



CONCEPTION, DIMENSIONNEMENT ET MISE EN ŒUVRE D'UN HÉLIOSTAT PIÉDESTAL

MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGÉNIEUR 2iE AVEC GRADE
DE
MASTER EN GÉNIE ÉLECTRIQUE ET ÉNERGÉTIQUE

Présenté et soutenu publiquement le 20 Juillet 2022 par

Kokou Florent YIBOKOU (20190060)

**Directeur de mémoire : Dr.-Ing. habil. Kokouvi Edem N'TSOUKPOE (HDR),
Maître de Conférences CAMES**

Encadrant 2iE : Dr.- Ing Aboubakar GOMNA

Structures d'accueil du stage : Laboratoire Énergies Renouvelables et Efficacité Énergétique
(LabEREE) du 2iE

Jury d'évaluation du mémoire :

Président : Dr.-Ing. Sayon SIDIBE, Maître de conférences CAMES

Membres et correcteurs : Ing. Sédi AGBOKOU
Dr.-Ing. Gaëlle KO
Dr.-Ing. habil. Kokouvi Edem N'TSOUKPOE (HDR),
Maître de conférences CAMES

Promotion [2021/2022]

DÉDICACES

Je dédie ce mémoire à :

- *À mon père, un homme généreux avec un cœur en or qui a tout donné pour que je puisse fréquenter dans de bonnes conditions. Si je suis arrivé jusqu'à ce stade de ma formation, c'est en grande partie grâce à toi. Merci pour tout !*
- *À ma mère, cette femme qui m'a toujours soutenu et qui continue de me soutenir sans cesse.*
- *À mes frères et sœurs, mes amis, je ne vous oublie pas également. Vous êtes les meilleurs !*
- *À la DAAD pour le financement de ma dernière année d'étude.*
- *À Cristiano RONALDO, une personnalité publique qui m'inspire énormément.*

CITATIONS

« Pour réussir, votre désir de réussite doit être plus grand que votre peur de l'échec. »

Bill cosby

« Détache-toi de ta zone de confort, libère ce que tu as de précieux et tu verras les meilleurs. »

Agbassou Kossi Ferdinand

« Je suis toujours motivé, je suis ambitieux et je veux toujours m'améliorer. »

Cristiano Ronaldo

« Ne t'ai-je pas donné cet ordre : Fortifie-toi et prends courage ? Ne t'épouvante point, car l'éternel, ton DIEU, est avec toi dans tous ce que tu entreprendras. »

Josué 1 :9

REMERCIEMENTS

Je remercie le « **DIEU tout puissant** », mon créateur pour sa protection et son soutien sans faille !

Mes sincères remerciements vont au corps professoral et administratif de l'institut 2iE pour la qualité de la formation reçue.

Mes sincères remerciements vont à l'endroit de :

- Mon directeur de mémoire et encadrant : **Dr.-Ing. habil. Kokouvi Edem N'TSOUKPOE (HDR)**, un professeur que j'ai toujours admiré pour sa rigueur, sa passion pour la recherche et aussi ses analyses critiques et très bien réfléchies. Merci pour le sujet de recherche et de votre apport multiforme durant toute la période du stage ;
- Mon encadrant secondaire : **Dr.-Ing. Aboubakar GOMNA**, pour sa disponibilité, ses conseils et son apport indescriptible durant toute la période du stage. Merci pour tout !
- Monsieur Mahamadou MAIGA pour son soutien et sa contribution dans le but d'améliorer le travail. Je te souhaite bien de chances pour ta thèse ;
- Monsieur Madieumbe GAYE qui m'a apporté quelques éclaircissements sur certains points ;
- Monsieur Christian SAMAYOUGA et Monsieur Ahmed ZONGO pour leurs contributions ;
- Monsieur Djidoula TAKO, Monsieur Moubarak AMIDOU, Monsieur TCHATCHOU pikiliwé et Monsieur Mézo qui m'ont également apporté leurs soutiens ;
- Mes promotionnaires qui ont de loin ou de près contribué à l'aboutissement de ce travail.

Je voudrais également remercier tous mes enseignants depuis l'école maternelle jusqu'à l'université. Parmi tous ces enseignants, j'aimerais remercier particulièrement M. Fabrice SALLAH, M. TALAKE, M. Justin KOUMAÏ, M. Fabien AGLAGO, Dr Isiaka AREMUA, Dr Nadjime PINDRA, Dr Zakari DJIBIBE, Ing. Bawong TCHODOU pour tout ce qu'ils ont pu apporter de positif dans mon cursus scolaire et universitaire.

Je n'oublie pas aussi ces dames de ménages qui rendent le cadre scolaire agréable, propre et tenable afin que nous puissions étudier dans de conditions sanitaires et hygiéniques acceptables. Je n'oublie pas non plus les restauratrices de nos deux campus et les agents de sécurité. Merci à chacun de vous !

RÉSUMÉ

Le concept CSP4Africa est un projet de recherche de développement et d'expérimentation d'une microcentrale solaire à concentration de 100 kWth avec une forte valeur ajoutée locale. Ledit concept utilise au mieux les ressources locales disponibles pour pallier les faibles taux d'accès d'électrification en zone rurale et péri-urbaine. La démonstration effective de ce concept de microcentrale nécessite une opérationnalisation effective du champ solaire en vue d'atteindre la puissance nominale. En effet, vu les problèmes que connaît le champ solaire existant, une autre approche serait de développer un héliostat piédestal pour cette microcentrale. L'héliostat piédestal conçu et mis en œuvre dans le cadre est composé de 16 miroirs carrés d'épaisseur 4 mm et de dimensions 33 cm·33 cm. Il est constitué d'une surface réfléchissante de 1,74 m² et d'une surface ouverte de 1,9 m². La hauteur de l'héliostat hors-sol est estimée à 1,60 m, une conception facile à la maintenance humaine. L'héliostat est équipé de deux équipements d'entraînement (couronne d'orientation et vérin électrique) pour le suivi sur deux axes (azimut et élévation). Une étude minutieuse sur le dimensionnement du réflecteur devant supporter les miroirs et le piédestal de l'héliostat est présentée. Une étude sur le dimensionnement de la couronne d'orientation du vérin électrique et le mode de fixation sur le réflecteur sont également présentés. Enfin, une mise en œuvre de l'héliostat conçu et mis en œuvre qui dévoile un résultat satisfaisant est également présentée dans ce document.

Mots Clés

1 – Centrale solaire à concentration

2 – Développement

3 – Mise en œuvre

4 – Héliostat piédestal

5 – CSP4frica

ABSTRACT

The CSP4Africa concept is research, development and testing project for 100 kWth concentrating solar power plant with high local added value. The concept makes the best use of available local resources to overcome the low access rates to electrification in rural and peri-urban areas. The effective demonstration of this micro power plant concept requires an effective operationalization of the solar field in order to reach the nominal power. Indeed, given the problems of the existing solar field, another approach would be to develop a pedestal heliostat for this micro power plant. The pedestal heliostat designed and implemented in the framework consists of 16 square mirrors of thickness 4 mm and dimensions 33 cm·33 cm. It consists of a reflective surface of 1.74 m² and an open surface of 1.9 m². The height of the above-ground heliostat is estimated at 1.60 m, a design that is easy to maintain by human hands. The heliostat is equipped with two drives (slewing ring and electric cylinder) for tracking in two axes (azimuth and elevation). A detailed study on the dimensioning of the reflector to support the mirrors and the pedestal of the heliostat is presented. A study on the dimensioning of the orientation ring of the electric actuator and the method of fixing it to the reflector are also presented. Finally, an implementation of the designed and implemented heliostat that reveals a satisfactory result is also presented in this paper.

1 – Concentrated solar power plant

2 – Development

3 – Implementation

4 – Pedestal heliostat

5 – CSP4Africa

LISTE DES ABRÉVIATIONS

SIGLES

CSP4Africa	Concentrated Solar Power for Africa
LabEREE	Laboratoire Énergies Renouvelables et efficacité énergétique
LESEE	Laboratoire Energie solaire et efficacité énergétique
NREL	National Renewable Energy Laboratory
PV	Photovoltaïque
STERG	Solar Thermal Energy Research Group
2iE	Institut International d'ingénierie de l'eau et de l'environnement

ALPHABET LATIN ET GREC

G	Charge surfacique des miroirs	$\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$
m_m	Masse surfacique du miroir	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$
g	Pesanteur	
n_M	Charge pondérée à l'état limite ultime	$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$
n_F	Charge pondérée à l'état limite de service	$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$
M	Moment	$\text{N} \cdot \text{m}$
f_y	Flèche suivant l'axe y	m
I_x	Moment quadratique suivant l'axe x	cm^4
L	Longueur de la charge	m
A	Section de l'acier	m^2
E	Module de young, Module d'élasticité	Pa
F_x	Force horizontale du vent arrivant sur les miroirs	N
F_z	Force verticale du vent arrivant sur les miroirs	N
C_{FX}	Coefficient de trainée	-

C_{FZ}	Coefficient de portance	-
$A_{réf}$	Surface du réflecteur	m^2
φ	Masse Volumique	$kg \cdot m^3$
V	Vitesse du vent	$m \cdot s^{-1}$
α	Angle d'élévation	°
β	Angle d'azimut	°
$F_{Vérin}$	Force du vérin	N
$P_{Vérin}$	Poids du vérin	N
$P_{réf}$	Poids du réflecteur	N
P_{mir}	Poids du miroir	N
P_{Struc}	Poids de la structure	N
λ_K	Élancement	—
L_k	Longueur de flambement	m
r	Rayon de giration	m
N	Effort de compression de la première partie du piédestal	N
N'	Effort de compression de la deuxième partie du piédestal	N

SOMMAIRE

<i>Dédicaces</i>	<i>i</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>Sommaire</i>	<i>viii</i>
<i>Liste des tableaux</i>	<i>x</i>
<i>Liste des figures</i>	<i>xi</i>
I. Introduction	1
I.1. Contexte général et justification du sujet de recherche.....	1
I.2. Présentation de la structure d'accueil.....	3
II. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	4
II.1. Technologies de centrale solaire à concentration.....	4
II.1.1. La centrale à tour.....	4
II.2. Définition et classification des héliostats.....	5
II.2.1. Définition	5
II.2.2. Classification	6
II.2.3. Justification du choix de l'héliostat piédestal à réaliser.....	14
III. MATERIELS ET METHODES	15
III.1. Matériels	15
III.1.1. Conception du modèle d'héliostat piédestal.....	15
III.1.2. Construction et mise en œuvre de l'héliostat piédestal	15
III.2. Méthodes.....	15
III.2.1. Description et justification du modèle de réflecteur	15
III.2.2. Dimensionnement et calcul de la structure métallique du réflecteur de l'héliostat piédestal	16
III.2.3. Calcul et choix des entraînements électriques	19
III.2.4. Dimensionnement du piédestal	21

IV.	<i>RESULTATS ET DISCUSSIONS</i>	22
IV.1.	Dimensionnement et calcul de la structure métallique du réflecteur	22
IV.2.	Calcul et choix des entraînements électriques	23
IV.2.1.	Calcul et choix du vérin électrique	23
IV.2.2.	Calcul et choix de la couronne d'orientation	24
IV.2.3.	Maintenance de la couronne d'orientation	24
IV.3.	Dimensionnement du piédestal de l'héliostat	25
IV.3.1.	Dimensionnement de la première partie du piédestal	26
IV.3.2.	Dimensionnement de la deuxième partie du piédestal	26
IV.4.	Construction de l'héliostat	27
IV.5.	Mise en œuvre de l'héliostat piédestal.....	29
V.	<i>COUT DE RÉALISATION</i>	31
VI.	<i>CONCLUSION</i>	33
VII.	<i>RECOMMANDATIONS</i>	34
	<i>Références bibliographiques</i>	35
	<i>Annexes</i>	36

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Résultat du dimensionnement et calcul de la structure métallique du réflecteur ...	22
Tableau 2. Résultats du calcul de la force du vérin électrique	23
Tableau 3. Récapitulatif des caractéristiques du vérin électrique	23
Tableau 4. Présentation des résultats du calcul de la position du vérin électrique	24
Tableau 5. Résultats du dimensionnement de la première partie du piédestal.....	26
Tableau 6. Résultats du dimensionnement de la deuxième partie du piédestal	26

LISTE DES FIGURES

Figure 1. La microcentrale pilote CSP4Africa de 2iE-Kamboinsin[4].....	2
Figure 2. Illustration des technologies de centrales solaires à concentration[5]	4
Figure 3. Illustration de la centrale solaire à tour [7]	5
Figure 4. Illustration d'un héliostat piédestal [9].....	6
Figure 5. Héliostat ASUP 140 Abengoa [9].....	7
Figure 6. Héliostat LH2.2 (à gauche) et son support central (à droite) [8]	7
Figure 7. Héliostat SENER [9].....	8
Figure 8. Héliostat de CSIRO [8].....	8
Figure 9. Héliostat d'esolar [9]	9
Figure 10. Héliostat Stellio [8].....	9
Figure 11. Héliostat Solaflect Energy [8].....	10
Figure 12. Héliostat de heliosystems (PATH) [8].....	10
Figure 13. Héliostat pitch/roll de l'université de Amrita [8]	11
Figure 14. Héliostat HélioTower [8].....	11
Figure 15. Héliostat développé par le NREL [8]	12
Figure 16. Héliostat à entraînement par jante [8].....	12
Figure 17. Prototypes d'hélio-40 développés à l'université de Stellenbosch [12].....	13
Figure 18. Expérimentation à petite échelle d'une centrale à tour en Irak [13].....	13
Figure 19. Concentrateur PV à Dassasgho.....	14
Figure 20. Structure du réflecteur montrant le tube le plus sollicité	16
Figure 21. Illustration des miroirs inclinés sur le récepteur d'un angle α	17
Figure 22. Illustration d'une panne sur deux appuis.....	18
Figure 23. Coefficient de calcul de vent sur un héliostat isolé [14].....	19
Figure 24. Calcul de fixation du vérin électrique au réflecteur.....	20
Figure 25. Présentation des différentes parties du piédestal	21
Figure 26. Opération de maintenance du vérin électrique	24
Figure 27. Démontage de la couronne d'orientation sur le piédestal	25
Figure 28. Intérieur de la couronne d'orientation avant nettoyage.....	25
Figure 29. Couronne d'orientation alimenté sous une tension de 12 VCC (Tension continue).....	25
Figure 30. Présentation des différentes parties du piédestal	26
Figure 31. État des lieux des différents éléments disponibles sur la plateforme à Kamboinsin	27

Figure 32. Réflecteur de l'héliostat piédestal	27
Figure 33. Illustration de la pose des cornières sur le réflecteur.....	28
Figure 34. Perçage des trous de fixations de miroirs sur le réflecteur	28
Figure 35. Test de fixation du miroir sur le réflecteur	29
Figure 36. Fixation des roulements sur les côtés de la cornière.....	29
Figure 37. Montage de l'héliostat piédestal.....	30
Figure 38. Illustration des différentes façades de l'héliostat monté	30
Figure 39. Illustration du fonctionnement de l'héliostat en élévation	31
Figure 40. Illustration du fonctionnement de l'héliostat en azimut.....	31

I. INTRODUCTION

I.1. Contexte général et justification du sujet de recherche

Le taux d'accès à l'électricité en Afrique sub-saharienne est médiocre. Selon les données sur l'électrification recueillies sur le site de la Banque Mondiale, en 2020, ce taux avoisinait 28,7 % [1]. La situation est plus préoccupante dans les zones rurales. À titre d'exemple, au Burkina Faso, en 2020, le taux d'électrification était 5,3 % en zone rurale contre 67,4 % en zone urbaine [2]. Au regard de multiples inconvénients que les énergies fossiles ont sur l'environnement, le développement des énergies renouvelables s'avère indispensable afin d'atténuer le réchauffement climatique et surtout de répondre aux besoins énergétiques de nos populations en zones rurales et péri-urbaines. En outre, le continent noir en général regorge d'un important potentiel solaire faiblement exploité. Au Burkina Faso en particulier, l'irradiation horizontale globale et l'irradiation normale directe moyenne sont respectivement de 6 kWh/m²/jr et 4,6 kWh/m²/jr [3]. Ces données énergétiques constituent une opportunité majeure pour développer des centrales solaires photovoltaïques et les centrales solaires thermodynamiques à concentration. Le recours au solaire photovoltaïque oblige une forte dépendance vis-à-vis des pays développés et de plus stocker l'énergie de façon rentable économiquement dans les batteries est encore non maîtrisée pour le moment dans nos régions. En outre, la gestion des composants de ce type de centrale en fin de cycle de vie n'est pas encore maîtrisée. Par contre, avec le solaire à concentration, bon nombre d'équipements peuvent être construits localement. C'est fort de ce constat que le Laboratoire Energie Solaire et Économie d'énergie (LESEE) aujourd'hui connu sous le nom de Laboratoire Énergies Renouvelables et Efficacité Énergétique (LabEREE) a travaillé sur un concept innovant de pilote de microcentrale solaire à concentration dénommée « CSP4Africa ». Ledit concept mise au maximum sur l'utilisation des matériaux localement disponible et la main-d'œuvre locale. CSP4Africa utilise une des technologies des centrales à concentration appelée la centrale à tour.

CSP4Africa est composée d'un ensemble d'éléments dont de deux réservoirs de stockages, d'un champ de miroir qui réfléchissent continuellement les rayons solaires vers un récepteur dont le principe de fonctionnement est illustré à la Figure 1. CSP4Africa est constitué de trois grandes parties, une partie Captage : une première partie captage qui est constituée d'un ensemble formé par les héliostats et les récepteurs, une deuxième partie composée des réservoirs de stockage et des organes annexes et enfin une dernière partie qui est la boucle thermodynamique.

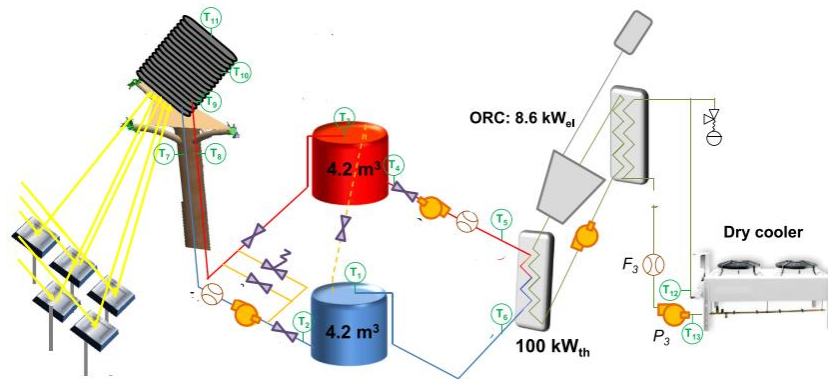


Figure 1. La microcentrale pilote CSP4Africa de 2iE-Kamboinsin[4]

Actuellement, les héliostats multifacettes utilisés sur la plateforme d'expérimentation connaissent des problèmes mécaniques empêchant la focalisation des rayons solaires sur le récepteur. En effet, le fonctionnement effectif de la microcentrale pilote nécessite une opérationnalisation effective du champ solaire. Une autre approche serait de développer un modèle d'héliostat, communément appelé héliostat piédestal. Les objectifs de ce travail de recherche sont :

- ✚ de concevoir, un modèle d'héliostat compatible avec la microcentrale pilote CSP4Africa ;
- ✚ de construire le prototype conçu en utilisant les matériaux localement disponibles ;
- ✚ de tester les équipements d'entrainements (vérin électrique et couronne d'orientation) sur le modèle construit.

Il faudra noter aussi qu'en 2010 un modèle d'héliostat piédestal a été conçu par le LESEE mais à ce jour, il n'y a pas une traçabilité des différents documents qui rentrent dans la conception de ce dernier. Le seul document disponible traite seulement du montage et l'expérimentation de l'héliostat.

Ce présent document, qui fait le point de ce travail de recherche, est constitué principalement de quatre grandes parties à savoir :

- ✚ une partie Synthèse bibliographique qui fait ressortir dans un premier temps les différentes technologies des centrales solaires à concentration, la classification et enfin l'état de l'art des héliostats ;
- ✚ une deuxième partie qui traite des « matériels et méthodes ». Cette partie fait une description des différents équipements et logiciels utilisés pour l'aboutissement de ce travail. Elle présente également une méthodologie détaillée du dimensionnement du réflecteur, du piédestal, des équipements d'entrainements et des calculs sur la fixation du vérin électrique ;

- ✚ une troisième partie qui porte sur les « Résultats et discussions ». Cette partie met en exergue les résultats obtenus issus de la méthodologie adoptée. Elle porte un regard critique sur ces résultats obtenus et présente également les résultats obtenus issus de la mise en œuvre de l'héliostat piédestal
- ✚ dans une quatrième partie qui fait ressortir le coût de réalisation.

I.2. Présentation de la structure d'accueil

Le Laboratoire Énergie renouvelable et Efficacité énergétique (LabEREE) est un laboratoire de recherche ayant deux axes principaux :

- ✚ Énergie solaire et Réseaux intelligents (ESRI) qui porte sur la recherche et le développement des solutions innovantes adaptées au contexte des pays subsahariennes dans le domaine des énergies renouvelables, en particulier le solaire ;
- ✚ Valorisation énergétique de la biomasse (Valbio) qui promet le développement des techniques et procédés de valorisation énergétique de la biomasse.

Le LabEREE est l'un des trois principaux laboratoires de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE). Il est dirigé par l'enseignante chercheuse Dr. Marie SAWADOGO (Maitre de conférences) et est composé de professeurs associés, d'enseignants chercheurs, d'assistants d'enseignement de recherche, des ingénieurs de recherche, des techniciens de laboratoires, de stagiaires de différents niveaux et enfin des doctorants.

II. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Ce chapitre a pour but de mener un raisonnement critique en vue de choisir un modèle d'héliostat à réaliser, en se basant sur les différentes données disponibles dans la littérature et aussi dans notre environnement physique de travail. Dans un premier temps, ce chapitre présente les différentes technologies de centrale solaire à concentration, ensuite une revue sur la classification générale des héliostats et enfin la justification du choix du modèle d'héliostat à concevoir et à mettre en œuvre.

II.1. Technologies de centrale solaire à concentration

Il existe essentiellement, en fonction de la morphologie de la centrale solaire ainsi que la manière de focalisation des rayons solaires vers le récepteur, quatre grandes technologies de centrales solaires à concentration, à savoir :

- ✚ La centrale solaire à tour ;
- ✚ La centrale solaire à miroir parabolique ;
- ✚ La centrale solaire à miroir de Fresnel ;
- ✚ La centrale solaire à capteurs cylindro-paraboliques.

En effet, une des différentes caractéristiques qui permet de distinguer les différents types de technologies en dehors de la morphologie et du principe de fonctionnement est le mode de suivi. Dans les centrales solaires à tour et à miroir parabolique, le suivi du soleil se fait suivant deux axes tandis que dans les centrales solaires à capteurs cylindro-paraboliques et à miroir de Fresnel, le suivi se fait suivant un axe.[5]. La Figure 2 illustre les formes de technologies de centrales solaires à concentration.



Figure 2. Illustration des technologies de centrales solaires à concentration[5]

La Figure 2, de la gauche vers la droite, montre respectivement la technologie de centrale solaire à concentration à capteurs cylindro-paraboliques, à miroir linéaire de Fresnel, à tour et enfin la technologie à miroir parabolique.

II.1.1. La centrale à tour

Elle est composée essentiellement d'un champ d'héliostats, une tour et un récepteur. Elle est illustrée à la Figure 3.

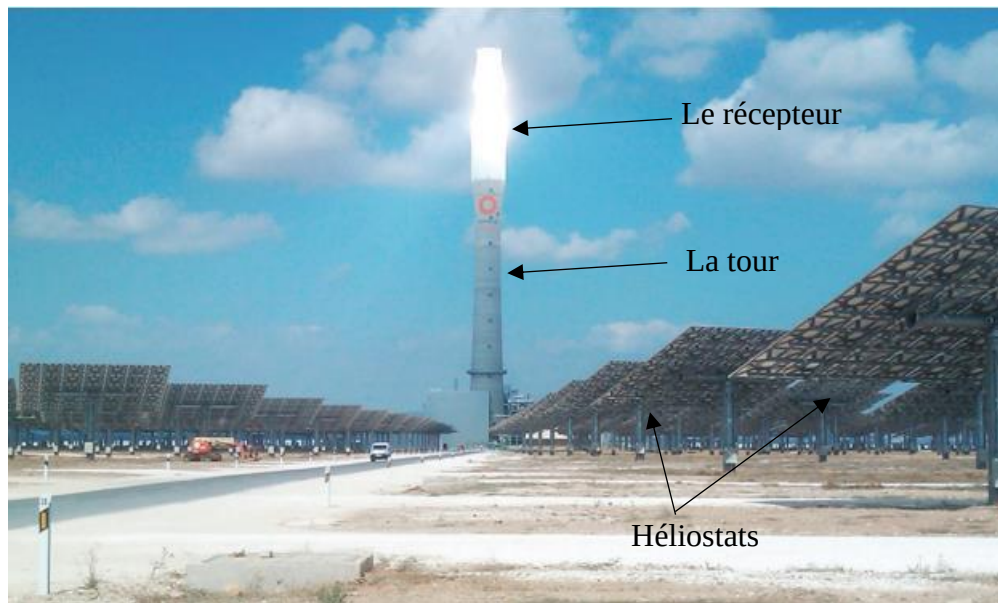


Figure 3. Illustration de la centrale solaire à tour [7]

Les héliostats de la centrale à tour sont des dispositifs munis de miroirs qui font le suivi solaire suivant deux axes. Ils réfléchissent continuellement les rayons solaires vers un récepteur. Les niveaux de température sont très élevés et varient en fonction du fluide de transfert de l'ordre de 300-700 °C et voire plus [8]. Ces différents niveaux de température ont pour finalité d'actionner des cycles thermodynamiques (cycle de Brayton ou cycle de Rankine) et de produire de l'électricité.

II.2. Définition et classification des héliostats

II.2.1. Définition

Un héliostat est un concept composé de deux mots grecs : « hélios » qui veut dire « soleil » et « stat » qui signifie « stationnaire », traduisant la projection des rayons issus du soleil en un point unique. Un héliostat est donc un dispositif composé d'un ou plusieurs miroirs montés sur une structure mécanique dont le but est de suivre la course du soleil et de réfléchir les rayons issus de ce dernier dans une direction fixe.

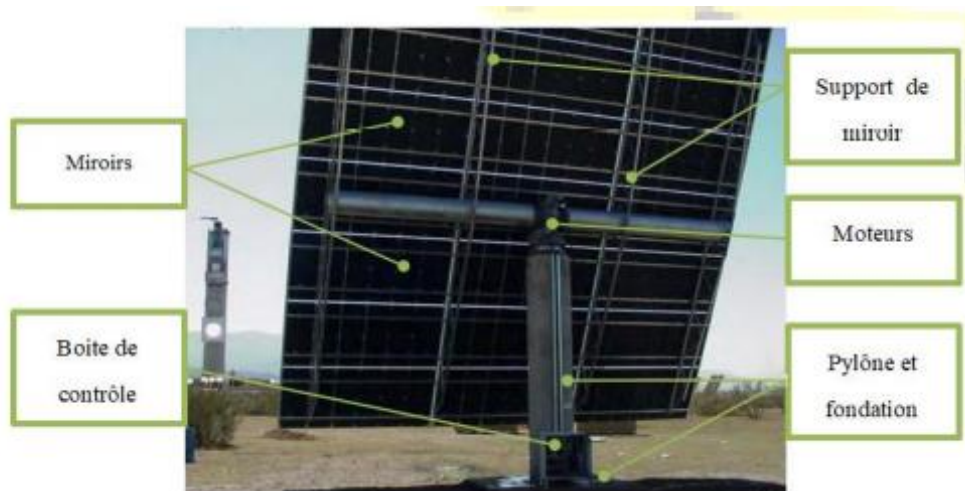


Figure 4. Illustration d'un héliostat piédestal [9]

Un héliostat piédestal, illustré à la Figure 4, comme son nom l'indique, est un dispositif composé de miroirs et des mécanismes de suivi de la course du soleil et monté sur un piédestal (un support droit en béton ou en structure métallique permettant de supporter la structure haute et les miroirs).

II.2.2. Classification

Les héliostats représentent un investissement important de l'ordre de 40 % du coût d'une centrale solaire à tour [10]. Ils peuvent être classés en deux catégories à savoir : les héliostats commerciaux et les héliostats de nouvelle génération ou en cours de développement [8]. Les héliostats commerciaux sont des héliostats de grande taille et de grande surface. Ils sont déjà à l'étape industrielle et sont installés dans les centrales solaires à concentration dans le monde. Quant aux héliostats de nouvelles générations, ils sont de petite taille et de surface un peu plus réduite. Ils font actuellement l'objet de recherche et développement dans le but d'optimiser le coût des héliostats.

II.2.2.1. Les héliostats commerciaux

Héliostat ASUP 140

Abengoa, un groupe technologique du domaine énergétique a développé en 2012, un héliostat de 138,7 m² avec des facettes combinées en feuille de verre et un support en panneau sandwich. Le panneau sandwich est matériau composé d'un double parement en acier avec une couche de matériau isolant. La rotation azimutale complète de cet héliostat est possible grâce à un mécanisme d'entraînement hydraulique breveté. Les paliers de l'axe d'élévation sont sous le tube de torsion continu pour éviter que les paliers ne soient trop grands [9].



Figure 5. Héliostat ASUP 140 Abengoa [9]

✚ Héliostat LH 2.2 de BrightSource

Cet héliostat est en deux facettes et a une surface réfléchissante de 15,2 m² est installé à la centrale solaire Ivanpah en Californie. Son pylône est fixé au sol sans coulage de la fondation en béton. L'héliostat LH 2.2 est formé de manière à ce que le palier soit au-dessus du tube de torsion pour un meilleur équilibrage de poids. Ses facettes sont attachées à la structure de supports des miroirs par des contacts linéaires [8], [9].



Figure 6. Héliostat LH2.2 (à gauche) et son support central (à droite) [8]

✚ Héliostat de SENER

La société SENER, a développé des héliostats de surfaces réfléchissantes de 175,7 m². Les facettes sont des miroirs de 3 mm renforcés d'un support en acier collé à la face arrière du miroir. Le piédestal de cet héliostat est en béton. L'héliostat est équipé des actionneurs hydrauliques qui effectuent les mouvements d'azimut et d'élévation [9].



Figure 7. Héliostat SENER [9]

✚ Héliostat de CSIRO

L'héliostat de CSIRO est basé sur une seule facette et est entraîné par deux actionneurs linéaires. Sa taille originale était de $4,5 \text{ m}^2$, mais peut atteindre aujourd'hui $7,22 \text{ m}^2$ [8].

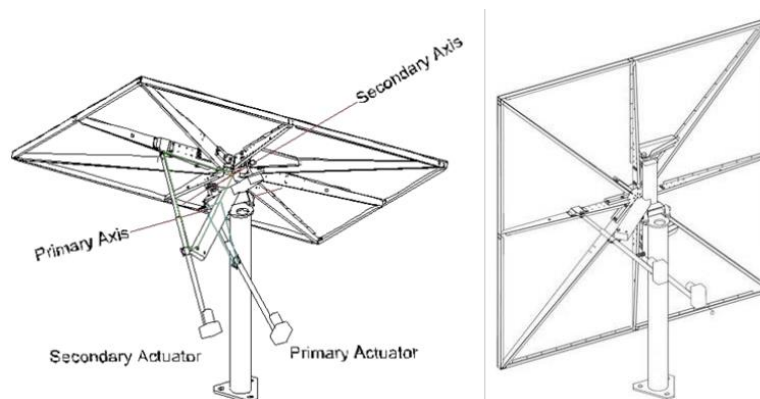


Figure 8. Héliostat de CSIRO [8]

✚ Héliostat d'esolar

L'héliostat d'esolar a une partie réfléchissante composée de miroirs de surface 2 m^2 . Le système de suivi de cet héliostat est constitué de deux moteurs pas-à-pas hybrides et montés sur un support d'acier. Les héliostats d'esolar sont supportés avec une structure en treillis et partagés avec d'autres héliostats [9]. La structure du trépied permet de réduire les charges en direction du pylône et de la fondation. Il est à noter que ces héliostats ont été installés à la centrale Sierra Sun Tower de 5 MWe en Californie.



Figure 9. Héliostat d'esolar [9]

✚ Héliostat Stellio

L'héliostat stellio a une surface réfléchissante de 48 m². Sa zone réfléchissante est pentagonale. Elle permet de réduire l'ombrage et le blocage. Ce qui permet une disposition de champ compacte. Les actionneurs de cet héliostat sont principalement soumis à une charge de traction. Une haute précision optique est également obtenue de cet héliostat à l'aide d'un assemblage basé sur des gabarits (appareil de mesure permettant de bien vérifier la forme et les dimensions d'un équipement) [8].



Figure 10. Héliostat Stellio [8]

✚ Héliostat Solaflect Energy

L'héliostat à suspension de Solarflect Energy est composé de 16 facettes de 1 m². Les facettes du miroir sont suspendues à l'aide de poteaux et de câbles. L'inconvénient de cette conception est que le nettoyage conventionnel des miroirs n'est pas possible [8].



Figure 11. Héliostat Solaflect Energy [8]

✚ Héliostat de héliosystems (PATH)

Heliosystems a construit huit héliostats de 12 m² alignés sur la cible (récepteur). La version actuelle a été développée en 2015 et la version antérieure en 2011 et testé avec plus de 650 héliostats. La principale raison pour laquelle, les héliostats sont alignés sur la cible est que les formes paraboliques réfléchissent les rayons solaires vers un point focal si seulement si les rayons sont parallèles à leur axe focal. Cependant, pour d'autres directions, le point focal est élargi. Cette erreur appelée « astigmatisme », peut être corrigée par une inclinaison optimisée des facettes du miroir pour tous les types d'héliostats en particulier ceux qui sont alignés sur la cible où les rayons incidents et réfléchis sont toujours dans un plan fixe par rapport au plan du miroir [8].



Figure 12. Héliostat de héliosystems (PATH) [8]

II.2.2.2. Les héliostats de nouvelle génération en cours de développement

✚ Héliostat pitch roll de l'université Amrita

L'héliostat pitch roll a été développé à l'université d'Amrita en Inde. Il a une surface de 1 m² et est constitué d'un concentrateur relié au pylône par le biais d'une articulation et est entraîné

par deux actionneurs linéaires [11]. Les héliostats pitch/roll compte tenu de leurs formes, peuvent être placés côte à côte. Ce qui permet d'obtenir de densités de champs d'héliostats plus élevés et donc un rendement élevé. La majeure contrainte de cet héliostat est que lors des orientations verticales des miroirs, les actionnaires linéaires sont presque parallèles au miroir, ce qui entraîne une charge d'entraînement élevé et du coup une faible rigidité du système [8].

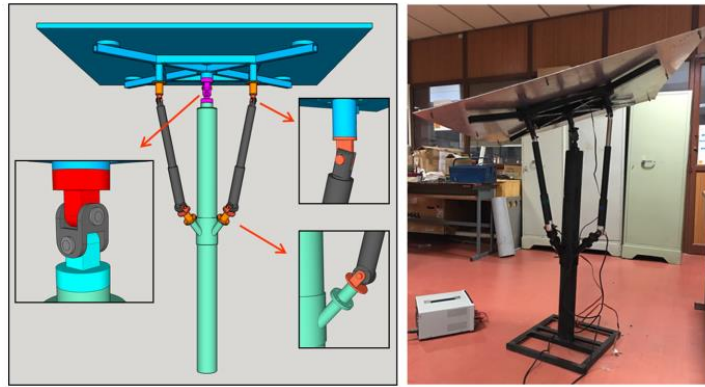


Figure 13. Héliostat pitch/roll de l'université de Amrita [8]

✚ Héliostat HelioTower

L'héliostat HélioTower a une surface de 36 m². Il est caractérisé par un premier axe de rotation horizontal permettant l'utilisation des actionneurs linéaires pour les deux entraînements. Il est constitué également d'un pylône fabriqué en tôle qui est excentré pour assurer la plage de suivi requise et des coins de réflecteurs pour réduire la taille de l'axe d'élévation requise [8].

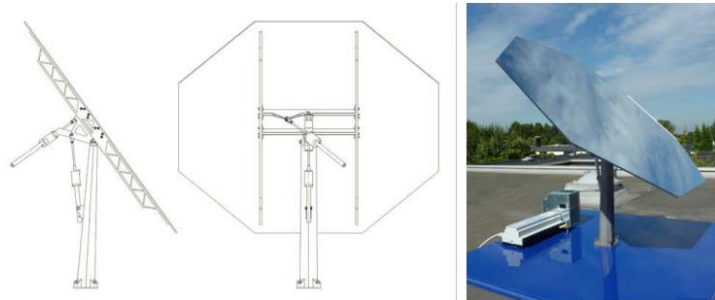


Figure 14. Héliostat HélioTower [8]

✚ Héliostat NREL

L'héliostat développé par le laboratoire national américain d'énergies renouvelables (en anglais NREL) est un prototype optimisé utilisant les concentrateurs plats à une facette unique pour éviter le basculement. Un design structurel intégré au verre pour la structure arrière a été mis au point dans le but d'éviter les processus d'assemblage et de fabrications sur le terrain. Cet héliostat utilise des actionneurs. En outre, le laboratoire national américain d'énergie renouvelable a proposé le développement d'une solution de réseau sans fil utilisant les stations

de contrôle alimenté par l'énergie photovoltaïque qui utilisent un émetteur-récepteur radio pour la communication et un système d'imagerie en boucle ouverte pour le suivi [8].

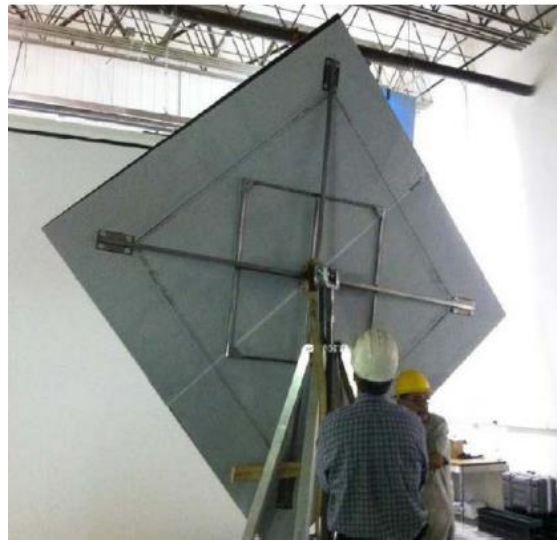


Figure 15. HélioSTAT développé par le NREL [8]

✚ HélioSTAT à entraînement par jante

Ce type d'hélioSTAT a été développé par le centre aérospatial allemand. Il utilise un entraînement par jante. L'avantage des jantes réside dans la rigidité qu'elle apporte à la structure de l'hélioSTAT. Ce qui conduit à des fréquences de résonances plus élevées et des charges dynamiques plus faibles. Les jantes peuvent être produites par de simples machines à cintrer les rouleaux. Par conséquent, aucun composant mécanique de précision n'est nécessaire, ce qui favorise une part élevée de production locale. En effet, l'hélioSTAT est équipé d'un panneau sandwich monolithique (matériau rigide et solide constitué d'un isolation et de deux parements en acier) de 9 m²[8].



Figure 16. HélioSTAT à entraînement par jante [8]

✚ Prototypé d'hélio-40

Le groupe de recherche sur l'énergie solaire thermique (STERG) a développé deux prototypes d'hélioSTAT de 2 m² utilisant différents mécanismes d'entraînement. Le choix de la proposition

héléo-40 consistait en 14 héliostats situés sur le toit de la salle de contrôle du laboratoire à l'université de Stellenbosch et de six autres héliostats fixés au sol sur un piédestal. Le prototype à gauche sur la Figure 17, est équipé d'un système de suivi azimut et élévation, un actionneur linéaire et une couronne d'orientation. Le deuxième prototype utilise deux actionneurs linéaires [12].

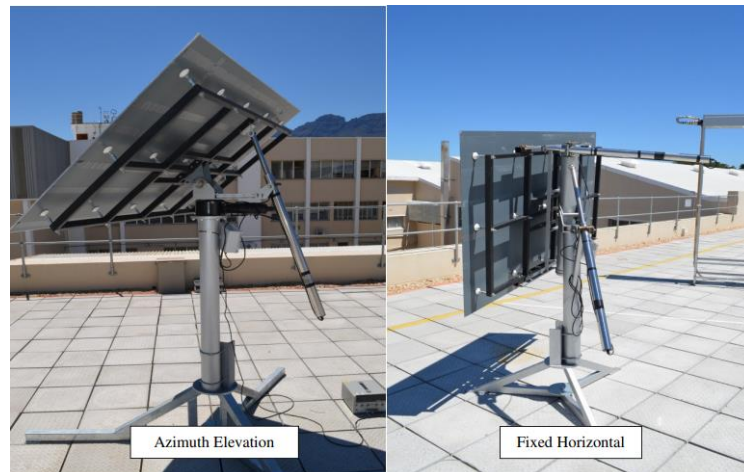


Figure 17. Prototypes d'héléo-40 développés à l'université de Stellenbosch [12]

✚ Héliostat de 0,5 m·0,5 m en Irak

Un héliostat de dimension 0,5 m·0,5 m a été développé en Irak, pour démontrer une application du solaire thermique dans la production d'électricité. Les héliostats sont fixes et montés sur un piédestal en acier comme l'illustre la Figure 18 [13].

L'inconvénient de ces héliostats réside dans le fait que le réglage se fera certainement manuellement.



Figure 18. Expérimentation à petite échelle d'une centrale à tour en Irak [13]

II.2.3. Justification du choix de l'héliostat piédestal à réaliser

Le choix sur le modèle du prototype d'héliostat piédestal à concevoir pour la microcentrale pilote CSP4Africa s'est porté sur une des catégories des héliostats : les héliostats de nouvelles générations. L'héliostat piédestal développé par STERG présenté à la Figure 17 est celui qui a été choisi vu la simplicité de sa conception. Cet héliostat est équipé de deux équipements d'entraînement, un actionneur linéaire électrique et une couronne d'orientation.

En outre, pour mieux s'acquitter de la réalité virtuelle et appréhender la réalité physique d'un héliostat piédestal, une visite sur un concentrateur PV situé à Dassasgho a été organisée. En effet, le concentrateur PV était composé d'un miroir qui reposait sur une structure montée sur un piédestal en béton. Il est à noter qu'un concentrateur PV est différent d'un héliostat. La ressemblance se situe au niveau de la forme et les systèmes d'entraînements. Le système d'entraînement de ce concentrateur PV est constitué d'un actionneur pneumatique et d'une couronne d'orientation. La Figure 19 illustre l'équipement en question.



Figure 19. Concentrateur PV à Dassasgho

Pour la fixation des miroirs sur le réflecteur, l'approche de fixation des miroirs sur les héliostats disponibles sur la microcentrale solaire à concentration CSP4Africa a été adoptée.

III. MATERIELS ET METHODES

Dans ce chapitre, les différents équipements, et logiciels utilisés pour l'aboutissement de ce présent travail seront présentés. En outre, une méthodologie détaillée expliquant la démarche suivie pour la conception et la mise en œuvre sera également présentée.

III.1. Matériels

III.1.1. Conception du modèle d'héliostat piédestal

Dans le cadre de ce travail, la conception du modèle d'héliostat standard qui est l'héliostat piédestal s'est faite avec les logiciels PowerPoint de Microsoft et AutoCAD de Autodesk (Annexe 1). Les différents calculs qui découlent de cette conception, notamment le dimensionnement du réflecteur, le piédestal, le vérin électrique, etc. sont faits sur le logiciel tableur Excel de Microsoft.

III.1.2. Construction et mise en œuvre de l'héliostat piédestal

Le choix étant porté sur les matériaux localement disponibles, la structure de l'héliostat a été donc réalisée en acier métallique de construction. Pour ce faire, les différents équipements suivants ont été sollicités dans la construction :

- ✚ un poste à souder de marque EON pour allier les différentes pièces (tubes creux, carrés, etc.) ;
- ✚ une meuleuse à disque pour couper les tubes creux carrés ;
- ✚ une perceuse pour le perçage des trous sur les réflecteurs ;
- ✚ des baguettes pour la liaison des différentes pièces ;
- ✚ un générateur basse fréquence a été utilisé afin d'alimenter les moteurs de ces différents équipements d'entraînement (vérin électrique et couronne d'orientation) sur l'héliostat, avec une tension continue un peu plus réduite ;
- ✚ un miroir pour vérifier l'exactitude des différents trous de fixation sur le réflecteur.

III.2. Méthodes

III.2.1. Description et justification du modèle de réflecteur

Le modèle de réflecteur choisit est un carré de surface réfléchive $1,7 \text{ m}^2$. L'idée au départ, c'était d'avoir une surface réfléchive réduite de 2 m^2 pour simplifier la conception. Pour le faire, il y a des contraintes à respecter qui rentrent dans l'essence de CSP4Africa. Ces contraintes sont liées aux matériaux localement disponibles et également l'utilisation de la main-d'œuvre locale. En outre, il y a également des contraintes liées miroirs de $33 \text{ cm} \cdot 33 \text{ cm}$ disponibles sur le

site CSP4Africa et aux dimensions du récepteur (diamètre 70 cm) monté sur la tour.. Il a fallu donc mettre ensemble des miroirs sur le réflecteur de sorte à rendre leurs réglages faciles sur ce dernier afin d'avoir une tâche focalisée carrée de côté 33 cm qui ne déborde pas sur le récepteur monté sur la tour. Tout ce travail préliminaire a conduit à un modèle unique de réflecteur composé de 16 miroirs de 33 cm·33 cm avec une surface réfléchissante de 1,7 m² et une surface ouverte de 1,9 m².

III.2.2. Dimensionnement et calcul de la structure métallique du réflecteur de l'héliostat piédestal

Le dimensionnement de la structure métallique du réflecteur de l'héliostat consiste dans un premier temps à déterminer le tube carré en acier le plus sollicité en fonction des charges arrivant sur ce dernier. La Figure 20 montre le tube carré creux en acier le plus sollicité. Pour ce faire, les charges surfaciques arrivant sur le réflecteur sont ramenées en une charge linéique en considérant un appui simple au milieu du tube. Le but final, c'est d'arriver à faire le choix du tube creux carré requis en considérant des contraintes de résistance et de déformation.

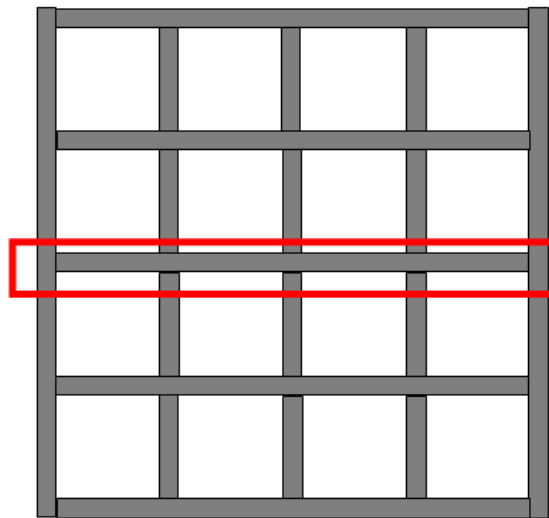


Figure 20. Structure du réflecteur montrant le tube le plus sollicité

L'hypothèse suivante sera donc prise en compte :

Hypothèse : Les miroirs utilisés sont disponibles localement qui ont une masse m_m égale à 0,82 kg pour une épaisseur de 4 mm et une dimension de 33 cm·33 cm. Soit 13,12 kg pour les 16 miroirs. Soit G la charge surfacique des miroirs arrivant sur le tube, m_m la masse surfacique du miroir arrivant sur les tubes carrés creux et g la pesanteur. Elle se calcule par la formule suivante à l'équation (1).

$$G = m_m \cdot g \quad (1)$$

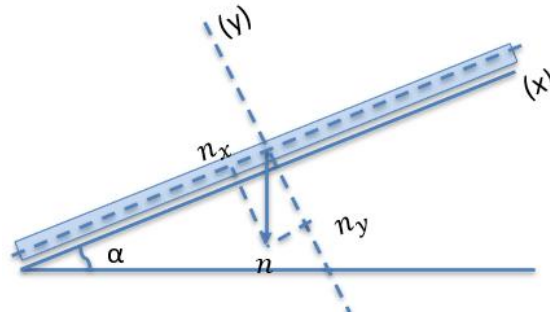


Figure 21. Illustration des miroirs inclinés sur le récepteur d'un angle α

L'objectif étant d'arriver à choisir une structure capable de supporter les miroirs, sans se déformer. Pour cela, il faut vérifier deux conditions à savoir : le moment et la flèche.

Pour la détermination du moment, on utilise la charge pondérée à l'ELU (État Limite Ultime)

Soit n_M , cette charge et L_m , la largeur de la charge. On a alors :

$$n_M = 1,35G * L_m \quad (2)$$

$$\begin{cases} n_{M_x} = n_M \sin \alpha \\ n_{M_y} = n_M \cos \alpha \end{cases} \quad \begin{cases} M_x = \frac{n_{M_y} * L^2}{8} \\ M_y = \frac{n_{M_x} * L^2}{8} \end{cases} \quad (3)$$

n_M , dans les conditions défavorables, est maximale lorsque l'angle α est soit égale à 0° ou 90° . Le cas où $\alpha = 0^\circ$, lorsque le réflecteur est en position horizontale, est pris en compte dans ce dimensionnement. Les équations (3) deviennent donc (4).

$$\begin{cases} n_{M_x} = 0 \\ n_{M_y} = n_M \end{cases} \quad \begin{cases} M_x = \frac{n_{M_y} * L^2}{8} \\ M_y = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Pour le calcul de la flèche, on utilise l'état limite de service. Soit n_F , la charge pondérée à l'état limite en service. Elle est exprimée à travers les équations (5) et (6).

$$n_F = G * L_m \quad (5)$$

$$\begin{cases} n_{F_x} = n_F \sin \alpha \\ n_{F_y} = n_F \cos \alpha \end{cases} \quad (6)$$

n_F , dans les conditions défavorables, est maximale lorsque l'angle α est soit égale à 0° ou 90° . le cas où $\alpha = 0^\circ$, lorsque le réflecteur est en position horizontale sera pris en compte dans ce dimensionnement. Les équations (6) deviennent donc (7).

$$\begin{cases} n_{Fx} = 0 \\ n_{Fy} = n_F \end{cases} \quad (7)$$

Notre cas peut être assimilé à une poutre sur deux appuis suivant le plan Oy (Annexe 2 Figure 1).

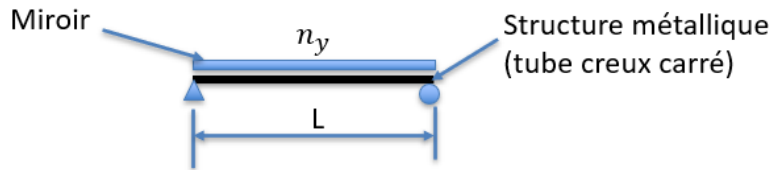


Figure 22. Illustration d'une poutre sur deux appuis

Pour cela deux conditions sont à prendre en compte notamment la flèche et le moment.

$$\begin{cases} f_y = \frac{5}{384} \cdot \frac{n_{Fy} L^4}{EI_x} \\ M_x = \frac{n_{My} \cdot L^2}{8} \end{cases} \quad (8)$$

La dernière étape du dimensionnement pour le choix du tube creux carré consiste à vérifier deux contraintes majeures à savoir la résistance des tubes creux carrés ainsi que la flèche qui est juste une déformation occasionnée par le poids des miroirs sur la structure.

✚ La résistance

$$\sigma \leq \sigma_e \quad (9)$$

$$\text{Avec } \sigma = \frac{M_x}{\frac{I_x}{v_x}} + \frac{M_y}{\frac{I_y}{v_y}} \quad \text{et } \sigma_e = 235 \text{ MPa}$$

✚ La flèche

$$f_y \leq \frac{L}{200} \quad (10)$$

En combinant les équations (8) et (10), on obtient une inégalité exprimée à l'équation (11) qui correspond au moment quadratique requis pour le choix du tube creux carrés en acier métallique de construction.

$$I_x \geq \frac{1000 \cdot n_{Fy} \cdot L^3}{384 \cdot E} \quad (11)$$

III.2.3. Calcul et choix des entraînements électriques

III.2.3.1. Calcul et choix du vérin électrique

Le vérin électrique est un équipement qui permet, dans le cadre de ce travail, de faire un suivi en élévation de l'héliostat piédestal. Pour le choix, il y a un certain nombre de paramètres à considérer à savoir :

- La charge à entrainer : C'est la force de l'équipement en question (Réflecteur et les miroirs) que le vérin devra vaincre pour entrainer ce dernier.
- Le facteur de marche : Définis le temps de fonctionnement du système par rapport à son temps de repos. Il permet de conférer aux équipements, une durée de vie minimale et de limiter l'usure des pièces mécaniques.
- Environnement de fonctionnement de l'équipement : c'est un facteur qui influe sur le fonctionnement de l'équipement. Pour cela, il est important de savoir si l'équipement est sujet à la poussière, à l'humidité en vue de choisir l'indice de protection convenable.
- La vitesse et la course de l'équipement : ce paramètre dépend du type d'application souhaitée.

Dans notre cas, l'équipement que le vérin doit entrainer n'est rien d'autre que l'ensemble composé du réflecteur et du miroir. Pour cela, le poids du miroir en plus du poids du réflecteur, mais aussi l'influence du vent sur l'ensemble réflecteur et miroir sont des éléments qu'il faut prendre en compte dans le dimensionnement.

La méthode de calcul de vent utilisée a été développée par Peterka et Derickson et les différents coefficients de trainée et de portance concernent un héliostat isolé[14].

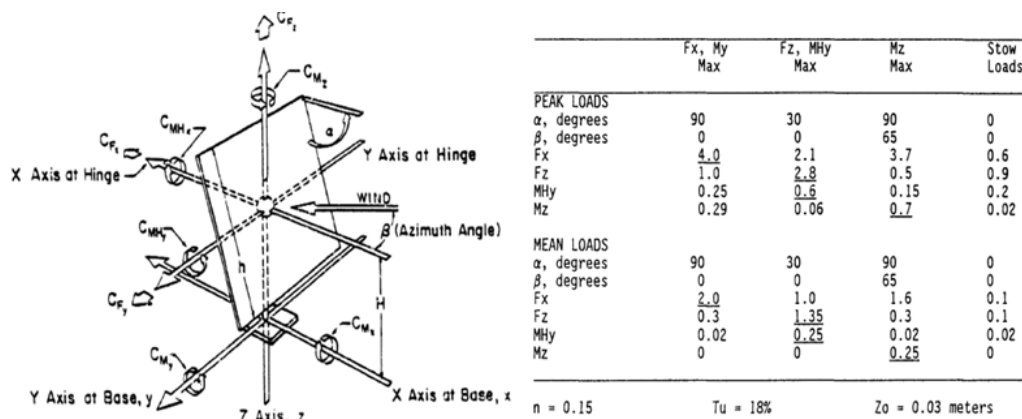


Figure 23. Coefficient de calcul de vent sur un héliostat isolé [14]

En fonction de l'orientation et de l'inclinaison, il y a divers coefficients de trainée (qui s'applique à Fx) et de portance (qui s'applique à Fz)

Ce dimensionnement considérera le cas le plus défavorable en utilisant les forces de trainée et

de portance maximale dans le cas de ce dimensionnement.

La vitesse maximale du vent à 10 m à Ouagadougou selon les données obtenues sur le site météoBlue est de 28 km/h.

F_X est la force horizontale du vent arrivant sur le miroir et perpendiculaire à l'axe du piédestal.

F_Z est la force verticale du vent arrivant sur les miroirs.

Deux hypothèses sont faites dans ce cadre :

Hypothèse 1 pour le calcul de F_X : Cas 1 où $\alpha = 90^\circ$ et $\beta = 0^\circ$

$$F_X = C_{FX} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot V^2 \cdot A_{réf} \quad (12)$$

Hypothèse 2 pour le calcul de F_X : Cas 2 où $\alpha = 30^\circ$ et $\beta = 0^\circ$

$$F_Z = C_{FZ} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot V^2 \cdot A_{réf} \quad (13)$$

La force requise pour le choix du vérin électrique est calculé à travers la formule suivante :

$$F_{Vérin} = P_{réf} + P_{mir} + F_Z \quad (14)$$

✚ Calcul pour la fixation du vérin électrique

La consultation du site Internet SunEarthtools a permis d'avoir les valeurs d'azimut et d'élévation de l'année 2022 pour le site de Kamboinsin. En effet, en considérant de différents horaires notamment 9 h (heure de début du test) et 12 h (midi solaire), les valeurs minimales et maximales d'angle d'élévation sont respectivement de $31,36^\circ$ au 1^{er} septembre 2022 à 9 h et $88,87^\circ$ au 23 avril 2022 à 12 h. En effet, ces différentes valeurs minimales et maximales seront prises en Compte pour trouver les différentes positions du vérin électrique, notamment la position de la tige du vérin électrique et la formule mathématique de Al-kashi à l'équation (15) suivante a été appliquée.

$$B = \sqrt{A^2 + C^2 - 2 \cdot A \cdot C \cdot \cos 31^\circ} \quad (15)$$

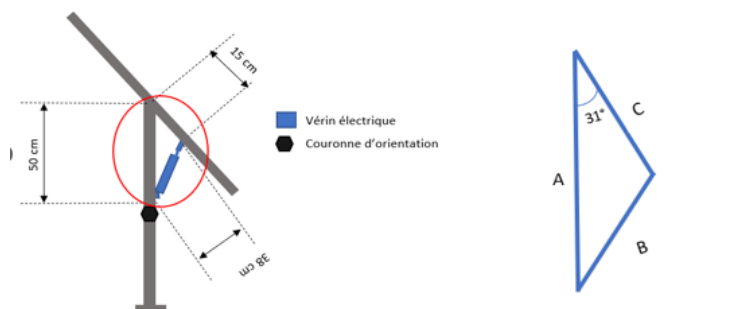


Figure 24. Calcul de fixation du vérin électrique au réflecteur

III.2.4. Dimensionnement du piédestal

Le piédestal est composé de deux parties distinctes : une partie supérieure et une partie inférieure. La partie supérieure supporte le réflecteur et les miroirs et la deuxième partie supporte la partie supérieure du piédestal ainsi que la couronne d'orientation comme l'illustre la Figure 25. La couronne d'orientation sert d'entraînement pour l'héliostat. Le matériau utilisé pour le réflecteur et le piédestal est en acier galvanisé.

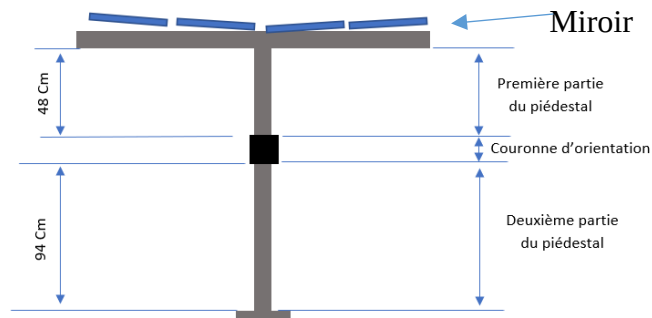


Figure 25. Présentation des différentes parties du piédestal

III.2.4.1. Dimensionnement de la première partie du piédestal

La principale contrainte à vérifier dans le cadre du dimensionnement du piédestal est le flambement. Pour cela, il revient tout d'abord à identifier le type de flambement grâce au catalogue disponible en Annexe 3 Tableau 1. Les différentes formules suivantes seront appliquées.

Le calcul de l'élancement $\bar{\lambda}$, se détermine par la formule à l'équation (16).

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{93} \quad \text{Avec } \lambda = \frac{L_K}{r} \quad (16)$$

L_K , la longueur de flambement et r , le rayon de giration.

Le risque de flambement n'est à considérer que si $\bar{\lambda} > 0.2$. La sollicitation de compression doit dans ce cas, satisfaire à la relation traduite à l'équation (17):

$$N \leq \chi \cdot \beta_A \cdot A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (17)$$

$\beta_A = 1$ pour les sections transversales de classe 1, 2 ou 3.

χ est le coefficient de réduction pour le mode de flambement à considérer (obtenu par interpolation) disponible en Annexe 3 Tableau 2.

A est la section de l'acier

f_y est la nuance de l'acier

γ_{M1} est un coefficient de sécurité

L'effort de compression est obtenu grâce à la formule exprimée à l'équation (18):

$$N = P_{struc} + P_{mir} + P_{vérin} \quad (18)$$

III.2.4.2. Dimensionnement de la deuxième partie du piédestal

Le dimensionnement de cette deuxième partie du piédestal est identique à la première partie. La différence résulte au niveau de l'effort de compression N' qui prend en compte l'effort de compression de la première partie du piédestal. Il est traduit à l'équation (19)

$$N' = N + P_{Cour} \quad (19)$$

IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS

IV.1. Dimensionnement et calcul de la structure métallique du réflecteur

Le réflecteur est composé de 16 miroirs de 33 cm·33 cm. Les différents résultats sont consignés dans le Tableau 1.

Tableau 1. Résultat du dimensionnement et calcul de la structure métallique du réflecteur

Charge surfacique	$G = 129 \text{ N/m}^2$
Charge pondérée à l'ELU (Etat limite ultime) et les moments résultants	$n_M = 240,33 \text{ N/m}$ $\begin{cases} n_{M_x} = n_M = 0 \\ n_{M_y} = 240,33 \text{ N/m} \end{cases}$ $\begin{cases} M_x = \frac{240,33 \cdot 1,38^2}{8} = 57,21 \text{ Nm} \\ M_y = 0 \text{ Nm} \end{cases}$
Charge pondérée à l'ELU (État limite ultime) et les moments résultants	$n_F = 178,02 \text{ N/m}$ $\begin{cases} n_{F_x} = 0 \\ n_{F_y} = 178,02 \text{ N/m} \end{cases}$
Moment quadratique requis pour le tube creux carré en acier	$I_x \geq 0,58 \text{ cm}^4$
Contrainte de résistance de la structure métallique du réflecteur	$\sigma = 98,13 \text{ MPa}$ $98,13 \text{ MPa} \leq 235 \text{ MPa}$

Le premier résultat du tableau obtenu grâce à l'équation (1) correspond au poids surfacique des 16 miroirs qui seront posés sur le réflecteur. L'équation (11) a permis de trouver le moment quadratique exact requis pour le choix du tube creux carré en acier convenable. En se référant

au catalogue disponible en Annexe 2 Tableau 1, le tube creux carré en acier de dimensions 20 mm·20 mm·1.5 mm répond aux spécifications.

La contrainte de résistance établie à l'équation (9) étant vérifiée, il n'y a donc pas de doute à propos du choix de la section d'acier convenable.

IV.2. Calcul et choix des entraînements électriques

IV.2.1. Calcul et choix du vérin électrique

Le vérin électrique est un équipement qui permet dans notre cas de faire un suivi en élévation de notre héliostat. Les différents résultats sont présentés dans le Tableau 2.

Tableau 2. Résultats du calcul de la force du vérin électrique

Equations	Résultats
(12)	$F_X = 4 \cdot \frac{1,156}{2} \cdot 7,77^2 \cdot 1,9 = 265,2 \text{ N}$
(13)	$F_Z = 2,8 \cdot \frac{1,156}{2} \cdot 7,77^2 \cdot 1,9 = 185,6 \text{ N}$
(14)	$F_{\text{Vérin}} = 10 \cdot 0,84 + 13,12 + 185,6$ $= 207 \text{ N}$

En ce qui concerne la vitesse du moteur, vu qu'il s'agit d'un suivi solaire et le mouvement du soleil est relativement lent, nous allons privilégier les moteurs avec une faible vitesse de rotation. L'équipement fonctionnera dans un environnement qui est sujet à la poussière, pour cela nous allons privilégier un équipement qui est étanche à la poussière qui a un indice de protection de 65.

Pour avoir un retour d'information exploitable au niveau de notre carte Arduino (carte programmable), il faudrait que le vérin soit équipé d'un potentiomètre ou d'un encodeur. Pour la précision de l'information, il faut aussi qu'il soit équipé d'un capteur de fin de course.

Tableau 3. Récapitulatif des caractéristiques du vérin électrique

Force	207 N
Vitesse	5 mm/s
Course	180 mm
Indice de protection	64
Capteur de fin de course	Oui
Potentiomètre ou encodeur	Oui

L'héliostat piédestal qui avait été réalisé dans le temps était en panne en se référant au mémoire de fin d'études de GIOAN Vincent. Il avait été également annoncé dans les

recommandations du mémoire de ce dernier qu'il faudrait acquérir un vérin électrique avec un capteur de fin de course. En effet, dans les investigations sur les traces de l'héliostat piédestal qui avait été réalisé, deux vérins électriques de marque MecVel avec une force maximale de 2000 N chacun et une course maximale de 200 mm ont été trouvés au magasin. Les différents vérins électriques qui ne fonctionnaient pas au départ ont subi tout un chacun une opération de maintenance. La Figure 26 illustre cette opération.



Figure 26. Opération de maintenance du vérin électrique

La Longueur à vide (sans la tige) d'un des vérins électriques équipés d'un potentiomètre et d'un capteur de fin de course est de 35 cm. En effet, pour le calcul de la fixation du vérin électrique, les différentes valeurs minimales d'élévation solaire ont été prises en compte. En se référant à la Figure 24, Le A et C étant fixé, l'angle minimal étant fixé, il nous faut trouver le B qui correspond à la longueur du vérin. Les différents résultats obtenus sont consignés dans le Tableau 4.

Tableau 4. Présentation des résultats du calcul de la position du vérin électrique

Valeur d'angle d'élévation	Distance B (Longueur du vérin)
$\alpha = 31^\circ$	B=37,4 cm
$\alpha = 90^\circ$	B=52,2 cm

La première valeur de B obtenue montre qu'il faudra faire sortir la tige du vérin électrique de 2,4 cm pour calibrer l'angle d'inclinaison de l'héliostat à 31° . Il en est de même pour la deuxième valeur de B qui correspond à la position horizontale de l'héliostat c'est-à-dire au midi solaire. La tige du vérin devra donc sortir de 17,2 cm.

IV.2.2. Calcul et choix de la couronne d'orientation

IV.2.3. Maintenance de la couronne d'orientation

La couronne d'orientation était couplée au piédestal sur la plateforme du linéaire Fresnel (COLIFR) à coté de la centrale CSP4Africa, comme le montre la Figure 27 ci-dessous.



Figure 27. Démontage de la couronne d'orientation sur le piédestal

La Figure 28, illustre l'intérieur de la couronne d'orientation



Figure 28. Intérieur de la couronne d'orientation avant nettoyage

Après la phase de maintenance, il s'est ensuivi de l'alimentation du moteur. Cependant, le problème majeur de la couronne est l'absence d'un encodeur pour avoir un retour d'information sur la position et le nombre de tours pouvant être effectué par cette dernière afin de mieux la programmer pour le suivi solaire.



Figure 29. Couronne d'orientation alimenté sous une tension de 12 VCC (Tension continue)

IV.3. Dimensionnement du piédestal de l'héliostat

Le piédestal est composé de deux parties distinctes, une partie supportant le réflecteur et une deuxième partie sur laquelle sont posées et la couronne d'orientation et cette première partie du piédestal comme l'illustre la Figure 30 ci-dessous

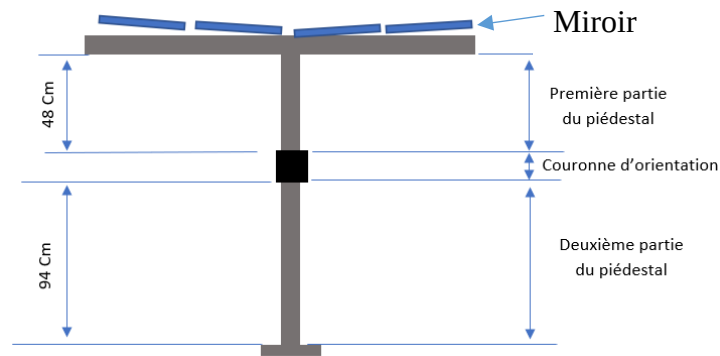


Figure 30. Présentation des différentes parties du piédestal

IV.3.1. Dimensionnement de la première partie du piédestal

En se référant au catalogue disponible en Annexe 3 Tableau 1, nous sommes dans le premier cas. Les différents résultats sont consignés dans le tableau suivant :

Tableau 5. Résultats du dimensionnement de la première partie du piédestal

Élancement du tube rond creux de la première partie du piédestal	$\lambda = \frac{48}{2.03} = 23,645 ; \quad \bar{\lambda} = \frac{23,645}{93} = 0,25$
Effort de compression du tube rond creux de la première partie du piédestal	$N = 13,8 \cdot 0.84 \cdot 9.81 + 13.12 \cdot 9,81 + 5 \cdot 9,81$ $= 291,5 \text{ N}$
Vérification d'inégalité du risque de flambement du tube rond creux de la première partie du piédestal.	$291,5 \leq 0,988752 \cdot 1 \cdot 5,23 \cdot \frac{235 \cdot 10^2}{1,05}$ $291,5 \text{ N} \leq 115735,7758 \text{ N}$

Dans cette partie, les calculs sont faits par itération en considérant différents tubes du catalogue disponible en Annexe 3 Tableau 3.

La valeur de l'élancement $\bar{\lambda}$, obtenu à l'équation (16) montre dans un premier temps qu'il y a un risque de flambement. En effet, en passant à l'équation (17) comme décrite dans la méthodologie plus haute, il y a lieu de remarquer que l'effort de compression arrivant sur le tube creux rond vérifie l'inégalité.

Le tube carré creux en acier de diamètre 60,3 cm et d'épaisseur 2,9 cm convient donc pour cette première partie du piédestal.

IV.3.2. Dimensionnement de la deuxième partie du piédestal

Le dimensionnement de la deuxième partie du piédestal est semblable à la première partie.

Tableau 6. Résultats du dimensionnement de la deuxième partie du piédestal

Élancement du tube rond creux de la deuxième partie du piédestal	$\lambda = \frac{65,8}{2,03} = 32,41 ; \quad \bar{\lambda} = \frac{23,645}{93} = 0,35$
--	--

Effort de compression du tube rond creux de la deuxième partie du piédestal	$N = 291,5 + 15 \cdot 9,81 = 439 \text{ N}$
Vérification d'inégalité du risque de flambement du tube rond creux de la première partie du piédestal.	$439 \leq 0,96762 \cdot 1 \cdot 5,23 \cdot \frac{235 \cdot 10^2}{1,05}$ $439 \text{ N} \leq 113262 \text{ N}$

Le tube rond creux de diamètre 60,3 mm convient également pour cette deuxième partie du piédestal.

IV.4. Construction de l'héliostat

Les Travaux de construction de l'héliostat étaient un peu délicats. En effet, il faut noter qu'il y avait des éléments qui étaient déjà disponibles sur la plateforme, notamment le piédestal, le roulement pour la liaison pivot et des cornières sur l'ancien réflecteur. La Figure 31 illustre les éléments qui étaient déjà disponibles sur la plateforme CSP4Africa.



Figure 31. État des lieux des différents éléments disponibles sur la plateforme à Kamboinsin

La Figure 32 ci-dessous illustre le support du réflecteur conçu en prenant en compte le modèle de conception établi.



Figure 32. Réflecteur de l'héliostat piédestal

Ensuite, il s'en est suivi du plaçage des cornières sur les côtés du réflecteur comme l'illustre la Figure 33.



Figure 33. Illustration de la pose des cornières sur le réflecteur

Le perçage des tubes creux carrés en acier métallique de construction qui constitue le réflecteur de l'héliostat piédestal est une étape importante qui sert à fixer les miroirs sur cette dernière. Il est illustré à travers la Figure 34.



Figure 34. Perçage des trous de fixations de miroirs sur le réflecteur

Pour s'assurer que les différents trous percés respectent les dimensions du modèle de conception, les tests de fixation de miroirs sur le réflecteur ont été effectués avec quelques miroirs disponibles sur le site. La Figure 35, illustre cette étape.



Figure 35. Test de fixation du miroir sur le réflecteur

Après l'étape de test de fixation, il s'en est suivi du placement du roulement pour la liaison pivot sur les roulements.



Figure 36. Fixation des roulements sur les côtés de la cornière

IV.5. Mise en œuvre de l'héliostat piédestal

Dans ce sous-chapitre, le montage et le test de fonctionnement des différents équipements d'entrainements, notamment la couronne d'orientation et le vérin électrique seront testés sur l'héliostat conçu.

Le montage de la couronne d'orientation ainsi que les vérins électriques sont illustrés à travers les figures Figure 37 et Figure 38. La mise en marche des équipements a nécessité l'utilisation d'un générateur de tension et courant basse fréquence afin de régler les tensions d'alimentations des différents équipements à 12 VCC (Tension continue).



Figure 37. Montage de l'héliostat piédestal



Figure 38. Illustration des différentes façades de l'héliostat monté

À cet effet, deux tests ont été conduits pour faire fonctionner l'héliostat en mode « élévation » grâce au vérin électrique et en mode « azimut » grâce à la couronne d'orientation. Les deux tests ont été satisfaisants. Les figures Figure 39 et Figure 40 illustrent le fonctionnement suivant les deux modes (azimut et élévation) de l'héliostat. Les différents tests quoiqu'intéressant nécessitent des dispositifs de contrôle de vitesse des moteurs des différents équipements d'entraînement de l'héliostat afin de suivre en temps réel la course du soleil. Par ailleurs, les tests réalisés sur ce site ne prennent pas en compte ces différents équipements de contrôle. Ils feront l'objet d'éventuels travaux de recherche sur la caractérisation de l'héliostat.



Figure 39. Illustration du fonctionnement de l'héliostat en élévation



Figure 40. Illustration du fonctionnement de l'héliostat en azimut

V. COUT DE RÉALISATION

Quantité	Composants	Devisé	Montant en F CFA
1	Vérin électrique	287 \$	188 559 F CFA
1	Couronne d'orientation	266 \$	174 762 F CFA
4	Tube creux carré (épaisseur 2 mm ; Longueur 5,80 m)	36 000 F CFA	36 000 F CFA
1	Tube creux rond (épaisseur 2,90 m ; Longueur 6 m)	15 870 F CFA	15 870 FCFA
Total			415 191 FCFA

Ce total de **quatre cent quinze mille cent quatre-vingt-un francs CFA** constitue le coût global qui rentre dans la conception de l'héliostat. Cependant, ce coût n'est pas définitif, car il ne prend pas en compte les frais de transport qui peuvent varier selon le lieu de commande des équipements, le moyen de transport, etc.

Néanmoins, vu les différents éléments qui étaient déjà disponibles, la conception a coûté **58 000 F CFA**. Ce coût constitue l'achat de tubes creux carrés, la main-d'œuvre ainsi que les frais de transport du lieu d'achat jusqu'à la minicentrale pilote CSP4Africa. Les fiches techniques des équipements d'entrainements sont disponibles à l'Annexe 4 Figure 2 et l'Annexe 4 Figure 3.

VI. CONCLUSION

La ressource endogène qui a été gracieusement donnée à l'Afrique, en particulier le Burkina Faso, le soleil, est sans doute l'une des ressources énergétiques renouvelables et moins polluantes à promouvoir pour atténuer les effets du changement climatique. En outre, elle constitue la ressource la plus abondante pouvant accélérer l'électrification de nos différents pays. C'est dans ce sens que le Laboratoire Énergies Renouvelables et Efficacité Énergétique a orienté l'un de ses axes de recherche sur l'énergie solaire et les systèmes intelligents.

Rappelant le contexte de ce stage de recherche, le Laboratoire Énergies Renouvelables et Efficacité Énergétique (LESEE) connu aujourd'hui sous le nom de Laboratoire Énergies Renouvelables et Efficacité Énergétique (LabEREE) ont travaillé sur la conception d'un pilote de microcentrale solaire à concentration avec une forte valeur ajoutée locale dénommé « CSP4Africa ». Ce concept mise sur la main-d'œuvre locale et les matériaux localement disponibles. Le projet étant conçu pour répondre aux besoins énergétiques en zone rurale et péri-urbaine en Afrique subsaharienne. Le champ solaire pilote est basé sur un modèle d'héliostat et un récepteur solaire qui ont été construits et testés.

En effet, ce présent travail de recherche s'inscrit dans ce même dynamisme et porte sur la conception, la construction et la mise en œuvre d'un héliostat piédestal qui est une alternative aux problèmes mécaniques que rencontrent les héliostats actuels de CSP4Africa. En outre, il faudra noter que ce travail a été réalisé dans le temps, mais actuellement, nous n'avons aucune traçabilité des documents de conception et construction. Le seul document disponible porte sur la mise en place et l'expérimentation de l'héliostat piédestal ainsi que quelques structures dispersées et abandonnées de l'héliostat, notamment la structure en « T » ainsi que le réflecteur. Dans le cadre de ce travail de recherche, il fallait donc concevoir à nouveau un modèle d'héliostat piédestal et en passant à la construction en privilégiant les matériaux localement disponibles. Pour cela, un héliostat à taille humaine de surface réfléchive de $1,74 \text{ m}^2$ pour faciliter la maintenance a été pensé et réalisé en acier métallique de construction. Les différentes étapes du dimensionnement sont détaillées dans le corps du travail. Ce travail de recherche a également permis de faire la maintenance et de réparer quelques éléments d'entraînements qui ne fonctionnaient pas au début. Il s'agit entre autres d'une couronne d'orientation et de deux vérins électriques dont l'un est équipé d'un capteur de fin de course. La maintenance et la réparation de ces équipements d'entraînements ont permis de poursuivre leur test sur l'héliostat conçu. Les résultats du test traduits aux figures Figure 39 et Figure 40 sont avérés satisfaisants et encourageants. Cependant, le volet caractérisation optique de l'héliostat piédestal n'a pas été

abordé pour des raisons liées au temps imparti pour le stage. La suite de ce travail de recherche à envisager comme perspectives reste sans doute la caractérisation optique de l'héliostat piédestal. Ce travail de recherche nous a permis de faire un pas dans la recherche scientifique et de développer une autre manière d'appréhender cette dernière à nouveau.

VII. RECOMMANDATIONS

Les différentes recommandations ci-dessous sont valables pour la continuité du travail de recherche sur l'héliostat conçu.

-  Motorisation de l'héliostat piédestal ;
-  Caractérisation de l'héliostat piédestal.

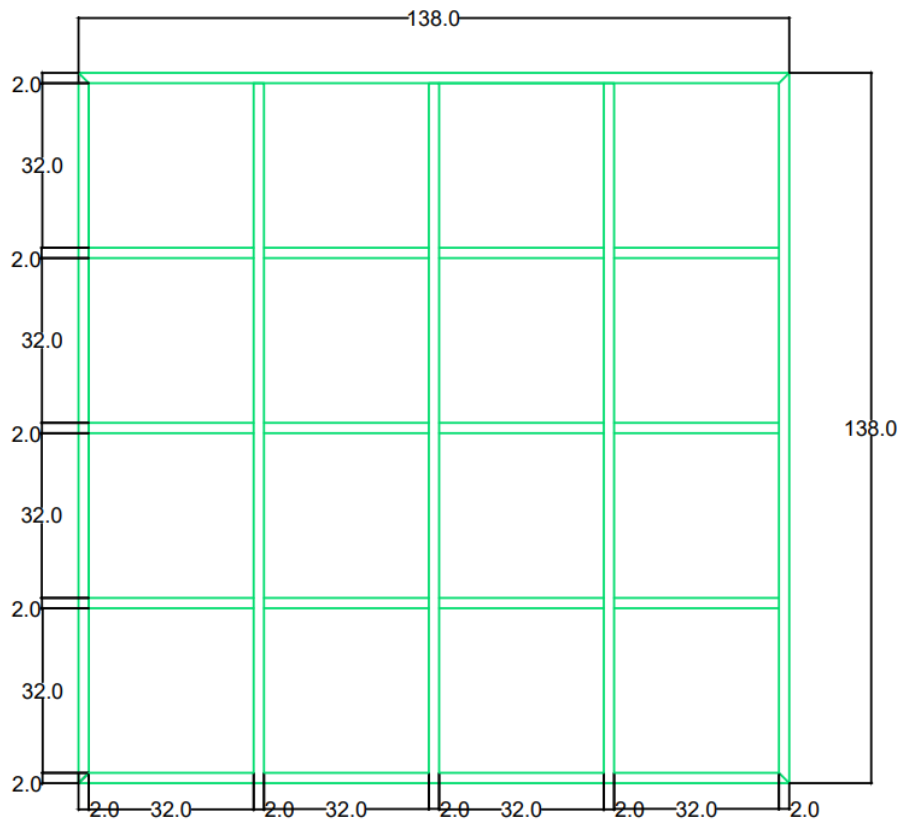
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] « Access to electricity, rural (% of rural population) - Sub-Saharan Africa | Data ». <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.ACCS.RU.ZS?locations=ZG> (consulté le 3 juin 2022).
- [2] A. D. Bank, « Burkina Faso : le Fonds africain de développement octroie un financement de plus de 59 millions d'euros pour améliorer l'accès des populations à l'électricité », *Banque africaine de développement - Bâtir aujourd'hui, une meilleure Afrique demain*, 20 septembre 2021. <https://www.afdb.org/fr/news-and-events/press-releases/burkina-faso-le-fonds-africain-de-developpement-octroie-un-financement-de-plus-de-59-millions-deuros-pour-ameliorer-lacces-des-populations-lelectricite-45670> (consulté le 3 juin 2022).
- [3] « Atlas solaire mondial ». <https://globalsolaratlas.info/download/burkina-faso> (consulté le 14 juin 2022).
- [4] K. E. N'Tsoukpoe *et al.*, « Integrated design and construction of a micro-central tower power plant », *Energy for Sustainable Development*, vol. 31, p. 1-13, avr. 2016, doi: 10.1016/j.esd.2015.11.004.
- [5] M. Liu *et al.*, « Review on concentrating solar power plants and new developments in high temperature thermal energy storage technologies », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 53, p. 1411-1432, janv. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.09.026.
- [6] E. González-Roubaud, D. Pérez-Osorio, et C. Prieto, « Review of commercial thermal energy storage in concentrated solar power plants: Steam vs. molten salts », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 80, p. 133-148, déc. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.084.
- [7] S. Alexopoulos et B. Hoffschmidt, « Advances in solar tower technology », *WIREs Energy Environ*, vol. 6, n° 1, p. e217, janv. 2017, doi: 10.1002/wene.217.
- [8] A. Pfahl *et al.*, « Progress in heliostat development », *Solar Energy*, vol. 152, p. 3-37, août 2017, doi: 10.1016/j.solener.2017.03.029.
- [9] M. Hakim *et al.*, « DEVELOPPEMENT DES HELIOSTATS DANS LES CENTRALES SOLAIRES A TOUR AU COURS DES DERNIERES ANNEES », p. 8, 2018.
- [10] A. Pfahl, M. Randt, C. Holze, et S. Unterschütz, « Autonomous light-weight heliostat with rim drives », *Solar Energy*, vol. 92, p. 230-240, juin 2013, doi: 10.1016/j.solener.2013.03.005.
- [11] J. Freeman, B. Shankar, et G. Sundaram, « Inverse kinematics of a dual linear actuator pitch/roll heliostat », Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2017, p. 030018. doi: 10.1063/1.4984361.
- [12] J. Larmuth, K. Malan, et P. Gauché, « Design and Cost Review of 2 m2 Heliostat Prototypes », p. 8.
- [13] Ghanim Kadhim Abdulsada et Afreen Emad Sa'ad-Aldeen, « Experimental Small Scale Solar Power Tower in Iraq », *JEPE*, vol. 10, n° 1, janv. 2016, doi: 10.17265/1934-8975/2016.01.009.
- [14] J. Peterka et R. Derickson, « Wind load design methods for ground-based heliostats and parabolic dish collectors », SAND-92-7009, 7105290, ON: DE93002737, sept. 1992. doi: 10.2172/7105290.

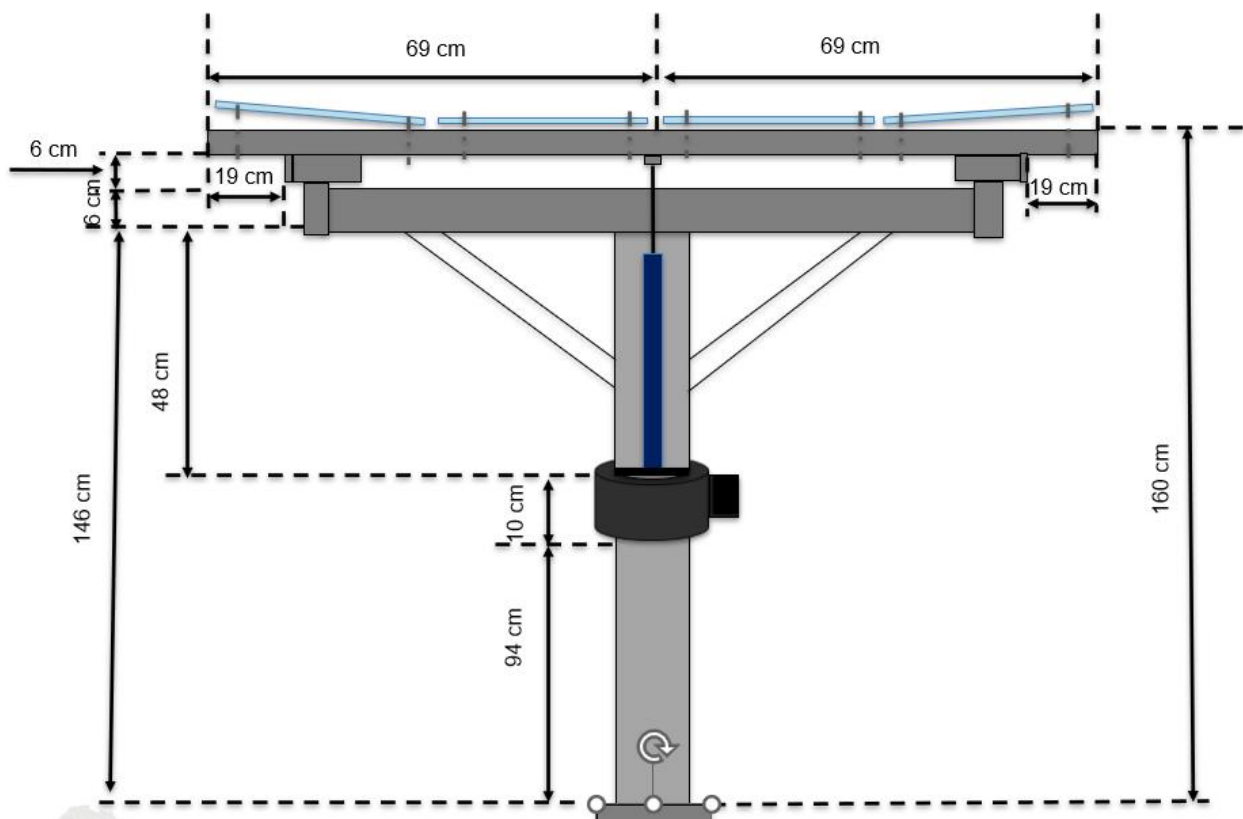
ANNEXES

Annexe 1. Conception de l'héliostat piédestal.....	37
Annexe 2. Dimensionnement du réflecteur de l'héliostat piédestal	38
Annexe 3. Dimensionnement du piédestal de l'héliostat.....	40
Annexe 4. Mise en œuvre de l'héliostat piédestal	42

Annexe 1. Conception de l'héliostat piédestal



Annexe 1 Figure 1. Réflecteur de l'héliostat piédestal



Annexe 1 Figure 2. Vue générale de face côté de l'héliostat piédestal

Annexe 2. Dimensionnement du réflecteur de l'héliostat piédestal

2-3 Calcul des sollicitations et des flèches

2-3-1 Charges réparties sur travées égales sans console

a- Suivant le plan oy

- Panne sur 2 appuis

$$\left| \begin{aligned} f_y &= \frac{5}{384} \cdot \frac{n_{Fy} L^4}{EI_x} \\ M_x &= \frac{n_{My} L^2}{8} \end{aligned} \right.$$

(5-6)

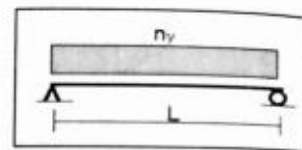


Figure 5-7

- Panne sur 3 appuis

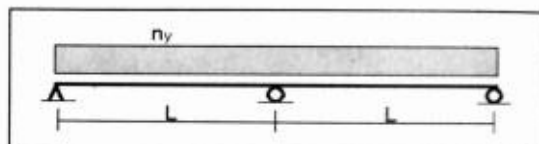


Figure 5-8

$$\left| \begin{aligned} f_y &= \frac{2,05}{384} \cdot \frac{n_{Fy} L^4}{EI_x} \\ M_x &= \frac{n_{My} L^2}{8} \end{aligned} \right.$$

(5-7)

- Panne sur 4 appuis

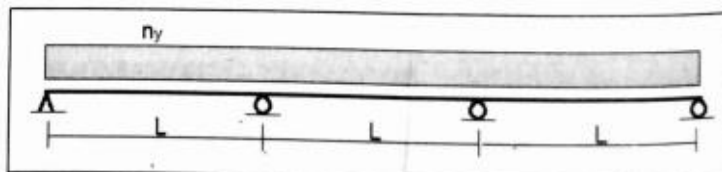


Figure 5-9

$$\left| \begin{aligned} f_y &= 0,00675 \cdot \frac{n_{Fy} L^4}{EI_x} \\ M_x &= \frac{n_{My} L^2}{8} \end{aligned} \right.$$

(5-8)

CONCEPTION, DIMENSIONNEMENT ET MISE EN ŒUVRE D'UN HÉLIOSTAT PIÉDESTAL

Annexe 2 Tableau 1. Catalogue de choix de tubes creux carrés en acier métallique de construction

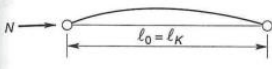
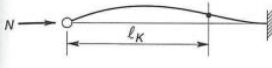
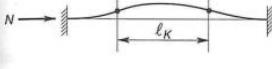
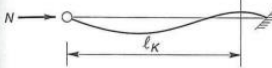
RÉF.	DÉSIGNATION	POIDS COMMERCIAL	DIMENSIONS			SECTION		SURFACE		MÈTRES/ TONNE
			b	t	r ₁	A	A ₁	A ₂	L ₂	
			mm			cm²	m²/m	m²/t	m/t	
15020	10x10x1	0,27	10	1	2	0,33	0,037	136,75	3,740	
15020	15x15x1	0,43	15	1	2	0,53	0,057	132,35	2,340	
15020	15x15x1,5	0,60	15	1,5	3	0,75	0,055	91,17	1,662	
15020	15x15x2	0,75	15	2	4	0,94	0,053	70,88	1,334	
15020	20x20x1	0,59	20	1	2	0,73	0,077	130,35	1,702	
15020	20x20x1,5	0,84	20	1,5	3	1,05	0,075	88,93	1,188	
15020	20x20x2	1,07	20	2	4	1,34	0,073	68,37	935	
15020	25x25x1	0,75	25	1	2	0,93	0,097	129,20	1,338	
15020	25x25x1,5	1,08	25	1,5	3	1,35	0,095	87,69	925	
15020	25x25x2	1,39	25	2	4	1,74	0,093	67,02	720	

VALEURS STATIQUES					CODE EAN
AXE Y-Y = Z-Z			TORSION		
$I_y = I_z$	$W_y = W_z$	I_{yz}	I_t	W_t	
cm ⁴	cm ³	cm	cm ⁴	cm ³	
0,043	0,087	0,360	0,076	0,132	
0,170	0,227	0,564	0,284	0,343	
0,219	0,292	0,540	0,384	0,447	
0,248	0,331	0,514	0,457	0,514	
0,434	0,434	0,769	0,705	0,654	
0,583	0,583	0,744	0,985	0,884	
0,692	0,692	0,720	1,21	1,06	
0,884	0,707	0,973	1,41	1,06	
1,22	0,97	0,95	2,01	1,47	
1,48	1,19	0,92	2,53	1,80	

Annexe 3. Dimensionnement du piédestal de l'héliostat

Annexe 3 Tableau 1. Différents cas d'étude de flambements

Les phénomènes d'instabilité élastique

Conditions d'appuis	m	ℓ_K
Sans déplacements des extrémités 	1	ℓ_0
	2	$0,7 \ell_0$
	4	$0,5 \ell_0$
	$1 < m < 2$	$> 0,7 \ell_0$
Avec liberté de déplacements aux extrémités 	$\frac{1}{4}$	$2 \ell_0$
	1	ℓ_0
	$m < \frac{1}{4}$	$> 2 \ell_0$

- Figure 58 -

Annexe 3 Tableau 2. Coefficient de réduction en fonction des valeurs de l'élancement

Les phénomènes d'instabilité élastique

Coefficients de réduction				
λ	Valeurs de χ pour la courbe de flambement			
	a	b	c	d
0,2	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,3	0,9775	0,9641	0,9491	0,9235
0,4	0,9528	0,9261	0,8973	0,8504
0,5	0,9243	0,8842	0,8430	0,7793
0,6	0,8900	0,8371	0,7854	0,7100
0,7	0,8477	0,7837	0,7247	0,6431
0,8	0,7957	0,7245	0,6622	0,5797
0,9	0,7339	0,6612	0,5998	0,5208
1,0	0,6656	0,5970	0,5399	0,4671
1,1	0,5960	0,5352	0,4842	0,4189
1,2	0,5300	0,4781	0,4338	0,3762
1,3	0,4703	0,4269	0,3888	0,3385
1,4	0,4179	0,3817	0,3492	0,3055
1,5	0,3724	0,3422	0,3145	0,2766
1,6	0,3332	0,3079	0,2842	0,2512
1,7	0,2994	0,2781	0,2577	0,2289
1,8	0,2702	0,2521	0,2345	0,2093
1,9	0,2449	0,2294	0,2141	0,1920
2,0	0,2229	0,2095	0,1962	0,1766
2,1	0,2036	0,1920	0,1803	0,1630
2,2	0,1867	0,1765	0,1662	0,1508
2,3	0,1717	0,1628	0,1537	0,1399
2,4	0,1585	0,1506	0,1425	0,1302
2,5	0,1467	0,1397	0,1325	0,1214
2,6	0,1362	0,1299	0,1234	0,1134
2,7	0,1267	0,1211	0,1153	0,1062
2,8	0,1182	0,1132	0,1079	0,0997
2,9	0,1105	0,1060	0,1012	0,0937
3,0	0,1036	0,0994	0,0951	0,0882

- Tableau 65 -

CONCEPTION, DIMENSIONNEMENT ET MISE EN ŒUVRE D'UN HÉLIOSTAT PIÉDESTAL

Annexe 3 Tableau 3. Catalogue de choix de tube creux ronds en acier métallique de construction

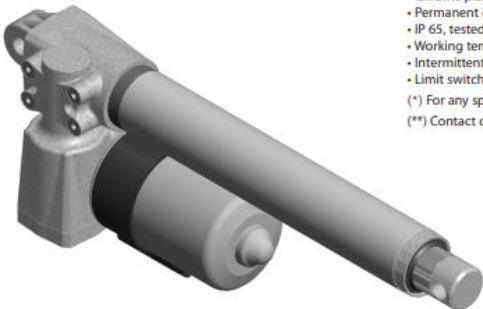
RÉF.	DÉSIGNATION	POIDS COMMERCIAL	DIMENSIONS		SECTION	SURFACE		MÈTRES/ TONNE	CODE EAN
			d	t	A	A _L	A _G	L _G	
			mm		cm²	m²/m	m²/t	m/t	
15102	1/2	0,97	21,3	2,00	1,21	0,067	68,98	1030,80	
15102	3/4	1,45	26,9	2,35	1,81	0,085	58,28	689,67	
15102	1	2,07	33,7	2,65	2,58	0,106	21,20	483,56	
15102	1 1/4	2,65	42,4	2,65	3,31	0,133	50,31	377,73	
15102	1 1/2	3,31	48,3	2,90	4,14	0,152	45,86	302,21	
15102	2	4,18	60,3	2,90	5,23	0,189	45,28	239,03	
15102	2 1/2	5,95	76,1	3,25	7,44	0,239	40,18	168,05	
15102	3	7,00	88,9	3,25	8,75	0,279	39,92	142,94	
15102	4	10,15	114,3	3,65	12,69	0,359	35,38	98,52	

Annexe 4. Mise en œuvre de l'héliostat piédestal



Annexe 4 Figure 1. Générateur de tension et courant basse fréquence

ALI2-P



ALI2-P Model C

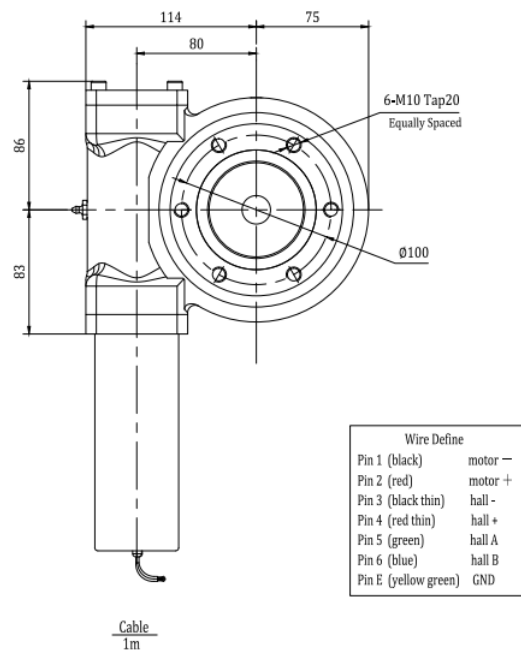
- Permanent magnet motor CE
- Double worm gearbox
- Acme lead screw or ballscrew (VRS)(**)
- Chrome plated steel push rod
- Permanent grease lubrication
- IP 65, tested according to rule CEI EN 60529
- Working temperature range -10°C +60°C
- Intermittent duty S3 30% (5 min) à 30°C*
- Limit switches, potentiometer and encoder on request

(*) For any special duty please contact our technical dept.
(**) Contact our technical dept.

ALI2-P (Vdc)						
Fmax (N)	Speed (mm/s)	Version	Motor size	Motor Power (KW)	Motor speed (rpm)	Max Current for Fmax(A) 24Vdc
2400	30	M01	61.5	-	4000	8.2
2600	20	M02	61.5	-	4000	7.8
3000	15	M03	61.5	-	4000	6
4200	10	M04	61.5	-	4000	7
4200	7	M05	61.5	-	4000	5.8
4200	5	M06	61.5	-	4000	4.8
4200	2.5	M07	61.5	-	4000	3.2
4200	1.2	M08	61.5	-	4000	2.6
4200	0.6	M09	61.5	-	4000	1.8

When stroke is longer than 350mm, check STROKE SETUP section.
 ** For 12 Vdc power supply currents are doubled and loads are 20% lower.
 BEFORE OPERATING ACTUATOR MAKE SURE YOU READ AND UNDERSTOOD BASIC OPERATIONAL INSTRUCTIONS SHOWN ON USERMANUALS, AVAILABLE FROM WEBSITE.

Annexe 4 Figure 2. Fiche technique du vérin électrique de Marque MecVel



Slewing Drive Performance Parameters		
Rated Output Speed	0.048rpm	
Output Torque	818N.m	603 lbf.ft
Tilting Moment	1100 N.m	812 lbf.ft
Holding Torque	2200N.m	1624 lbf.ft
Static Axial Rating	30 kN	6750 lbf
Static Radial Rating	15 kN	3375 lbf
Dynamic Axial Rating	9.6 kN	2160 lbf
Dynamic Radial Rating	8.4 kN	1890 lbf
Gear Ratio	62:1	
Precision	≤0.2°	
24VDC Planetary Reducer Motor Performance Data (24H/30/33)		
Rated Output Torque	33 N.m	
Rated Output Speed	3 rpm	
IP Class	IP 65	
Gear Ratio	575:1	
Rated Current	<1.9 A	

Annexe 4 Figure 3. Fiche technique de la couronne d'orientation