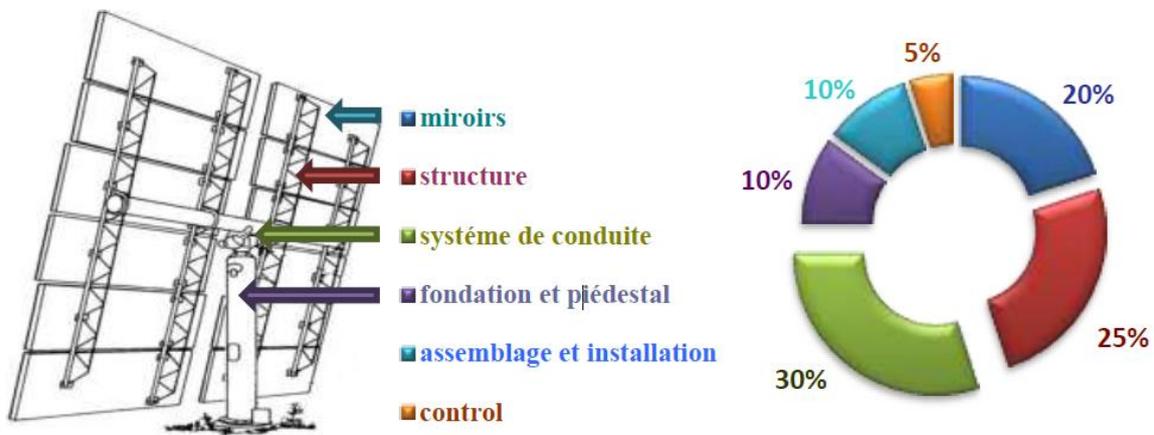


Figure 9 : Répartition des prix suivant les éléments de l'héliostat

Pour remédier au coût élevé du système de conduite, l'entraînement des héliostats avec un système moins coûteux semble être une voie de recherche prometteuse. Cet héliostat a pour objectif principal de démontrer la possibilité d'utiliser un système d'entraînement commun pour les réflecteurs.

L'héliostat CSP4Africa est un héliostat multi-facettes composé de neuf réflecteurs, une grille, un châssis et une motorisation (Figure 10).

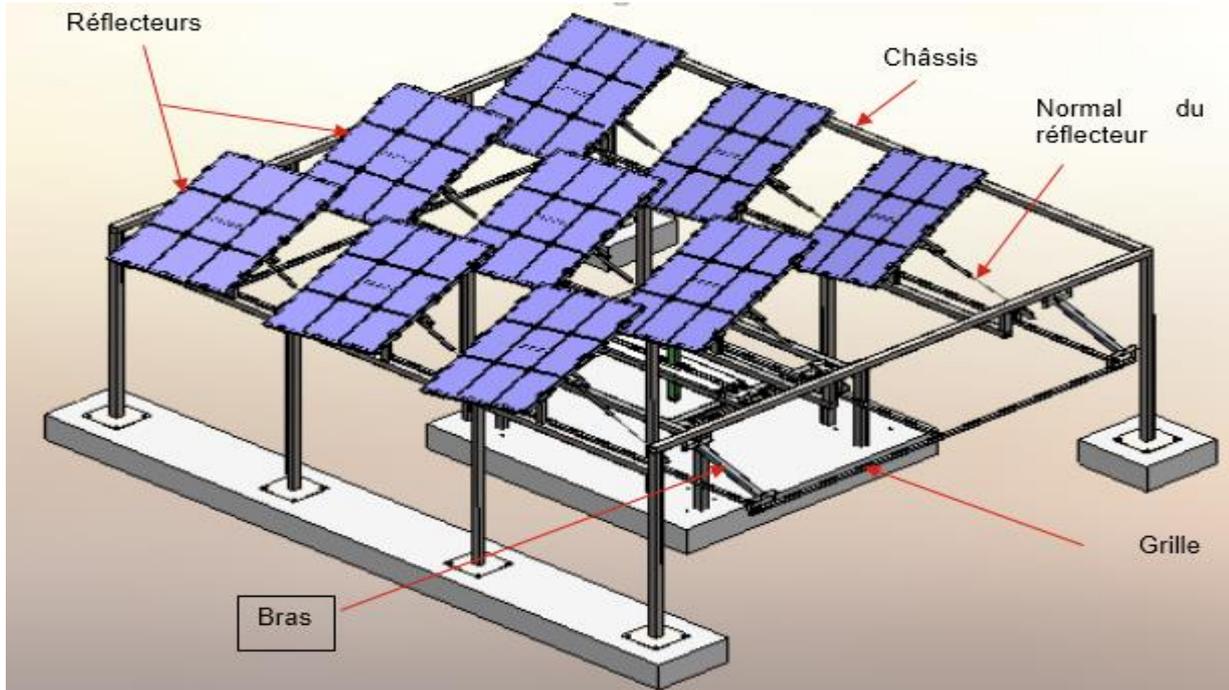


Figure 10 : Schéma de l'héliostat V1

a) Les réflecteurs

Le réflecteur (Figure 11) est composé d'un cadre de dimension 1m x 1m qui supporte neuf petits miroirs de dimension 33 cm X 33 cm X 3 mm, son entrainement est assuré par une normale parallèle aux rayons incidents lors du suivi. Le réflecteur permet de réfléchir les rayons du soleil sur le récepteur.

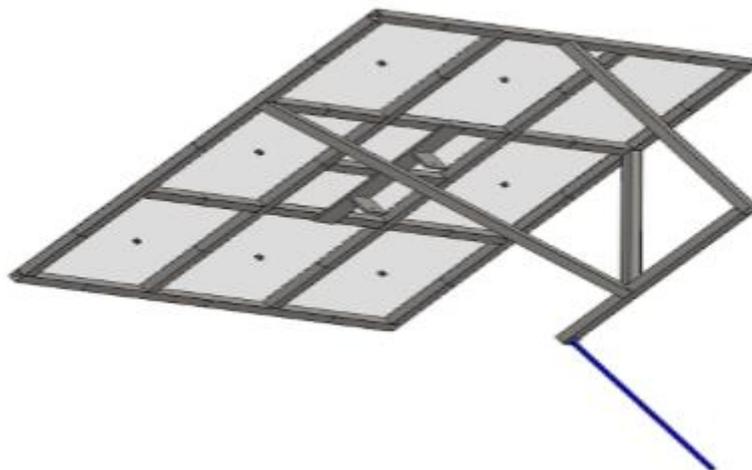


Figure 11 : Schéma d'un réflecteur

b) Le châssis

Le châssis (Figure 12) est la structure fixe et stable qui supporte la motorisation, les réflecteurs et la grille.

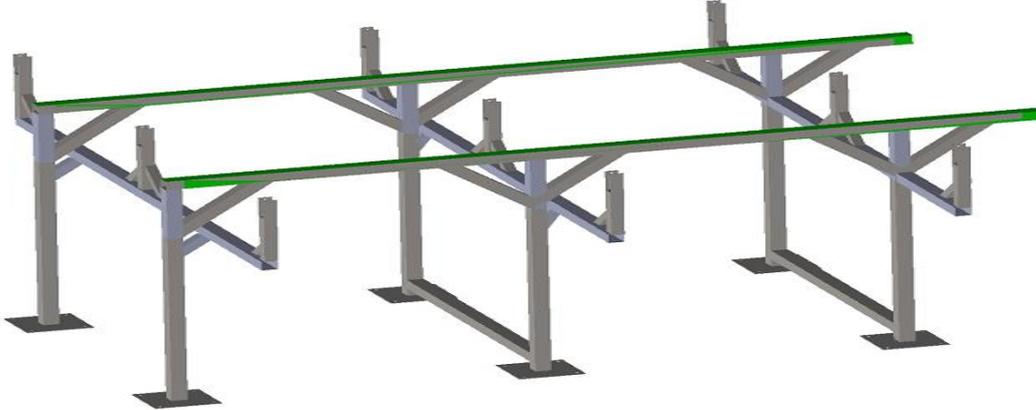


Figure 12 : Schéma du châssis

c) La grille

La grille (Figure 13) est une structure métallique conçue à partir de tube carrés de 30 mm. Elle a rôle l'entraînement simultanée des neuf réflecteurs, elle est maintenue par des bras qui sont fixés sur le châssis. La motorisation fait déplacer la grille, qui à son tour entraîne les réflecteurs par l'intermédiaire de tube rond perpendiculaire au miroir central, et passant par son centre. Ce tube rond est appelé la normale au réflecteur.

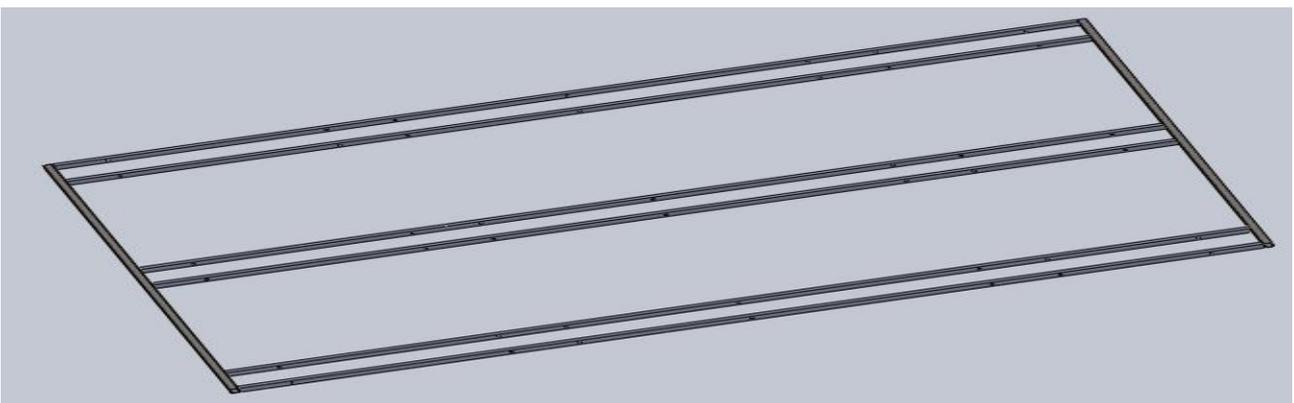


Figure 13 : Schéma de la grille

d) La motorisation

La motorisation est un système composé de deux moteurs pas à pas, de glissières suivant chaque axe, de tiges filetées, et d'un chariot. La motorisation permet de suivre le soleil suivant l'axe azimut et l'axe élévation.

Le moteur pas à pas constitue un convertisseur électromécanique destiné à transformer le signal électrique (impulsion ou train d'impulsions de pilotage) en déplacement (angulaire ou linéaire) mécanique. Nous avons opté pour des moteurs pas à pas par ce qu'ils permettent un positionnement précis sans asservissement. Le moteur tourne lentement grâce à un réducteur de vitesse, après cinq secondes de fonctionnement le moteur est arrêté afin d'éviter une surchauffe.

Pour faire fonctionner le moteur pas à pas, nous avons besoin d'une carte de commande (Figure 14). Elle permet de gérer les pas et micro pas de notre moteur. Notre choix s'est porté sur la carte phidgets 1063.

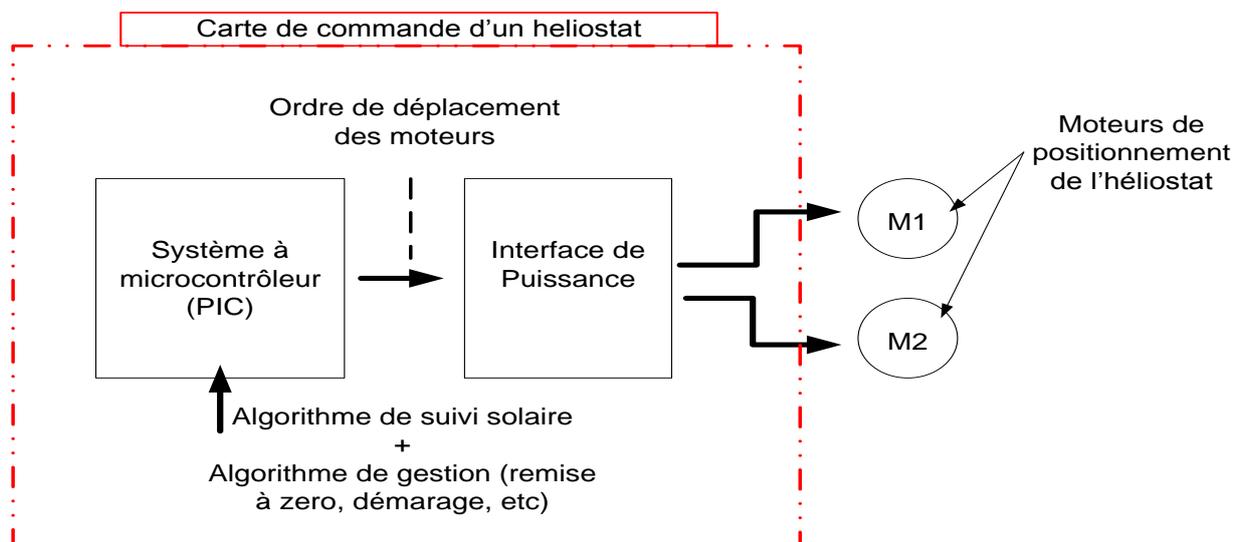


Figure 14 : Principe d'une carte de commande d'un héliostat

Un premier prototype V1 a été mise au point (Annexe 1 : Prototype V1), cependant il avait des erreurs mécaniques et électriques. Ce qui a conduit à la conception d'un deuxième prototype nommé V2 (Annexe 2 : Prototype V2). Ces prototypes ont été conçus par les ingénieurs du LESEE.

2) Comparaison entre le prototype V1 et le prototype V2

a) Réflecteur

Pour éviter l'encombrement lors du passage vers le Nord, la structure de la normale a été modifiée. Le cadre du réflecteur V2 fut renforcé pour une meilleure tenue aux contraintes mécaniques par rapport au V1 (Figure 15).

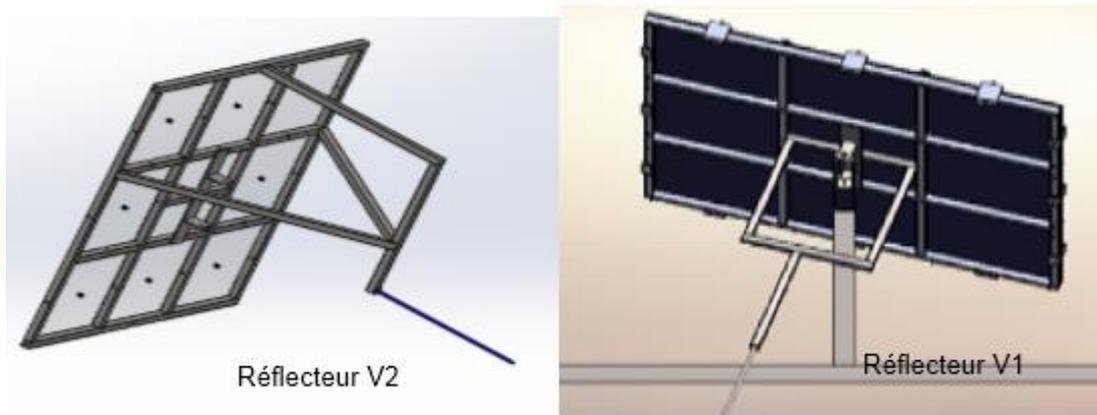


Figure 15 : Image illustrant la différence entre V1 et V2

b) Châssis

La forme du châssis ainsi que les dimensions ont été modifiées (Figure 16). Le prototype V1 a été conçu avec une structure métallique trop légère ne permettant pas d'assurer une grande stabilité du système. Le prototype V2 a été réalisé avec des composants plus robustes et une conception plus compacte permettant d'assurer son rôle.



Figure 16 : Image illustrant la différence entre le châssis V2 et le châssis V1

c) La grille

La taille de la grille a été diminuée et le nombre de points supportant cette grille fût augmenté, ainsi les effets de flexions furent réduits et la précision d'orientation des réflecteurs fut améliorée (Figure 17).

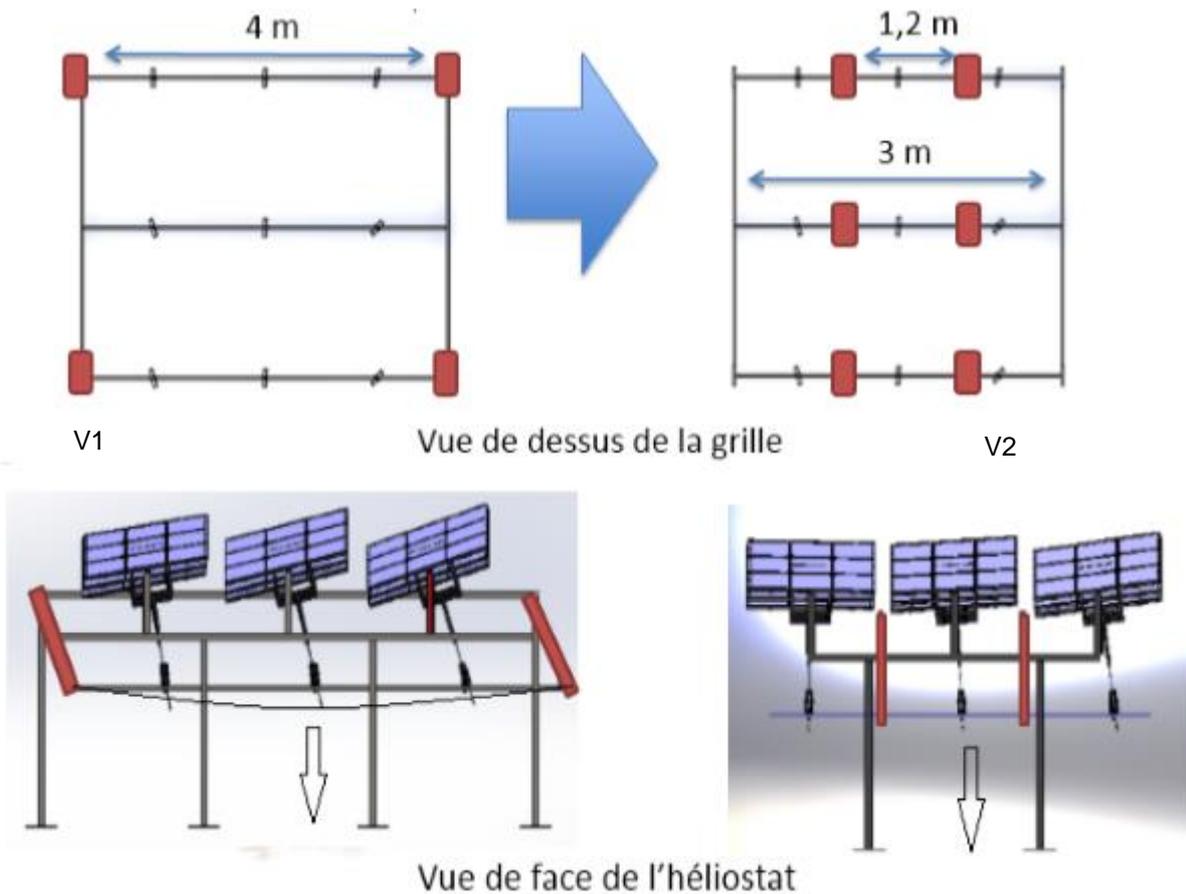


Figure 17 : Schéma illustrant la différence entre la grille V1 et V2

d) La motorisation

La longueur de guidage a été modifiée (Figure 18), elle passe de 20 cm à 30 cm afin de respecter les ratios (voir Annexe 6 : Etude motorisation de l'HELIOSTAT).



Figure 18 : Modification de la longueur de guidage

Il y avait des présences de blocages au niveau des glissières V1 suivant l'axe en trait interrompu.

Ces blocages sont dus à des défauts de parallélisme ainsi qu'au manque de coussinets. Sur la Figure 19, on remarque la présence de coussinets sur les glissières.

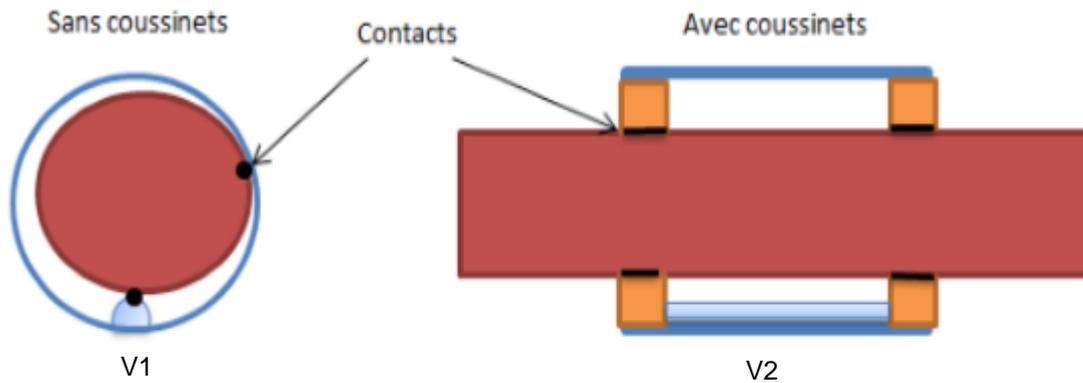


Figure 19 : Présence de coussinets sur les glissières de V2

Sur le prototype V2, ces défauts ont été minimisés en mettant des coussinets sur les coulisseaux. Ces coussinets augmentent la fluidité du mouvement. La distance entre les deux axes a été diminuée (Figure 20), elle est passée de 130 cm sur le V1 à 60 cm sur le V2 afin de respecter les ratios (voir Annexe 6 : Etude motorisation de l'HELIOSTAT).

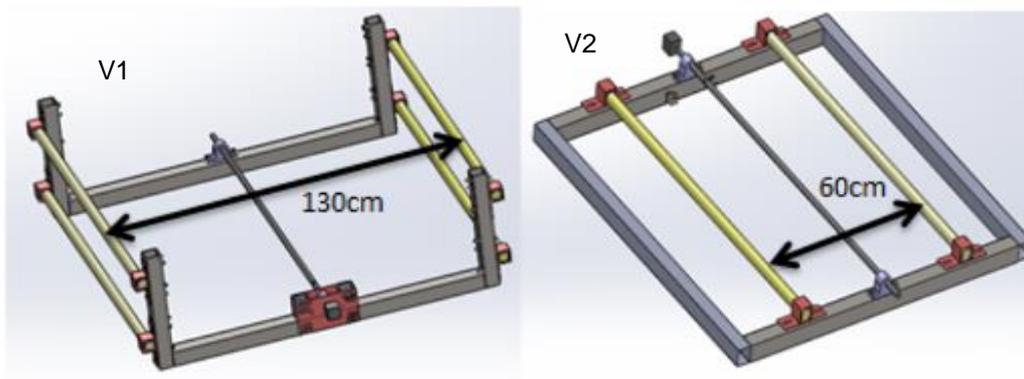


Figure 20 : Comparaison entre les glissières V1 et V2

IV) Mise en place du prototype

1) Objectif

Cette partie a pour but de montrer comment l'installation et le réglage de l'héliostat ont été effectués.

Les éléments utilisés pour les tests et diagnostic sont :

- Deux moteurs pas à pas
- Deux cartes Phidgets 1063
- Une batterie
- Deux rallonges USB de 3 m
- Un ruban et un mètre
- Un ordinateur
- Un laser BOSCH

2) Installation et réglages du prototype

L'héliostat a été déplacé du site K1 au site K2 sur la plateforme expérimentale CSP afin d'effectuer les tests.

L'héliostat doit être placé plein Sud. Nous n'avons pas utilisé de boussole car sa précision est de $\pm 5^\circ$. Pour atteindre cet objectif avec une bonne précision ($\pm 1^\circ$), la méthode suivante fût adoptée :

Placement des axes

Nous avons déterminé la position du soleil en utilisant un tube carré d'une longueur de 2 m. Nous avons cherché la position adéquate du tube carré de manière à minimiser l'ombre de celui-ci ; cette manipulation donne la direction du soleil. Une fois la position obtenue, nous avons tracé la projection du tube carré au sol. La projection de l'extrémité haute du tube carré au sol est réalisée à l'aide d'un fil à plomb (Figure 21).

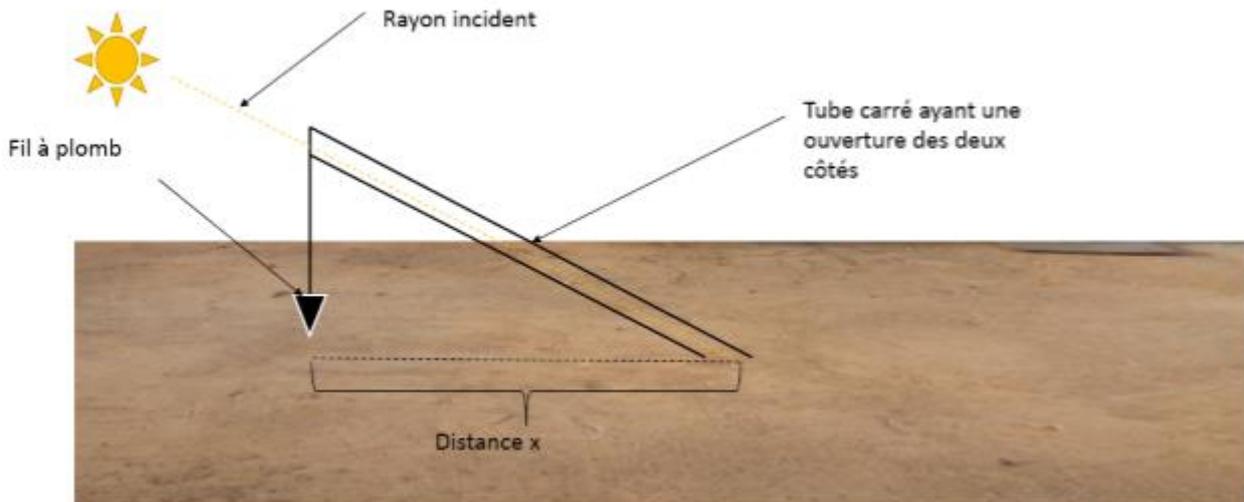


Figure 21 : Détermination de la position du soleil et tracé

Nous avons également noté l'heure et la date de la manipulation. Ces données ont été insérées dans la fonction « Algorithme Solaire » qui nous donne l'azimut correspondant à notre tracé. Ce qui permet ensuite de déterminer la position Est-Ouest. Une fois l'azimut obtenu (Figure 22), nous avons effectué le calcul suivant :

$$\tan \alpha = \frac{X}{Y} \rightarrow Y = \frac{X}{\tan \alpha}$$

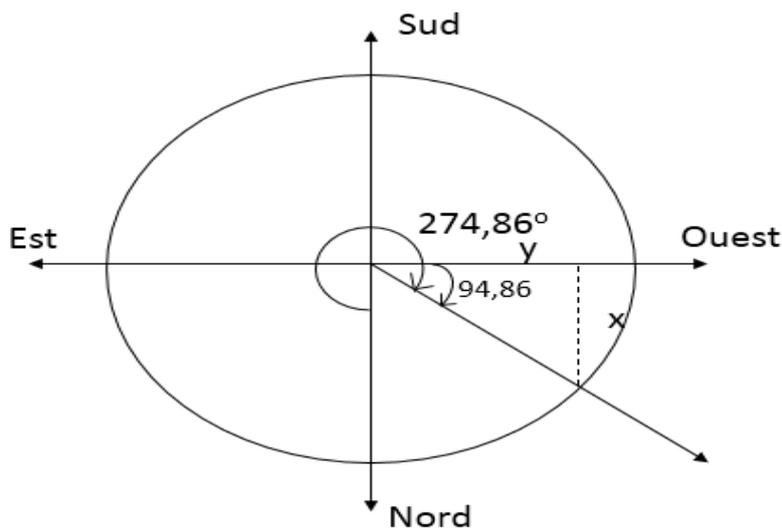


Figure 22 : Illustration de la détermination de la position Est-Ouest

Une fois l'héliostat orienté plein sud, nous ajustons sa position par rapport à l'axe nord-sud passant par le centre de la cible. Les distances par rapport à la cible doivent aussi respecter le ratio (Figure 23) imposé par la conception du système (Annexe 6 : Etude motorisation de l'HELIOSTAT).

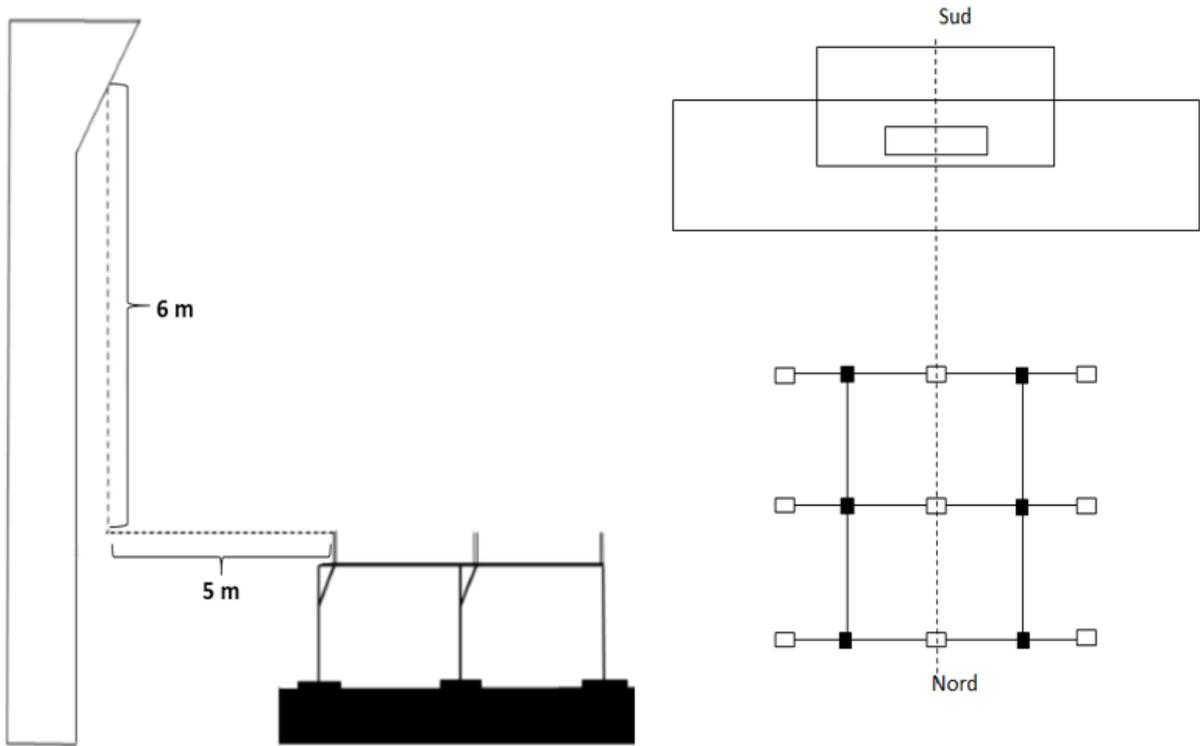


Figure 23 : Illustration du placement de l'héliostat par rapport à la cible

L'étape suivante passe par la mise à niveau de la structure. Cela consiste à rendre horizontal les supports du châssis. Cette manipulation est importante car la structure du châssis (partie fixe) a un impact direct sur la précision générale du système. Les points indiqués sur la figure doivent être alignés sur le plan horizontal projeté par le laser pour effectuer les ajustements avec une précision millimétrique (Figure 24).



Figure 24 : Ajustement de l'héliostat suivant l'axe horizontal

Le matériel utilisé pour vérifier l'horizontalité du socle est le laser Bosch, cet appareil permet d'obtenir un plan horizontal avec une précision de ± 1 mm.

Une fois l'héliostat installé, les miroirs centraux de chaque réflecteur sont mis en place et réglés pour focaliser les rayons en un point au centre de la cible (voir Figure 25).

Le réglage des miroirs centraux se fait à 12 h, cette heure est optimale pour diminuer les pertes par concentration (effets cosinus, ombrage, étalement de la focale...) et obtenir la meilleure précision durant la journée.



Figure 25 : Présentation de la tâche focale après l'orientation des miroirs

3) Protocole de démarrage du système de suivi

- On effectue premièrement la mise au niveau zéro de l'héliostat

La mise à niveau correspond au positionnement de l'héliostat avant la mise en marche des moteurs. Le premier code mis au point pour l'expérimentation nécessite que les bras soient placés en position verticale, et pour ce faire, on tourne les tiges filetées manuellement jusqu'à avoir la position des bras verticale. La verticalité peut être vérifiée à l'aide d'un fil à plomb ou d'un poids attaché au bout d'un fil (Figure 26).



Figure 26 : Image illustrant la détermination de la verticalité des bras

- Deuxièmement, les moteurs sont connectés aux tiges filetées (Annexe 8 : Démarrage du système de suivi).
- Troisièmement, la carte Phidgets est connecté au moteur, à la batterie et à l'ordinateur contenant le programme (Annexe 8 : Démarrage du système de suivi).
- Quatrièmement, le programme est exécuté (Annexe 8 : Démarrage du système de suivi).

La Figure 27 illustre la connexion des éléments de système de suivi.

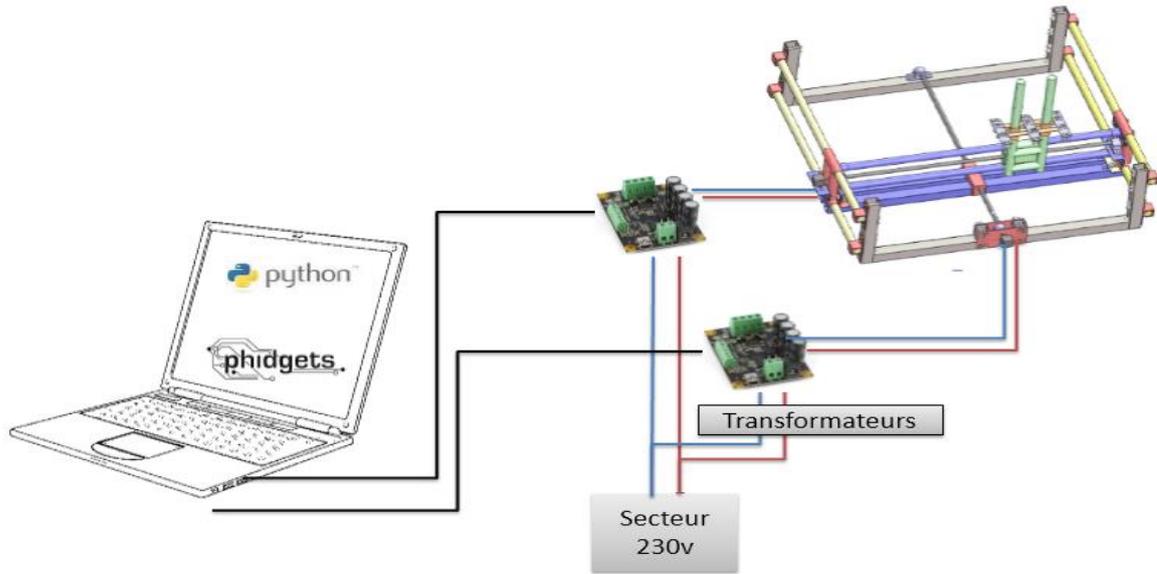


Figure 27 Schéma illustrant l'automatisation du système de suivi

V) Diagnostic mécanique et électronique du prototype

1) Objectif

Le diagnostic consiste à analyser le prototype. Cette analyse doit permettre de valider certains aspects et trouver les erreurs mécaniques ou électroniques du système.

2) Méthode

Deux méthodes ont été utilisées pour le diagnostic :

- Les tests qui consistent à la mise en marche de la motorisation.
- Les mesures au laser qui ont permis de déterminer le parallélisme, l'orthogonalité et l'alignement des axes Est-Ouest et Nord-Sud (Figure 28).

3) Tests et diagnostic

Après l'installation du prototype, nous avons effectué des tests de fonctionnement dans le but d'apprécier le fonctionnement du système. Au total, 8 jours de tests ont été menés.

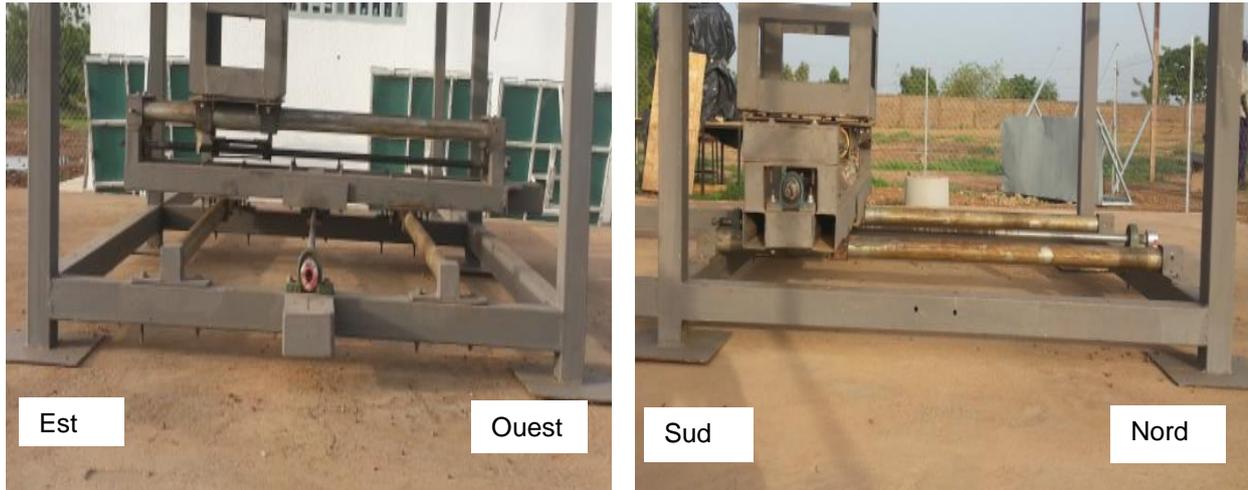


Figure 28 : Image montrant l'axe Est-Ouest et l'axe Nord-Sud

a) Premier jour d'expérimentation

Ces expérimentations consistent à effectuer des tests de focalisation avec 9 réflecteurs, chacun d'eux est muni d'un miroir placé au centre. Les huit autres miroirs de chaque réflecteur n'étaient pas nécessaires car les miroirs centraux servent de références pour l'orientation des autres.

Test : Le prototype a été mis en marche de 10 h à 13 h, le 08 mai 2014 (Figure 29). Nous avons arrêté le test à 13 h pour cause de pluie.

Diagnostic : La focale a bougé d'environ 5 cm vers le haut après 2 h de fonctionnement. En passant d'une direction une autre suivant l'axe Est-Ouest, nous avons observé que la tige filetée tournait mais que le chariot attaché à la grille (voir Figure 48) ne se déplacé pas.

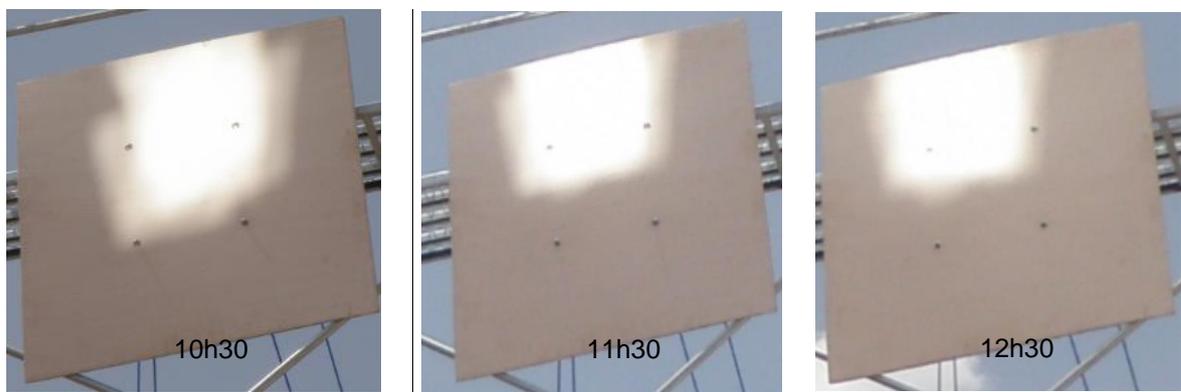


Figure 29 : Première journée de test

Analyse : Nous avons émis trois hypothèses comme suit : le déplacement de la tâche focale est dû à des erreurs mécaniques, soit à une erreur de programmation, soit à un mauvais placement de l'héliostat. Les tours à vide sont dus à la présence de jeu dans le chariot qui relie la tige filetée et les glissières entraînant un mauvais positionnement de la tâche focale (Figure 30).

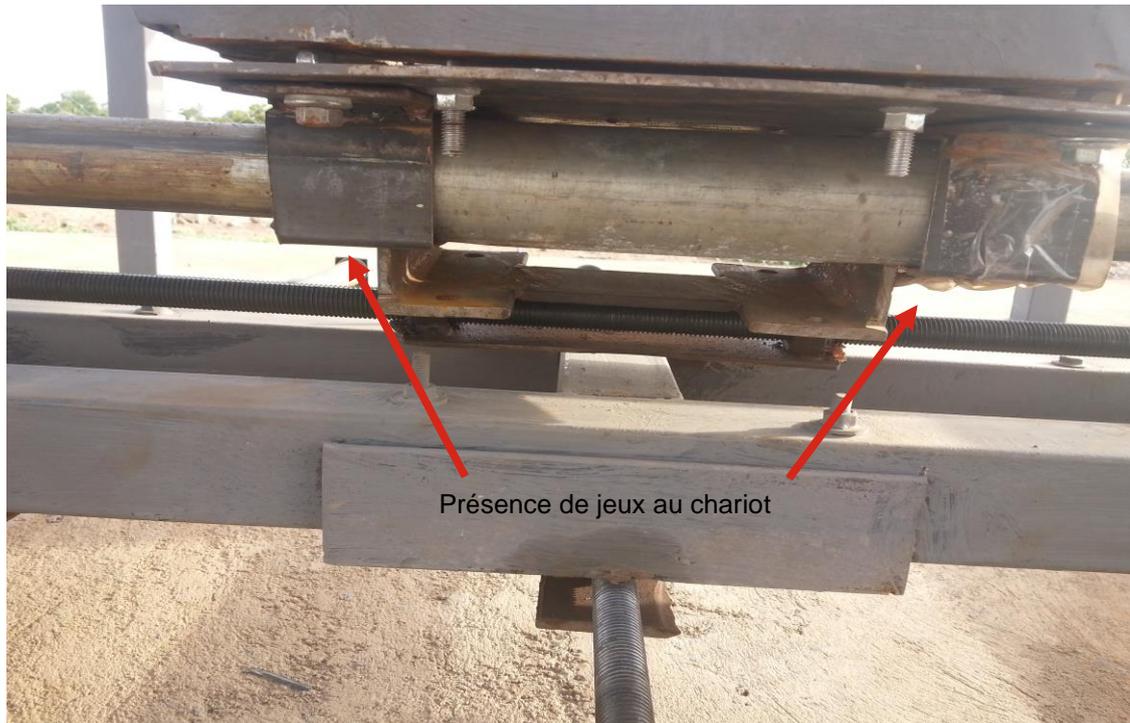


Figure 30 : Chariot assurant le déplacement Est-Ouest

Conclusion : Ce test s'est avéré encourageant car la tâche focale n'est pas sortie de la zone de la cible durant le test...

b) Deuxième jour d'expérimentation

Test : Au deuxième jour de test, le prototype a été mis en marche plus tôt, le test a été effectué de 9 h à 16 h, le 09 mai 2014 (Figure 31).

Diagnostic : Nous avons observé que la tâche focale ne restait toujours pas fixe. Après 4 h 30 min de fonctionnement, la tâche s'était déplacée de près de 30 cm vers la gauche. Nous avons aussi observé des blocages suivant l'axe Est-Ouest le matin à 8 h 37 min, lorsque l'héliostat était en train de prendre la direction du soleil pour commencer le suivi. Ensuite, des blocages ont été observés sur l'axe Nord-Sud à partir de 15 h, le moteur n'arrivait plus à entraîner la tige filetée.

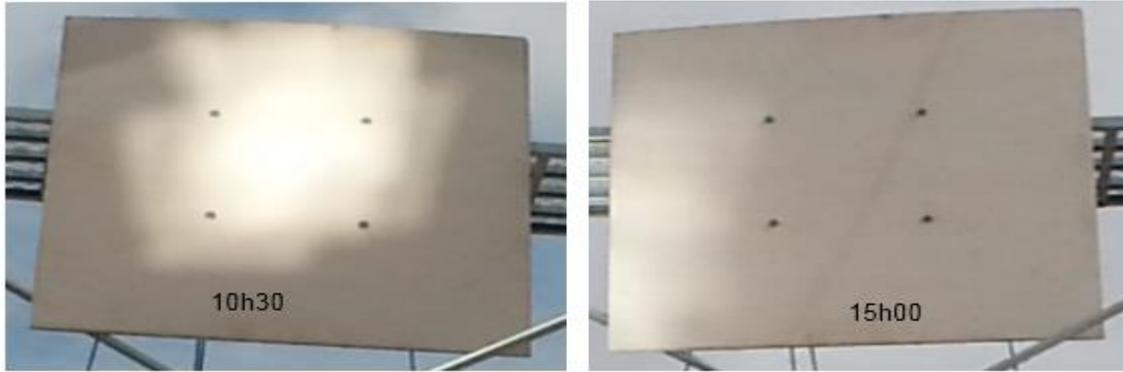


Figure 31 : Deuxième journée de test

Durant cette journée de test, nous avons d'abord obtenu une grande tâche focale, la superposition des rayons incidents n'était pas parfaite. Aussi, la tâche focale s'est dirigée peu à peu vers la gauche du récepteur jusqu'à sortir du cadre de la cible.

Analyse : Afin de comprendre les blocages observés sur l'axe Est-Ouest, nous avons retiré la motorisation Est-Ouest. Le chariot se déplace sans difficulté lorsque nous l'utilisons indépendamment de l'héliostat. Nous pouvons donc affirmer que la motorisation est soumise à plusieurs forces suivant la direction horizontale et verticale dues à l'effet du poids de la grille sur le chariot (Figure 32).

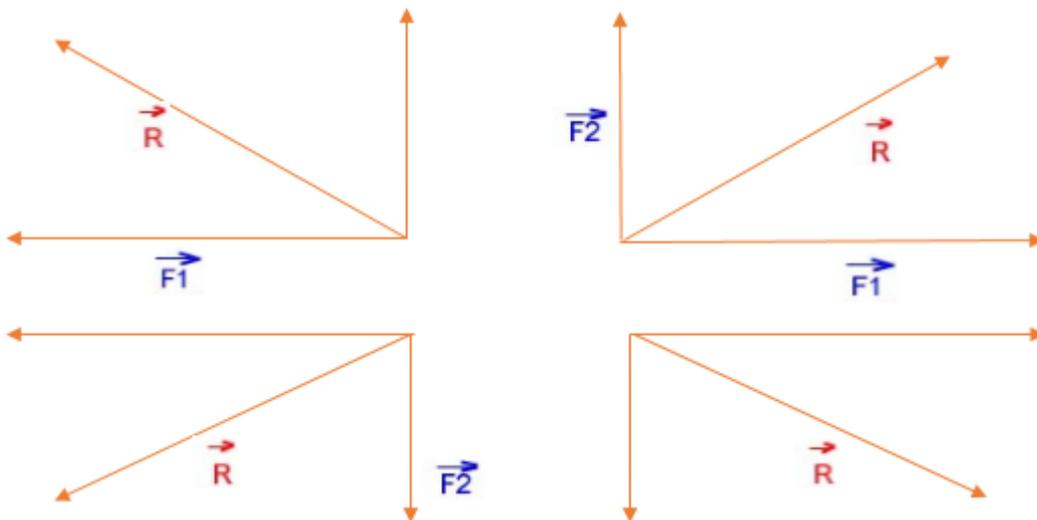


Figure 32 : Illustration des forces appliquées sur la motorisation

Conclusion : Nous avons réduit notre plage de fonctionnement 9 h à 15 h afin d'effectuer les tests sans blocages.

c) Troisième jour d'expérimentation

Test : le prototype a été mis en marche de 8 h 30 min à 12 h 45 min, le 12 mai 2014 (Figure 33). Nous avons dû arrêter par ce que l'ordinateur n'avait plus d'énergie.

Diagnostic : Durant cette journée de test, nous avons encore observé des blocages suivant l'axe Est-Ouest le matin à 8 h 45 min durant l'initialisation. Ensuite, le suivi du soleil s'est fait sans blocage. Cependant la tâche focale n'était pas centrée, elle était située sur le côté haut-gauche.

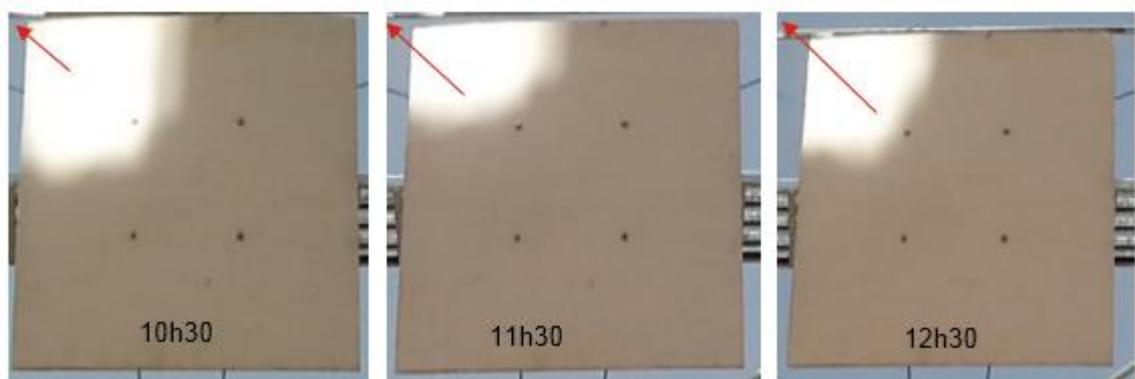


Figure 33 : Troisième journée de test

A travers ces photos prise à une heure d'intervalle, nous observons que la tâche focale n'était pas fixe, elle se déplaçait suivant le sens de la flèche (Figure 33) de 10 cm.

Analyse : Les blocages étaient dus à des contraintes mécaniques élevées, l'erreur au niveau de la tâche focale était due à des erreurs de l'héliostat ou à des erreurs de programmation.

Conclusion : La tâche focale ne restait toujours pas fixe sur le récepteur, le code du programme fût modifié. Ce nouveau code continue le suivi du soleil après avoir placé les réflecteurs suivant la direction du soleil. Pour effectuer cette manipulation, nous alignons les bras de la grille avec le soleil. Cet alignement est obtenu lorsque l'ombre des bras est minimale.

d) Quatrième jour d'expérimentation

Test : L'héliostat a été orienté manuellement, ensuite le programme a pris le relais. Le test s'est déroulé de 9 h 55 min à 15 h 30 min, le 13 mai 2014 (Figure 34).

Diagnostic : La tâche focale ne restait toujours pas fixe. Lorsque les bras de la grille étaient alignés avec le soleil, nous observons que les rayons réfléchis des miroirs se superposent en une seule tâche focale au centre du récepteur.

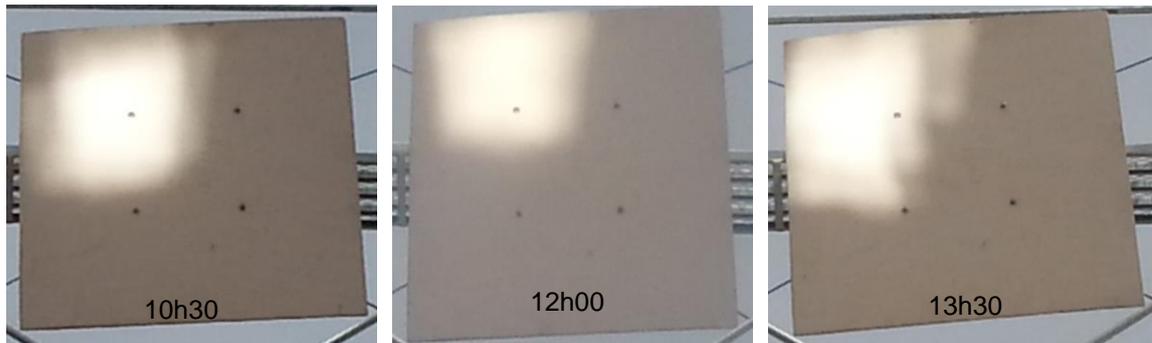


Figure 34 : Quatrième journée de test

Durant cet essai la tâche focale ne restait pas fixe, elle se déplaçait vers la gauche. La grille s'élevait et descendait de manière saccadée (Figure 35).



Figure 35 : Schéma illustrant les mouvements haut et bas de la grille

Analyse : Avec le nouveau code la tâche focale n'est toujours pas fixe sur la cible et le chariot élévateur se déplaçait en saccade.

Conclusion : Le suivi se fait sans blocage, cependant le fonctionnement n'est pas satisfaisant car la tâche focale ne reste pas fixe. Un nouveau code a été mis au point pour les prochains tests. Nous avons graissé les tiges filetées, les glissières ainsi que le chariot élévateur afin d'obtenir une meilleure fluidité.

e) Cinquième jour d'expérimentation

Test : Nous avons effectués la manipulation précédente test avec un nouveau code écrit par l'ingénieur Emmanuel Clerc et les glissières graissées. Le test a été effectué de 9 h 45 min à 14 h 15 min, le 15 mai 2014 (Figure 37).

Diagnostic : Nous avons constaté que le temps entre le lancement du programme et la mise en marche des moteurs était relativement élevé, près de 3 minutes. Pendant cet intervalle de temps la tâche s'était déplacée de plus d'une dizaine de centimètres. La tâche focale n'était pas à une position fixe. La grille butait sur le châssis lorsque la motorisation arrivait en position extrême suivant l'axe Est-Ouest (Figure 36).

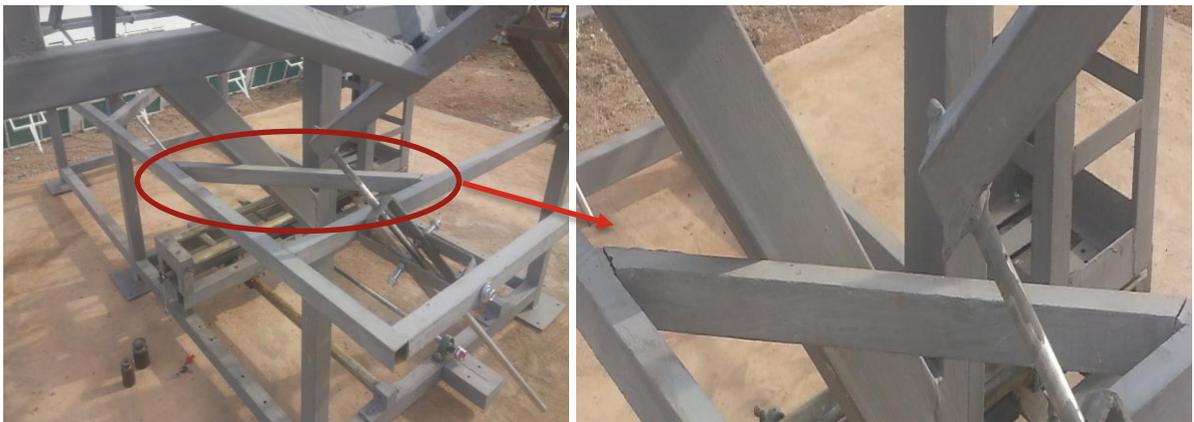


Figure 36 : Blocage de la grille contre le châssis

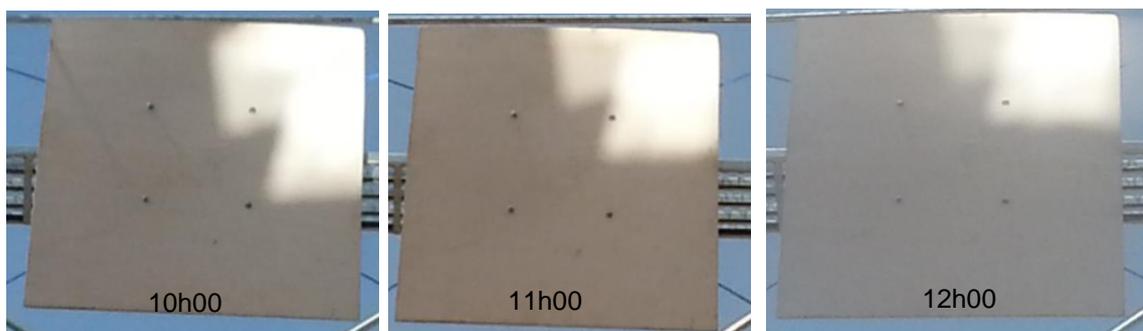


Figure 37 : Cinquième journée de test

Analyse : La grille se butait contre le châssis. Pour résoudre ce problème, nous avons scié les raccords qui empêchaient le suivi jusqu'aux extrêmes.

Conclusion : Le problème de blocage de la grille sur le châssis est dorénavant résolu. Le programme n'était pas adapté au suivi car la tâche focale se déplaçait vite. L'attente après le lancement du programme était longue. Nous avons encore modifié le code du programme pour les tests ultérieurs.

f) Sixième jour d'expérimentation

Test : Au sixième jour de test, nous avons effectué le test avec le nouveau programme. Le test a été effectué de 8 h 30 min à 9 h 30 min, le 16 mai 2014 (Figure 38).



Figure 38 : Sixième journée de test

Diagnostic : la tâche focale se déplaçait encore plus vite.

Analyse : Ce déplacement rapide de la tâche focale était dû à une erreur dans le code de programmation. Afin d'ajuster ce code, nous avons effectué le suivi du soleil manuellement en tournant la tige filetée avec un intervalle de temps 3 minutes. Cette manipulation a duré quatre heures. Ensuite nous avons comparé les résultats au programme pour savoir si le déplacement manuel correspondait aux ordres du programme.

Conclusion : Les résultats du test ne nous permettaient pas d'apprécier le fonctionnement du système car le code n'était pas adapté.

g) Septième jour d'expérimentation

Dans la continuité du diagnostic, nous avons enlevé la grille et relié le réflecteur central avec la motorisation (Figure 39). Cette manipulation avait pour objectif de supprimer les contraintes mécaniques dues au déplacement de la grille. Le test avec le réflecteur central devait permettre de savoir si ces résultats sont dus à une erreur mécanique ou une erreur de programmation.



Figure 39 : Test avec le réflecteur central

La présence de jeu entre la normale du réflecteur et l'articulation a permis d'effectuer le suivi sur un seul plan horizontal.

Test : Nous avons effectué le test de 13 h 45 min à 15 h 30 min, le 22 mai 2014 (Figure 40).

Diagnostic : La tâche focale ne restait toujours pas fixe. Après 1 h 45 min de fonctionnement, la tâche avait dévié de près de 40 cm vers la droite et légèrement vers le haut.

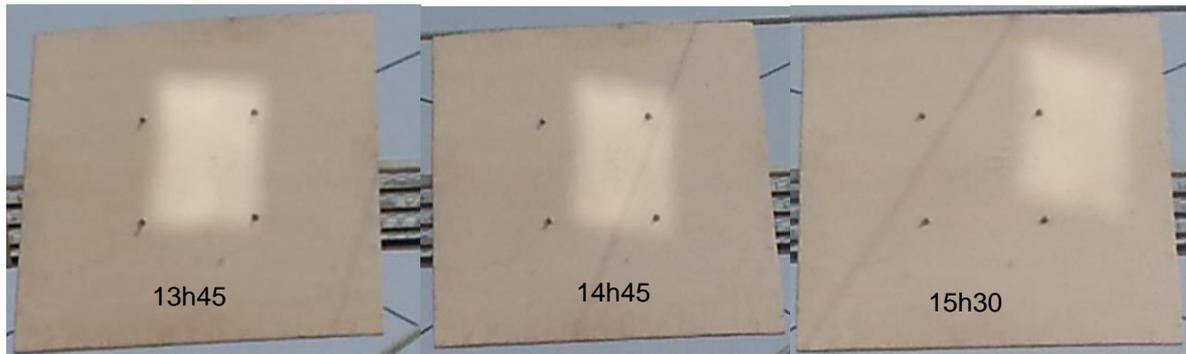


Figure 40 : Septième journée de test

Analyse : Suite à ce résultat, nous avons vérifié les distances entre l'héliostat et le récepteur. La hauteur du récepteur correspondait bien à celle insérée dans le code. Nous avons aussi retiré le réflecteur pour vérifier si la normale du réflecteur est orthogonale au miroir central. Le défaut de cette partie entraîne directement des erreurs de précision lors du suivi car le principe optique s'applique plus. Le matériel utilisé pour faire la manipulation est le laser BOSH et le niveau. La normale du réflecteur a été placée horizontalement avec le niveau. Le rayon horizontal a été projeté sur le réflecteur central à l'aide du laser (Figure 41), puis le miroir fut ajusté de manière à ce que le rayon incident et rayon réfléchi se superpose. Cette manipulation a été effectuée dans les deux plans (horizontal et vertical)



Figure 41 : Ajustement du miroir central par rapport à la normal au réflecteur

Conclusion : La normale du réflecteur n'était pas perpendiculaire au miroir central, ce qui a donc pu engendrer des erreurs lors du suivi.

h) Huitième journée de test

Test : Le réflecteur central ajusté a été remplacé, nous avons effectué le test de 8 h 50 min à 12 h 06 min, le 23 mai 2014 (Figure 42). Le code avait été légèrement modifié pour que le positionnement soit moins rapide. Dans le précédent test, la tâche focale se déplaçait trop vite

Diagnostic : La tâche ne reste toujours pas en position fixe. Le temps entre le lancement du programme et la mise en marche des moteurs était d'environ 3 minutes.

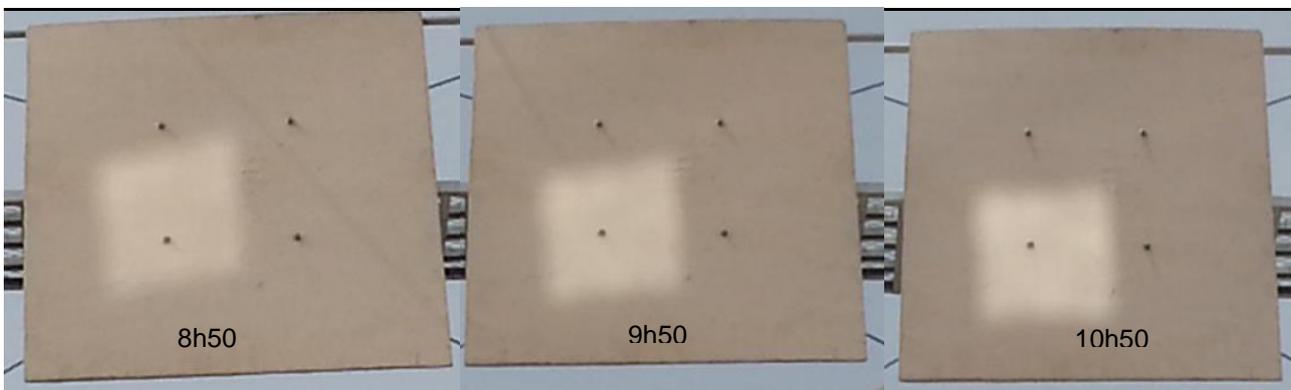


Figure 42 : Huitième journée de test

Analyse : Le suivi suivant l'axe Est-Ouest était excellent, la tâche n'a pas déplacé sur cet axe. Cependant le code suivant l'axe Nord-Sud doit être revu, le moteur Nord-Sud ne tourne pas assez vite, ce qui explique que la tâche a tendance à descendre.

Conclusion : Le programme doit être amélioré, mais les résultats sont satisfaisants car l'axe Est Ouest a donné un bon résultat sur la plage 8 h 50 min à 11 h. Il y a une erreur de 20 cm sur l'axe Nord-Sud à corriger.

VI) Conclusion

Durant ce stage, nous avons étudié les prototypes d'héliostat V1 et V2 afin de comprendre leur principe de fonctionnement. Des optimisations ont été effectuées de V1 à V2 ; le châssis, la grille, les réflecteurs et la motorisation ont été améliorés. Afin de mettre en évidence ces améliorations, nous avons effectué une étude comparative des deux prototypes. Ensuite nous avons mis en place des

méthodes d'installation et de réglages du prototype d'héliostat V2. Premièrement, l'héliostat a été placé suivant l'axe Est-Ouest sur la plateforme CSP4Africa. Deuxièmement, le prototype fut placé à la distance nécessaire pour le respect du ratio afin de minimiser l'effet cosinus (Figure 46). Troisièmement, celui-ci fût mis à niveau par rapport au plan horizontal. Quatrièmement, les miroirs furent orientés afin que les rayons réfléchis se superposent en une seule tâche focale au centre de la cible. Une fois le placement et les réglages terminés, nous avons commencé les tests de visée. Ces tests nous ont permis de déterminer les erreurs mécaniques et électroniques. Pour y remédier, nous avons mis en place des solutions. Au terme de notre stage, nous avons obtenu les résultats suivant :

- Le prototype fonctionne sans blocage sur la plage de 9 h à 15 h.
- Lorsque les bras sont alignés avec le soleil, les rayons réfléchis se superposent en une seule tâche focale.
- Le suivi suivant l'axe Est-Ouest est validé.

Les tests effectués nous ont permis de comprendre l'importance de la précision dans la conception d'un héliostat car une petite erreur mécanique ou électrique a pour conséquence un résultat inexploitable.

VII) Perspectives

Ces résultats peuvent être améliorés pour obtenir un fonctionnement optimal.

- Les tiges filetées et les glissières doivent être protégées du vent et de la poussière afin d'éviter des blocages durant le suivi du soleil.
- Le couple moteur nécessaire pour entraîner les réflecteurs doit être déterminé à différents niveaux des axes de la motorisation afin de choisir le moteur adéquat pour l'entraînement des tiges filetées si besoin.
- Les miroirs centraux doivent être ajustés par rapport à la normale (Figure 41). Cette manipulation est indispensable pour que la tâche focale reste fixe sur le récepteur.
- Les glissières et les tiges filetées doivent être rallongées pour que le suivi puisse se faire de 7 h à 17 h.

VIII) Références bibliographiques

- [1] B. GRANGE, Modélisation et dimensionnement d'un récepteur solaire à air pressurisé pour le projet PEGASE.
- [2] [En ligne]. Available: <http://www.promes.cnrs.fr/pegase/informations.html>.
- [3] J. G.-A. Manuel Romero, «Solar thermal CSP technology».
- [4] S. A. J. M. W. D. D. G. Gregory J.Kolb, «Heliostat Cost Reduction Study,» Sandia National Laboratories, juin 2007.
- [5] A. K. K. M. Omar Behar, «A review of studies on central receiver solar thermal power plants,» 31 janvier 2013.
- [6] J. ZMUDA, «Montage et expérimentation d'un système de tracking en chaîne des héliostats pour une centrale à tour de petite puissance».
- [7] T. R.Mancini, «SolarPACES. Catalog of Solar Heliostats,» juin 2000.
- [8] dspace.univ-tlemcen.dz, «La position de l'héliostat».
- [9] [En ligne]. Available: <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2007/073293.pdf>.
- [10] [En ligne]. Available: <http://www.esolar.com/products/heliostats/>.

IX) Annexes

1) Annexe 1 : Prototype V1



Figure 43 : Prototype V1

2) Annexe 2 : Prototype V2



Figure 44 : Prototype V2

3) Annexe 3 : motorisation V2



Figure 45 : Motorisation V2

4) Annexe 4 : Effet cosinus

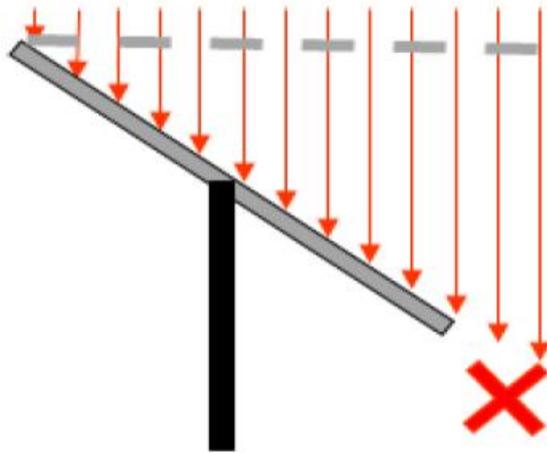


Figure 46 Illustration de l'effet cosinus

Les pertes par effet cosinus sont dues au fait que la surface des miroirs ne capte pas tout le rayonnement incident. Le soleil ne voit pas la surface totale du miroir mais une projection de celle-ci plus petite, appelée surface efficace. Plus l'angle d'inclinaison de la normale au miroir par rapport au soleil est grand, plus ces pertes sont élevées.

5) Annexe 5 : Test de la motorisation V2

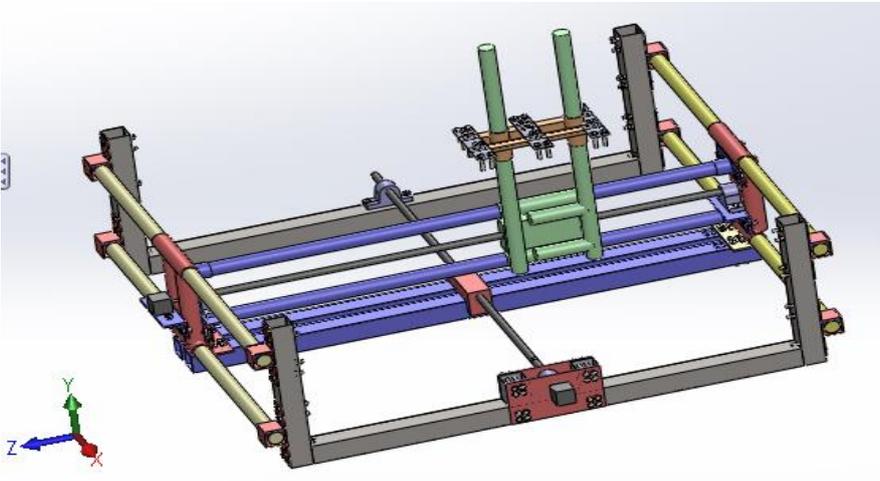


Figure 47 : Test à vide de la motorisation V2

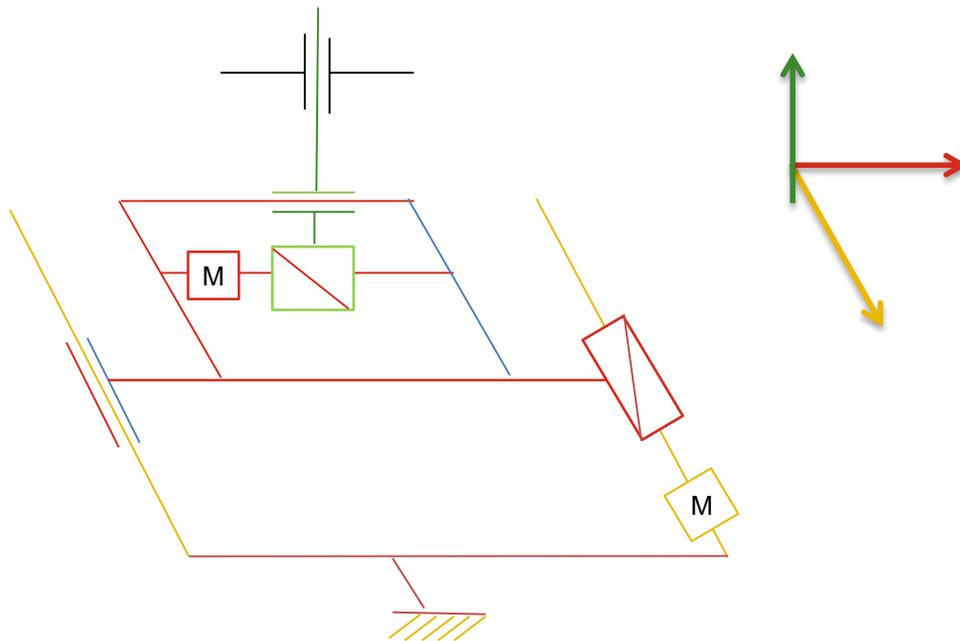
6) Annexe 6 : Etude motorisation de l'HELIOSTAT

1 Présentation du système global

3.1 SolidWorks



3.2 Schéma isométrique



2 Analyse du guidage en translation suivant (O, X)

2.1 Principe fondamental de la statique

D'après le principe fondamental de la statique :

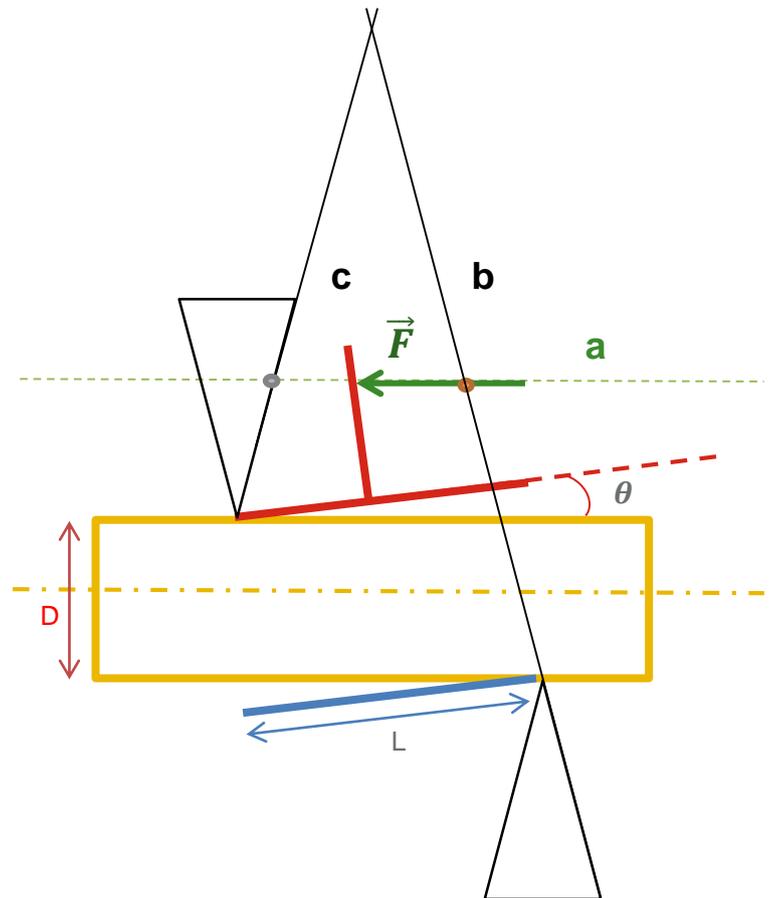
$$Si \sum \vec{F} = 0$$

Les droites a , b , c se croisent en un point

Alors le système est en équilibre

Donc il n'y a pas de mouvement.

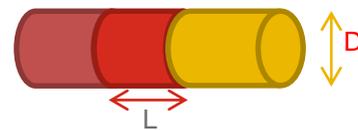
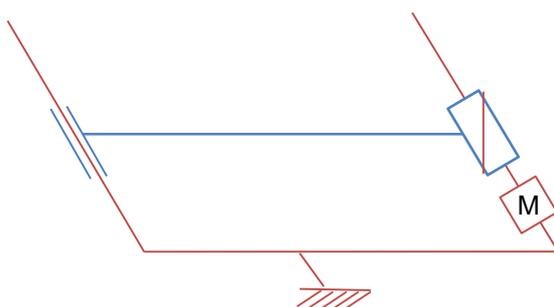
$$f = \tan \theta$$



Facteurs mis en jeu dans l'arc-boutement :

- L : longueur de guidage
- D : épaisseur de la surface de guidage
- A : distance entre l'axe d'application de la force et l'axe de guidage
- θ : coefficient de frottement (lubrification, autre matériaux, compenser le jeu)
- Ajustement adapté au parallélisme entre l'axe de la glissière et la direction de la force appliquée au système (méthode de construction)

2.2 Longueur de la glissière



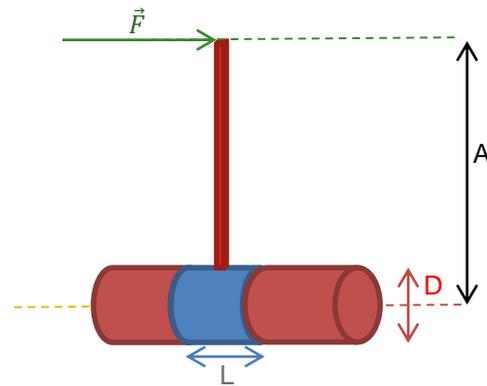
La longueur L doit être suffisante :

$L \geq 2,5D$ respecté ?

$L=250$ et $2,5D=250$

L est trop petit puisqu'il atteint la limite admissible

2.3 Point d'application



\vec{F} : Force appliqué au système

A : distance entre l'axe d'application de la force et l'axe de déplacement de la liaison

θ : coefficient de frottement (acier/acier : 0,3max)

L'effort exercé sur la liaison doit être près de l'axe :

$A < L / 2f$ respecté?

$L=250$; $f=0,3$; $L / 2f = 400$; $A = 740$

$A > 400$ donc l'effort appliqué est trop éloigné de l'axe de la glissière.

2.4 Solutions

Allonger la longueur de guidage avec un guidage long (L)

Réduire la distance entre l'axe de la force appliqué et l'axe de translation (A)

Diminuer les frottements :

-Réduire les points de contacts entre les surfaces

-Mettre en place des matériaux à faible coefficient de frottement (bronze, laiton)

-diminuer le jeu entre l'axe de guidage et la glissière

Ajuster le parallélisme entre l'axe de translation et la direction de l'effort (CDC, gabarits)

3 Analyse du guidage en translation suivant (O, Z)

3.1 Principe fondamental de la statique

On a :

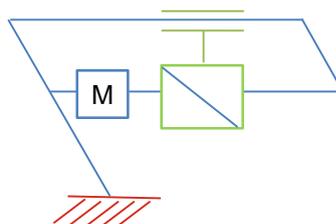
$L=250$

$D= 50$

$A=74$

Donc $L=2,5D$

Et $L/2f=400$



Alors $A \ll 400$

3.2 Solution

Agrandir la longueur de guidage L

4 Analyse du guidage en translation suivant (O, Y)

S'applique aussi suivant l'axe (o,x)

D'après le PFS on a $\sum \vec{F} = 0$

$$\vec{P} = 500\text{N}$$

$$\vec{R} = 600\text{N}$$

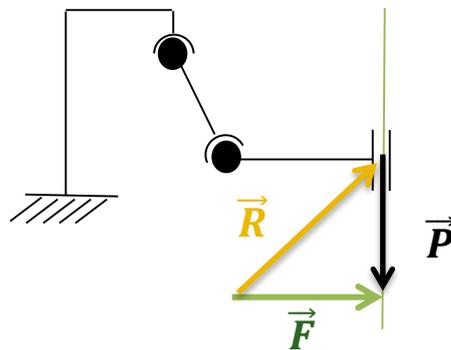
Force minimum de déplacement

est de

Valeur de \vec{F} réelle :

$$\vec{F} = 4000\text{N}$$

Donc la force est suffisante



7) Annexe7 : Les glissières suivant l'axe Est-Ouest



Figure 48 : Illustration des glissières

8) Annexe 8 : Démarrage du système de suivi



Figure 49 : Moteur pas à pas



Figure 50 Carte Phidget



Figure 51 Connexion avec la batterie et local de supervision