



OPTIMISATION DU SUIVI SOLAIRE D'UN HÉLIOSTAT PIÉDESTAL : DIAGNOSTIC ET SOLUTIONS INNOVANTES

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

Présenté et soutenu publiquement le 19/07/2024 par

Livane Sheila GOUBA (20190013)

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

**Encadrant 2iE : Dr. -Ing. ABOUBAKAR GOMNA
Encadrant externe : Ing. Dimeba Mubarack OUEDRAOGO**

Structure d'accueil du stage : Laboratoire Energie Renouvelable et Efficacité Energétique
(LabEREE) du 2iE

Jury d'évaluation du stage :

Présidente : Dr. Marie TIEMTORE/SAWADOGO

Membres et correcteurs : Dr. Gaëlle Kafira KO
Dr. Daniel YAMEGUEU
Dr.-Ing. habil. Kokouvi Edem N'TSOUKPOE (HDR),
Maître de Conférences CAMES

Promotion [2023/2024]

DEDICACES

Je dédie ce mémoire à :

- ❖ **DIEU mon créateur**, pour tous ses bienfaits dans ma vie, sans qui je n'aurais pas atteint ce stade dans mes études.
- ❖ mon père **Jean Bedel GOUBA**, un homme au grand cœur, un ami, un père dévoué, compréhensif, qui se bat nuit et jour pour le bonheur de sa famille.
- ❖ ma mère **Victoire GOUBA/OUOBA**, une femme débordante de joie et d'amour pour son prochain, une femme qui se sacrifie sans cesse pour sa famille.
- ❖ mes petites sœurs **Katel et Cheryl GOUBA**, qui m'apportent leur soutien indéfectible dans tous les moments de mon parcours scolaire.
- ❖ ma grand-mère **Thérèse OUOBA**, qui joue le rôle de mon ange gardien tout là-haut, merci pour tes prières et ta protection quotidienne.

CITATIONS

« Je ne perds jamais, soit je gagne, soit j'apprends. »

Nelson Mandela

« L'humilité est le fondement de la vraie grandeur »

Albert Einstein

REMERCIEMENTS

Mes sincères remerciements vont à l'endroit de l'institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement 2iE pour sa formation de qualité durant mes 5 ans d'études au sein de l'institut.

Mes sincères remerciement vont également à :

- ❖ mon directeur de mémoire : **Dr.-Ing. Habil. Kokouvi Edem N'TSOUKPOE (HDR)**, un professeur pour qui j'ai grande estime, notamment pour sa passion dans son domaine de recherche, sa patience à comprendre ses étudiants et pour son perfectionnisme dans tout ce qu'il fait, tel que l'enseignement, les travaux de recherches, etc. Il m'a permis de me discipliner d'avantage, de comprendre certains points de mes travaux et d'acquérir des connaissances qui me serviront pour ma carrière future.
- ❖ mon second encadrant : **Dr.-Ing. ABOUBAKAR GOMNA**, un professeur pour qui j'ai un profond respect, qui m'a guidé considérablement sur les thématiques de mon mémoire, grâce à sa disponibilité pour me prodiguer des conseils et des explications.
- ❖ monsieur **Dimeba Mubarack OUEDRAOGO**, pour sa disponibilité sur la centrale et son aide précieuse.
- ❖ monsieur **Mahamadou MAIGA**, un brillant doctorant, toujours disponible pour m'aider et me motiver à améliorer mes travaux de recherches.
- ❖ **le LabEREE**, qui a permis à ce projet de voir le jour.
- ❖ la grande famille **GOUBA**, pour vos encouragements et vos bénédictions.
- ❖ la grande famille **OUBA**, pour votre soutien permanent et vos bénédictions.
- ❖ **mes camarades de classe**, pour leurs encouragements à mon égard.

RÉSUMÉ

Le Laboratoire Energies Renouvelables et Efficacité Énergétique (LabEREE) a mis au point un prototype de microcentrale solaire à concentration, offrant une grande valeur ajoutée locale et nommé « CSP4Africa ». Cependant, ces héliostats ont rencontré des défauts mécaniques qui ont empêché la concentration précise des rayons réfléchis sur le récepteur. C'est dans cette optique que, l'héliostat piédestal a vu le jour. Les tests qui ont été effectués, après la conception et la mise en œuvre du suivi solaire en boucle fermée, ont démontré l'efficacité du système, assurant une focalisation optimale pendant 8 heures par jour. Cependant, après quelques mois, de nouveaux tests ont révélé des problèmes dans le bon fonctionnement du suivi solaire. Pour y remédier, nous avons entrepris un diagnostic de chaque dispositif impliqué dans le suivi automatique. Le type de suivi solaire utilisé est un suivi solaire actif à double axe. Durant cette phase de diagnostic, nous avons constaté une variation constante des valeurs des photorésistances du capteur quatre quadrants. Cela a engendré des déviations dans la trajectoire des rayons réfléchis. En effet, la stabilité et la similarité des valeurs entre les quatre photorésistances sont essentielles pour assurer un suivi précis. De plus nous avons également constaté une dispersion de la tâche focalisée des miroirs qui est considérée comme un problème récurrent, affectant la précision et l'efficacité du suivi solaire. Pour pallier à ces problèmes, des travaux ont été réalisés pour la mise en œuvre d'un nouveau capteur quatre quadrants et pour une nouvelle configuration des miroirs. Grâce à ces travaux, nous avons pu effectuer un test de suivi solaire avec des résultats.

Mots Clés

- 1 – CSP4Africa
- 2 – Centrale Solaire à concentration
- 3 – Héliostat piédestal
- 4 – Capteur quatre quadrants
- 5 – Système de suivi solaire

ABSTRACT

The Renewable Energy and Energy Efficiency Laboratory (LabEREE) has developed a prototype of a concentrated solar micro-power plant, offering high local added value and named CSP4Africa. However, these heliostats encountered mechanical defects that prevented the precise concentration of the reflected rays on the receiver. It is in this context that the pedestal heliostat was born. The tests that were carried out, after the design and implementation of the solar tracking, demonstrated the effectiveness of the system, ensuring optimal focusing for 8 hours per day. However, after a few months, new tests revealed problems in the proper functioning of the closed-loop solar tracking. The type of solar tracking used is an active dual-axis solar tracking system. To remedy this, we undertook a diagnosis of each device involved in automatic tracking. During this diagnostic phase, we observed a constant variation in the photoresistor values of the four-quadrant sensor. This caused deviations in the trajectory of the reflected rays. In addition, we also observed a dispersion, of the focused spot of the mirrors which is considered a recurring problem affecting the accuracy and efficiency of solar tracking. To overcome these problems, work was carried out on the construction of a new four-quadrant sensor and for a new configuration of the mirrors. Thanks to this work, we were able to perform a solar tracking test with satisfactory results.

Key words

- 1 – CSP4Africa
- 2 – Concentrated Solar power plant
- 3 – Heliostat pedestal
- 4 – Four-quadrant sensor
- 5 – Solar tracking system

LISTE DES ABREVIATIONS

CSP4Africa : Concentrated Solar Power for Africa.

LabEREE : Laboratoire Energie Renouvelable et Efficacité Energétique

SOMMAIRE

Dédicaces.....	i
Remerciements	iii
Résumé.....	iv
Abstract.....	v
Liste des abréviations	vi
Sommaire	1
Liste des tableaux.....	3
Liste des figures.....	4
I. Introduction	6
I.1. Contexte et justification.....	6
I.2. Présentation de la structure d'accueil.....	7
I.3. Présentation du projet CSP4Africa.....	8
I.4. Objectifs.....	9
II. Fondements théoriques	10
II.1. Principe de fonctionnement des héliostats piédestaux.....	10
II.2. Explication du concept de photodétection et de son application dans le suivi solaire pour ajuster automatiquement la position des héliostats	10
II.2.1. Concept de la photodétection.....	10
II.2.2. Utilisation de la photodétection dans le suivi solaire	12
II.3. Travaux précédents sur l'héliostat piédestal dans le cadre de la centrale CSP4Africa.....	13
II.3.1. Travaux de la conception, et de la mise en œuvre de l'héliostat piédestal	13
II.3.2. La mise en œuvre du suivi solaire par photodétecteur d'un héliostat piédestal et son fonctionnement	15
II.4. Conclusion.....	17
III. Matériels et Méthodes	18
III.1. Matériels	18
III.2. Méthodes.....	19
III.2.1. Identification des limites du système actuel.....	19
III.2.1.1. Examen du capteur quatre quadrants	19
III.2.1.2. La dispersion de la tâche focalisée des miroirs	20
III.2.2. Travaux réalisés pour la construction d'un nouveau capteur quatre quadrant	21
III.2.2.1. Le choix des photorésistances	21

Optimisation du suivi solaire d'un héliostat piédestal : Diagnostic et solutions innovantes

III.2.2.2. Le choix des résistances	23
III.2.3. Protocole de tests de suivi	25
III.2.3.1. Phase d'installation	25
III.2.3.2. Composants intervenants dans la configuration du système.....	25
III.2.3.3. Configuration du système.....	27
II.2.4. Conclusion.....	27
IV. Résultats et discussion.....	27
IV.1. Résultats.....	27
IV.1.1. La valeur de la résistance obtenue.....	27
IV.1.2. Résultat obtenu à la suite du diagnostic du capteur quatre quadrants	28
IV.1.2. La correction de la tâche focalisée des miroirs	30
IV.1.3. Résultats du test de suivi solaire	31
IV.2. Analyse du test de suivi solaire.....	31
IV.3. Dispositif de capteur embarqué	34
IV.4. Conclusion.....	35
V. Coût de réalisations des travaux	35
VI. Conclusion- Perspectives	36
VII. Recommandations	36
Reference bibliographique	37
Annexes	39

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Tableau comparatif entre les différents photodétecteurs.....	12
Tableau 2. Logiciels utilisés.....	18
Tableau 3. Matériels électroniques et divers	19
Tableau 4. Résultat de la valeur de la résistance calculée.....	28
Tableau 5. Devis estimatif et quantitatif des composants supplémentaires	35

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Centrale à concentration PS10 en Espagne[3]	7
Figure 2. Illustration de l'héliostat multifacette (a) et de l'héliostat piédestal (b) sur la microcentrale CSP4Africa [2].....	7
Figure 3. Illustration schématique de la centrale solaire [4]	8
Figure 4. Illustration du plan de la centrale solaire [4]	9
Figure 5. Illustration du mécanisme de suivi azimut-élévation [6].....	10
Figure 6. Illustration de la bande énergétique [9]	11
Figure 7. Illustration d'une photorésistance [10], d'une photodiode[11], d'un phototransistor[12], d'un photomultiplicateur [13] et d'un photocapteur [14].....	12
Figure 8. Illustration du positionnement des entraînements électriques [1]	14
Figure 9. Illustration des différentes parties du piédestal [1]	14
Figure 10. Illustration de l'héliostat confectionné en mouvement azimutal (a) et élévation (b) [1]	15
Figure 11. Illustration de la configuration du système de suivi solaire [2]	15
Figure 12. Phase de correction automatique du capteur quatre quadrants : rayons réfléchis parfaitement alignés (a), déviés (b) et corrigés (c) [2]	16
Figure 13. Dispositif de test de suivi solaire [2]	17
Figure 15. Illustration de la phase de test des photorésistances	20
Figure 16. Illustration de la tâche focalisée des miroirs.....	21
Figure 17. Illustration des différents éléments utilisés lors des tests de photorésistance.....	22
Figure 18. Illustration schématique du test d'une photorésistance	23
Figure 19. Illustration des différents éléments utilisés lors des tests de résistance.....	24
Figure 20. Illustration schématique du câblage des résistances avec Arduino	24
Figure 21. Illustration de la disposition de l'héliostat face au capteur	25
Figure 22. Les différents matériels intervenant dans la configuration du système	26
Figure 23. Illustration des courbes montrant les variations des écarts entre les photorésistances avant correction	29
Figure 24. Illustration des courbes montrant les variations des écarts entre les photorésistances après correction	29
Figure 25. Illustration du nouveau capteur quatre quadrants	30
Figure 26. Nouvelle disposition des miroirs	30

Optimisation du suivi solaire d'un héliostat piédestal : Diagnostic et solutions innovantes

Figure 27. Illustration de la tâche focalisée des miroirs après correction	31
Figure 28. Illustration du comportement de la tâche focalisée en matinée	32
Figure 29. Illustration du comportement de la tâche focalisée vers midi	32
Figure 30. Illustration du comportement de la tâche focalisée dans l'après-midi	33
Figure 31. Tache focale (a) en début de suivi et (b) en fin de suivi [2]	33
Figure 32. Illustration des différentes parties du capteur embarqué	34
Figure 33. Illustration des réglottes	35

I. INTRODUCTION

I.1. Contexte et justification

Le développement des héliostats à piédestal s'inscrit dans une longue tradition d'amélioration des technologies de concentration solaire. Les premiers héliostats, conçus pour suivre le mouvement du soleil et concentrer la lumière sur un point focal fixe, ont été développés au début du 20^{ème} siècle. Ces systèmes utilisaient des miroirs pour refléter les rayons solaires vers un récepteur, mais étaient souvent limités par des technologies de suivi peu précises et des mécanismes de contrôle rudimentaires. Avec l'avènement de l'énergie solaire comme source d'énergie renouvelable viable, les héliostats ont évolué pour améliorer leur efficacité et leur précision. Les héliostats à piédestal, en particulier, sont devenus une solution populaire en raison de leur conception robuste et de leur capacité à supporter de grands miroirs, augmentant ainsi la surface de collecte de lumière. Ces systèmes ont été adoptés dans plusieurs grandes centrales solaires à travers le monde, y compris des projets pionniers comme ceux à Solar Two aux États-Unis et PS10 en Espagne (Figure 1). Le Laboratoire Energies Renouvelables et Efficacité Énergétique (LabEREE) développe depuis 2014 un prototype de microcentrale solaire à concentration, offrant une grande valeur ajoutée locale et dénommé « CSP4Africa ». Ce projet a pour but de pallier au déficit énergétique et d'optimiser la production d'électricité, avec un bon rendement, dans les régions rurales et péri-urbaines. Il exploite les riches ressources solaires de la région pour fournir une énergie fiable et durable. À l'origine, la centrale d'expérimentation utilisait des héliostats multifacettes (Figure 2a). Cependant, ces héliostats ont rencontré des contraintes mécaniques qui ont empêché la concentration précise des rayons réfléchis sur le récepteur. En réponse à cela, un nouveau type d'héliostat, l'héliostat piédestal (Figure 2b), a été développé. La construction de cet héliostat a été réalisée par Florent YIBOKOU [1], avec un fonctionnement en boucle ouverte. Pour améliorer ce dispositif, Dimeba OUEDRAOGO [2] a ensuite conçu un système de suivi solaire en boucle fermée. Les tests effectués, après la conception et la mise en œuvre du suivi solaire, ont démontré l'efficacité du système, assurant une focalisation optimale pendant 8 heures par jour. Cependant, après quelques mois, de nouveaux tests ont révélé des défauts dans le suivi solaire. Étant donné que le suivi solaire doit fonctionner tout au long de l'année, il est crucial de réaliser un diagnostic détaillé de chaque dispositif impliqué dans le suivi solaire, pour identifier les causes de ces défauts et les corriger.



Figure 1. Centrale à concentration PS10 en Espagne[3]

Le principe de fonctionnement d'une centrale thermique à tour se trouve dans l'Annexe 1.

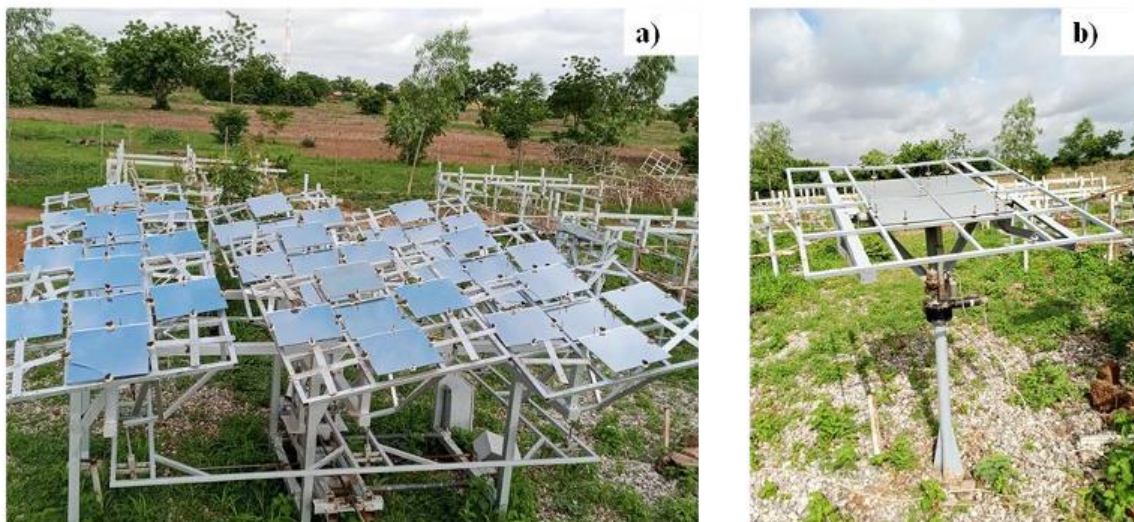


Figure 2. Illustration de l'héliostat multifacette (a) et de l'héliostat piédestal (b) sur la microcentrale CSP4Africa [2]

I.2. Présentation de la structure d'accueil

Le Laboratoire Energies Renouvelables et Efficacité Énergétique (LabEREE) est l'un des trois laboratoires de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE)

œuvrant dans le domaine de la recherche. Les travaux de ce laboratoire se concentrent sur deux principaux axes : le premier axe concerne les énergies renouvelables et les matériaux pour systèmes énergétiques (ERMaSE). Le second axe porte sur les systèmes multi-sources et l'efficacité énergétique (SMEE). Le laboratoire dispose de partenaires scientifiques tels que le Cirad, ou industriels tels que TOTAL et des ONG.

I.3. Présentation du projet CSP4Africa

La microcentrale solaire CSP4Africa comporte un champ solaire, composé de 20 héliostats multifacettes, qui sont utilisés pour focaliser les rayons solaires sur un récepteur situé au sommet d'une tour. La chaleur est absorbée par le récepteur grâce à un fluide caloporteur, qui alimente ensuite le cycle organique par l'intermédiaire d'un échangeur thermique. De plus, deux réservoirs de $4,2 \text{ m}^3$ chacun sont utilisés pour stocker le fluide caloporteur (Figure 3).

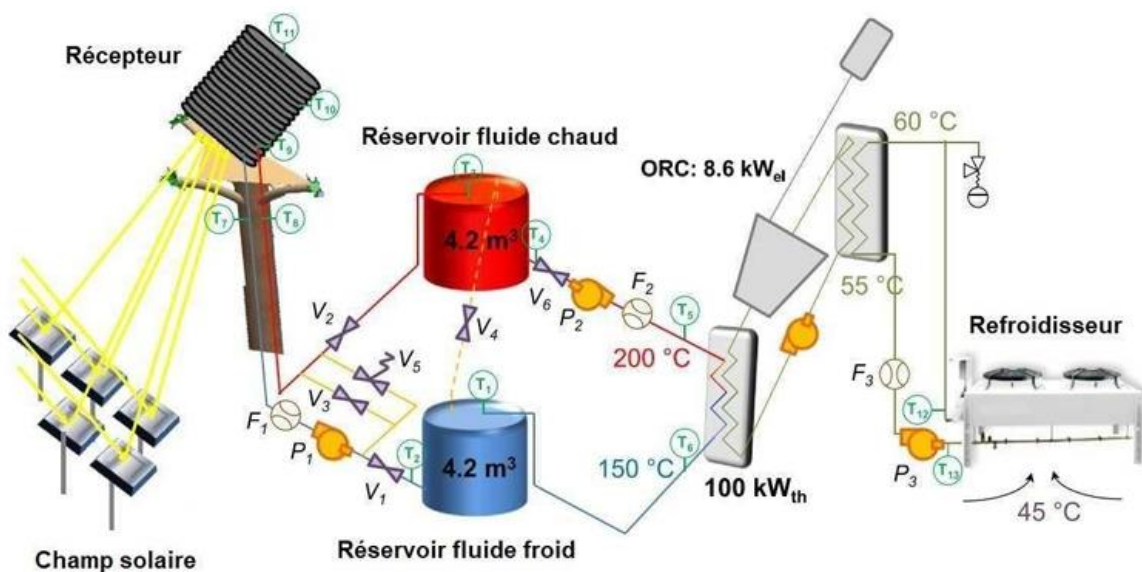


Figure 3. Illustration schématique de la centrale solaire [4]

L'huile de jatropha sert de fluide caloporteur. Le champ solaire s'étend sur une superficie de 463 m^2 , avec 38 % de la surface totale couverte par les héliostats (Figure 4). Chaque héliostat est équipé de 81 miroirs carrés de $0,11 \text{ m}^2$, permettant ainsi de concentrer l'énergie de 81 soleils sur le récepteur au sommet de la tour. La tour mesure 15 m de hauteur et le récepteur a un diamètre de 0,7 m. Chaque héliostat est équipé de deux moteurs pas à pas, chacun d'une puissance de 22 W (3,85 V ; 5 A). Un mécanisme motorisé a été mis en place pour garantir la fonction de suivi solaire.

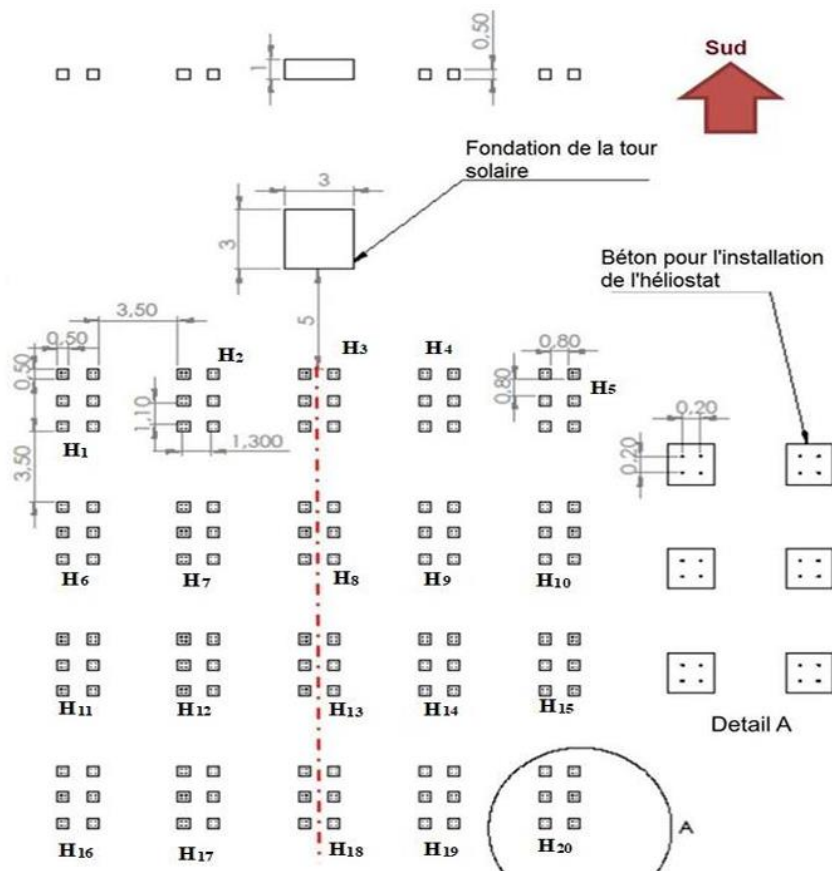


Figure 4. Illustration du plan de la centrale solaire [4]

I.4. Objectifs

L'objectif principal du stage est d'optimiser le système de suivi solaire de l'héliostat piédestal en effectuant un diagnostic des limitations actuelles et en proposant des solutions innovantes pour maximiser l'efficacité et la précision du suivi solaire. Pour concrétiser cet objectif principal, deux objectifs spécifiques ont été définis :

- ❖ Identifier les dysfonctionnements actuels du système de suivi solaire.
- ❖ Proposer des solutions d'optimisation du suivi solaire.

Pour atteindre les objectifs de ce stage, une méthodologie a été adoptée, en commençant par une étude des fondements théoriques pour comprendre le principe du suivi solaire et le contexte de la photodétection appliquée au suivi solaire. Ensuite, l'identification des dysfonctionnements initiaux du système de suivi solaire a été effectuée, documentant les interventions réalisées pour rétablir le fonctionnement et les résultats observés. Les résultats de ces tests ont été analysés et discutés pour identifier les points faibles persistants et proposer des pistes d'optimisation du suivi. Enfin, le coût de réalisation des solutions proposées a été évalué.

II. FONDEMENTS THEORIQUES

II.1. Principe de fonctionnement des héliostats piédestaux

Les héliostats sont des dispositifs qui utilisent des miroirs pour diriger la lumière du soleil dans une direction spécifique. Etant donné que la position du soleil change tout au long de la journée, les héliostats ont un mécanisme intégré pour suivre ce mouvement[5]. On distingue deux configurations courantes de mécanisme de suivi : l'azimut-élévation et l'horizontal fixe. Dans notre cas, l'héliostat utilise le mécanisme azimut-élévation. Dans ce mécanisme, l'axe primaire pivote autour du zénith, autrement dit l'axe ancré au sol, permettant ainsi le mouvement azimutal de l'héliostat. L'axe secondaire pour sa part, tourne autour de l'horizontal, générant ainsi le mouvement d'élévation qui permet de suivre la trajectoire du soleil dans le ciel. Ce type de mécanisme (Figure 5) est généralement actionné par deux entraînements rotatifs orthogonaux ou une combinaison d'entraînement rotatif azimutal et d'un actionneur linéaire [6]. Pour ce prototype, une couronne joue le rôle de moteur rotatif pour le mouvement azimutal, tandis qu'un vérin joue le rôle d'actionneur linéaire pour le mouvement d'élévation.

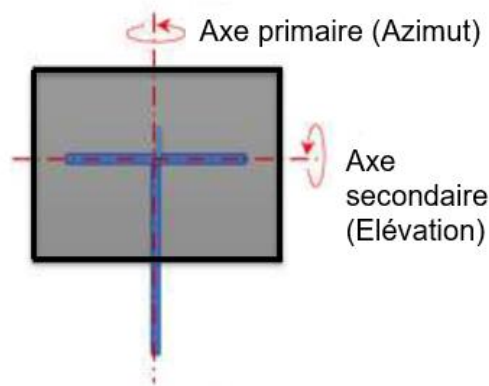


Figure 5. Illustration du mécanisme de suivi azimut-élévation [6]

II.2. Explication du concept de photodétection et de son application dans le suivi solaire pour ajuster automatiquement la position des héliostats

II.2.1. Concept de la photodétection

La photodétection est une technologie utilisée pour détecter et mesurer la lumière. Les photodétecteurs sont des dispositifs capables de transformer la lumière qu'ils absorbent à une grandeur mesurable tel qu'un courant ou une tension électrique. Le fonctionnement des

photodétecteurs repose sur l'utilisation de matériaux semi-conducteur tels que le silicium ou le germanium [7]. Il existe deux types de photodétecteurs : les passifs, comme les cellules photovoltaïques, qui produisent un signal électrique sans source d'énergie supplémentaire, et les actifs, qui nécessitent une alimentation auxiliaire. Par exemple, les photodiodes et les phototransistors nécessitent une tension d'alimentation pour polariser leurs jonctions. Ces détecteurs exploitent le phénomène photoélectrique en modifiant l'état des électrons dans le matériau photosensible, grâce à l'absorption des photons incidents. Pour que ce phénomène se produise, l'énergie des photons incidents doit être supérieure à la bande interdite énergétique du matériau [8]. La bande interdite du matériau représente la différence d'énergie entre la bande de valence (où se trouvent les électrons liés) et la bande de conduction (où les électrons sont libres de se déplacer) dans un matériau semi-conducteur (Figure 6).

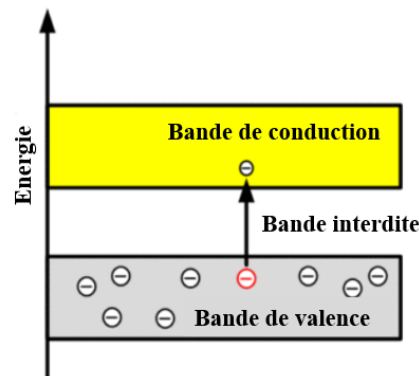


Figure 6. Illustration de la bande énergétique [9]

Lorsqu'un photon est absorbé, il peut se produire deux phénomènes que sont la photoémission, c'est-à-dire la sortie de l'électron hors du matériau photosensible et la photoconductivité, l'électron est libéré à l'intérieur du matériau [8].

Il existe différentes sortes de photodétecteurs tels que la photorésistance, la photodiode, le phototransistor, le photomultiplicateur et le photocapteur (Figure 7). La performance des photodétecteurs s'évalue en fonction de leur rapidité, de leur linéarité à la lumière, de leur précision et de leur sensibilité (Tableau 1).

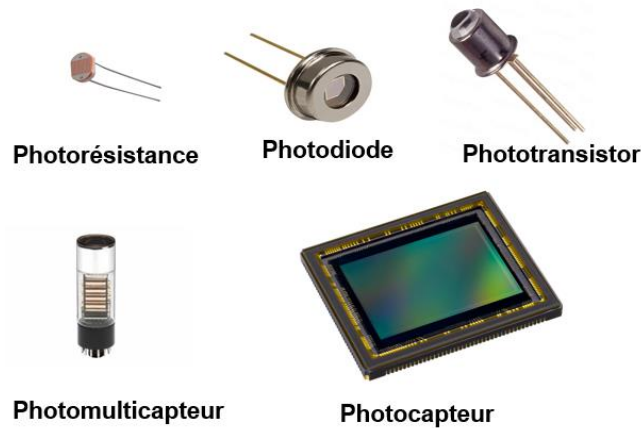


Figure 7. Illustration d'une photorésistance [10], d'une photodiode[11], d'un phototransistor[12], d'un photomultiplicateur [13] et d'un photocapteur [14]

Le domaine de la photodétection s'applique dans le suivi solaire où les photodétecteurs servent à suivre la position du soleil en détectant la lumière reçue et en ajustant l'orientation des panneaux solaires ou des héliostats. Il s'applique également dans la communication optique où ils sont essentiels dans les fibres optiques, pour convertir les signaux lumineux en signaux électriques. On les retrouve aussi dans les scanners de code-barres, les systèmes de vision industrielle et dans le domaine de la sécurité et de la surveillance.

Tableau 1. Tableau comparatif entre les différents photodétecteurs

Critère	Photomultiplicateur	Photocapteur	Photodiode	Phototransistor	Photorésistance
Rapidité	Excellent	Très bon	Très bon	Bon	Moyen
Linéarité	Excellent	Très bon	Très bon	Bon	Bon
Précision	Excellent	Très bon	Très bon	Bon	Moyen
Sensibilité	Excellent	Très bon	Très bon	Très bon	Bon
Coût	Très élevé	Moyen	Moyen	Moyen	Faible

II.2.2. Utilisation de la photodétection dans le suivi solaire

Dans les technologies de concentration solaire, le système de suivi solaire joue un rôle crucial dans l'optimisation de la production de l'énergie [15]. Des chercheurs ont utilisé différentes méthodes pour suivre la course du soleil. L'une des méthodes impliquait l'utilisation d'une photorésistance où d'une webcam pour capturer la position du soleil [16]. L'autre approche consistait à utiliser une caméra avec une vision de 180° pour créer une image panoramique, estimant ainsi les angles d'azimut et d'élévation [17].

Optimisation du suivi solaire d'un héliostat piédestal : Diagnostic et solutions innovantes

Les photodétecteurs effectuent un rôle essentiel pour le suivi solaire en permettant de surveiller et d'ajuster la position de l'héliostat. Ils fonctionnent en détectant la lumière incidente. Des dispositifs comme la photodiode ou le phototransistor capturent cette lumière et la convertissent en signaux électriques proportionnels à l'intensité lumineuse reçue. Ces signaux, générés par la création de paires électron-trou dans le matériau semi-conducteur des photodétecteurs, sont ensuite traités par un contrôleur électronique. Le contrôleur compare les données de différents détecteurs pour déterminer la position relative du soleil. Selon les signaux traités, le contrôleur ajuste l'orientation des héliostats à l'aide de moteurs ou d'actionneurs, permettant de suivre précisément le mouvement du soleil tout au long de la journée. Les photodétecteurs offrent une grande précision et efficacité pour le suivi solaire. Ils permettent des ajustements en temps réel grâce à leur sensibilité aux variations de lumière, assurant une performance optimale même par temps nuageux. En utilisant quatre photorésistances placées en quadrants, le système mesure les différences de lumière pour ajuster l'orientation de l'héliostat. En conclusion, l'intégration de la photodétection dans le suivi solaire assure une orientation optimale des dispositifs tout au long de la journée.

II.3. Travaux précédents sur l'héliostat piédestal dans le cadre de la centrale CSP4Africa

II.3.1. Travaux de la conception, et de la mise en œuvre de l'héliostat piédestal

Diverses études ont été menées par Florent YIBOKOU [1] dans le but de dimensionner et de mettre en œuvre un héliostat piédestal. Ce type d'héliostat est un modèle du groupe de recherche sur l'énergie solaire thermique (STERG) dénommé Helio-40. L'héliostat est composé de deux parties qui sont le réflecteur et le piédestal. Le modèle de réflecteur conçu est un carré avec une surface réfléchissante de 1,7 m² composé de 16 miroirs de 33 cm. Le réflecteur devrait former une tâche focalisée carrée de 33 cm de côté, correspondant aux dimensions du récepteur de 70 cm de diamètre monté sur la tour de la centrale CSP4Africa. Pour la structure métallique, un tube carré en acier a été choisi après avoir converti les charges surfaciques en charges linéiques. Les miroirs d'une masse de 0.82 kg chacun, engendrent une charge totale de 13,12 kg pour les 16 miroirs. Pour les entraînements électriques (Figure 8), le choix du vérin électrique, essentiel pour le suivi en élévations, s'est basé sur plusieurs paramètres y compris la charge,

Optimisation du suivi solaire d'un héliostat piédestal : Diagnostic et solutions innovantes

l'environnement de fonctionnement, la vitesse et la course. La couronne d'orientation est alimentée par une tension de 12 VCC (tension continue) [1].

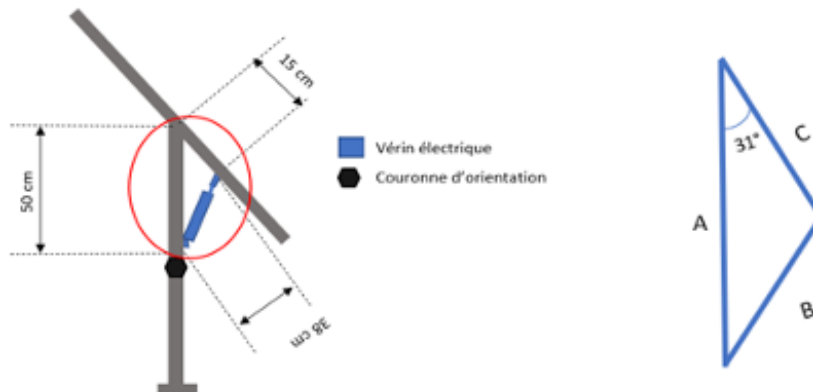


Figure 8. Illustration du positionnement des entraînements électriques [1]

L'héliostat en acier galvanisé, se compose de deux parties : la partie supérieure supportant le réflecteur et les miroirs, et la partie inférieure supportant la partie supérieure et la couronne d'orientation (Figure 9). Le dimensionnement a principalement pris en compte les risques de flambement.

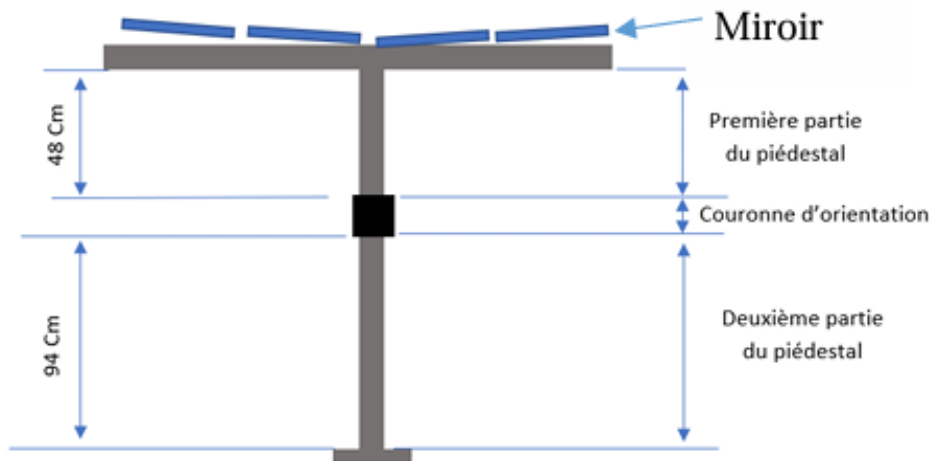


Figure 9. Illustration des différentes parties du piédestal [1]

Des tests ont également été effectués pour s'assurer du bon fonctionnement de l'héliostat en mouvements d'élévation et azimutaux (Figure 10). Cependant, le système conçu par Florent YIBOKOU [1] fonctionne en boucle ouverte, autrement dit il n'utilise pas de retour d'information pour ajuster la position des héliostats en fonction de la position réelle du soleil.

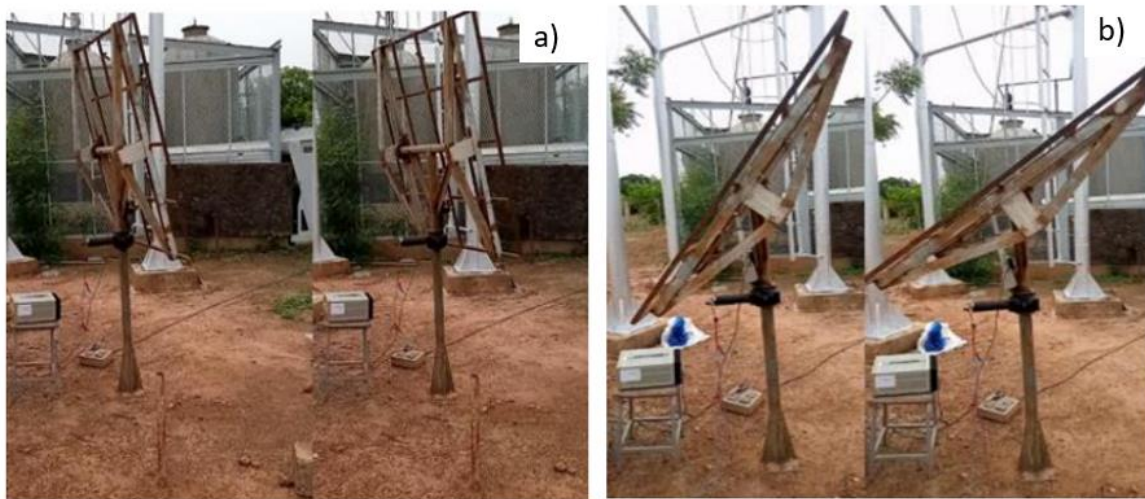


Figure 10. Illustration de l'héliostat confectionné en mouvement azimutal (a) et élévation (b) [1]

II.3.2. La mise en œuvre du suivi solaire par photodétecteur d'un héliostat piédestal et son fonctionnement

Dimeba OUEDRAOGO [2] a développé un système de suivi solaire en boucle fermée, ce qui implique la présence de capteur pour surveiller la position du soleil en temps réel et ajuster la position des héliostats en conséquence (Figure 11), offrant ainsi une précision et une efficacité accrue.

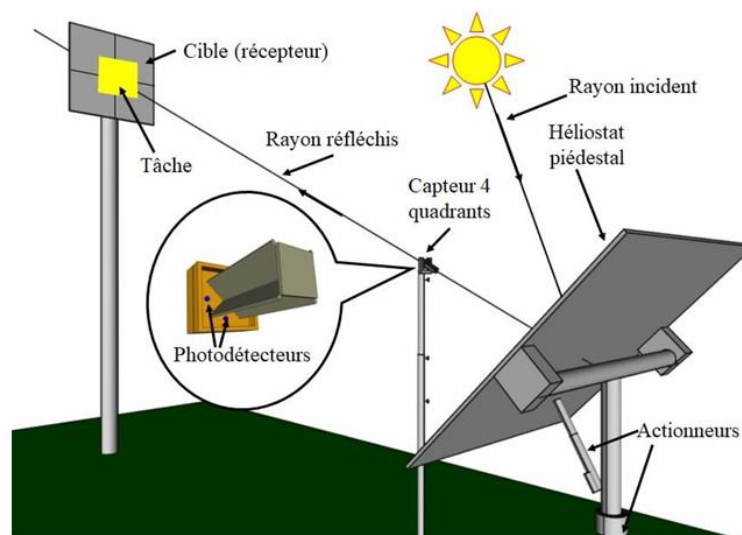


Figure 11. Illustration de la configuration du système de suivi solaire [2]

La mise en œuvre de ce système de suivi solaire a nécessité plusieurs étapes telles que la conception du capteur à quatre quadrants et l'installation d'un dispositif de commande et

Optimisation du suivi solaire d'un héliostat piédestal : Diagnostic et solutions innovantes

d'acquisition de données. Le capteur à quatre quadrants est crucial pour l'orientation précise des rayons réfléchis vers le récepteur. Chaque quadrant du capteur est équipé d'une photorésistance, permettant de détecter l'absence ou la présence de lumière incidente. Lorsque les quatre photorésistances sont ombragées cela signifie que les rayons réfléchis ont atteint la cible de manière centrée et précise (Figure 12a). Lorsque l'ombre détectée par les photorésistances change, suggérant une déviation dans la trajectoire des rayons réfléchis, le capteur initie un processus visant à corriger cette déviation. Si l'un des quadrants n'est pas ombragé (Figure 12b), cela indique une déviation dans la direction des rayons réfléchis. Le capteur réagit en envoyant un signal qui active le mouvement de l'héliostat. Ce mouvement peut soit être en élévation, si la déviation concerne la position verticale, soit en azimut, si la déviation concerne leur position horizontale.

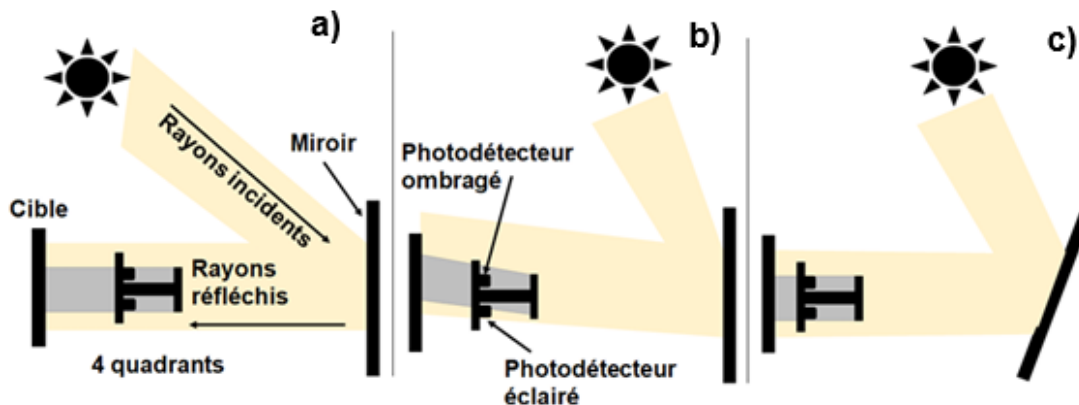


Figure 12. Phase de correction automatique du capteur quatre quadrants : rayons réfléchies parfaitement alignés (a), déviés (b) et corrigés (c) [2]

Ainsi, grâce à cette rétroaction en temps réel du capteur à quatre quadrants, l'orientation précise des rayons réfléchis est assurée (Figure 12c), garantissant un fonctionnement optimal du système de suivi solaire. Des tests de suivi solaire (Figure 13) ont été menés pour vérifier le bon fonctionnement du système. Ces tests ont révélé une focalisation efficace de la tâche pendant 8 heures.



Figure 13. Dispositif de test de suivi solaire [2]

II.4. Conclusion partielle

L'intégration de la photodétection dans le suivi solaire des héliostats, en particulier avec des configurations en boucle fermée, améliore considérablement l'efficacité énergétique et la précision de l'orientation. Grâce à des dispositifs tels que le capteur à quatre quadrants, les héliostats peuvent suivre et ajuster en temps réel leur position par rapport au soleil, assurant une collecte optimale de l'énergie solaire. Les travaux de recherches ont démontré une focalisation des rayons pendant de longues périodes, maximisant ainsi la production d'énergie tout en minimisant les coûts d'exploitation.

III. MATERIELS ET METHODES

Pour optimiser le suivi solaire, des matériels spécifiques tels que des composants, des dispositifs et des logiciels ont été utilisés. De plus, une approche méthodologique a été appliquée.

III.1. Matériels

Les logiciels (Tableau 2) ont été utilisés pour accomplir des tâches spécifiques :

- ❖ Arduino : Il est utilisé pour contrôler le capteur en lisant les valeurs et en traitant les données. Il est utilisé également pour le contrôle de la couronne et du vérin.
- ❖ Excel : Il permet de produire des graphiques, tableaux et effectuer des calculs.
- ❖ Fritzing : Il est utilisé pour la conception de schémas en utilisant sa bibliothèque de composants électroniques courants.
- ❖ Isis Proteus : Il permet de produire des schémas électroniques, disposant également d'une bibliothèque de composants électroniques.

Tableau 2. Logiciels utilisés

Logiciels	Version
Arduino IDE	1.8.19
Excel	2016
Fritzing	0.9.3
Isis Proteus	8.15

Quant aux matériels utilisés, ils sont répertoriés dans le Tableau 3.

Tableau 3. Matériels électroniques et divers

Matériels électroniques et divers	Quantité
Carte Arduino Uno	01
Carte Arduino Nano	01
Carte pilote moteur L298N	01
Platine d'essai	02
Photorésistance de 5 mm de diamètre	04
Potentiomètre	02
Fer à souder	01
Résistance de 10 k Ω	04
Redresseur 220 V/12 V-20 A	01
Régulateur de tension	01
Vérin électrique	01
Couronne d'entraînement rotatif	01
Cible en bois	01
Caméra	01
Trépied	01

III.2. Méthodes

III.2.1. Identification des limites du système actuel

Nous avons entrepris un examen de chaque dispositif impliqué dans le suivi automatique. Tout d'abord nous avons examiné l'ensemble du dispositif électronique, incluant le capteur quatre quadrants, pour nous assurer de son bon fonctionnement. Ensuite, nous avons également vérifié la dispersion des tâches focalisées de chaque miroir pour nous assurer qu'elle ne contribuait pas au dysfonctionnement du système

III.2.1.1. Examen du capteur quatre quadrants

Les différentes étapes de l'identification des défauts du capteur sont :

❖ **Etape 1** : Vérifier l'état physique du capteur et des connexions

Il s'agit d'examiner le capteur pour détecter tout dommage visible (fissures, déformations, etc.), vérifier l'intégrité des fils et des connexions électriques, et de s'assurer que le capteur est correctement monté et orienté.

❖ **Etape 2** : S'assurer que chaque photorésistance donne une réponse de manière cohérente avec une luminosité uniforme.

Optimisation du suivi solaire d'un héliostat piédestal : Diagnostic et solutions innovantes

Nous devons placer le capteur sans le masque dans un environnement, offrant une luminosité uniforme, pour chaque photorésistance et mesurer leurs valeurs, puis les comparer pour s'assurer qu'elles sont similaires. La Figure 14 illustre cette étape où les photorésistances sont uniformément éclairées à la lumière du soleil.

❖ **Etape 3** : Identifier les potentiels problèmes et proposer des solutions

Il s'agit d'analyser les valeurs mesurées, et d'identifier les incohérences dans les mesures et de proposer des solutions.

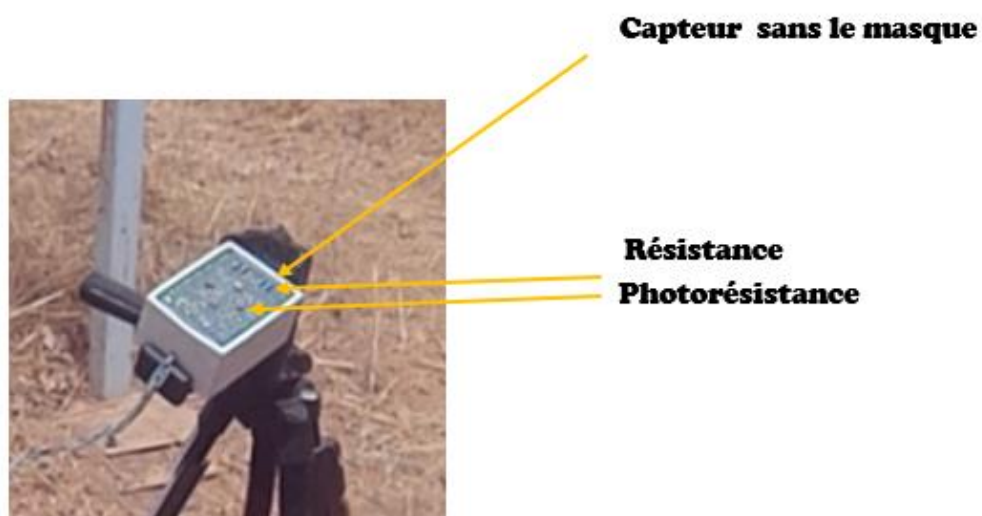


Figure 14. Illustration de la phase de test des photorésistances

Il est important de noter que, les valeurs lues par les photorésistances sont initialement des tensions. Ces tensions sont envoyées à l'Arduino, qui les convertit en valeurs numériques comprises entre 0 et 1023 à l'aide de son convertisseur analogique-numérique (5 V correspondant à 1023). Par conséquent ces valeurs numériques n'ont pas d'unité.

III.2.1.2. La dispersion de la tâche focalisée des miroirs

Lorsque nous avons effectué des tests en mode manuel, c'est-à-dire orienter les miroirs sur la cible à l'aide de potentiomètre, nous avons rencontré une dispersion rapide de la tâche focalisée (Figure 15) des miroirs une heure après être positionné sur la cible, ce qui risquait d'affecter la précision et l'efficacité du suivi solaire. Cette dispersion s'est produite en raison du mauvais alignement des miroirs engendrant une déviation de la trajectoire lumineuse.



Figure 15. Illustration de la tâche focalisée des miroirs

Comme méthodologie adaptée pour résoudre ce problème, nous avons adopté une approche spécifique. Nous avons tout d'abord introduit un miroir plan central que nous avons considéré comme le point de référence de la tâche. Ensuite nous avons placé les autres miroirs au-dessus de celui-ci, en prenant en compte le miroir central comme origine de la tâche.

III.2.2. Travaux réalisés pour la construction d'un nouveau capteur quatre quadrant

Le processus de construction du capteur à quatre quadrants s'est déroulé en plusieurs étapes méthodiques. Tout d'abord, une attention particulière a été portée à la sélection des photorésistances où chaque paire a été minutieusement examinée pour garantir des valeurs comparables. De même, la sélection des résistances s'est faite par paire, dans le but d'assurer une cohérence dans les mesures électriques du capteur. Par la suite, un contrôle précis a été effectué pour vérifier que les valeurs des quatre photorésistances sont approximativement égales. Cette étape est cruciale pour garantir une sensibilité uniforme du capteur à la lumière incidente, ce qui est essentiel pour son bon fonctionnement.

III.2.2.1. Le choix des photorésistances

Pour sélectionner les paires de photorésistances (Annexe 2), nous avons suivi une méthodologie précise. Tout d'abord, nous avons mesuré les valeurs de huit photorésistances afin de les comparer et de choisir celle dont les valeurs étaient les plus similaires. Cette mesure a été réalisée en utilisant un pont diviseur de tension avec une résistance de $10\text{ k}\Omega$ [18] et une

Optimisation du suivi solaire d'un héliostat piédestal : Diagnostic et solutions innovantes

photorésistance (Figure 16). Tout d'abord, nous avons isolé chaque photorésistance avec une LED afin d'obtenir un éclairage uniforme pour chacune. Cela nous a permis de comparer les valeurs de luminosité fournies par les photorésistances et de détecter toute anomalie éventuelle. Pour isoler la photorésistance, celle-ci ainsi qu'une led ont été placés à l'intérieur d'un tube également appelé chambre de test de sorte que seule la led éclaire la photorésistance. Ce processus (Figure 17) a été appliqué à toutes les photorésistances afin de garantir une sélection rigoureuse et homogène des paires. Cette méthode est basée sur des notions fondamentales telles que le pont diviseur de tension.

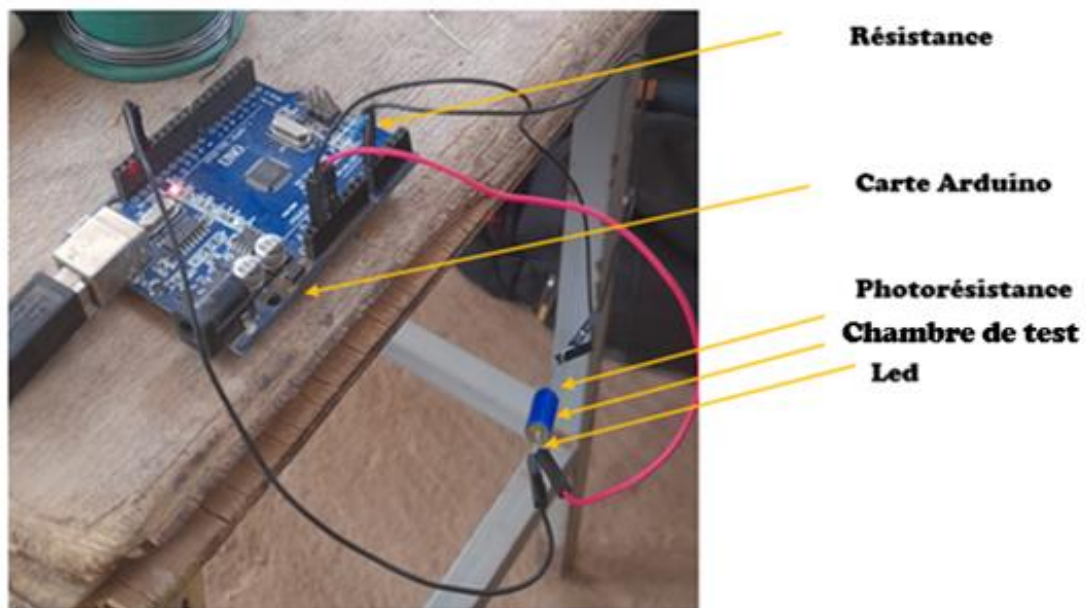


Figure 16. Illustration des différents éléments utilisés lors des tests de photorésistance

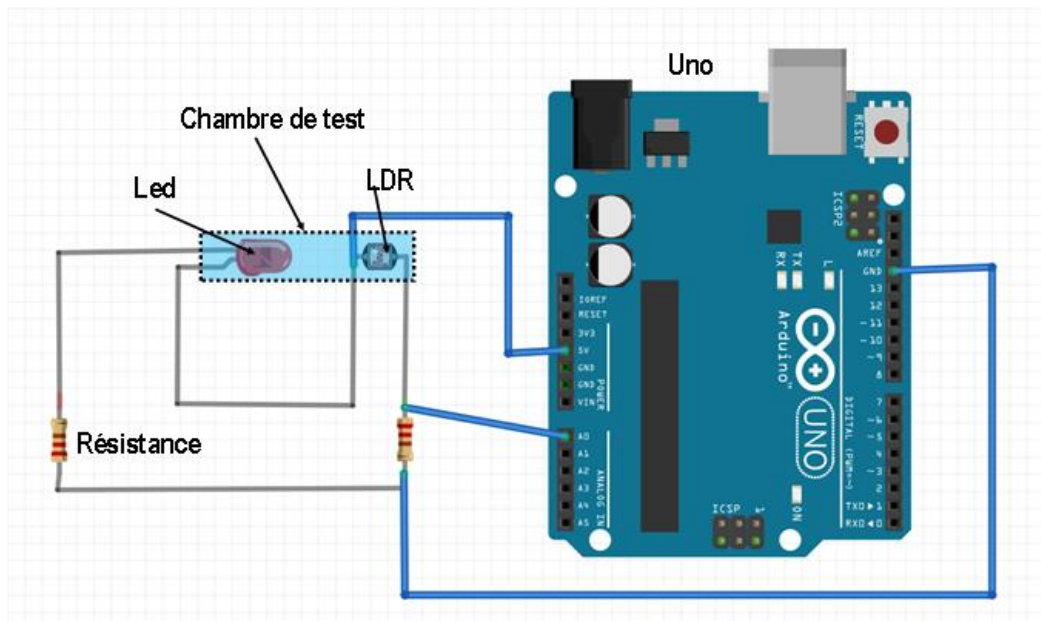


Figure 17. Illustration schématique du test d'une photorésistance

Pour calculer la valeur de la résistance à utiliser nous avons procédé comme suite :

Dans la fiche technique des photorésistances, la luminosité standard est de 10 lux avec des résistances comprises entre 30 et 50 k Ω . Le Gamma (γ) est déterminé dans la fiche technique à partir de 10 lux et 100 lux. Ainsi, nous avons appliqué la formule suivante :

$$R_{100} = \frac{R_{10}}{10^\gamma} \quad (1) [19]$$

Avec :

- ❖ R_{100} , la résistance de la photorésistance pour un éclairement de 100 lux.
- ❖ $R_{10} = 50 \text{ k}\Omega$, la résistance de la photorésistance pour un éclairement de 10 lux.
- ❖ $\gamma = 0,7$; montrant la sensibilité de la photorésistance à l'éclairement lumineux

La résistance de la photorésistance diminue de manière exponentielle lorsque l'éclairement lumineux augmente.

III.2.2.2. Le choix des résistances

Les photorésistances sont des composants sensibles aux variations de courant et de tension. Une surcharge de courant peut endommager ses composants affectant la précision et l'efficacité du capteur à quatre quadrants. Pour prévenir cela nous avons intégré des résistances de protection dans le circuit. Nous avons suivi une procédure pour sélectionner les résistances. Il était crucial d'avoir quatre résistances identiques, appariées deux à deux pour les raisons suivantes. D'abord,

Optimisation du suivi solaire d'un héliostat piédestal : Diagnostic et solutions innovantes

les résistances identiques assurent que le courant traversant chaque photorésistance est le même, permettant ainsi une comparaison équilibrée des signaux. Ensuite, elles assurent la symétrie dans le circuit. Enfin les résistances identiques assurent la fiabilité des et la stabilité des mesures. Le processus de mesure s'est effectué en utilisant un pont diviseur de tension pour chaque paire de résistances (Figure 18). L'objectif était de s'assurer que la tension résultante pour chaque résistance, après le pont diviseur, atteignait précisément 512 qui est une valeur numérique fourni par Arduino. Cette procédure (Figure 19) garantissait que chaque résistance fournissait une contribution égale au circuit, assurant ainsi une répartition uniforme de la tension et un fonctionnement cohérent du capteur à quatre quadrants.

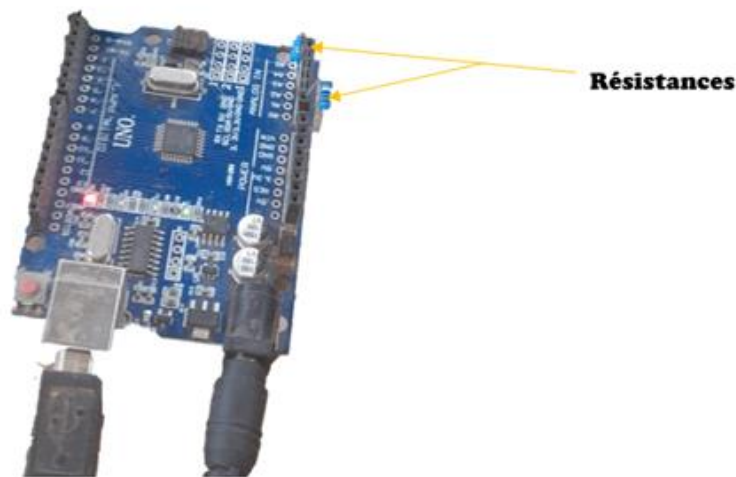


Figure 18. Illustration des différents éléments utilisés lors des tests de résistance

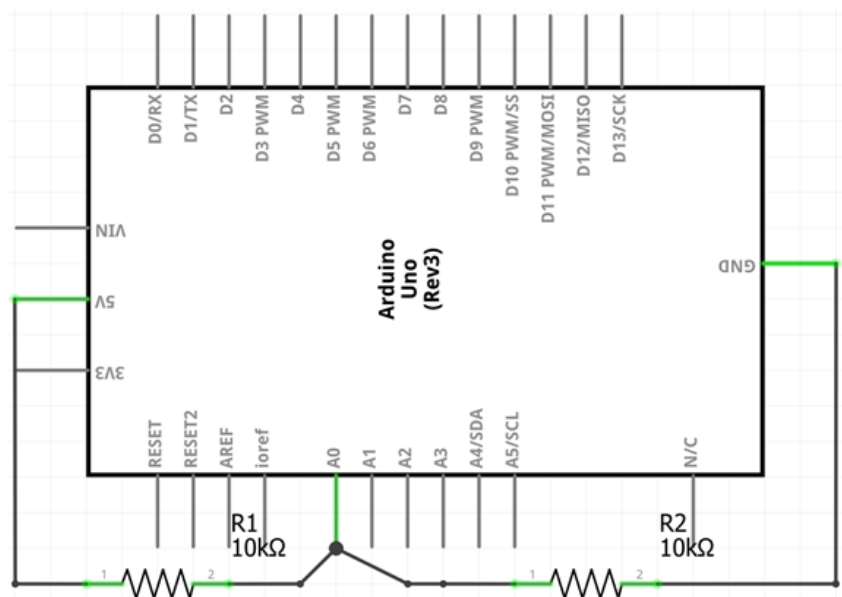


Figure 19. Illustration schématique du câblage des résistances avec Arduino

Une fois le capteur quatre quadrants conçu, il nous faudra procéder à la phase des tests, mais avant, nous devons mettre au point un protocole de test pour le bon déroulement des tests de suivi solaire.

III.2.3. Protocole de tests de suivi

III.2.3.1. Phase d'installation

- ❖ Vérifier que l'héliostat et le capteur quatre quadrants sont opérationnels.
- ❖ Disposer le capteur quatre quadrants à une distance de 1,15 m du centre du réflecteur (Figure 20).
- ❖ Positionner le capteur de manière sécurisée pour éviter tout déplacement durant le test.

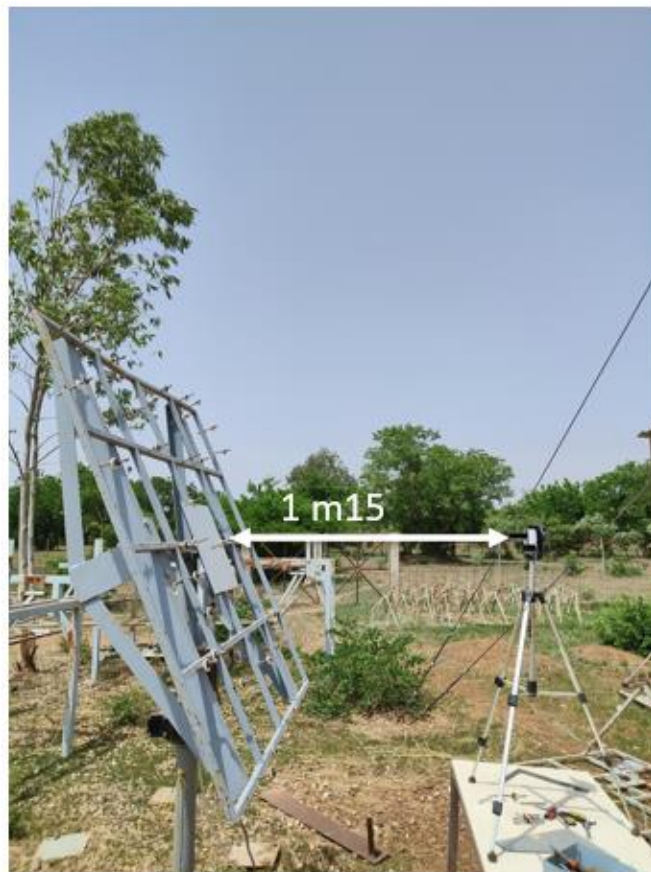


Figure 20. Illustration de la disposition de l'héliostat face au capteur

III.2.3.2. Composants intervenants dans la configuration du système

Les différents composants (Figure 21) intervenants dans la configuration du système sont :

Optimisation du suivi solaire d'un héliostat piédestal : Diagnostic et solutions innovantes

- ❖ La carte Arduino : Elle joue le rôle de cerveau du système, elle reçoit les données, lit les valeurs du capteur, commande les actionneurs en passant par la carte motrice, et communique avec d'autres modules tels que l'ordinateur ou un microcontrôleur.
- ❖ La carte L298N : Elle a pour rôle de traiter les informations de Arduino concernant le capteur et d'actionner les actionneurs pour ajuster la position du réflecteur. Ses caractéristiques se trouvent dans l'Annexe 2.
- ❖ Le potentiomètre : Il permet de contrôler les actionneurs en mode manuel.
- ❖ Le commutateur : Il permet de passer du mode manuel au mode automatique et inversement.
- ❖ Le régulateur Arduino : Il a pour rôle de permettre à la carte d'Arduino de recevoir une tension constante, généralement entre 3,3 V et 5 V.
- ❖ L'alimentation 12 V : Elle permet de fournir une source de puissance suffisante et adaptable pour les divers composants.
- ❖ Le code Arduino écrit par Dimeba OUEDRAOGO [2] qui contient les instructions fournies à Arduino pour vérifier et comparer les valeurs des photorésistances. Le code se trouve dans l'Annexe 3.

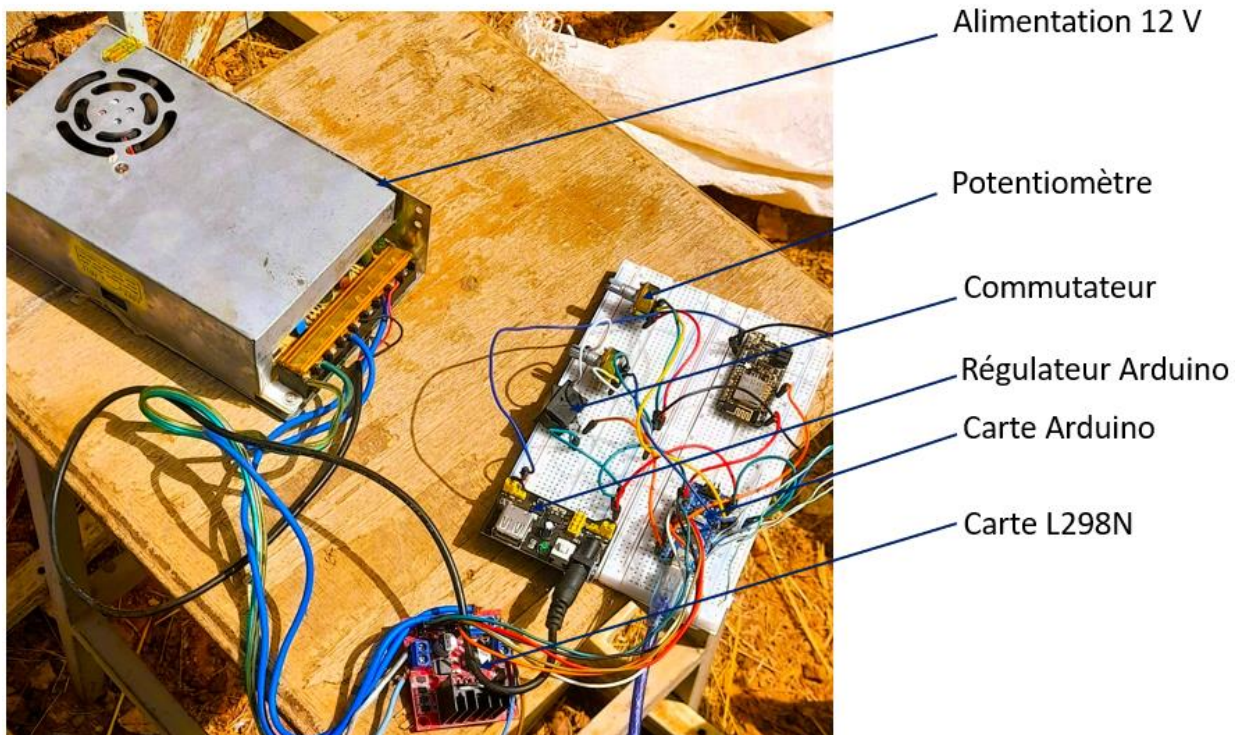


Figure 21. Les différents matériels intervenant dans la configuration du système

III.2.3.3. Configuration du système

La configuration correcte du matériel est essentielle pour assurer un fonctionnement précis et optimal du système. Les étapes de configuration nécessaires pour mettre en place le système de suivi solaire utilisant le capteur à quatre quadrants, les actionneurs, et les contrôleurs sont les suivantes :

- ❖ Raccorder les actionneurs à la carte motrice L298N.
- ❖ Raccorder la carte motrice L298N à la carte Arduino
- ❖ Câbler le capteur quatre quadrant à la carte Arduino
- ❖ Raccorder la carte motrice L298N et le régulateur à l'alimentation 12 V.
- ❖ S'assurer que toutes les connexions sont sécurisées et correctes.
- ❖ Mettre le commutateur en position ON pour activer le pilotage manuel.
- ❖ Se servir des potentiomètres pour orienter la tâche focale vers la cible.
- ❖ Mettre le commutateur en position OFF pour activer le pilotage automatique.

II.2.4. Conclusion partielle

Pour optimiser le suivi solaire, des logiciels tels que Arduino, Excel, été utilisés pour contrôler le capteur et analyser les données et les logiciels tels que Fritzing et Isis Proteus ont été utilisés pour concevoir des schémas électroniques. Un nouveau capteur à quatre quadrants a été conçu en sélectionnant des photorésistances et des résistances appariées pour assurer une sensibilité uniforme et une précision dans les mesures. Le processus de configuration du système a impliqué l'intégration de composants électroniques comme des cartes Arduino et L298N, ainsi que la mise en place d'un protocole de test pour vérifier le bon fonctionnement et l'efficacité du système de suivi solaire.

IV. RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1. Résultats

IV.1.1. La valeur de la résistance obtenue

La valeur de la résistance obtenue se trouve dans le Tableau 4. Ces résistances permettent de protéger les photorésistances contre les surcharges de courant et les surtensions.

Tableau 4. Résultat de la valeur de la résistance calculée

Equation	Résultat
(1)	$R_{100} = \frac{50}{10^{0.7}} = 9,976 \text{ k}\Omega \approx 10 \text{ k}\Omega$

Les résistances associées aux photorésistances jouent un rôle dans la protection et le bon fonctionnement du circuit. Elles servent principalement à limiter le courant traversant les photorésistances, empêchant ainsi les surcharges de courant qui pourraient endommager les composants sensibles. En effet, lorsque la photorésistance est exposée à une forte intensité lumineuse, sa résistance interne diminue, ce qui pourrait entraîner un courant excessif dans le circuit. Les résistances ajoutées atténuent ce risque en réduisant le courant à un niveau sûr, tout en maintenant une tension stable à travers la photorésistance. De plus, elles protègent le circuit contre les surtensions, garantissant ainsi la fiabilité et la durabilité du système de détection de lumière. Dans ce contexte, la résistance de 10 kΩ a été choisie pour assurer un équilibre optimal entre protection et performance du circuit.

Cette opération justifie le choix de la résistance de 10 kΩ utilisée pour la photorésistance

IV.1.2. Résultat obtenu à la suite du diagnostic du capteur quatre quadrants

Lors de l'examen des valeurs numériques (Annexe 4) de chaque photorésistance, il a été observé un écart significatif concernant celle située du côté droit par rapport aux trois autres. De manière préoccupante, l'écart fluctuait toutes les secondes, variant entre -600 et 300 (Figure 22). Ce qui indiquait une instabilité dans la lumière incidente. En effet, la plage optimale des valeurs des écarts des photorésistances est comprise entre 0 et 40. Ces valeurs représentent les différences d'intensité lumineuse perçues par chaque quadrant du capteur. Cette variation constante des valeurs des photorésistances a engendré des déviations dans la trajectoire des rayons réfléchis. En effet, la stabilité et la similarité des valeurs entre les quatre photorésistances sont essentielles pour assurer un suivi précis. De plus, il est crucial que les écarts entre les paires des photorésistances restent stables et ne dépassent pas un seuil acceptable qui est d'environ 40, afin de garantir un fonctionnement optimal du système de suivi automatique.

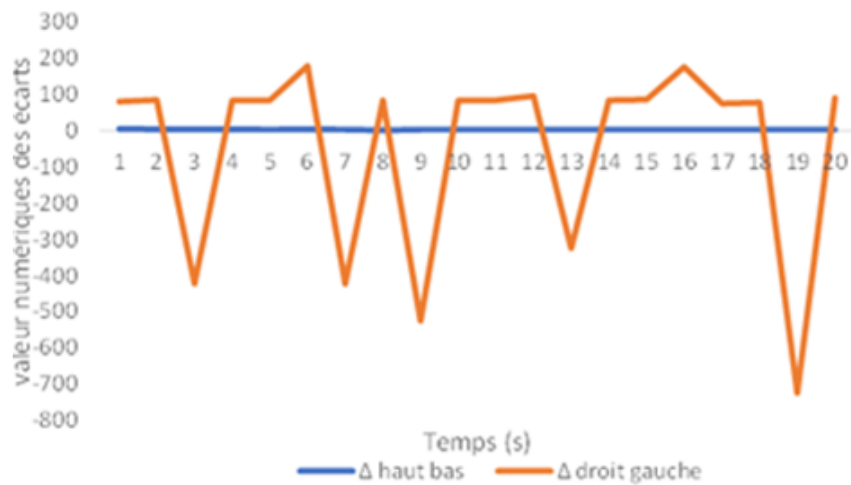


Figure 22. Illustration des courbes montrant les variations des écarts entre les photorésistances avant correction

Grâce aux renouvellements des résistances et photorésistances, nous avons pu réduire de manière significative les écarts (Figure 23) entre les valeurs mesurées des photorésistances du capteur. Ces ajustements ont permis d'améliorer la précision des mesures (Annexe 4) en assurant une meilleure uniformité des réponses de photorésistances.

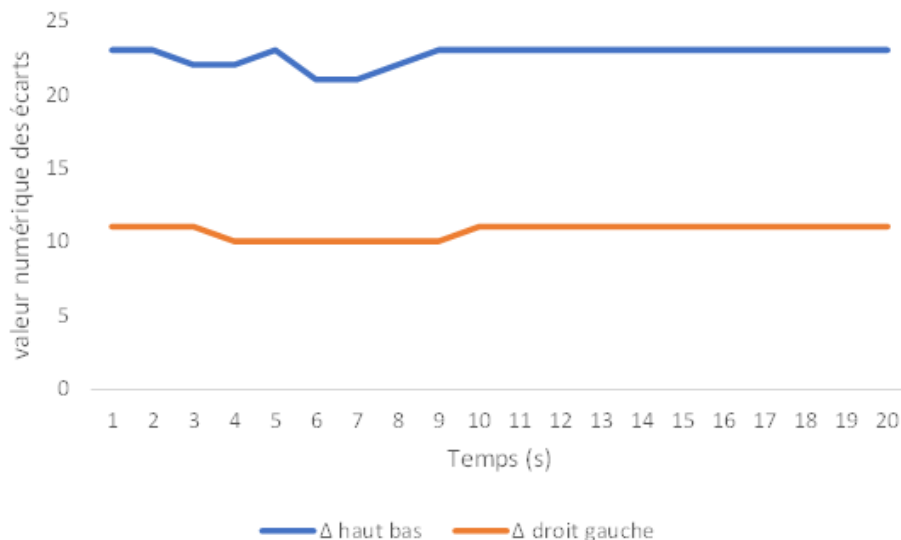


Figure 23. Illustration des courbes montrant les variations des écarts entre les photorésistances après correction

De plus nous avons choisi de revêtir le masque d'une couleur noire (Figure 24) pour maximiser son pouvoir absorbant des reflets. Cette couleur foncée permet de réduire les réflexions

lumineuses indésirables, et d'optimiser le fonctionnement du système.



Figure 24. Illustration du nouveau capteur quatre quadrants

IV.1.2. La correction de la tâche focalisée des miroirs

La nouvelle disposition (Figure 25) des miroirs a permis de minimiser la dispersion de la tâche focalisée en organisant les miroirs de manière à ce que leur tâche focalisée converge vers le miroir central. Cette configuration permet de stabiliser et de centraliser la focalisation des rayons réfléchis (Figure 26) pendant environ 5 heures, améliorant ainsi la précision et la cohérence du suivi solaire dans le système global.



Figure 25. Nouvelle disposition des miroirs



Figure 26. Illustration de la tâche focalisée des miroirs après correction

IV.1.3. Résultats du test de suivi solaire

Le test de suivi solaire s'est déroulé sur une période de 8 heures 35 minutes le 08 Avril 2024. Durant ce test nous avons pu observer la tâche focalisée des miroirs sur la cible tout au long de la période, ce qui nous a permis d'obtenir des résultats. Néanmoins, nous avons détecté quelques légers défauts qui peuvent être améliorés. Les résultats des tests de suivi se trouvent dans l'Annexe 5.

IV.2. Analyse du test de suivi solaire

Nous remarquons dans la Figure 27, que la tâche n'est pas centrée entre 8 h 40 min et 10 h dans la matinée. Cela est dû au fait que l'angle incident du soleil change rapidement après le lever du soleil. Etant conçu pour suivre la trajectoire du soleil, l'héliostat ajuste continuellement les miroirs pour refléter la lumière vers la cible. Cependant au vu de la position fixe du capteur, on observe un décalage initial qui se corrige progressivement à mesure que le soleil monte plus haut dans le ciel.



Figure 27. Illustration du comportement de la tâche focalisée en matinée

Nous constatons également qu'à partir de 10 h 10 min, la tâche commence à se recentrer progressivement jusqu'à atteindre un alignement parfait sur la cible. Cette tâche reste fixe jusqu'à 14 h 25 min (Figure 28). Cette phase de stabilisation indique que le système devient plus performant, une fois que le soleil est suffisamment haut, réduisant ainsi les écarts initiaux.



Figure 28. Illustration du comportement de la tâche focalisée vers midi

Par la suite, nous remarquons qu'à partir de 14 h 40 min la tâche a tendance à se déformer et à

Optimisation du suivi solaire d'un héliostat piédestal : Diagnostic et solutions innovantes

se déplacer légèrement vers le haut, jusqu'à finalement quitter complètement la cible vers 17 h (Figure 29). En effet, au fur et à mesure que l'après-midi avance, l'angle d'incidence de la lumière solaire change.

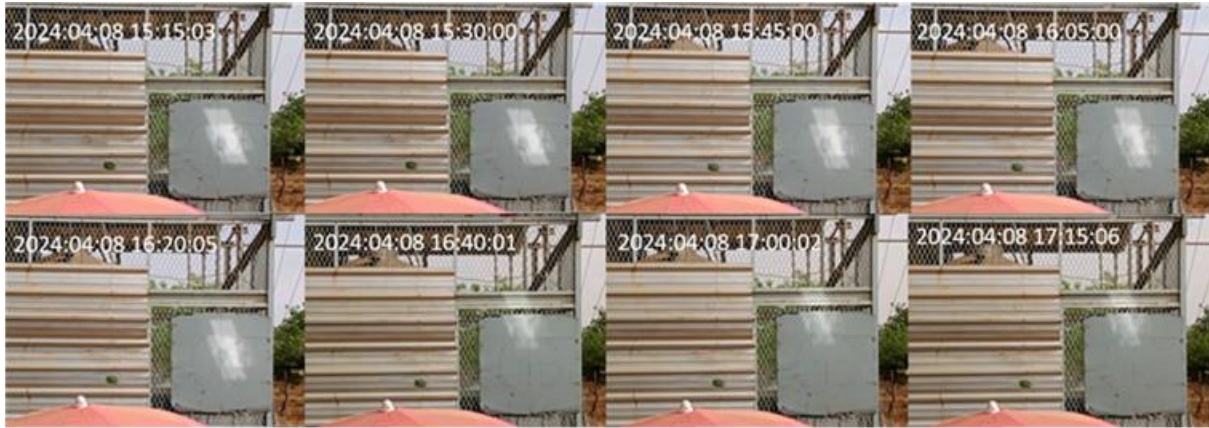


Figure 29. Illustration du comportement de la tâche focalisée dans l'après-midi

En conclusion, l'analyse des figures 28 ;29 et 30 nous indique des défis spécifiques dans le suivi solaire de l'héliostat. Au matin la tâche est décalée vers la droite, nécessitant certains ajustements. Vers 10 h, la tâche se recentre progressivement indiquant une amélioration du suivi. Cependant durant l'après-midi, la tâche se déforme et se déplace vers le haut quittant la cible vers 17 h. Dimeba OUEDRAOGO, a eu à avoir un problème similaire de décalage lors de ses précédents tests effectués en 2023 (Figure 30).

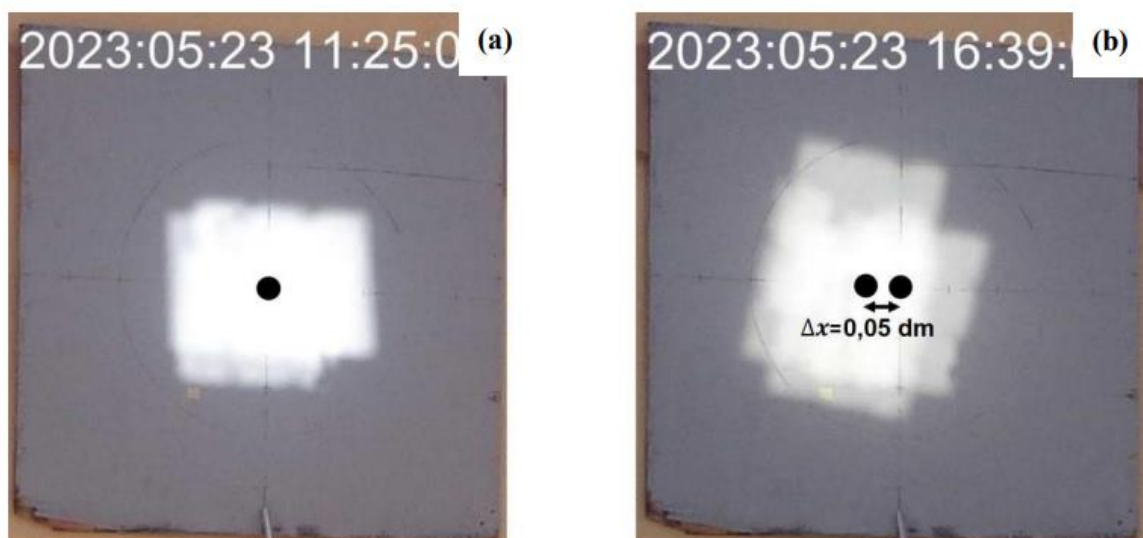


Figure 30. Tache focale (a) en début de suivi et (b) en fin de suivi [2]

En effet, on observe que dans la Figure 30a prise à 11h 25 min, la tâche est légèrement décentrée bien que le système commence à stabiliser son suivi, par contre dans la Figure 30b prise à 16 h 39 min, nous observons un décalage. Ces observations permettent de mettre en

évidence la nécessité d'améliorer la réactivité et la précision du système de suivi solaire.

IV.3. Dispositif de capteur embarqué

Elle a pour rôle d'améliorer les performances du suivi solaire en rendant stable le capteur. Elle dispose de deux parties (Figure 31) :

- ❖ La première partie : Elle joue le rôle de liaison entre le piédestal de l'héliostat et la seconde partie qui porte le capteur. Elle peut être facilement détachée du réflecteur pour des besoins d'entretien, de transport ou de réajustement.
- ❖ La deuxième partie : Elle supporte le capteur quatre quadrants. Cette partie peut être ajuster indépendamment, permettant un alignement en face du miroir du réflecteur. Le pose capteur est équipé de mini dispositifs qui permettent d'orienter, d'abaisser ou d'incliner le capteur à notre convenance.

Elle dispose également de réglettes d'ajustement. Elles sont conçues pour permettre des réglages et un ajustement fin et précis de la position du capteur. Elles permettent également à la deuxième partie de glisser sur la première partie facilitant ainsi les ajustements sans nécessiter de démontage complet. Les deux parties du dispositif peuvent être séparées de l'héliostat (Figure 32).

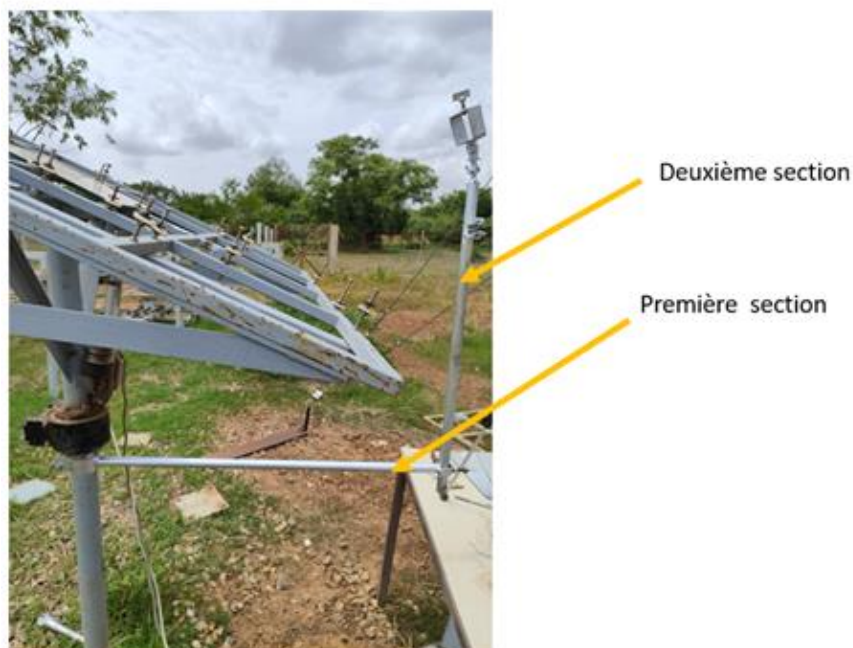


Figure 31. Illustration des différentes parties du capteur embarqué

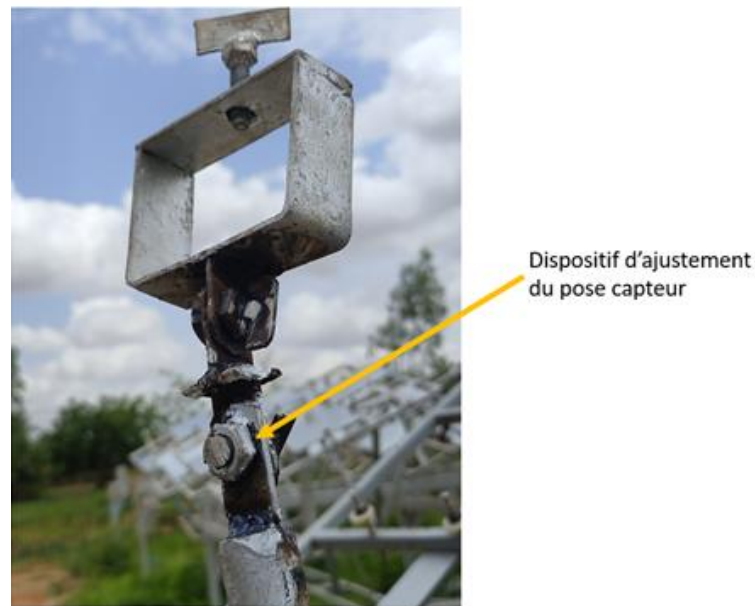


Figure 32. Illustration des réglettes

IV.4. Conclusion partielle

Le dispositif du capteur embarqué a été conçu pour améliorer le système de suivi solaire en boucle fermée. Cependant, en raison de certaines contraintes, des tests complets n'ont pas pu être réalisés. Il est donc nécessaire d'effectuer des tests approfondis pour évaluer les améliorations potentielles et s'assurer que les résultats obtenus répondent à nos attentes.

V. COUT DE REALISATIONS DES TRAVAUX

Pour la réalisation des travaux visant à rétablir le suivi solaire, nous avons pu acquérir des composants supplémentaires. Leur devis quantitatif et estimatif est fourni dans le Tableau 5 suivant.

Tableau 5. Devis estimatif et quantitatif des composants supplémentaires

Désignation	Quantité	Prix unitaire (FCFA)	Prix total (FCFA)	Total (FCFA)
Carte Arduino Nano	1	10 000	10 000	36 100
Carte pilote moteur L298N	1	7 500	7 500	
Platine d'essai	2	2 500	5 000	
Photorésistance de 5 mm de diamètre	4	200	800	
Potentiomètre	2	750	1 500	
PCB	1	600	600	
Résistance de 10 k Ω	4	50	200	
Dispositif de capteur embarqué	1	10 500	10 500	

VI. CONCLUSION- PERSPECTIVES

Le développement des héliostats piédestaux a considérablement amélioré les technologies de concentration solaire, offrant des systèmes de suivi plus précis et efficaces. Le projet CSP4Africa du Laboratoire Energies Renouvelables et Efficacité Energétique (LabEREE) illustre cette évolution, visant à optimiser la production d'électricité dans les régions rurales et péri-urbaines. La mise en œuvre des mécanismes azimut-élévation permet un suivi précis du soleil grâce à des moteurs rotatifs et des actionneurs linéaires, tandis-que la photodétection transforme la lumière en signaux électriques pour des ajustements en temps réel. Les travaux antérieurs, tels que ceux de Florent YIBOKOU et Dimeba OUEDRAOGO, ont contribué à la conception de systèmes robustes et précis, intégrant des technologies avancées pour un alignement optimal des rayons réfléchis. Grâce à l'utilisation de matériels spécifiques comme les cartes Arduino et les capteurs, ainsi qu'à une méthodologie rigoureuse, il a été identifié et corrigé les limites du système existant, en fabriquant un nouveau capteur quatre quadrants et en réorganisant la disposition des miroirs. Les résultats montrent une amélioration notable de la précision du suivi solaire et de l'efficacité énergétique globale. De plus un dispositif de capteur embarqué a été spécifiquement conçu pour renforcer le système de suivi solaire en boucle fermée. Cependant des tests approfondis n'ont pas été réalisés. L'acquisition de composants supplémentaires pour la réalisation des travaux a couté 36 100 CFA.

VII. RECOMMANDATIONS

Étant donné que des tests approfondis sur de longues périodes n'ont pas encore été effectués avec le nouveau dispositif de capteur embarqué sur l'héliostat, il serait recommandé de :

- ❖ poursuivre les tests approfondis de suivi avec le capteur embarqué sur une longue période,
- ❖ faire des tests avec l'entièreté des miroirs.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] K. F. YIBOKOU, Mémoire Master d'ingénierie Génie Electrique et Energétique. Conception, dimensionnement et mise en oeuvre d'un héliostat piédestal, 56^e éd. 2022.
- [2] D. O. M. OUEDRAOGO, Mémoire Master d'ingénierie Génie Electrique et Energétique. Conception et mise en oeuvre du suivi solaire par photodétecteur d'un héliostat piédestal. 2023.
- [3] L. fr Éditions, « L'énergie, une ressource à ménager | Lelivrescolaire.fr ». Consulté le: 30 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.lolivrescolaire.fr/page/15110324>
- [4] K. E. N'TSOUKPOE et al., « Integrated design and construction of a micro-central tower power plant », Energy Sustain. Dev., vol. 31, p. 1-13, avr. 2016, doi: 10.1016/j.esd.2015.11.004.
- [5] Spiegato, « Que sont les héliostats ? ». Consulté le: 27 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://spiegato.com/fr/que-sont-les-heliostats>
- [6] B. Abdelfetah, « OPTIMISATION DES PERFORMANCES DU CHAMP SOLAIRE D'UNE CENTRALE A TOUR A CONCENTRATION », Thesis, Université Kasdi Merbah–Ouargla, 2023. Consulté le: 4 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <http://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/35024>
- [7] Matan, « Le Photodétecteur: Fonctionnement et Utilisations | Description, Exemple & Application », Your Physicist. Consulté le: 12 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://your-physicist.com/le-photodetecteur-fonctionnement-et-utilisations/>
- [8] ABC électronique, « Les photodétecteurs - chapitre 2 ». Consulté le: 12 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://abcelectronique.com/divers/dossiers/photodetecteurs/chap2.phtml>
- [9] A. Faizan, « Difference between Conductor Semiconductor and Insulator », Electrical A2Z. Consulté le: 12 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://electricala2z.com/electrical-circuits/difference-between-conductor-semiconductor-and-insulator/>
- [10] DISTRONIC SARL, « Photorésistance LDR 7mm », DISTRONIC SARL. Consulté le: 13 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.distronic.fr/capteurs-et-transducteurs/9228-photoresistance-ldr-7mm.html>
- [11] T. Agarwal, « Photodiode : Construction, Types, Working & Its Applications », ElProCus - Electronic Projects for Engineering Students. Consulté le: 13 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.elprocus.com/photodiode-working-principle-applications/>
- [12] Project point, « Phototransistor, L14G2 Original, L14F1, L14G1, Photodiode, Photo Diode, Photo detector, Photo transistor ». Consulté le: 13 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://projectpoint.in/index.php?route=product/product&product_id=503287307023
- [13] L'Expo Permanente, « Devis Photomultiplicateurs ». Consulté le: 13 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.usinenouvelle.com/expo/photomultiplicateurs-l94.html>
- [14] VONGURU, « Canon: Un capteur 250 Mégapixels ». Consulté le: 13 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://vonguru.fr/2015/11/07/canon-capteur-250-megapixels/>
- [15] F. M. A. Lorilla et R. Barroca, « Flexible Dynamic Sun-Tracking System (STS) Employing Machine Vision Control Approach », Int. J. Renew. Energy Res. IJRER, vol. 12, n° 2, Art. n° 2, juin 2022, Consulté le: 13 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ijrer.org/ijrer/index.php/ijrer/article/view/12949>
- [16] M. Sohag, Md. M. Hasan, M. Khatun, et M. Ahmad, An accurate and efficient solar tracking system using image processing and LDR sensor. 2015, p. 527. doi:

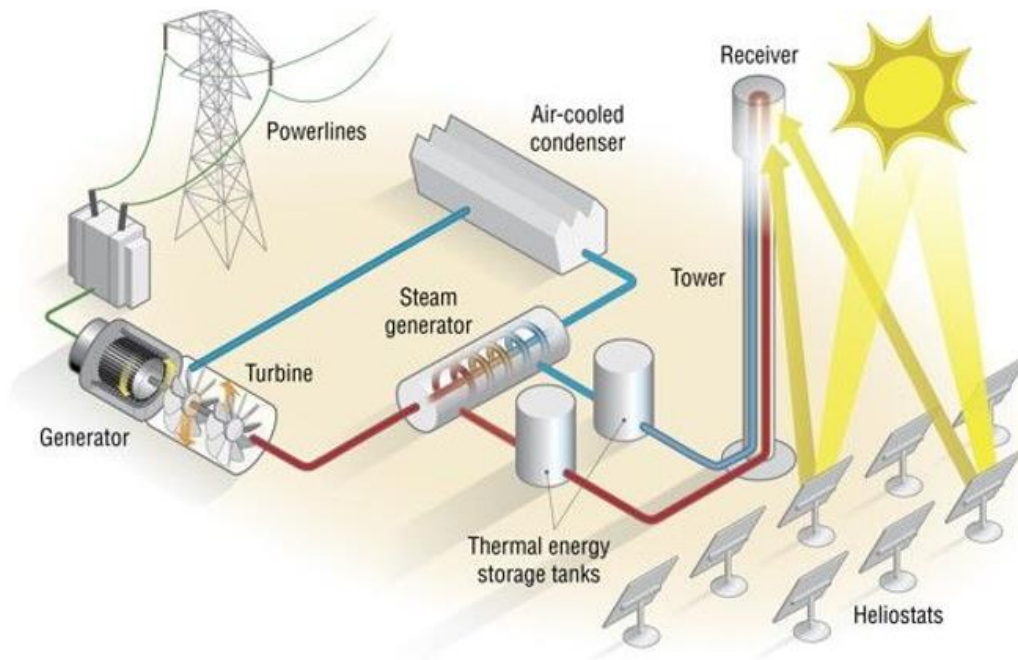
10.1109/EICT.2015.7392008.

- [17] G. Garcia-Gil et J. M. Ramirez, « Fish-eye camera and image processing for commanding a solar tracker », *Heliyon*, vol. 5, n° 3, p. e01398, mars 2019, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e01398.
- [18] M. Wang, « Résistance 10K | Petit composant, grand impact sur la conception des circuits », *PCBMay*. Consulté le: 18 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.pcbmay.com/fr/r%C3%A9sistance-10k/>
- [19] Passion électronique, « Photorésistance : fonctionnement, choix, montages arduino, ... ». Consulté le: 27 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://passionelectronique.fr/photoresistance/>
- [20] Pinterest, « Concentrating Solar-Thermal Power Systems ». Consulté le: 7 août 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.pinterest.com/pin/371969250472990760/>

ANNEXES

Annexe 1 : Principe de fonctionnement d'une centrale à tour thermique.....	40
Annexe 2 : Fiche technique du matériel	41
Annexe 3 : Code Arduino.....	47
Annexe 4 : Les valeurs des photorésistances avant et après correction	50
Annexe 5 : Résultats test de suivi	52

Annexe 1 : Principe de fonctionnement d'une centrale à tour thermique



Annexe 1. Principe de fonctionnement d'une CSP[20]

Annexe 2 : Fiche technique du matériel

PHOTORESISTORS

5mm, 12mm, & 20mm LDR Radial Lead Types

Description

Photoconductive cells are sensors that allow you to detect light. They are small, inexpensive, low-power, easy to use, and don't wear out. NTE's light-dependent resistors (LDR) are photoresistors whose resistance decreases with increasing incident light intensity. In other words, when it is dark, they have a high electrical resistance and when it is light, their electrical resistance is low.

Features

- Epoxy Encapsulated
- Small Size
- Reliable Performance
- Quick Response
- High Sensitivity
- Good Characteristic of Spectrum

Typical Applications

Digital Applications

- Automatic Headlight Dimmer
- Night/Streetlight Control
- Photoelectric Control
- Industrial Control
- Security System

Analog Applications

- Camera Exposure Control
- Automatic Gain Control

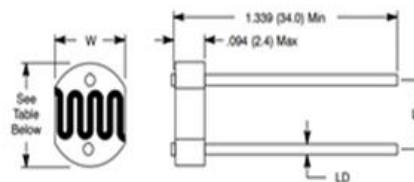
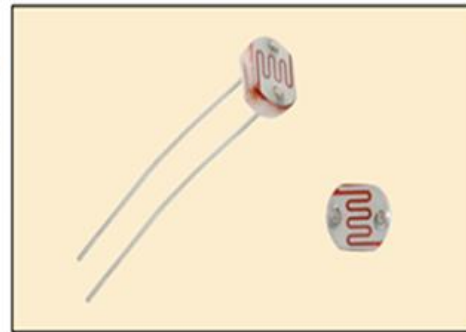
Specifications

Spectral Response Peak:

5mm Types: 540nm

12mm & 20mm Types: 560nm

Ambient Temperature Range: -30° to +70°C



Lead Diameter (LD)	
5mm	.020 (0.5)
12mm	.026 (0.7)
20mm	.036 (0.9)

NTE Type	Dimensions			Max. DC Voltage	Power Dissipation (mW)	Light Resistance (10Lux)(KΩ)	Dark Resistance (MΩ)	γ _{100/10}	Response Times (ms)	
	Diameter	W	LS						Increase	Decrease
02-LDR1	.201 (5.0)	.169 (4.3)	.134 (3.4)	150	100	50 - 100	5.0	0.8	20	30
02-LDR2	.201 (5.0)	.169 (4.3)	.134 (3.4)	150	90	5 - 10	0.2	0.5	30	30
02-LDR3	.201 (5.0)	.169 (4.3)	.134 (3.4)	150	100	100 - 200	10.0	0.9	20	30
02-LDR4	.201 (5.0)	.169 (4.3)	.134 (3.4)	150	100	30 - 50	3.0	0.7	20	30
02-LDR12	.472 (12.0)	.405 (10.3)	.353 (9.0)	250	200	5 - 10	1.0	0.6	30	30
02-LDR13	.472 (12.0)	.405 (10.3)	.353 (9.0)	250	200	10 - 20	2.0	0.6	30	30
02-LDR14	.472 (12.0)	.405 (10.3)	.353 (9.0)	250	200	30 - 50	5.0	0.7	30	30
02-LDR15	.472 (12.0)	.405 (10.3)	.353 (9.0)	250	200	50 - 100	8.0	0.8	30	30
02-LDR20	.787 (20.0)	.787 (20.0)	.593 (15.1)	500	500	5 - 10	1.0	0.6	30	30
02-LDR21	.787 (20.0)	.787 (20.0)	.593 (15.1)	500	500	10 - 20	2.0	0.6	30	30
02-LDR22	.787 (20.0)	.787 (20.0)	.593 (15.1)	500	500	30 - 50	5.0	0.7	30	30
02-LDR23	.787 (20.0)	.787 (20.0)	.593 (15.1)	500	500	50 - 100	8.0	0.8	30	30

Soldering Notes:

1. Soldering times should be kept as short as possible.
2. The soldering iron should be positioned at least 4mm from the ceramic base.

Terms

- Light Resistance:
Measured at 10Lux with standard light A (2854K color temperature) and 2H pre-illumination at 400-600Lux prior to testing.
- Dark Resistance:
Measured 10 seconds after pulsed 10Lux.
- Gamma Characteristic:
Between 10Lux and 100Lux and given by: $T = \frac{\log(R_{10} / R_{100})}{\log(100 / 10)} = \log(R_{10} / R_{100})$
R₁₀, R₁₀₀ cell resistance at 10Lux and 100Lux. The error of T is +0.1.

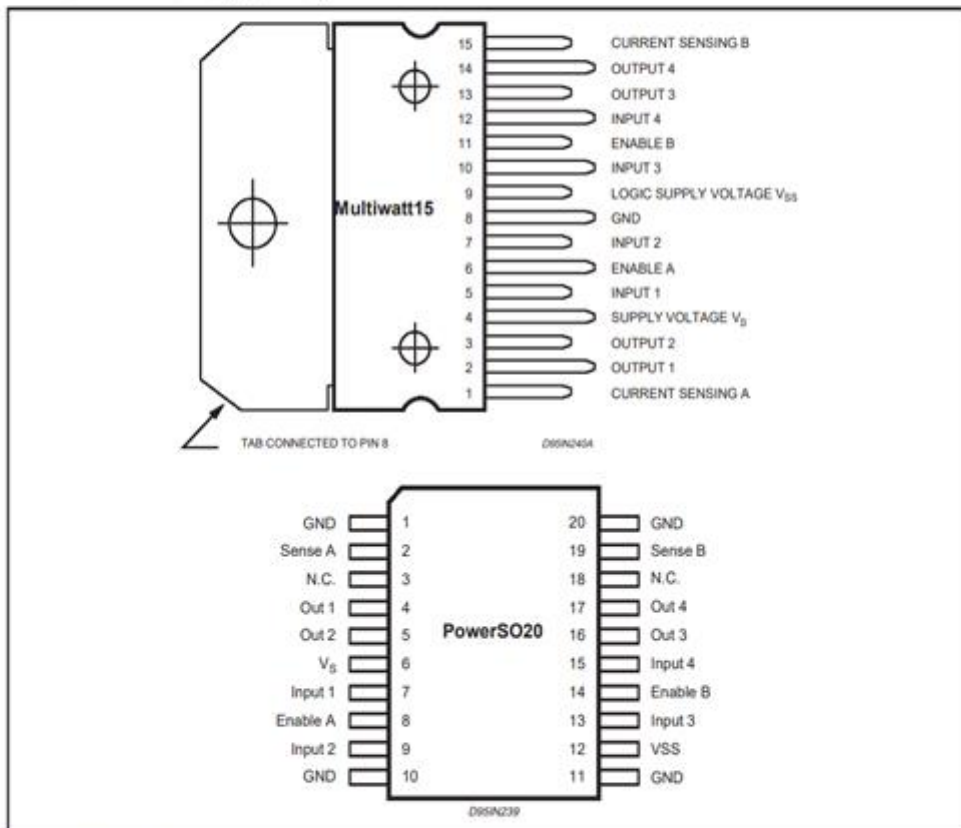
Annexe 2. Figure1. Caractéristique des photorésistances

L298

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit
V_S	Power Supply	50	V
V_{SS}	Logic Supply Voltage	7	V
V_i, V_{en}	Input and Enable Voltage	-0.3 to 7	V
I_O	Peak Output Current (each Channel)		
	- Non Repetitive ($t = 100\mu s$)	3	A
	- Repetitive (80% on -20% off; $t_{on} = 10ms$)	2.5	A
	-DC Operation	2	A
V_{sens}	Sensing Voltage	-1 to 2.3	V
P_{tot}	Total Power Dissipation ($T_{case} = 75^\circ C$)	25	W
T_{op}	Junction Operating Temperature	-25 to 130	$^\circ C$
T_{stg}, T_j	Storage and Junction Temperature	-40 to 150	$^\circ C$

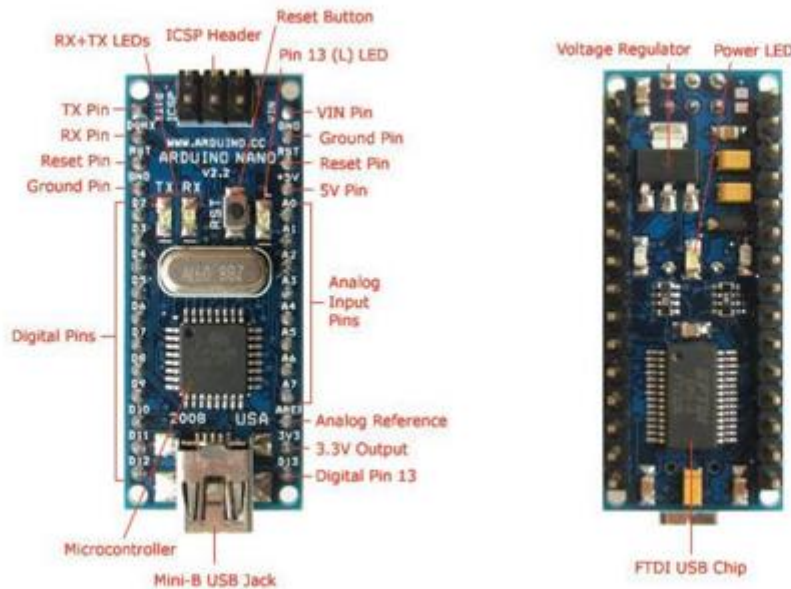
PIN CONNECTIONS (top view)



THERMAL DATA

Symbol	Parameter	PowerSO20	Multiwatt15	Unit
$R_{th(j-case)}$	Thermal Resistance Junction-case	Max. -	3	$^\circ C/W$
$R_{th(j-amb)}$	Thermal Resistance Junction-ambient	Max. 13 (*)	35	$^\circ C/W$

Annexe 2. Figure2. Caractéristiques de la carte motrice



Schematic and Design

Arduino Nano 3.0 (ATmega328): [schematic](#), [Eagle files](#).

Arduino Nano 2.3 (ATmega168): [manual](#) (pdf), [Eagle files](#). Note: since the free version of Eagle does not handle more than 2 layers, and this version of the Nano is 4 layers, it is published here unrouted, so users can open and use it in the free version of Eagle.

Specifications:

Microcontroller	Atmel ATmega168 or ATmega328
Operating Voltage (logic level)	5 V
Input Voltage (recommended)	7-12 V
Input Voltage (limits)	6-20 V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
Analog Input Pins	8
DC Current per I/O Pin	40 mA
Flash Memory	16 KB (ATmega168) or 32 KB (ATmega328) of which 2 KB used by bootloader
SRAM	1 KB (ATmega168) or 2 KB (ATmega328)
EEPROM	512 bytes (ATmega168) or 1 KB (ATmega328)
Clock Speed	16 MHz
Dimensions	0.73" x 1.70"

Power:

The Arduino Nano can be powered via the Mini-B USB connection, 6-20V unregulated external power supply (pin 30), or 5V regulated external power supply (pin 27). The power source is automatically selected to the highest voltage source.

Annexe 2. Figure 3. Caractéristique de la carte Arduino Nano

Optimisation du suivi solaire d'un héliostat piédestal : Diagnostic et solutions innovantes

Caractéristique :

entrée AC universelle, 110 V/220 V sont sélectionnables par interrupteur
Type de protection : court-circuit/surcharge/surtension
Récupération automatique après protection
Refroidissement par air forcé par ventilateur DC intégré
Contrôle PWM et régule
100 % pleine charge Test de vieillissement
Filtre EMI intégré filtre
LED source d'alimentation
faible consommation d'énergie, basse température, haute efficacité, haute fiabilité

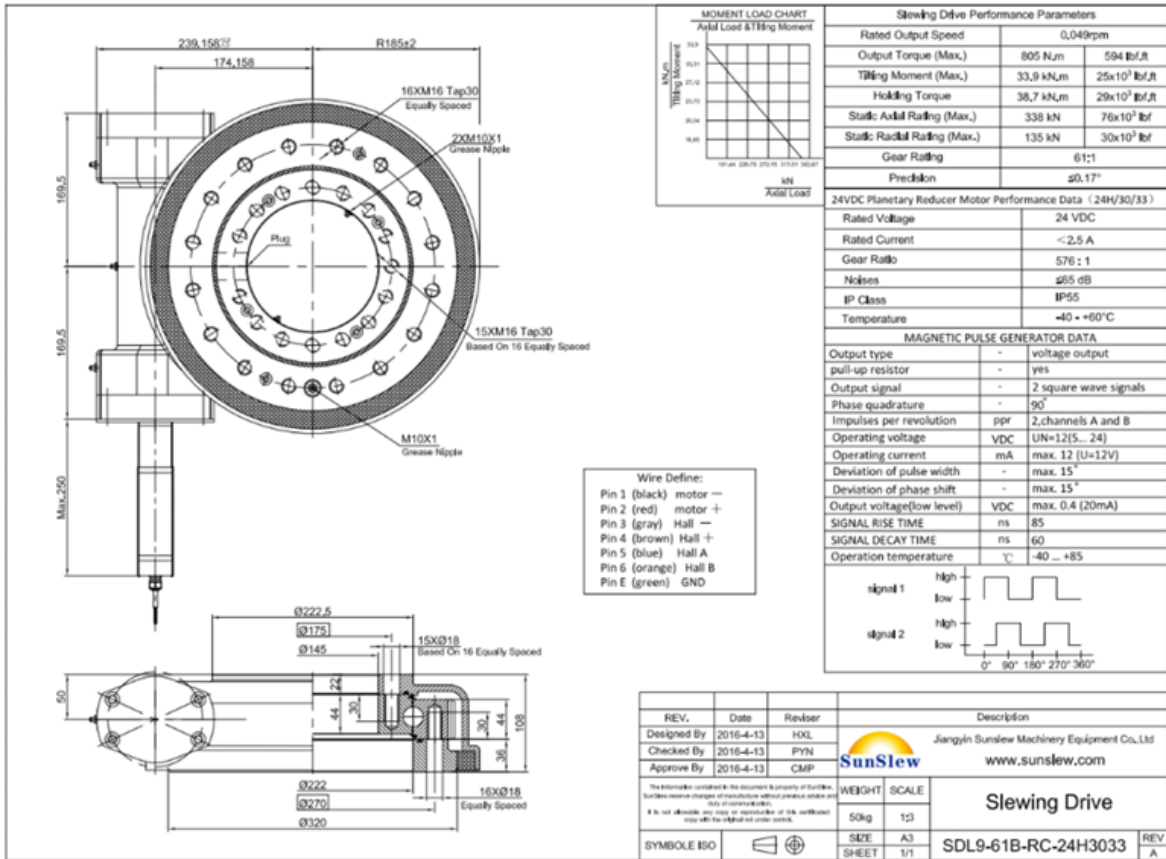
Description des performances :

Modèle : 0010128
Dimensions : 198 x 98 x 40 mm
Entrée : 100~120VAC ou 200~240VAC
Plage de fréquence : 50/60Hz
Sortie : DC 12V
réglable Plage de tension : ± 10 % Courant nominal
: 20 A
Puissance nominale : 240 W
Surcharge : 110 à 150 % de puissance de sortie nomina
Surtension : 13,8 à 16,2 V
Température de fonctionnement : -20 °C à +70 °C



Annexe 1. Figure 4. Caractéristique du redresseur

Optimisation du suivi solaire d'un héliostat piédestal : Diagnostic et solutions innovantes



Annexe 2. Figure 5. Caractéristique de la couronne

ALI 2-P



- Permanent magnet motor 12-24 Vdc
- 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
- Limit switches, potentiometer and encoder on request

ALI2-P (Vdc)						
Fmax (N)	Speed (mm/s)	Version	Motor size	Motor speed (rpm)	Max Current for F max(A) 24Vdc**	Fs % base 5 min.
2400	30	M01	59	4000	9,5	10
3000	15	M03	59	4000	7	30
4200	10	M04	59	4000	9,5	10
4200	7	M05	59	4000	7	30
4200	2.5	M07	59	4000	3	30
4200	0.6	M09	59	4000	1	30

Annexe 2. Figure 6. Caractéristique du vérin

Annexe 3 : Code Arduino

```
Helios_control.ino
1  #include <SoftwareSerial.h>
2
3
4  SoftwareSerial mcu(10,11);
5
6  int h,b,d,g;
7  int enA = 9;
8  int in1 = 8;
9  int in2 = 7;
10
11  int enB = 3;
12  int in3 = 5;
13  int in4 = 4;
14
15  int HB = 0, DG = 0;
16
17  const int V_ref_inf = -5 ,V_ref_sup = 5;
18  const int C_ref_inf = -10 ,C_ref_sup = 10;
19
20  const int cloud_value = 500;
21
22  String statc = "",statv = "";
23  int v = 0,c = 0;
24  int potA = 0, potB = 0;
25  int sky = 0;
26  int m = 0;
27
28  long elapsedTime = 1*60*1000;
29  long currentTime = 0;
30  long lastTime = 0;
31
32  bool cycle = true;
33
34  void setup() {
35      // put your setup code here, to run once:
36      pinMode(enA,OUTPUT);
37      pinMode(enB,OUTPUT);
38      pinMode(in1,OUTPUT);
39      pinMode(in2,OUTPUT);
40      pinMode(in3,OUTPUT);
41      pinMode(in4,OUTPUT);
42      pinMode(12,INPUT_PULLUP);
43      pinMode(2,INPUT);
44      digitalWrite(in1, LOW);
45      digitalWrite(in2,LOW);
46      digitalWrite(in3,LOW);
47      digitalWrite(in4,LOW);
48
49      attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2),sendJsonData, RISING);
50
51      Serial.begin(9600);
52      mcu.begin(115200);
53      delay(1000);
54
55  }
56
57
58  void loop() {
59      /*
60      | | | if(digitalRead(12) == 0){
61      | | | | | autom();
62      | | | }
63      | | |
64      | | |
65      | | | else{
66      | | | | m = 1;
```

Optimisation du suivi solaire d'un héliostat piédestal : Diagnostic et solutions innovantes

```
67 | | | | Potm();
68 | | | | //correction = 0;
69 | | | | //lastTime = millis();
70 | | | | }
71 | | | | }
72 | | | | */
73 | | | | //M2_Sens(0,HIGH);
74 | | | | }
75 |
76 |
77 | void M1_Sens(int p,int sens){
78 |
79 |     digitalWrite(in1,sens);
80 |     digitalWrite(in2,!sens);
81 |     analogWrite(enA,p);
82 | }
83 |
84 | void M2_Sens(int p,int sens){
85 |
86 |     digitalWrite(in3,sens);
87 |     digitalWrite(in4,!sens);
88 |     analogWrite(enB,p);
89 | }
90 |
91 | void Potm()
92 | {
93 |     h = analogRead(A0);
94 |     b = analogRead(A1);
95 |     d = analogRead(A2);
96 |     g = analogRead(A3);
97 |     potA = analogRead(A6);
98 |     potB = analogRead(A7);
99 |     sky = analogRead(A5);
100 |
101 |     //Serial.println("sky : " + String(sky));
102 |
103 |     if(potA > 200 && potA < 800){
104 |         M1_Sens(0,LOW);
105 |     }
106 |
107 |     else{if(potA <= 200){
108 |         M1_Sens(255,LOW);
109 |     }
110 |
111 |     else{
112 |         M1_Sens(255,HIGH);
113 |     }
114 | }
115 | if(potB > 200 && potB < 800){
116 |     M2_Sens(0,LOW);
117 | }
118 |
119 | else{if(potB <= 200){
120 |     M2_Sens(255,LOW);
121 | }
122 |
123 | else{
124 |     M2_Sens(255,HIGH);
125 | }
126 | }
127 |
128 | Serial.println("POT A : "+String(potA)+" POT B : "+String(potB));
129 | }
130 |
131 | void autom()
132 | {
```

Optimisation du suivi solaire d'un héliostat piédestal : Diagnostic et solutions innovantes

```
133  /*
134  if(millis() - lastTime >= elapsedTime){
135  precision = centerPrecision;
136  precision2 = centerPrecision2;
137  isCentered = false;
138  }
139  /**/
140  h = analogRead(A0);
141  b = analogRead(A1);
142  d = analogRead(A2);
143  g = analogRead(A3);
144  sky = analogRead(A5);
145
146  Serial.println("sky : " + String(sky));
147  /**/
148
149
150  /*
151  if(sky <= cloud_value){
152
153  M1_Sens(0,LOW);
154  M2_Sens(0,LOW);
155  v = 0;
156  c = 0;
157  m = -1;
158  return;
159  }/**/
160  m = 0;
161
162  if((h-b) >= -5 && (h-b) <= 5)
163  {
164  // ne rien faire
165  M1_Sens(0,LOW);
```

Annexe 3. Code Arduino

```
166  v = 0;
167  }
168
169  else{
170
171  if((h-b) < -5 )
172  {
173  // rentrer le verin
174  M1_Sens(255,HIGH);
175  v = 1;
176  }
177
178  else{
179  //sortir le vérin
180  M1_Sens(255,LOW);
181  v = -1;
182  }
183  }
184
185  if((d-g) >= -11 && (d-g) <= 11)
186  {
187  // ne rien faire
188  M2_Sens(0,HIGH);
189  c = 0;
190  }
191
192
193  else{
194  if((d-g) < -11 )
195  {
196  // rentrer le verin
197  M2_Sens(255,LOW);
198  c = 1;
```


Optimisation du suivi solaire d'un héliostat piédestal : Diagnostic et solutions innovantes

```

193     else{
194         if((d-g) < -11 )
195         {
196             // rentrer le verin
197             M2_Sens(255,LOW);
198             c = 1;
199         }
200
201         else{
202             //sortir le verin
203             M2_Sens(255,HIGH);
204             c = -1;
205         }
206     }
207 }
208
209 /**/
210
211
212 Serial.println("HB : "+String(h-b)+" DG : "+String(d-g));
213 }
214
215 void sendJsonData()
216 {
217
218     String data = String(h) +" ; "+ String(b) +" ; "+ String(d) +" ; "+ String(g) +" ; "+ String(v) +" ; "+ String(c) +" ; "+String(m)+"\n";
219     mcu.print(data);
220
221     //Serial.println("HB : "+String(h-b)+" DG : "+String(d-g));
222     //delay(1000);
223 }
224 }
225

```

Annexe 4 : Les valeurs des photorésistances avant et après correction

Annexe 4. Tableau1. Valeurs des photorésistances avant correction

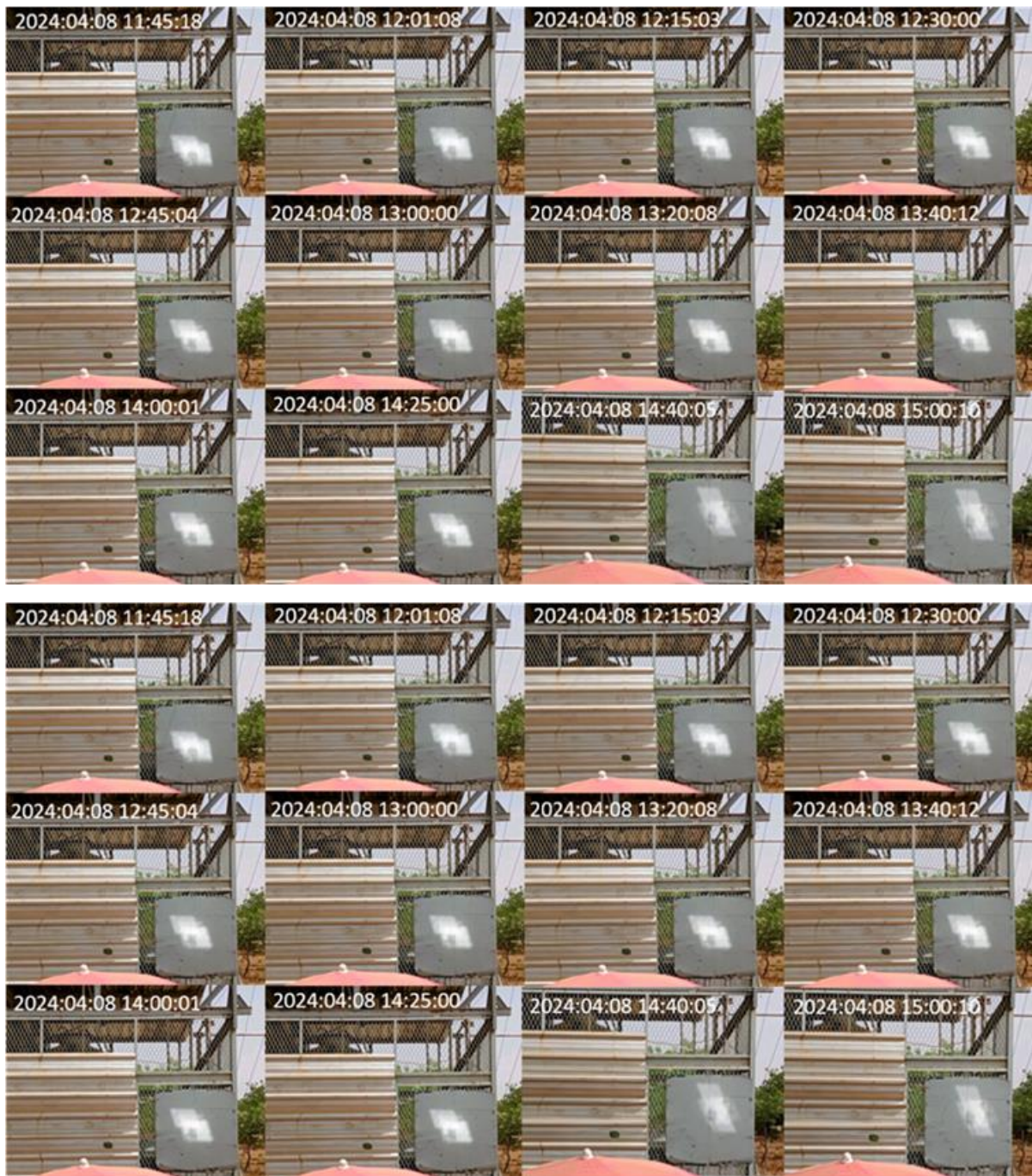
Temps (seconde)	Capteur haut	Capteur bas	Capteur droit	Capteur gauche	Δ haut bas	Δ droit gauche	Δ haut gauche	Δ bas gauche	Δ droit haut	Δ droit bas
1	823,001	818,001	902,001	821,001	5	81	2	-3	79	84
2	823,001	819,001	907,001	822,001	4	85	1	-3	84	88
3	822,001	818,001	400,001	822,001	4	-422	0	-4	-422	-418
4	822,001	818,001	905,001	822,001	4	83	0	-4	83	87
5	822,001	819,001	908,001	824,001	3	84	-2	-5	86	89
6	823,001	819,001	1003,001	824,001	4	179	-1	-5	180	184
7	822,001	819,001	401,001	824,001	3	-423	-2	-5	-421	-418
8	821,001	820,001	908,001	824,001	1	84	-3	-4	87	88
9	822,001	819,001	300,001	825,001	3	-525	-3	-6	-522	-519
10	822,001	819,001	908,001	825,001	3	83	-3	-6	86	89
11	822,001	819,001	908,001	824,001	3	84	-2	-5	86	89
12	822,001	819,001	920,001	824,001	3	96	-2	-5	98	101
13	822,001	819,001	500,001	824,001	3	-324	-2	-5	-322	-319
14	822,001	819,001	908,001	824,001	3	84	-2	-5	86	89
15	822,001	819,001	910,001	824,001	3	86	-2	-5	88	91
16	822,001	819,001	1000,001	824,001	3	176	-2	-5	178	181
17	822,001	819,001	899,001	824,001	3	75	-2	-5	77	80
18	822,001	819,001	902,001	824,001	3	78	-2	-5	80	83
19	822,001	819,001	100	824,001	3	-724,001	-2	-5	-722,001	-719,001
20	822,001	819,001	915,001	824,001	3	91	-2	-5	93	96

Optimisation du suivi solaire d'un héliostat piédestal : Diagnostic et solutions innovantes

Annexe 4. Tableau 2. Valeurs des photorésistances après correction

Temps (seconde)	Capteur haut	Capteur bas	Capteur droit	Capteur gauche	Δ haut bas	Δ droit gauche	Δ haut gauche	Δ bas gauche	Δ droit haut	Δ droit bas
1	814,001	811,001	815,001	811,001	3	4	3	0	1	4
2	814,001	811,001	815,001	811,001	3	4	3	0	1	4
3	813,001	811,001	815,001	810,001	2	5	3	1	2	4
4	813,001	811,001	815,001	810,001	2	5	3	1	2	4
5	813,001	811,001	815,001	810,001	2	5	3	1	2	4
6	814,001	811,001	815,001	811,001	3	4	3	0	1	4
7	814,001	811,001	815,001	811,001	3	4	3	0	1	4
8	814,001	811,001	815,001	811,001	3	4	3	0	1	4
9	814,001	811,001	815,001	811,001	3	4	3	0	1	4
10	819,001	816,001	820,001	815,001	3	5	4	1	1	4
11	819,001	816,001	820,001	815,001	3	5	4	1	1	4
12	819,001	816,001	820,001	815,001	3	5	4	1	1	4
13	819,001	816,001	821,001	816,001	3	5	3	0	2	5
14	819,001	816,001	821,001	816,001	3	5	3	0	2	5
15	819,001	816,001	821,001	816,001	3	5	3	0	2	5
16	820,001	819,001	821,001	817,001	1	4	3	2	1	2
17	820,001	819,001	821,001	817,001	1	4	3	2	1	2
18	820,001	819,001	821,001	817,001	1	4	3	2	1	2
19	820,001	819,001	821,001	817,001	1	4	3	2	1	2
20	820,001	819,001	821,001	817,001	1	4	3	2	1	2

Annexe 5 : Résultats test de suivi



Optimisation du suivi solaire d'un héliostat piédestal : Diagnostic et solutions innovantes



Annexe 5. Test de suivi