



**INSTITUT INTERNATIONAL D'INGENIERIE DE L'EAU
ET DE L'ENVIRONNEMENT**

ECOLE DOCTORALE SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'EAU, DE L'ENERGIE ET DE
L'ENVIRONNEMENT

THESE

Pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE L'INSTITUT 2iE

Spécialité : **Energie**

Présentée et soutenue publiquement

Par Mahamadou MAIGA

Le 09 Décembre 2024

Réf :2iE/2024-05

**MICROCENTRALES SOLAIRES A CONCENTRATION A FORTE
VALEUR AJOUTEE LOCALE DANS LE SAHEL : AMELIORATION
DES HELIOSTATS ET EXPLORATION D'HUILES VEGETALES
POUR LE STOCKAGE THERMIQUE POUR CSP4AFRICA**

JURY

Mme Tognon Clotilde GUIDI	Professeur Titulaire (CAMES)	Université Nationale des Sciences, Technologies, Ingénierie et Mathématiques, Bénin	Présidente
Mme Svitlana Leonidovna NITIEMA/YEFANOVA	Maître de Conférences (CAMES)	École Normale Supérieure, Burkina Faso	Rapporteure
M. Ababacar THIAM	Maître de Conférences (CAMES)	Université Alioune Diop de Bambey, Sénégal	Rapporteur
M. Cokou Pascal AGBANGNAN DOSSA	Professeur Titulaire (CAMES)	Université d'Abomey-Calavi, Bénin	Examineur
M. Seydou OUEDRAOGO	Maître de Conférences (CAMES)	Université Nazi Boni, Burkina Faso	Examineur
M. Kokouvi Edem N'TSOUKPOE	Maître de Conférences (CAMES)	Institut 2iE, Burkina Faso	Directeur de thèse

Laboratoire Energies Renouvelables et Efficacité Energétique (LabEREE)

Dédicace

J'aimerais dédier ce travail à mes chers parents, Hawa MAIGA et Feu Alassane Backa MAIGA, qui ont toujours cru en moi et m'ont offert un soutien inébranlable. Votre amour et vos sacrifices ont été les fondations de mes rêves.

D'après Robert Collier, « La réussite est la somme de petits efforts répétés jour après jour ». Cette citation m'a chaque fois rappelé l'importance de la constance et de la détermination dans la poursuite de mes objectifs. Chaque étape franchie, chaque défi surmonté, a été le fruit d'efforts quotidiens et d'un engagement sans faille. C'est grâce à ces petites victoires accumulées que j'ai pu atteindre ce moment significatif de ma vie.

Remerciements

Bismillahi Rahmani Rahimi ! Il n'y a de force, ni de puissance, que Dieu. Merci mon Seigneur pour tous les bienfaits que vous m'avez apportés !

À l'aube de l'achèvement de cette thèse, il m'est primordial d'exprimer ma profonde gratitude envers toutes celles et ceux qui ont contribué à cette aventure. Ce travail, réalisé à cheval entre le Laboratoire Énergies Renouvelables et Efficacité Énergétique (LabEREE) de l'institut 2iE (Burkina Faso) et le Laboratoire TotalEnergies du Burkina Faso, est le fruit d'un effort collectif et d'un soutien inestimable. Je suis particulièrement reconnaissant envers le service d'échange académique allemand (DAAD) et l'Union-Européenne (UE) pour leur financement, sans lequel cette recherche n'aurait pas pu aboutir. Votre confiance en ce projet a été une source de motivation constante.

Ma profonde gratitude va à l'endroit de mon directeur de thèse, M. Kokouvi Edem N'TSOUKPOE, Maître de Conférences (CAMES) à l'Institut 2iE, dont l'engagement et l'excellence scientifique sont une véritable source d'inspiration. Au-delà de ses immenses responsabilités, il a toujours su se rendre disponible, transformant chaque séance d'échange en une opportunité d'apprentissage et d'amélioration. Sa rigueur intellectuelle et son sens aigu d'analyse ont non seulement guidé mon travail, mais ont aussi façonné ma manière de penser. Ce qui le distingue, c'est sa capacité à allier une profonde exigence scientifique à une humanité rare, faisant de lui un mentor d'exception. Grâce à son encadrement bienveillant et à son écoute attentive, j'ai pu franchir chaque étape de cette thèse avec confiance. Je lui adresse mes plus sincères remerciements, car son soutien a été bien plus qu'un accompagnement académique : il a été le moteur de mon développement intellectuel. Personnellement, je pense avoir bénéficié du meilleur encadrement qui puisse exister pour mener à bien ce travail.

Je remercie sincèrement Mme Tognon Clotilde GUIDI, Professeure Titulaire (CAMES) à l'Université Nationale des Sciences, Technologies, Ingénierie et Mathématiques (Bénin), pour avoir accepté de présider le jury de ma soutenance de thèse.

Je tiens également à remercier Mme Svitlana Leonidovna NITIEMA née YEFANOVA, Maître de Conférences (CAMES) à l'École Normale Supérieure (Burkina Faso), et M. Ababacar THIAM, Maître de Conférences (CAMES) à l'Université Alioune Diop de Bambey (Sénégal), pour avoir accepté de rapporter ce travail de recherche.

Je voudrais aussi remercier M. Cokou Pascal AGBANGNAN DOSSA, Professeur Titulaire (CAMES) à l'Université d'Abomey-Calavi (Bénin), et M. Seydou OUEDRAOGO, Maître de Conférences (CAMES) à l'Université Nazi Boni (Burkina Faso), pour avoir accepté d'examiner ce travail de recherche.

Je remercie M. Aboubakar GOMNA, Maître Assistant (CAMES) à l'Institut 2iE, pour son soutien et les encouragements constants, me poussant toujours à aller plus loin dans ma réflexion et mes efforts. Son ouverture d'esprit et sa rigueur scientifique ont fait de nos échanges des moments d'apprentissage inestimables. Il m'a apporté des conseils avisés, toujours avec une bienveillance qui m'a beaucoup marquée. Son engagement et sa passion pour la science m'ont profondément inspiré. Je lui témoigne ici toute ma gratitude et mon respect.

Mes remerciements vont également à l'endroit de la responsable du Laboratoire Énergies Renouvelables et Efficacité Énergétique (LabEREE) de l'Institut 2iE, Dr Marie SAWADOGO, pour avoir instauré un environnement de travail stimulant et propice à une recherche rigoureuse. Son engagement envers l'excellence scientifique n'a jamais cessé de nous encourager.

Je souhaite aussi exprimer mes plus sincères remerciements à toute l'équipe pédagogique et scientifique du Laboratoire Énergies Renouvelables et Efficacité Énergétique (LabEREE), dont je ne peux citer tous les noms, pour leur soutien indéfectible et leurs contributions précieuses durant ces trois années : Pr Moussa SORO, Pr Igor OUEDRAOGO, Dr Marie SAWADOGO, Dr Sayon dit Sadio SIDIBE, Dr Daniel YAMEGUEU, Dr Yohan RICHARDSON, Dr Moussa KADRI, M. Madieumbe GAYE, M. Justin BASSOLE, M. Ahmed ZONGO, M. Romaric SAMAGNOUGA, M. Sédi AGBOKOU, M. Theodore BELEMGNEGRE, Mme Salamata CONGO et Mme Karoll NABALLOUM. Une reconnaissance particulière à Dr Sayon dit Sadio SIDIBE, mon mentor académique depuis mes premiers jours à l'Institut 2iE en 2017, dont l'accueil chaleureux et les encouragements permanents ont su me soutenir même dans les moments de doute. Je remercie Karoll pour son aide inestimable dans la gestion des procédures administratives, souvent un défi à relever. Enfin, je remercie Mme Obi KAM, Mme Flavy GNAMBIO, Mme Françoise YEDAN, Mme Madina TRIANDE, Mme Benedicte BOUDA, M. Lassina COULIBALY, M. Georges YAMEOGO, M. Abdel Kader OUEDRAOGO, M. Camille SOME, M. Claude OUEDRAOGO et M. Sylvain BOURGOU, dont l'efficacité et le professionnalisme ont grandement facilité mon parcours à travers les rouages administratifs de l'Institut 2iE.

Je remercie chaleureusement toute l'équipe du Laboratoire TotalEnergies du Burkina Faso pour leur soutien précieux tout au long de cette aventure scientifique : M. Fabrice OUEDRAOGO, Mme SAWADOGO, M. Emmanuel PACMOGDA, M. Salif OUEDRAOGO, M. Adama OUEDRAOGO et M. Adalphe KAM. Leur disponibilité, leur expertise et leur professionnalisme ont joué un rôle clé dans l'avancement de mes travaux. Qu'il s'agisse des conseils techniques, de mise à disposition de ressources, ou simplement d'un environnement de travail stimulant, leur contribution a été inestimable. Chaque membre de l'équipe a su, à sa manière, m'apporter une aide précieuse, et c'est avec une grande reconnaissance que je tiens à les inclure dans ces remerciements.

C'est au sein d'une atmosphère de camaraderie et de collaboration que j'ai également passé ces trois années de thèse, une aventure qui m'a profondément marquée à l'institut 2iE. À mes camarades du LabEREE, avec qui j'ai partagé bien plus que des moments de travail, je tiens à vous exprimer ma profonde gratitude. Je pense notamment à Fernand ZOMA, Yasmina OUEDRAOGO, Sabba GWODA, Sara LEKOMBO, Ladjï ACKA TANO, Roger ESSUI KONAN, Souwera Stan Lionnel SOMDA, Mame Sokhna Thiane SECK, Stéphanie NOUNAGNON, Fabrice CHIMI, Hamado OUEDRAOGO, Jean KAFANDO, Adanyro ATILAGO, Boniface EHLAN et Cléfasse KOULA, avec qui on échangeait souvent sur nos recherches et nos vies, créant ainsi des liens inestimables. Je rends également hommage aux aînés et mentors, Ahmed SAWADOGO, Ouo Adeline OUATTARA et Rock Aymar DAKE, qui ont su être des exemples de détermination et de solidarité. Mention spéciale à ceux qui sont maintenant Docteurs : Dr Fanta BARRY, Dr Laetitia HEMA, Dr Laetitia YOSSA, Dr Brice HAPPI, Dr Komlan Hector Seth TETE, Dr Kodami BADZA et Dr Bassalia OUATTARA.

Je tiens aussi à remercier l'ensemble des stagiaires qui sont passés sur la plateforme CSP4Africa dans le cadre de cette thèse. Je pense notamment à Kokou Florent YIBOKOU, Charik Nadiyah BANCE, Beh Dencana KAM, Abdoul Sakourou OUEDRAOGO, Alex KOUASSI, Dimeba Osnoun Mubarak OUEDRAOGO, Patrice SEOGO, Sambou Dodi BAGAYOGO et Livane Sheila GOUBA. Leur engagement, leur créativité et leur travail acharné ont grandement contribué au succès de ce projet. Chaque idée partagée et chaque effort fourni ont été précieux pour l'avancement de cette aventure scientifique. Merci à chacun d'entre vous pour votre passion et votre dévouement.

M. Beh Dencana KAM, M. Yves Clément NGUEJOURNE, M. Olivier RAMDE et M. Léonce Christian KAMSO KAMTO n'ont ménagé aucun effort pour m'aider souvent dans le réglage des miroirs sur la plateforme CSP4Africa. Je leur suis profondément reconnaissant pour leur disponibilité et leur soutien, qui ont permis de surmonter de nombreux défis techniques.

Un immense merci à Iliassou Salou NOUHOUE, Modou Mamoune DIAGNE, et Patrice Boubou LAMBA, mes chers camarades de promotion Master à l'Institut 2iE, et à Kader BANAOU DJIBO, Yawo Daniel ADUFU, Georges Kibalo TCHAMIE, mes chers amis du Laboratoire Éco-Matériaux et Habitats Durables, pour leur amitié, leur soutien indéfectible et les nombreuses discussions enrichissantes.

Je suis spécialement reconnaissant envers mes frères et sœurs, Fadimata Alassane MAIGA, Aminata Alassane MAIGA, Moussa Alassane MAIGA, Ibrahim Alassane MAIGA, Aissata Alassane MAIGA et Backa Alassane MAIGA, d'être ma source de motivation jour et nuit. C'est en partie grâce à eux que je trouve l'énergie pour surmonter les défis et atteindre mes objectifs.

Je remercie du fond du cœur l'ensemble de la famille MAIGA, dont l'appui, la confiance et les encouragements ont aussi été une source de force inestimable durant ce parcours. Leur présence, à la fois discrète et essentielle, a joué un rôle fondamental dans l'aboutissement de cette thèse, et je leur suis profondément redevable.

Enfin, je remercie tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin tout au long de ce parcours. Vos soutiens, encouragements et conseils précieux ont été essentiels pour l'atteinte de ce niveau. Je suis profondément reconnaissant envers chacun d'entre vous pour vos contributions, aussi petites soient-elles, qui m'ont permis d'avancer et de me surpasser.

Résumé

La présente thèse porte sur le développement d'une microcentrale solaire à concentration nommée CSP4Africa, en se concentrant sur deux axes principaux : l'amélioration de la poursuite solaire de deux technologies d'héliostat, à savoir la multifacette et le piédestal, et l'étude de deux huiles végétales issues de la même famille pour leur utilisation comme fluides de transfert et de stockage thermique, à savoir l'huile des graines de *Lannea microcarpa* (LaMSO) et l'huile des graines de *Lannea kerstingii* (LaKSO).

Le travail a d'abord mis en lumière les défis liés au fonctionnement idéal de la technologie d'héliostat multifacette, notamment l'instabilité de la grille, l'incurvation des miroirs, l'insuffisance des couple-moteurs, l'existence de jeux et les liaisons inappropriées. Les corrections ont consisté à remplacer les moteurs par des plus adéquats et à proposer une méthode flexible de réglage des miroirs. Après les corrections, des tests de suivi solaire ont été réalisés entre juin 2023 et février 2024, avec des résultats prometteurs, permettant désormais de faire fonctionner l'héliostat dans la période de fonctionnement de la microcentrale CSP4Africa (9h30 à 14h30), avec des déviations focales plus ou moins inférieures à 0,2 m. Parallèlement, en tant qu'alternatif à l'héliostat multifacette, un héliostat piédestal a été conçu, construit et testé avec succès. Les tests préliminaires ont montré que le principe de suivi solaire proposé fonctionne avec une précision inférieure à 1° pour une distance focale de 5 m. Des tests sur une année à différentes positions du champ sont encore nécessaires pour conclure sur la potentialité de cet héliostat.

Par ailleurs, les tests de stabilité thermique ont montré que LaMSO et LaKSO, présentent un potentiel notable pour leur utilisation comme fluides de transfert et de stockage thermique à 210 °C, sans incident majeur sur leur point d'éclair, leur masse volumique et leur viscosité après 1000 h de vieillissement. Cependant, l'augmentation de leur point de fusion au fil du vieillissement pose des défis de solidification dans les tuyauteries ou les réservoirs dans certains climats.

La compatibilité des deux huiles, LaMSO et LaKSO, avec les métaux courants dans l'industrie a également été examinée. L'étude a révélé que l'acier inoxydable 316L et l'aluminium sont les meilleurs choix pour l'utilisation de ces deux huiles à température élevée, tandis que le cuivre et l'acier galvanisé présentent des risques d'oxydation accrue.

Cette thèse met en évidence les potentialités de la microcentrale CSP4Africa, tant au niveau technologique qu'écologique. Les résultats obtenus ouvrent la voie à de futures recherches visant à intégrer ces solutions innovantes dans des projets énergétiques similaires en Afrique subsaharienne, contribuant ainsi à la transition énergétique et à la durabilité.

Mots-clés : solaire à concentration ; héliostats, suivi solaire ; huile des graines de *Lannea microcarpa* ; huile des graines de *Lannea kerstingii* ; stockage thermique ; stabilité thermique ; corrosion.

Abstract

This thesis focuses on the development of a micro-concentrated solar power plant named CSP4Africa, with two main objectives: improving the solar tracking accuracy of two heliostat technologies, specifically the multifaceted and pedestal types, and studying two vegetable oils as heat transfer and storage fluids, namely *Lannea microcarpa* seed oil (LaMSO) and *Lannea kerstingii* seed oil (LaKSO).

The work first highlighted the challenges related to the ideal operation of the multifaceted heliostat technology, including grid instability, mirror canting, insufficient motor torque, the presence of backlashes, and improper connections. The solutions involved replacing the motors with more suitable ones and proposing a flexible method for mirror adjustment. After these corrections, solar tracking tests were conducted between June 2023 and February 2024, yielding promising results. The heliostat is now able to operate during the working hours of the CSP4Africa microplant (9:30 am to 2:30 pm), with focal deviations generally below 0.2 m. In parallel, as an alternative to the multifaceted heliostat, a pedestal heliostat with its closed-loop tracking sensor was designed, constructed, and successfully tested. Initial tests have proved that the proposed solar tracking principle works well, with an error of less than 1° for a focal distance of 5 m. Further solar tracking tests over a full year at various positions in the field are still needed to conclude about the potential of this heliostat to address the solar concentration challenge in the CSP4Africa microplant.

Additionally, thermal stability tests showed that LaMSO and LaKSO have significant potential for use as both heat transfer and storage fluids at 210 °C, without major impact on their flash point, density, and viscosity after 1000 h of aging. Nonetheless, the increase in their melting point with aging presents solidification challenges for these oils in pipes or tanks in certain climates.

Ultimately, the compatibility of the two relative oils, LaMSO and LaKSO, with common industrial metals was also examined. The study revealed that 316L stainless steel and aluminum are the best choices for use with these oils at elevated temperatures, while copper and galvanized steel pose an increased oxidation risk for them.

This thesis highlights the technological and ecological potential of the CSP4Africa microplant. The results open the door to future research aimed at integrating these innovative solutions into similar energy projects in sub-Saharan Africa, thus contributing to energy transition and sustainability.

Keywords: concentrating solar power; heliostats; solar tracking; *Lannea microcarpa* seeds oil; *Lannea kerstingii* seeds oil; thermal storage; thermal stability; corrosion.

Table des matières

Dédicace	i
Remerciements	ii
Résumé	vi
Abstract	vii
Table des matières	viii
Liste des figures	xiii
Liste des tableaux	xviii
Liste des annexes	xix
Introduction générale	1
I. Contexte et enjeux énergétiques en Afrique	2
II. Présentation de la microcentrale solaire à concentration CSP4Africa	3
II. 1. Champ solaire	4
II. 2. Boucle thermique	5
II. 3. Boucle thermodynamique	6
III. Objectifs de la thèse	7
Chapitre 1 : Revue de la littérature	9
I. Introduction	10
II. Sources d'erreurs de suivi solaire et stratégies de correction des héliostats	10
II. 1. Notion générale sur les héliostats	11
II.1.1. Terminologie	11
II.1.2. Différentes technologies d'héliostats	12
II.1.3. Méthodes de suivi solaire des héliostats	14
II. 2. Méthodologie	18
II.2.1. Question de recherche	18
II.2.2. Identification et sélection des études	18
II. 3. Résultats et discussion	20

II.3.1.	Synthèse chronologique des études	20
II.3.2.	Sources récurrentes d'erreurs de suivi solaire	23
II.3.3.	Stratégies de correction des erreurs de suivi solaire.....	39
II. 4.	Conclusion sur les sources d'erreur de suivi solaire des héliostats.....	42
III.	Bref aperçu des huiles végétales comme fluides caloporteurs ou de stockage thermique	44
III. 1.	Présentation des huiles végétales.....	44
III.1.1.	Triglycérides.....	45
III.1.2.	Acides gras libres.....	45
III.1.3.	Composants mineurs	46
III. 2.	Propriétés d'intérêt des huiles végétales pour le transfert et stockage thermique.....	46
III. 3.	Stabilité thermique des huiles végétales	47
III.3.1.	Méthodes d'évaluation de la stabilité thermique.....	48
III.3.2.	Produits de dégradation thermique	48
III. 4.	État de l'art sur l'utilisation des huiles végétales comme fluides caloporteurs ou de stockage thermique	49
Chapitre 2 : Amélioration de la poursuite solaire de l'héliostat multifacette de la microcentrale CSP4Africa :		
	Diagnostic et correction des sources d'erreur de suivi solaire	53
I.	Introduction	54
II.	Présentation de l'héliostat multifacette de CSP4Africa	54
II.1.	Description physique.....	54
II.2.	Principe de fonctionnement.....	56
III.	Diagnostic et identification des sources d'erreur de l'héliostat multifacette	57
III.1.	Instabilité de la grille entre les composants de l'héliostat.....	58
III.2.	L'incurvation chronophage des miroirs pour une précision faible	58
III.3.	Insuffisance des couples moteurs	59
III.4.	Existence de jeux entre les composants de l'héliostat	59
III.5.	Liaisons pivot et rotule inappropriées.....	59
IV.	Approche méthodologique de correction des sources d'erreur identifiées	60

IV.1.	Etude de la possibilité de fixation et de réglage flexible des miroirs.....	60
IV.1.1.	Etude de faisabilité technique du dispositif de réglage des miroirs	61
IV.1.2.	Réalisation du dispositif de réglage des miroirs	62
IV.2.	Vérification du dimensionnement des moteurs pas-à-pas de l'organe d'entraînement ..	62
IV.2.1.	Modélisation des deux chaînes de transmission de l'organe d'entraînement.....	64
IV.2.2.	Besoins en impulsions de la charge.....	65
IV.2.3.	Vitesse-moteur nécessaire.....	66
IV.2.4.	Précision de positionnement	66
IV.2.5.	Couple-moteur nécessaire	66
IV.3.	Tests de suivi solaire.....	67
V.	Résultats et discussion	67
V.1.	Mise en œuvre des dispositifs de fixation et de réglage flexible des miroirs	67
V.2.	Dimensionnement des moteurs pas-à-pas de l'organe d'entraînement	68
V.3.	Tests de suivi solaire après les améliorations	70
VI.	Exploration d'une piste alternative : conception et test d'un héliostat piédestal avec capteur de suivi solaire en boucle fermée	72
VII.	Conclusion	75
Chapitre 3 : Etude expérimentale des huiles des graines de <i>Lannea microcarpa</i> et <i>Lannea kerstingii</i> pour leur utilisation comme fluide de transfert et de stockage thermique pour la microcentrale solaire CSP4Africa		76
I.	Introduction	77
II.	Description botanique et écologique des 2 espèces d'arbre du même genre	78
II.1.	<i>Lannea microcarpa</i>	78
II.2.	<i>Lannea kerstingii</i>	79
III.	Matériel et méthodes.....	80
III.1.	Extraction des deux huiles végétales	80
III.1.1.	Extraction au Soxhlet	81
III.1.2.	Extraction à la presse mécanique	81

III.2.	Procédure expérimentale	81
III.2.1.	Propriétés des deux huiles végétales neuves	82
III.2.2.	Vieillessement isotherme et caractérisation des échantillons	86
IV.	Résultats	88
IV.1.	Bilan de l'extraction	88
IV.1.1.	Huile des graines de <i>Lannea microcarpa</i>	88
IV.1.2.	Huile des graines de <i>Lannea kerstingii</i>	89
IV.2.	Propriétés des deux huiles végétales neuves	90
IV.2.1.	Propriétés thermophysiques et chimiques.....	90
IV.2.2.	Dégradation thermique.....	92
IV.3.	Caractérisation des échantillons d'huile vieillis.....	93
IV.3.1.	Evolution des propriétés thermophysiques et chimiques	93
IV.3.2.	Dégradation thermique.....	97
IV.3.3.	Changement de la composition chimique avec le vieillissement	99
V.	Discussion.....	101
V.1.	Comparaison des rendements d'extraction	101
V.2.	Propriétés des deux huiles végétales (neuves).....	102
V.3.	Analyse de la stabilité thermique des deux huiles végétales avec le vieillissement	107
V.4.	Limites de l'étude	109
VI.	Conclusion	111
Chapitre 4 : Analyse de la compatibilité des huiles des graines de <i>Lannea microcarpa</i> et de <i>Lannea kerstingii</i> avec les métaux courants dans l'industrie à température élevée		113
I.	Introduction	114
II.	Matériel et méthodes.....	115
II.1.	Matériels	115
II.2.	Procédure expérimentale	116
II.2.1.	Test de corrosion par immersion des métaux	116

II.2.2.	Caractérisation des échantillons d'huiles vieillis	119
III.	Résultats	120
III.1.	Caractérisation des échantillons d'huiles vieilles	120
III.1.1.	Changements apparents survenus	120
III.1.2.	Evolution des propriétés thermophysiques et chimiques	121
III.2.	Vitesse de corrosion des métaux	131
III.2.1.	Test de compatibilité à température ambiante	131
III.2.2.	Test de compatibilité à 210 °C	132
IV.	Discussion.....	134
IV.1.	Analyse de la stabilité avec le vieillissement en présence des métaux.....	134
IV.1.1.	Test de compatibilité à température ambiante	134
IV.1.2.	Test de compatibilité à 210 °C	135
IV.2.	Analyse de la compatibilité des deux huiles avec les métaux	136
IV.3.	Limites de l'étude	139
V.	Conclusion	140
	Conclusion générale et perspectives	142
	Bibliographie	146
	Annexes	162

Liste des figures

Figure 1: Schéma synoptique de fonctionnement de la microcentrale CSP4Africa.....	4
Figure 2: Configuration du champ solaire : 20 héliostats en 4 rangées de 5 colonnes	5
Figure 3: (a) Illustration de l'absorbeur, (b) illustration de l'absorbeur intégré dans la structure métallique du récepteur solaire, (c) aperçu du récepteur solaire après fabrication et (d) illustration de la cuve de stockage.....	5
Figure 4: (a) Illustration schématique de la machine à cycle organique de Rankine	6
Figure 5: Schéma de principe de la loi de Snell-Descartes appliquée à un héliostat	11
Figure 6: Regroupement des méthodes de suivi solaire suivant i) le principe, ii) le mode et iii) le mouvement de suivi solaire.....	14
Figure 7: Illustration du principe de fonctionnement d'une méthode de suivi solaire a) en boucle ouverte et b) en boucle fermée	15
Figure 8: Mécanisme de fonctionnement passif basé sur la dilatation thermique : l'héliostat a) à sa position de fin de suivi solaire du jour d'avant, b) pivoté en raison du mouvement total du liquide vers l'est, c) à plat au midi solaire, et d) à sa position de fin de suivi solaire au coucher du soleil	16
Figure 9: Illustration a) du concentrateur à deux étages (héliostat et parabole) et b) du principe de fonctionnement de l'héliostat du four solaire de l'Institut Paul Scherrer	17
Figure 10: Flux de diagramme PRISMA de la procédure principale de sélection des articles.....	19
Figure 11: Déviation journalière causée par l'inclinaison du piédestal en fonction des quatre points cardinaux pour un héliostat situé au nord de la tour (Móstoles) aux solstices d'été (a,c) et d'hiver (b,d). L'inclinaison et la direction (nord : N, sud : S, est : E et ouest : O) du piédestal sont indiquées à côté des courbes, et leur position correspond au début du suivi	25
Figure 12: Déviation journalière causée par l'inclinaison du piédestal vers le nord, l'est et le nord-est pour un héliostat situé au nord de la tour (Pékin) au solstice d'été.	26
Figure 13: Déviation causée par l'inclinaison du piédestal suivant a) les quatre points cardinaux (est, ouest, sud et nord) au midi solaire et b) la zone de déviation journalière de leurs combinaisons (sud-est, sud-ouest, nord-est et nord-ouest) pour un héliostat situé au nord de la tour.	26
Figure 14: Illustration des paramètres intervenant dans la simulation de la déviation de la tache focale effectuée par Escobar-Toledo et al.	27
Figure 15: Déviations journalières causées par une inclinaison du piédestal de 10 mrad suivant a) le sud-ouest ($d/h=20$) et b) l'ouest ($d/h=1,5$) pendant différents mois de l'année pour un héliostat situé au nord de la tour (Hermosillo, Mexico)	28

Figure 16: Déviation journalière causée par le décalage azimutal de référence du réflecteur pour un héliostat situé au nord de la tour (Móstoles, Espagne) aux solstices a) d'été et b) d'hiver. De gauche à droite, le décalage varie de -20 mrad à 20 mrad, et sa position d'indication correspond au début du suivi. Les courbes sont agrandies 43 fois à l'intérieur des ellipses.	29
Figure 17: Déviation journalière causée par le décalage d'élévation de référence du réflecteur pour un héliostat situé au nord de la tour (Móstoles, Espagne) aux solstices a) d'été et b) d'hiver. De gauche à droite, le décalage varie de -20 mrad à 20 mrad, et sa position d'indication correspond au début du suivi	29
Figure 18: Illustration des différentes déviations causées par l'avance azimutale, le retard azimutal, l'avance en élévation et le retard en élévation du réflecteur pour un héliostat situé plein nord de la tour.	30
Figure 19: Illustration de la disposition idéale des deux axes de suivi solaire d'un héliostat piédestal...	31
Figure 20: Déviation journalière causée par la mauvaise disposition des deux axes de suivi pour un héliostat situé au nord de la tour (Móstoles) a) au solstice d'été et b) au solstice d'hiver. L'angle θ est indiqué à côté de chaque courbe de déviation, et sa position correspond au début du suivi	32
Figure 21: Illustration de l'effet cosinus	33
Figure 22: Illustration du type d'orientation d'axes giration-élévation (spinning-elevation mount)	34
Figure 23: Déviation journalière causée par l'erreur d'incurvation par rapport à l'axe de roulis pour un héliostat situé au nord de la tour a) au solstice d'été et b) au solstice d'hiver à Móstoles (Espagne). La valeur de l'erreur est indiquée à côté de chaque courbe de déviation et sa position correspond au début du suivi.....	35
Figure 24: Déviations journalières causées par une erreur d'incurvation de 10 mrad par rapport à l'axe d'élévation pour un héliostat a) éloigné ($d/h=20$) et b) proche ($d/h= 1,5$) situé au nord de la tour à Hermosillo (Mexico)	36
Figure 25: Déviation journalière causée par le décalage horaire pour un héliostat situé au nord de la tour a) au solstice d'été et b) au solstice d'hiver à Móstoles (Espagne). L'ampleur du décalage horaire est indiquée à côté de chaque courbe de déviation, et sa position correspond au début du suivi	37
Figure 26: Déviation journalière causée par un retard temporel d'environ 1 mrad pour un héliostat situé au nord de la tour au solstice d'été à Pékin (Chine).....	38
Figure 27: Illustration des cibles de calibration placées sous le récepteur dans différentes centrales CSP (de gauche à droite) : Planta Solar 10, Gemasolar, Coalinga Chevron Solar, Crescent Dunes Solar power plant, Sierra Suntower.....	40
Figure 28: Classification des méthodes de calibration en fonction de l'emplacement du dispositif principal du système de caractérisation des faisceaux (BCS)	41

Figure 29: Équation chimique de la formation des triglycérides	45
Figure 30: Structure chimique d'un acide gras	45
Figure 31: Critères de sélection des fluides caloporteurs et matériaux de stockage thermique sensible	47
Figure 32: Illustration du mécanisme de dégradation thermique des huiles végétales par pyrolyse	49
Figure 33: Aperçu de l'assemblage des différents composants de l'héliostat multifacette de CSP4Africa : a) perspective de l'héliostat, b) illustration de l'oscillation de la grille et c) l'organe d'entraînement couplé à la grille.....	55
Figure 34: Présentation des différentes inclinaisons extrêmes des réflecteurs de l'héliostat	57
Figure 35: Cas de tolérances dimensionnelles des cornières de liaison (encadrées en rouge)	59
Figure 36: Présentation de a) la liaison pivot et b) la liaison rotule de l'héliostat réalisées avec des systèmes vis-écrou et cornières.....	60
Figure 37: a) Vue de dessus et b) coupe transversale du dispositif individuel de réglage des miroirs, et c) vue de plusieurs dispositifs de réglage implantés sur un réflecteur de l'héliostat.....	61
Figure 38: Rotule de a) la direction d'une voiture, b) du rétroviseur d'une moto, b) d'un trépied pour caméra, et d) d'un rétroviseur extérieur et e) intérieur de voiture.....	62
Figure 39: Présentation de la chaîne de transmission du a) moteur X et du b) moteur Y	65
Figure 40: a) Implémentation des dispositifs de fixation sur les réflecteurs ; b) fixation des miroirs centraux des réflecteurs ; c) miroirs périphériques réglés sur l'héliostat ; d) cinq miroirs installés et réglés sur un réflecteur avec concentration précise.....	68
Figure 41: Séquence d'images de la tache focale pendant le test de suivi solaire conduit le 08 Aout 2023.	71
Figure 42: Illustration du principe de suivi solaire mis en place.....	73
Figure 43: Illustration du capteur LDR à quatre quadrants a) ombragé par le masque frontal, b) partiellement illuminé par la tache focale, et c) à nouveau ombragé par le masque frontal après correction de l'orientation de l'héliostat.....	73
Figure 44: Capteur LDR à quatre quadrants en a) perspective et b) vue de face, et c) l'organe de commande de l'héliostat	74
Figure 45: Présentation de a) <i>Lannea microcarpa</i> et b) ses fruits.....	79
Figure 46: Présentation de <i>Lannea kerstingii</i> et ses fruits.....	80
Figure 47: Résumé de la procédure expérimentale adoptée pour l'étude du potentiel des deux espèces d'huiles comme fluides de transfert et de stockage thermique.....	82
Figure 48: Illustration de la chauffe subie par les huiles pendant le vieillissement isotherme à 210 °C. 86	

Figure 49: a) Réacteur A (63 mL) et b) Réacteur B (70 mL) entièrement fabriqués en acier inoxydable 316L.....	87
Figure 50: Évaluation globale du processus d'extraction de l'huile des graines de <i>Lannea microcarpa</i> au a) Soxhlet et à la b) presse	89
Figure 51: Évaluation globale du processus d'extraction de l'huile des graines de <i>Lannea kerstingii</i> au a) Soxhlet et à la b) presse	89
Figure 52: Capacités thermiques massiques des huiles végétales a) LaMSO et b) LaKSO en fonction de la température.....	91
Figure 53: Viscosités cinématiques des huiles végétales LaMSO et LaKSO en fonction de la température	92
Figure 54: Courbes TG et DTG des huiles végétales a) LaMSO et b) LaKSO	93
Figure 55: Évolution des propriétés thermophysiques et chimiques de LaMSO : a) point d'éclair, b) point de fusion, c) masse volumique 25 °C, d) viscosité cinématique, e) indice d'acide, et f) indice d'iode....	94
Figure 56: Évolution des propriétés thermophysiques et chimiques de LaKSO : a) point d'éclair, b) point de fusion, c) masse volumique 25 °C, d) viscosité cinématique, e) indice d'acide, f) indice d'iode, et g) teneur en métaux.	96
Figure 57: Courbes a) TG et b) DTG des échantillons de LaMSO neufs et vieillis.....	97
Figure 58: Courbes a) TG et b) DTG des échantillons de LaKSO neufs et vieillis	98
Figure 59: Spectres FTIR de LaMSO et de ses échantillons vieillis	100
Figure 60: Spectres FTIR de LaKSO et de ses échantillons vieillis.....	101
Figure 61: Résumé de la procédure expérimentale adoptée pour l'analyse de la compatibilité les deux espèces d'huile avec les métaux.....	116
Figure 62: Préparation des échantillons métalliques conformément à la norme ASTM G1	117
Figure 63: Présentation des échantillons de (a,c) LaKSO et (b,d) LaMSO avec les différents métaux (316L, Al, Cu et GS).....	119
Figure 64: Séparation en deux phases (couche solide et huile pâteuse) des échantillons d'huile vieillis en présence de l'acier galvanisé (GS) après a) 500h et b) 1000h de vieillissement à 210 °C.....	120
Figure 65: a) Saturation de LaKSO après 1000 h de vieillissement à 210 °C et b) fixation des gouttelettes d'huile solides sur le cuivre.	121
Figure 66: Évolution des propriétés thermophysiques et chimiques des échantillons de LaMSO vieillis en présence des métaux (316L, Al, Cu, et GS) à température ambiante : a) point d'éclair, b) point de fusion, c) masse volumique à 25 °C, d) viscosité cinématique, e) indice d'acide, f) indice d'iode, g) indice de peroxyde et h) teneur en métaux.	123

Figure 67: Évolution des propriétés thermophysiques et chimiques des échantillons de LaKSO vieilliss en présence des métaux (316L, Al, Cu, et GS) à température ambiante : a) point d'éclair, b) point de fusion, c) masse volumique à 25 °C, d) viscosité cinématique, e) indice d'acide, f) indice d'iode, g) indice de peroxyde et h) teneur en métaux.	125
Figure 68: Évolution des propriétés thermophysiques et chimiques des échantillons de LaMSO vieilliss en présence des métaux (316L, Al, Cu, et GS) à 210 °C : a) point de fusion, b) masse volumique à 40 °C, c) viscosité cinématique, d) indice d'acidité, e) indice d'iode et f) teneur en métaux.....	128
Figure 69: Évolution des propriétés thermophysiques et chimiques des échantillons de LaKSO vieilliss en présence des métaux (316L, Al, Cu, et GS) à 210 °C : a) point de fusion, b) masse volumique à 40 °C, c) viscosité cinématique, d) indice d'acidité, e) indice d'iode et f) teneur en métaux.....	130
Figure 70: Échantillons métalliques après (a,c) le nettoyage à l'acétone et (b,d) le polissage au papier abrasif au terme du test de corrosion par immersion dans (a,b) LaMSO et (c,d) LaKSO à température ambiante pendant une année.	132
Figure 71: Taux de corrosion des métaux en immersion statique dans les huiles LaMSO et LaKSO à température ambiante.	132
Figure 72: Échantillons métalliques après le nettoyage à l'acétone (a,c,e,g) et le polissage au papier abrasif (b,d,f,g) au terme des tests de corrosion par immersion dans (a–d) LaMSO et (e–h) LaKSO à 210 °C pendant (a,b,e,f) 500 h et (c,d,g,h) 1000 h.....	133
Figure 73: Taux de corrosion des métaux en immersion statique à 210 °C dans a) LaMSO et b) LaKSO.	134

Liste des tableaux

Tableau 1: Paramètres intervenant dans le fonctionnement des héliostats	11
Tableau 2: Comparaison des technologies d'héliostats	13
Tableau 3: Présentation des sources d'erreur récurrentes de suivi solaire dans les champs d'héliostats	21
Tableau 4: Comportements généraux de la déviation causée par l'inclinaison du piédestal suivant les quatre points cardinaux et combinaisons.	27
Tableau 5: Comportements généraux de la déviation causée par le décalage de la référence angulaire du réflecteur de l'héliostat	30
Tableau 6: Comportements généraux de la déviation causée par l'erreur d'incurvation par rapport à l'axe d'élévation.....	36
Tableau 7: Méthodes de mise en œuvre du contrôle de suivi solaire en boucle fermée.	42
Tableau 8 : Huiles végétales envisagées et utilisées comme fluide de transfert ou stockage thermique dans les microcentrales solaires	50
Tableau 9: Présentation des actions enclenchées par les différentes combinaisons du pupitre de commande	56
Tableau 10: Hypothèses de calcul du dimensionnement des moteurs pas-à-pas.....	63
Tableau 11: Présentation des différents composants de l'héliostat intervenant dans le dimensionnement	64
Tableau 12: Récapitulation des résultats de redimensionnement des moteurs pas-à-pas de l'organe d'entraînement.....	69
Tableau 13: Spécifications techniques des nouveaux moteurs pas-à-pas choisis pour l'héliostat multifacette.....	70
Tableau 14: Nomenclature des échantillons d'huile (extraits au Soxhlet)	87
Tableau 15: Informations générales sur les cellules de test fabriquées en acier inoxydable 316L	88
Tableau 16: Propriétés thermophysiques et chimiques des huiles végétales LaMSO et LaKSO	92
Tableau 17: Comparaison des rendements d'extraction des différentes méthodes d'extraction.....	102
Tableau 18: Propriétés thermophysiques et chimiques de LaMSO (de la présente étude et d'autres), LaKSO (de la présente étude et d'autres), RJCO, JaCCO, Dowtherm A et Xceltherm 600.	103
Tableau 19: Indice de résistance des métaux à la corrosion en présence des huiles LaKSO et LaMSO.	138

Liste des annexes

Annexe A: Résultats du dimensionnement effectué à l'aide de l'outil "Orientalmotor"	A-1
Annexe B: Présentation de la fiche technique des nouveaux moteurs pas-à-pas choisis	B-1
Annexe C: Séquences d'images des tests de suivi solaire réalisés entre juin 2023 à février 2024	C-1
Annexe D: Collaboration sur une autre technologie d'héliostat : Conception, construction et test d'un héliostat piédestal avec son capteur de suivi solaire en boucle fermée pour la microcentrale solaire CSP4Africa	D-1
Annexe E: Présentation botanique et écologique de <i>Lannea microcarpa</i> et <i>Lannea kerstingii</i>	E-1
Annexe F: Estimation du coût de production à petite échelle des huiles des graines de <i>Lannea microcarpa</i> (LaMSO) et <i>Lannea kerstingii</i> (LaKSO), et de ceux des autres huiles considérées dans la comparaison économique	F-1
Annexe G: Liste des publications, communications et prix scientifiques	G-1

Introduction générale

I. Contexte et enjeux énergétiques en Afrique

L'accès à l'électricité est un facteur essentiel pour assurer le développement socio-économique, ainsi que les services de base indispensables tels que la santé, l'éducation et la sécurité [1,2]. Cependant, l'Afrique rencontre un défi majeur en matière d'accès à l'énergie, alors que les besoins croissants de sa population restent largement insatisfaits [3–6]. En 2023, le continent africain abrite environ 17,6 % de la population mondiale, mais ne représente que 3 % de la consommation électrique mondiale, faisant de lui la région la moins consommatrice d'électricité au monde [7].

L'Afrique présente une grande disparité dans l'accès à l'électricité, avec une ligne de fracture marquée entre l'Afrique du Nord et l'Afrique subsaharienne. Tandis que l'Afrique du Nord a presque atteint 100 % de taux d'électrification en 2019, le taux d'électrification en Afrique subsaharienne était de 48 % la même année [8]. Aujourd'hui, la majeure partie des populations sans accès à l'électricité vit en Afrique subsaharienne [7,9]. Cette situation a des répercussions considérables sur le développement socio-économique du continent. Les régions rurales en sont particulièrement touchées, avec des taux d'accès à l'électricité extrêmement faibles. Dans de nombreux pays de l'Afrique de l'Ouest, par exemple, moins de 25 % des populations rurales ont accès à l'électricité, contre plus de 70 % en zones urbaines [1,10]. Pourtant, près de 70 % de la population africaine vivent en zone rurale [1,10]. Cette inégalité entre zones rurales et urbaines exacerbe les disparités sociales et économiques, freinant la croissance économique dans les régions les plus vulnérables [11].

Face à ces faibles taux d'électrification, une grande partie de la population africaine continue de dépendre des sources d'énergie non modernes, principalement la biomasse traditionnelle (le bois et le charbon) [7]. Dans des pays comme le Burkina Faso, la biomasse représente environ 63 % de la demande énergétique primaire, tandis que l'électricité n'en constitue que 5 % [12]. Cette utilisation massive de la biomasse a des conséquences environnementales graves, telles que la déforestation et les émissions de gaz à effet de serre, contribuant ainsi aux changements climatiques. Parallèlement, la dépendance aux combustibles fossiles importés pose également des défis majeurs, en raison de la flambée des prix sur le marché international.

L'Afrique a connu une demande croissante en électricité ces dernières années [13], avec une augmentation annuelle moyenne de 7 % au cours de la dernière décennie dans la zone de l'Union Économique et Monétaire Ouest Africaine (UEMOA) [1]. Cette augmentation est due à divers facteurs, tels que la croissance démographique, la croissance économique, l'urbanisation galopante, etc. [3–6]. Toutefois, cette hausse de la demande met une pression considérable sur les infrastructures énergétiques, qui sont souvent obsolètes et mal entretenues [3–6]. Les pertes liées aux pannes

fréquentes et aux perturbations des réseaux électriques entraînent non seulement des pertes économiques, mais affectent également la qualité des services fournis. En outre, les coûts élevés de l'électricité dans certains pays, y compris les régions du Sahel [1,12], constituent une barrière supplémentaire pour l'accès à l'électricité des populations rurales [1,12]. Ces populations, ayant un accès limité à l'électricité, se tournent vers des alternatives moins chères, mais plus polluantes. Ces défis soulignent la nécessité d'une transition énergétique efficace et inclusive pour réduire les inégalités d'accès et améliorer la durabilité des systèmes énergétiques africains.

Face à ces défis énergétiques, les énergies renouvelables (énergie solaire, énergie éolienne, énergie hydroélectrique, énergie géothermique, etc.) offrent de grandes opportunités [14]. En particulier, le continent bénéficie d'un ensoleillement abondant, ce qui en fait de l'Afrique, particulièrement le Sahel, un lieu idéal pour le développement de projets solaires à grande échelle. Des initiatives comme la centrale solaire à concentration (CSP) de Noor au Maroc démontrent la capacité de l'Afrique à exploiter ses ressources naturelles pour répondre à ses besoins énergétiques [15,16].

Les technologies CSP pourraient constituer une voie d'industrialisation pour l'Afrique subsaharienne, en particulier le Sahel, par rapport à la technologie photovoltaïque [17]. En effet, les premières centrales CSP au monde, ainsi que les premières pompes solaires thermodynamiques, ont été établies au Sahel [18] et les composants majeurs de ces centrales peuvent être conçus localement en ayant recours aux matériaux et compétences disponibles dans la sous-région [17,19]. Cela permettrait de réduire les coûts de production finale et d'accroître la capacité de la région à tirer profit des technologies CSP. Cependant, des investissements importants sont nécessaires pour ces infrastructures énergétiques, souvent hors de portée des autorités locales [14]. Il est crucial de renforcer la collaboration entre les gouvernements, les centres de recherche et le secteur privé pour accélérer l'intégration des technologies CSP. En parallèle, des initiatives de formation et de transfert de compétences locales doivent être mises en place pour garantir une main-d'œuvre qualifiée, capable de soutenir la conception, la construction et l'entretien de ces installations. La valorisation des ressources humaines locales, alliée à l'utilisation de matériaux à faible coût disponibles dans la région, pourraient jouer un rôle clé dans la réduction de la dépendance énergétique de l'Afrique subsaharienne [17,18], tout en favorisant un modèle de développement durable et autonome basé sur les énergies renouvelables telles que le solaire.

II. Présentation de la microcentrale solaire à concentration CSP4Africa

CSP4Africa est un projet de développement d'une microcentrale solaire à concentration avec forte valeur ajoutée locale [17,19]. La spécificité de ce projet réside dans l'utilisation des matériaux localement

disponibles pour la conception des composants de la microcentrale. Cela contribue, d'une part, au renforcement des capacités locales et réduit, d'autre part, le coût de la production finale de l'électricité.

La microcentrale CSP4Africa est en développement sur le campus 2iE sis à Kamboinsin [17,19]. Comme toutes les centrales solaires à tour, CSP4Africa est principalement composée de trois grandes parties (Figure 1), notamment le champ solaire comportant les héliostats, la boucle thermique comprenant le récepteur solaire et la boucle thermodynamique correspondant à l'unité de conversion de la chaleur en électricité.

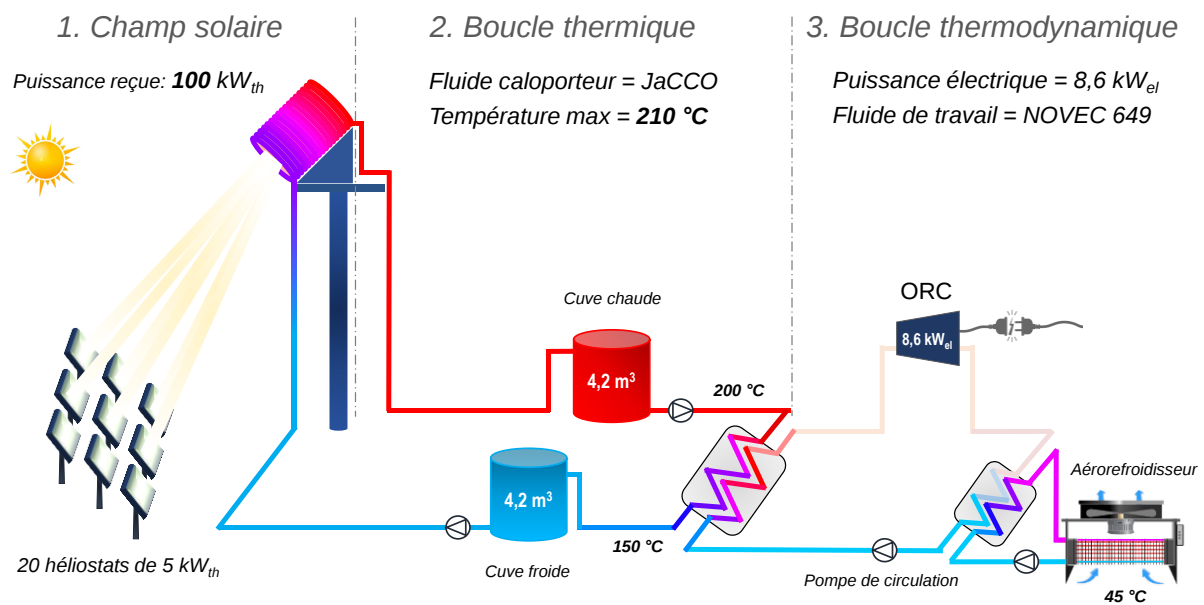


Figure 1: Schéma synoptique de fonctionnement de la microcentrale CSP4Africa

II. 1. Champ solaire

Le champ solaire de la microcentrale CSP4Africa, basé sur une technologie d'héliostat multifacette à entraînement commun [17,19], est le principal intrant énergétique du processus de production d'électricité de la microcentrale. Il concentre sur le récepteur le rayonnement solaire grâce à 20 héliostats multifacettes. Le rôle de ces héliostats est de réfléchir instantanément, tels que reçus, les rayons incidents du soleil. La puissance totale de focalisation est de 100 kW_{th} , ainsi chaque héliostat fournit 5 kW_{th} . Le champ solaire est implanté sur une surface de $19,5 \text{ m} \times 23,75 \text{ m}$ et les héliostats sont rangés en cinq colonnes de quatre lignes (Figure 2). L'héliostat de la colonne i et de la ligne j est nommée H_{ij} [17,19]. La colonne est numérotée de l'est vers l'ouest de 1 à 5, tandis que la ligne est numérotée du sud vers le nord de 1 à 4.

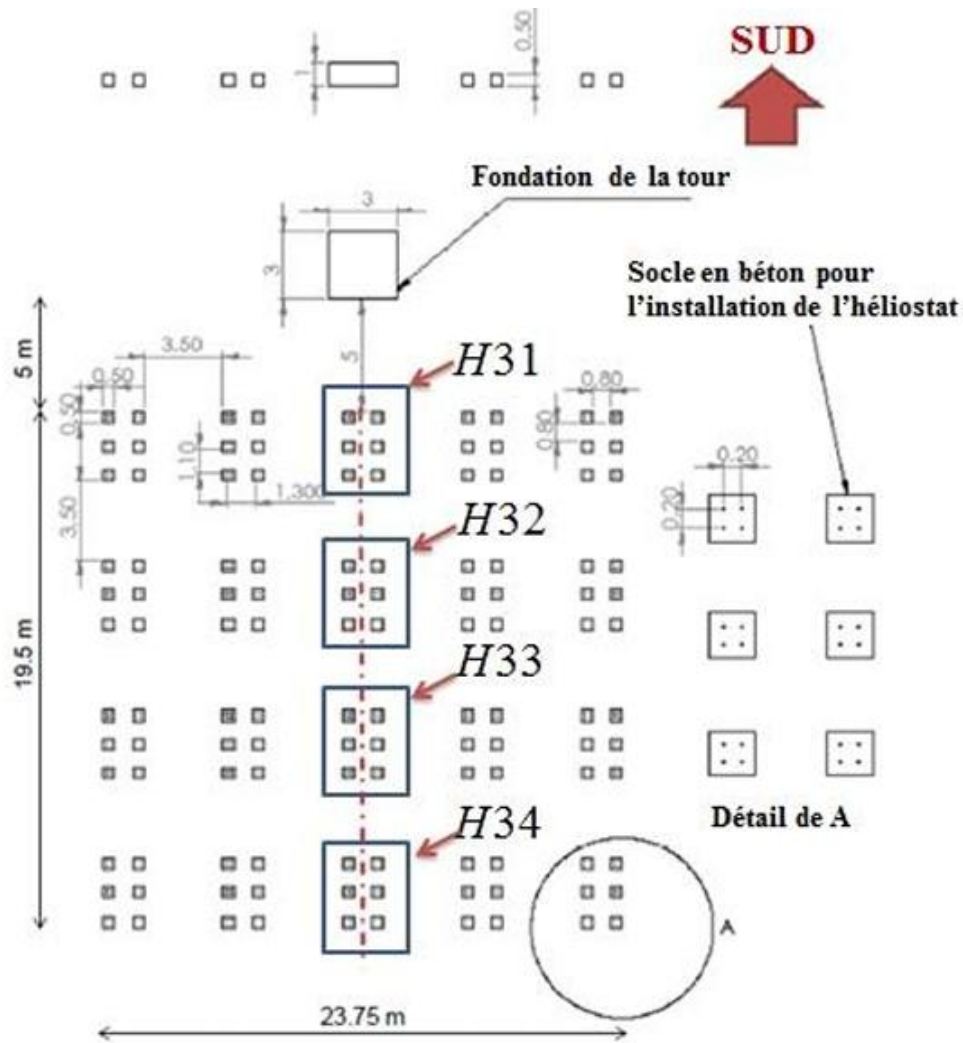


Figure 2: Configuration du champ solaire : 20 héliostats en 4 rangées de 5 colonnes [17,19].

II. 2. Boucle thermique

La boucle thermique est composée principalement du récepteur solaire et des cuves de stockage (Figure 1). Ces composants sont reliés entre eux par des tuyauteries en acier inoxydable 316L. Le récepteur solaire, de type cavitare cylindrique, est constitué d'un tube en acier galvanisé de diamètre interne 2,54 cm, formant un enroulement hélicoïdal (Figure 7a), et le tout recouvert par une tôle en acier galvanisé (Figure 7c).

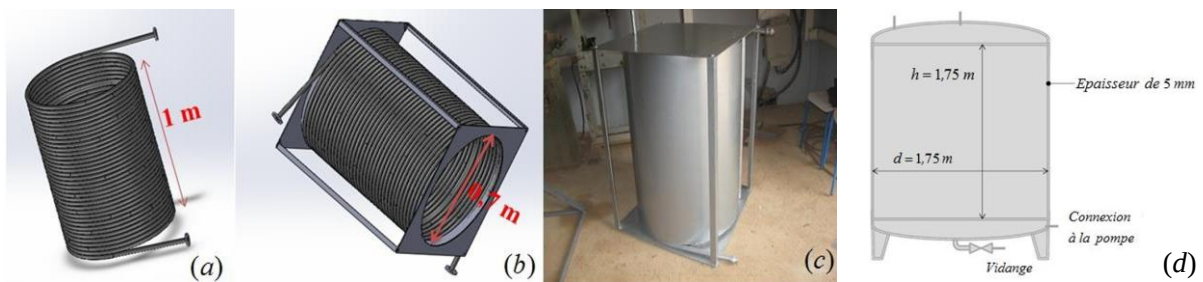


Figure 3: (a) Illustration de l'absorbeur, (b) illustration de l'absorbeur intégré dans la structure métallique du récepteur solaire, (c) aperçu du récepteur solaire après fabrication et (d) illustration de la cuve de stockage [17,19]

Le système de stockage de la microcentrale CSP4Africa est constitué de 2 cuves identiques en acier inoxydable 316L. Les deux cuves ont les mêmes dimensions (diamètre = hauteur = 1,75 m) pour 5 mm d'épaisseur. Cette géométrie présente l'avantage de réduire non seulement la surface des cuves et du matériau, mais aussi les pertes thermiques. L'introduction de l'huile de *Jatropha curcas* comme fluide caloporteur et de stockage thermique est l'une des innovations majeures du projet CSP4Africa. Le fluide caloporteur, l'huile de *Jatropha curcas*, est pompé de la cuve froide à 150 °C par un circulateur, pour récupérer la chaleur emmagasinée au niveau du récepteur solaire afin de la stocker dans la cuve chaude à 210 °C. La température maximale du fluide caloporteur est limitée à 210 °C, sachant que la température opérationnelle de la microcentrale est de 200 °C.

II. 3. Boucle thermodynamique

La boucle thermodynamique est principalement constituée d'une machine à cycle organique de Rankine (ORC) et d'un aérorefroidisseur (Figure 1). La puissance thermique d'entrée dans le bloc ORC, présentée à la Figure 4, est de 100 kW_{th} pour une puissance électrique de 8,6 kW_{el} à la sortie. L'aérorefroidisseur a pour rôle de refroidir le fluide de travail, en l'occurrence le Novec 649, utilisé dans la boucle thermodynamique. Le cycle de fonctionnement de la boucle thermodynamique commence par le pompage du fluide caloporteur à 200 °C de la cuve chaude à l'évaporateur du bloc ORC. Par la suite, le fluide caloporteur cède sa chaleur au fluide de travail, qui s'évapore pour entrainer la turbine. Cette dernière est couplée à un alternateur qui génère de l'électricité. Le fluide caloporteur sort du bloc ORC à 150 °C et retourne dans la cuve froide pour un nouveau cycle.

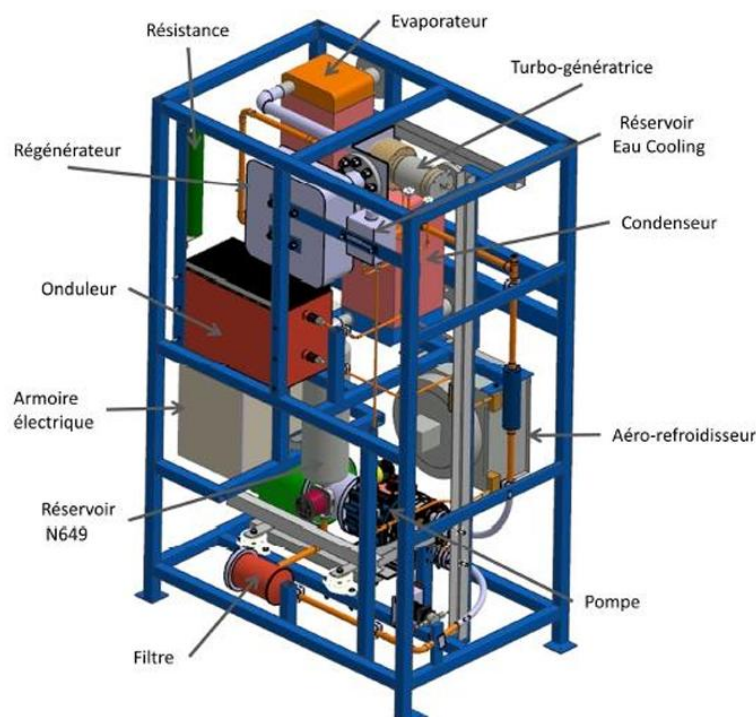


Figure 4: (a) Illustration schématique de la machine à cycle organique de Rankine [17,19]

Ainsi, dans la conception de cette microcentrale, des simplifications significatives ont été apportées afin de rendre possible la fabrication de bon nombre de ses composants par la main d'œuvre locale, en exploitant au maximum les matériaux disponibles dans la région [17,20]. Le champ solaire repose sur un prototype d'héliostat multifacette et un récepteur solaire qui ont été conçus, fabriqués et testés [19]. Dans le cadre de l'utilisation des ressources locales, l'huile de *Jatropha curcas* a été explorée comme fluide caloporteur et de stockage thermique pour le projet, et plus largement pour des applications nécessitant des températures élevées [21–24]. Les principales avancées réalisées à ce jour comprennent :

- L'évaluation du potentiel de la technologie CSP et un classement des sites d'Afrique de l'Ouest selon ce potentiel énergétique ;
- La conception globale d'une microcentrale CSP optimisée pour une intégration locale, avec une chaîne de valeur ajoutée significative ;
- La fabrication, l'installation et la mise en fonctionnement de divers éléments de la microcentrale, incluant le récepteur solaire, la tour et le circuit thermique avec ses réservoirs de stockage ;
- Les tests initiaux sur une partie opérationnelle du champ solaire.

Cependant, un des principaux défis reste la correction des défauts résiduels des héliostats pour que le champ solaire atteigne sa pleine capacité thermique. Quant au stockage thermique, bien que les recherches de l'équipe aient confirmé le potentiel de l'huile de *Jatropha curcas* pour les applications thermiques à haute température, la présence d'oxygène affecte sa stabilité thermique, comme c'est le cas pour la plupart des fluides de ce type. Récemment, l'huile extraite des graines de *Lannea microcarpa*, également produite localement, a montré des propriétés de stabilité à l'oxydation supérieures lors d'analyses initiales [25]. Un approfondissement de ces études serait nécessaire pour valider son efficacité en tant que fluide caloporteur ou de stockage thermique dans les centrales solaires à concentration et d'autres procédés industriels à haute température.

III. Objectifs de la thèse

L'objectif général de la présente thèse est de contribuer au développement d'un pilote économiquement viable de microcentrale solaire à concentration nommée CSP4Africa. Pour atteindre cet objectif, quatre objectifs spécifiques ont été définis :

- Effectuer l'état de l'art des stratégies de correction des erreurs de suivi solaire dans les champs d'héliostats de centrales solaires à concentration.

- Développer et valider un héliostat pleinement opérationnel pour le champ solaire de la microcentrale CSP4Africa. Cela inclut le diagnostic et la correction des sources d'erreur de la technologie d'héliostat multifacette actuellement utilisée, et éventuellement le développement d'une technologie d'héliostat classique fonctionnant en boucle fermée.
- Caractériser les propriétés thermophysiques et chimiques de l'huile des graines de *Lannea microcarpa* et l'huile des graines de *Lannea kerstingii* à température élevée, en vue d'évaluer leur potentiel comme fluides caloporteurs ou de stockage thermique pour la microcentrale CSP4Africa. Les performances de ces deux huiles seront comparées à celles des fluides de référence de l'industrie CSP et à celles d'autres huiles végétales comme l'huile brute de *Jatropha curcas*.
- Analyser la compatibilité de l'huile des graines de *Lannea microcarpa* et l'huile des graines de *Lannea kerstingii*, avec les métaux couramment utilisés dans les infrastructures industrielles à température élevée, y compris les centrales solaires à concentration : l'acier inoxydable 316L, l'aluminium, le cuivre et l'acier galvanisé.

Le présent manuscrit, fruit de trois années de travaux, est structuré en quatre chapitres :

- Le premier chapitre présente les généralités sur les héliostats et les huiles végétales comme fluides caloporteurs ou de stockage thermique dans les applications à haute température.
- Le deuxième chapitre se concentre sur l'amélioration de la poursuite solaire du modèle d'héliostat multifacette de la microcentrale CSP4Africa. Il explore également une piste alternative d'héliostat piédestal fonctionnant en boucle fermée.
- Le troisième chapitre porte sur l'investigation de l'huile des graines de *Lannea microcarpa* et l'huile des graines de *Lannea kerstingii*, en tant que fluides caloporteurs ou de stockage thermique dans les applications à haute température telles que les centrales solaires à concentration.
- Le quatrième chapitre analyse la compatibilité de l'huile des graines de *Lannea microcarpa* et l'huile des graines de *Lannea kerstingii*, avec les métaux d'ingénierie courants dans les procédés thermiques.

Chapitre 1 : Revue de la littérature

I. Introduction

Dans le cadre du projet CSP4Africa, nous visons à développer un pilote de microcentrale solaire à concentration, répondant aux défis énergétiques en Afrique subsaharienne, où l'accès à l'électricité est limité, notamment en milieu rural. La technologie solaire à concentration (CSP) se distingue par la possibilité de fabriquer une grande partie de ses composants localement, en utilisant la main-d'œuvre et les matériaux disponibles sur place, ce qui pourrait réduire les coûts de production et favoriser le développement industriel local durable. Dans les centrales CSP à tour, modèle retenu dans le cadre de CSP4Africa, les héliostats concentrent les rayons solaires vers un récepteur central, permettant la conversion de l'énergie solaire en énergie thermique. Cependant, le principal défi du pilote mis en place reste la correction des défauts des héliostats pour avoir un champ complètement fonctionnel.

Plus généralement, dans les centrales à tour, des erreurs de suivi solaire peuvent compromettre leur performance, avec des pertes d'efficacité allant jusqu'à 20 %, comme observé dans des projets tels que Solar Two [26,27]. Par exemple, un incendie causé par les erreurs de suivi solaire a temporairement mis hors service un récepteur à Ivanpah (États-Unis) [28]. Ces erreurs, dues à des facteurs tels que les imperfections structurelles, le vent et la gravité, nécessitent des technologies de suivi avancées et des stratégies de correction.

Par ailleurs, dans le cadre de la mise en valeur des matériaux localement disponibles, les huiles végétales ont été identifiées comme potentiels fluides de stockage et de transfert thermique dans le cadre du projet CSP4Africa. Produites localement, elles présentent l'avantage d'être renouvelables et biodégradables, émergent comme alternatives aux fluides caloporteurs pétroliers, offrant des avantages économiques et environnementaux particulièrement adaptés à l'Afrique.

Ce chapitre propose une revue de la littérature consacrée aux sources d'erreurs de suivi solaire des héliostats et aux stratégies de correction associées. Il aborde également l'état des connaissances sur les technologies actuelles d'héliostats, les principes de suivi solaire et les différentes approches permettant de réduire les déviations focales dans les centrales à concentration solaire. En outre, la revue s'intéresse aux huiles végétales, en tant qu'alternatives viables aux fluides caloporteurs traditionnels dans les applications à température élevée telles que les centrales à concentration solaire. L'objectif de cette revue est d'éclairer sur les problématiques actuelles liées au suivi solaire des héliostats et à l'utilisation des huiles végétales comme fluides caloporteurs, tout en mettant en lumière les opportunités d'amélioration pour le projet CSP4Africa et d'autres initiatives similaires dans les régions à fort potentiel solaire.

II. Sources d'erreurs de suivi solaire et stratégies de correction des héliostats

II. 1. Notion générale sur les héliostats

Beaucoup de termes sont parfois utilisés pour désigner un seul aspect ou paramètre dans le fonctionnement d'un héliostat, ce qui peut induire en erreur. Les connaissances générales sur les héliostats sont brièvement présentées avec la terminologie adoptée dans ce document.

II.1.1. Terminologie

Un héliostat est un dispositif capable de réfléchir les rayons solaires incidents sur un point focal qui, en l'occurrence, est un récepteur. Fondamentalement, le dispositif obéit à la loi de la réflexion de Snell–Descartes [29], comme l'illustre la Figure 5. Les principaux paramètres intervenant dans le fonctionnement d'un héliostat sont définis dans le Tableau 1.

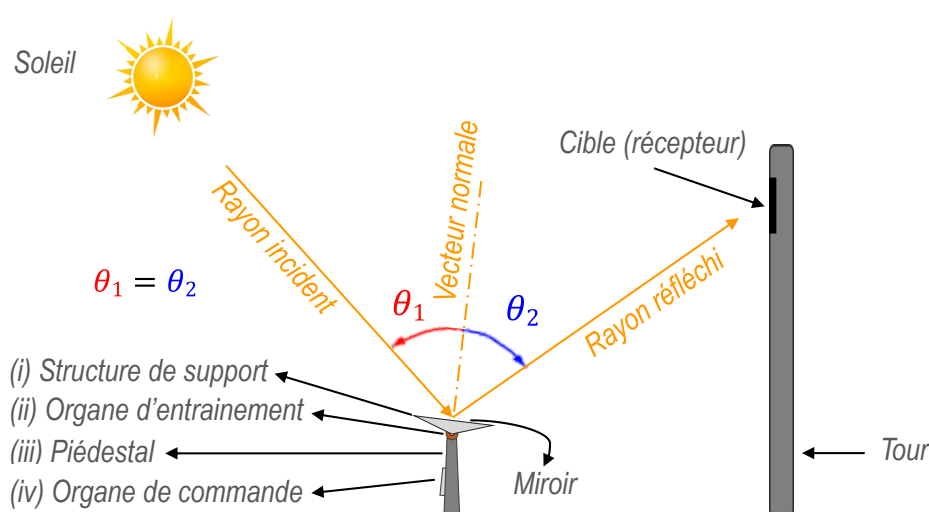


Figure 5: Schéma de principe de la loi de Snell-Descartes appliquée à un héliostat

Tableau 1: Paramètres intervenant dans le fonctionnement des héliostats

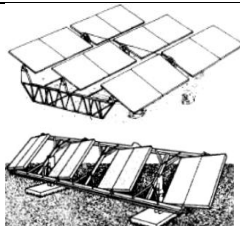
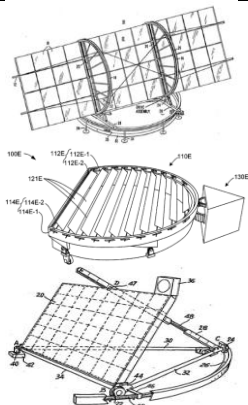
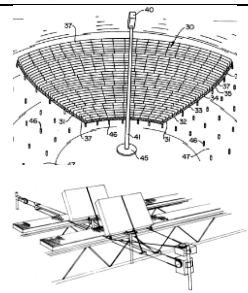
Paramètre	Synonymes	Définition
Position du soleil	Coordonnées du soleil	Un couple d'angles (azimut; élévation) qui permet de localiser la position du soleil en fonction de la date et l'heure dans un système référentiel [26,30].
Normale de l'héliostat	-	Le vecteur orthogonal à la surface réfléchissante de l'héliostat (Figure 5) [26,29].
Angle d'incidence	-	L'angle existant entre le rayon incident solaire et la normale de l'héliostat (θ_1) (Figure 5) [29].
Angle de réflexion	-	L'angle existant entre le rayon réfléchi et la normale de l'héliostat (θ_2) (Figure 5) [29].
Récepteur	Cible de l'héliostat ; Point focale ; Foyer	La destination des rayons réfléchis en condition idéale de fonctionnement de

		l'héliostat. Elle est généralement localisée au-dessus d'une tour (Figure 5) [31].
Inclinaison idéale de l'héliostat	Orientation idéale de l'héliostat ; Position idéale de l'héliostat	Un couple d'angles déduit à partir de la position du soleil et permettant aux rayons réfléchis de pointer exactement sur le récepteur [26].
Inclinaison réelle de l'héliostat	Orientation réelle de l'héliostat ; Position réelle de l'héliostat	Un couple d'angles réellement adopté par l'héliostat en fonctionnement. Il n'est pas égal à l'orientation idéale de l'héliostat à cause des sources d'erreur de suivi solaire [26].
Tache focale de l'héliostat	Rayons réfléchis ; Image de l'héliostat [32] ; Flux de l'héliostat [33] ; Rayons concentrés	Une section de rayons réfléchis ayant pour cible le récepteur [32,34,35].
Taille de l'héliostat	Aire de l'héliostat	L'aire de la surface réfléchissante des réflecteurs de l'héliostat.
Erreur de suivi solaire	Déviation de la tache focale [26] ; Dérive de la tache focale [32,36]	L'écart entre l'inclinaison réelle et l'inclinaison idéale de l'héliostat [26,32].
Source d'erreur de suivi solaire	Source de déviation ; Source de dérive	Les causes ou facteurs directs menant aux erreurs de suivi solaire d'héliostat [37].

II.1.2. Différentes technologies d'héliostats

Les ancêtres des héliostats modernes étaient principalement actionnés par les mécanismes d'horlogerie et les systèmes bielle-manivelle, et essentiellement utilisés à des fins astronomiques [38–40]. Avec l'utilisation des héliostats dans les centrales solaires à tour, ces systèmes ont été délaissés parce qu'ils n'étaient pas assez précis. Par conséquent, les aspects multidimensionnels d'optimisation des composants et contraintes des héliostats ont été analysés par plusieurs auteurs et fabricants [41–46] dans le but de concevoir l'héliostat le plus précis au coût le plus bas pour les centrales à tour. Ces travaux ont conduit à cinq principales technologies d'héliostat (Tableau 2) compatibles avec les centrales à tour, à savoir les héliostats piédestaux, les héliostats à membrane, les héliostats groupés ou à entraînement commun, les héliostats carrousels et les champs d'héliostats rotatifs. Le Tableau 2 présente l'illustration, les avantages et les inconvénients de chacune de ces technologies. Parmi elles, les héliostats piédestaux sont la référence, car ils offrent un meilleur compromis entre le coût et la performance [41]. Pour la suite, l'intérêt est accordé principalement aux héliostats piédestaux, car la plupart des grandes (≥ 50 MW) centrales solaires à tour adopte cette technologie [47].

Tableau 2: Comparaison des technologies d'héliostats

Technologie	Illustration	Avantages	Inconvénients	Références
Héliostat piédestal		• Référence à faible coût des héliostats • Précision élevée • Technologie maîtrisée • Simplicité de conception	• Structure généralement lourde • Incurvation des réflecteurs souvent nécessaire • Influence d'intempéries (vent, pluie, poussière, etc.) • Nettoyage difficile	[44,45,48–50]
Héliostat à membrane (sous contrainte, étirée ou bulle)		• Protection de l'héliostat contre les intempéries (pluie, influence du vent, poussière, etc.)	• Matériau parfaitement transparent et rigide nécessaire comme membrane • Membrane exposée aux ultraviolets et grêles de pluie • Connexion complexe de la membrane au réflecteur	[41,48,50–55]
Héliostat multifacette à entraînement commun		• Moins d'actionneurs • Structure optimale et rigide face aux intempéries	• Nécessité d'une synchronisation parfaite des réflecteurs • Nettoyage des réflecteurs difficile • Risque d'obtention d'une tache focale astigmatique • Effort de couplage des réflecteurs	[17,56–61]
Héliostat carrousel		• Très peu d'éléments de support • Simplicité de conception • Rotation azimutale favorable • Possibilité d'être jumelée à la technologie membrane	• Très exposé à la poussière • Fondation nécessaire et très coûteuse • Nivellement horizontal parfait de la fondation nécessaire	[62–67]
Champ d'héliostats rotatif		• Moins d'actionneurs • Conception mécanique optimale • Structure plus équilibrée, stable et rigide face aux intempéries • Moins de pertes d'effet cosinus	• Nécessité d'une synchronisation parfaite des réflecteurs • Nettoyage des réflecteurs extrêmement difficile • Réalisation complexe du système de rotation • Difficulté d'un principe de visée dynamique	[56,68–71]

II.1.3. Méthodes de suivi solaire des héliostats

Dans une centrale solaire à tour, les rayons réfléchis doivent suivre une direction fixe dans le meilleur des cas où respecter une tolérance d'erreur qui les maintient sur le récepteur. La direction du soleil n'étant pas fixe par rapport à la terre, l'héliostat doit réaliser un mouvement dans l'optique de maintenir les rayons réfléchis sur le récepteur, d'où le besoin d'adopter une méthode de suivi solaire pour tenir compte du mouvement apparent du soleil. À ce jour, plusieurs méthodes de suivi solaire existent pour les héliostats. On peut les regrouper suivant le (i) principe de suivi, (ii) le mode de suivi ou (iii) le mouvement de suivi, comme illustré par Figure 6. Chacune de ces méthodes s'appuie sur un organe de commande et un organe d'entraînement. L'organe de commande traite les informations et assure le fonctionnement de l'héliostat. Quant à l'organe d'entraînement, il exécute les informations qui sont envoyées par l'organe de commande. En quelque sorte, il s'occupe de l'orientation des réflecteurs de l'héliostat à travers ses actionneurs.

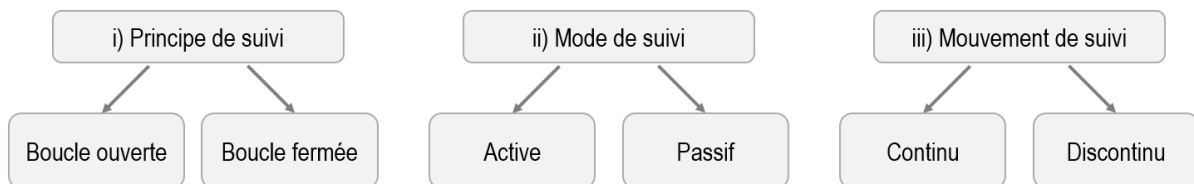


Figure 6: Regroupement des méthodes de suivi solaire suivant i) le principe, ii) le mode et iii) le mouvement de suivi solaire

II.1.3.1. Principe de suivi solaire

Le principe de suivi définit l'idée de fonctionnement global d'une méthode de suivi solaire. On distingue le fonctionnement avec (boucle fermée) ou sans (boucle ouverte) contrôle de rétroaction. La boucle ouverte est une stratégie de suivi basée sur l'ordre et l'exécution entre l'organe de commande et l'organe d'entraînement, c'est-à-dire l'organe de commande détermine la position du soleil, déduit l'inclinaison requise pour le réflecteur de l'héliostat et envoie l'information pour qu'elle soit exécutée par l'organe d'entraînement, comme illustrée par la Figure 7a. Pour le cas de la boucle fermée, l'organe de commande ne se limite pas à l'envoi de l'ordre à l'organe d'entraînement, il vérifie par un mécanisme de rétroaction si la tache focale est effectivement sur le récepteur et corrige éventuellement l'erreur de suivi solaire (Figure 7b). Chacun de ces deux principes présente des avantages et des inconvénients [26,37]. La boucle fermée offre une précision de suivi généralement acceptable et un fonctionnement autonome de l'héliostat en présence des sources d'erreur de suivi solaire. Cependant, elle est complexe à mettre en œuvre et présente surtout un coût d'investissement élevé. La boucle ouverte, par contre, est plus facile à mettre en œuvre et a l'avantage d'être abordable en termes de coût d'investissement, mais souffre cependant d'une précision faible.

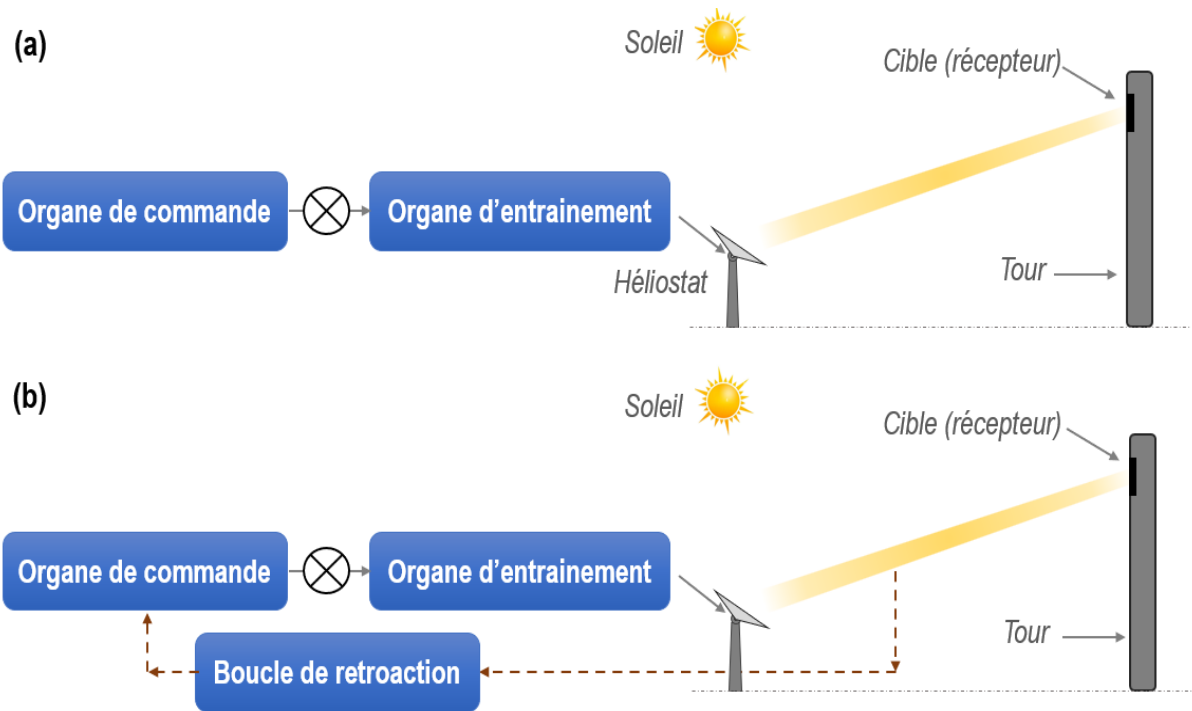


Figure 7: Illustration du principe de fonctionnement d'une méthode de suivi solaire a) en boucle ouverte et b) en boucle fermée

II.1.3.2. Mode de suivi solaire

Le mode de suivi tient compte de la consommation énergétique de l'organe d'entraînement de la méthode de suivi solaire, c'est-à-dire les actionneurs. Lorsque les actionneurs ont besoin d'une source d'énergie locale pour leur fonctionnement, le mode de suivi solaire est dit actif. En revanche, s'ils peuvent fonctionner sans apport d'énergie locale, le mode de poursuite solaire est dit passif. Le mode de poursuite passif est généralement possible grâce à la gestion de l'énergie potentielle ou cinétique de la structure de l'héliostat (en fonction de la trajectoire du soleil) par un phénomène naturel. Toutefois, il n'est pas adapté pour les héliostats de centrales à tour en raison de sa précision peu fiable [37,72].

Zomeworks Corporation [73] est l'une des rares entreprises spécialisées dans la conception du suivi passif pour les héliostats depuis 1969. Le mécanisme de fonctionnement de leur suiveur passif est basé sur la dilatation thermique d'une masse fixe de fluide à faible température d'évaporation. C'est la chaleur du soleil qui déplace le fluide d'un côté à un autre de la structure, de sorte que la gravité seule fasse tourner l'héliostat en fonction de la trajectoire du soleil, comme le montre la progression quotidienne de la Figure 8a à la Figure 8d. Les suiveurs passifs de Zomeworks Corporation [73] sont uniaxiaux et spécialement conçus pour les panneaux photovoltaïques dans le but de suivre la trajectoire azimutale du soleil avec une incertitude de 175 mrad. Ce qui est suffisant pour capter plus de 98 % des rayons solaires, selon l'entreprise. Par contre, pour les héliostats, une précision de suivi solaire inférieure à 1 mrad est généralement recherchée pour la concentration quasi-précise des rayons réfléchis.

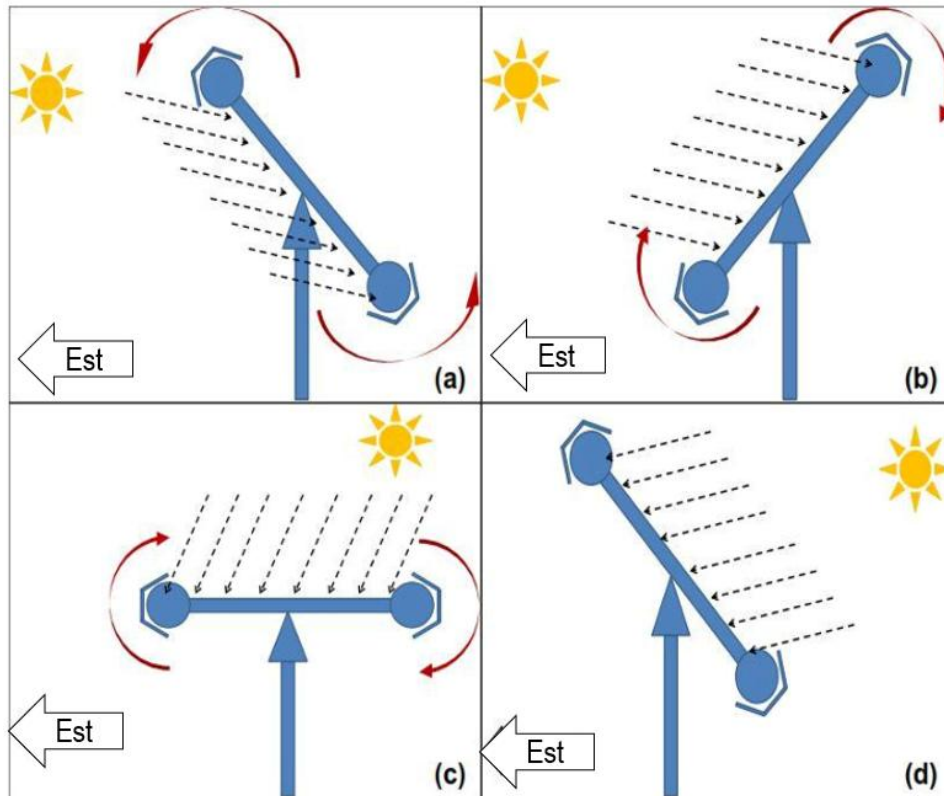


Figure 8: Mécanisme de fonctionnement passif basé sur la dilatation thermique : l'héliostat a) à sa position de fin de suivi solaire du jour d'avant, b) pivoté en raison du mouvement total du liquide vers l'est, c) à plat au midi solaire, et d) à sa position de fin de suivi solaire au coucher du soleil [74]

D'autres héliostats fonctionnant au mode passif incluent ceux conçus par Poulek [75], Clifford et Eastwood [76], et Farrooqui [77]. Ils sont tous uniaxiaux. Comme les suiveurs de Zomeworks Corporation, le système de suivi passif de Poulek [75] utilise également la chaleur solaire comme source d'énergie et son mécanisme est basé sur la déformation naturelle d'un alliage à mémoire de forme, qui entraîne la structure de l'héliostat en fonction de la trajectoire azimutale du soleil. Une approche similaire est proposée par Clifford et Eastwood [76], en utilisant la force résultante de la dilatation thermique des bilames pour créer un déséquilibre dans la structure de l'héliostat.

II.1.3.3. Mouvement de suivi solaire

Le mouvement de suivi est un aspect qui tient compte de la progression du suivi solaire. La progression peut être discontinue ou continue. La progression discontinue, également appelée bang-bang contrôle [78,79], est un suivi pas à pas de la position du soleil, c'est-à-dire par intervalle de temps, généralement de quelques secondes. La progression continue est le suivi instantané du soleil par l'héliostat. La progression continue est idéale pour une meilleure précision du suivi solaire car le mouvement du soleil est continu, mais elle est difficile à mettre en œuvre et consomme plus d'énergie [80]. Seules deux études [78,79] ont été identifiées sur la mise en œuvre d'un système de suiveur continu. L'un [78] a été proposé pour l'héliostat d'un concentrateur à deux étages pour un four solaire (Figure 9a) à l'Institut Paul Scherrer

(Suisse) en 1990. L'héliostat se trouvait à 100 m de sa cible et avait une surface réfléchissante de 51,8 m². Un mouvement de suivi continu était nécessaire, car dans la progression discontinue adoptée, l'héliostat devait se repositionner toutes les 1,5 seconde pour répondre aux exigences de précision (0,1 mrad, correspondant à une déviation maximale de 0,06 cm au niveau du récepteur) du four solaire. Cela a entraîné de fortes vibrations mécaniques, provoquant ainsi l'oscillation de la tache focale autour du récepteur. En outre, l'accélération et la décélération brutales des actionneurs ont entraîné des charges de couple considérables sur l'organe d'entraînement de l'héliostat. Par conséquent, une progression continue a été adoptée en contrôlant la vitesse de poursuite de l'héliostat à l'aide d'une commande asservie (Figure 9b). La position réelle de l'héliostat ($\vec{r}_a$) était mesurée à l'aide d'un encodeur absolu, pendant qu'un accéléromètre mesurait la vitesse de son arbre-moteur ($\vec{v}_a$). En se basant sur ces paramètres, la vitesse de suivi ($\vec{v}_n$) de l'héliostat était adaptée à la trajectoire du soleil toutes les cinq minutes.

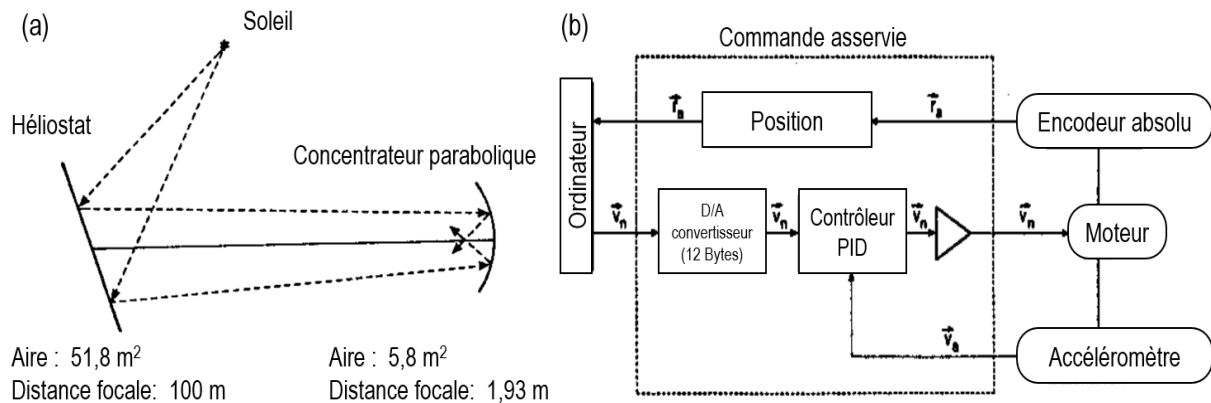


Figure 9: Illustration a) du concentrateur à deux étages (héliostat et parabole) et b) du principe de fonctionnement de l'héliostat du four solaire de l'Institut Paul Scherrer [78]

Le second suiveur continu [79] a été proposé pour le champ d'héliostats de Weizmann Institute of Science (Israël) en 2003. Il a un principe de fonctionnement similaire au premier et a été proposé pour les mêmes raisons mentionnées précédemment : vibration mécanique de l'héliostat, l'oscillation de la tache focale de 20 cm à 40 cm (correspondant à une erreur de suivi de 2 mrad à 4 mrad) autour de la cible et le couple considérable provoqués par les mouvements de démarrage et d'arrêt sur l'organe d'entraînement. Les tests de suivi solaire ont été réalisés sur l'héliostat 307 (80-90 m du récepteur et une surface réfléchissante de 54 m²) du champ. La mise en œuvre du suiveur continu a consisté à coupler un régulateur de vitesse électronique à chacun des deux moteurs de l'organe d'entraînement de l'héliostat. Les régulateurs ont adapté les vitesses de rotation des deux moteurs aux courses azimutales et d'élévation du soleil. Les erreurs de suivi solaire causées par la progression discontinue ont de ce fait été éliminées.

De nos jours, la progression discontinue est le mouvement de suivi communément adopté dans les champs d'héliostats de centrales à tour [26,79,81], si ce n'est pas le seul. Les héliostats commerciaux fonctionnant en progression discontinue incluent les technologies suivantes : L'héliostat LH-2.2 de Brightsource (15,1 m² de surface réfléchissante et 4 mrad d'erreur de suivi) [82], l'héliostat LH-2.3 de Brightsource (19 m² de surface réfléchissante et 1,5 mrad d'erreur de suivi) [83], et l'héliostat Stellio (48 m² de surface réfléchissante et 1,18 mrad d'erreur de suivi) [84]. Ces technologies sont réputées pour leur grande efficacité et précision dans le suivi solaire [33,62,85], et utilisent un mouvement discret caractérisé par des ajustements intermittents pour optimiser la concentration solaire. Malgré leur progression discontinue, elles ont démontré des performances remarquables dans diverses centrales CSP commerciales (centrale solaire d'Ivanpah, centrale solaire d'Ashalim, la centrale solaire d'Hami, etc.) [47], contribuant ainsi de manière significative à l'efficacité globale de la production d'électricité.

II. 2. Méthodologie

II.2.1. Question de recherche

Les erreurs de suivi solaire représentent le plus grand défi des champs d'héliostats de centrale à tour, quelle que soit la précision de conception des héliostats [32,86]. Cette revue vise à répondre à la question de recherche qui est la suivante : comment les études menées jusque-là contribuent-elles à la compréhension et à la correction de la déviation causée par les sources d'erreur de suivi solaire dans le fonctionnement des héliostats ?

II.2.2. Identification et sélection des études

La méthodologie adoptée pour l'identification et la sélection des articles de la présente revue est principalement basée sur les recommandations PRISMA « Preferred Reporting Item for Systematic Review and Meta-Analysis » [87]. Les quatre phases suivantes ont été successivement appliquées : (i) l'identification des références après l'interrogation des bases de données avec une équation de recherche précise, (ii) la sélection des références sur la base de l'analyse des titres et résumés après la suppression des doublons, (iii) l'éligibilité des références après la lecture du texte intégral et (iv) l'inclusion définitive des études dans la revue. La Figure 10 présente le flux de diagramme PRISMA de la procédure principale de sélection.

Dans la 1^{ère} phase, les bases de données SCOPUS et ScienceDirect ont été interrogées à la date du 7 février 2023 avec l'équation de recherche suivante : ((solar power tower) OR (central receiver systems)) AND (heliostat) AND (tracking error) AND ((source) OR (cause)). La requête a renvoyé 116 et 984 références, respectivement pour SCOPUS et ScienceDirect. La plateforme en ligne COVIDENCE a

permis de mettre en évidence la présence de 63 doublons parmi les 1100 références exportées depuis SCOPUS et ScienceDirect.

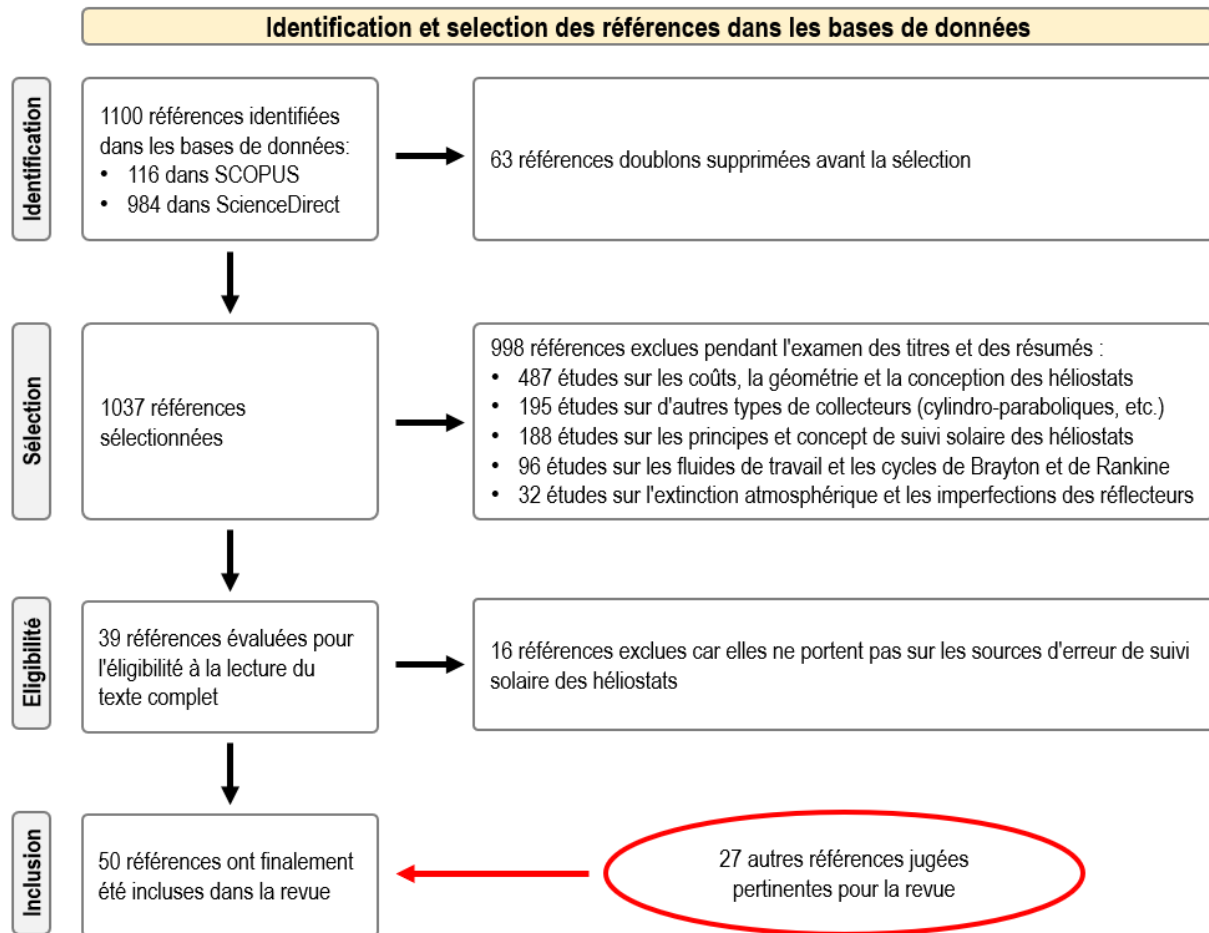


Figure 10: Flux de diagramme PRISMA de la procédure principale de sélection des articles

Les titres et résumés de 1037 références ont été analysés dans la 2^{ème} phase de la procédure de sélection. Il a été constaté que la majeure partie des références ne porte pas essentiellement sur les sources d'erreur de suivi solaire des héliostats de centrale solaire à tour. C'est plutôt la conception, la géométrie, l'optimisation du cout et la disposition des héliostats qui étaient principalement abordés ; Ensuite les erreurs optiques des collecteurs cylindro-parabolique, linéaire de Fresnel et parabolique ; Après les principes et méthodes de suivi solaire sans focus sur les sources d'erreur de suivi solaire ; Puis les fluides de transfert thermique et les cycles de Brayton et Rankine ; En dernier lieu, on avait les études portant sur l'extinction atmosphérique des rayons réfléchis et les imperfections des réflecteurs. À l'issue de cette phase, 39 références ont été retenues pour la lecture du texte intégral, soit un examen approfondi de l'étude.

Pour qu'une référence soit incluse définitivement dans la revue lors de la dernière phase de sélection, il faut que son contenu soit essentiellement basé sur l'analyse, l'impact ou la correction d'au moins une

source d'erreur de suivi solaire des héliostats. Au final, 23 références (articles) remplirent ce critère et ont de ce fait été incluses dans la revue.

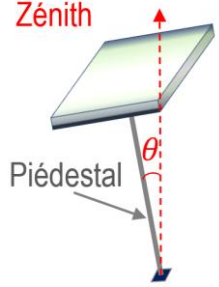
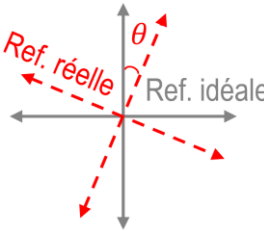
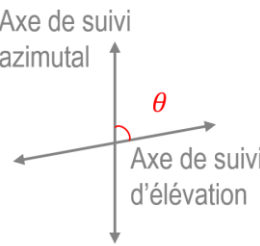
Il faudrait souligner que 27 autres références ont également été incluses dans la revue. Ces références ont été identifiées et jugées pertinentes, car elles justifient certaines informations importantes et sont pour la plupart citées dans les 23 références sélectionnées par la procédure PRISMA. Au total, 50 références ont finalement été utilisées pour la présente revue portant sur les sources d'erreur de suivi solaire des héliostats.

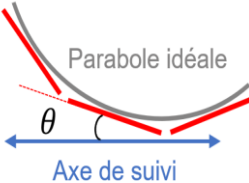
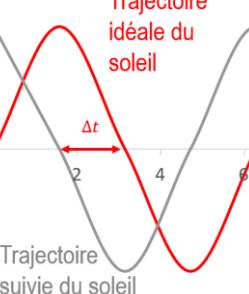
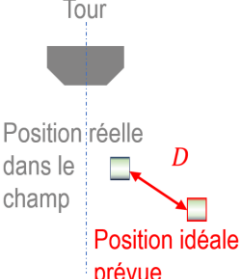
II. 3. Résultats et discussion

II.3.1. Synthèse chronologique des études

Le Tableau 3 présente les sources récurrentes d'erreur de suivi solaire dans les champs d'héliostats. Les premiers travaux publiés sur les sources d'erreur remontent probablement à 1980. À cette époque, Baheti et Scot [88] ont proposé une méthode de suivi solaire basée sur un modèle mathématique capable de corriger la déviation causée par trois sources d'erreur : l'inclinaison du piédestal, la tolérance du rayon de la roue motrice et le décalage de référence angulaire. Les paramètres et coefficients de ce modèle ont été obtenus en fonction de la différence d'angle mesurée instantanément entre l'orientation réelle et l'orientation idéale de l'héliostat pendant une période donnée. Le modèle développé réduisit la moyenne quadratique des erreurs journalières de suivi solaire d'un héliostat de 90 % et 80 %, respectivement pour la poursuite azimutale et d'élévation du soleil. La méthode de Baheti et Scot [88] n'a pas largement été mise en œuvre, car les ordinateurs de l'époque étaient chers et présentaient beaucoup de contraintes (taille, poids, non-portabilité, etc.) [89]. En 1986, une méthode de suivi solaire ayant une approche similaire à celle de Baheti et Scot [88], a été brevetée par McDonnell Douglas Corporation [90], en ajoutant aux trois sources d'erreur précédentes la non-orthogonalité des deux axes de suivi solaire (Tableau 3). Cette fois-ci, les paramètres et coefficients du modèle ont été obtenus en fonction de la distance existante entre le centroïde de la tache focale et la cible à l'aide d'une caméra. L'effet de gravité a été ultérieurement ajouté aux sources d'erreur du modèle mathématique [89]. Aujourd'hui, la méthode brevetée par McDonnell Douglas Corporation [90] est non seulement la méthode la plus déployée dans les centrales solaires commerciales à tour, mais aussi la référence que toutes les autres méthodes de suivi solaire cherchent à concurrencer [26].

Tableau 3: Présentation des sources d'erreur récurrentes de suivi solaire dans les champs d'héliostats

Source d'erreur de suivi solaire	Illustration	Condition idéale du paramètre de control	Causes potentielles	Déviation journalière de la tache focale ^d	Stratégies de correction	Difficulté de correction	Références
Inclinaison du piédestal		L'angle θ existant entre le piédestal et la verticale du lieu doit être égale à 0°	• Fluage du piédestal • Appareils de mesure • Influence du vent • Affaissement gravitationnel • Tassement de la fondation dû aux propriétés géotechniques du sol et de la pluie	• Au-dessus de la cible pour une inclinaison du piédestal vers le nord • En dessous de la cible pour une inclinaison du piédestal vers le sud • À l'est de la cible pour une inclinaison du piédestal vers l'est • À l'ouest de la cible pour une inclinaison du piédestal vers l'ouest	• Suivi solaire en boucle fermée • Suivi solaire basé sur un modèle mathématique Réagencement, reconstruction ou réinstallation rigoureuse de l'héliostat	Moyen	[26,32,36,37, 88,91–111]
Décalage de référence angulaire (azimut ou élévation)		L'angle θ existant entre la référence idéale et référence réelle doit être égale à 0°	• Affaissement gravitationnel • Jeux mécaniques d'accouplements ou liaisons • Plage d'orientation limitée des réflecteurs	• Au-dessus de la cible pour un retard d'élévation • En dessous de la cible pour une avance d'élévation • À l'est de la cible pour un retard azimutal • À l'ouest de la cible pour une avance azimutale	• Suivi solaire en boucle fermée • Suivi solaire basé sur un modèle mathématique Réagencement, reconstruction ou réinstallation rigoureuse de l'héliostat	Moyen	[32,36,37,86, 88,91,93,105,107–109,112]
Mauvaise disposition des deux axes de suivi solaire		L'angle θ existante entre les deux axes de suivi solaire doit être égale à 90°	• Influence du vent • Affaissement gravitationnel • Jeux de liaison sur l'héliostat	• Négligeable au midi solaire et alentours • Négligeable suivant l'axe horizontal X • Significative suivant l'axe vertical Z	• Suivi solaire en boucle fermée • Suivi solaire basé sur un modèle mathématique Réagencement rigoureux des deux axes de suivi solaire	Moyen	[36,88,93,101,107–109,113]

Incurvation des réflecteurs	Réflecteurs incurvés  Parabole idéale θ Axe de suivi	L'équation d'une parabole dans l'espace est donnée par : $z = \frac{x^2 + y^2}{4f}$ (f étant la distance focale). L'erreur d'incurvation θ doit être égale 0°	• Appareils de mesure ^{ab} • Approximation de la parabole ^c • Effet d'astigmatisme ^c • Effet cosinus ^c	• Au-dessus de la cible pour une erreur d'incurvation négative ^a • En dessous de la cible pour une erreur d'incurvation positive ^a • À l'est de la cible pour une erreur d'incurvation négative ^b • À l'ouest de la cible pour une erreur d'incurvation positive ^b	• Suivi solaire en boucle fermée ^{ab} • Suivi solaire basé sur un modèle mathématique ^{ab} • Adoption de la méthode de suivi giration-élévation (spinning-elevation mount) ^c • Adoption du champ d'héliostats rotatif ^c	Elevé	[32,36,88,91, 93,107–109,114–126]
Décalage horaire	 Trajectoire idéale du soleil Δt Trajectoire suivie du soleil	La décalage horaire Δt existant entre la trajectoire idéale et la trajectoire poursuivie doit être égale à 0 seconde	• Défaut d'horloge • Synchronisation imprécise de l'horloge avec l'organe de commande • Temps de traitement et de réponse des composants de l'organe de commande • Précision faible de l'algorithme de suivi solaire	• À l'est de la cible pour un retard horaire • À l'ouest de la cible pour une avance horaire	• Utilisation d'une horloge précise • Éviter la granularité de l'organe de commande • Utilisation de composants précis avec un temps de traitement négligeable • Algorithme précis de suivi solaire	Elevé	[36,37,104,112,127–130]
Mauvais positionnement de l'héliostat	 Tour Position réelle dans le champ D Position idéale prévue	La distance D existante la position idéale et la position réelle de l'héliostat dans le champ doit être égale à 0 m	• Installation du champ d'héliostats sur un terrain non-plat • Appareils de mesure • Erreurs d'interprétation humaines	• Quasi-constante et la position par rapport à la cible est fonction de la distance existante entre la position réelle et la position prévue l'héliostat	• Suivi solaire en boucle fermée • Suivi solaire basé sur un modèle mathématique • Réinstallation précise de l'héliostat	Faible	[26,36,37,91, 93,104,105,107–111,128,131–133]

^a Erreur d'incurvation relative à l'axe de poursuite d'élévation de l'héliostat

^b Erreur d'incurvation relative à l'axe azimutal de l'héliostat

^c Relative à la déformation variable de tache causée par l'incurvation des réflecteurs

^d Relative à l'héliostat situé au nord de la tour dans l'hémisphère nord

Stone et Jones [27] ont examiné les erreurs de suivi solaire de la centrale Solar Two et ont proposé des stratégies de correction pour les trois sources d'erreur présentées, à savoir l'inclinaison de l'axe de rotation azimutale qui est une conséquence de l'inclinaison du piédestal, le décalage de référence angulaire et l'incurvation des réflecteurs. L'impact de ces trois sources d'erreur sur la tache focale de quelques héliostats de différentes positions du champ solaire, a été simulé quotidiennement. La principale stratégie de correction mise en œuvre a consisté à ajuster la position de référence des encodeurs. Elle a permis de réduire de 1,61 mrad à 0,67 mrad la moyenne quadratique des erreurs de suivi journalières d'un héliostat. Une autre stratégie de correction qui a consisté à décaler la tache focale vers la cible à l'aide des données de suivi solaire a été proposée par les auteurs [27,134]. Les trois sources d'erreur présentées par Stone et Jones [27] ont de même été étudiées par Escobar et al. [32]. Cependant, Escobar et al. [32] ont établi une règle générale qui décrit qualitativement le comportement de la déviation causée par les trois sources d'erreur étudiées.

En 2020, Martínez-Hernández et al. [36] ont analysé la déviation causée par huit sources d'erreur pour un héliostat tilt-roll (suiveur basculement-roulement) à Móstoles (Espagne). L'inclinaison et la rotation du piédestal, ainsi que la mauvaise disposition des deux axes de poursuite, étaient les principales sources d'erreur avec d'importantes déviations causées par la tache focale simulée. Par ailleurs, différentes études [115–117,135] ont rapporté que les erreurs de suivi solaire peuvent également provenir de l'incurvation des réflecteurs d'héliostats, qui aujourd'hui est une technique souvent exploitée pour adapter la tache focale de l'héliostat aux dimensions du récepteur ou augmenter le facteur de concentration solaire.

L'impact et la complexité de correction de quinze sources d'erreurs optiques ont été évalués qualitativement pour minimiser les pertes thermiques dans les champs d'héliostats [37]. D'après cette étude, les sources d'erreur à forts impacts proviennent des capteurs, des actionneurs et de l'installation de l'héliostat. La plupart des sources d'erreur évaluées ont une complexité de correction moyenne. L'étude propose diverses solutions pour éviter les sources d'erreur dans les champs d'héliostat.

II.3.2. Sources récurrentes d'erreurs de suivi solaire

II.3.2.1. Inclinaison du piédestal

Présentation. L'inclinaison du piédestal est une contreperformance de positionnement du support central d'un héliostat piédestal. Précisément, il y a une inclinaison du piédestal sur un héliostat piédestal lorsque son support central n'est pas rigoureusement parallèle à la verticale du lieu. L'inclinaison du piédestal est une source d'erreur très courante dans les centrales à tour, et cela, depuis la mise en place des premières centrales [27,34,88,97–101]. Aussi appelée inclinaison de l'héliostat quand il s'agit d'autres technologies d'héliostat [32,96], l'inclinaison du piédestal est plus souvent la cause de l'inclinaison de l'axe de rotation

azimutal par rapport à l'horizontale. Souvent, l'inclinaison du piédestal est même justement désignée inclinaison de l'axe de rotation azimutal [27,32], alors qu'en présence d'inclinaison du piédestal, il n'y a pas forcément une inclinaison de l'axe de rotation azimutal. À cause des erreurs de liaison entre les deux axes (le piédestal et l'axe de rotation azimutal), l'inclinaison de l'axe de rotation azimutal peut exister sans qu'il n'y ait d'inclinaison du piédestal [27,102].

Causes potentielles. Les raisons de l'inclinaison du piédestal sont nombreuses. Elles peuvent survenir lors de la fabrication, de l'installation ou encore après l'installation. Il peut s'agir notamment du dépassement de la limite d'élasticité du matériau de fabrication de la structure de l'héliostat [102], des erreurs d'installation, du tassement de la fondation dans le temps [37] ou encore de la déformation de la structure de l'héliostat due aux charges telles que le vent et le poids des réflecteurs [95,104].

Analyse de l'impact. Diverses simulations [32,36,91,106] de la déviation de la tache focale causée par l'inclinaison du piédestal ont été réalisées dans l'hémisphère nord. Les comportements observés dans la déviation sont fonction de la saison, de la position de l'héliostat par rapport à l'axe symétrique du champ solaire et de l'ampleur de l'inclinaison du piédestal. De plus, la position de la déviation dépendrait principalement de la direction de l'inclinaison du piédestal suivant les quatre points cardinaux et leurs combinaisons. La Figure 11 présente la déviation journalière causée par différentes inclinaisons (5 mrad, 10 mrad, 15 mrad, 20 mrad) du piédestal suivant les quatre points cardinaux pour un champ solaire situé à Móstoles (Espagne), aux solstices d'été et d'hiver [36]. L'héliostat (le même que celui utilisé par Martínez-Hernández et al. [36] pour analyser les sources d'erreur à venir) était situé au nord de la tour sur l'axe symétrique nord-sud du champ à une distance focale de 20 m. Que ça soit au solstice d'été (figures 11a et 11c) et au solstice d'hiver (figures 11b et 11d), il a été constaté qu'une inclinaison du piédestal vers le nord fait pointer la tache focale au-dessus ($Z > 0$) de la cible (figures 11a et 11b). Inversement, une inclinaison du piédestal vers le sud fait pointer la tache focale en dessous ($Z < 0$) de la cible. De la même manière, une inclinaison du piédestal vers l'est fait pointer la tache focale à l'est ($X < 0$) de la cible (figures 11c and 11d) et vice versa. En outre, la déviation journalière présente une tendance temporelle plus ou moins courbée, selon que le piédestal soit incliné suivant l'axe nord-sud (plus courbé) ou l'axe est-ouest (moins courbé). Des résultats similaires ont également été trouvés au solstice d'été pour une inclinaison mineure ($\Delta\psi \leq 1$ mrad) du piédestal pour un héliostat situé à 208,3 m de la cible au nord à Pékin (Chine) (Figure 12) [106].

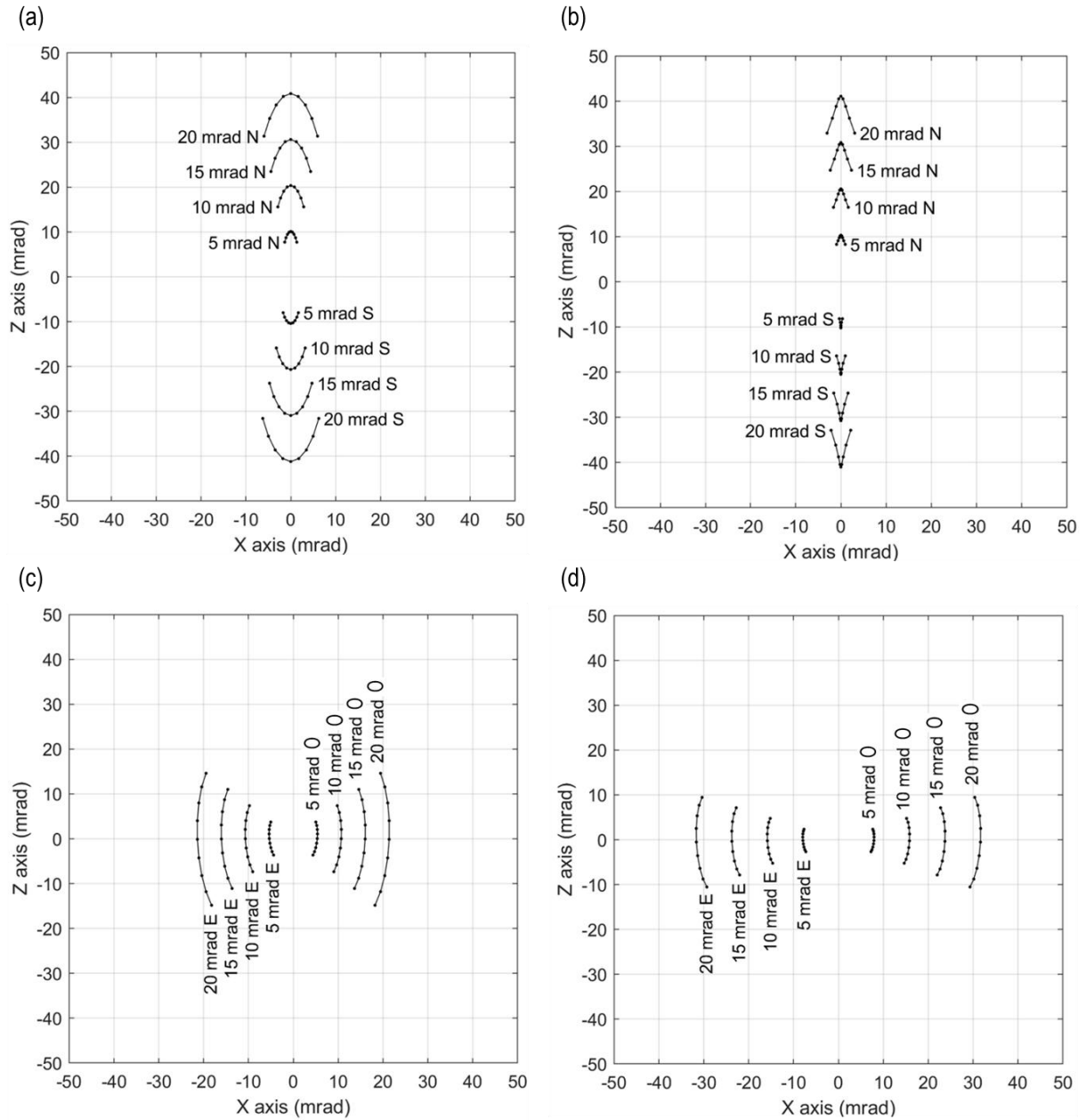


Figure 11: Déviation journalière causée par l'inclinaison du piédestal en fonction des quatre points cardinaux pour un héliostat situé au nord de la tour (Móstoles) aux solstices d'été (a,c) et d'hiver (b,d). L'inclinaison et la direction (nord : N, sud : S, est : E et ouest : O) du piédestal sont indiquées à côté des courbes, et leur position correspond au début du suivi [36].

Pour un héliostat situé sur l'axe symétrique nord-sud du champ, la déviation journalière causée par l'inclinaison du piédestal suivant l'un des 4 points cardinaux est paraboliquement symétrique à l'axe vertical et horizontal (respectivement pour l'inclinaison du piédestal suivant l'axe nord-sud et l'axe est-ouest) à la surface du récepteur. Par conséquent, la position de la déviation est fonction d'un seul axe au midi solaire (Figure 13a). Il peut arriver que la direction de l'inclinaison du piédestal soit la combinaison de 2 points cardinaux, c'est-à-dire sud-est, sud-ouest, nord-est ou nord-ouest. Dans ce cas, la position de la déviation ne sera plus fonction d'un seul axe au midi solaire, mais plutôt des deux axes à la surface du récepteur, à savoir l'axe vertical et l'axe horizontal (Figure 13b) [32]. En outre, la zone de déviation

journalière de la tache focale sera l'un des quatre quadrants du plan lorsque celui-ci est divisé équitablement en quatre carrés [32,106].

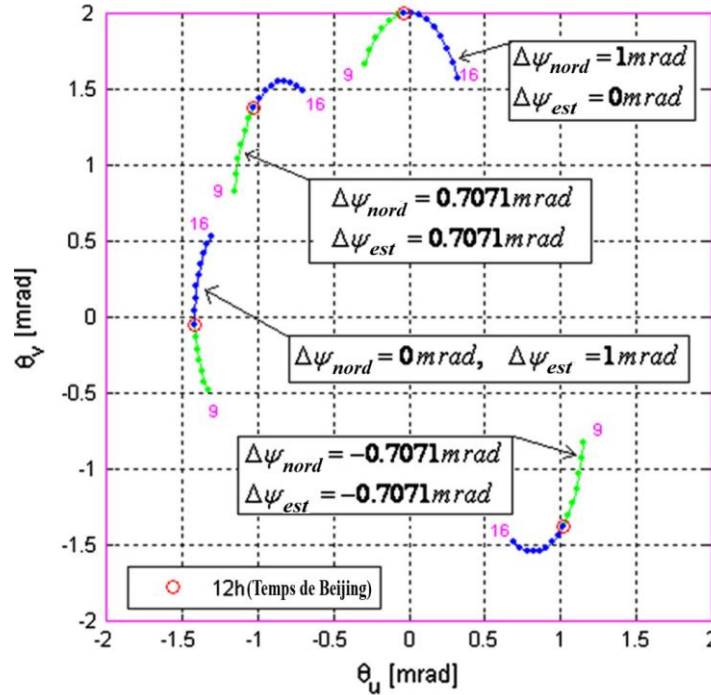


Figure 12: Déviation journalière causée par l'inclinaison du piédestal vers le nord, l'est et le nord-est pour un héliostat situé au nord de la tour (Pékin) au solstice d'été [106].

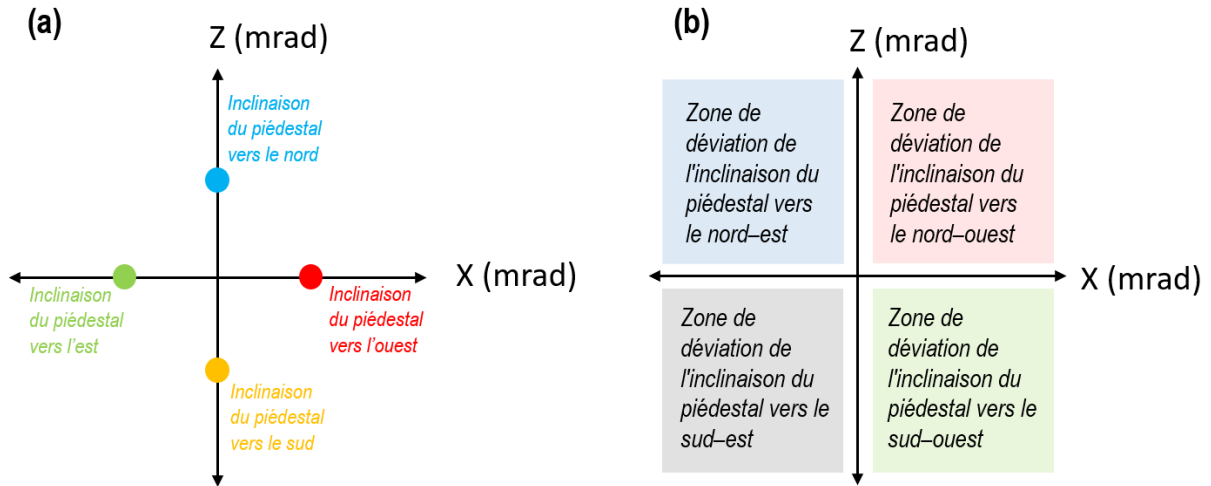


Figure 13: Déviation causée par l'inclinaison du piédestal suivant a) les quatre points cardinaux (est, ouest, sud et nord) au midi solaire et b) la zone de déviation journalière de leurs combinaisons (sud-est, sud-ouest, nord-est et nord-ouest) pour un héliostat situé au nord de la tour.

Escobar-Toledo et al. [32] décrivent les comportements observés dans la déviation de la tache focale causée par l'inclinaison du piédestal pour une simulation effectuée pendant différents mois à Hermosillo (Mexique) pour un héliostat (le même héliostat que celui utilisé par Escobar-Toledo et al. [32] pour

analyser les sources d'erreur à venir) situé également au nord de la cible (Tableau 4). Les signes de la déviation journalière suivant l'axe vertical Z et l'axe horizontal X sur le plan cible et le point d'inflexion de la déviation sont présentés. Dans leur étude [32], plusieurs paramètres sont pris en compte. Ces paramètres, comme l'illustre la Figure 14, comprennent la distance entre l'héliostat et l'axe symétrique du champ (a), la distance focale (d), la hauteur de la cible par rapport à l'héliostat (h) et la direction de l'inclinaison du piédestal (K) suivant les quatre points cardinaux et les combinaisons. Leurs résultats (Figure 15) concernant les tendances et zones de déviation journalière sont en accord avec ceux de Martínez-Hernández et al [36] et Guo et al [106], même si les courbes de déviation sont présentées par rapport à la distance focale, c'est-à-dire que les valeurs des axes verticaux et horizontaux sont divisés par la distance focale de l'héliostat, ce qui les rend adimensionnelles. Escobar-Toledo et al [32] justifient que cette présentation des données de déviation les rend plus universelles.

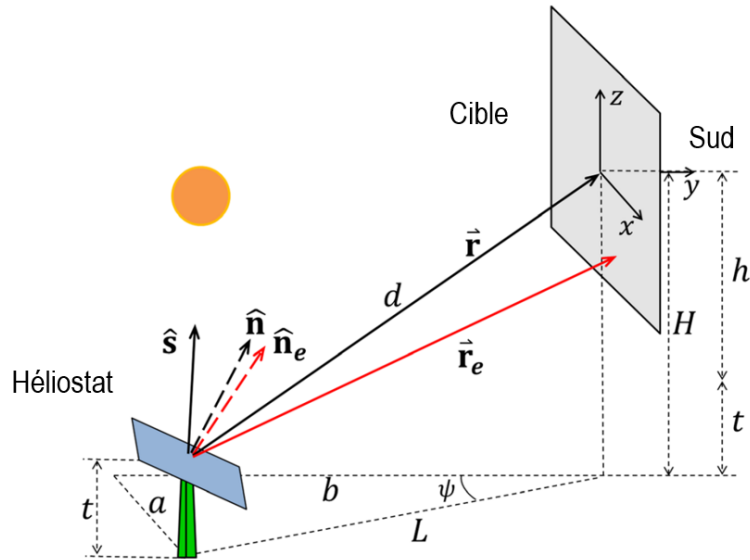


Figure 14: Illustration des paramètres intervenant dans la simulation de la déviation de la tache focale effectuée par Escobar-Toledo [32].

Tableau 4: Comportements généraux de la déviation causée par l'inclinaison du piédestal suivant les quatre points cardinaux et combinaisons. [32]

Direction de l'inclinaison du piédestal (K)	Déviation suivant l'axe horizontal X	Déviation suivant l'axe vertical X	Point d'inflexion
Sud	$\text{sgn}(-a)$	–	↓
Sud–ouest	+	–	↓ ou (↘) × $\text{sgn}(-a)$
Ouest	+	$\text{sgn}(-a)$	→
Nord–ouest	+	+	↑ ou (↗) × $\text{sgn}(a)$
Nord	$\text{sgn}(a)$	+	↑
Nord–est	–	+	↑ ou (↖) × $\text{sgn}(-a)$
Est	–	$\text{sgn}(a)$	←
Sud–est	–	–	↓ ou (↙) × $\text{sgn}(a)$

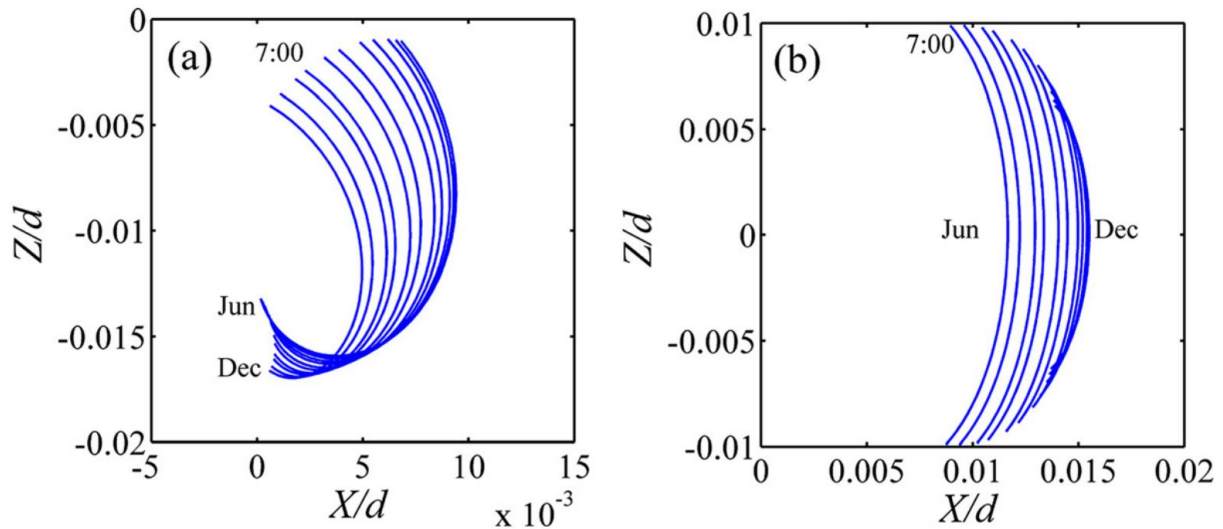


Figure 15: Déviations journalières causées par une inclinaison du piédestal de 10 mrad suivant a) le sud-ouest ($d/h=20$) et b) l'ouest ($d/h=1,5$) pendant différents mois de l'année pour un héliostat situé au nord de la tour (Hermosillo, Mexico) [32].

II.3.2.2. Décalage de référence angulaire

Présentation. Le décalage de référence angulaire est présent sur un héliostat lorsque son réflecteur est en avance ou en retard par rapport à son orientation idéale. C'est une source d'erreur qui dévie le réflecteur de l'héliostat de son orientation idéale, ce qui entraîne une déviation de la tache focale par rapport au récepteur [37].

Causes potentielles. Le décalage de référence angulaire provient de l'imperfection (jeu d'accouplement ou de liaison, les tolérances dimensionnelles, etc.) de la chaîne de transmission de l'organe d'entraînement [37,112] ou d'une mauvaise conception de l'héliostat qui ne permet pas au réflecteur d'atteindre son orientation de début ou de fin de suivi solaire [37,112].

Analyse de l'impact. Plusieurs simulations [32,36,91,106] de la déviation de la tache focale causée par le décalage de référence angulaire ont été réalisées dans l'hémisphère nord. Les comportements observés dans la déviation de cette source d'erreur dépendent principalement de la saison et de l'ampleur du décalage. Les figures 16 et 17 illustrent ce phénomène pour la simulation réalisée par Martínez-Hernández et al. [36] à Móstoles (Espagne), en considérant différents décalages azimutaux et d'élévations comprises entre -20 mrad et 20 mrad. Aux solstices d'été (figures 16a et 17a) et d'hiver (figures 16b et 17b), il a été constaté qu'un réflecteur en retard azimutal par rapport à son orientation idéale fait pointer la tache focale à l'est ($X<0$) de la cible. Inversement, un réflecteur d'héliostat en avance azimutale par rapport à son orientation idéale fait pointer la tache focale à l'ouest ($X>0$) de la cible. De la même manière, un retard d'élévation du réflecteur fait pointer la tache focale au-dessus ($Z>0$) de la cible et vice versa. Notamment, la courbure de déviation journalière est moins prononcée pour le décalage de référence azimutal (Figure 16) que le décalage de référence en élévation (Figure 17). La déviation

journalière semble même quasi-constante pour le décalage de référence azimuthal. Par contre, la déviation journalière causée par le décalage de référence d'élévation ressemble à celle de l'inclinaison du piédestal suivant l'axe nord-sud, avec également un rapport de proportionnalité avec l'ampleur du décalage suivant l'axe vertical Z au midi solaire.

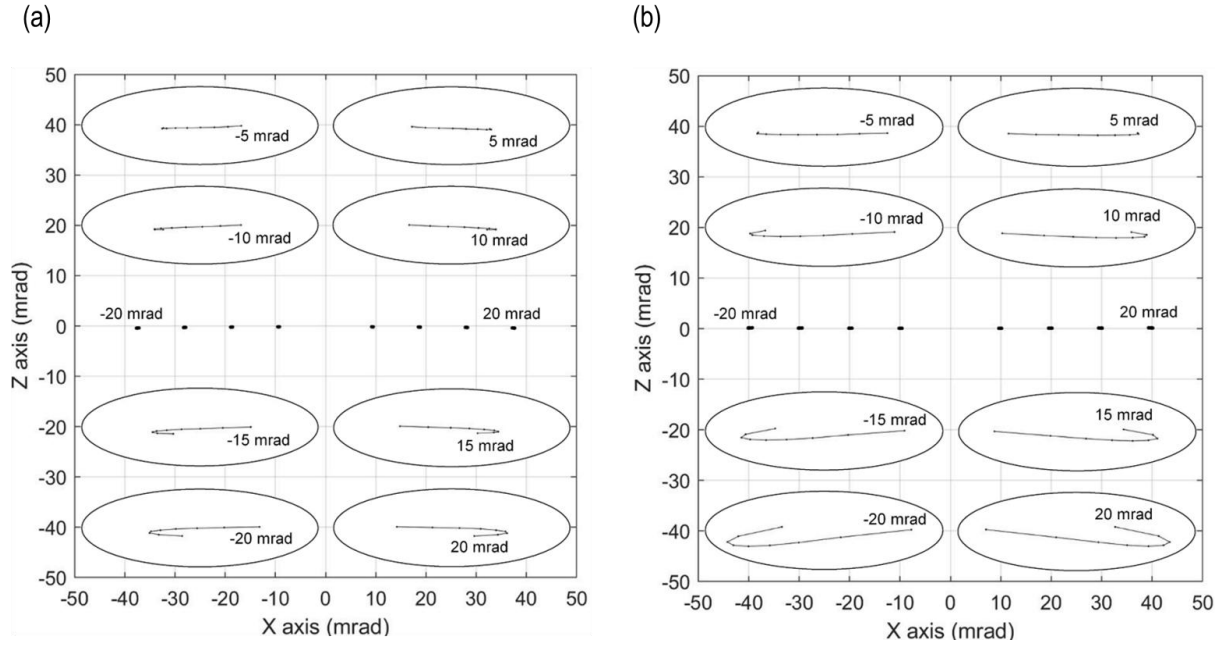


Figure 16: Déviation journalière causée par le décalage azimuthal de référence du réflecteur pour un héliostat situé au nord de la tour (Móstoles, Espagne) aux solstices a) d'été et b) d'hiver. De gauche à droite, le décalage varie de -20 mrad à 20 mrad, et sa position d'indication correspond au début du suivi. Les courbes sont agrandies 43 fois à l'intérieur des ellipses [36].

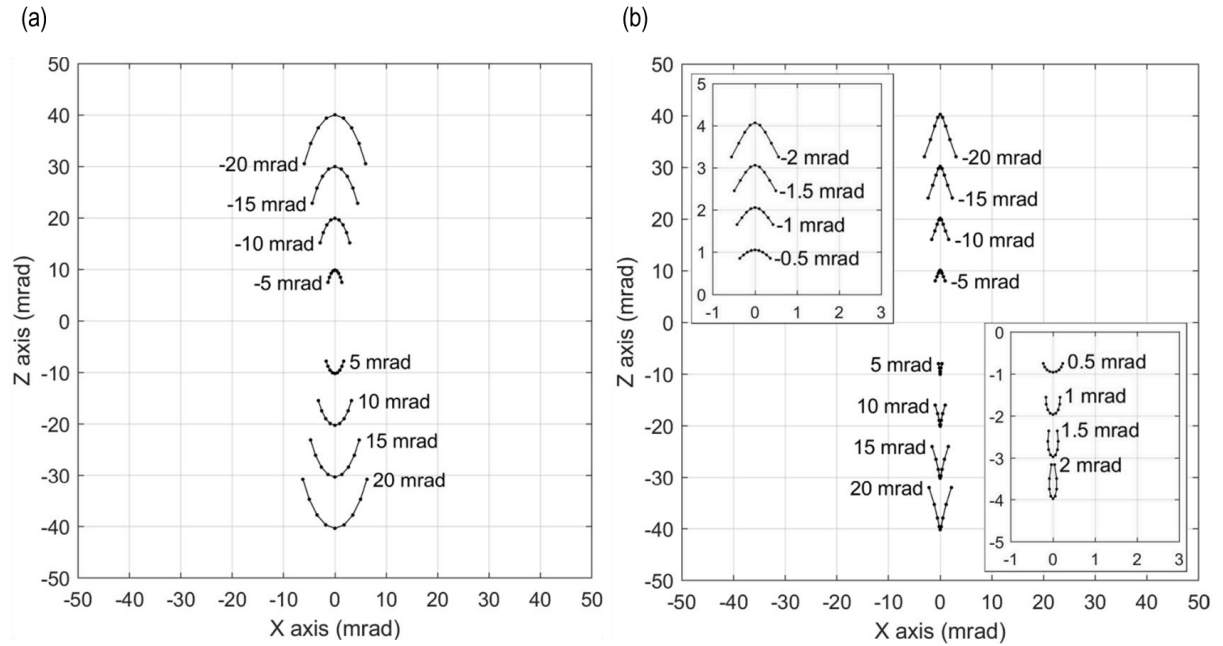


Figure 17: Déviation journalière causée par le décalage d'élévation de référence du réflecteur pour un héliostat situé au nord de la tour (Móstoles, Espagne) aux solstices a) d'été et b) d'hiver. De gauche à droite, le décalage varie de -20 mrad à 20 mrad, et sa position d'indication correspond au début du suivi [36].

Des résultats similaires ont été obtenus à Hermosillo (Mexique), où Escobar-Toledo et al. [32] ont également simulé la déviation causée par le décalage de référence angulaire pendant différents mois. Les résultats sont résumés dans le Tableau 5. De façon générale, la zone de déviation d'un héliostat en retard azimutal par rapport à son orientation idéale est l'est ($X < 0$) de la cible (Figure 18). Inversement, la zone de déviation d'un héliostat en avance azimutale par rapport à son orientation idéale est l'ouest ($X > 0$) de la cible (Figure 18). De même, la zone de déviation d'un héliostat en retard d'élévation par rapport à son orientation idéale se situe au-dessus ($Z > 0$) de la cible et vice versa. La position de la déviation causée par les autres possibilités de décalage de référence angulaire, c'est-à-dire la présence simultanée d'un retard et d'une avance du réflecteur par rapport à son orientation idéale, constitue la combinaison des quatre cas (retard azimutal, avance azimutale, retard d'élévation et avance d'élévation) présentés individuellement.

Tableau 5: Comportements généraux de la déviation causée par le décalage de la référence angulaire du réflecteur de l'héliostat [32]

Décalage azimutal	Décalage en élévation	Déviation suivant l'axe horizontal X	Déviation suivant l'axe vertical Z	Point d'inflexion
Avance (+)	Avance (+)	+	-	↙
Retard (-)	Retard (-)	-	+	↗
Avance (+)	Retard (-)	+	+	↖
Retard (-)	Avance (+)	-	-	↘
0	Avance (+)	0	-	↓
0	Retard (-)	0	+	↑
Avance (+)	0	+	0	→
Retard (-)	0	-	0	←

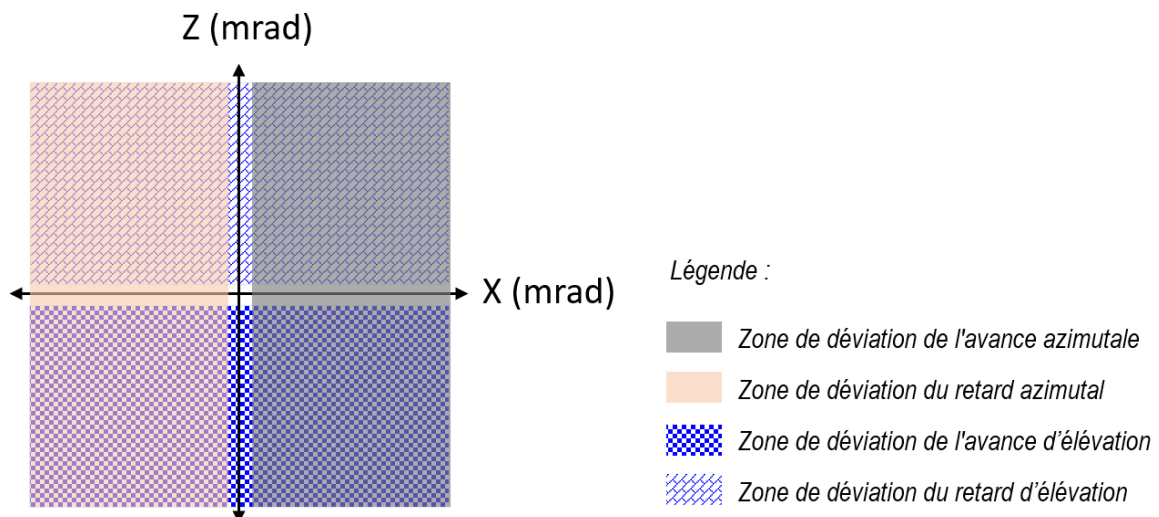


Figure 18: Illustration des différentes déviations causées par l'avance azimutale, le retard azimutal, l'avance en élévation et le retard en élévation du réflecteur pour un héliostat situé plein nord de la tour.

II.3.2.3. Mauvaise disposition des deux axes de suivi solaire

Présentation. La disposition idéale des deux axes de suivi d'un héliostat exige qu'ils soient parfaitement orthogonaux (Figure 19), selon le type d'orientation d'axes adopté par l'héliostat [36]. Cet agencement n'est pas souvent évident à cause des jeux de liaisons sous l'influence du vent et l'effet de la gravité. Ainsi, lorsque les deux axes de suivi ne sont pas rigoureusement orthogonaux, il en résultera un mouvement de rotation autour d'un angle θ (l'angle entre les deux axes de suivi moins ou plus 90°) par rapport à la verticale ou horizontale [93]. L'angle θ fera dévier la tache focale de l'héliostat du récepteur. Cette source d'erreur est très fréquente dans les champs d'héliostats [36,113].

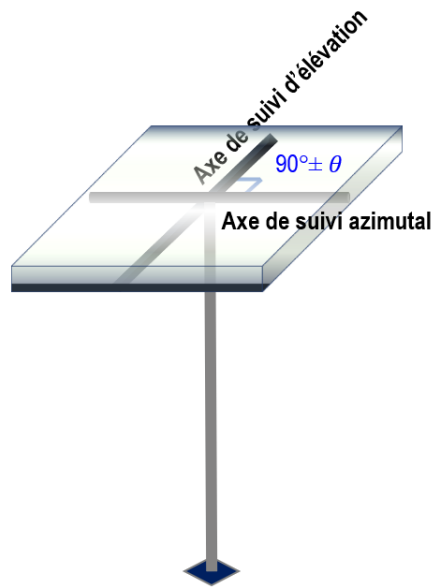


Figure 19: Illustration de la disposition idéale des deux axes de suivi solaire d'un héliostat piédestal

Causes potentielles. Comme l'inclinaison du piédestal, la mauvaise disposition des deux axes de suivi apparaît généralement dans le temps pour de nombreuses raisons [101]. Les raisons [37,95,104] incluent les tolérances mécaniques pendant la construction de l'héliostat, les jeux de liaison des deux de suivi et la flexibilité de la structure et l'influence du vent.

Analyse de l'impact. La déviation de la tache focale causée par la mauvaise disposition des deux axes de suivi solaire a été simulée par Martínez-Hernández et al [36] à Móstoles (Espagne). Que ça soit au solstice d'été (Figure 20a) ou d'hiver (Figure 20b), la mauvaise disposition des deux axes de suivi solaire n'a pas du tout d'impact sur la tache focale au midi solaire. Cependant, la déviation qu'elle entraîne est plus importante suivant l'axe de suivi d'élévation que l'axe de suivi azimutal du soleil. Il semble même qu'il n'y ait pratiquement pas de déviation suivant l'axe horizontal X au solstice d'hiver, quelle que soit l'ampleur de l'angle θ (Figure 20b).

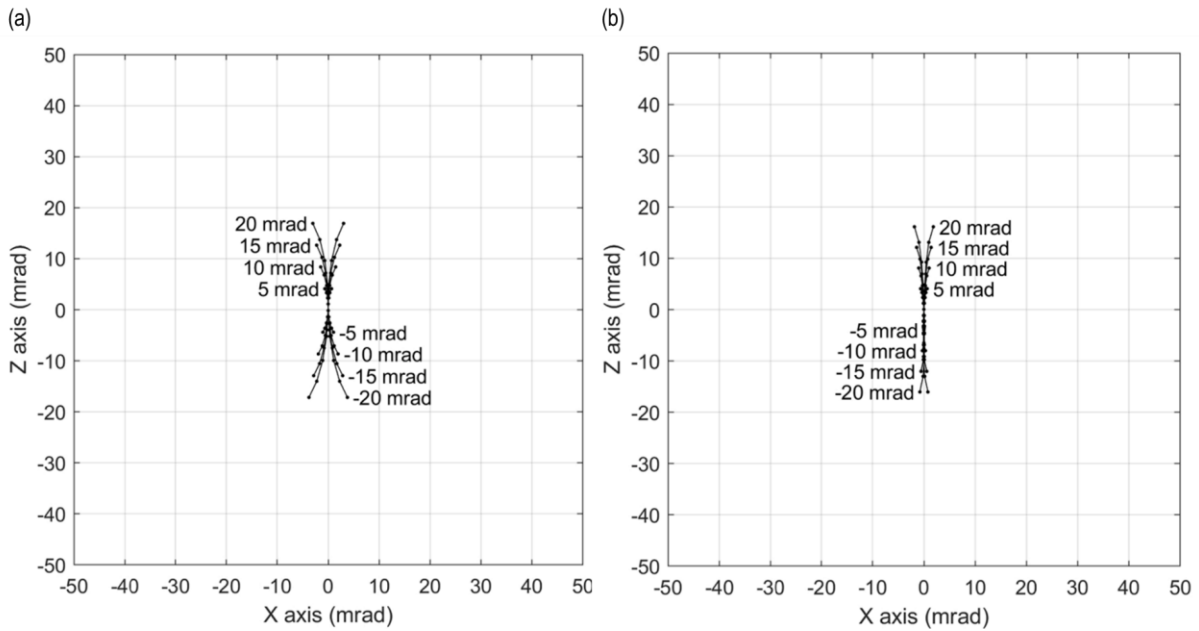


Figure 20: Déviation journalière causée par la mauvaise disposition des deux axes de suivi pour un héliostat situé au nord de la tour (Móstoles) a) au solstice d'été et b) au solstice d'hiver. L'angle θ est indiqué à côté de chaque courbe de déviation, et sa position correspond au début du suivi [36]

II.3.2.4. Incurvation des réflecteurs

Présentation. Dans les centrales solaires à tour, l'incurvation des réflecteurs est une stratégie adoptée pour réduire le coût de conception de l'héliostat [56], augmenter son facteur de concentration solaire [118] ou adapter sa taille aux dimensions du récepteur [32,134]. La technique consiste à faire de la surface de l'héliostat une sorte de parabole ayant comme foyer le récepteur (Tableau 3).

Analyse de l'impact. Le problème majeur que cause l'incurvation des réflecteurs se situe au niveau du vecteur normal de l'héliostat [27]. L'incurvation crée plusieurs vecteurs normaux pour un seul héliostat, alors que l'organe de commande a besoin d'un seul vecteur pour effectuer ses calculs et envoyer une instruction à l'organe d'entraînement. Généralement, c'est le réflecteur central qui assure ce rôle [32]. Ce choix considère que tous les réflecteurs incurvés ont le même vecteur normal que celui du réflecteur central, alors que ce n'est pas le cas. Par conséquent, les erreurs d'incurvation de l'ordre de mrad créeraient une dispersion dans la tache focale de l'héliostat [115], car toutes les méthodes pratiques d'incurvations des réflecteurs présentent des erreurs [115,116]. La méthode la plus précise est l'incurvation basée sur le principe des dispositifs optiques (laser, caméra, etc.) [119].

La déformation variable de la tache focale est le second aspect à prévoir dans la concentration solaire lorsque la surface de l'héliostat est incurvée [118,121]. Cette dernière proviendrait de l'effet d'astigmatisme et de l'effet cosinus qui sont des phénomènes intrinsèques de la concentration solaire et dont leur impact s'accroît en fonction de l'angle d'incidence solaire [36,121]. L'effet d'astigmatisme

traduit les déformations non-symétriques des différentes taches superposées, tandis que l'effet cosinus traduit le fait que l'orientation du réflecteur offre aux rayons incidents solaires une surface apparente inférieure à la surface du réflecteur (Figure 21). Ces effets ne peuvent être évités que lorsque les rayons incidents solaires sont perpendiculaires à la surface réfléchissante des réflecteurs. Ce qui est une situation sans doute improbable dans les centrales à tour, car les héliostats adoptent la loi de la réflexion Snell-Descartes (Figure 5) pour concentrer les rayons incidents sur le récepteur. Par conséquent, les taches superposées auront tendance à se déformer de façon différente en fonction de la position du soleil, de l'inclinaison des réflecteurs et de la distance focale [121]. L'orientation d'axes giration-élévation (spinning-elevation mount) [114,122,123], qui consiste à orienter l'un des deux axes de suivi solaire vers le récepteur et à maintenir l'autre horizontal et orthogonal au premier (Figure 22), pourrait réduire l'effet d'astigmatisme d'environ 50 %. De même, le champ d'héliostat rotatif (Tableau 2) pourrait réduire l'effet cosinus dans un champ d'héliostat [124,125]. Comme le montre la Figure 21b, l'héliostat Y offre une plus grande surface apparente aux rayons incidents solaires que l'héliostat X.

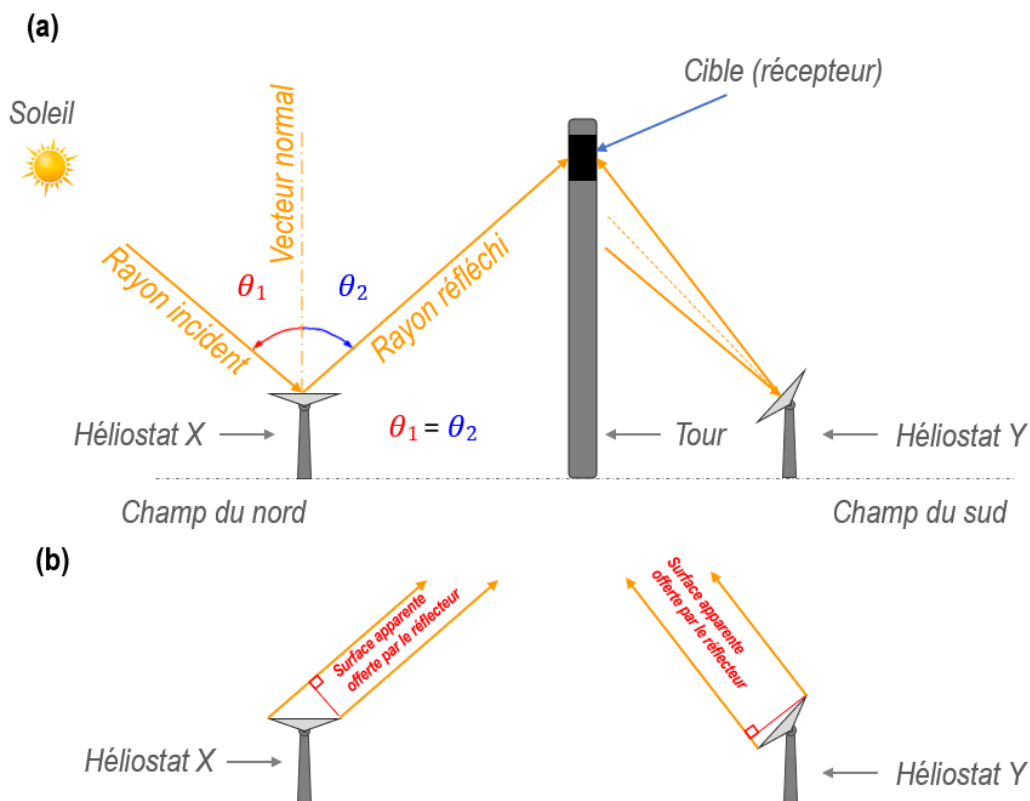


Figure 21: Illustration de l'effet cosinus

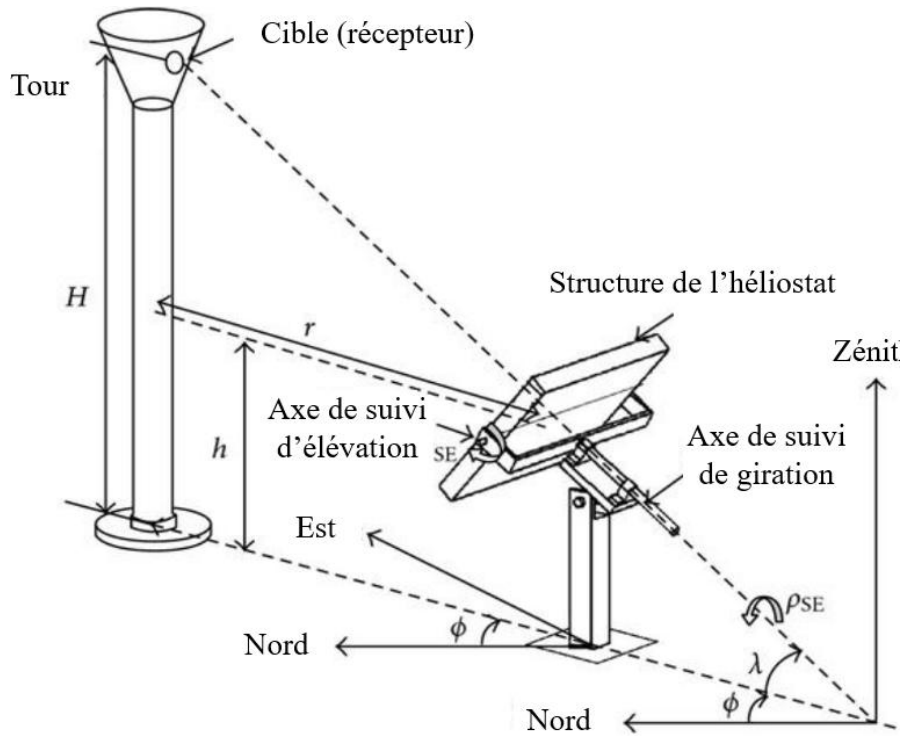


Figure 22: Illustration du type d'orientation d'axes giration-élévation (spinning-elevation mount) [126]

La source d'erreur potentielle qui pourrait également affecter la précision de concentration d'un héliostat incurvé est le manque de perpendicularité entre le vecteur normal du réflecteur de référence et l'axe de suivi azimuthal [36] ou d'élévation [32,91,106] (Tableau 3), selon le type d'orientation d'axes adopté par l'héliostat. Cette contreperformance provenant de l'incurvation des réflecteurs est appelée erreur d'incurvation [32,36,91,106]. Plusieurs simulations [32,36,91,106] de l'erreur d'incurvation ont été effectuées dans l'hémisphère nord. Les comportements observés dans la déviation de la tache focale causée par l'erreur d'incurvation dépendent principalement de la saison, de la position de l'héliostat par rapport à l'axe symétrique du champ, de la distance focale et de l'ampleur de l'erreur. Martínez-Hernández et al. [36] ont analysé la déviation journalière causée par l'erreur d'incurvation pour un héliostat fonctionnant avec une orientation d'axes basculement-roulement (tilt-roll mount) (Figure 23). La conception de cette orientation d'axes exige que le vecteur normal de référence de l'héliostat soit perpendiculaire à l'axe de roulis. Que ça soit au solstice d'été (Figure 23a) et d'hiver (Figure 23b), lorsque le vecteur normal de référence est incliné vers le sud (angle positif), la zone de déviation journalière de la tache focale se situe en dessous ($Z < 0$) de la cible. Inversement, lorsque le vecteur normal de référence est incliné vers le nord (angle négatif), la zone de déviation journalière de la tache focale se situe au-dessus ($Z > 0$) de la cible. En outre, les courbes d'écart journalier résultant de l'erreur d'inclinaison par rapport au vecteur normal de référence (amplitude négative) se situent au-dessus ($Z > 0$) de la cible.

Notamment, la déviation journalière résultant de l'erreur d'incurvation par rapport à l'axe de roulis ressemble à celle de l'inclinaison du piédestal suivant l'axe nord-sud et du décalage de la référence suivant l'axe d'élévation. Cela est dû au fait que les trois sources d'erreur produisent le même effet sur le vecteur normal de référence.

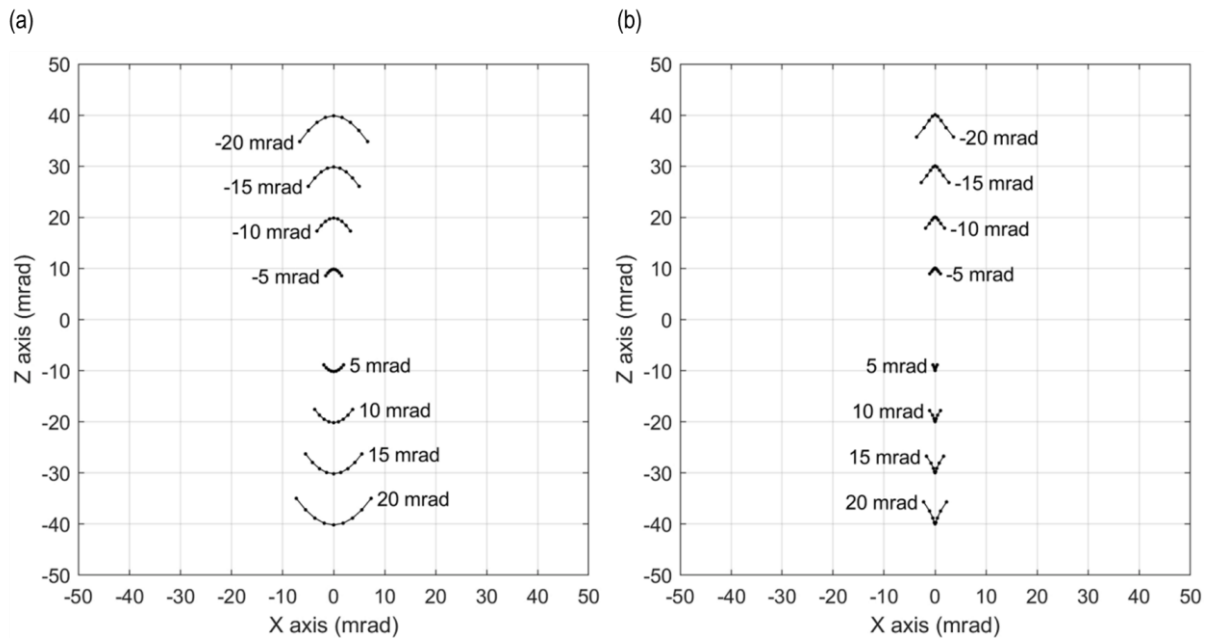


Figure 23: Déviation journalière causée par l'erreur d'incurvation par rapport à l'axe de roulis pour un héliostat situé au nord de la tour a) au solstice d'été et b) au solstice d'hiver à Móstoles (Espagne). La valeur de l'erreur est indiquée à côté de chaque courbe de déviation et sa position correspond au début du suivi [36]

L'erreur d'incurvation a également été analysée par Escobar-Toledo et al [32] pour un héliostat fonctionnant avec une orientation d'axes azimut-élévation. La conception de ce type d'orientation d'axes exige que le vecteur normal de référence de l'héliostat soit perpendiculaire à l'axe d'élévation. La Figure 24 présente les principaux résultats de la simulation et les comportements généraux qui en découlent sont décrits dans le Tableau 6. Les courbes de la déviation journalière changent leur point d'inflexion au fur et à mesure que le rapport entre la distance focale (d) de l'héliostat et la hauteur (h) du récepteur augmente. La transition est plus observable quand le rapport d/h se situe entre 1,7 et 3,5. Les courbes de déviation journalière sont concaves vers l'est ($X < 0$) pour les héliostats proches (rapport d/h inférieur à 1,7) du récepteur (Figure 24b) et convexes vers l'est pour les héliostats éloignés (rapport d/h supérieur à 3,5) du récepteur (Figure 24a), lorsque l'erreur d'incurvation est positive. De plus, la zone de déviation journalière lorsque l'erreur d'incurvation est positive se situe à l'ouest ($X > 0$) de la cible. Des comportements inverses ont également été observés lorsque l'erreur d'incurvation est négative.

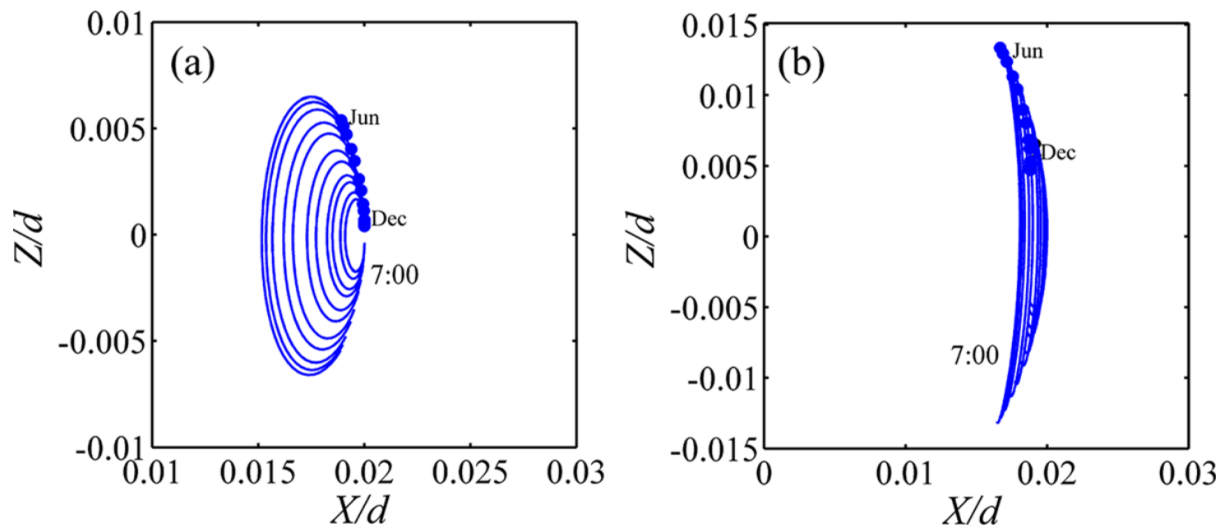


Figure 24: Déviations journalières causées par une erreur d'incurvation de 10 mrad par rapport à l'axe d'élévation pour un héliostat a) éloigné ($d/h=20$) et b) proche ($d/h= 1,5$) situé au nord de la tour à Hermosillo (Mexico) [32].

Tableau 6: Comportements généraux de la déviation causée par l'erreur d'incurvation par rapport à l'axe d'élévation [32]

Déviaton du vecteur normal de référence	Distance entre l'héliostat et l'axe symétrique du champ (a)	Déviaton suivant l'axe horizontal X	Déviaton suivant l'axe vertical Z	Point d'inflexion
+	0	+	0	→(proche) ←(loin)
+	+	+	+(proche) –(loin)	↗(proche) ↘(loin)
+	–	+	–(proche) +(loin)	↘(proche) ↗(loin)
–	0	–	0	←(proche) →(loin)
–	+	–	–(proche) +(loin)	↗(proche) ↘(loin)
–	–	–	+(proche) –(loin)	↘(proche) ↗(loin)

II.3.2.5. Décalage horaire

Présentation. Le temps intervient dans le calcul de la trajectoire du soleil comme un paramètre clé d'entrée [127,128]. Par conséquent, il est donc crucial que l'horloge de l'héliostat fournisse exactement l'heure solaire locale, sinon l'héliostat se mettra à poursuivre une position antérieure ou postérieure du soleil. Un décalage horaire d'au moins 60 s est nécessaire pour causer une déviation significative de la tache pour une distance focale de 20 m [36].

Causes potentielles. Le décalage horaire dans le fonctionnement de l'héliostat peut avoir de nombreuses causes. Outre l'horloge, le temps d'exécution de l'algorithme de suivi solaire boucle par boucle et équation par équation, ainsi que la transmission des informations d'un composant à l'autre, sont tous des facteurs qui peuvent provoquer le décalage horaire [37,104,112,130,134]. Toutefois, l'impact de ces facteurs est négligeable. C'est pourquoi ils ne sont pas pris en compte dans la pratique.

Analyse de l'impact. Plusieurs simulations [36,106,129] de la déviation de la tache focale causée par le décalage horaire ont été effectuées dans l'hémisphère nord. Les comportements observés dans la déviation dépendent principalement de la saison et de l'ampleur du décalage horaire. Ceci est illustré à la Figure 25 pour la simulation réalisée par Martínez-Hernández et al [36] à Móstoles (Espagne), où l'amplitude du décalage temporel varie entre -20 mrad et 20 mrad au solstice d'été (Figure 25a) et au solstice d'hiver (Figure 25). Un décalage horaire de 1 mrad signifie que le soleil est en avance de 15,75 secondes par rapport au temps utilisé pour résoudre l'équation de la trajectoire du soleil. Cela est également appelé retard temporel. La zone de déviation journalière du retard temporel se situe à l'est ($X < 0$) de la cible, tandis que la zone de déviation journalière de l'avance temporelle se situe à l'ouest ($X > 0$) de la cible. Notamment, la courbure de la déviation journalière causée par le décalage horaire est plus prononcée au solstice d'été qu'au solstice d'hiver pour la localisation de Móstoles. En outre, la déviation au midi solaire est linéairement proportionnelle à l'ampleur du décalage horaire, comme celle de l'inclinaison du piédestal, et dépend uniquement de l'axe horizontal X à la surface du récepteur.

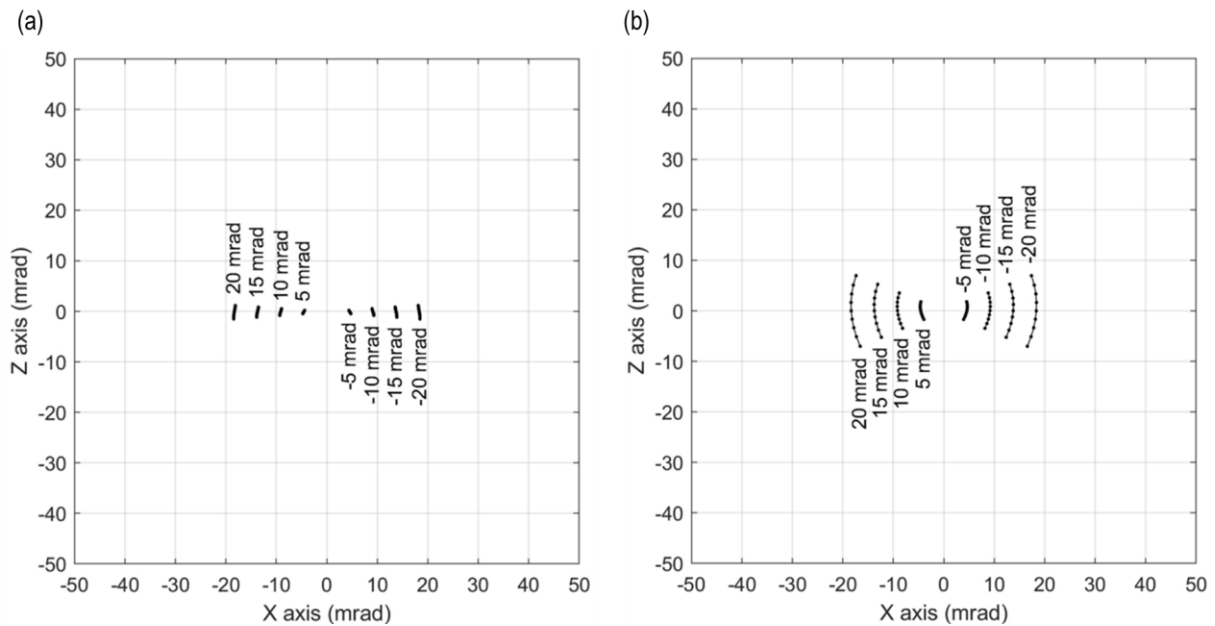


Figure 25: Déviation journalière causée par le décalage horaire pour un héliostat situé au nord de la tour a) au solstice d'été et b) au solstice d'hiver à Móstoles (Espagne). L'ampleur du décalage horaire est indiquée à côté de chaque courbe de déviation, et sa position correspond au début du suivi [36].

Des résultats similaires sur la zone de déviation journalière a été obtenu à Beijing (Chine) pour un retard temporel d'environ 1 mrad au solstice d'été (Figure 26). Cependant, la déviation journalière était plus prononcée suivant l'axe vertical Z que l'axe horizontal X . La différence de forme des déviations journalières pourrait s'expliquer par la différence de localisation de la simulation.

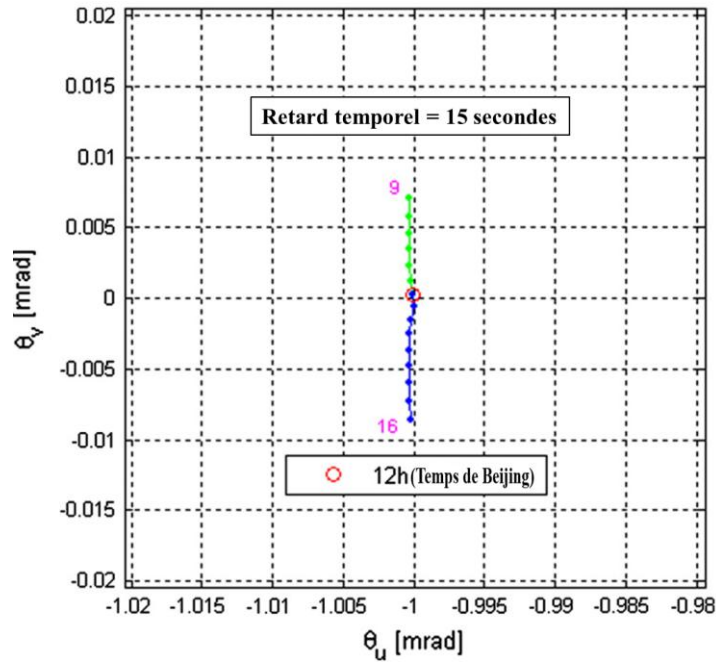


Figure 26: Déviation journalière causée par un retard temporel d'environ 1 mrad pour un héliostat situé au nord de la tour au solstice d'été à Pékin (Chine) [106].

II.3.2.6. Mauvais positionnement de l'héliostat

Présentation. La position de l'héliostat dans le système référentiel du champ est l'un des principaux facteurs intervenant dans le principe de visée de l'héliostat [128,136]. Il est donc crucial que l'héliostat soit à la position prévue lors des études de conception pour que la tache focale pointe exactement sur le récepteur, sinon il y aura forcément une déviation de la tache focale.

Causes potentielles. De nombreuses raisons peuvent être à l'origine du mauvais positionnement d'un héliostat. Il y a l'installation du champ d'héliostats sur un terrain qui n'est pas parfaitement plat [37], les erreurs dues aux instruments de mesure (les instruments modernes de mesure de distance ont une précision allant jusqu'à $1 \text{ mm} \cdot \text{km}^{-1}$, tandis que les grands champs solaires peuvent être installés sur une surface de 14 km^2 [131]) et les erreurs d'interprétation humaine [105]. Les erreurs d'interprétation humaine résultent essentiellement de l'ambiguïté de la direction du nord. En effet, l'arpentage des champs solaires utilise le plus souvent le système de projection Transverse Universelle de Mercator (UTM) (basé sur le nord du quadrillage), tandis que le calcul de la position du soleil utilise un système de coordonnées aligné sur le nord géographique. Lors de la conversion entre les deux systèmes de coordonnées, des erreurs peuvent être commises.

Analyse de l'impact. La déviation de la tache focale résultant du mauvais positionnement de l'héliostat est quasi-constante (simple décalage) durant le suivi solaire [36,91]. En outre, la distance entre la cible et la tache focale sera fonction de la distance existante entre la position réelle et la position prévue

(pendant les études de conception) pour l'héliostat. Toutefois, il faudrait souligner qu'il existe des méthodes de suivi solaire pour lesquelles le positionnement précis de l'héliostat n'est pas important. Au lieu d'utiliser des équations astronomiques, ces méthodes utilisent un photodétecteur pour déterminer la position du soleil et, ensuite, l'agencement du photodétecteur par rapport au réflecteur permet de connaître la direction du récepteur [137,138].

II.3.3. Stratégies de correction des erreurs de suivi solaire

Les erreurs de suivi solaire des héliostats sont intrinsèquement aléatoires et se produisent principalement en raison des sources récurrentes détaillées dans la section (II.3.2). Il existe trois approches principales pour corriger la déviation de la tache focale causée par les sources d'erreur.

II.3.3.1. Réagencement, reconstruction ou réinstallation rigoureuse de l'héliostat

Dans cette approche, les composants de l'héliostat sont réagencés rigoureusement [139], ou l'héliostat est reconstruit ou réinstallé rigoureusement [37]. C'est le seul moyen de corriger pratiquement les sources d'erreur. Cette approche peut être adoptée lorsque l'héliostat présente les sources d'erreur suivantes : l'inclinaison du piédestal, le décalage de référence angulaire, la mauvaise disposition des deux axes de suivi, l'erreur d'incurvation et le mauvais positionnement de l'héliostat. Cependant, elle est très laborieuse, surtout pour les grands champs solaires qui sont constitués de milliers d'héliostats.

Dans le cas de l'inclinaison du piédestal, par exemple, l'héliostat doit être réinstallé tout en s'assurant, à l'aide d'un inclinomètre extrêmement précis, que l'axe de rotation azimutale est parfaitement horizontal, selon le type d'orientation d'axes adopté par l'héliostat. Cette approche a été appliquée à la centrale pilote Solar One (constituée de centaines d'héliostats) aux États-Unis [97] et à la plateforme expérimentale Helio40 (constituée d'environ 20 héliostats) en Afrique du Sud [102]. Cela a permis de réduire considérablement l'inclinaison du piédestal dans les deux cas. Pour Solar One, 95 % des héliostats se sont retrouvés avec une inclinaison du piédestal inférieure à 0,974 mrad à la fin de la correction. Pour Helio40, l'inclinaison du piédestal maximale du champ solaire a été réduite d'environ 90 %, soit de 2,1 ° (environ 37 mrad) à moins de 0,2 ° (environ 3,5 mrad), qui est la précision de l'instrument de mesure. Aucune autre étude n'a été trouvée sur les autres sources d'erreur récurrentes concernant cette approche.

II.3.3.2. Suivi solaire basé sur un modèle mathématique

Le suivi solaire basé sur un modèle mathématique est la méthode la plus couramment utilisée pour corriger la déviation de la tache focale causée par les sources d'erreur [81]. L'approche consiste à adopter un contrôle en boucle ouverte (Figure 7a) basé sur un modèle mathématique qui intègre déjà l'erreur de

suivi solaire présente dans le fonctionnement de l'héliostat. Le processus de quantification de cette erreur est communément appelé "calibration". Une revue de la littérature effectuée par Slatter et al [26] présente les méthodes de calibration proposées pour corriger les erreurs de suivi solaire des héliostats. Malgré le grand nombre de méthodes proposées, montrant un progrès significatif dans le domaine, on ne sait toujours pas quelles sont les méthodes pratiquement efficaces [26]. La référence des méthodes de calibration reste de loin la méthode brevetée par McDonnell Douglas Corporation en 1986 [90]. Dans cette méthode [90], une cible est placée en dessous du récepteur (Figure 27), avec la tache focale de l'héliostat dirigée vers elle. La distance entre le centroïde de la tache focale et le point de référence de la cible est déterminée pour différentes positions du soleil à l'aide d'un système de caractérisation de faisceau (BCS). Par la suite, un modèle mathématique prédisant l'orientation idéale de l'héliostat est développé sur la base des déviations de la tache focale enregistrées pour différentes positions du soleil. L'objectif du modèle mathématique est de compenser la déviation de la tache focale causée par les sources d'erreur. La procédure détaillée du développement de telle méthode est présentée par Malan [89].



Figure 27: Illustration des cibles de calibration placées sous le récepteur dans différentes centrales CSP (de gauche à droite) : Planta Solar 10, Gemasolar, Coalinga Chevron Solar, Crescent Dunes Solar power plant, Sierra Suntower [89].

Les méthodes de calibration ont été classées en quatre catégories, c'est-à-dire de la classe A à la classe D (Figure 28) [26]. Cette classification se base sur la position du dispositif principal (caméra, capteurs, radars, lasers, etc.) utilisé dans la méthode de calibration. Le BCS des méthodes de calibration de la classe A est généralement basé sur une ou plusieurs caméras centrales qui permettent d'estimer l'erreur de suivi à travers diverses séries de photos de l'orientation réelle de l'héliostat (photogrammétrie) (sous-classe A2) ou à partir de la déviation causée par la tache focale sur une cible en l'excitant ou non (sous-classe A1). Pour ce qui concerne les méthodes de calibration de la classe B, la quantification de l'erreur ne se fait qu'avec des équipements lasers ou radars. Les méthodes de calibration de la classe C

utilisent plusieurs caméras autour du récepteur pour photographier la surface réfléchissante de l'héliostat et comparent les différentes images pour estimer les erreurs de suivi solaire. Dans la classe D, les méthodes de calibration exigent que chaque héliostat du champ soit équipé de son propre capteur ou caméra pour estimer ses erreurs de suivi solaire. Quelle que soit la méthode de calibration, les erreurs de suivi solaire estimées sont généralement enregistrées sur une année dans une base de données, afin de mettre continuellement à jour le modèle mathématique de suivi solaire.

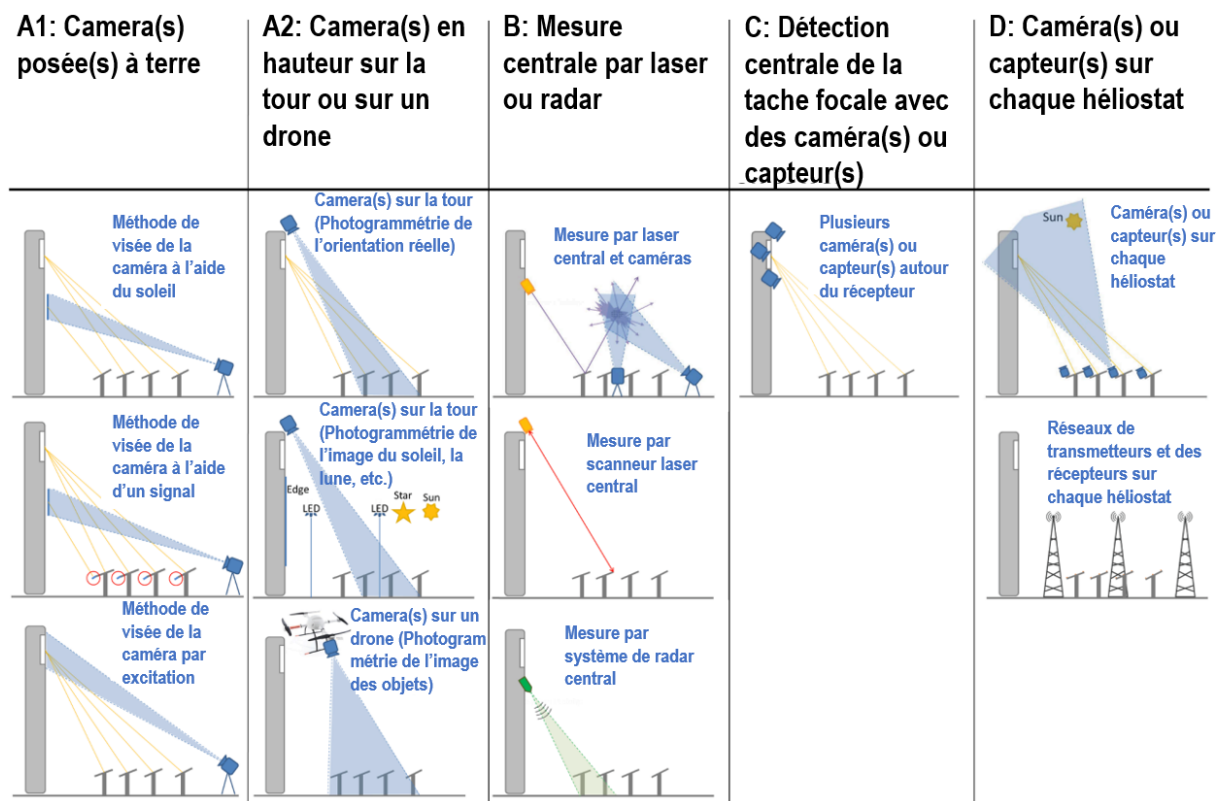


Figure 28: Classification des méthodes de calibration en fonction de l'emplacement du dispositif principal du système de caractérisation des faisceaux (BCS) [26].

Plus précisément, le suivi solaire basé sur un modèle mathématique a été adopté pour corriger globalement la déviation de la tache focale causée par diverses sources d'erreur, notamment l'inclinaison du piédestal, le décalage de référence angulaire et la tolérance du rayon de la roue motrice [88]. Cette approche a permis de réduire respectivement les déviations horizontales et verticales causées par ces sources d'erreur d'environ 90 % et 80 %.

II.3.3.3. Suivi solaire en boucle fermée

Le suivi solaire en boucle fermée (Figure 7b) pourrait corriger la déviation de la tache focale causée par la plupart des sources d'erreur. Comme expliqué dans la section (II.1.3.1), l'approche consiste à corriger instantanément les erreurs de suivi solaire par le biais d'un mécanisme de rétroaction contrôlant la tache

focale sur le récepteur [104,110,111,132,140]. Par conséquent, lorsqu'il y a une déviation de la tache focale, un signal est envoyé à l'organe de commande pour qu'il corrige systématiquement l'erreur.

Il existe plusieurs méthodes pour la mise en œuvre d'une boucle fermée (Tableau 7), selon la source qui fournit le signal à la boucle de rétroaction. La source peut être directement la tache focale (comme décrite précédemment), l'orientation réelle de l'héliostat ou les actionneurs de l'organe d'entraînement. Quelle que soit la source du feedback, le principe reste le même. Dans le cas de la méthode basée sur l'analyse de la déviation angulaire, l'erreur de suivi solaire est mesurée séquentiellement, ce qui permet de réajuster convenablement l'orientation de l'héliostat. De même, la rotation ou le mouvement linéaire des actionneurs est analysé séquentiellement pour vérifier l'exécution rigoureuse de la commande par l'organe d'entraînement afin d'agir convenablement pour ce qui concerne la méthode basée sur l'analyse du mouvement d'entraînement.

Tableau 7: Méthodes de mise en œuvre du contrôle de suivi solaire en boucle fermée.

Méthode de boucle fermée	Source du retour d'information	Appareils/capteurs de mesure d'erreur	Références
Analyse de la déviation de la tache focale	Tache focale de l'héliostat	Cameras CCD, actionneurs piézoélectriques, capteurs photodiodes, capteur LDRs à quatre quadrants, etc.	[104,110,111, 132,140]
Analyse de la déviation angulaire de l'orientation réelle	Orientation réelle de l'héliostat	Inclinomètres, accéléromètres, magnétomètres, Réseau of transmetteurs and récepteurs, etc.	[26,141–143]
Analyse du mouvement d'entraînement	Actionneurs de l'organe d'entraînement de l'héliostat	Encodeur, capteur de position, etc.	[26,144,145]

Il convient de noter que seule la méthode basée sur l'analyse de la déviation de la tache focale est qualifiée de boucle fermée "complet" [22], tandis que les autres sont considérées comme des boucles fermées "partielles" car elles ont une capacité limitée à détecter les sources d'erreur. Par exemple, la méthode basée sur l'analyse du mouvement d'entraînement ne peut détecter l'impact d'aucune source d'erreur récurrente détaillée dans la section (II.3.2). En revanche, la méthode basée sur l'analyse de la déviation angulaire de l'orientation réelle de l'héliostat peut détecter les impacts de l'inclinaison du piédestal, du décalage de référence angulaire, de la mauvaise disposition des deux axes de suivi et de l'erreur d'incurvation.

II. 4. Conclusion sur les sources d'erreur de suivi solaire des héliostats

La performance et la sécurité d'une centrale solaire à tour reposent essentiellement sur la précision de suivi solaire des héliostats. Cette précision est généralement affectée par les sources d'erreur de suivi

solaire qui font dévier les taches focales des héliostats du récepteur, causant ainsi une perte d'énergie thermique pouvant aller jusqu'à 40 % de la puissance nominale du champ. Les sources d'erreur de suivi solaire surviennent lors de la fabrication, de l'installation ou encore après l'installation de l'héliostat. Elles résultent principalement de la structure de l'héliostat, de l'imperfection des équipements de l'organe de commande et d'entraînement, des appareils de mesure, des erreurs d'interprétation humaines, de l'influence du vent ou de l'affaissement gravitationnel. Les sources d'erreur provenant de la structure de l'héliostat (inclinaison du piédestal, décalage de référence angulaire et la mauvaise disposition des deux axes de suivi solaire) sont les plus impactantes et les seules intégralement évitables dans la théorie et la pratique. Cependant, pour les éviter, il faut rigoureusement de la précision lors de la conception et de l'installation des héliostats. Toutefois, l'affaissement gravitationnel, l'influence du vent, la pluie et les propriétés géotechniques du sol sont des aspects négatifs qui pourront les faire apparaître dans le temps. Le décalage horaire et l'incurvation des réflecteurs sont des sources d'erreur moins graves qui ne peuvent qu'être minimisées. La correction du mauvais positionnement de l'héliostat et le décalage de référence angulaire sur le champ nécessitent des techniques plus sophistiquées pour le nivellement parfait du terrain et la conversion entre les systèmes de coordonnées de référentiels utilisés dans la conception et la mise en place des centrales à tour.

Les sources d'erreur ayant fait l'objet de multiples études sont très probablement les plus récurrentes et ont longtemps impacté sur la production d'électricité depuis la conception des premières centrales à tour (Solar One, Solar Two, etc.). Raison pour laquelle l'idée d'autres méthodes de suivi solaire, autre que la boucle ouverte, ne s'est pas fait attendre. Aujourd'hui, le suivi solaire basé sur le modèle mathématique est l'approche la plus utilisée pour remédier aux déviations de la tache focale causées par les sources d'erreur de suivi solaire des héliostats. L'avantage de cette approche est qu'elle nécessite moins d'investissement par rapport aux deux autres qui consistent soit à adopter un suivi solaire en boucle fermée ou à reprendre rigoureusement l'agencement, la construction ou l'installation de l'héliostat. Le suivi solaire en boucle fermée requiert une précision de pointe pour la boucle de rétroaction, pour ne pas causer un décalage horaire ou une erreur importante sur la mesure de l'erreur de suivi solaire. La dernière approche qui consiste à reprendre rigoureusement l'agencement, la construction ou l'installation de l'héliostat est la seule option capable de corriger réellement certaines sources d'erreur de suivi solaire (l'inclinaison du piédestal, le décalage de référence angulaire, la mauvaise disposition des deux axes de suivi et le mauvais positionnement de l'héliostat), mais inadaptée pour les grands champs solaires qui sont constitués de milliers d'héliostats. Le suivi solaire basé sur le modèle mathématique et le suivi solaire en boucle fermée sont toutes des approches qui remédient simplement aux déviations causées par les sources d'erreur de suivi solaire, mais ne corrigent pas réellement les sources d'erreur de suivi solaire.

Les comportements constatés dans la déviation causée par la plupart des sources d'erreur de suivi solaire sont fonction de la saison, de la position de l'héliostat et de l'ampleur de la source d'erreur. Les déviations causées par le décalage de référence angulaire azimutal et du mauvais positionnement de l'héliostat restent quasi-constantes durant la poursuite solaire. Cela les rend moins complexe par rapport aux déviations des autres sources d'erreur qui sont fonction du temps. Par ailleurs, les simulations des déviations effectuées jusque-là concernent principalement les héliostats situés sur les repères nord-sud et est-ouest des champs solaires. Des simulations complémentaires dans différentes positions des champs solaires, autres que les repères nord-sud et est-ouest, permettront de mieux comprendre les déviations causées par les sources d'erreur de suivi solaire des héliostats.

Les modèles mathématiques qui simulent le fonctionnement des héliostats existent. Les futures recherches pourraient améliorer la précision de ces modèles en prenant compte des facteurs tels que le fluage du matériau de fabrication, les propriétés géotechniques du sol et la pluviométrie pour permettre de concevoir une structure d'héliostat robuste et bien adaptée aux réalités du terrain. Cela pourrait contribuer à réduire les sources d'erreur provenant de la structure des héliostats. Enfin, l'analyse révèle que si les sources d'erreur individuelles des héliostats ont été largement étudiées, les effets combinés de ces erreurs dans les conditions réelles de fonctionnement des héliostats restent encore peu explorés.

Dans le cadre du projet CSP4Africa, l'héliostat multifacette à entraînement commun conçu et construit présentait de nombreuses sources d'erreur de suivi solaire, affectant à la fois la précision de sa poursuite solaire et réduisant sa période de fonctionnement journalière. Il est crucial de corriger ces sources d'erreur pour améliorer l'efficacité de la microcentrale CSP4Africa. En outre, cet héliostat fonctionne en boucle ouverte, sans contrôle de rétroaction sur sa tache focale. Il serait pertinent de mener une réflexion sur la mise en place d'une technologie d'héliostat fonctionnant en boucle fermée.

III. Bref aperçu des huiles végétales comme fluides caloporteurs ou de stockage thermique

III. 1. Présentation des huiles végétales

Les huiles végétales sont des matières grasses obtenues à partir de graines oléagineuses par différentes méthodes, y compris le pressage, la centrifugation et l'extraction au Soxhlet [146]. Insolubles dans l'eau, les huiles végétales se présentent sous forme solide ou liquide à température ambiante, selon leur composition, qui est dominée par des triglycérides (ou triesters d'acides gras), suivis respectivement d'acides gras libres et divers composants mineurs [146].

III.1.1. Triglycérides

Les triglycérides représentent environ 95 % du poids des huiles végétales. Ils sont formés par la liaison d'une molécule de glycérol (alcool) et trois molécules d'acides gras (Figure 29), ces dernières constituant environ 94 % de la masse totale du triglycéride [147].

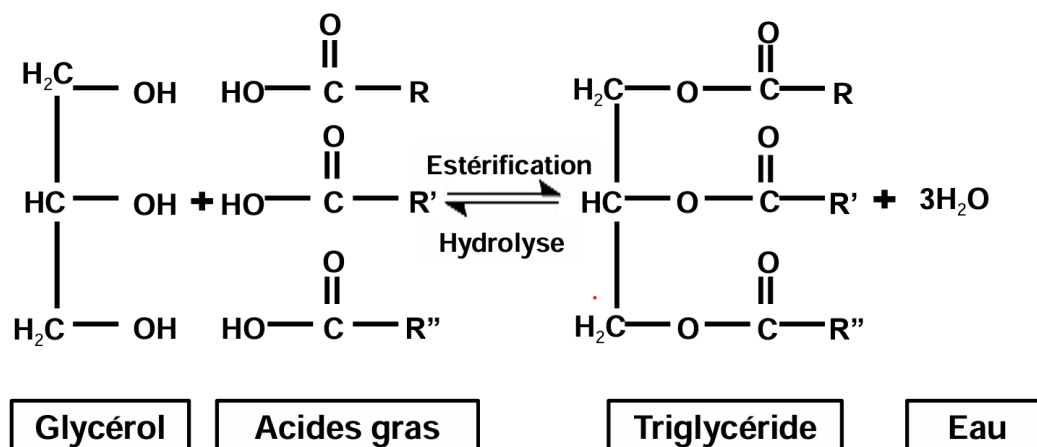


Figure 29: Équation chimique de la formation des triglycérides [148]

Les triglycérides contiennent généralement un à trois types d'acides gras, et les propriétés thermophysiques et chimiques des huiles végétales dépendent principalement de la composition en acides gras de ces triglycérides [146]. Cependant, deux huiles végétales présentant la même composition qualitative et quantitative en acides gras auront des caractéristiques physico-chimiques distinctes si la distribution des acides gras dans les triglycérides diffère [147]. Cette complexité structurelle confère aux huiles végétales des propriétés uniques. Ainsi, chaque huile végétale se distingue par sa composition spécifique en acides gras [149].

III.1.2. Acides gras libres

Les acides gras libres représentent approximativement 5 % de la composition d'une huile végétale [147]. Ils se caractérisent par une chaîne hydrocarbonée comportant un groupement méthyle (-CH₃) à une extrémité et un groupement carboxyle (-COOH) à l'autre (Figure 30).

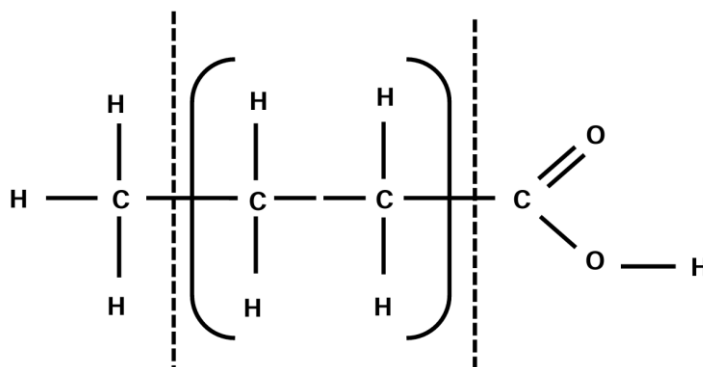


Figure 30: Structure chimique d'un acide gras [148]

Les acides gras se distinguent par la longueur de leur chaîne carbonée, contenant entre 8 et 24 atomes de carbone, avec ou sans insaturation [146]. Les acides gras saturés possèdent un squelette carboné constitué uniquement de liaisons simples, tandis que les acides gras insaturés contiennent une ou plusieurs doubles liaisons. Certaines propriétés des huiles végétales, y compris leur température de fusion et leur température d'ébullition, dépendent de leur constitution en acides gras saturés et insaturés [147,148]. En effet, les acides gras saturés sont généralement solides à température ambiante, alors que les acides gras insaturés se présentent sous forme liquide à température ambiante [147,148].

III.1.3. Composants mineurs

Les composants mineurs, représentant moins de 3 % de la masse des huiles végétales, incluent les hydrocarbures, les antioxydants naturels, l'eau, les pigments, les cires et les mucilages [147,148]. Ces substances peuvent intervenir dans la conservation de l'huile, influencer sa couleur, ou même accélérer sa dégradation.

III. 2. Propriétés d'intérêt des huiles végétales pour le transfert et stockage thermique

Ces dernières années [21,23,148,150–152], la demande croissante de solutions énergétiques durables a donné lieu à une exploration notable des huiles végétales comme fluides caloporteurs (HTF¹) ou matériaux de stockage thermique (TESM) dans les applications à température élevée, notamment les centrales à concentration solaire. Les huiles végétales sont apparues comme des candidates prometteuses pour ces applications en raison de leur nature renouvelable, leurs propriétés respectueuses de l'environnement, leur caractère non dangereux, leur grande disponibilité et surtout leur faible coût par rapport aux huiles thermiques conventionnelles (minérales et synthétiques) [148]. La sélection d'une huile appropriée pour les applications de transfert et de stockage thermique implique de multiples critères, dont beaucoup se retrouvent à cheval entre les HTFs et les TESMs (Figure 31) [153].

Des études [21,23,148,150–152] ont mis en évidence le potentiel des huiles végétales comme fluide de transfert et de stockage thermique dans les applications à température élevée, en particulier dans les centrales solaires, où elles offrent certains avantages par rapport aux huiles thermiques traditionnelles. Ces avantages comprennent leur capacité thermique massique élevée, leur conductivité thermique

¹ Au-delà de leur fonction de matériau de stockage thermique (TESM) primaire, de nombreux fluides servent également d'agents de transfert de chaleur, remplissant ainsi le rôle de fluide caloporteur (HTF). Par souci de simplicité, nous utiliserons tout au long de ce document le terme « fluide caloporteur » (HTF) pour désigner à la fois les fluides de transfert thermique et les matériaux de stockage thermique.

élevée, leur densité de stockage thermique élevée, leur caractère renouvelable et leur inflammabilité relativement faible. En outre, les huiles végétales présentent une forte biodégradabilité et une toxicité relativement faible, ce qui renforce leur intérêt pour les applications de transfert et de stockage thermique.



Figure 31: Critères de sélection des fluides caloporteurs et matériaux de stockage thermique sensible [153]

III. 3. Stabilité thermique des huiles végétales

L'un des principaux paramètres influençant les performances des huiles végétales dans les applications à température élevée est leur stabilité thermique, c'est-à-dire leur capacité à résister au changement permanent de leurs propriétés d'intérêt [148,154]. En effet, la stabilité thermique détermine la capacité d'usage à long terme d'une d'huile végétale en tant que fluide caloporteur ou de stockage thermique. Plus elle est grande, plus elle limite les fréquences de remplacement du fluide dans les applications thermiques. La stabilité des huiles végétales est influencée par divers facteurs, notamment la température, la durée d'exposition à la chaleur et la présence d'oxygène ou d'humidité [148,154].

L'étude de la stabilité thermique des huiles végétales vise à prédire l'évolution de leurs propriétés thermophysiques avec le vieillissement pour une application donnée. Par conséquent, il est primordial d'évaluer la stabilité thermique de toute huile végétale identifiée comme fluide de transfert ou de stockage thermique avant son utilisation réelle.

III.3.1. Méthodes d'évaluation de la stabilité thermique

L'évaluation de la stabilité thermique des huiles végétales dépend de leur application spécifique [146,148]. Dans les applications alimentaires, par exemple pour la friture, les tests sont généralement réalisés dans une atmosphère oxydante pour simuler les conditions de cuisson. En revanche, pour les applications des huiles végétales en tant que fluides de transfert de chaleur, il est essentiel de réaliser les tests dans une atmosphère inerte afin de minimiser les risques d'oxydation et de polymérisation. Plusieurs méthodes [24] couramment utilisées permettent de caractériser cette stabilité thermique :

- **Analyse thermogravimétrique (ATG)** : Cette technique mesure la perte de masse de l'huile en fonction de la température [155]. Elle permet de déterminer la température seuil au-delà de laquelle une dégradation significative de l'huile commence à se produire.
- **Chromatographie en phase gazeuse (GC)** : Utilisée pour analyser le profil en acides gras de l'huile végétale [154], cette méthode permet de détecter les changements dans la composition de l'huile au fil du vieillissement, indicatifs de dégradations thermiques.
- **Calorimétrie à balayage différentiel (DSC)** : Cette technique permet de mesurer les flux de chaleur de l'huile en fonction de la température [156], fournissant ainsi des informations sur sa stabilité thermique et les transitions énergétiques lors du chauffage.

D'autres méthodes plus avancées peuvent également être employées, comme la spectroscopie Raman [157,158] et la chromatographie en phase gazeuse ultrarapide couplée à la chimiométrie [159]. La chromatographie ultrarapide, notamment, est reconnue pour son efficacité, ne nécessitant pas de préparation d'échantillon et permettant une analyse complète en moins de deux minutes.

III.3.2. Produits de dégradation thermique

Les triglycérides, composants majeurs des huiles végétales, présentent des dégradations thermiques complexes en raison de leur composition diversifiée et de la multiplicité des réactions chimiques possibles [160,161]. Ainsi, sous l'effet de la chaleur, de nombreux produits de dégradation sont observés, dépendant de plusieurs paramètres : la température, le type d'atmosphère (oxydante ou inerte), la vitesse de chauffe et la durée d'exposition à la chaleur [148]. Ces facteurs influent non seulement sur la quantité, mais aussi sur la nature des produits formés. Des études, telles que celles menées par Fortes et Baugh [162], ont montré l'impact du type d'atmosphère sur les composés de dégradation générés. Par exemple, la pyrolyse de l'huile des fruits de macauba a permis d'identifier plus de trente composés distincts sous atmosphères inerte et oxydante [162], les composés observés étant relatifs à l'atmosphère de test. Ce

constat souligne l'importance de contrôler les conditions opératoires des huiles végétales afin de minimiser les effets indésirables dans des applications thermiques spécifiques.

Les composés issus de la dégradation des huiles végétales à haute température sont divers et incluent généralement les aldéhydes, les acides carboxyliques, les alcènes, les alcanes, ainsi que les alcools et certains composés aromatiques [24,149,161,162]. Ces produits résultent de processus tels que la décarboxylation, l'oxydation, etc. La Figure 32 illustre le profil de divers produits générés lors de la pyrolyse d'une huile végétale, soulignant l'ampleur de la dégradation possible et la variété des composés formés.

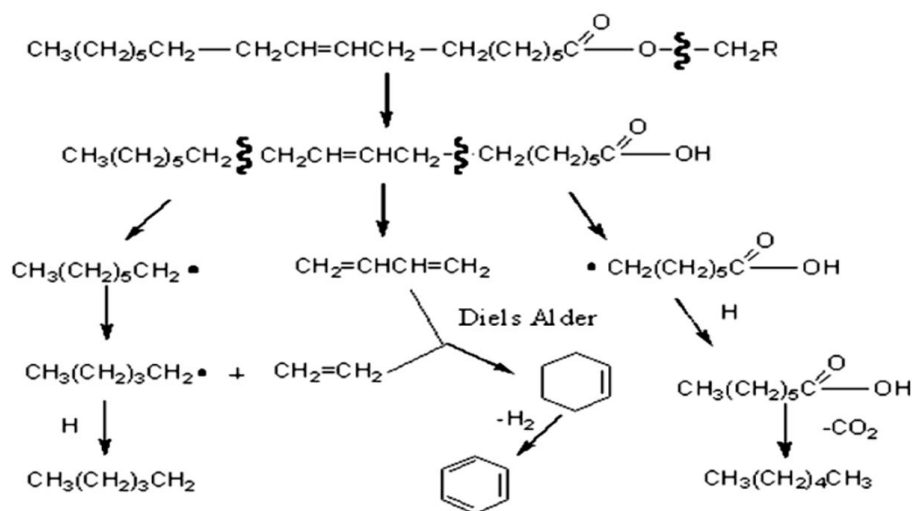


Figure 32: Illustration du mécanisme de dégradation thermique des huiles végétales par pyrolyse [161]

III. 4. État de l'art sur l'utilisation des huiles végétales comme fluides caloporteurs ou de stockage thermique

L'utilisation des huiles végétales comme fluides de transfert et/ou de stockage thermique est envisagée dans de nombreuses études [17,21,149,152,163–166] pour des applications de concentration et de cuisson solaire. L'ensemble de ces études visent des températures de fonctionnement allant jusqu'à 233 °C (Tableau 8). À cette fin, les recherches se concentrent sur l'identification des huiles présentant non seulement les critères mentionnés à la Figure 31, mais également une grande stabilité thermique dans des conditions de chauffe prolongée. Des huiles comme celles de *Jatropha curcas*, de palme, de tournesol et de colza ont été largement étudiées pour leurs performances dans des environnements thermiques contrôlés.

Les travaux de Pikra et al. [165] sur le développement d'une microcentrale CSP de type cylindro-parabolique ont montré qu'environ 24 m³ d'huile de palme sont nécessaires pour produire 10 kW_{el} pendant 6 h de fonctionnement. La plage de fonctionnement en température de la microcentrale varie de

150 °C à 200 °C. Aucune comparaison entre l'huile de palme et d'autres huiles thermiques n'a été présentée dans cette étude [165].

Dans le cadre du projet INNOTHERM III, Hoffmann [149] a investigué sept huiles végétales comme fluides caloporteurs pour un système de climatisation solaire de 100 kW. Le système devrait fonctionner dans la plage de température allant de 175 °C à 210 °C. Les propriétés thermophysiques et chimiques des sept huiles végétales neuves ont été mesurées de la température ambiante à 250 °C, incluant la viscosité dynamique, la conductivité thermique, la masse volumique et la capacité thermique massique de ces huiles. Les résultats montrent que ces sept huiles végétales possèdent des caractéristiques thermophysiques très proches, quasiment pas de différence [150].

Tableau 8 : Huiles végétales envisagées et utilisées comme fluide de transfert ou stockage thermique dans les microcentrales solaires [148].

Projet	Huile végétale	Fonction	Plage de température [°C]	Etat	Références
Conception d'une microcentrale solaire à concentration de 10 kW _{el}	Huile de palme	Fluide de transfert et de stockage thermique	150 °C à 200 °C	Projeté	[165]
Projet Innotherm III : climatisation solaire 138 kW _{th} .	Huile de colza	Fluide de transfert thermique	175 °C à 200 °C	Projeté	[149]
Projet CSP4Africa : microcentrale solaire à concentration de 10 kW _{el}	Huile brute de <i>Jatropha curcas</i>	Fluide de transfert et de stockage thermique	150 °C à 210 °C	Assemblé et testé	[17,21]
Cuiseur solaire	Huile de tournesol	Fluide de stockage thermique	Température ambiante à 180 °C	Fonctionnel	[163]
Cuiseur solaire à capteurs plans	Huile de coco	Fluide de stockage thermique	Température ambiante à 220 °C	Testé	[166]
Cuiseur solaire à collecteur parabolique	Huile de tournesol et de Roki (mélange d'huile de palme et de tournesol)	Fluide de stockage thermique	Température ambiante à 233 °C	Testé	[152]

L'huile brute de *Jatropha curcas* (JaCCO) a montré de nombreux avantages pour son utilisation comme fluide caloporteur et de stockage thermique dans le cadre du projet CSP4Africa, notamment sur les plans environnemental, économique et sociétal [17,21]. En outre, JaCCO offre des propriétés de stockage thermique remarquables par rapport aux huiles traditionnelles prédominantes dans les centrales à concentration solaire (CSP). Dans le cadre du même projet (CSP4Africa), L'huile de *Jatropha curcas* raffinée (RJCO) a également été étudiée comme fluide de transfert ou de stockage thermique dans les

applications thermiques allant jusqu'à 300 °C [23]. La neutralisation de l'acidité de JaCCO n'a pas influencé ses propriétés thermophysiques et les deux huiles ont présenté des propriétés similaires au fil du vieillissement isotherme à 210 °C [21,23,167].

Mawire et al. [163] ont mené des expériences de vieillissement sur l'huile de tournesol et deux autres huiles thermiques (Shell Thermia C et Shell Thermia B), en vue d'évaluer leur performance de stockage thermique dans les cuiseurs solaires. L'étude repose sur un dispositif expérimental comprenant un réservoir de stockage isolé (en acier inoxydable) de 20 L comme réacteur. Les trois fluides testés sont l'huile de tournesol, Shell Thermia C et Shell Thermia B. L'huile de tournesol a présenté la meilleure performance de stockage thermique à 180 °C, tandis qu'à 110 °C, les trois huiles ont présenté des performances similaires.

L'huile de coco a été employée comme fluide caloporteur dans un capteur plan à double vitrage recouvert d'une surface sélective [166]. Des températures d'environ 150 °C ont été atteintes entre 10h00 et 14h00 dans des conditions d'isolation de 25 MJ·m⁻²·j⁻¹ avec une valeur de crête de 1000 W·m⁻².

Abedigamba et al. [152] ont analysé les propriétés thermophysiques de deux huiles végétales, l'huile de tournesol et l'huile de Roki (mélange d'huile de palme et d'huile de tournesol), en vue de leur utilisation comme matériaux de stockage thermique sensible pour les applications à moyenne température. Les propriétés mesurées comprennent l'indice de réfraction, la vitesse du son, la densité, la capacité thermique spécifique et la conductivité thermique dans la plage de température allant de 17 °C à 57 °C. Les résultats indiquent que l'indice de réfraction, la vitesse du son, la densité et la conductivité thermique des deux huiles diminuent avec l'augmentation de la température, tandis que la compressibilité isentropique, le coefficient de dilatation thermique et la capacité thermique augmentent avec l'augmentation de la température. Par ailleurs, en fonctionnement dans le cuiseur solaire, l'huile de Roki s'est montrée plus performante, atteignant des températures maximales plus élevées (170 °C à 233 °C) comparativement à l'huile de tournesol (160 °C à 210 °C).

Bien que ces études aient porté sur le potentiel des huiles végétales comme fluides caloporteurs ou de stockage thermique dans les applications à température élevée [21,23,148,150–152], peu d'information existe sur la stabilité thermique des huiles végétales, y compris l'huile des graines de *Lannea microcarpa* et l'huile des graines de *Lannea kerstingii*, des huiles végétales considérées particulièrement stables jusqu'à 120 °C [168,169]. Pourtant, la plupart des microcentrales à concentration solaire utilisent des cycles organiques de Rankine, fonctionnant entre 150 °C et 250 °C [167]. Par conséquent, il est impératif de poursuivre les recherches afin d'évaluer la pertinence des huiles végétales, telles que l'huile des graines de *Lannea microcarpa* et l'huile des graines de *Lannea kerstingii*, en tant qu'alternatives durables

pour les applications de transfert et stockage thermique, en particulier dans les microcentrales à concentration solaire fonctionnant à température élevée comme CSP4Africa.

Chapitre 2 : Amélioration de la poursuite solaire de l'héliostat multifacette de la microcentrale CSP4Africa : Diagnostic et correction des sources d'erreur de suivi solaire

I. Introduction

Dans les centrales à concentration solaire, la précision de suivi solaire des héliostats est un facteur déterminant pour maximiser l'efficacité de la production d'électricité. L'une des innovations clés du projet CSP4Africa [17] est l'héliostat multifacette à entraînement commun (Tableau 2), un dispositif ergonomique présentant plusieurs réflecteurs partageant à la fois une paire de moteurs pas à pas et une seule structure de support. Cette conception, bien que sa mise en œuvre soit complexe, limite considérablement les ressources et le coût global de l'héliostat, tout en optimisant sa surface réfléchissante [56]. Cependant, malgré son potentiel, ce système rencontre plusieurs limitations opérationnelles qui affectent son fonctionnement idéal. En effet, les travaux antérieurs [19,170] ont rapporté que cet héliostat pilote ne fonctionne que pendant une partie (entre 11 h et 14 h) de la période de fonctionnement journalière de la microcentrale CSP4Africa, qui s'étend de 9h30 à 14h30 [17]. Le diagnostic entrepris par Ouedraogo [170] confirme les principes mathématiques et physiques utilisés pour la réflexion du rayonnement solaire, cependant met en évidence des problèmes de positionnement des différents réflecteurs des héliostats.

Ce chapitre se concentre sur l'amélioration de la poursuite solaire du modèle d'héliostat multifacette de la microcentrale CSP4Africa. L'objectif est de diagnostiquer les principales sources d'erreur qui entravent son fonctionnement optimal, et de proposer des solutions correctives concrètes. Ce diagnostic repose sur un examen du fonctionnement de l'héliostat sur une période de deux mois, pendant laquelle ses performances ont été minutieusement observées, analysées et évaluées. Parmi les anomalies identifiées, certaines concernent l'instabilité de la grille qui entraîne les réflecteurs, l'insuffisance du couple des moteurs d'entraînement, ainsi que les défauts de réglage des miroirs. Des solutions pratiques ont été mises en œuvre pour corriger certaines de ces erreurs afin d'améliorer la précision de suivi solaire de l'héliostat, notamment par le remplacement des moteurs pas-à-pas et l'introduction de mécanismes de réglage flexible des miroirs. Par la suite, des suivis solaires ont été effectués avec l'héliostat sur une période de neuf mois afin d'évaluer l'impact des améliorations apportées dans son fonctionnement.

II. Présentation de l'héliostat multifacette de CSP4Africa

II.1. Description physique

L'héliostat multifacette de CSP4Africa est principalement composé de neuf réflecteurs, d'un châssis, d'une grille, d'un chariot, d'un organe d'entraînement et d'un organe de commande [17]. La Figure 33 fournit un aperçu de l'assemblage de ces différents composants. Chaque réflecteur possède une surface réfléchissante d'environ 1 m², fragmentée en neuf miroirs de 0,33 m × 0,33 m, d'un cadre de liaison et d'une tige métallique appelée "queue". Les miroirs périphériques des réflecteurs sont incurvés vers les miroirs

centraux dans l'optique de superposer leur tache focale (Tableau 3), pour qu'elle soit à même de pénétrer le récepteur de la microcentrale qui est un cylindre creux de diamètre 0,7 m [17]. L'incurvation des miroirs permet ainsi à l'héliostat multifacette de 9 m² de surface réfléchissante d'avoir approximativement une tache solaire concentrée de 0,11 m², soit 0,33 m × 0,33 m.

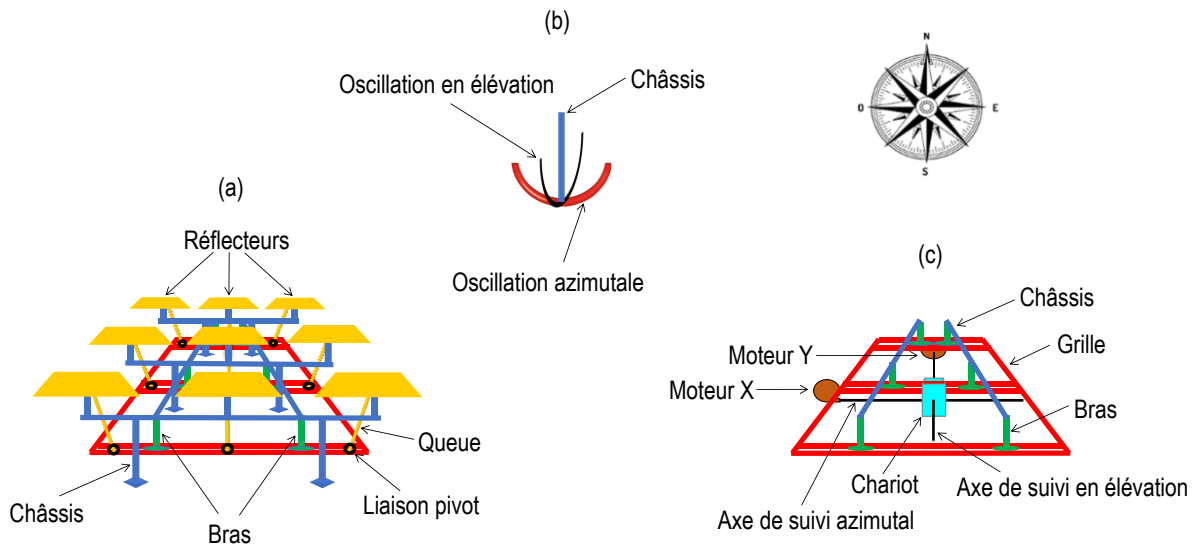


Figure 33: Aperçu de l'assemblage des différents composants de l'héliostat multifacette de CSP4Africa : a) perspective de l'héliostat, b) illustration de l'oscillation de la grille et c) l'organe d'entraînement couplé à la grille

L'ensemble des composants de l'héliostat est supporté par le châssis qui est une structure fixe, résistant et stable face aux intempéries [17]. Les réflecteurs sont connectés au châssis par deux liaisons, dont l'une est rotule et l'autre, pivot. Les liaisons rotules sont remarquées entre les neuf mâts du châssis et les cadres de liaison des réflecteurs (Voir Figure 33). Par contre, les liaisons pivots existent entre la grille de translation et les queues de réflecteurs. La grille est portée par six tubes métalliques creux, appelés "bras", reliés par une liaison pivot au châssis. L'organe d'entraînement est quant à lui posé à la partie inférieure du châssis, pendant que l'organe de commande est accroché à l'un des six supports du châssis entre les deux moteurs pas-à-pas de l'organe d'entraînement.

Quant au chariot qui assure la translation de la grille, il est en liaison pivot glissière avec les deux axes de suivi de l'organe d'entraînement, et maintient la grille par son centre à travers une liaison rigide. Le déplacement du chariot entraîne systématiquement la translation de la grille, impliquant également le mouvement de suivi solaire des réflecteurs de l'héliostat. Le moteur orienté suivant l'axe est-ouest est appelé "moteur X" et le moteur orienté suivant l'axe nord-sud, "moteur Y". Le moteur X suit la trajectoire azimuthale du soleil, pendant que le moteur Y suit l'élévation du soleil.

L'organe de commande constitue le cerveau de l'héliostat. Il est principalement constitué d'une carte Arduino, d'un pupitre de commande, et de deux contrôleur-moteurs. Le mouvement de suivi solaire des

réflecteurs de l'héliostat est contrôlé par l'organe de commande à travers les instructions envoyées aux deux moteurs pas-à-pas de l'organe d'entraînement.

II.2. Principe de fonctionnement

La chaîne de fonctionnement de l'héliostat débute avec l'organe de commande, plus précisément la carte Arduino. Son algorithme de suivi solaire a été développé de sorte qu'un pupitre de commande puisse le contrôler en fonctionnement automatique ou manuel. Pour cela, le pupitre de commande doit d'abord être connecté à la carte Arduino pour que ses éléments de contrôle (deux boutons poussoirs et un commutateur à trois niveaux, allant de -1 à 1) agissent. Le Tableau 9 présente les différentes actions pouvant enclencher la combinaison des différents éléments de contrôle du pupitre de commande.

Tableau 9: Présentation des actions enclenchées par les différentes combinaisons du pupitre de commande

	Position (-1) du Commutateur	Position (0) du Commutateur	Position (1) du Commutateur	Bouton poussoir 1	Bouton poussoir 2
Suivi solaire automatique	☒	☐	☐	☒	☒
Déplacement du chariot vers l'est	☒	☐	☐	☒	☐
Déplacement du chariot vers l'ouest	☒	☐	☐	☐	☒
Déplacement du chariot vers le sud	☐	☒	☐	☒	☐
Déplacement du chariot vers le nord	☐	☒	☐	☐	☒
Réinitialisation de la mémoire du pupitre de commande	☐	☐	☒	☐	☒

L'héliostat multifacette de CSP4Africa fonctionne en boucle ouverte (voir Figure 7a) et le calcul de la position du soleil est basé sur l'algorithme de Joseph Michalsky [171]. Dans un premier temps, les angles d'azimut et d'élévation du soleil sont déterminés, puis convertis en distances linéaires, ensuite l'organe de commande ordonne aux deux moteurs pas-à-pas, à travers leur contrôleur, de déplacer le chariot de ces distances linéaires. Le déplacement du chariot se traduira en inclinaison au niveau des réflecteurs de l'héliostat et une tache concentrée est maintenue sur le récepteur. Le processus est répété continuellement en fonction de la trajectoire du soleil durant la période d'opération de l'héliostat. Il est important de souligner qu'à travers la translation de la grille, tous les réflecteurs sont entraînés de manière synchrone. Un synoptique présentant les différentes inclinaisons extrêmes des réflecteurs est présenté à

la Figure 34. En fonctionnement normal, les six bras restent parallèles aux rayons incidents du soleil et les queues, normales aux réflecteurs. Ces aspects servent de stratégies pour se rassurer d'une bonne poursuite solaire lors du fonctionnement de l'héliostat.

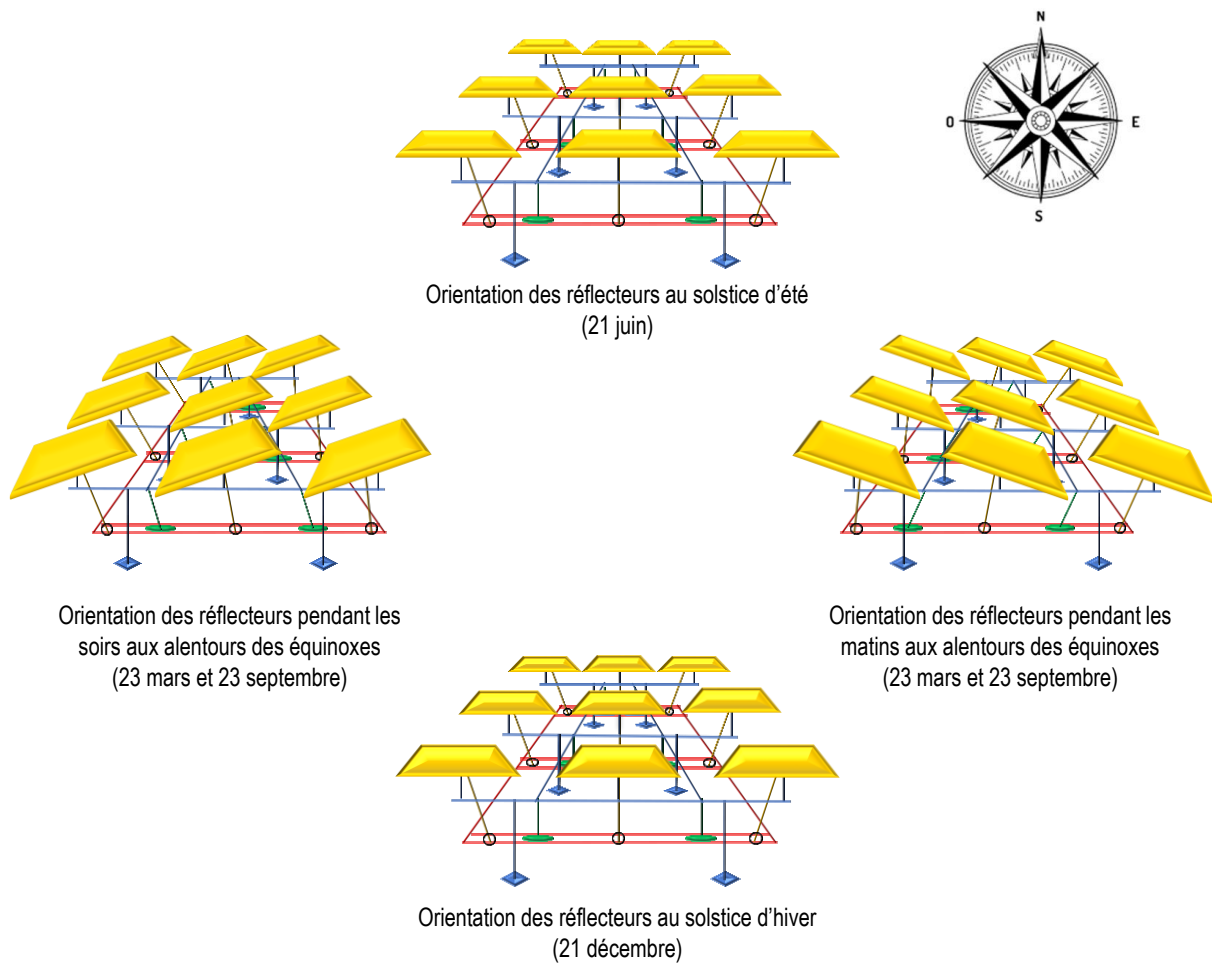


Figure 34: Présentation des différentes inclinaisons extrêmes des réflecteurs de l'héliostat

III. Diagnostic et identification des sources d'erreur de l'héliostat multifacette

Le diagnostic a consisté à analyser le fonctionnement de l'héliostat pendant deux mois (du 27 Janvier 2022 au 3 Avril 2022) durant sa période de fonctionnement qui figurait entre 11 h et 14 h [19,170]. Le diagnostic avait pour objectif de faire le bilan des sources d'erreur rencontrées dans le fonctionnement de l'héliostat. Les sources d'erreur identifiées ont ensuite été abordées pour remédier à leur impact sur la poursuite solaire de l'héliostat.

Le diagnostic a porté sur l'héliostat 3.1 du champ solaire (Figure 2). Ce choix a été motivé par l'uniformité par le fait que tous les 20 héliostats du champ sont identiques. Par conséquent, les sources d'erreurs identifiées dans le fonctionnement de l'héliostat 3.1 seront typiquement valables pour les autres héliostats du champ. Tout d'abord, la conformité et la sûreté de fonctionnement de tous les composants de l'organe

de commande de l'héliostat ont été vérifiées. Les composants et câbles défectueux ont été remplacés. Un tableau peint en couleur blanche et gradué en dm a été placé devant le récepteur pour servir de cible d'étalonnage. Les miroirs de l'héliostat ont été nettoyés pour avoir une meilleure intensité de la concentration solaire, avant d'être réglés manuellement en superposant leur tache. La méthode adoptée consistait à mettre l'héliostat en marche et à procéder parallèlement au réglage en ayant un contrôle visuel de la tache focale sur la cible d'étalonnage [172]. Les rondelles et systèmes vis-écrou ont été utilisés pour compenser l'inclinaison des miroirs périphériques des réflecteurs par rapport aux miroirs centraux. Cette activité aura pris environ deux semaines (14 au 28 Janvier 2022) au rythme de trois à quatre miroirs par jour.

Après la mise en marche de l'héliostat, son fonctionnement était analysé de sorte à identifier toutes les sources d'erreur présentes. Les mêmes sources d'erreur de fonctionnement étaient constatées durant les deux mois. À la fin du diagnostic, ces sources d'erreur, reportées ci-après, ont donc été jugées responsables des contreperformances de suivi solaire de l'héliostat 3.1.

III.1. Instabilité de la grille entre les composants de l'héliostat

La grille de translation est maintenue d'une part par les six bras de l'héliostat avec des liaisons pivots et d'autre part, elle est également supportée par le chariot à travers une liaison rigide (Figure 33). Malgré ces liaisons, l'instabilité demeure en raison de plusieurs facteurs : les tolérances mécaniques dans les liaisons pivots, les vibrations générées lors du déplacement du chariot, ainsi que les déformations induites par sa flexibilité. Cette instabilité affecte l'inclinaison des réflecteurs et, par conséquent, agrandit la tache focale globale de l'héliostat. En effet, les périphéries de la grille sont à une hauteur inférieure par rapport à son centre. Ce qui fait que les neuf réflecteurs ont des inclinaisons légèrement différentes.

III.2. L'incurvation chronophage des miroirs pour une précision faible

Les miroirs des réflecteurs devraient être incurvés pour approximer une tache carrée de côté 0,33 m. Malgré les efforts déployés dans le réglage, au rythme de trois à quatre miroirs par jour, il était impossible d'obtenir une tache carrée de côté 0,33 m. En effet, les réflecteurs censés recevoir les miroirs n'ont pas tous le même angle en raison de l'instabilité de la grille. Donc, même si l'on installe uniquement les miroirs centraux, on n'obtient pas une tache carrée de 0,33 m, à moins qu'on varie la position de la grille jusqu'à obtenir toutes les taches bien superposées et ensuite maintenir cette position de la grille. Cependant, cette solution n'est pas viable à long terme en raison des ajustements fréquents nécessaires et de la difficulté à maintenir une configuration stable. Pour remédier à cela, il serait nécessaire de corriger l'instabilité de la grille ou d'adopter une méthode de fixation et de réglage des miroirs plus précise et flexible.

III.3. Insuffisance des couples moteurs

L'organe d'entraînement n'était capable de faire fonctionner l'héliostat qu'entre 11 h et 14 h lors des tests de suivi solaire. Au-delà de cette période, les deux moteurs pas-à-pas de couple 6,8 N·m n'étaient plus à même de déplacer le chariot en raison de l'augmentation de la charge mécanique due à l'oscillation de la grille (Figure 33). En effet, avant 11 h et au-delà de 14 h, pour que l'héliostat concentre sur le récepteur, la grille devrait se retrouver à une hauteur plus élevée qui demandait beaucoup plus de couple de la part des moteurs pas-à-pas. Cela provoquait une surcharge sur les moteurs, les rendant inefficaces pour assurer le suivi du soleil, causant ainsi la déviation de la tache focale de l'héliostat. Par conséquent, une adaptation ou un renforcement du système d'entraînement est nécessaire pour garantir un suivi solaire continu durant la disponibilité de la ressource solaire.

III.4. Existence de jeux entre les composants de l'héliostat

Les jeux entre les pièces mécaniques proviennent essentiellement des cornières de liaison utilisées pour assembler les différents composants de la structure de l'héliostat (Figure 33). Ces cornières, bien que robustes, présentent des tolérances mécaniques (Figure 35) qui entraînent des écarts entre les points de fixation. Ces écarts provoquent des jeux mécaniques pouvant créer des décalages de référence angulaire ou horaire (Tableau 3), réduisant ainsi la précision des mouvements de l'héliostat et altérant l'orientation des réflecteurs.



Figure 35: Cas de tolérances dimensionnelles des cornières de liaison (encerclées en rouge)

III.5. Liaisons pivot et rotule inappropriées

Les liaisons pivot et rotule de l'héliostat ont été réalisées localement avec des systèmes vis-écrou et cornière (Figure 36). Ces systèmes créent un frottement excessif nuisant à la flexibilité et à la liberté de rotation des cornières. Ces défauts réduisent la capacité de l'héliostat à suivre fidèlement le mouvement solaire et entraînent des erreurs dans l'orientation des réflecteurs.

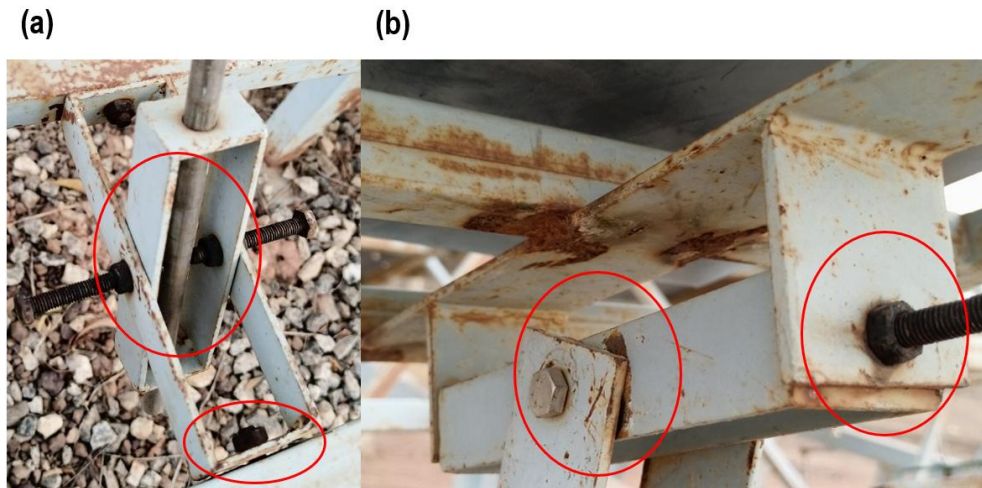


Figure 36: Présentation de a) la liaison pivot et b) la liaison rotule de l'héliostat réalisées avec des systèmes vis-écrou et cornières

IV. Approche méthodologique de correction des sources d'erreur identifiées

Seules deux des sources d'erreur identifiées ont été adressées, à savoir le réglage chronophage des miroirs pour peu de précision et l'insuffisance des couple-moteurs de l'organe d'entraînement. Les autres sources d'erreur identifiées nécessitent la reconstruction, voire la reconception, de l'héliostat [173]. Donc, elles n'ont pas été abordées. Les approches méthodologiques adoptées pour la correction des deux sources d'erreur adressées sont présentées dans cette section.

IV.1. Etude de la possibilité de fixation et de réglage flexible des miroirs

L'ancienne méthode de réglage des miroirs de l'héliostat multifacette était un travail pénible, très chronophage, et présentait surtout des erreurs, comme toutes les autres méthodes d'incurvation [115,116]. La possibilité de réglage instantané apporte davantage de flexibilité dans la superposition des taches de miroirs. Cette idée a conduit à la proposition d'un dispositif individuel de réglage des miroirs, illustré à la Figure 37. Puis, une étude de faisabilité technique du dispositif a été effectuée, suivie par sa réalisation. Ce dispositif permettrait des incurvations fines en temps réel à l'aide d'une liaison rotule entre les miroirs et les réflecteurs, réduisant ainsi les erreurs et augmentant la précision de superposition des taches.

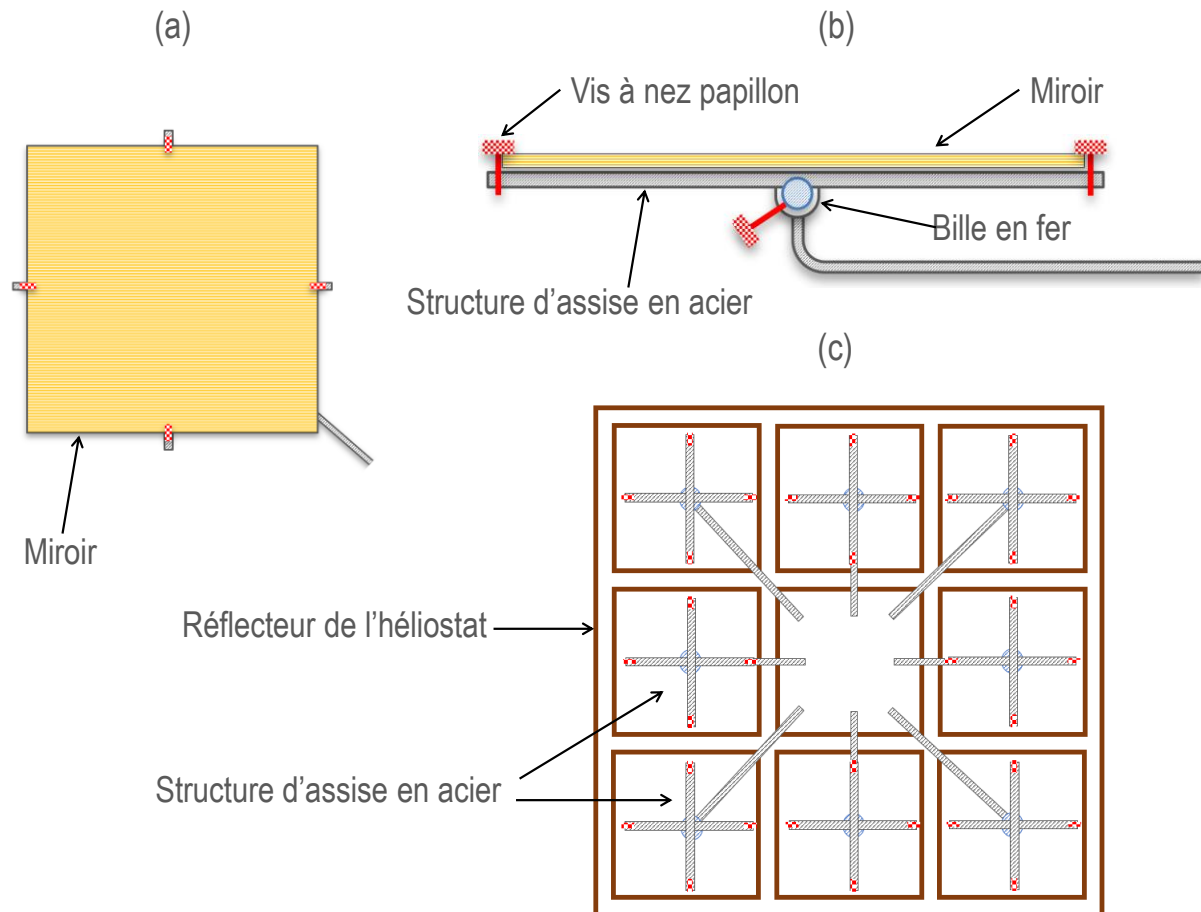


Figure 37: a) Vue de dessus et b) coupe transversale du dispositif individuel de réglage des miroirs, et c) vue de plusieurs dispositifs de réglage implantés sur un réflecteur de l'héliostat

IV.1.1. Etude de faisabilité technique du dispositif de réglage des miroirs

Le support d'assise doit recevoir un miroir de dimension $0,33 \text{ m} \times 0,33 \text{ m}$. Le "plus" du support d'assise peut être fait avec 2 bars plates en acier de longueur $0,35 \text{ m}$, de largeur $0,010 \text{ m}$ et d'épaisseur 5 mm , avec une vis en nez papillon de diamètre 4 mm au bout des 4 côtés du "plus" (Figure 37c). La liaison rotule se fait avec une sphère pleine dans une sphère creuse (Figure 37b). Une pièce de ce genre doit généralement être usinée pour l'application souhaitée, mais dans le contexte de cette étude, ce service n'est pas localement disponible. Par contre, les liaisons rotules sont disponibles dans certains objets qui peuvent être exploitées (Figure 38). Il s'agit des trépieds de caméra, des rétroviseurs de motos, des rétroviseurs et volants de voitures, etc. L'idée est de coupler le support d'assise à une rotule donnée et ensuite relier cette rotule à une tige. Un tube plein en acier a été choisi comme tige pour le dispositif de réglage. Il était important de vérifier que ce tube serait à même de supporter la charge constituée du miroir et le support d'assise. Si cette charge est plus élevée que la contrainte critique du tube, il y aura une torsion. L'équation (1) permet de vérifier le risque de torsion du tube. La limite d'élasticité de l'acier est de $235 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$.

$$F_{appliquée} \leq F_{critique} \quad (1)$$

Où

$$F_{critique}[N] = \text{Nuance de la tige} \times \text{Section de la tige}$$

$$F_{appliquée}[N] = \text{Poids du miroir} + \text{Poids du support d'assise}$$

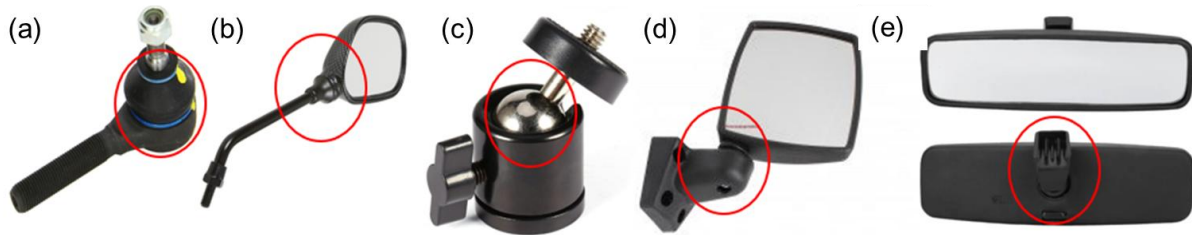


Figure 38: Rotule de a) la direction d'une voiture, b) du rétroviseur d'une moto, b) d'un trépied pour caméra, et d) d'un rétroviseur extérieur et e) intérieur de voiture.

IV.1.2. Réalisation du dispositif de réglage des miroirs

La réalisation du dispositif de réglage des miroirs a été préalablement expérimentée sur un seul réflecteur, et ensuite sur l'ensemble des réflecteurs de l'héliostat 3.1, sur la base du succès rencontré. Le choix de la rotule s'est porté sur celle des rétroviseurs de moto, en raison de sa disponibilité locale, de sa rigidité et de son coût relativement faible par rapport aux autres objets possédant des rotules. En outre, les rétroviseurs de motos endommagés sont abondamment disponibles dans la région, en raison de l'usage répandu des motos, facilitant ainsi l'accès à ce composant. Un autre avantage de ce choix est la possibilité d'obtenir une tige en acier déjà munie d'une petite sphère pleine, ce qui simplifie largement la construction du dispositif de réglage des miroirs. Le travail supplémentaire a consisté à la fabrication de la demi-sphère creuse capable de recevoir la petite sphère pleine du rétroviseur de moto. Le support d'assise a ensuite été soudé à la sphère creuse, puis le tout soudé sur le réflecteur à travers la tige en acier. Le dispositif est réalisé de sorte que le support d'assise ait un champ d'inclinaison de 0° à 180° suivant tous les sens.

IV.2. Vérification du dimensionnement des moteurs pas-à-pas de l'organe d'entraînement

La vérification du dimensionnement des moteurs pas-à-pas a pour objectif de s'assurer qu'ils répondent aux exigences d'entraînement de la structure de l'héliostat pendant la disponibilité de la ressource solaire. Par conséquent, les paramètres essentiels requis pour l'entraînement de l'héliostat ont été déterminés et ensuite comparés avec ceux des anciens moteurs pas-à-pas. Vu l'importance de l'étude, elle a d'abord été faite conformément au guide de dimensionnement "SureStep" [174] et ensuite à l'aide de l'outil de dimensionnement "Orientalmotor" [175]. Les résultats obtenus ont été comparés aux caractéristiques des anciens moteurs pas-à-pas pour analyser la cohérence. Les paramètres essentiels déterminés pour

l'entraînement de l'héliostat sont listés ci-après. Ils permettront de choisir les moteurs appropriés pour l'héliostat multifacette de CSP4Africa.

- La fréquence d'impulsions nécessaire à l'entraînement des réflecteurs de l'héliostat
- La vitesse-moteur nécessaire à l'entraînement des réflecteurs de l'héliostat
- La précision de positionnement du chariot
- Le couple moteur nécessaire à l'entraînement des réflecteurs de l'héliostat

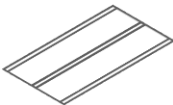
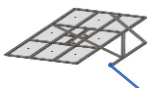
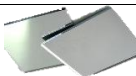
Les hypothèses de calcul sont présentées dans le Tableau 10. Ces paramètres ont été choisis pour représenter les conditions réelles de fonctionnement de l'héliostat. En particulier, la vitesse de déplacement du chariot pour l'azimut et l'élévation a été fixée en fonction des exigences de précision du suivi solaire pour l'héliostat multifacette [170]. Le pas de vis de 3 mm et l'avancement par tour correspondant sont les caractéristiques des axes de suivi solaire de l'organe d'entraînement. Le choix d'un angle de pas de $1,2^\circ$ pour le moteur, combiné à un rapport de transmission de 1, permet de maintenir un bon contrôle sur la rotation des moteurs pas-à-pas. L'efficacité relativement faible de la tige filetée, due à l'absence de roulements à billes [174], ainsi qu'un coefficient de frottement élevé entre les surfaces d'acier, ont également été pris en compte pour garantir que les moteurs soient dimensionnés pour compenser ces pertes mécaniques. Enfin, l'angle d'inclinaison de 30° reflète l'oscillation de la grille de l'héliostat autour du châssis et influence directement la force nécessaire pour déplacer le chariot en début et fin de suivi solaire.

Tableau 10: Hypothèses de calcul du dimensionnement des moteurs pas-à-pas

Paramètre	Unité	Valeur
Vitesse de déplacement du chariot (azimut)	$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	1
Vitesse de déplacement du chariot (élévation)	$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	0,3
Pas de vis	mm	3
Avancement de la vis	$\text{mm} \cdot \text{tour}$	3
Angle de pas prévu pour le moteur	$^\circ$	1,2
Rapport de transmission	(-)	1
Efficacité de la tige filetée (vis en acier sans bille)	(-)	20
Coefficient de frottement (acier sur acier)	(-)	1
Angle d'inclinaison de l'oscillation de la grille	$^\circ$	30

De l'ensemble des composants de l'héliostat, la charge à entraîner à travers le déplacement du chariot constitue principalement la grille, les six bras et les neuf réflecteurs et leurs miroirs (Figure 33). Cependant, d'autres composants interviennent également en fonction des deux chaînes de transmission de l'organe d'entraînement. La lumière est faite sur ces composants plus tard. La liste exhaustive de tous les composants (Figure 33), y compris leur masse, intervenant dans le dimensionnement des moteurs pas-à-pas est présentée dans le Tableau 11.

Tableau 11: Présentation des différents composants de l'héliostat intervenant dans le dimensionnement

Composant	Illustration	Masse (kg)
Coupleur		0,02
Barre de glissière		2,50
Support d'assise de la chaîne de transmission du moteur X		32
Tige filetée		6
Chariot		22
Grille		36
Bras		1,00
Réflecteur		7,50
Miroir		1,25
Cadre de liaison		0.25
Vis + écrou		0,005

IV.2.1. Modélisation des deux chaînes de transmission de l'organe d'entraînement

L'organe d'entraînement de l'héliostat multifacette a deux chaînes de transmission (Figure 33) : la première suivant l'axe est-ouest et la seconde suivant l'axe nord-sud. La Figure 39 présente la

modélisation de ces deux chaînes de transmission. Chacune d'entre-elles est principalement constituée d'un moteur, d'un coupleur, d'une tige filetée, et d'une charge. Toutefois, les charges diffèrent en fonction de la chaîne de transmission. La charge du moteur X, c'est-à-dire suivant l'azimut du soleil, est plus faible que celle du moteur Y suivant l'élévation du soleil. En effet, la charge du moteur Y est égale à la charge du moteur X plus celle du support d'assise de la chaîne de transmission du moteur X.

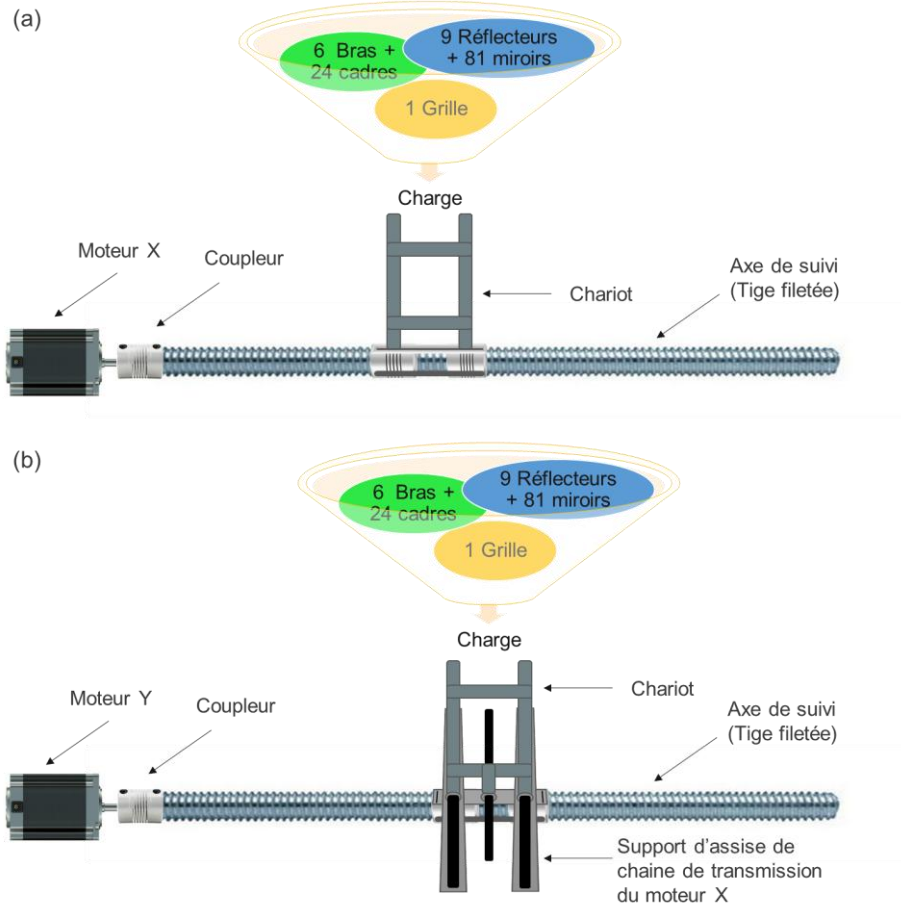


Figure 39: Présentation de la chaîne de transmission du a) moteur X et du b) moteur Y

IV.2.2. Besoins en impulsions de la charge

Les besoins en impulsion de la charge, également appelés “fréquence d’impulsions”, permet de choisir le contrôleur adéquat pour le moteur [174]. En effet, c’est le contrôleur qui envoie le nombre d’impulsions nécessaire pour que le moteur fasse un pas. Il est donc important que le contrôleur soit à même d’envoyer le besoin nécessaire en impulsions dans la période souhaitée, sinon un retard sera constaté dans la poursuite solaire. Les besoins en impulsion de la charge sont déterminés par l’équation (2) [174].

$$\text{Fréquence d'impulsions [Imp} \cdot \text{s}^{-1}] = \frac{\text{Vitesse de déplacement [mm} \cdot \text{s}^{-1}] \times \text{Résolution du motor [Pas} \cdot \text{tr}^{-1}]}{\text{Avancement de la vis [mm} \cdot \text{tr}^{-1}]} \quad (2)$$

IV.2.3. Vitesse-moteur nécessaire

Ici, nous avons deux profils de déplacement de faible vitesse pour le chariot (Tableau 10), à raison de $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ suivant l'azimut et de $0,3 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ suivant l'élévation (Tableau 10). De plus, le déplacement du chariot est de type "Start-Stop" [174], ce qui veut dire qu'il n'y a pas de période d'accélération ni de décélération. L'équation (3) [174] permet de déterminer la vitesse-moteur du profil de déplacement "Start-Stop". Les résultats issus de cette équation correspondront aux vitesses minimales requises par les moteurs pas-à-pas à choisir.

$$\text{Vitesse moteur } [\text{tr} \cdot \text{mn}^{-1}] = \frac{\text{Vitesse de déplacement } [\text{mm} \cdot \text{mn}^{-1}]}{\text{Avancement de la vis } [\text{mm} \cdot \text{tr}^{-1}]} \quad (3)$$

IV.2.4. Précision de positionnement

La précision de positionnement permet d'avoir une idée du déplacement effectué par la charge en fonction du pas de moteur [174]. Elle se détermine par l'équation (4) [174]. Lors du choix du moteur, l'attention sera accordée à l'incertitude du pas angulaire pour qu'il ne nuise pas à la précision de positionnement de la charge.

$$\text{Précision de positionnement } [\text{mm} \cdot \text{pas}^{-1}] = \frac{\text{Avancement de la vis } [\text{mm} \cdot \text{tr}^{-1}]}{\text{Résolution du motor } [\text{Pas} \cdot \text{tr}^{-1}]} \quad (4)$$

IV.2.5. Couple-moteur nécessaire

Le couple-moteur nécessaire résulte de deux forces [174], à savoir la force de maintien et la force d'entraînement de la charge. Quant à la force de maintien, c'est elle qui permet de garder la charge à une position statique lorsque le moteur est à l'arrêt. Par contre, la force d'entraînement est la force nécessaire à la mise en mouvement de la charge. Le couple moteur nécessaire correspond à la somme des couples résultants des deux forces précédentes, à savoir le couple de maintien et le couple d'entraînement, et est déterminé par l'équation (5) [174]. F_g [N] est la force supplémentaire résultant de l'oscillation de la grille ; F_f [N] est la force de friction résultant du déplacement du chariot ; F_c [N] est la force résultant de la charge à entraîner ; m_c [kg] est la masse de la charge ; μ est le coefficient de frottement ; θ est l'angle d'inclinaison résultant de l'oscillation ; et g [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$] est l'accélération due à la gravité. Le couple de précharge est pris en compte en maximisant le coefficient de frottement à 1.

$$\text{Couple moteur } [\text{N} \cdot \text{m}] = \frac{\frac{(F_{osc} + F_f + F_c) \times \text{Pas de vis}}{2\pi \times \text{Efficacité}_{t\grave{e}ge}} + \text{Couple de précharge}}{\text{Rapport de transmission}^2} \quad (5)$$

Où

$$F_{osc} [\text{N}] = m_c \times g \times \cos(\theta)$$

$$F_f [N] = m_c \times g \times \mu$$

$$F_c [N] = m_c \times g$$

IV.3. Tests de suivi solaire

Après les améliorations apportées dans le fonctionnement de l'héliostat multifacette, des tests de suivi solaire ont été réalisés pour situer la période de fonctionnement journalière de l'héliostat dans l'année. Ces tests ont été effectués de juin 2023 à février 2024. Lors de ces tests, la concentration de l'héliostat était faite sur un tableau peint en couleur blanche (gradué en décimètre) de dimensions 1 m × 1 m qui a été placé devant le récepteur de la microcentrale CSP4Africa. La tache focale de l'héliostat était filmée à l'aide d'une caméra pour suivre son évolution lors de ces tests.

V. Résultats et discussion

V.1. Mise en œuvre des dispositifs de fixation et de réglage flexible des miroirs

Les dispositifs de fixation et de réglage ont pu être construits conformément à l'agencement proposé à la Figure 37. Des rétroviseurs de moto ont été choisis pour la construction de ces dispositifs. Les miroirs des rétroviseurs ont été enlevés. Il ne restait plus que les tiges courbées des rétroviseurs, avec leur petite sphère pleine au bout. Les tiges ont été redressées pour avoir une longueur d'environ 0,23 m. Ensuite, des demi-sphères creuses, taraudées pour qu'elles soient à même de recevoir des vis à nez papillon, ont été emplies à l'aide des sphères pleines des tiges de rétroviseurs redressées. Les vis à nez papillon pouvaient ainsi immobiliser la position des rotules à n'importe quel moment. Par la suite, les supports d'assise ont tout simplement été soudés au bout des demi-sphères creuses, finalisant ainsi la construction des dispositifs de réglage.

Pour le reste, il était question d'implémenter les dispositifs de réglage sur les neuf réflecteurs de l'héliostat 3.1 (Figure 40a), puis procéder à la superposition des taches. La superposition des taches de l'héliostat a été effectuée en installant d'abord les miroirs centraux des réflecteurs (Figure 40b), puis les miroirs périphériques. À l'aide des dispositifs de réglage, les miroirs périphériques pouvaient facilement être réglés en superposant leur tache avec celle des miroirs centraux (Figure 40c).

Les dispositifs de réglage ont démontré leur capacité à permettre des incurvations précises et flexibles, améliorant considérablement la superposition des taches des miroirs. Cinq miroirs ont pu être installés et réglés en moins de 1 h de temps sur un réflecteur (Figure 40d), alors que cette activité aurait pris 8 h avec l'ancienne méthode de réglage. Ces résultats indiquent que l'intégration des dispositifs de réglage flexible améliore non seulement l'efficacité du processus d'incurvation, mais également la précision de la concentration solaire.

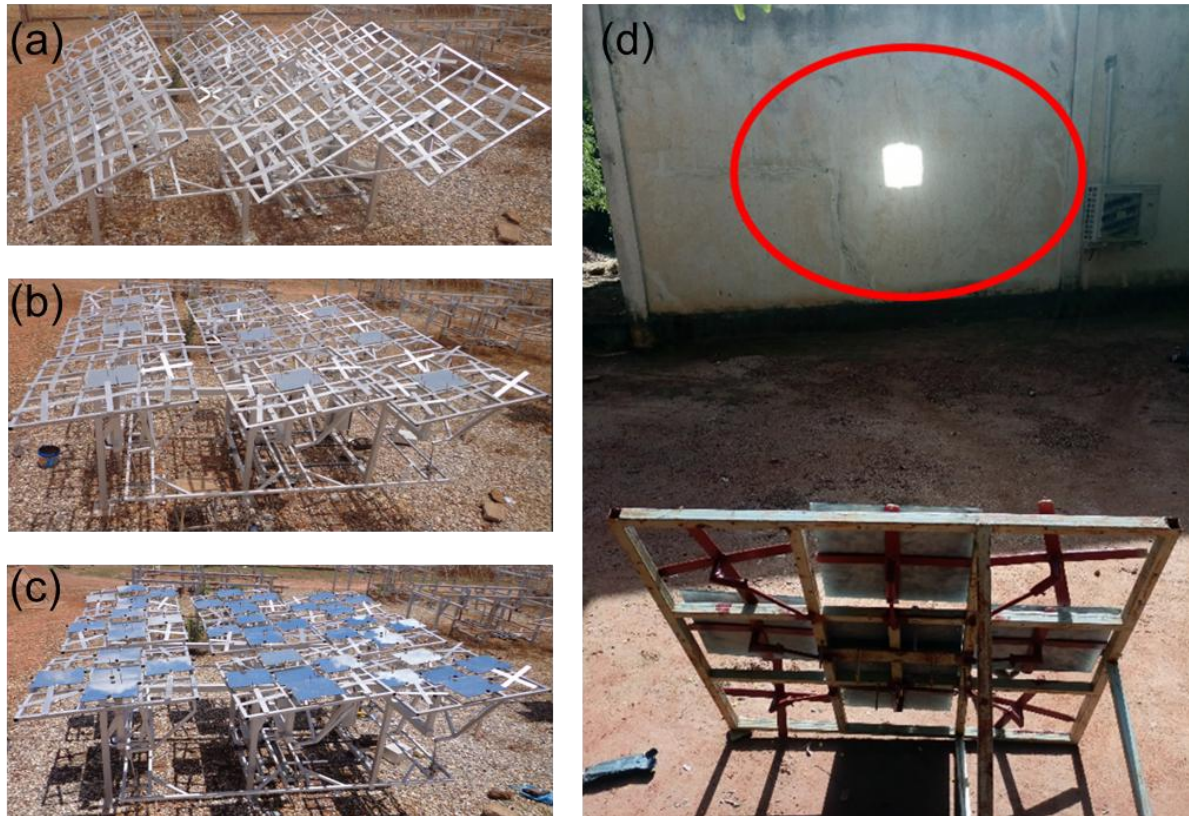


Figure 40: a) Implémentation des dispositifs de fixation sur les réflecteurs ; b) fixation des miroirs centraux des réflecteurs ; c) miroirs périphériques réglés sur l'héliostat ; d) cinq miroirs installés et réglés sur un réflecteur avec concentration précise

V.2. Dimensionnement des moteurs pas-à-pas de l'organe d'entraînement

Le Tableau 12 présente les spécifications techniques des anciens moteurs pas-à-pas, ainsi que les résultats du dimensionnement entrepris conformément au guide "SureStep" et à l'aide de l'outil "Orientalmotor". Le rapport détaillé du dimensionnement effectué à l'aide de l'outil "Orientalmotor" est présenté à l'Annexe A.

Les anciens moteurs pas-à-pas présentaient une insuffisance significative au niveau du couple nécessaire pour entraîner efficacement les réflecteurs. Le couple maximal fourni par ces moteurs était de $6,8 \text{ N}\cdot\text{m}$, bien en deçà des besoins réels calculés lors de cette étude. En effet, les calculs cinématiques effectués montrent que le couple nécessaire pour entraîner les réflecteurs dans le cas du moteur X est de $12,30 \text{ N}\cdot\text{m}$, tandis que pour le moteur Y, il est de $14,20 \text{ N}\cdot\text{m}$. Ces résultats indiquent clairement que les anciens moteurs n'étaient pas adaptés à l'application souhaitée, créant ainsi des difficultés pour assurer l'entraînement des réflecteurs en dehors de la plage horaire comprise entre 11 h et 14 h, lors des tests de suivi solaire effectués entre le 27 janvier 2022 et le 3 avril 2022.

Tableau 12: Récapitulation des résultats de redimensionnement des moteurs pas-à-pas de l'organe d'entraînement

Paramètre	Unité	Spécifications techniques des anciens moteurs		Redimensionnement conformément au guide "SureStep"		Redimensionnement à l'aide de l'outil "Orientalmotor"	
		Moteur X	Moteur Y	Moteur X	Moteur Y	Moteur X	Moteur Y
Fréquence d'impulsions	Imp·s ⁻¹	200	200	67	20	-	-
Vitesse moteur	tr·min ⁻¹	20	4	20	4	20	4
Précision de positionnement	mm·Pas	0,015	0,015	0,010	0,010	0,010	0,010
Couple nécessaire	N·m	6,8	6,8	12,30	14,20	13,05	14,35

Les autres paramètres dimensionnés ne présentaient pas de différences significatives pouvant impacter la précision de suivi solaire de l'héliostat. La fréquence d'impulsions élevée de 200 Imp·s⁻¹ est la capacité maximale d'impulsions que les anciens moteurs étaient à même de délivrer, tandis que celles de 67 Imp·s⁻¹ et 20 Imp·s⁻¹, dimensionnées respectivement pour le moteur X et le moteur Y, sont celles requises pour le suivi solaire précis de l'héliostat.

L'outil "Orientalmotor" a permis d'obtenir un couple légèrement différent, mais cohérent avec celui obtenu conformément au guide "SureStep", assurant ainsi une validation croisée des calculs. Pour le moteur X, l'outil propose un couple de 13,05 N·m, et pour le moteur Y, un couple de 14,35 N·m. Ces valeurs sont similaires à celles calculées conformément au guide "SureStep", ce qui renforce la fiabilité des résultats obtenus. De plus, les vitesses de rotation des moteurs calculées avec cet outil sont également similaires avec celles du dimensionnement effectué conformément au guide "SureStep", 20 tr·mn⁻¹ pour le moteur X et 4 tr·min⁻¹ pour le moteur Y. Ces paramètres confirment bien que les moteurs proposés par "Orientalmotor" respectent également les exigences d'entraînement des réflecteurs de l'héliostat.

Par ailleurs, le couple plus élevé du moteur Y (Tableau 12), comparé à celui du moteur X, se justifie par la configuration spécifique des deux chaînes de transmission de l'héliostat multifacette. En effet, la charge entraînée par le moteur X est relativement faible, car elle ne comprend que la résistance générée par les réflecteurs avec les miroirs, les bras et la grille. En revanche, la charge du moteur Y est plus importante, car elle inclut, en plus de la charge du moteur X, celle du support d'assise de la chaîne de transmission du moteur X, ce qui explique pourquoi il nécessite un couple plus élevé.

Toutefois, la vitesse de suivi du moteur X est plus élevée que celle du moteur Y en raison des exigences spécifiques du mouvement en azimut (Tableau 10). Le moteur X doit ajuster la position des réflecteurs sur l'axe est-ouest, qui correspond au déplacement quotidien du soleil à travers le ciel. Ce mouvement

est plus rapide et nécessite des corrections plus fréquentes pour maintenir la tache focale sur le récepteur. Par conséquent, le moteur X est dimensionné pour fonctionner à une vitesse plus élevée afin de permettre ces ajustements réguliers et rapides. En revanche, le moteur Y, qui contrôle le mouvement en élévation sur l'axe nord-sud, doit faire face à des variations moins fréquentes et plus progressives, car le changement de la hauteur du soleil est très lent au cours d'une journée.

Au terme du dimensionnement, les anciens moteurs pas-à-pas ont été remplacés par des nouveaux moteurs pas-à-pas fonctionnant en boucle fermée, de pas angulaire 1,2 ° et de couple 16 N·m (voir les spécifications techniques dans le Tableau 13). La fiche technique de ces moteurs identiques est présentée à l'Annexe B.

Tableau 13: Spécifications techniques des nouveaux moteurs pas-à-pas choisis pour l'héliostat multifacette [176]

Paramètre	Unité	Valeur
Couple	N·m	16
Pas angulaire	°	1,2
Tension d'alimentation	VAC	80–230
Courant	A	6,4
Classe de protection		IP55

V.3. Tests de suivi solaire après les améliorations

Les tests de suivi solaire conduits après les améliorations apportées dans le fonctionnement de l'héliostat avaient pour objectif de situer la période de fonctionnement de l'héliostat sur une année. Les tests ont été effectués sur plusieurs jours entre juin 2023 et février 2024. La séquence d'images du test conduit le 8 aout 2023 est présentée à la Figure 41 à titre illustratif. Les séquences d'images des autres tests sont présentées à l'Annexe C. Lors de ces tests, même s'il était possible de régler efficacement tous les miroirs de façon flexible en une journée, il était toutefois difficile d'obtenir une tache focale carrée de 0,33 m de côté en raison de l'instabilité de la grille, qui faisait que les réflecteurs n'avaient pas le même angle.



Figure 41: Séquence d'images de la tache focale pendant le test de suivi solaire conduit le 08 Aout 2023.

Les tests de suivi solaire (Annexe C) ont montré que l'héliostat multifacette est maintenant à même de fonctionner dans la plage de fonctionnement de la microcentrale CSP4Africa [17], qui est de 9h30 à 14h30. Notamment, la plus longue période de fonctionnement de l'héliostat a été observée dans le mois d'août (Figure 41). Cela s'explique par la trajectoire du soleil par rapport à Ouagadougou. En effet, dans le mois d'août, pour que l'héliostat respecte la loi de la réflexion de Snell-Descartes (Figure 5), Il n'y a pratiquement pas de mouvement suivant l'élévation, réduisant drastiquement la charge à entraîner.

VI. Exploration d'une piste alternative : conception et test d'un héliostat piédestal avec capteur de suivi solaire en boucle fermée

Compte tenu des limites observées avec l'héliostat multifacette, notamment dues aux erreurs de poursuite solaire et à l'instabilité de la grille, une piste alternative basée sur un héliostat piédestal a été explorée parallèlement aux efforts de correction sur l'héliostat multifacette. Cette approche, développée en collaboration avec deux étudiants de master [177,178], Kokou Florent YIBOKOU et Dimeba Osnoun Mubarak OUEDRAOGO, sous l'encadrement du doctorant, repose essentiellement sur l'utilisation de matériaux et d'équipements accessibles localement et s'appuie sur les conclusions de l'étude bibliographique sur la boucle fermée.

Comme présenté au chapitre 1, l'héliostat piédestal est le modèle le plus simple d'héliostat et le plus couramment utilisé dans les grandes ($\geq 50 \text{ MW}_{\text{el}}$) centrales solaires commerciales [47]. Il est généralement composé de quatre principaux composants : (i) la structure de support des miroirs, (ii) l'organe d'entraînement, (iii) le piédestal lui-même, et (iv) l'organe de commande (Figure 5). L'objectif du travail était de concevoir, construire et tester un héliostat piédestal intégrant une approche de suivi en boucle fermée, capable de maintenir la concentration du rayonnement solaire sur le récepteur avec une précision accrue. Un rendu plus détaillé du travail est fourni à l'Annexe D.

Le principe de suivi solaire adopté ici est basé sur un capteur light dependent resistor (LDR) à quatre quadrants. Le capteur est placé sur le chemin de la tache focale, comme illustré à la Figure 42. Ses quatre LDRs font face à la tache focale de l'héliostat et sont couverts par un masque frontal. L'héliostat concentre sa tache focale sur la zone cible du récepteur si les quatre LDRs du capteur sont ombragés par le masque frontal (Figure 43a), sinon, au moins un des quatre LDRs délivrera un signal parce qu'il est illuminé (Figure 43b). En comparant le signal délivré par les LDRs, la position de l'héliostat peut être réajustée en redirigeant sa tache focale vers la zone cible du récepteur (Figure 43c). Ce principe de suivi solaire peut être considéré comme une boucle fermée, car l'organe de commande pilote l'organe d'entraînement en vérifiant activement si la tache focale se trouve réellement sur la zone cible du récepteur. Les LDRs des quadrants impairs (1 et 3) suivent l'élévation du soleil, tandis que les LDRs des quadrants pairs (2 et 4) suivent l'azimut du soleil. La différence entre les signaux délivrés par les LDRs des quadrants impairs est notée LDRs1-3 , tandis que celle des quadrants pairs est notée LDRs2-4 . La tache focale de l'héliostat est focalisée sur le récepteur si et seulement si les deux différences LDRs1-3 et LDRs2-4 se trouvent dans leur plage de référence $[\text{B}_{\text{ref}}, \text{H}_{\text{ref}}]$, ce qui traduit également que les 4 LDRs du capteur sont ombragés par le masque frontal, comme mentionné précédemment.

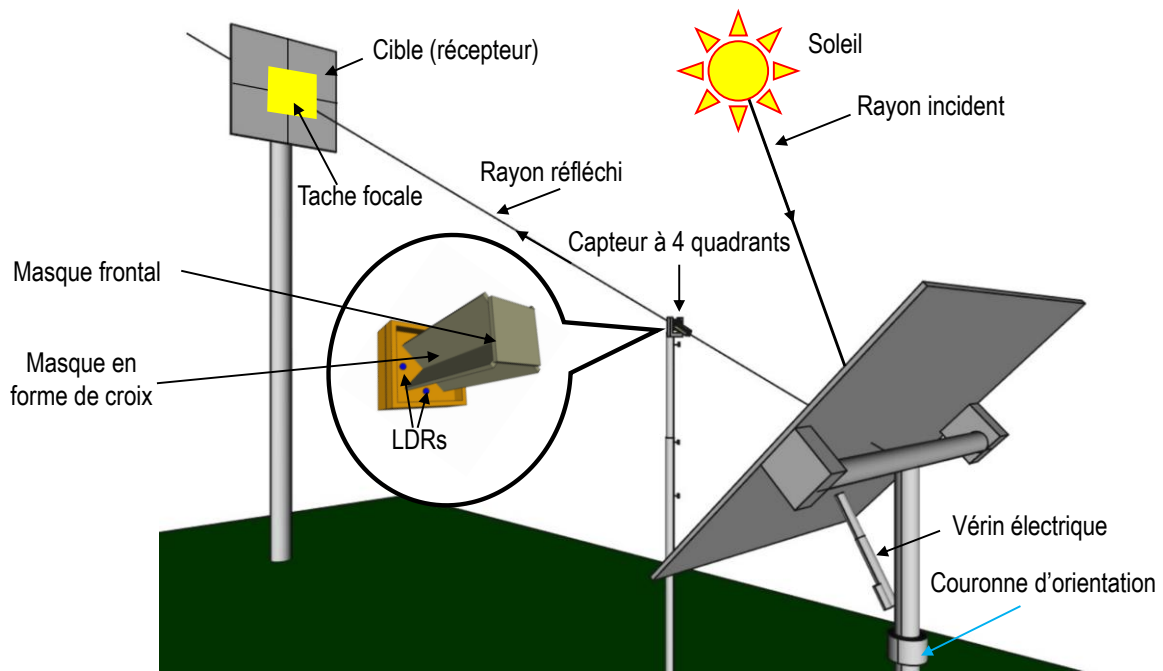


Figure 42: Illustration du principe de suivi solaire mis en place

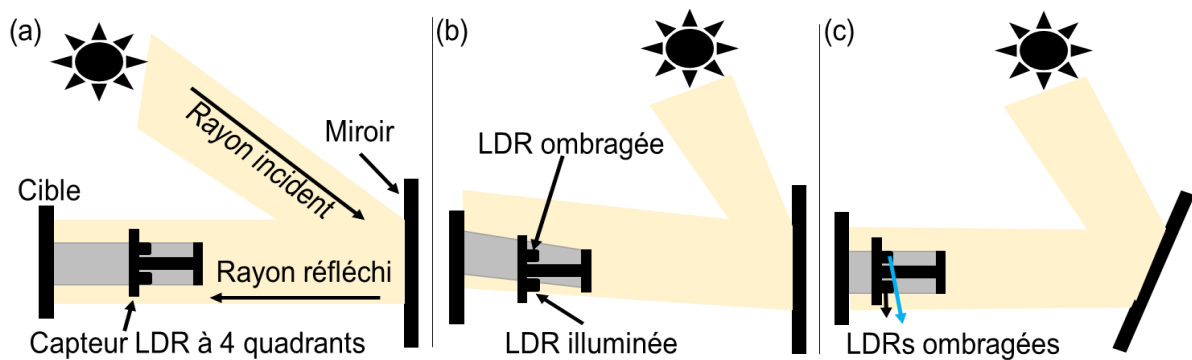


Figure 43: Illustration du capteur LDR à quatre quadrants a) ombragé par le masque frontal, b) partiellement illuminé par la tache focale, et c) à nouveau ombragé par le masque frontal après correction de l'orientation de l'héliostat.

Tous les composants de l'héliostat ont été construits localement avec la main d'œuvre locale. Les LDRs du capteur de boucle fermée ont été installés sur un circuit imprimé et le tout placé dans une petite boîte imprimée en 3D. Le masque frontal et le masque en forme de croix ont tous été fabriqués à partir de carton rigide. L'organe de commande de l'héliostat avec son capteur LDR à quatre quadrants est présenté à la Figure 44.

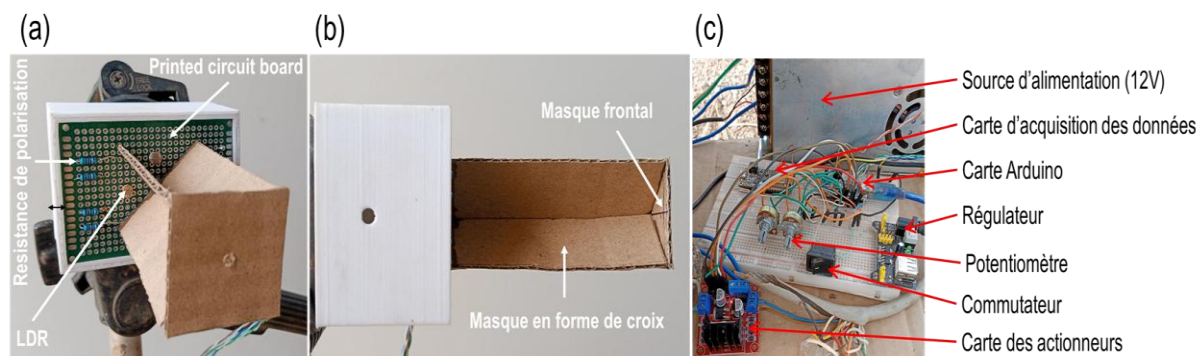


Figure 44: Capteur LDR à quatre quadrants en a) perspective et b) vue de face, et c) l'organe de commande de l'héliostat

Après l'assemblage des composants, l'héliostat a été installé sur la plateforme CSP4Africa. Des tests de suivi solaire ont été réalisés pour évaluer la capacité de l'héliostat piédestal conçu à maintenir sa tache focale dans la zone cible du récepteur pendant la période d'avril à juin 2023 [179,180]. Durant les tests, la concentration de l'héliostat était faite sur un tableau en bois (gradué en décimètre) pour une distance focale de 5 m. Même si des déviations de $\pm 0,1$ m ont été observées, la tache focale de l'héliostat piédestal est principalement restée concentrée sur la cible (Figure D.14 à Figure D.17 respectivement pour les tests réalisés les 16, 17, 23 et 24 mai 2023).

Par ailleurs, pendant les tests de suivi solaire, il a été constaté que les taches des miroirs se dispersaient légèrement et de manière continue alors que les miroirs restaient parfaitement incurvés. Les bords de certaines taches étaient même visibles à la fin du test de suivi solaire (Figure D.18b), alors que toutes les taches des miroirs étaient rigoureusement superposées au début du suivi solaire (Figure D.18a).

Les erreurs de suivi solaire observées varient en fonction des jours de test et restent inférieures à 1° pendant les tests réalisés. Cette variation peut être attribuée à la précision de calibration du capteur de boucle fermée, car la même précision de calibration du capteur de boucle fermée n'a pas pu être obtenue tous les jours, en raison du fait que l'organe de commande devrait être démonté à la fin de chaque test de suivi et remonté juste avant le début du test de suivi suivant.

VII. Conclusion

La technologie d'héliostat multifacette, faisant l'objet de ce présent chapitre, est l'une des innovations majeures du projet CSP4Africa. Dans cette étude, nous avons entrepris un diagnostic consistant à analyser le principe de fonctionnement de cette technologie d'héliostat dans l'optique de corriger ses sources d'erreur, l'objectif étant d'améliorer la poursuite solaire du modèle pilote existant sur le site de la microcentrale. Le diagnostic a mis en évidence cinq principales sources d'erreur (l'instabilité de la grille entre les composants, l'incurvation des miroirs, l'insuffisance des couple-moteurs, les jeux de liaison et les liaisons pivot et rotule inappropriées) en lien avec la structure mécanique, l'organe d'entraînement et l'incurvation des miroirs de l'héliostat. Les corrections ont consisté d'une part à remplacer les moteurs pas-à-pas de l'organe d'entraînement, suite aux résultats de l'étude de cinématique qui ont mis en évidence que les anciens moteurs pas-à-pas n'avaient pas le couple requis pour l'application de suivi solaire souhaitée. D'autre part, un dispositif de fixation et de réglage flexible des miroirs a également été proposé et mis en œuvre sur l'héliostat sur la base d'une étude de faisabilité. Bien qu'elles n'aient pas été abordées, les autres sources identifiées, l'instabilité de la grille entre les composants, les jeux de liaison et les liaisons pivot et rotule inappropriées, ne peuvent être corrigées qu'en reconstruisant rigoureusement l'héliostat. Toutefois, l'instabilité de la grille reste une source d'erreur inquiétante qui nécessite de profondes réflexions pouvant conduire à une modification de la structure de l'héliostat.

Après les corrections, des tests ont été réalisés entre juin 2023 et février 2024, pour évaluer les améliorations apportées. Ces tests ont montré que l'héliostat pourra désormais fonctionner dans la période de fonctionnement de la microcentrale CSP4Africa, qui s'étend de 9h30 à 14h30. De plus, lors de ces tests, des précisions de focalisation prometteuses ont été observées, avec des déviations plus ou moins inférieures 0,2 m. Toutefois, même s'il était possible de régler efficacement tous les miroirs de façon flexible, il était difficile d'obtenir la forme de tache focale prévue en raison de l'instabilité de la grille qui faisait que tous les réflecteurs de l'héliostat ne présentaient pas les mêmes angles d'inclinaison.

Parallèlement à ces efforts de correction sur l'héliostat multifacette, un héliostat piédestal avec son capteur de suivi solaire en boucle fermée a été conçu, construit et testé. Les tests de suivi solaire ont été réalisés pendant quatre jours au mois de mai pour évaluer la capacité de l'appareil avec son capteur de boucle fermée à garder la tache focale à l'intérieur du cercle cible pendant la période de fonctionnement de la microcentrale CSP4Africa. Des résultats satisfaisants ont été obtenus avec une erreur de suivi solaire inférieure à 1° pour une distance focale de 5 m. Cependant, des tests de suivi solaire sur une année complète dans différentes positions du champ à distance focale plus grande, sont encore nécessaires pour valider le principe de suivi solaire proposé et conclure sur la potentialité de l'héliostat piédestal conçu à résoudre le défi de la concentration solaire sur la microcentrale CSP4Africa.

Chapitre 3 : Etude expérimentale des huiles des graines de *Lannea microcarpa* et *Lannea kerstingii* pour leur utilisation comme fluide de transfert et de stockage thermique pour la microcentrale solaire CSP4Africa

I. Introduction

Dans un contexte mondial où la transition vers des pratiques industrielles plus durables et respectueuses de l'environnement est devenue impérative, l'intérêt pour des alternatives écologiques dans divers secteurs industriels, en particulier les systèmes de stockage d'énergie et de transfert de chaleur, ne cesse de croître. Traditionnellement dominés par les huiles minérales et synthétiques, les fluides caloporteurs et les matériaux de stockage thermique voient désormais émerger une alternative prometteuse et respectueuse de l'environnement : les huiles végétales [21,23,148,149,151,152].

Les huiles végétales offrent plusieurs avantages qui les rendent attrayantes dans les applications de transfert et de stockage thermique. Tout d'abord, leur origine renouvelable les distingue des huiles minérales et synthétiques, souvent dérivées des sources non renouvelables telles que le pétrole [181,182]. Cette caractéristique leur confère un avantage indéniable sur le plan environnemental, réduisant ainsi l'empreinte carbone des processus industriels qui les utilisent. De plus, les huiles végétales sont biodégradables, ce qui minimise leur impact sur l'environnement en cas de fuite ou de déversement accidentel [23]. Cette biocompatibilité peut également être un facteur déterminant dans certaines industries, telles que l'alimentaire ou la pharmaceutique, où la sécurité des produits est primordiale. En termes de performances, les huiles végétales possèdent des propriétés similaires et souvent meilleures que celles des fluides caloporteurs traditionnels [148,150]. Par conséquent, elles peuvent donc rivaliser avec-eux. En outre, les propriétés d'intérêt (Figure 31) des huiles végétales comme fluides caloporteurs peuvent être ajustées pour répondre aux exigences spécifiques d'un processus industriel en faisant usage des nanoparticules [183,184], ce qui fait également d'elles une option adaptable.

Cependant, l'utilisation des huiles végétales comme fluides caloporteurs ou de stockage thermique présente également des défis. Les huiles végétales s'oxydent facilement à des températures élevées lorsqu'elles sont en contact avec l'oxygène, l'eau ou tout autre matériau incompatible, ce qui entraîne des modifications de leurs propriétés d'intérêt pour les applications de transfert ou de stockage thermique [160,185–187]. La capacité des huiles végétales à résister aux changements permanents de leurs propriétés à température élevée est appelée stabilité thermique [154]. Il est essentiel d'évaluer la stabilité thermique de toute huile végétale destinée à être utilisée à des fins de transfert ou de stockage thermique à moyenne et haute température, d'où l'importance de cette étude. L'huile de graines de *Lannea microcarpa* (LaMSO) et L'huile de graines de *Lannea kerstingii* (LaKSO) font partie d'un groupe d'huiles végétales non comestibles, y compris l'huile brute de *Jatropha curcas* (JaCCO) [21], et l'huile raffinée de *Jatropha curcas* (RJCO) [23], qui ont été identifiées comme des candidates potentielles pour des applications de transfert ou de stockage thermique dans le cadre du projet CSP4Africa [17]. En réalité,

LaMSO et LaKSO ont été identifiées comme des huiles potentiellement comestibles [169,188,189], mais ne sont actuellement pas consommées par la population. Par conséquent, ces deux huiles sont classées comme des huiles non conventionnelles [169,188]. Le potentiel de JaCCO et RJCO en tant qu'agents thermiques a déjà été investigué dans les travaux antérieurs [21,23]. Ce chapitre examine les propriétés thermophysiques et les performances thermiques de LaMSO et LaKSO pour les applications de stockage thermique, dans le but d'évaluer leur aptitude à être utilisées comme fluides caloporteurs ou de stockage thermique pour des microcentrales CSP (Figure 31), en particulier à des températures inférieures à 210 °C. L'objectif est de comprendre le comportement thermique de ces deux huiles et leur capacité à répondre aux critères de sélection (Figure 31). La température de 210 °C est justifiée par la température maximale de fonctionnement de la microcentrale CSP4Africa. Toutefois, l'utilisation de ces huiles ne se limite pas qu'aux applications CSP, mais englobe également tout processus industriel nécessitant un fluide caloporteur ou de stockage à des températures allant jusqu'à 210 °C.

II. Description botanique et écologique des 2 espèces d'arbre du même genre

II.1. *Lannea microcarpa*

Lannea microcarpa (Figure 45), communément appelé raisinier sauvage, est un arbre de taille moyenne appartenant à la famille des anacardiées et répandu principalement en Afrique de l'Ouest, dans les régions sahéliennes et soudaniennes [190]. Il peut atteindre 15 m de haut, avec un tronc recouvert d'écorces fissurées de couleur grisâtre [190]. Ses feuilles, alternes et composées imparipennées, se distinguent par la présence de 2 à 4 paires de folioles opposées, mesurant jusqu'à 25 cm de long [190]. Les fleurs, petites et regroupées en inflorescences terminales ou axillaires en panicules, sont de couleur jaunâtre à 4 pétales, atteignant 4 mm de diamètre [190]. Ces fleurs, souvent unisexuées, sont dioïques, avec des étamines proéminentes chez les mâles. La floraison et la fructification de *Lannea microcarpa* ont lieu en fin de saison sèche (entre mai et juin), plutôt avant l'apparition des premières feuilles [190]. Les fruits de *Lannea microcarpa* sont des drupes globuleuses ou ovoïdes, mesurant environ 1,4 cm de diamètre [190]. À maturité, ces fruits passent du vert au rouge et contiennent une seule graine, riche en matière grasse [168]. Sur le plan écologique, *Lannea microcarpa* joue un rôle crucial dans son environnement. Il sert d'abri et de nourriture à diverses espèces animales, notamment pendant la saison sèche. Ses fruits sont consommés par les oiseaux et les mammifères [191], qui contribuent ainsi à la dispersion des graines. De plus, ses feuilles peuvent être utilisées comme fourrage pour le bétail. Les interactions avec les humains sont également significatives, puisque les fruits de *Lannea microcarpa* sont comestibles et que les graines sont une source d'huile utilisée traditionnellement dans la cosmétique [168]. L'écorce de cet arbre est souvent utilisée en médecine traditionnelle [192,193] pour traiter les infections, les troubles digestifs, les maladies respiratoires, etc. Bien que l'huile des graines de *Lannea*

microcarpa (LaMSO) puisse potentiellement servir d'huile comestible [168,169,188], elle est considérée comme une huile non conventionnelle et n'est pas couramment consommée par la population [169,188].



Figure 45: Présentation de a) *Lannea microcarpa* et b) ses fruits

II.2. *Lannea kerstingii*

Lannea kerstingii (Figure 46), parfois confondu avec *Lannea microcarpa* (Annexe E), est aussi un arbre de la famille des anacardiées et répandu principalement en Afrique de l'Ouest dans les régions soudanaises [190]. *Lannea kerstingii* peut atteindre 12 m de haut, avec un tronc court et recouvert d'écorces lisses ou légèrement fissurées de couleur grisâtre [190]. Les feuilles de *Lannea kerstingii* sont alternes et composées imparipennées, avec 2 à 6 paires de folioles opposées, mesurant jusqu'à 25 cm de long [190]. Les folioles sont glabres, avec des marges entières et une texture coriace par rapport à celles de *Lannea microcarpa*. Les fleurs, généralement unisexuées, sont regroupées en panicules terminales ou axillaires et composées de 4 pétales, atteignant 4 mm de diamètre et dégageant une légère odeur [190]. Les arbres de *Lannea kerstingii* sont dioïques, avec des fleurs mâles et femelles présentes sur des individus séparés [189]. La floraison et la fructification de *Lannea kerstingii* ont également lieu en fin de saison sèche (entre mai et juin), avant l'apparition des premières feuilles [190]. Les fruits sont des drupes globuleuses à ovoïdes, mesurant environ 1,3 cm de diamètre [190]. À maturité, les fruits prennent une couleur pourpre foncé et contiennent une seule graine, riche en matière grasse [189]. Les fruits de *Lannea kerstingii* sont consommés par les oiseaux et les mammifères [194], qui contribuent à la dispersion des graines. *Lannea kerstingii* est également d'une grande importance pour les populations locales. Les fruits sont consommés localement, bien qu'ils soient moins prisés que ceux de *Lannea microcarpa*. Les deux arbres sont pratiquement utilisés pour les mêmes applications (médecine traditionnelle, fourrage pour le bétail, teinture, etc.) et les huiles extraites de leurs graines peuvent potentiellement servir d'huiles alimentaires [169,188,189], mais ne sont actuellement pas consommées par la population [169,188]. Par

conséquent, LaMSO et LaKSO, sont considérées comme des huiles non conventionnelles parmi tant d'autres dans le Sahel [169,188].

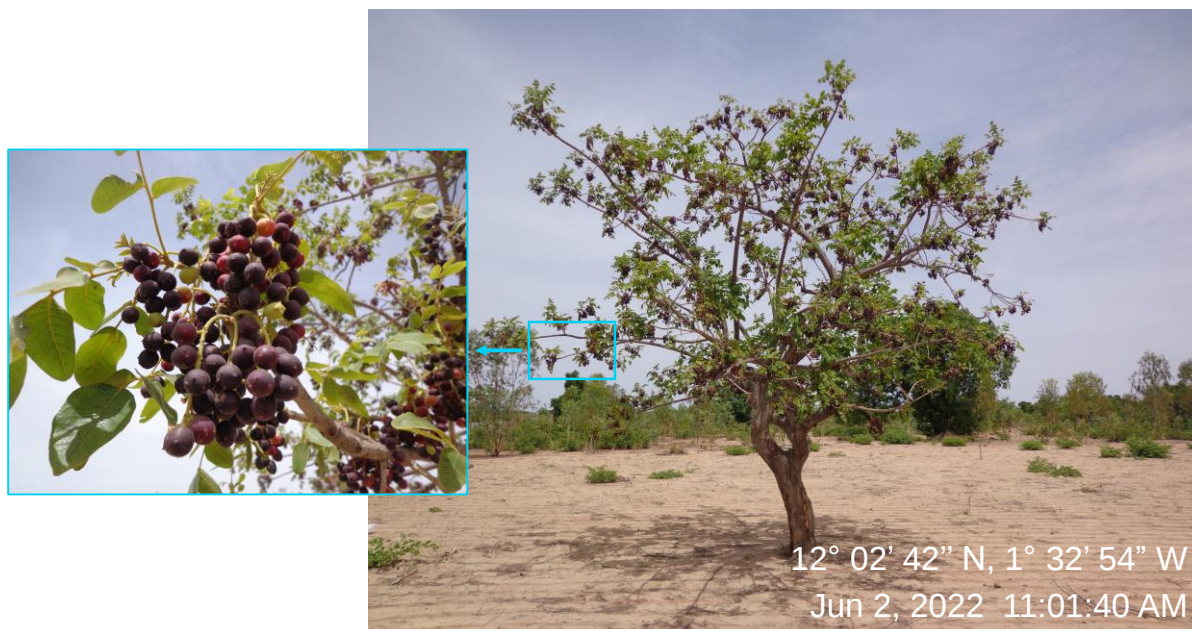


Figure 46: Présentation de *Lannea kerstingii* et ses fruits

III. Matériel et méthodes

III.1. Extraction des deux huiles végétales

Les huiles LaMSO et LaKSO ont été extraites des graines des deux espèces d'arbres selon deux méthodes distinctes : l'extraction au Soxhlet et l'extraction à la presse mécanique. Ces deux techniques ont permis d'obtenir des échantillons d'huile suffisants pour l'analyse expérimentale de leurs propriétés. Cependant, dans ce chapitre, il faudrait noter que seules les huiles LaMSO et LaKSO extraites au Soxhlet ont été étudiées comme fluide de transfert et de stockage thermique pour les applications à température élevée. Les huiles LaMSO et LaKSO extraites à la presse mécanique ont servi de réserve et d'analyse de l'influence de la méthode d'extraction sur leur qualité.

Les fruits utilisés dans cette étude ont été collectés sur différents arbres de *Lannea microcarpa* et *Lannea kerstingii* dans la localité de Saponé (12° 06' 00" N, 1° 36' 00" O), située dans la zone soudano-sahélienne, caractérisée par des précipitations annuelles allant de 600 mm à 900 mm [195]. Avant l'extraction des huiles, les fruits collectés ont subi un prétraitement pour obtenir leurs graines. Ce prétraitement a consisté à dépulper les fruits, à les nettoyer avec de l'eau pour obtenir leurs noyaux, puis à décortiquer ces derniers pour extraire les graines.

III.1.1. Extraction au Soxhlet

L'extraction au Soxhlet a été effectuée conformément à la méthode décrite dans la norme ISO 734 [196]. Une masse de 30 g de graines réduites en pâte (à l'aide d'un mortier et d'un pilon en porcelaine) a été mise dans une cartouche, d'abord bouchée avec du coton hydrophile, puis placée dans le dispositif Soxhlet. Par la suite, le dispositif Soxhlet, monté sur un ballon à fond plat, contenant 250 mL d'hexane, a été posé sur le chauffe-ballon, qui a été fixé à 150 °C pendant 6 h. Après l'extraction, l'huile est récupérée par un processus d'évaporation de l'hexane à l'aide d'un évaporateur rotatif. L'ensemble de cette procédure a été répété jusqu'à l'obtention de quantités suffisantes de LaMSO et LaKSO pour les analyses expérimentales. Ce sont les huiles obtenues à travers ce processus d'extraction qui ont été étudiées comme fluide de transfert et de stockage thermique à 210 °C.

III.1.2. Extraction à la presse mécanique

L'extraction à la presse mécanique a été réalisée à l'aide d'une machine fabriquée par la compagnie chinoise CGOLDENWALL [197]. Cette presse à vis, modèle WDD 151, est spécialement conçue pour l'extraction d'huiles végétales à partir de diverses graines, telles que les arachides, les graines de sésame, les noix de coco, les graines de tournesol, etc. Elle est équipée d'un moteur qui permet d'entraîner une vis pour extraire l'huile des graines. De plus, la presse WDD 151 est dotée d'un système de contrôle de température qui permet d'ajuster la chaleur en fonction du type de graines utilisées. Pour cette étude, l'extraction des huiles LaMSO et LaKSO a été effectuée à une température de 70 °C, sur la base de plusieurs tentatives d'extraction échouées à température ambiante.

Les huiles LaMSO et LaKSO obtenues à travers ce processus de pressage ont servi de réserve et d'analyse de l'influence de la méthode d'extraction sur la qualité des huiles.

III.2. Procédure expérimentale

La procédure expérimentale adoptée dans cette étude est résumée à la Figure 47.

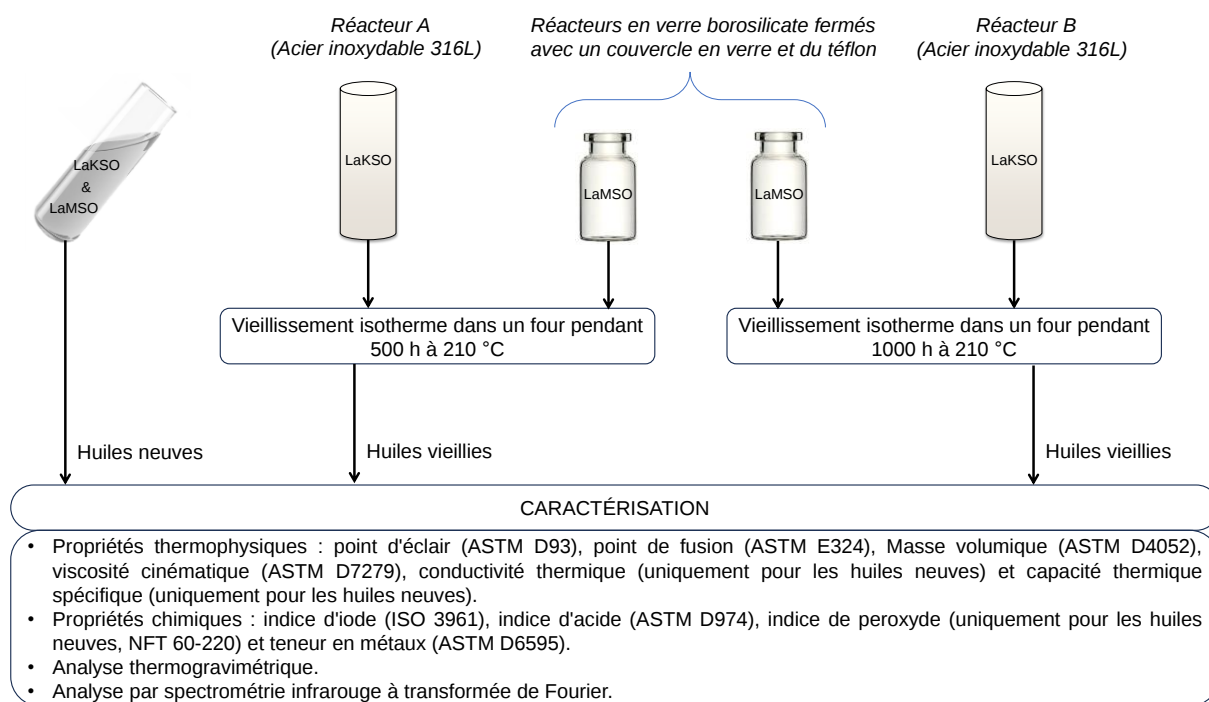


Figure 47: Résumé de la procédure expérimentale adoptée pour l'étude du potentiel des deux espèces d'huiles comme fluides de transfert et de stockage thermique.

III.2.1. Propriétés des deux huiles végétales neuves

III.2.1.1. Propriétés thermophysiques et chimiques

Les propriétés thermophysiques et chimiques suivantes des huiles extraites au Soxhlet et à la presse ont été déterminées en ayant recours aux méthodes standardisées.

Point d'éclair. Le point d'éclair a été mesuré en vase clos à l'aide d'un analyseur Setaflash series 3 (modèle 33000-0, Stanhope-Seta) conformément à la norme ASTM D93. La plage de mesure de l'appareil varie de la température ambiante à 300 °C, avec une incertitude de 10 °C. Le point d'éclair est la température à partir de laquelle l'huile génère suffisamment de substances volatiles pour permettre l'inflammation [146,198].

Point de fusion. Le point de fusion a été mesuré par la méthode du tube capillaire conformément à la norme ASTM E324. Le point de fusion est la température à laquelle l'huile passe de l'état solide à l'état liquide à pression atmosphérique [146].

Masse volumique. La masse volumique a été mesurée à 25 °C et 40 °C à l'aide d'un densimètre Anton Paar DMA 4500M conformément à la norme ASTM D4052. La plage de mesure de l'appareil varie de 0 kg·m⁻³ à 3000 kg·m⁻³. La masse volumique est la mesure de la masse par unité de volume [146].

Viscosité cinématique. La viscosité cinématique a été mesurée à 40 °C, 60 °C, 80 °C et 100 °C à l'aide d'un viscosimètre OmniTek S-Flow 3000 conformément à la norme ASTM D7279. La plage de mesure

de l'appareil varie de $0,6 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ to $3000 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. La viscosité cinématique est la résistance d'un fluide à l'écoulement sous l'effet de la gravité [146,199].

Conductivité thermique. La conductivité thermique a été mesurée à 40°C à l'aide d'un analyseur thermique KD2 Pro utilisant la technique du fil chaud transitoire [200]. La sonde KS-1, recommandée par le manuel de l'appareil pour les huiles végétales, a été utilisée pour la mesure. La sonde a été entièrement immergée dans 30 mL d'huile contenue dans un tube en verre borosilicaté pendant 3 min pour garantir une mesure précise de la conductivité thermique. La plage de mesure de la sonde KS-1 varie de $0,02 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ à $2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. La conductivité thermique est la capacité d'un fluide à transmettre la chaleur [201].

Capacité thermique massique. La capacité thermique massique est la quantité de chaleur requise pour augmenter de 1 K la température d'une unité de masse [202]. La capacité thermique massique a été déterminée par le laboratoire d'application de Setaram (Caluire, France) à l'aide d'un calorimètre Calvet C80 doté de capteurs 3D. La cellule de mesure a été soigneusement nettoyée, séchée, et puis remplie de l'échantillon et pesée (5551,38 mg et 5481,69 mg, respectivement pour LaMSO et LaKSO). Une cellule vide identique a servi de référence pour soustraire du flux de chaleur la contribution de la cellule. Ces deux cellules ont ensuite été insérées dans le calorimètre et stabilisées à 30°C . Par la suite, l'analyse des échantillons a été effectuée conformément aux étapes suivantes :

- Chauffage isotherme à 30°C pendant 1 h
- Chauffage de 30°C à 300°C avec une vitesse $0,4 \text{ K} \cdot \text{min}^{-1}$
- Chauffage isotherme à 300°C pendant 4 h
- Retour à la température ambiante

Pour garantir la fiabilité des résultats, un deuxième cycle de chauffage a été effectué pour vérifier la reproductibilité des phénomènes observés. Par ailleurs, une analyse utilisant de la poudre d'alumine a également été réalisée pour valider les résultats (servant généralement de référence pour les mesures de capacité thermique massique). La masse d'alumine employée a été ajustée pour obtenir une capacité thermique ($m \cdot c_p$) similaire à celle de l'échantillon.

La capacité thermique massique en $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ a été déterminée par l'équation (6) avec une incertitude de 1 %

$$c_p [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] = \frac{H_t - H_c}{m_s \cdot \beta} \quad (6)$$

Où H_t [W] est le flux de chaleur total ; H_c [W] est la contribution au flux de chaleur de la cellule en acier inoxydable ; m_s [kg] est la masse de l'échantillon et β [K·s⁻¹] est la vitesse de chauffe.

Indice d'iode. L'indice d'iode a été déterminé par la méthode analytique de Wijs conformément à la norme ISO 3961. L'indice d'iode renseigne sur la stabilité à l'oxydation d'une huile végétale en indiquant son niveau d'insaturation ² et sa capacité à être conservée plus longtemps sans détérioration majeure [146,203,204]. Les huiles végétales saturées sont plus résistantes à l'oxydation, relativement moins visqueuses et souvent solides à température ambiante [146,203,204]. En revanche, les huiles végétales insaturées sont siccatives (capacité à sécher à température ambiante), moins résistantes à l'oxydation et présentent des points de fusion plus bas [146,203,204].

Indice d'acide. L'indice d'acide a été déterminé par titrage potentiométrique conformément à la norme ASTM D974. L'indice d'acide représente la masse d'hydroxyde de potassium (KOH) nécessaire pour neutraliser les acides gras libres contenus dans 1 g d'huile végétale [146,203,205]. Il renseigne sur la pureté, la teneur en acides gras libres et la corrosivité d'une huile végétale. Un indice d'acide faible suggère que l'huile est de meilleure qualité, avec moins de risques de dégradation et de corrosion à haute température [146,203,205].

Indice de peroxyde. L'indice de peroxyde a été déterminé par titrage potentiométrique conformément à la norme NFT 60-220. Cet indice est utilisé pour évaluer le niveau d'oxydation d'une huile végétale neuve [146,205]. Il correspond à la quantité de peroxydes (formés à la suite d'un processus d'oxydation) présente dans l'huile végétale [146,205]. Cependant, l'indice de peroxyde n'est pas un indicateur fiable pour évaluer l'oxydation après un vieillissement à haute température [206,207]. Cela est dû au fait que les peroxydes apparaissent lorsque l'huile commence à s'oxyder et se décomposent généralement aux environs de 150 °C [146,205–207]. Au-delà de cette température, aucune accumulation de peroxydes n'est observée dans l'huile.

Teneur en métaux. Les teneurs en chrome (Cr), aluminium (Al), cuivre (Cu), fer (Fe) et zinc (Zn) ont été analysées par le spectromètre Spectro LNF-Q100 conformément à la norme ASTM D6595. L'appareil

² Les huiles végétales sont définies comme (i) saturées lorsque leur indice d'iode est compris entre 5 g I₂·100 g⁻¹ and 50 g I₂·100 g⁻¹, (ii) monoinsaturées lorsque leur indice d'iode est compris entre 50 g I₂·100 g⁻¹ and 100 g I₂·100 g⁻¹, (iii) diinsaturées lorsque leur indice d'iode est compris entre 100 g I₂·100 g⁻¹ and 150 g I₂·100 g⁻¹, et (iv) triinsaturées lorsque leur indice d'iode est supérieur à 150 g I₂·100 g⁻¹ [146,203].

fonctionne dans une plage de mesure de 203 nm à 810 nm, ce qui lui permet de détecter un large spectre de longueurs d'onde allant de l'ultraviolet à l'infrarouge.

À part la détermination de la capacité thermique massique, qui a été effectuée deux fois, toutes les autres propriétés thermophysiques et chimiques ont été mesurées trois fois. Les résultats sont présentés sous la forme “moyenne $\pm$ écart-type” pour toutes les propriétés thermophysiques et chimiques mesurées, à l'exception du point d'éclair et de la capacité thermique massique, dont les incertitudes ont été présentées précédemment (± 10 °C pour le point d'éclair et ± 1 % pour la capacité thermique massique). Les équations (7) et (8) déterminent respectivement la moyenne statistique ($\bar{X}$) des valeurs mesurées (X_i) et leur écart type (σ) pour une propriété spécifique.

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^3 \frac{X_i}{3} \quad (7)$$

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \frac{(X_i - \bar{X})^2}{3}} \quad (8)$$

III.2.1.2. Analyse thermogravimétrique

La dégradation thermique a été examinée par analyse thermogravimétrique (ATG) dans des conditions de gaz inertes conformément à la norme ASTM E2550 [155]. Le calorimètre SETARAM Setsys 2000 équipé d'une cellule d'alumine a été utilisé à cette fin. Environ 100 mg d'échantillon ont été soigneusement insérés dans la cellule d'alumine. Par la suite, l'échantillon a subi un chauffage contrôlé de 25 °C à 600 °C à une vitesse de 10 K·min⁻¹ dans une atmosphère d'azote.

III.2.1.3. Analyse infrarouge à transformée de Fourier

Les groupes fonctionnels ont été analysés par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) [208]. Le spectre FTIR a été obtenu à l'aide d'un spectromètre compact Bruker Alpha II, équipé d'un accessoire de réflectance totale atténuée (ATR) en platine. Environ 10 μ L d'huile ont été placées sur la lentille de l'instrument, et le spectre a été enregistré sur une gamme de nombres d'ondes allant de 4000 cm⁻¹ à 500 cm⁻¹, avec une résolution de 2 cm⁻¹. Les résultats représentent la moyenne de 24 balayages.

III.2.2. Vieillissement isotherme et caractérisation des échantillons

III.2.2.1. Vieillissement thermique des échantillons

Il n'existe pas de normes spécifiques pour la caractérisation des huiles végétales comme fluide de transfert ou de stockage thermique. Toutefois, l'ASTM D6743 [154] propose une méthode standardisée pour l'analyse de la stabilité thermique des HTFs organiques, qui peut être adaptée aux huiles végétales. Cette méthode consiste à chauffer le fluide dans un réacteur scellé en acier inoxydable 316L à une température donnée pendant une période minimale de 500 h. L'analyse chromatographique en phase gazeuse avant et après le vieillissement du fluide permet d'identifier les produits de dégradation résultant du processus de chauffage. La réalisation du test à différentes températures permet de construire les courbes de dégradation du fluide en fonction de la température. Dans cette étude, nous avons adapté la norme ASTM D6743 pour étudier les deux huiles végétales comme fluides de transfert ou de stockage thermique dans des conditions de vieillissement à 210 °C.

Ce protocole consistait à chauffer chaque huile de la température ambiante à 210 °C dans un four électrique (Figure 48), puis à maintenir cette température pendant la période spécifiée (500 h ou 1000 h). Le temps de vieillissement a débuté dès que la température de consigne de 210 °C a été atteinte à l'intérieur du four, cette température étant affichée directement sur l'appareil. Une fois le temps écoulé, les échantillons ont été laissés pour refroidir naturellement jusqu'à la température ambiante. Trois échantillons d'huile ont été préparés pour chaque test, à l'exception de l'échantillon de LaKSO vieilli pendant 1000 h, pour lequel un seul échantillon a été utilisé. Le Tableau 15 présente la nomenclature adoptée pour désigner les différents échantillons.

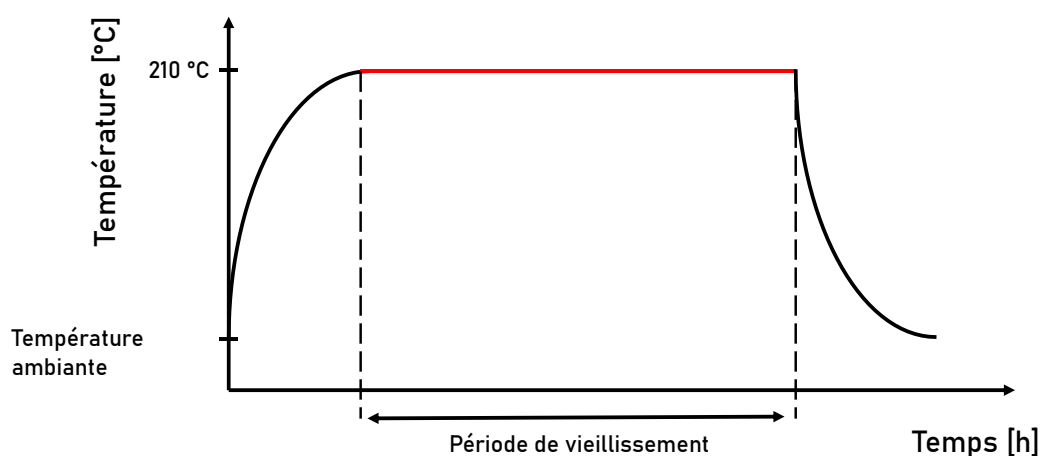


Figure 48: Illustration de la chauffe subie par les huiles pendant le vieillissement isotherme à 210 °C.

Tableau 14: Nomenclature des échantillons d'huile (extraits au Soxhlet)

Nomenclature	Désignation
LaMSO	LaMSO (neuve)
LaMSO-500h	LaMSO vieillie dans du verre borosilicaté pendant 500 h
LaMSO-1000h	LaMSO vieillie dans du verre borosilicaté pendant 1000 h
LaKSO	LaKSO (neuve)
LaKSO-500h	LaKSO vieillie dans la cellule A en acier inoxydable 316L pendant 500 h
LaKSO-1000h	LaKSO vieillie dans la cellule B en acier inoxydable 316L pendant 1000 h

Pour limiter l'oxygène durant le vieillissement, chaque cellule ou enceinte a été entièrement remplie d'huile et soigneusement fermée avec des techniques d'étanchéité adaptées. Les détails concernant le choix de la cellule pour chaque huile sont précisés ci-dessous :

Huile des graines de *Lannea microcarpa* (LaMSO). Vieillissement dans des tubes en verre borosilicaté de 30 mL, choisis pour leur stabilité thermique et leur résistance chimique à des températures élevées [209,210], ce qui justifie d'ailleurs leur utilisation dans diverses études expérimentales sur les huiles végétales pour des expériences similaires [23,211–213]. Les tubes ont été complètement remplis de LaMSO et scellés avec des bouchons en verre enveloppés de Téflon [214,215].

Huile des graines de *Lannea kerstingii* (LaKSO). Vieillissement dans des cellules en acier inoxydable 316L fabriquées selon la norme ASTM D6743 [154]. Pour des raisons de disponibilité, deux types de cellules en acier inoxydable 316L ont été utilisés (Figure 49). La cellule de type A (63 mL), munie d'un raccord à compression Swagelok [216], a servi pour les tests de 500 h (Tableau 16). Cependant, le nombre limité de cellules de type A ne permettant pas de répondre à l'ensemble des besoins expérimentaux, une cellule de type B (70 mL), équipée d'un couvercle à vis et initialement utilisée dans une étude précédente [24], a été employée pour le test de 1000 h. Toutes les cellules de test ont également été enveloppées de Téflon pour garantir une étanchéité satisfaisante à haute température.

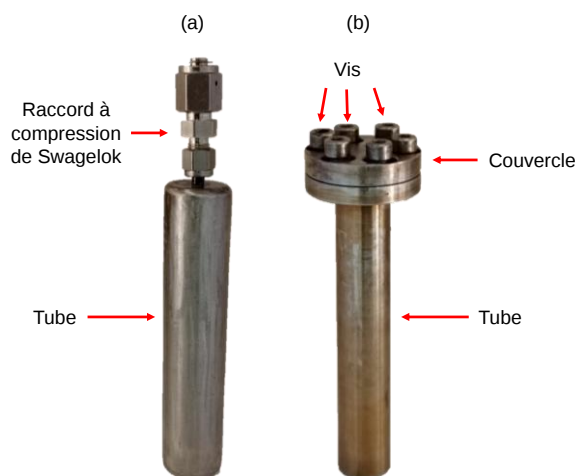


Figure 49: a) Réacteur A (63 mL) et b) Réacteur B (70 mL) entièrement fabriqués en acier inoxydable 316L

Tableau 15: Informations générales sur les cellules de test fabriquées en acier inoxydable 316L

Type de réacteur	Diamètre [mm]	Hauteur [mm]	Volume [mL]	Couvercle
Cellule A	23	152	63	Raccord de compression Swagelok de diamètre 0,25” [216]
Cellule B	22	188	70	Bride d’étanchéité à six vis et de diamètre 32 mm

III.2.2.2. Caractérisation des échantillons vieillis

Après le vieillissement isotherme pendant une période donnée, les propriétés des échantillons de LaMSO et LaKSO vieillis ont été déterminées. Ces évaluations ont permis de suivre l’évolution des propriétés au fil du vieillissement. La détermination des propriétés thermophysiques et chimiques, ainsi que les analyses thermogravimétriques (TGA) et infrarouges à transformée de Fourier (FTIR), ont été effectuées selon les mêmes procédures que celles employées pour les échantillons d’huiles neuves dans la section (III.2.1) du présent chapitre. Cependant, l’indice de peroxyde n’a pas été déterminé pour les échantillons vieillis, car il n’est pas un indicateur fiable pour évaluer la dégradation des huiles végétales dans les applications à haute température [148,149,206,207].

IV. Résultats

IV.1. Bilan de l’extraction

IV.1.1. Huile des graines de *Lannea microcarpa*

L’extraction de l’huile des graines de *Lannea microcarpa* a été réalisée en utilisant deux méthodes différentes : l’extraction au Soxhlet et l’extraction à la presse mécanique. Pour l’extraction au Soxhlet (Figure 50a), 94 kg de fruits ont été traités pour obtenir environ 10 kg de noyaux, qui ont ensuite été décortiqués pour extraire 3,5 kg de graines. Ces graines ont pu produire 1,74 kg de LaMSO. Le ratio d’extraction global pour l’extraction au Soxhlet est de 18,51 g de LaMSO par kg de fruits, avec un rendement d’extraction de 49,70 % à partir des graines. Dans le cas de l’extraction à la presse mécanique (Figure 50b), 338 kg de fruits ont été traités, produisant 31 kg de noyaux et, par la suite, 13,46 kg de graines. De ces graines, 6,12 kg de LaMSO ont été extraites, avec un ratio d’extraction global de 18,10 g d’huile par kg de fruits et un rendement d’extraction de 45,50 % à partir des graines.

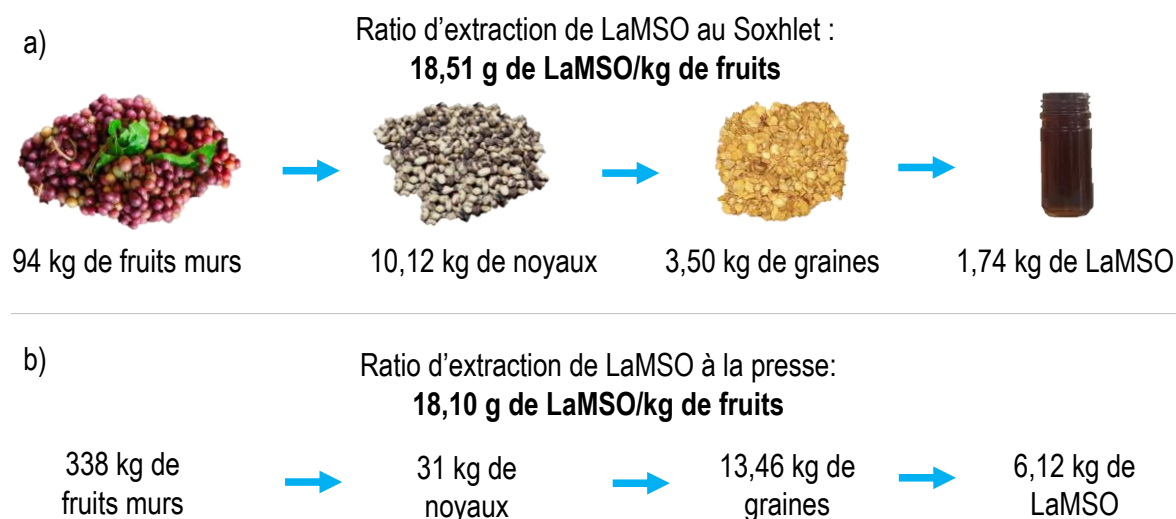


Figure 50: Évaluation globale du processus d'extraction de l'huile des graines de *Lannea microcarpa* au a) Soxhlet et à la b) presse

IV.1.2. Huile des graines de *Lannea kerstingii*

L'huile des graines de *Lannea kerstingii* a également été extraite à travers les deux méthodes précédentes. Pour l'extraction au Soxhlet (Figure 51a), 103 kg de fruits ont été traités pour obtenir environ 14 kg de noyaux, qui ont ensuite été décortiqués pour extraire 3,7 kg de graines. Ces graines ont pu produire 1,93 kg de LaKSO. Le ratio d'extraction global pour l'extraction au Soxhlet est de 18,74 g de LaMSO par kg de fruits, avec un rendement d'extraction de 52,2 % à partir des graines. Dans le cas de l'extraction à la presse mécanique (Figure 51b), 14 kg de fruits ont été traités, produisant 1,8 kg de noyaux et, par la suite, 0,5 kg de graines. De ces graines, 0,24 kg de LaKSO ont été extraits, avec un ratio d'extraction global de 17,14 g d'huile par kg de fruits et un rendement d'extraction de 48 % à partir des graines.

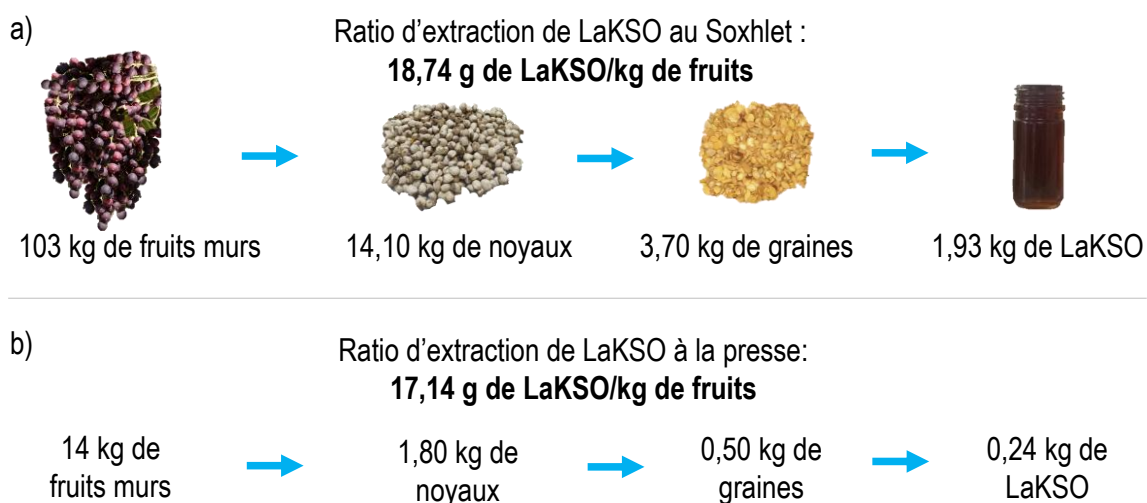


Figure 51: Évaluation globale du processus d'extraction de l'huile des graines de *Lannea kerstingii* au a) Soxhlet et à la b) presse

IV.2. Propriétés des deux huiles végétales neuves

Les propriétés présentées dans cette section sont celles des huiles végétales LaMSO et LaKSO extraites au Soxhlet. Ces dernières sont comparées aux propriétés des huiles végétales LaMSO et LaKSO extraites à la presse plus tard dans la partie discussion (V.1).

IV.2.1. Propriétés thermophysiques et chimiques

Les capacités thermiques massiques de LaMSO et LaKSO, telles que présentées respectivement aux figures 52a et 52b, augmentent progressivement en fonction de la température, passant de $2057 \pm 21 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ à $2853 \pm 29 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ pour LaMSO et $2121 \pm 21 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ à $2979 \pm 30 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ pour LaKSO, dans l'intervalle de température comprise entre 30°C et 300°C . Ces deux tendances ont été modélisées par des équations polynomiales (Équations (9) et (10)) qui fournissent respectivement les capacités thermiques massiques de LaMSO ($c_{p \text{ LaMSO}}$) et LaKSO ($c_{p \text{ LaKSO}}$) en fonction de la température (T) [$^\circ\text{C}$] dans la plage spécifiée. Ces équations s'expriment comme suit :

$$c_{p \text{ LaMSO}} [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] = -2,9669 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 + 1,2851 \cdot 10^{-2} \cdot T^2 + 1,6541 \cdot T + 1995,8 \quad (9)$$

$$c_{p \text{ LaKSO}} [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] = -3,6034 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 + 1,4292 \cdot 10^{-2} \cdot T^2 + 2,0634 \cdot T + 2047,0747 \quad (10)$$

Les viscosités cinématiques de LaMSO et LaKSO diminuent avec l'augmentation de la température, passant de $30,3 \pm 0,1 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ à $6,7 \pm 0,1 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ pour LaMSO et $30,6 \pm 0,1 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ à $6,6 \pm 0,1 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ pour LaKSO, dans la plage de température de 40°C à 100°C (Figure 53). Les données observées ont été ajustées à l'aide des équations (11) et (12) pour décrire respectivement la variation des viscosités cinématiques de LaMSO (η_{LaMSO}) et LaKSO (η_{LaKSO}) dans la plage de température (T) [$^\circ\text{C}$] allant de 40°C à 100°C , ce qui a donné respectivement les coefficients de détermination suivant : 0,9999999999998 et 0,9999999999991. La forme adoptée pour la modélisation de la viscosité est suggérée comme la plus appropriée pour les huiles végétales par Esteban et al. [217].

$$\eta_{\text{LaMSO}} [\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}] = \exp \left(\frac{464970034,6348}{(T + 273,15)^3} - \frac{3737404,3592}{(T + 273,15)^2} + \frac{12820,8581}{T + 273,15} - 14,5612 \right) \quad (11)$$

$$\eta_{\text{LaKSO}} [\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}] = \exp \left(\frac{-5327314404,5684}{(T + 273,15)^3} + \frac{48197990,0408}{(T + 273,15)^2} - \frac{141913,2326}{T + 273,15} + 138,5821 \right) \quad (12)$$

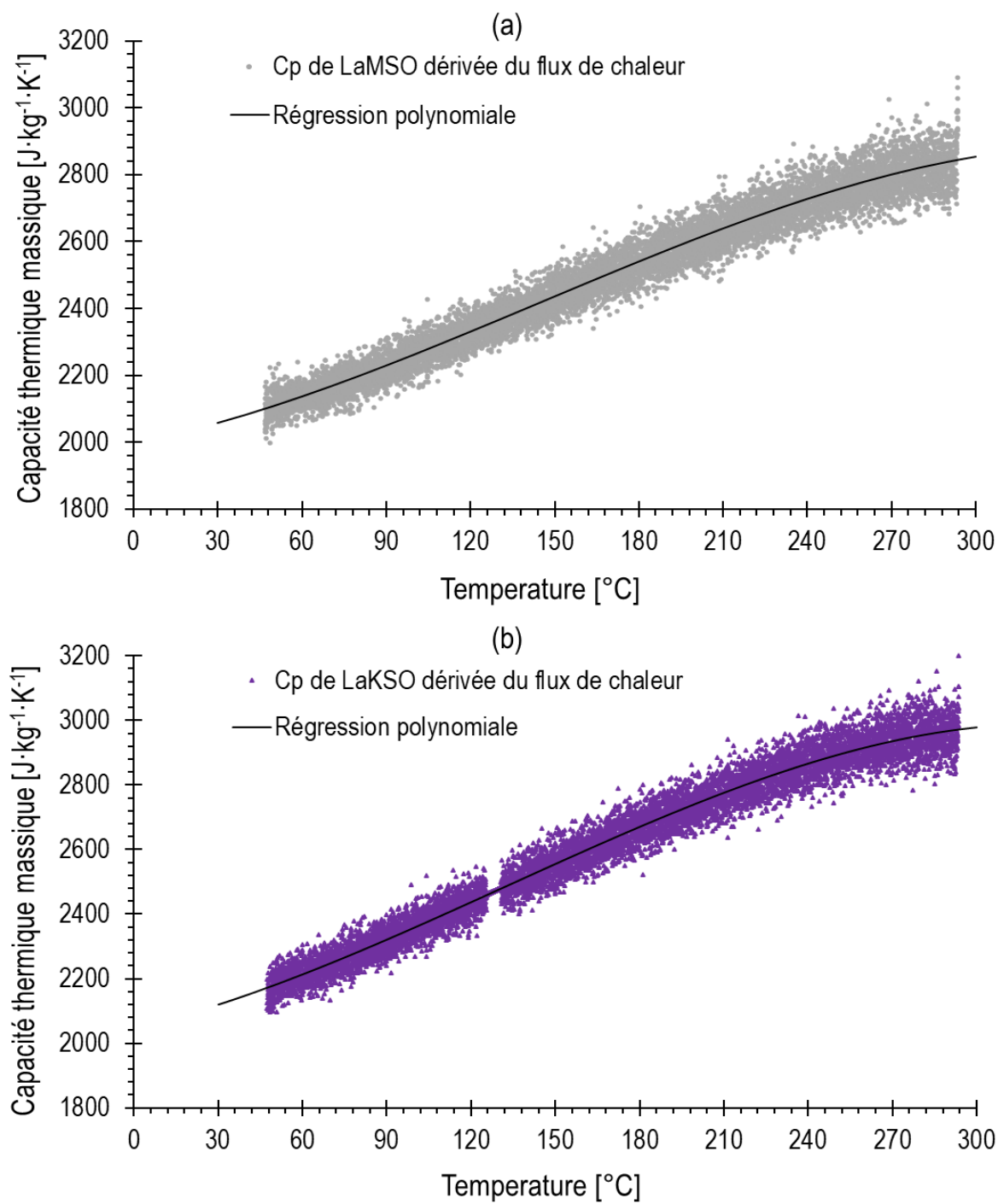


Figure 52: Capacités thermiques massiques des huiles végétales a) LaMSO et b) LaKSO en fonction de la température

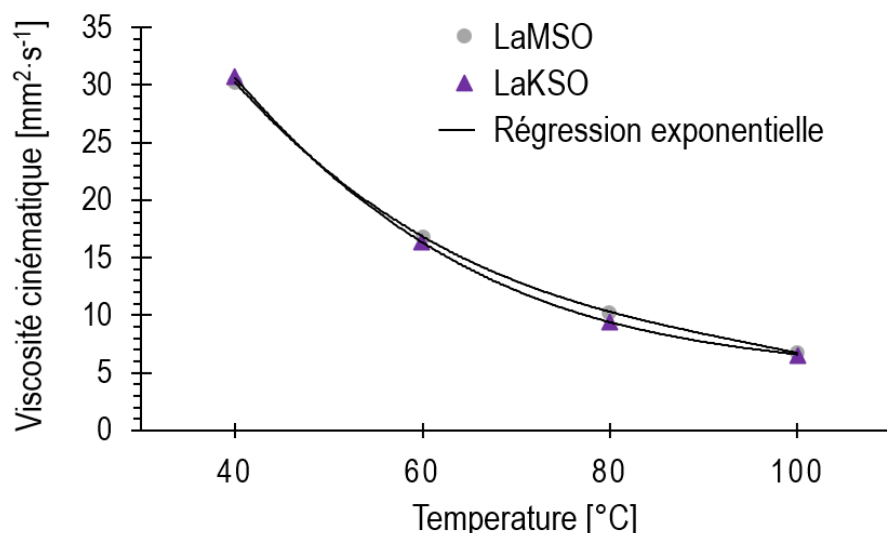


Figure 53: Viscosités cinématiques des huiles végétales LaMSO et LaKSO en fonction de la température

Les autres propriétés thermophysiques et chimiques mesurées de LaMSO et LaKSO sont présentées dans le Tableau 16. Les deux huiles sont liquides dans l'intervalle de température allant de 20 °C à 220 °C. En supposant que la masse volumique varie linéairement en fonction de la température, conformément à ce qui est généralement observé pour la plupart des huiles végétales [150], les masses volumiques de LaMSO (ρ_{LaMSO}) et LaKSO (ρ_{LaKSO}) peuvent être déterminées respectivement en fonction de la température (T) [°C] par les équations (13) et (14) :

$$\rho_{LaMSO} \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}] = -0,5067 \cdot T + 912,87 \quad (13)$$

$$\rho_{LaKSO} \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}] = -0,5400 \cdot T + 928,30 \quad (14)$$

Tableau 16: Propriétés thermophysiques et chimiques des huiles végétales LaMSO et LaKSO

Propriétés thermophysiques et chimiques	LaMSO	LaKSO
Point d'éclair (°C)	220±10	220±10
Point de fusion (°C)	20,5±0,6	19,4±0,8
Masse volumique à 25 °C (kg·m ⁻³)	900,2±0,1	914,8±0,5
Masse volumique à 40 °C (kg·m ⁻³)	892,6±3,3	906,7±2,3
Conductivité thermique à 40 °C (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0,329±0,004	0,330±0,010
Indice d'iode (g I ₂ ·100 g ⁻¹)	13,8±0,7	35,8±0,7
Indice d'acide (mg KOH·g ⁻¹)	8,8±0,4	10,3±0,8
Indice de peroxyde (mEq O ₂ ·kg ⁻¹)	40,8±0,5	19,3±0,8

IV.2.2. Dégradation thermique

Les résultats des analyses thermogravimétriques (TG) et thermogravimétriques dérivées (DTG) de LaMSO et LaKSO sont présentés respectivement aux figures 54a et 54b. La perte de masse a été assimilée à la dégradation thermique des huiles [155,218] et s'est produite en une seule étape pour les

deux huiles. Concernant LaMSO, la dégradation commence à 130 °C, avec une température onset de 402 °C et une température offset de 454 °C. Pour LaKSO, la dégradation commence à 270 °C, avec une température onset de 400 °C et une température offset de 452 °C. Les pics de la dégradation sont observés à 432 °C (avec une perte de masse de 60 %) pour LaMSO et à 430 °C (avec une perte de masse de 61 %) pour LaKSO.

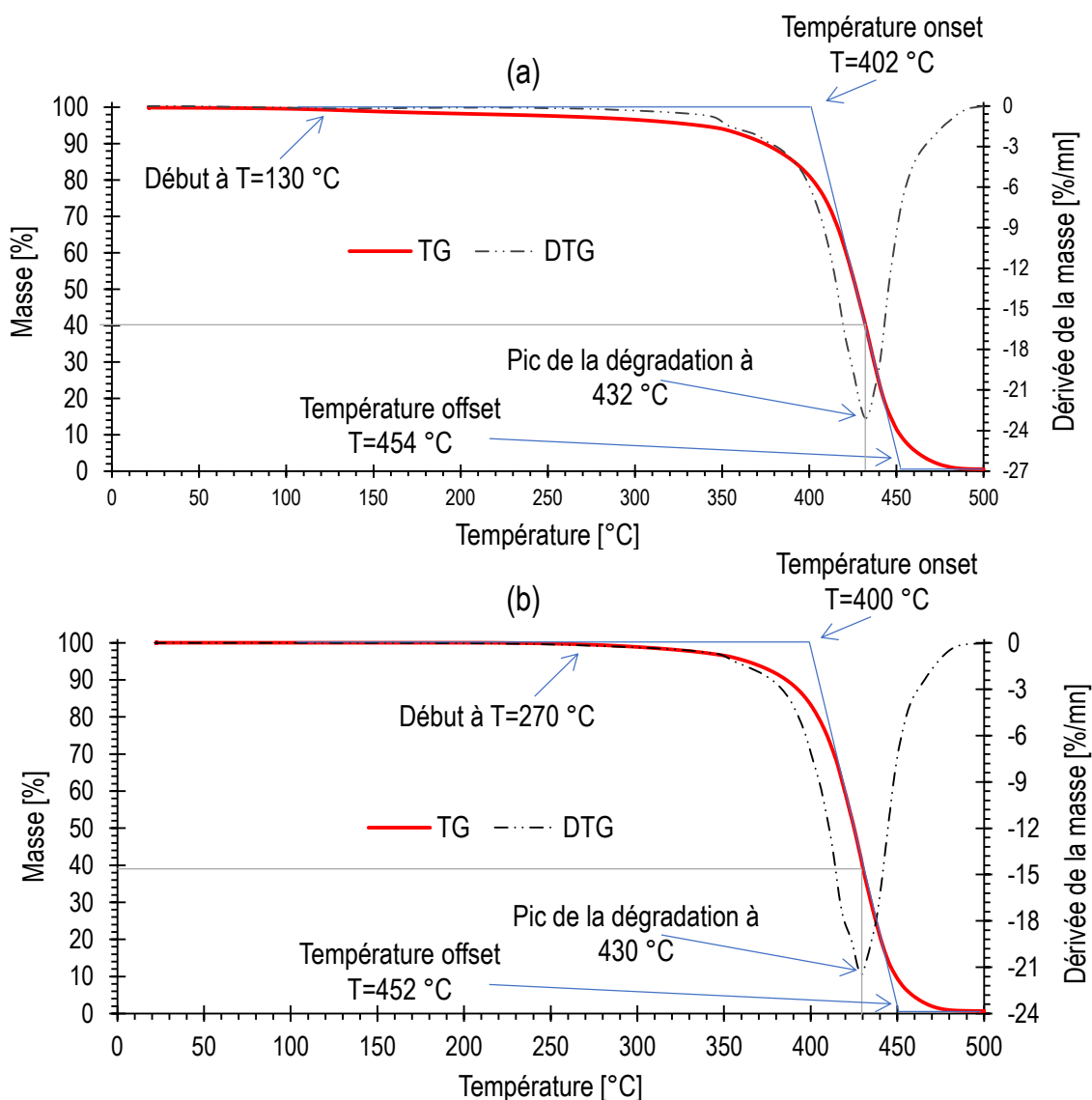


Figure 54: Courbes TG et DTG des huiles végétales a) LaMSO et b) LaKSO

IV.3. Caractérisation des échantillons d'huile vieillis

IV.3.1. Evolution des propriétés thermophysiques et chimiques

IV.3.1.1. Cas de l'huile des graines de *Lannea microcarpa*

La Figure 55 présente l'évolution des propriétés thermophysiques et chimiques de LaMSO au fil du vieillissement.

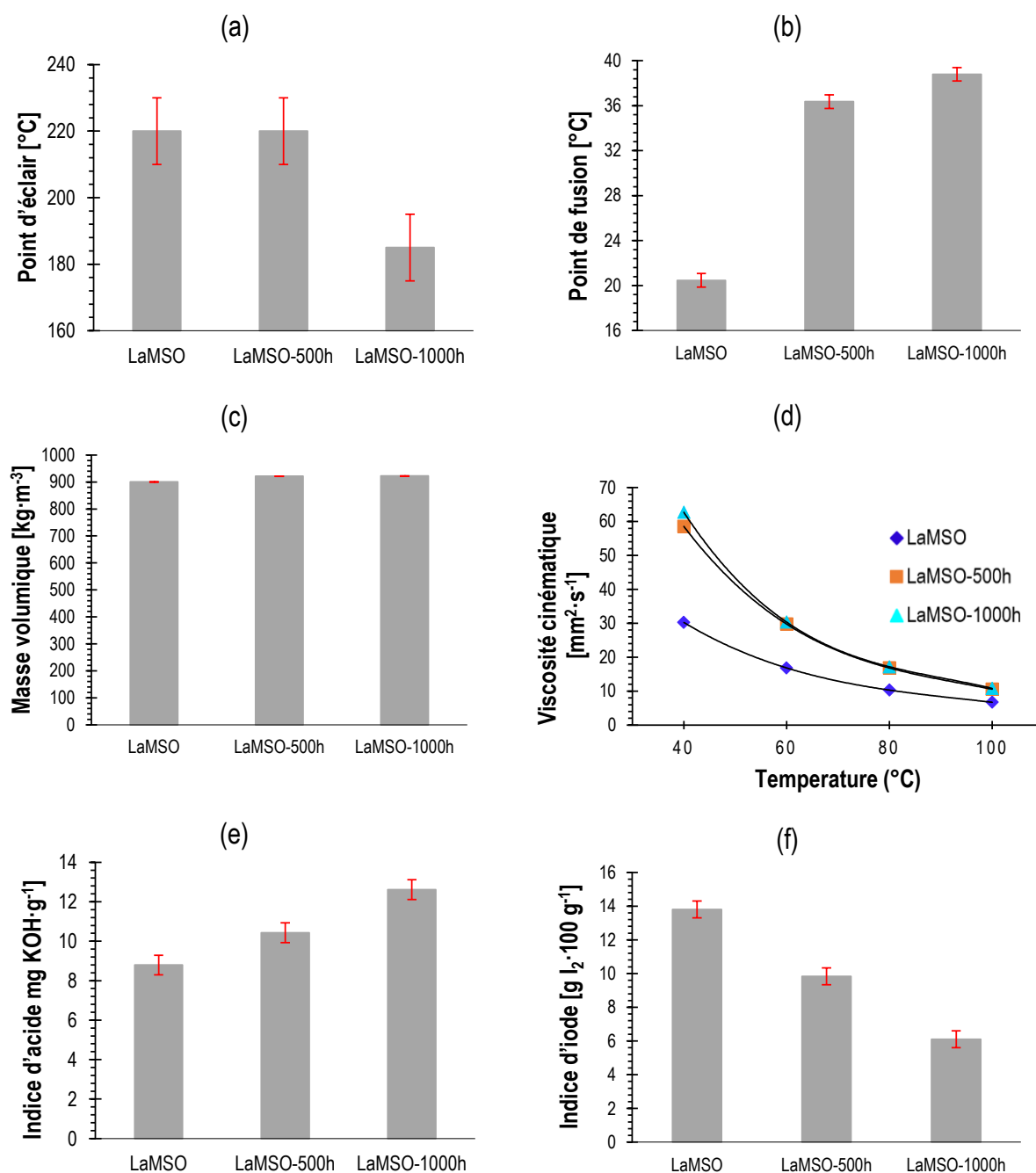


Figure 55: Évolution des propriétés thermophysiques et chimiques de LaMSO : a) point d'éclair, b) point de fusion, c) masse volumique 25 °C, d) viscosité cinématique, e) indice d'acide, et f) indice d'iode. La teneur en métaux des échantillons de LaMSO n'a pas été présentée, car il n'y a pas eu d'évolution au fil du vieillissement. La valeur est restée inférieure à 2 ppm dans la limite des bruits de mesure de l'appareil.

Le point d'éclair de LaMSO est resté stable à 220 ± 10 °C après 500 h de vieillissement à 210 °C (Figure 55a). Cependant, après 1000 h de vieillissement, il a baissé à 185 ± 10 °C.

Le point de fusion de LaMSO a augmenté progressivement de sa valeur initiale de $20,5 \pm 0,6$ °C à $38,8 \pm 0,2$ °C après 1000 h de vieillissement (Figure 55b).

La masse volumique de LaMSO n'a pas connu de changement notable avec le vieillissement, juste 2,5 % d'augmentation observée après 1000 h à 210 °C (Figure 55c).

La viscosité cinématique des échantillons est présentée en fonction de la température à la Figure 55d. Alors que les tendances de viscosité des échantillons de LaMSO vieillis pendant 500 h et 1000 h sont presque similaires, la viscosité des échantillons vieillis vaut le double de celle de LaMSO neuve à 40 °C. Toutefois, avec l'augmentation de la température, la viscosité des échantillons diminue considérablement en rapprochant ainsi de la viscosité de LaMSO neuve.

L'indice d'acide de LaMSO a augmenté linéairement de sa valeur initiale de $8,8 \pm 0,4 \text{ g KOH} \cdot \text{g}^{-1}$ à $12,6 \pm 0,7 \text{ g KOH} \cdot \text{g}^{-1}$ après 1000 h de vieillissement à 210 °C, ce qui représente une augmentation de 40 % (Figure 55e).

L'indice d'iode de LaMSO a diminué linéairement de sa valeur initiale de $13,8 \pm 0,7 \text{ g I}_2 \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ à $6,1 \pm 0,5 \text{ g I}_2 \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ après 1000 h de vieillissement à 210 °C, soit une réduction de 50 % (Figure 55f).

IV.3.1.2. Cas de l'huile des graines de *Lannea kerstingii*

La Figure 56 présente les propriétés thermophysiques et chimiques des échantillons de LaKSO vieillis à 210 °C dans les réacteurs en acier inoxydable pendant 500 h et 1000 h.

Le point d'éclair de LaKSO est resté stable à 220 ± 10 °C après 500 h de vieillissement à 210 °C (Figure 56a). Cependant, après 1000 h de vieillissement, il a baissé à 200 ± 10 °C.

Le point de fusion de LaKSO a augmenté linéairement de sa valeur initiale de $19,4 \pm 0,8$ °C à $28,4 \pm 1,0$ °C après 1000 h de vieillissement à 210 °C (Figure 56b).

La masse volumique de LaKSO a subi un changement négligeable avec le vieillissement, avec une légère augmentation de 1,3 % après 1000 h de vieillissement à 210 °C (Figure 56c).

Après 500 h de vieillissement à 210 °C, la viscosité cinématique de LaKSO a augmenté de 34 % à 40 °C (Figure 56d). De même, une augmentation de 45 % a été observée après 1000 h de vieillissement. Cependant, avec l'augmentation de la température vers 100 °C, la viscosité des échantillons de LaKSO vieillis se rapproche de celle de LaKSO neuve.

L'indice d'acide de LaKSO est passé de sa valeur initiale de $10,3 \pm 0,8 \text{ g KOH} \cdot \text{g}^{-1}$ à $18,6 \pm 0,9 \text{ g KOH} \cdot \text{g}^{-1}$ après 1000 h de vieillissement à 210 °C, représentant ainsi une augmentation de 80 % (Figure 56e).

L'indice d'iode de LaKSO a diminué de sa valeur initiale de $35,8 \pm 0,7 \text{ g I}_2 \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ à $27,4 \pm 0,8 \text{ g I}_2 \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ après 1000 h de vieillissement à 210 °C, ce qui représente une réduction de 25 % (Figure 56f).

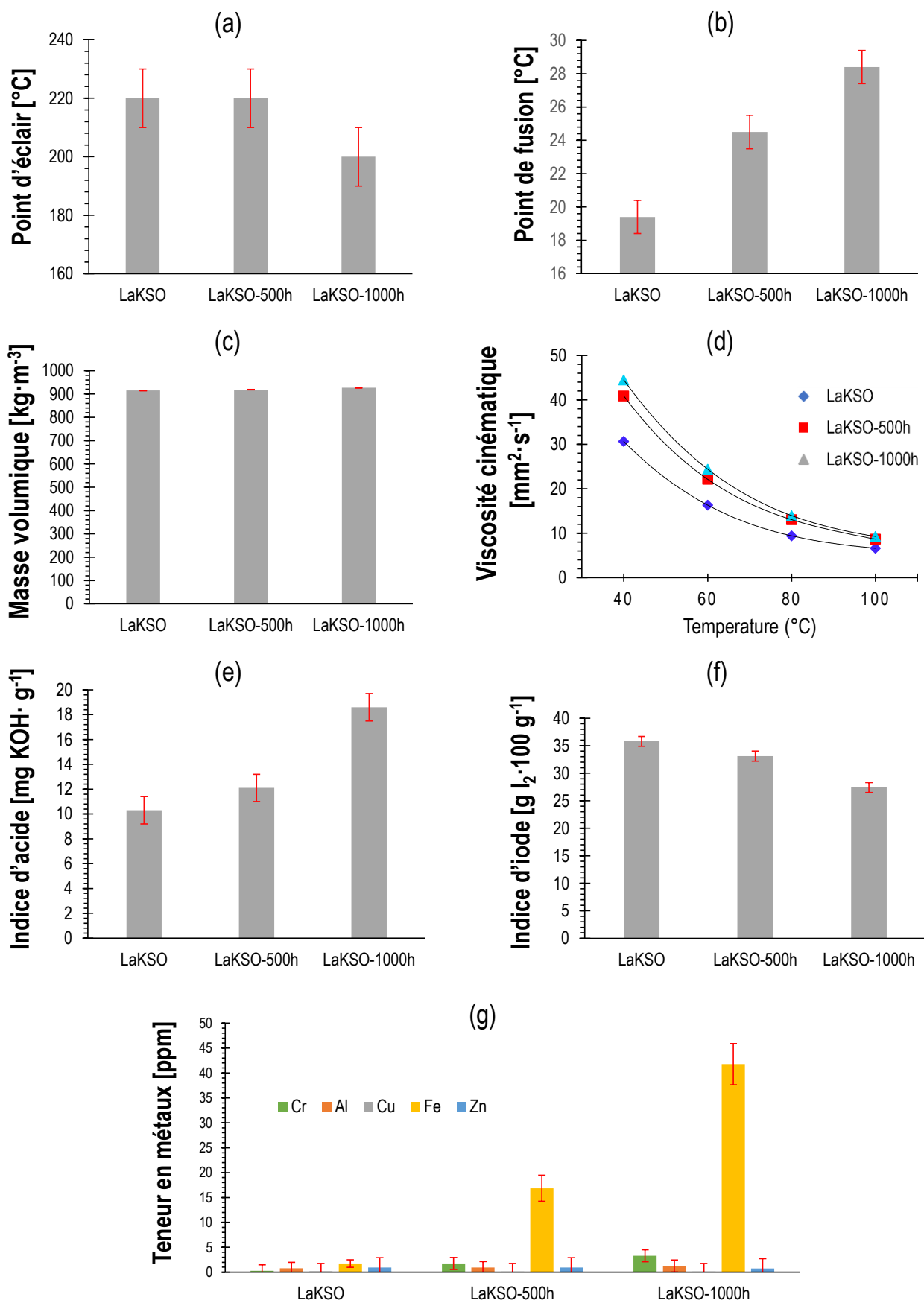


Figure 56: Évolution des propriétés thermophysiques et chimiques de LaKSO : a) point d'éclair, b) point de fusion, c) masse volumique 25 °C, d) viscosité cinématique, e) indice d'acide, f) indice d'iode, et g) teneur en métaux.

Par ailleurs, des traces de chrome et de fer ont été observées dans les échantillons de LaKSO, qui ont été vieillis dans les réacteurs en acier inoxydable 316L (Figure 56g). Ces teneurs en chrome et en fer ont progressivement augmenté avec le vieillissement, atteignant respectivement 10 fois et 24 fois leur valeur initiale dans l'huile neuve, après 1000 h de vieillissement.

IV.3.2. Dégradation thermique

IV.3.2.1. Cas de l'huile des graines de *Lannea microcarpa*

Les courbes TG et DTG des échantillons de LaMSO neuves et vieillis sont respectivement présentées aux figures 57a and 57b.

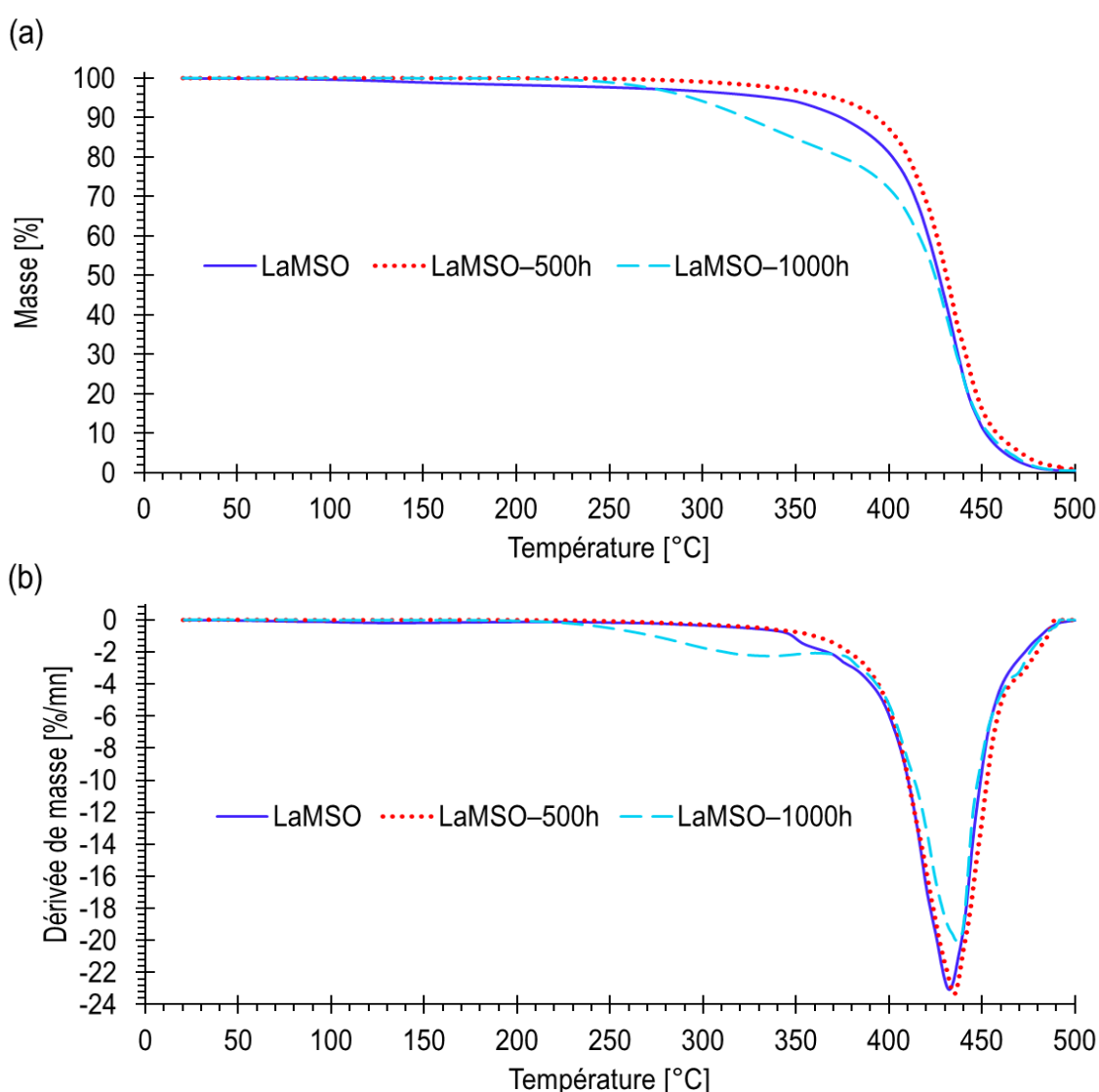


Figure 57: Courbes a) TG et b) DTG des échantillons de LaMSO neuves et vieillis

L'analyse révèle que l'échantillon de LaMSO vieilli pendant 500 h (LaMSO-500h) présente un profil TG similaire à celui de l'échantillon de LaMSO neuve. Tout comme l'échantillon de LaMSO neuve, sa perte

de masse se produit en une seule étape. En revanche, l'échantillon vieilli pendant 1000 h (LaMSO-1000h) présente un comportement distinct, avec une perte de masse produite en deux étapes : de 240 °C à 360 °C et de 374 °C à 490 °C. Par ailleurs, tous les échantillons de LaMSO libèrent moins de 3 % de composés volatils à 210 °C (Figure 57b). Toutefois, au-delà de 300 °C, une augmentation notable de l'émission de composés volatils a été observée pour tous les échantillons, atteignant environ 50 % à 430 °C. Les échantillons disparaissent complètement à 490 °C, après avoir suivi une tendance convergente à partir de 430 °C.

IV.3.2.2. Cas de l'huile des graines de *Lannea kerstingii*

Les figures 58a et 58b présentent respectivement les courbes TG et DTG des échantillons de LaKSO vieillis.

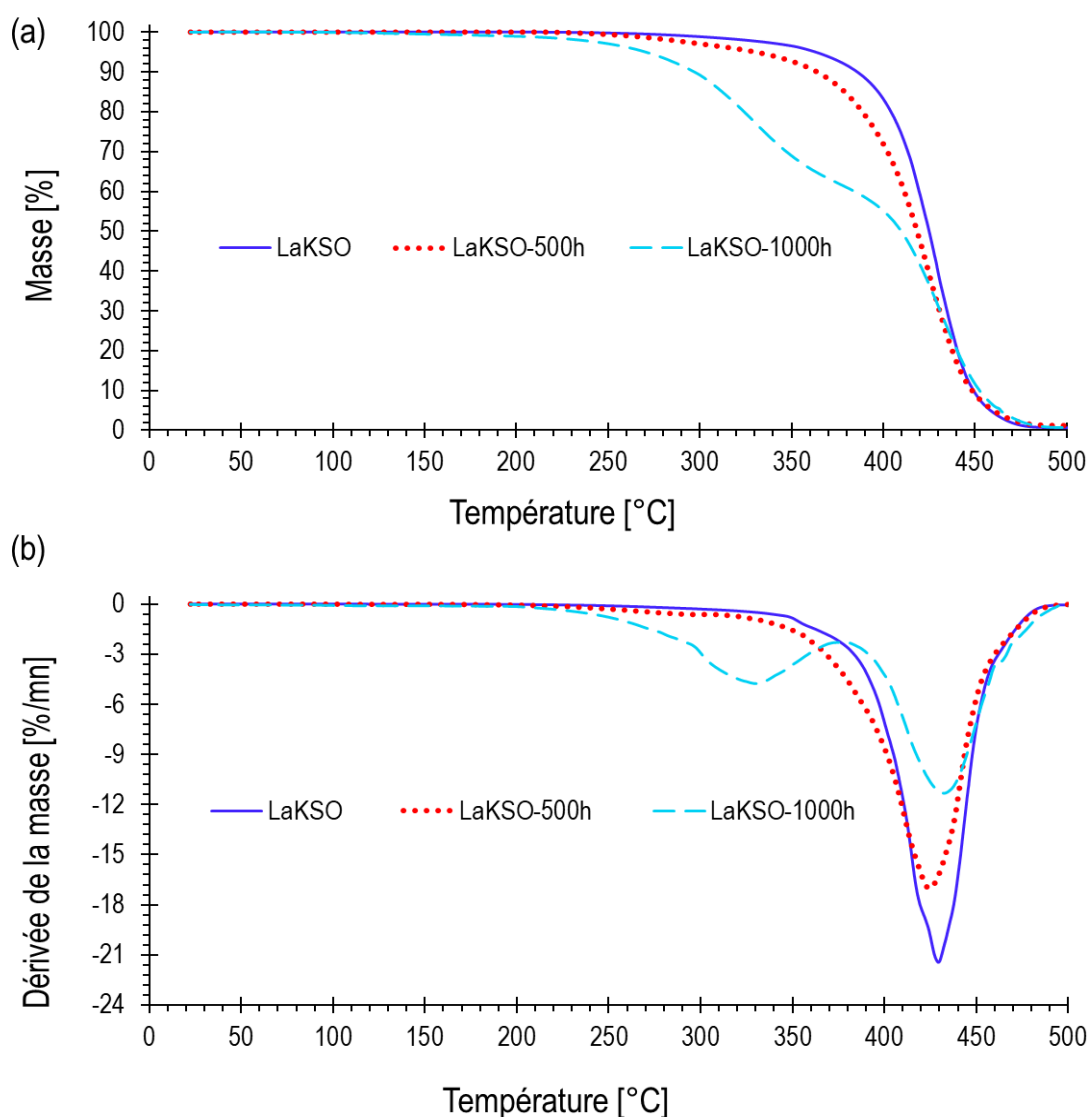


Figure 58: Courbes a) TG et b) DTG des échantillons de LaKSO neufs et vieillis

Le profil TG de l'échantillon de LaKSO vieilli pendant 500 h (LaKSO-500h) ressemble confondement au profil de LaKSO neuve, présentant également une perte de masse en une étape. Par contre, l'échantillon vieilli pendant 1000 h (LaKSO-1000h) présente un profil TG différent des deux derniers, avec une perte de masse se produisant en deux étapes entre deux plages de température : de 103 °C à 372 °C et de 384 °C à 490 °C. En outre, LaKSO-1000h était à 1,3 % de perte de masse à 210 °C (Figure 58b), pendant que les autres échantillons étaient à 0 % de perte de masse à la même température. Notablement, une augmentation significative de l'émission de composés volatils est observée pour tous les échantillons lorsque la température excède 270 °C. Cette augmentation est particulièrement accentuée pour LaKSO-1000h, dépassant les autres échantillons et atteignant environ 50 % de perte de masse à 412 °C. Les échantillons disparaissent complètement à 480 °C, après avoir suivi une tendance convergente à partir de 440 °C.

IV.3.3. Changement de la composition chimique avec le vieillissement

IV.3.3.1. Cas de l'huile des graines de *Lannea microcarpa*

Les spectres FTIR des échantillons de LaMSO neuf et vieillis sont présentés à la Figure 59. L'attribution des bandes utilisée dans cette étude est basée sur des analyses FTIR antérieures portant sur les huiles végétales [23,208,219–221]. Les résultats montrent un changement progressif de la composition de LaMSO avec le vieillissement. Ce changement est manifesté par la variation du niveau d'absorbance dans les spectres (Figure 59). En particulier, les pics d'absorption représentant les triglycérides (1743 cm^{-1} , 1158 cm^{-1} , 1116 cm^{-1} and 1098 cm^{-1}) [23,208,219–221], les acides gras insaturés (3005 cm^{-1}) [23,208,219–221] et les groupes aliphatiques à longue chaîne (720 cm^{-1}) [23,208,219–221] ont légèrement diminué après 1000 h de vieillissement, tandis que les pics d'absorption représentant les groupes méthylène et éthyle (2921 cm^{-1} , 2851 cm^{-1} , 1463 cm^{-1} , and 1236 cm^{-1}) [208,219–221], ont augmenté.

En outre, un changement spectral dans la gamme de nombre d'onde allant de 1720 cm^{-1} à 1700 cm^{-1} , indiquant la formation d'un nouveau pic représentant les acides gras libres, est progressivement observé avec le vieillissement (Figure 59), tandis que des pics d'absorption bien prononcés, indiquant des composés alcènes [23,208,219,222], ont été observés à 965 cm^{-1} dans les échantillons de LaMSO vieillis.

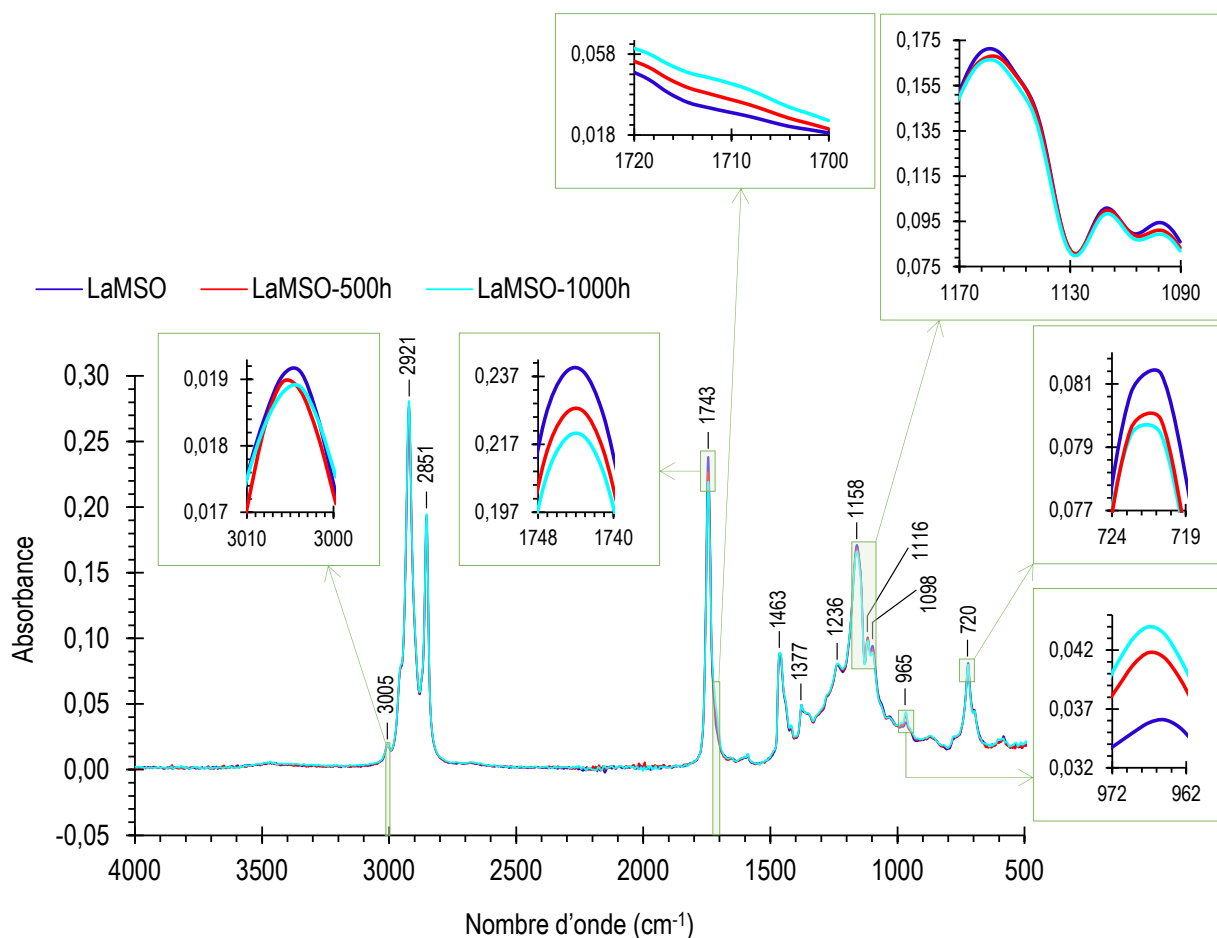


Figure 59: Spectres FTIR de LaMSO et de ses échantillons vieillis

IV.3.3.2. Cas de l'huile des graines de *Lannea kerstingii*

La Figure 60 présente les spectres FTIR de LaKSO et de ses échantillons vieillis dans des réacteurs scellés en acier inoxydable 316L. Comme mentionné plutôt, l'attribution des bandes de cette étude est basée sur des analyses FTIR antérieures des huiles végétales [23,208,219–221]. Les résultats indiquent des changements minimes au niveau des intensités d'absorption (Figure 60). Plus précisément, les pics liés aux triglycérides (1744 cm^{-1} , 1160 cm^{-1} , 1118 cm^{-1} and 1098 cm^{-1}) [23,208,219–221], aux acides gras insaturés (3005 cm^{-1}) [23,208,219–221] et aux groupes aliphatiques à longue chaîne (721 cm^{-1}) [23,208,219–221] ont légèrement diminué, tandis que les pics liés aux groupes méthylène et éthyle (2921 cm^{-1} , 2851 cm^{-1} , 1463 cm^{-1} , 1377 cm^{-1} and 1236 cm^{-1}) [48–51] ont augmenté avec le vieillissement.

Par ailleurs, un changement spectral dans la plage de longueur d'onde allant de 1720 cm^{-1} à 1700 cm^{-1} , indiquant la formation d'un nouveau pic représentant les acides gras libres, est progressivement observé avec le vieillissement (Figure 60), tandis qu'un pic d'absorption bien prononcé, indiquant des composés alcènes [23,208,219,222], est d'abord apparu à 966 cm^{-1} dans l'échantillon de LaKSO vieilli pendant 500 h, puis disparaît après 1000 h de vieillissement.

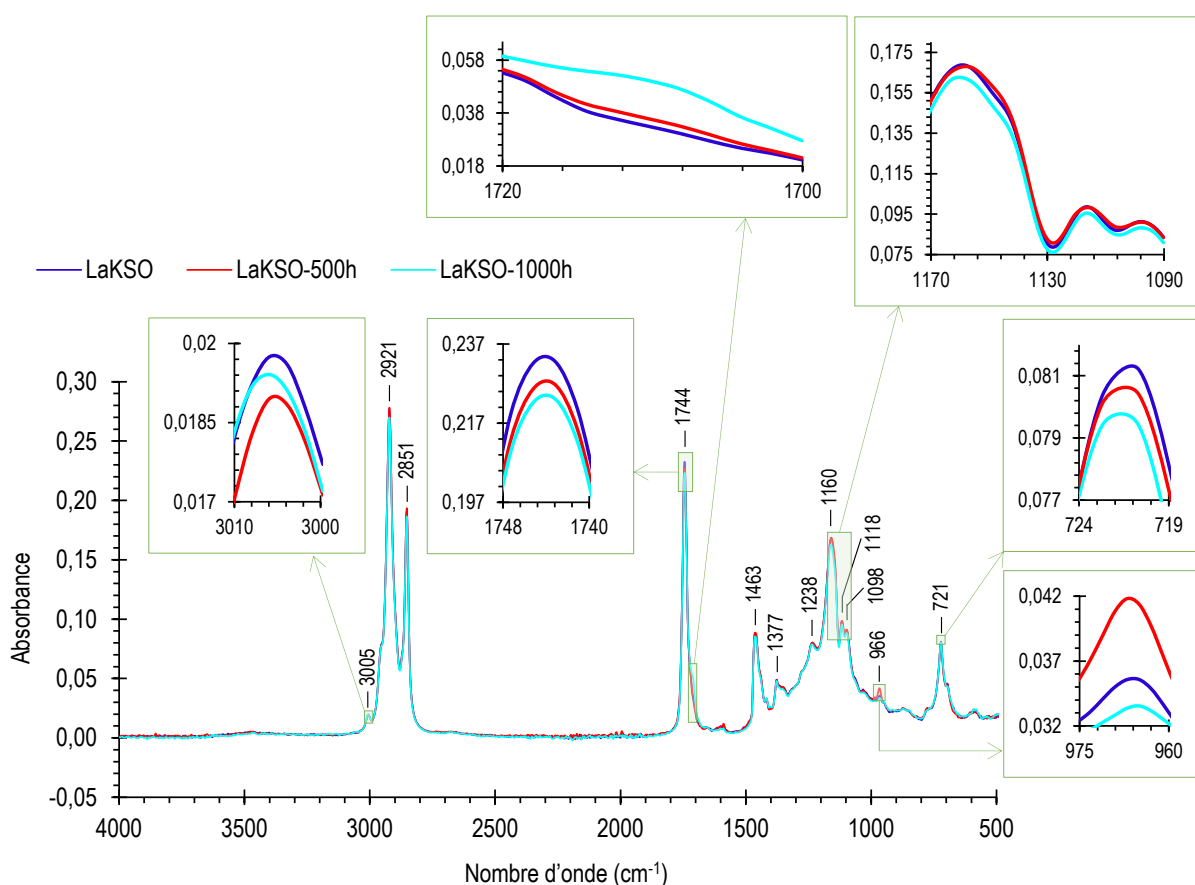


Figure 60: Spectres FTIR de LaKSO et de ses échantillons vieillis

V. Discussion

V.1. Comparaison des rendements d'extraction

Le Tableau 17 présente les paramètres d'extraction des huiles des graines de *Lannea microcarpa* (LaMSO) et de *Lannea kerstingii* (LaKSO). Ces paramètres mettent en évidence une efficacité légèrement supérieure de l'extraction au Soxhlet par rapport à l'extraction à la presse mécanique. Ce résultat est en accord avec l'extraction de l'huile des graines d'*Adansonia digitata* [223].

Par ailleurs, le rendement d'extraction de LaMSO est de 49,70 % au Soxhlet (Tableau 17), contre 45,50 % à la presse mécanique. Le rendement d'extraction au Soxhlet obtenu pour LaMSO est moins élevé que le rendement rapporté (64,90 %) par Bazongo et al. [168]. Cela suggère que les conditions spécifiques et la qualité des matières premières peuvent jouer un rôle important dans l'extraction. Pour LaKSO, le rendement est de 52,20 % au Soxhlet et de 48,00 % à la presse mécanique, avec un rendement rapporté de 57,85 % pour l'extraction au Soxhlet [189]. Ainsi, l'extraction au Soxhlet se révèle plus efficace que l'extraction à la presse mécanique pour les deux huiles, tant en termes de quantité d'huile extraite par kg de fruits que de rendement d'extraction. Toutefois, l'extraction à la presse permet d'obtenir une quantité

importante d'huile plus rapidement que l'extraction au Soxhlet. Les différences constatées dans les rendements d'extraction au Soxhlet indiquent que les conditions d'extraction et la qualité des graines sont tous des facteurs qui pourraient influencer les performances de chaque méthode d'extraction.

Tableau 17: Comparaison des rendements d'extraction des différentes méthodes d'extraction

Paramètre	LaMSO extraite à la presse (Présente étude)	LaMSO extraite au Soxhlet (Présente étude)	LaMSO extraite au Soxhlet [168]	LaKSO extraite à la presse (Présente étude)	LaKSO extraite au Soxhlet (Présente étude)	LaKSO extraite au Soxhlet [189]
Ratio d'extraction global ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ de fruits)	18,10	18,51	–	17,14	18,74	–
Rendement d'extraction (%)	45,50	49,70	64,90	48,00	52,20	57,85

V.2. Propriétés des deux huiles végétales (neuves)

Dans cette section, les propriétés thermophysiques et chimiques mesurées des deux huiles végétales extraites au Soxhlet sont d'abord comparées à celles des huiles extraites à la presse, puis aux données de la littérature (Tableau 18). Par la suite, les propriétés des deux huiles sont comparées à d'autres huiles végétales non comestibles, à savoir RJCO [23] et JaCCO [21], précédemment proposées comme HTFs ou TESMs pour les applications à haute température. La discussion comprend également une comparaison des propriétés des deux huiles, LaMSO et LaKSO, avec l'oxyde de diphenyle/biphényle (Dowtherm A, l'huile industrielle prédominante dans les centrales solaires à concentration en raison de sa grande stabilité thermique [224,225]) et Xceltherm 600. Xceltherm 600 est une huile minérale courante dans les applications CSP, et est également connue pour son profil de sécurité élevé et son rapport cout-efficacité, malgré les limites de stabilité thermique qui confinent généralement l'utilisation des huiles minérales à des températures inférieures à 300 °C [226]. Parmi les applications notables de Xceltherm 600 dans les centrales CSP commerciales aux États-Unis, on peut citer son utilisation dans la centrale Holaniku à Keahole Point [227–229], qui fonctionne à des températures inférieures à 180 °C (2 MW_{el}), ainsi que dans les centrales Saguaro ($1,16 \text{ MW}_{\text{e}}$) [230,231] et Thermesol 2 (2 MW_{e}) [230], qui fonctionnent à des températures allant jusqu'à 300 °C.

Tableau 18: Propriétés thermophysiques et chimiques de LaMSO (de la présente étude et d'autres [168,232]), LaKSO (de la présente étude et Ref. [189]), RJCO, JaCCO, Dowtherm A et Xceltherm 600.

Propriétés thermophysiques et chimiques	LaMSO extraite au Soxhlet (Présente étude)	LaMSO extraite à la presse (Présente étude)	LaMSO extraite au Soxhlet [168,232]	LaKSO extraite au Soxhlet (Présente étude)	LaKSO extraite à la presse (Présente étude)	LaKSO extraite au Soxhlet [189]	JaCCO [21,233]	RJCO [23,233]	Dowtherm A [224,234]	Xceltherm 600 [235,236]
Point d'éclair (°C)	220±10	220±10	—	220±10	220±10	—	220–240	220±10	113	193
Point de fusion (°C)	20,5±0,6	18,4±0,4	22,60±0,75	19,4±0,8	18,0±0,6	19,67±3,80	3	—	12	-29
Masse volumique à 25 °C (kg·m ⁻³)	900,2±0,1	909,7±0,6	—	914,8±0,5	915,6±0,8	—	—	—	1055,54	851
Masse volumique à 40 °C (kg·m ⁻³)	892,6±3,3	902,1±1,8	—	906,7±2,3	906,8±3,1	—	926	—	1044	841
Masse volumique à 210 °C (kg·m ⁻³)	806,463 ^a	—	—	814,9 ^a	—	—	802	—	898	736
Viscosité cinématique à 40 °C (mm ² ·s ⁻¹)	30,3±0,1	43,8±0,1	33,10±0,41	30,6±0,1	41,1±0,1	—	30–35	36,54±0,48	2,45	14,13
Viscosité cinématique à 100 °C (mm ² ·s ⁻¹)	6,7±0,1	8,5±0,1	—	6,6±0,1	8,2±0,1	—	6,45±0,65	7,97±0,20	1	2,24
Conductivité thermique à 40 °C (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0,329±0,004	—	—	0,330±0,01	—	—	0,165±0,002	—	0,1355	0,1343
Capacité thermique massique à 40 °C (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	2081±21	—	—	2150±22	2099±21	—	2150±81	2110±147	1630	2062
Capacité thermique massique à 210 °C (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	2638±26	—	—	2777±30	2723±27	—	2509	2375±166	2107	2643
Capacité de stockage thermique à 40 °C (kJ·m ⁻³ ·K ⁻¹) ^b	1858±19	—	—	1949±20	—	—	1 991	—	1702	1734
Capacité de stockage thermique 210 °C (kJ·m ⁻³ ·K ⁻¹) ^b	2127±21 ^a	—	—	2263±23 ^a	—	—	2012	—	1892	1947
Indice d'iode (g I ₂ ·100 g ⁻¹)	13,8±0,7	46,7±0,7	61,33±0,25	35,8±0,7	46,2±0,8	60,72±3,56	107±4,8	101,93±0,98	—	—
Indice d'acide (mg KOH·g ⁻¹)	8,8±0,4	11,5±0,9	1,21±0,01	10,3±0,8	13,7±1,1	0,64±0,05	11	1,73±0,04	< 0,2	—
Indice de peroxyde (mEq O ₂ ·kg ⁻¹)	40,8±0,5	24,6±0,5	1,48±0,11	19,3±0,8	23,7±0,9	0,99±0,05	23±1,4	68,34±0,42	—	—
Coût unitaire (FCFA·t ⁻¹) ^c	3,89·10 ⁶	3,89·10 ⁶	—	3,47·10 ⁶	3,47·10 ⁶	—	8·10 ⁵	1·10 ⁶	24,3·10 ⁶ ^c	10,2·10 ⁶ ^c
Coût de stockage thermique normalisé par °C (FCFA·°C·kWh ⁻¹) ^d	88 476	—	—	74 973	76 460	—	19 131	25 263	691 979	231 555

^a En supposant une évolution linéaire des masse volumiques de LaMSO et LaKSO, comme le suggèrent respectivement les équations (13) et (14).

^b La capacité de stockage thermique est déterminée en multipliant la capacité thermique spécifique par la masse volumique.

^c Le coût d'approvisionnement de l'huile, estimé pour une livraison à Ouagadougou, Burkina Faso, est détaillé dans l'Annexe F.

^d Cela représente le coût de stockage thermique pour une variation de température de 1 °C. Pour tout stockage thermique sensible sur une plage de température ΔT , le coût unitaire de stockage thermique (FCFA·kWh⁻¹) peut être calculé en divisant le coût de stockage thermique normalisé par °C (FCFA·°C·kWh⁻¹) par ΔT .

La méthode d'extraction n'a pas eu d'influence majeure sur les propriétés thermophysiques des deux huiles (Tableau 24), comme en témoignent leurs points d'éclair égaux et leurs masses volumiques, points de fusion et capacités thermiques massiques très similaires. Toutefois, les huiles extraites à la presse sont légèrement plus visqueuses, présentant également des indices d'acide légèrement plus élevés. Par ailleurs, étant deux huiles provenant de différentes espèces d'arbre du même genre, LaKSO et LaMSO présentent des propriétés très similaires, indépendamment de la méthode d'extraction.

L'indice d'acide et l'indice de peroxyde mesurés pour les deux huiles végétales, LaMSO et LaKSO, sont particulièrement élevés, surtout lorsqu'on les compare respectivement aux valeurs rapportées par Bazongo et al [168] et Ouilly et al. [189] (Tableau 18). Cette différence de propriétés chimiques peut être attribuée principalement au solvant utilisé pendant le processus d'extraction. Bazongo et al. [168] et Ouilly et al. [189] ont utilisé de l'éther de pétrole, dont la température d'évaporation est plus basse (40 °C) que celle de l'hexane (69 °C) utilisé dans la présente étude. L'indice de peroxyde élevé suggère que l'huile a subi une pré-oxydation, probablement au cours du processus d'extraction [185,237], car certains composés peroxydes, tels que les hydroperoxydes, commencent à se former dans l'intervalle de température allant de 80 °C à 90 °C. Lors de l'extraction des huiles LaMSO et LaKSO dans la présente étude, bien que le chauffe-ballon ait été réglé à 150 °C, des mesures ultérieures ont révélé que les températures des mélanges LaMSO/hexane et LaKSO/hexane variaient respectivement entre 73 °C et 96 °C, et 71 °C et 93 °C. Par ailleurs, l'indice d'acide élevé s'expliquerait par l'exposition des huiles à l'oxygène ou à la vapeur d'eau pendant ou après le processus d'extraction, entraînant ainsi la formation d'acides gras libres. En revanche, l'indice d'iode diminue avec l'oxydation, ce qui expliquerait les faibles indices d'iode des deux huiles de la présente étude par rapport aux données de la littérature (Tableau 18). Les indices d'iode mesurés, quelle que soit la méthode d'extraction, classent LaMSO et LaKSO dans la catégorie des huiles saturées et non siccatives [149], ce qui indique qu'elles peuvent être stockées à long terme sans détérioration significative à température ambiante.

Le profil de dégradation TG de LaMSO et LaKSO (Figure 54) est similaire à celui de nombreuses huiles végétales, notamment l'huile de tournesol [152], l'huile de Roki [152], JaCCO [21] et RJCO [23]. Il montre que la décomposition thermique majeure des huiles végétales se produit généralement à une température bien supérieure à la température cible (210 °C) de la présente application. Cependant, à 210 °C, une perte de masse de 3 % a déjà été observée pour LaMSO, ce qui suggère la libération de composés volatiles qui pourraient être soit de la vapeur d'huile ou d'autres vapeurs, comprenant éventuellement de l'eau ou des produits de dégradation, en raison de la pré-oxydation [21]. D'autres analyses sont nécessaires pour mieux comprendre ces phénomènes. Quant à LaKSO, aucune émission de composés volatiles n'a été observée jusqu'à 270 °C. La pré-oxydation des deux huiles étudiées est difficile à

confirmer avec leur spectre FTIR (figures 59 et 60), qui est similaire à celui de diverses huiles végétales [23,208,219–221]. En effet, dans la gamme de nombre d'onde allant de 1500 cm^{-1} à 1400 cm^{-1} , il y a plusieurs pics d'absorption négligeables, peu prononcés, qui pourraient inclure le pic d'absorption des hydroperoxydes, généralement observé à 1444 cm^{-1} [208]. Une analyse chromatographique permettrait d'apporter plus de précision à cette observation.

Parmi les huiles végétales, LaMSO et LaKSO se distinguent par leur conductivité thermique à $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, qui vaut deux fois celle de JaCCO (Tableau 18). Leurs autres propriétés thermophysiques mesurées (la viscosité, la masse volumique et la capacité thermique spécifique) sont similaires à celles des autres huiles végétales [149–152,238], y compris les huiles non comestibles JaCCO [21] et RJCO [23], qui ont précédemment été proposées comme HTFs et TESMs dans des applications à température élevée. Toutefois, JaCCO et RJCO présentent des indices d'iode plus élevés (Tableau 18), indiquant une plus grande insaturation et sensibilité à l'oxydation par rapport aux deux huiles, LaMSO et LaKSO. L'indice d'acide relativement faible du RJCO est probablement dû à la neutralisation de l'acidité de l'huile utilisée par Gomna et al [23]. Ce qui n'était pas le cas avec JaCCO [21] et les deux huiles étudiées, et il semble que la neutralisation de l'acidité JaCCO n'ait pas eu d'impact significatif sur ses propriétés thermophysiques lorsque nous comparons les propriétés de JaCCO à celles de RJCO. Par conséquent, la neutralisation de LaMSO (ou également LaKSO) aurait pu être imaginée si l'indice d'acide était considéré comme un problème. Pour le moment, le principal avantage de JaCCO et RJCO par rapport aux deux huiles étudiées est leur disponibilité en quantité grâce à la maîtrise et à l'économie circulaire déjà présentes localement pour leur production. Autrement, les trois huiles sont durables, renouvelables, respectueuses de l'environnement et possèdent des propriétés thermophysiques similaires et pertinentes pour une utilisation en tant que fluides caloporteurs ou de stockage thermique, LaMSO et LaKSO étant les moins sensibles à l'oxydation et plus chers.

Les propriétés thermophysiques des deux huiles LaMSO et LaKSO mettent en évidence leur potentiel pour une utilisation en tant que fluides caloporteurs ou de stockage thermique (Tableau 18). À $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, LaMSO et LaKSO présentent respectivement $1858\pm 19\text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$ et $1949\pm 20\text{ J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$ comme capacités thermiques volumiques, soient respectivement 10 % et 15 % de plus que celle du Dowtherm A à la même température. En supposant que les masses volumiques des deux huiles suivent les tendances linéaires proposées (équations (13) et (14)), LaMSO et LaKSO offrent une capacité thermique volumique (respectivement $2127\pm 21\text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$ et $2263\pm 23\text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$) légèrement supérieure d'environ 20 % à celle de Dowtherm A à $210\text{ }^{\circ}\text{C}$. Cela suggère que les deux huiles offrent une densité de stockage thermique similaire ou légèrement supérieure à celle de Dowtherm A dans la plage de température considérée pour la présente étude. Les deux huiles doivent cette supériorité à leur capacité thermique

spécifique, qui surpassent celle de Dowtherm A de 20 % à 35 %. Par ailleurs, les deux huiles présentent également un point d'éclair supérieur de plus de 100 °C à celui de Dowtherm A, ce qui réduit le risque d'incendie ou d'inflammation en présence d'une source de chaleur.

Bien que les deux huiles végétales étudiées aient un point de fusion plus élevé que celui de Dowtherm A, cela ne cause pas de problème dans le contexte de l'application visée. La température ambiante descend rarement en dessous de 20 °C dans la région intertropicale africaine et ne reste pas en dessous de ce niveau pendant une période prolongée. Cependant, LaMSO et LaKSO présentent une viscosité cinématique plus élevée que Dowtherm A dans la plage de température allant de 40 °C à 100 °C. Par conséquent, il faudrait plus d'énergie pour faire circuler le même volume de chacune de ces deux huiles, que celui de Dowtherm A, en particulier lors des démarrages à froid. Néanmoins, on s'attend à ce que la différence de viscosité diminue de manière significative avec l'augmentation de la température, comme cela a été observé avec de nombreuses huiles végétales [21,148,150,238]. Cette convergence conduit à une consommation électrique similaire [153], surtout si l'on considère que le volume circulé de ces deux huiles serait inférieur en raison de leur densité de stockage thermique volumique plus élevée. En somme :

(i) LaMSO (également LaKSO) offre une densité de stockage thermique similaire, où même légèrement supérieure, à celle de Dowtherm A.

(ii) Le débit nécessaire pour transférer une quantité de chaleur donnée avec LaMSO (également LaKSO) est similaire, voire inférieur, à celui de Dowtherm A.

(iii) LaMSO (également LaKSO) stocke et récupère l'énergie thermique 2,5 fois plus vite que Dowtherm A à 40 °C, et l'on s'attend à ce que ce soit approximativement le cas jusqu'à 210 °C, comme observé pour plusieurs huiles végétales [152,239].

(iv) Il n'y a pas de risque d'inflammabilité lorsque LaMSO (également LaKSO) est utilisé à des températures allant jusqu'à 210 °C.

(v) Malgré sa viscosité élevée à 40 °C, la puissance nécessaire pour pomper LaMSO (ou également LaKSO) peut être similaire à celle de Dowtherm A à 210 °C.

(vi) Le risque de solidification de LaMSO neuve (également LaKSO neuve) dans les canalisations ou les réservoirs à température ambiante est très faible dans la région du Sahel.

(vii) Le coût d'approvisionnement de LaMSO (également LaKSO) est environ 8 fois inférieur à celui de Dowtherm A dans le contexte des pays sahéliens.

Par ailleurs, les deux huiles LaMSO et LaKSO présentent une capacité thermique spécifique similaire à celle de Xceltherm 600 dans la plage de température allant de 30 °C à 300 °C (Tableau 18). Toutefois, en raison de leur masse volumique plus élevée, les capacités thermiques volumiques de LaMSO et LaKSO sont respectivement 10 % et 15 % supérieures à celle de Xceltherm 600 à 210 °C, si l'on considère les tendances linéaires proposées (équations (13) et (14)) pour les masses volumiques. Les principaux avantages de Xceltherm 600 par rapport aux deux huiles sont son point de fusion relativement bas (-29 °C) et sa faible viscosité. La viscosité de Xceltherm 600 est approximativement 3 fois inférieure à celle de chacune des deux huiles à 100 °C, mais on s'attend à ce que les trois huiles aient une viscosité similaire à 210 °C [150]. Par ailleurs, LaMSO, également LaKSO, a le point d'éclair le plus élevé, la conductivité thermique la plus élevée à 40 °C et le coût d'approvisionnement le plus bas par rapport à Xceltherm 600.

Bien que cette discussion n'aborde pas les aspects environnementaux de l'utilisation de LaMSO et LaKSO comme fluides caloporteurs ou de stockage thermique, il est crucial de noter que l'importation et l'utilisation d'huiles conventionnelles comme Dowtherm A ou Xceltherm 600 dans un pays comme le Burkina Faso présentent plusieurs défis environnementaux, à savoir la gestion des déchets, la pollution, l'impact sur la biodiversité, etc. [240]. L'adoption d'huiles végétales d'origine locale, comme LaMSO ou LaKSO, atténue ces problèmes et offre des avantages sociaux et économiques [17].

V.3. Analyse de la stabilité thermique des deux huiles végétales avec le vieillissement

L'analyse thermogravimétrique (ATG) effectuée après 1000 h de vieillissement isotherme à 210 °C a révélé une stabilité thermique notable pour LaMSO (figures 57a et 57b) et LaKSO (figures 58a et 58b), avec moins de 3 % de composés volatils libérés par les échantillons à cette température. Cependant, des différences significatives ont été observées dans le comportement des échantillons vieillis au cours de l'ATG, en particulier au-dessus de 300 °C, suggérant d'une part des changements dans la composition chimique des deux huiles et d'autre part la formation de produits de dégradation tels que les composés alcènes, comme le montre les pics d'absorption bien prononcés approximativement à 965 cm⁻¹ dans les spectres FTIR des échantillons de LaMSO (Figure 59) et LaKSO (Figure 60) vieillis. Toutefois, pour ce qui concerne LaKSO, ce pic a significativement diminué après 1000 h de vieillissement, indiquant que ces composés alcènes se sont transformés en d'autres substances non identifiées. Ces changements observés dans la composition chimique des deux huiles ont été corroborés par des altérations de diverses propriétés avec le vieillissement, notamment la réduction du point d'éclair et de l'indice d'iode, ainsi que l'augmentation du point de fusion, de la viscosité, et de l'indice d'acide.

Le point d'éclair des deux huiles, LaMSO et LaKSO, est resté relativement élevé (respectivement 185 ± 10 °C et 200 ± 10 °C) même après 1000 h de vieillissement, et est toujours supérieur au point d'éclair de Dowtherm A (113 °C). Cette diminution suggère la décomposition des triglycérides contenus dans les huiles en acides gras libres par hydrolyse, oxydation ou l'action combinée des deux, ce qui est cohérent avec l'augmentation observée de leur indice d'acide avec le vieillissement [241] (figures 55e et 56e). Cela a également été corroboré par la diminution des pics d'absorption représentant les triglycérides (observés approximativement à 1743 cm^{-1} , 1158 cm^{-1} , 1116 cm^{-1} et 1098 cm^{-1}) avec le vieillissement (figures 59 et 60), tandis qu'un épaulement spectral représentant les acides gras libres [208] a été observé dans la gamme de nombre d'onde allant de 1720 cm^{-1} à 1700 cm^{-1} . Les études antérieures [21,148,149] sur les huiles végétales ont également rapporté une baisse du point d'éclair avec le vieillissement, pendant que l'indice d'acide augmente.

L'augmentation du point de fusion des deux huiles LaMSO et LaKSO (respectivement $38,8\pm 0,2$ °C et $28,4\pm 1,0$ °C au terme de 1000 h de vieillissement), est attribuée à la saturation des huiles, mise en évidence par la réduction de leur indice d'iode (figures 55f et 56f) [148,149,242], et pourrait s'expliquer par la migration des acides gras insaturés vers les acides gras saturés [149] quand nous savons que LaMSO et LaKSO contiennent plus de 50 % d'acides gras insaturés [168,189]. Cette hypothèse a été confirmée par l'intensité accrue des pics d'absorption liés aux groupes méthylènes et éthyliques (observés approximativement à 2921 cm^{-1} , 2851 cm^{-1} , 1463 cm^{-1} , and 1236 cm^{-1}), qui incluent probablement ceux formant les acides gras saturés contenus dans les deux huiles [168,208,220]. Toutefois, l'augmentation du point de fusion présente un risque de solidification pour les deux huiles dans les conduites ou réservoirs dans les périodes de basse température.

La masse volumique des deux huiles n'a pas connu de variation notable après le vieillissement. Ce qui indique un impact minimal sur les performances des deux huiles comme fluides caloporteurs ou de stockage thermique, similaire aux observations faites avec RJCO [23].

Malgré l'augmentation de la viscosité des deux huiles à basse température avec le vieillissement, la viscosité des échantillons d'huiles vieillis est restée proche de celle des huiles neuves à 100 °C (figures 55d et 56d), et devrait être assez similaire à ces dernières à des températures plus élevées [148,150]. Des observations similaires ont été faites pour RJCO [23] avec le vieillissement, ainsi que d'autres huiles végétales [148]. L'augmentation de la viscosité avec le vieillissement est la conséquence de la dégradation des peroxydes en polymères dans les huiles vieilles [160,185], car les peroxydes apparaissent lorsque les huiles commencent à s'oxyder et se décomposent généralement autour de 150 °C [148]. Au-dessus de cette température, aucune accumulation de peroxydes n'est observée. Par

ailleurs, la saturation des huiles avec le vieillissement explique également l'augmentation de leur viscosité à basse température [148,150].

La capacité thermique spécifique et la conductivité thermique des échantillons de LaMSO et LaKSO vieillis, n'ont pas été directement mesurées, mais on s'attend à ce qu'elles soient similaires à celles de LaMSO et LaKSO neuve sur la base du comportement typique observé chez les huiles végétales [148–150,152,239]. Par conséquent, LaMSO et LaKSO devraient présenter une capacité thermique spécifique et une conductivité thermique pratiquement stable, même après le vieillissement, comme l'ont démontré respectivement les études sur RJCO [23] et l'huile de colza [149].

Par ailleurs, LaKSO n'a pas présenté d'incompatibilité majeure avec l'acier inoxydable 316L si nous comparons son comportement de vieillissement thermique avec celui de LaMSO présenté dans la section (IV.3.1.1) du présent chapitre. Par conséquent, LaKSO peut être utilisée dans des réservoirs et conduites en acier inoxydable 316L comme fluide caloporteur ou de stockage thermique. Le chapitre 4 apporte plus de détails par rapport à cette compatibilité.

V.4. Limites de l'étude

Cette étude présente certaines limites qui suggèrent des pistes de recherche pour affiner et développer les résultats. Premièrement, certaines propriétés thermophysiques, telles que la masse volumique, la conductivité thermique et la viscosité, ont été mesurées à des températures inférieures à 210 °C. Plus précisément, la masse volumique et la conductivité thermique ont été mesurées jusqu'à 40 °C, tandis que la viscosité a été mesurée jusqu'à 100 °C. Bien que l'extrapolation de ces propriétés à des températures plus élevées corresponde à celles d'autres huiles végétales [150], il est nécessaire de les valider par des mesures directes à ces températures pour confirmer le comportement prévu.

Deuxièmement, l'estimation des coûts de production de LaMSO et LaKSO est basée sur une extraction à petite échelle, car les deux huiles ne sont pas encore produites à grande échelle au Burkina Faso. Cette limitation peut affecter la précision de l'analyse économique, en raison des économies d'échelle qui pourraient modifier les structures de coûts en cas de production à grande échelle. En outre, bien que les deux huiles ne soient pas actuellement consommées par la population au Burkina Faso, des études antérieures [168,189] suggèrent qu'elles pourraient l'être, compte tenu de leurs propriétés nutritionnelles. Si LaMSO et LaKSO deviennent des huiles comestibles dans l'avenir, cela pourrait influencer leur coût, soit en les augmentant en raison d'une demande plus élevée, soit en les diminuant si la production à grande échelle entraîne une réduction des coûts. Toutefois, les coûts actuels estimés pour les deux huiles LaMSO et LaKSO, respectivement 3890 FCFA·kg⁻¹ et 3470 FCFA·kg⁻¹, sont plus élevés que ceux des

huiles végétales comestibles couramment utilisées dans la région, ce qui suggère que l'analyse est conservatrice, *a priori*, à cet égard.

Troisièmement, la comparaison économique fournie dans cette étude est préliminaire, car elle n'aborde pas de manière exhaustive les coûts du cycle de vie [153]. Des facteurs tels que la fréquence de remplacement des huiles, qui dépend de la stabilité thermique, et les coûts d'élimination finale n'ont pas été pris en compte de manière approfondie.

De plus, la composition et la qualité des huiles végétales peuvent être influencées par la méthode d'extraction utilisée. Dans cette étude, ce sont les huiles extraites au Soxhlet qui ont été étudiées comme fluides caloporteurs ou de stockage thermique. Bien que ce processus d'extraction ait pu induire une certaine pré-oxydation, en raison de la température d'extraction atteignant 96 °C, la similarité des résultats entre les huiles extraites au Soxhlet et à la presse suggère un impact limité. Néanmoins, d'autres études utilisant différentes méthodes d'extraction pourraient permettre de mieux comprendre les propriétés et la stabilité des deux huiles.

Enfin, la caractérisation de la structure et de la composition des huiles et leurs échantillons vieillis s'est limitée aux analyses thermogravimétriques et infrarouges à transformée de Fourier, afin de donner un aperçu des produits de dégradation apparaissant au fil du vieillissement. Une caractérisation plus poussée de la structure et de la composition des échantillons d'huiles vieillis est nécessaire pour obtenir une compréhension plus complète de la dégradation de LaMSO et LaKSO au fil du vieillissement.

VI. Conclusion

L'huile des graines de *Lannea microcarpa* (LaMSO) et l'huile des graines de *Lannea kerstingii* (LaKSO) ont été identifiées comme potentielles candidates pour les applications de fluide caloporteur (HTF) et de matériau de stockage thermique (TESM) à température élevée, sur la base d'une réputation notable de grande stabilité à l'oxydation. Dans cette étude, LaMSO et LaKSO ont été étudiées comme fluides caloporteurs ou de stockage thermique pour la microcentrale CSP4Africa, ce qui constitue une première exploration de ce genre pour ces deux huiles. L'objectif était d'évaluer leurs propriétés physicochimiques afin de mieux comprendre leur comportement thermique et capacité à être utilisées comme HTF et TSM jusqu'à 210 °C.

La masse volumique de LaMSO (également LaKSO) reste largement stable tout au long du processus de vieillissement, et bien que la viscosité cinématique augmente à 40 °C avec le vieillissement, elle tend à diminuer avec la température, se rapprochant ainsi de la viscosité de LaMSO (également LaKSO) neuve. Le point d'éclair de LaMSO (également LaKSO) est relativement élevé (220 ± 10 °C), mais il diminue avec le vieillissement, jusqu'à 185 ± 10 °C (200 ± 10 °C pour LaKSO) après 1000 h à 210 °C. L'analyse thermogravimétrique a révélé une stabilité thermique notable après 1000 h de vieillissement à 210 °C, avec une libération négligeable de composés volatils pour les deux huiles.

Les propriétés thermophysiques de LaMSO (également LaKSO) lors du vieillissement à 210 °C sont comparables à celles de JaCCO et RJCO, qui ont précédemment été proposées comme fluide de transfert et de stockage thermique dans les applications à haute température. Cependant, les deux huiles présentent une conductivité thermique deux fois plus élevée que celle de JaCCO et RJCO à 40 °C. Bien que LaMSO (également LaKSO), soit moins sensible à l'oxydation, elle présente aussi un coût plus élevé.

LaMSO et LaKSO ont également montré plusieurs avantages par rapport aux huiles thermiques traditionnelles telles que le Dowtherm A et le Xceltherm 600. Les résultats mettent en évidence leur capacité thermique massique supérieure, qui est environ 5 % et 30 % plus élevée que celle de Dowtherm A et Xceltherm 600 à 210 °C, respectivement. LaMSO et LaKSO présentent également le point d'éclair le plus élevé, ce qui renforce leur profil de sécurité, et offrent la conductivité thermique la plus élevée à 40 °C et le coût d'approvisionnement le plus bas.

Bien que les deux huiles présentent une viscosité plus élevée que celle de Dowtherm A et Xceltherm 600, augmentant les besoins en énergie pour le pompage, cet inconvénient est atténué par la consommation d'énergie similaire attendue à des températures de fonctionnement plus élevées, en raison de la plus grande densité de stockage thermique. Alors que le risque de solidification dans les conduites ou les réservoirs dans les climats sahéliens reste minime, le principal défi réside dans l'augmentation de leur

point de fusion induite par le vieillissement (respectivement $38,8 \pm 0,2$ °C et $28,4 \pm 1,0$ °C pour LaMSO et LaKSO après 1000 h de vieillissement), ce qui pose des risques potentiels de solidification des deux huiles à des températures plus basses. En outre, les avantages environnementaux et économiques de l'utilisation de LaMSO et LaKSO comme fluides caloporteurs ou de stockage thermique, en particulier en raison de leur disponibilité locale et de leur faible coût, s'alignent bien avec les objectifs de durabilité pour les solutions énergétiques dans la région du Sahel.

À la lumière de ces résultats, LaMSO et LaKSO présentent un réel potentiel pour leur utilisation comme fluides caloporteurs ou de stockage thermique sur un large spectre de températures allant des conditions ambiantes à 210 °C. Les futures recherches pourraient porter sur l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la température et du vieillissement, ainsi que le vieillissement dynamique des deux huiles pour évaluer leurs performances de fluide caloporteur ou de stockage thermique dans les conditions réelles de fonctionnement de la microcentrale CSP4Africa.

**Chapitre 4 : Analyse de la compatibilité des huiles des
graines de *Lannea microcarpa* et de *Lannea kerstingii*
avec les métaux courants dans l'industrie à température
élevée**

I. Introduction

Dans le chapitre précédent, l'huile des graines de *Lannea microcarpa* (LaMSO) et l'huile des graines de *Lannea kerstingii* (LaKSO) ont été investiguées comme fluides caloporteurs ou de stockage thermique dans les applications à température élevée, telles que le solaire à concentration. Les deux huiles ont présenté des propriétés thermophysiques prometteuses, ainsi qu'une stabilité thermique notable [167,243], faisant d'elles des candidates potentielles pour de telles applications. Cependant, pour envisager leur intégration dans les infrastructures industrielles existantes, il est essentiel d'évaluer au préalable leur compatibilité avec les métaux utilisés dans ces systèmes. En effet, l'efficacité et la durabilité de ces huiles dans les systèmes industriels dépendent non seulement de leurs propriétés thermophysiques, mais également de leur compatibilité avec les métaux en présence [244–247].

Alors que très peu d'études [24,245] se sont intéressées à la compatibilité des métaux industriels courants avec les huiles végétales à des températures élevées, plusieurs études [244,246–252] ont exploré le comportement des métaux industriels courants face à la corrosion en présence de biodiesels issus d'huiles végétales. La plupart de ces études ont évalué la corrosion par des mesures de perte de masse après des tests d'immersion statique [244,246]. La température, la composition du fluide et la durée d'exposition sont tous des facteurs clés qui peuvent influencer de manière significative le taux et le type de corrosion des métaux à la fois [244,246,253].

La littérature rapporte qu'en présence des produits de dégradations des huiles végétales, l'acier inoxydable 316L montre une forte résistance à la corrosion grâce à sa couche d'oxyde protectrice, tandis que des métaux tels que l'acier galvanisé, le fer et le cuivre sont plus vulnérables [24,245]. Après 1656 h d'immersion isotherme de plusieurs métaux dans RJCO à 210 °C, Gomna [24] a suggéré que l'acier inoxydable 316L est particulièrement résistant, suivi du cuivre et de l'aluminium, tandis que l'acier galvanisé et le fer sont les moins compatibles. Plus récemment, Andari et al. [245] ont réalisé des tests de corrosion avec divers grades d'huiles végétales à 220 °C pendant 120 h. Les résultats ont montré des corrélations linéaires entre l'acidité des huiles et les taux de corrosion dans l'acier faiblement allié et l'acier au carbone. Notamment, l'acier inoxydable 316L présente une excellente résistance à la corrosion, peu importe la concentration en acide gras libre des huiles végétales. Bien que certaines pistes aient émergé de ces études [24,245], des recherches supplémentaires sont nécessaires pour évaluer la stabilité à long terme et soutenir la sélection des métaux les plus adaptés aux systèmes utilisant les huiles végétales à des températures élevées. En effet, même si l'acier inoxydable 316L convient dans de nombreuses situations, explorer d'autres matériaux permet de répondre à des besoins variés en fonction du coût, des propriétés spécifiques ou des exigences des applications. Par exemple, l'acier inoxydable est relativement cher par rapport à d'autres matériaux comme l'aluminium, le cuivre et l'acier galvanisé. Dans

des applications où le coût est un facteur déterminant, utiliser des matériaux moins coûteux peut offrir un compromis acceptable si des conditions d'exploitation permettent leur utilisation pendant une durée raisonnable avant que la corrosion ne devienne un problème critique. De plus, chaque métal a des propriétés mécaniques et thermiques spécifiques qui peuvent influencer le choix des matériaux dans un système. Par exemple, l'aluminium, en dépit d'une résistance à la corrosion inférieure à celle de l'acier inoxydable, est bien plus léger, ce qui peut être un avantage dans des applications où la légèreté est cruciale. Le cuivre, de son côté, a une conductivité thermique nettement supérieure à celle de l'acier inoxydable, ce qui peut être souhaitable dans certaines applications de transfert de chaleur.

Ce chapitre a pour objectif d'analyser la compatibilité des huiles des graines de *Lannea microcarpa* et *Lannea kerstingii* avec quatre métaux couramment utilisés dans les infrastructures industrielles à température élevée, y compris les centrales solaires à concentration : l'acier inoxydable (316L), l'aluminium (Al), le cuivre (Cu), et l'acier galvanisé (GS). Cette étude se base sur les tests d'immersion des métaux dans les huiles à température ambiante sur une année, ainsi qu'à 210 °C pendant 500 h et 1000 h. Le test à température élevée (210 °C) a été dicté par les conditions opératoires de la microcentrale CSP4Africa, tandis que le test à température ambiante est justifié par le stockage des huiles et les arrêts de longue durée des systèmes supposés les utiliser. L'objectif de ces tests est de déterminer la résistance des métaux à la corrosion, ainsi que les effets potentiels de ces interactions sur les propriétés thermophysiques des deux huiles.

II. Matériel et méthodes

II.1. Matériels

Dans cette étude, les matériaux suivants ont été utilisés :

- Les huiles des graines de *Lannea microcarpa* et *Lannea kerstingii* extraites au Soxhlet et à la presse, selon la procédure décrite respectivement dans les sections (III.1.1) et (III.1.2) du chapitre 3. Les propriétés thermophysiques et chimiques des deux huiles ont été initialement mesurées, car elles sont influencées par divers paramètres, notamment la qualité de la matière première, les conditions de stockage, etc.
- Différents échantillons métalliques d'une longueur de 5 cm, d'une largeur de 1 cm et d'une épaisseur variant de 1 mm à 3 mm : acier inoxydable 316L, aluminium, cuivre et acier galvanisé.
 - (i) L'acier inoxydable 316L (3 mm d'épaisseur) a été obtenu auprès de la société Köhler en Allemagne.
 - (ii) Les trois autres échantillons métalliques (1 mm d'épaisseur), à savoir l'aluminium, le cuivre et l'acier galvanisé, ont été obtenus localement auprès d'entreprises spécialisées.

- Papiers abrasifs d'une rugosité de P60
- Rubans de téflon de dimensions 1,9 cm × 1500 cm × 0,02 cm
- Tubes cylindriques en verre borosilicaté d'un volume de 30 mL
- Couvercle circulaire en verre de 3 cm de diamètre
- Balance analytique Precisa XT 220A : plage de pesée allant de 0 g à 220 g, avec une précision de 0,0001 g

II.2. Procédure expérimentale

La procédure expérimentale adoptée dans cette étude est résumée à la Figure 61.

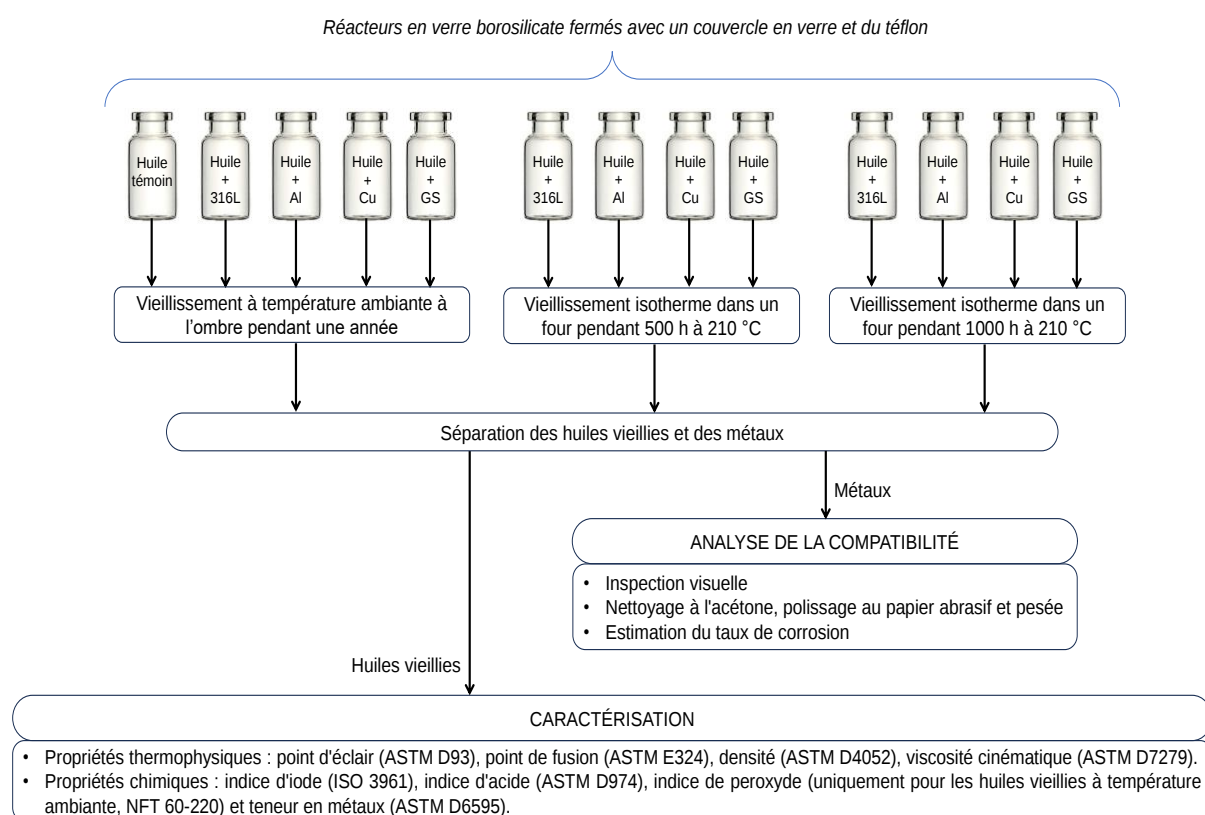


Figure 61: Résumé de la procédure expérimentale adoptée pour l'analyse de la compatibilité des deux espèces d'huile avec les métaux.

II.2.1. Test de corrosion par immersion des métaux

La méthode présentée par ASTM G31 [253] a été adaptée pour analyser la compatibilité des deux huiles avec les métaux courants dans l'industrie à température élevée. Les métaux concernés par l'étude sont les suivants : acier inoxydable 316L (316L), aluminium (Al), cuivre (Cu) et acier galvanisé (GS) (Figure 62). Dans la méthode proposée par ASTM G31 [253], les échantillons métalliques doivent être préparés conformément à ASTM G1 [254], suivis de leur pesée et de la mesure de leurs dimensions (longueur, largeur et épaisseur) avant et après le test de corrosion. La préparation des échantillons métalliques comprend le nettoyage au solvant et le polissage à l'aide d'un papier abrasif. Par la suite, les échantillons

métalliques sont immergés dans le fluide à l'intérieur d'un réacteur scellé pendant une durée spécifique à la température d'utilisation prévue pour le fluide, qui dans ce cas est 210 °C. Après l'expérience, le taux de corrosion (CR) du métal est déterminé par l'équation (15). Selon la norme ASTM G31 [253], la durée usuelle des tests de corrosion est comprise entre 48 h et 168 h. Cependant, la poursuite des tests de corrosion sur une longue durée donne des résultats plus réalistes [253]. À cet effet, la norme ASTM G31 [253] suggère l'équation (15) pour déterminer la durée de test adéquate après l'éventualité d'un taux de corrosion jugé faible.

$$CR [\text{mm} \cdot \text{an}^{-1}] = 8,76 \cdot 10^4 \times \frac{M_i - M_f}{S \times t \times \rho} \quad (15)$$

$$t [\text{h}] = \frac{2000}{CR} \quad (16)$$

Où :

M_i [g] et M_f [g] sont respectivement les masses initiales et finales de l'échantillon métallique ; S [cm²] est la surface métallique immergée ; t [h] est la durée du test de corrosion ; et ρ [g·cm⁻³] est la masse volumique de l'échantillon métallique.

Dans cette investigation, le protocole expérimental a d'abord consisté à préparer les différents échantillons métalliques (316L, Al, Cu, et GS) conformément à la norme ASTM G1 [254], puis à les immerger séparément dans des échantillons de chaque espèce d'huile (LaKSO et LaMSO) dans des réacteurs en verre borosilicaté de 30 mL (Figure 63). Par la suite, les réacteurs entièrement remplis d'huile ont été scellés avec des couvercles en verre et du ruban de téflon, comme dans les études précédentes [23,211–213]. La préparation des échantillons métalliques a commencé par le polissage à l'aide du papier abrasif, suivi du nettoyage à l'acétone et enfin le séchage au dessiccateur pendant 1 h. Il convient de noter que la masse de tous les échantillons métalliques a été déterminée avant le début du test de corrosion.

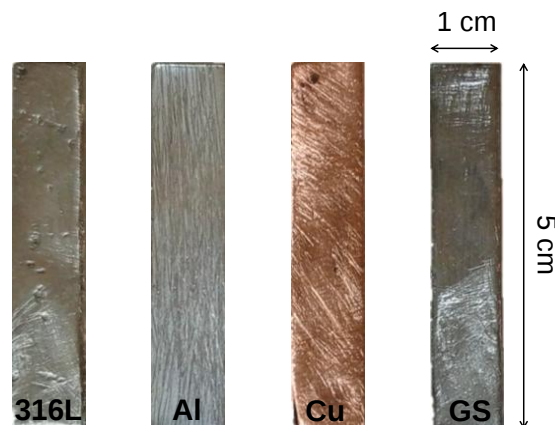


Figure 62: Préparation des échantillons métalliques conformément à la norme ASTM G1

Le test de corrosion a été conduit en triplicata à température ambiante pendant une année et en duplicata à 210 °C pendant 500 h et 1000 h (Figure 63). Les huiles extraites à la presse ont été utilisées pour le test à température ambiante, tandis que les huiles extraites au Soxhlet ont été utilisées pour le test à température élevée, ceci uniquement pour des raisons de disponibilité. Dans la nomenclature utilisée ici, “LaMSO” et “LaKSO” représentent les échantillons d’huiles neuves. Lorsque ces échantillons sont vieillis en présence des métaux à température ambiante ou à 210 °C pendant une durée spécifique, la nomenclature est étendue. Par exemple, “LaMSO-316L-1Y” désigne un échantillon de LaMSO vieilli en présence de l’acier inoxydable 316L pendant une année à température ambiante, et “LaKSO-316L-1Y” désigne un échantillon de LaKSO vieilli en présence de l’acier inoxydable 316L pendant une année à température ambiante. De la même manière, “LaMSO-316L-500h” désigne un échantillon de LaMSO vieilli en présence de l’acier inoxydable 316L pendant 500 h à 210 °C, et “LaKSO-316L-1000h” désigne un échantillon de LaKSO vieilli en présence de l’acier inoxydable 316L pendant 1000 h à 210 °C. Le même schéma s’applique aux autres métaux tels que l’aluminium, le cuivre et l’acier galvanisé.

À la fin des tests de corrosion, les échantillons métalliques et d’huiles ont été minutieusement examinés afin de reporter tous les changements apparents survenus. Par la suite, les échantillons métalliques ont de nouveau été nettoyés à l’acétone, puis polis avec du papier abrasif pour éliminer les traces de corrosion apparente. Après un dernier nettoyage à l’acétone, les échantillons métalliques ont été séchés dans le dessiccateur pendant 1 h, avant d’être repesés. Les masses initiales et finales des échantillons métalliques, ainsi que leurs dimensions, ont été exploitées pour estimer leur taux de corrosion à l’aide de l’équation (15). Les taux de corrosion estimés ont permis de classer les métaux étudiés selon la classification proposée par Biernat et al. [255].

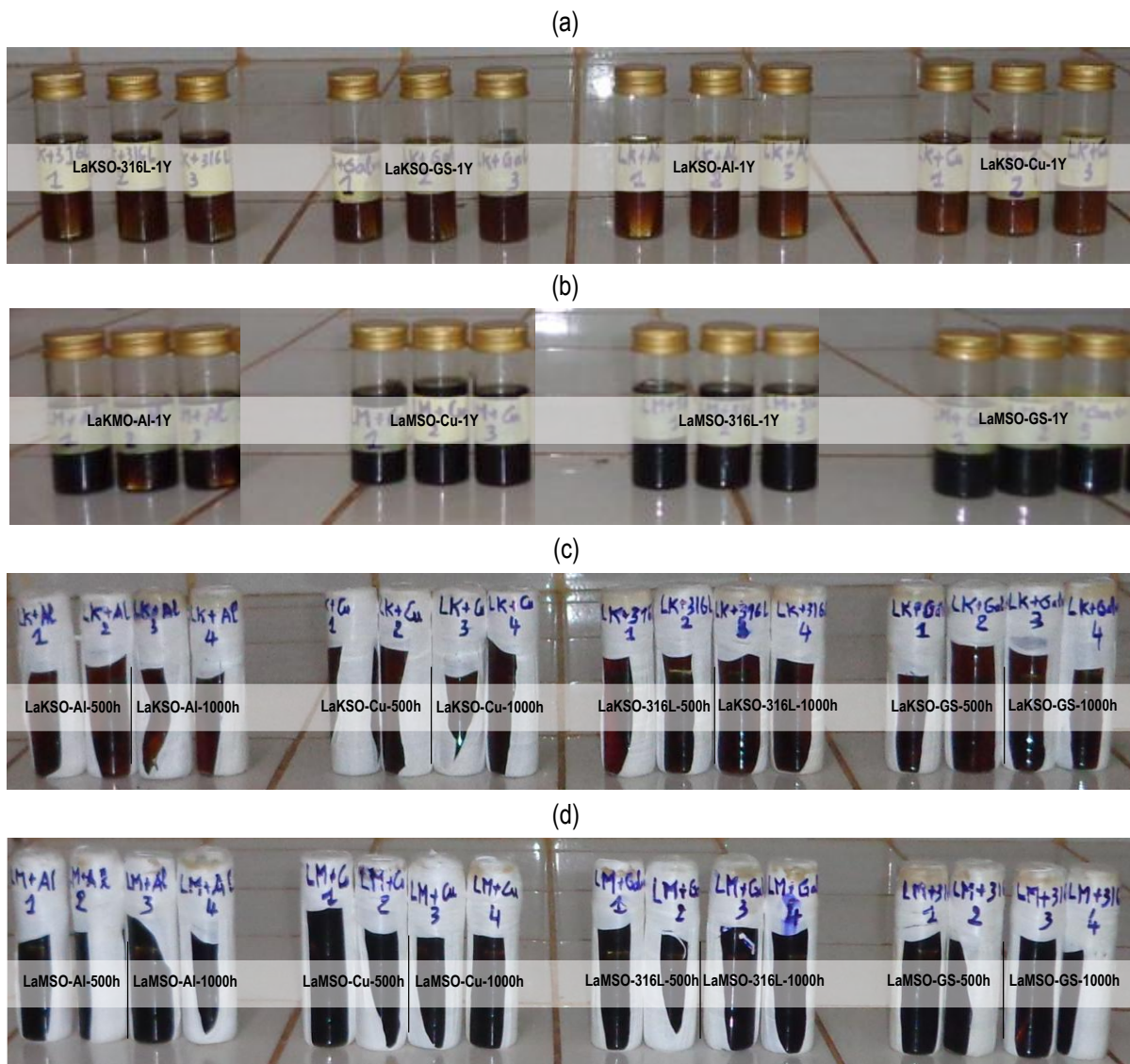


Figure 63: Présentation des échantillons de (a,c) LaKSO et (b,d) LaMSO avec les différents métaux (316L, Al, Cu et GS).

II.2.2. Caractérisation des échantillons d'huiles vieillis

Tous les échantillons d'huiles ont été caractérisés après les tests de corrosion par immersion des métaux. La caractérisation a consisté à déterminer les propriétés thermophysiques et chimiques suivantes : le point d'éclair (ASTM D93), le point de fusion (ASTM E324), la masse volumique (ASTM D4052), la viscosité cinématique (ASTM D7279), l'indice d'iode (ISO 3961), l'indice d'acide (ASTM D974), l'indice de peroxyde (NFT 60–220) et la teneur en métaux (ASTM D6595). Les méthodes décrites dans la section (III.2.1.1) du Chapitre 4 ont été adoptées pour la détermination des propriétés thermophysiques et chimiques mentionnées. Les résultats obtenus sont présentés sous la forme des moyennes statistiques (Équation(7)) accompagnées de leurs écarts types (Équation (8)). Il convient de noter que l'indice de peroxyde n'a été déterminé que pour les échantillons d'huiles du test de corrosion conduit à température ambiante pour les mêmes raisons mentionnées plus haut dans la section (III.2.1.1) du Chapitre 3.

III. Résultats

III.1. Caractérisation des échantillons d'huiles vieilles

III.1.1. Changements apparents survenus

LaMSO et LaKSO se sont comportées de la même manière en présence des métaux. Au terme des tests de corrosion à température ambiante, tous les échantillons d'huiles sont restés liquides à température ambiante. Aucune autre particularité n'était visuellement observable.

Cependant, au terme des tests de corrosion à 210 °C, les échantillons d'huiles vieillis en présence de l'acier galvanisé ont subi une division en deux phases (Figure 64), à savoir une couche solide qui s'est formée au-dessus du réacteur, et une huile pâteuse qui est restée au fond du réacteur. Il a également été constaté que la proportion de la couche solide a augmenté au fil du vieillissement (figures 64a et 64b). Les propriétés rapportées pour les échantillons d'huiles vieilles en présence de l'acier galvanisé correspondent uniquement à celles de l'huile pâteuse restée au fond du réacteur. En ce qui concerne les échantillons d'huile vieillis en présence de cuivre, la formation de gouttelettes d'huile solides a été observée à température ambiante (Figure 65). Les gouttelettes d'huile solides étaient pour la plupart accrochées aux échantillons de cuivre et aux tubes, comme le montre la Figure 65. Par ailleurs, les échantillons d'huile vieillis en présence de l'acier inoxydable 316L et de l'aluminium n'ont pas présentés de particularités remarquables et sont restés liquides à température ambiante.

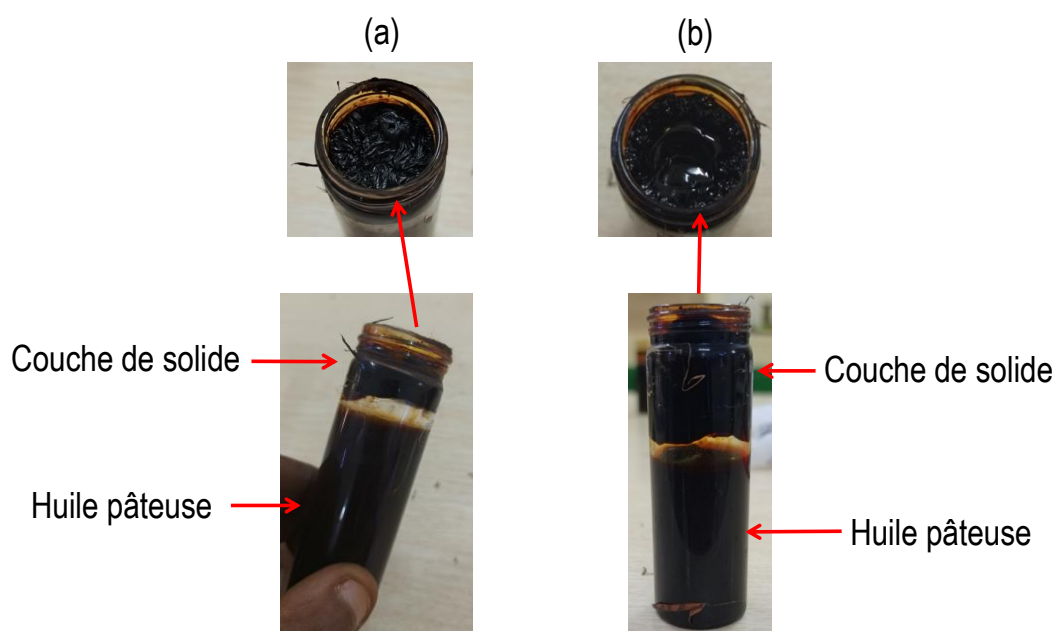


Figure 64: Séparation en deux phases (couche solide et huile pâteuse) des échantillons d'huile vieillis en présence de l'acier galvanisé (GS) après a) 500h et b) 1000h de vieillissement à 210 °C.

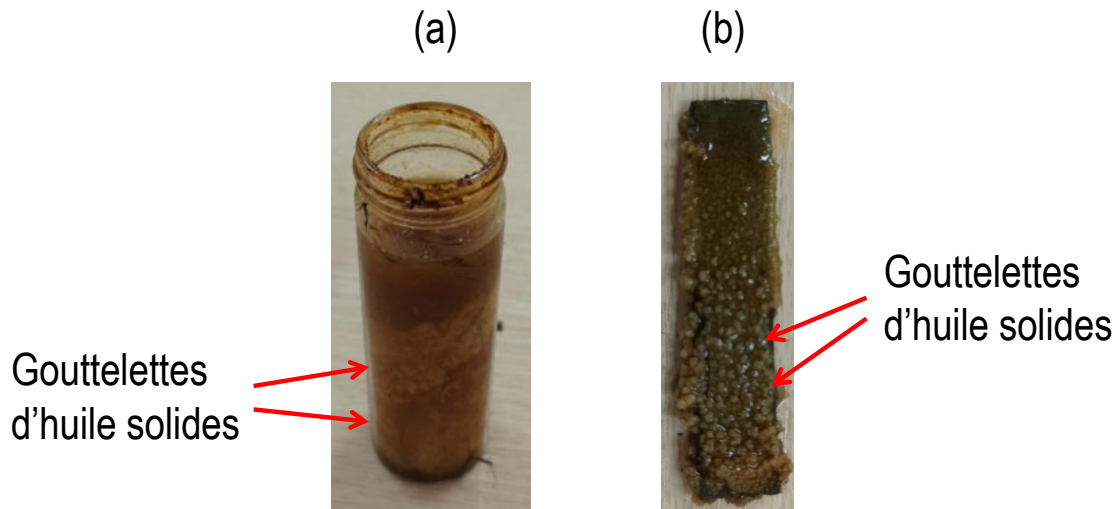


Figure 65: a) Saturation de LaKSO après 1000 h de vieillissement à 210 °C et b) fixation des gouttelettes d'huile solides sur le cuivre.

III.1.2. Evolution des propriétés thermophysiques et chimiques

III.1.2.1. Test de compatibilité à température ambiante

Huile des graines de *Lannea microcarpa*.

Les propriétés thermophysiques et chimiques des échantillons de LaMSO vieillis en présence des métaux à température ambiante sont présentées à la Figure 66.

Les points d'éclair de l'échantillon témoin, LaMSO-1Y, et ceux vieillis en présence de l'acier inoxydable 316L et l'aluminium, n'ont pas connu de variation après une année de vieillissement à température ambiante, et sont restés à 220 ± 10 °C (Figure 66a). Par contre, les échantillons de LaMSO vieillis en présence de l'acier galvanisé et du cuivre ont vu leur point d'éclair diminuer de 20 °C, soit 200 ± 10 °C.

Pendant que les points de fusion des échantillons de LaMSO vieillis en présence de l'acier inoxydable 316L et l'aluminium sont restés constants à $18,4 \pm 0,4$ °C (Figure 66b), tout comme l'échantillon témoin de LaMSO, les autres échantillons ont subi une légère augmentation du point de fusion de 2 °C à 4 °C. La plus grande valeur a été enregistrée par l'échantillon de LaMSO vieilli en présence du cuivre, avec $22,2 \pm 0,2$ °C. L'échantillon de LaMSO vieilli en présence de l'acier galvanisé était à $20,8 \pm 0,3$ °C.

La masse volumique n'a pratiquement pas connu de changement après une année de vieillissement en présence des métaux à température ambiante (Figure 66c). La plus grande augmentation, soit 0,4 %, a été enregistrée par l'échantillon de LaMSO vieilli en présence du cuivre. Les autres échantillons sont à moins 0,25 % d'augmentation.

La viscosité cinématique est présentée en fonction de la température à la Figure 66d. Bien qu'une légère différence ait été observée à 40 °C, les échantillons de LaMSO vieillis en présence des métaux à

température ambiante ont présenté une extrême similarité avec la viscosité de LaMSO neuve dans la plage de température allant de 60 °C à 100 °C.

L'indice d'acide de l'échantillon témoin de LaMSO, ainsi que ceux vieillis en présence de l'acier inoxydable 316L et l'aluminium, n'a pas connu de variation après une année de vieillissement à température ambiante (Figure 66e). En revanche, l'indice d'acide des échantillons de LaMSO vieillis en présence de l'acier galvanisé et du cuivre ont augmenté respectivement de 53 % et 85 % par rapport à l'indice l'acide de LaMSO neuve.

L'indice d'iode de LaMSO a diminué après une année de vieillissement à température ambiante en présence des métaux (Figure 66f). Pendant que les échantillons de LaMSO vieillis en présence de l'acier inoxydable 316L et l'aluminium était à une diminution légère et similaire à celle de l'échantillon témoin, soit 8 %, les échantillons de LaMSO vieillis en présence de l'acier galvanisé et du cuivre étaient respectivement à 17 % et 29 % de diminution par rapport à l'indice d'iode de l'huile neuve.

L'indice de peroxyde est resté pratiquement constant à $24,6 \pm 0,5$ mEq $O_2 \cdot kg^{-1}$ dans les échantillons de LaMSO vieillis en présence de l'acier inoxydable 316L et l'aluminium à température ambiante (Figure 66g), tout comme dans l'échantillon témoin. Cependant, dans les échantillons de LaMSO vieillis en présence de l'acier galvanisé et du cuivre, l'indice de peroxyde a baissé respectivement de 40 % et 50 % par rapport à sa valeur initiale.

Les teneurs en métaux des échantillons de LaMSO vieillis en présence de l'acier inoxydable 316L et l'aluminium sont restées négligeables (moins de 2 ppm) après une année de vieillissement à température (Figure 66h). Par contre, des traces de cuivre ont été observées dans les échantillons de LaMSO vieillis en présence du cuivre, tandis que des traces de zinc ont été observées dans les échantillons de LaMSO vieillis en présence de l'acier galvanisé. Les teneurs en cuivre et zinc ont été multipliés respectivement par 3100 et 340 après une année de vieillissement à température ambiante dans les deux échantillons concernés.

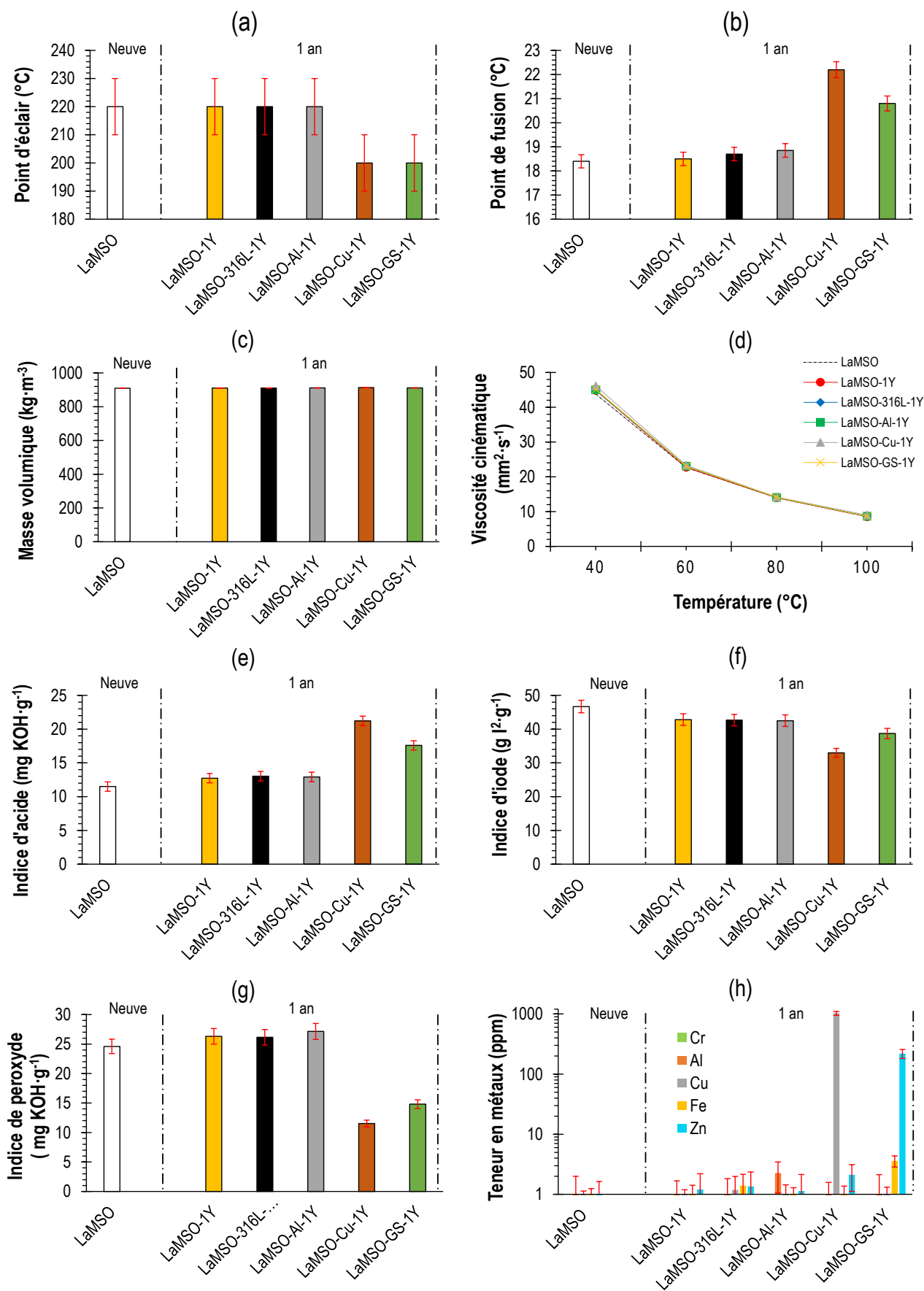


Figure 66: Évolution des propriétés thermophysiques et chimiques des échantillons de LaMSO vieillies en présence des métaux (316L, Al, Cu, et GS) à température ambiante : a) point d'éclair, b) point de fusion, c) masse volumique à 25 °C, d) viscosité cinématique, e) indice d'acide, f) indice d'iode, g) indice de peroxyde et h) teneur en métaux.

Huile des graines de *Lannea kerstingii*.

Les propriétés thermophysiques et chimiques des échantillons de LaKSO vieillis en présence des métaux à température ambiante sont présentées à la Figure 67.

Les points d'éclair des échantillons de LaKSO vieillis en présence de l'acier inoxydable 316L et l'aluminium sont restés constants à 220 ± 10 °C après une année de vieillissement à température ambiante (Figure 67a), tout comme l'échantillon témoin, LaKSO-1Y. En revanche, les échantillons de LaKSO vieillis en présence de l'acier galvanisé et du cuivre ont vu leur point d'éclair baisser à 200 ± 10 °C.

Le point de fusion des échantillons de LaKSO vieillis en présence de l'acier inoxydable 316L et l'aluminium, ainsi que celui du témoin, sont restés constants à $18,0 \pm 0,6$ °C (Figure 67b). En revanche, les deux autres échantillons, ceux vieillis en présence du cuivre et l'acier galvanisé, ont montré une légère augmentation allant de 2 °C à 4 °C. L'échantillon de LaKSO vieilli en présence du cuivre a enregistré le plus grand point de fusion avec $21,0 \pm 0,3$ °C, suivi de l'échantillon de LaKSO vieilli en présence d'acier galvanisé, qui a atteint $20,1 \pm 0,6$ °C.

La masse volumique de LaKSO n'a presque pas évolué après une année de vieillissement en présence des métaux à température ambiante (Figure 67c). La plus grande augmentation, de l'ordre de 0,2 %, a été enregistrée par l'échantillon de LaKSO vieilli en présence du cuivre.

La Figure 67d présente la viscosité cinématique en fonction de la température. Bien qu'une légère différence ait été notée à 40 °C, les échantillons de LaKSO vieillis en présence des métaux à température ambiante ont montré une très grande similitude avec la viscosité de LaKSO neuve dans la plage de température allant 60 °C et 100 °C.

L'indice d'acide de l'échantillon témoin de LaKSO, ainsi que ceux vieillis en présence de l'acier inoxydable 316L et l'aluminium, est resté constant à $13,7 \pm 1,1$ mg KOH·g⁻¹ après une année de vieillissement à température ambiante (Figure 67e). Par contre, l'indice d'acide des échantillons de LaKSO vieillis en présence de l'acier galvanisé et du cuivre a subi respectivement une augmentation de 40 % et 70 % par rapport à l'indice l'acide de LaKSO neuve.

L'indice d'iode de LaKSO n'a connu qu'une légère baisse après une année de vieillissement en présence des métaux à température ambiante (Figure 67f). La plus grande baisse, soit 16 %, a été enregistrée par l'échantillon de LaMSO vieilli en présence du cuivre, suivi par l'échantillon de LaKSO vieilli en présence de l'acier galvanisé avec 14 %. Les deux autres échantillons sont approximativement à 7 % de baisse, surpassant à peine l'échantillon témoin de LaKSO.

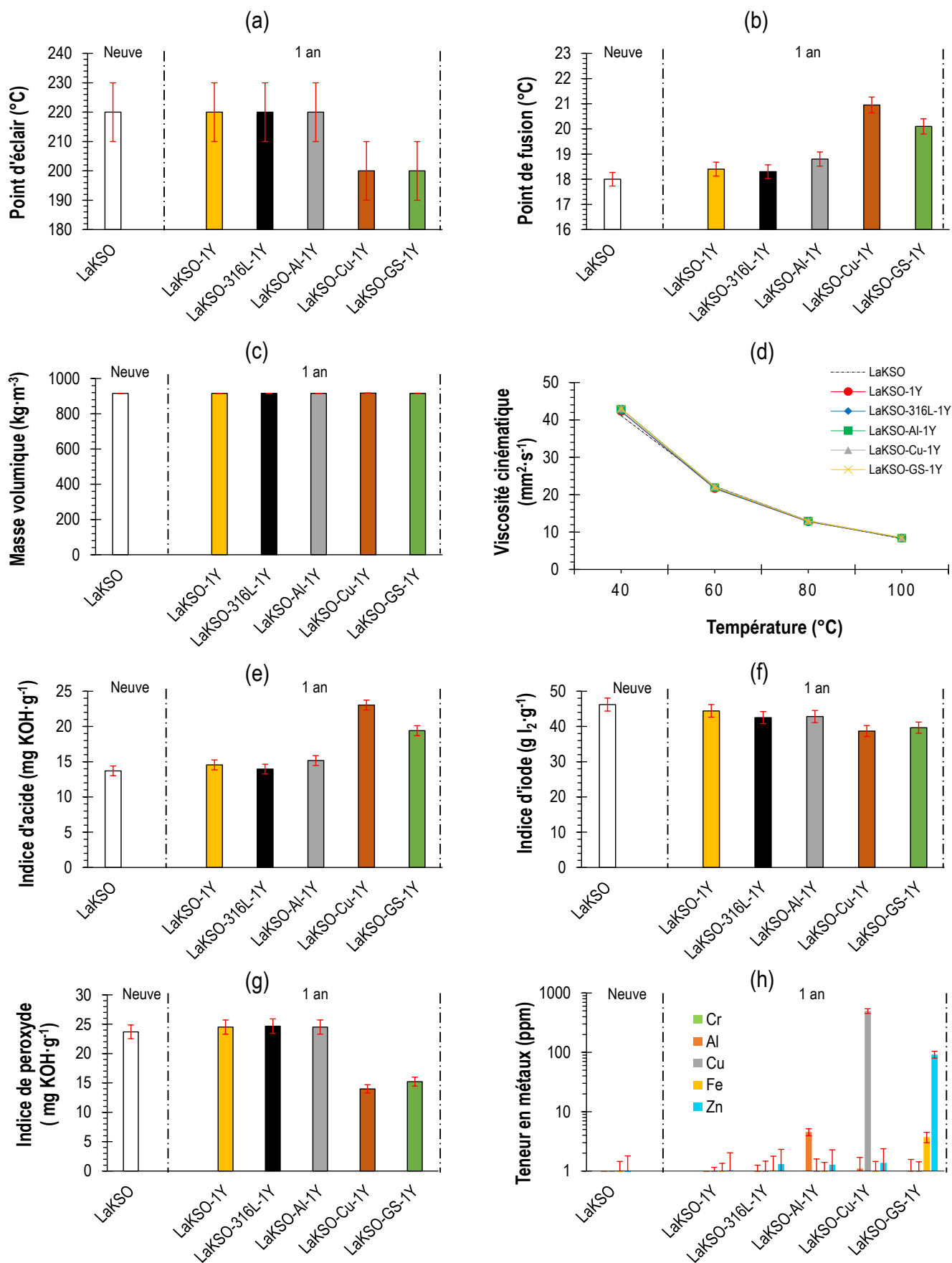


Figure 67: Évolution des propriétés thermophysiques et chimiques des échantillons de LaKSO vieilliss en présence des métaux (316L, Al, Cu, et GS) à température ambiante : a) point d'éclair, b) point de fusion, c) masse volumique à 25 °C, d) viscosité cinématique, e) indice d'acide, f) indice d'iode, g) indice de peroxyde et h) teneur en métaux.

Pendant que l'indice de peroxyde est resté constant à $23,7 \pm 0,9$ mEq $O_2 \cdot kg^{-1}$ dans les échantillons de LaKSO vieillis en présence de l'acier inoxydable 316L et l'aluminium à température ambiante (Figure 67g), ainsi que l'échantillon témoin, il a diminué pratiquement de moitié dans les échantillons de LaKSO vieillis en présence de l'acier galvanisé et du cuivre.

Les teneurs en métaux des échantillons de LaMSO vieillis en présence de l'acier inoxydable 316L et l'aluminium sont restées négligeables (moins de 2 ppm) après une année de vieillissement à température (Figure 67h). En revanche, les teneurs en cuivre et en zinc ont été multipliées respectivement par 5500 et 110 dans les échantillons de LaKSO vieillis en présence de l'acier galvanisé et du cuivre après une année de vieillissement à température ambiante.

III.1.2.2. Test de compatibilité à 210 °C

Huile des graines de *Lannea microcarpa*.

Les propriétés thermophysiques et chimiques des échantillons de LaMSO vieillis en présence des métaux à 210 °C sont présentées à la Figure 68. Le point d'éclair (non présenté) n'a pas changé après 1000 h de vieillissement en présence de métaux. Il est resté à sa valeur initiale qui est de 220 ± 10 °C.

Le point de fusion a augmenté au fil du vieillissement en présence des métaux pour tous les échantillons de LaMSO (Figure 68a). Les échantillons de LaMSO vieillis en présence de l'acier inoxydable 316L, l'aluminium et le cuivre ont présenté un point de fusion proche de 36 °C après 500 h de vieillissement. Après 1000 h de vieillissement, les échantillons vieillis en présence de l'acier inoxydable 316L et l'aluminium sont restés pratiquement à ce même niveau de température. Cependant, les points de fusion des échantillons LaMSO-GS-500h, LaMSO-Cu-500h et LaMSO-Gs-1000h n'ont pas pu être déterminés en raison des résidus de polymères qui bouchaient les tubes capillaires.

La masse volumique de LaMSO n'a pas subi de changement significatif susceptible d'impacter les performances de transfert et de stockage thermique de LaMSO (Figure 68b). Toutefois, l'échantillon de LaMSO vieilli en présence de l'acier galvanisé était à 10 % d'augmentation après 1000 h de vieillissement, pendant que celui vieilli en présence du cuivre était à 6 % d'augmentation. Quant aux échantillons de LaMSO vieillis en présence de l'acier inoxydable 316L et de l'aluminium, ils ont présenté une augmentation similaire de l'ordre de 5 %.

La tendance de la viscosité cinématique en fonction de la température est présentée à la Figure 68c. Les viscosités les plus élevées ont été enregistrées par les échantillons de LaMSO vieillis en présence de l'acier galvanisé, suivis par ceux vieillis en présence du cuivre. Après 1000 h de vieillissement, la viscosité de l'échantillon de LaMSO vieilli en présence de l'acier galvanisé était à 1344 % d'augmentation à 40 °C,

comparé à 946 % d'augmentation pour l'échantillon de LaMSO vieilli en présence du cuivre. Les échantillons de LaMSO vieillis en présence de l'acier inoxydable 316L et de l'aluminium ont connu une augmentation de l'ordre de 200 % après 500 h de vieillissement et sont restés pratiquement comme telle après 1000 h de vieillissement. Toutefois, tous les échantillons de LaMSO vieillis en présence des métaux ont vu leur viscosité diminuer et approcher celle de LaMSO neuve à 100 °C (Figure 68c).

Une augmentation progressive de l'acidité de LaMSO a été observée après le vieillissement en présence des métaux (Figure 68d). L'échantillon de LaMSO vieilli en présence de l'acier galvanisé a subi la plus grande augmentation en acidité après 1000 h de vieillissement, soit 380 %, suivi par l'échantillon de LaMSO vieilli en présence du cuivre avec 220 %. Notamment, les échantillons de LaMSO vieillis en présence de l'acier inoxydable 316L et l'aluminium ont montré une augmentation similaire de l'ordre de 130 % après 1000 h de vieillissement.

L'indice d'iode de LaMSO a diminué progressivement au fil du vieillissement en présence des métaux (Figure 68e). Notamment, les échantillons de LaMSO vieillis en présence de l'acier galvanisé ont enregistré les plus grandes diminutions, suivis par ceux vieillis en présence du cuivre. Les échantillons de LaMSO vieillis en présence de l'acier inoxydable et l'aluminium ont présenté pratiquement les mêmes proportions de diminution en indice d'iode.

Les teneurs en métaux des échantillons de LaMSO vieillis en présence de l'acier inoxydable 316L et l'aluminium sont restées négligeables (moins de 2 ppm), même après 1000 h de vieillissement (Figure 68f). Par contre, des traces de cuivre ont été observées dans les échantillons de LaMSO vieillis en présence du cuivre, tandis que des traces de zinc et de fer ont été observées dans les échantillons de LaMSO vieillis en présence de l'acier galvanisé. En effet, LaMSO neuve présentait des teneurs négligeables (moins de 2 ppm) en cuivre, en zinc et en fer. Après 1000 h de vieillissement, la teneur en cuivre a été multipliée par six dans les échantillons de LaMSO vieillis en présence de cuivre. Quant aux échantillons de LaMSO vieillis en présence de l'acier galvanisé, la teneur en zinc a subi une augmentation de 590 % après 500 h de vieillissement, sans aucune autre augmentation significative de la teneur en zinc. Cependant, la teneur en fer a augmenté progressivement dans les échantillons de LaMSO vieillis en présence de l'acier galvanisé, atteignant 2345 % d'augmentation après 1000 h de vieillissement.

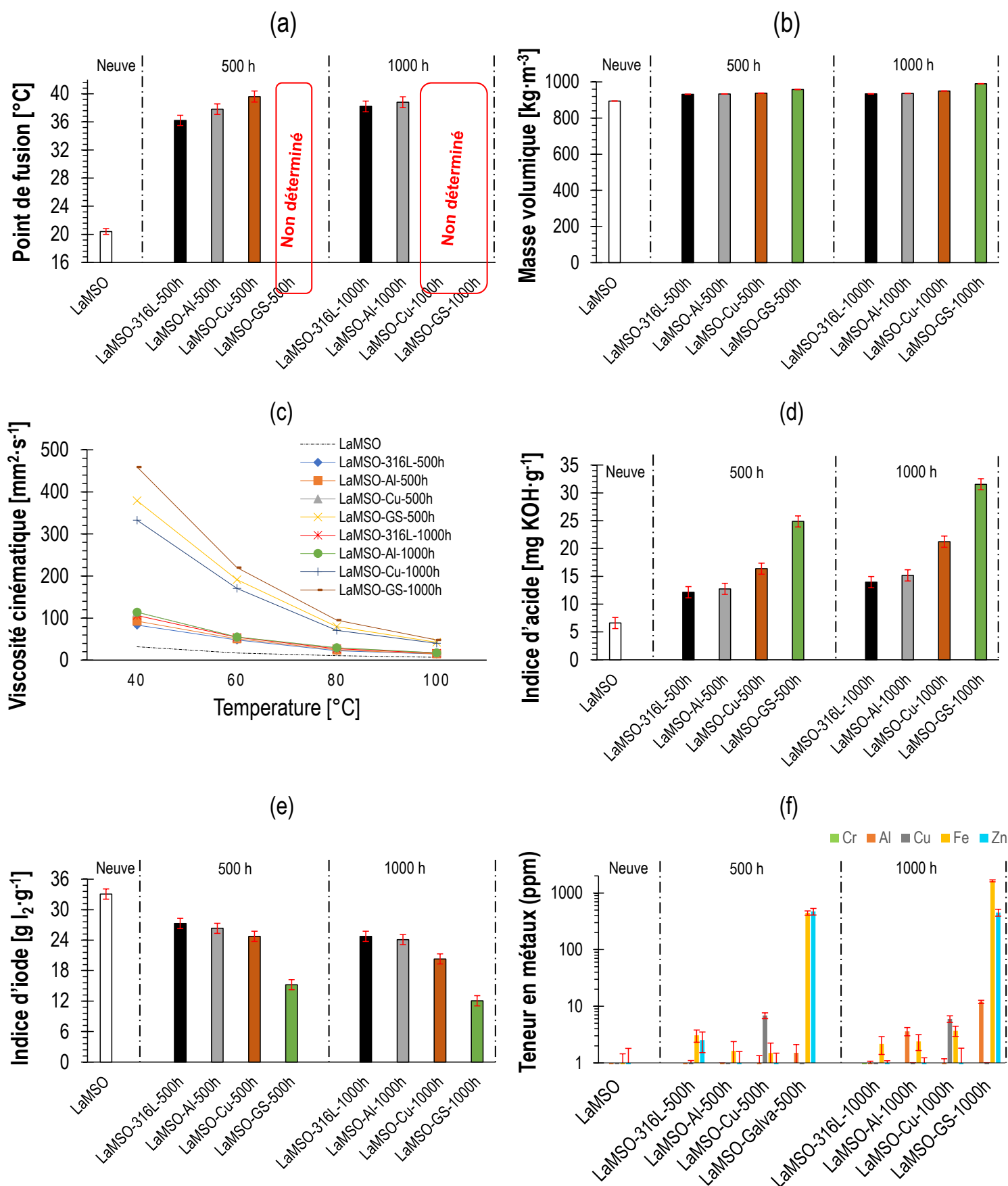


Figure 68: Évolution des propriétés thermophysiques et chimiques des échantillons de LaMSO vieillies en présence des métaux (316L, Al, Cu, et GS) à 210 °C : a) point de fusion, b) masse volumique à 40 °C, c) viscosité cinématique, d) indice d'acidité, e) indice d'iode et f) teneur en métaux.

Huile des graines de *Lannea kerstingii*.

La Figure 69 présente les propriétés thermophysiques et chimiques des échantillons de LaKSO vieillis en présence des métaux à 210 °C pendant 500 h et 1000 h. Le point d'éclair de LaKSO (non présenté), initialement à 220 ± 10 °C, n'a pas changé après 1000 h de vieillissement en présence de métaux.

Une augmentation progressive du point de fusion a été observée pour tous les échantillons de LaKSO vieillis en présence des métaux (Figure 69a). Les échantillons de LaKSO vieillis en présence de l'acier inoxydable 316L et de l'aluminium ont enregistré des points de fusion proches de 25 °C après 500 h de vieillissement et 30 °C après 1000 h de vieillissement. En revanche, les échantillons de LaKSO vieillis en présence du cuivre et de l'acier galvanisé ont eu des points de fusion plus élevés, atteignant 33 °C après 500 h de vieillissement et 38 °C après 1000 h de vieillissement.

Aucun changement significatif de la masse volumique susceptible d'affecter les performances de transfert et de stockage thermique de LaKSO n'a été observé après le vieillissement en présence des métaux (Figure 69b). L'échantillon de LaKSO vieilli en présence de l'acier galvanisé a montré la plus forte augmentation, soit 4 %, après 1000 h de vieillissement. L'échantillon de LaKSO vieilli en présence du cuivre a montré une augmentation d'environ 3 %. Quant aux échantillons de LaKSO vieillis en présence de l'acier inoxydable 316L et de l'aluminium, ils ont présenté des changements minimes de la masse volumique, avec une augmentation d'un peu plus de 2 %.

En ce qui concerne la viscosité cinématique, les échantillons de LaKSO vieillis en présence de l'acier galvanisé ont présenté les valeurs les plus élevées, suivis par ceux vieillis en présence du cuivre (Figure 69c). Après 1000 h de vieillissement, la viscosité cinématique de l'échantillon de LaKSO vieilli en présence de l'acier galvanisé a augmenté de 442 % à 40 °C, contre 312 % pour l'échantillon de LaKSO vieilli en présence du cuivre. Les échantillons de LaKSO vieillis en présence de l'acier inoxydable 316L et de l'aluminium ont connu une augmentation constante de 55 % après 500 h de vieillissement, sans autre changement significatif après 1000 h de vieillissement. Il faudrait noter que tous les échantillons de LaKSO vieilli en présence des métaux ont montré une diminution de la viscosité avec l'augmentation de la température, approchant ainsi la viscosité de LaKSO neuve à 100 °C.

L'acidité de LaKSO a progressivement augmenté avec le vieillissement pour tous les échantillons (Figure 69d). Notamment, les échantillons de LaKSO vieillis en présence de l'acier galvanisé et de cuivre ont montré une augmentation plus importante et similaire après 1000 h de vieillissement, soit 250 %, qui vaut pratiquement le double de l'acidité observée dans les échantillons de LaKSO vieillis en présence de l'acier inoxydable 316L et l'aluminium.

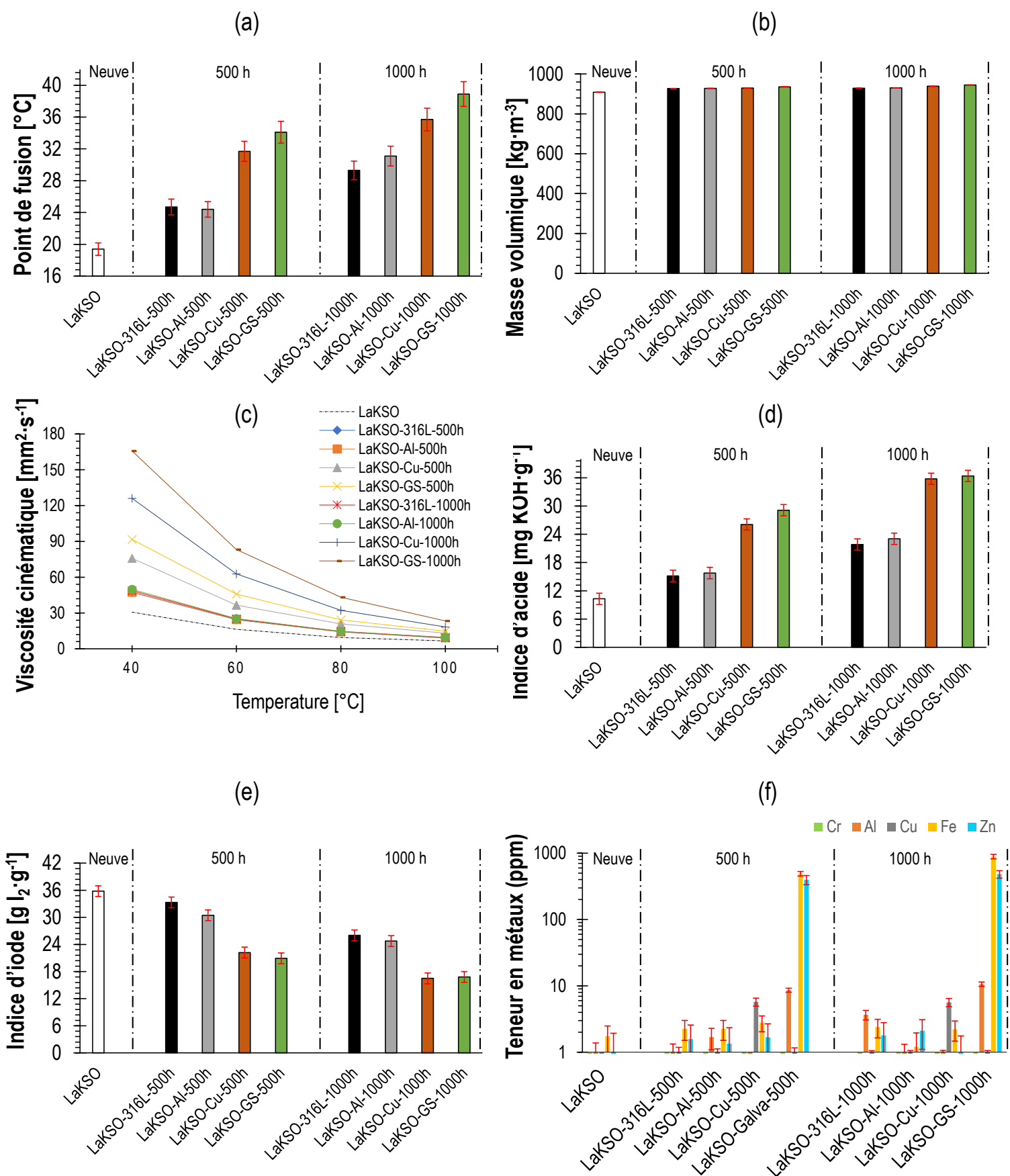


Figure 69: Évolution des propriétés thermophysiques et chimiques des échantillons de LaKSO vieillies en présence des métaux (316L, Al, Cu, et GS) à 210 °C : a) point de fusion, b) masse volumique à 40 °C, c) viscosité cinématique, d) indice d'acidité, e) indice d'iode et f) teneur en métaux.

L'indice d'iode de LaKSO a diminué progressivement avec le vieillissement en présence des métaux (Figure 69e). Cependant, les échantillons de LaKSO vieillis en présence de l'acier galvanisé et du cuivre ont présenté une diminution plus importante et similaire de l'ordre de 54 % après 1000 h de vieillissement, contre 11 % de diminution en indice d'iode pour les échantillons de LaKSO vieillis en présence de l'acier inoxydable 316L et l'aluminium.

Les teneurs en métaux des échantillons de LaKSO vieillis en présence de l'acier inoxydable 316L et de l'aluminium sont restées négligeables, inférieures à 2 ppm même après 1000 h de vieillissement (Figure 69f). Cependant, la teneur en cuivre a été multipliée par six dans l'échantillon vieilli en présence du cuivre après 1000 h de vieillissement, et les teneurs en zinc et en fer ont également été multipliées respectivement par 513 et 510 dans l'échantillon de LaKSO vieilli en présence de l'acier galvanisé. Notamment, l'augmentation des teneurs en cuivre et en zinc observée respectivement dans les échantillons de LaKSO vieillis en présence du cuivre et de l'acier galvanisé a montré une progression limitée entre 500 h et 1000 h, ce qui indique que le changement majeur de ces deux teneurs s'est produit plus tôt au cours du processus de vieillissement. Par contre, la teneur en fer a augmenté progressivement au fil du vieillissement dans les échantillons de LaKSO vieillis en présence de l'acier galvanisé.

III.2. Vitesse de corrosion des métaux

III.2.1. Test de compatibilité à température ambiante

La Figure 70 présente les métaux qui étaient contenus dans les échantillons d'huiles LaMSO et LaKSO vieillis à température ambiante pendant une année. A vue d'œil, les huiles LaMSO et LaKSO, ont eu des impacts similaires sur les échantillons métalliques. Les échantillons d'acier inoxydable 316L, d'acier galvanisé et d'aluminium sont restés brillants comme ils l'étaient avant le début des tests de corrosion. En revanche, les échantillons de cuivre ont complètement changé de la couleur rougeâtre à la couleur verdâtre. La couleur verdâtre sur les échantillons de cuivre indique la présence d'oxyde de cuivre à leur surface.

Les vitesses de corrosion des métaux investigués à température ambiante pour un usage avec LaMSO et LaKSO, sont présentées à la Figure 71. Le cuivre a enregistré le taux de corrosion le plus élevé (respectivement $13 \mu\text{m}\cdot\text{an}^{-1}$ et $4 \mu\text{m}\cdot\text{an}^{-1}$ pour un usage avec LaMSO et LaKSO à température ambiante pendant une année), indépendamment de l'espèce d'huile. L'acier galvanisé a présenté respectivement $0,5 \mu\text{m}\cdot\text{an}^{-1}$ et $0,4 \mu\text{m}\cdot\text{an}^{-1}$ pour un usage avec LaMSO et LaKSO, pendant que l'acier inoxydable 316L et l'aluminium ont présenté des vitesses de corrosion nettement inférieures à $0,3 \mu\text{m}\cdot\text{an}^{-1}$.

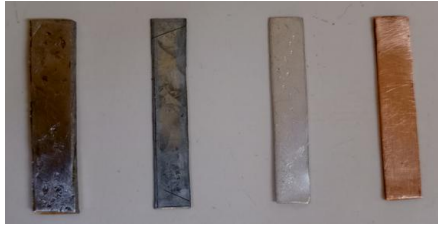
	Après le nettoyage à l'acétone	Après le polissage au papier abrasif
Après une année de vieillissement dans LaMSO à T_{amb}	(a)  316L GS Al Cu	(b)  316L GS Al Cu
Après une année de vieillissement dans LaKSO à T_{amb}	(c)  316L GS Al Cu	(d)  316L GS Al Cu

Figure 70: Échantillons métalliques après (a,c) le nettoyage à l'acétone et (b,d) le polissage au papier abrasif au terme du test de corrosion par immersion dans (a,b) LaMSO et (c,d) LaKSO à température ambiante pendant une année.

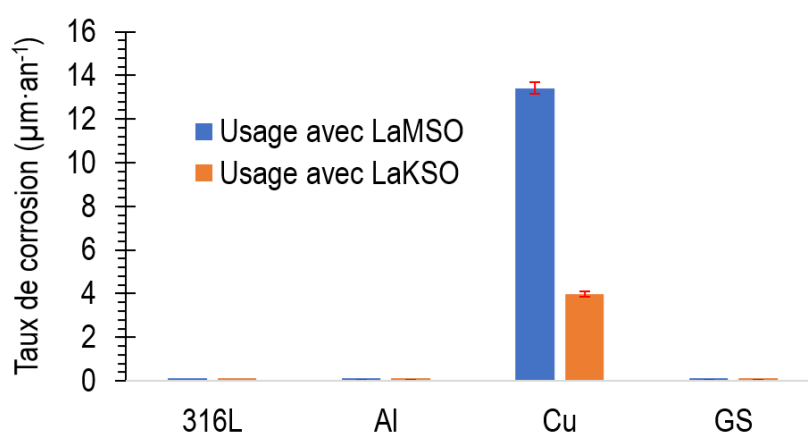


Figure 71: Taux de corrosion des métaux en immersion statique dans les huiles LaMSO et LaKSO à température ambiante.

III.2.2. Test de compatibilité à 210 °C

La Figure 72 présente les échantillons métalliques qui étaient contenus dans les huiles LaMSO et LaKSO vieillis à 210 °C, après le nettoyage à l'acétone et le polissage au papier abrasif au terme des tests de corrosion. À vue d'œil, les huiles LaMSO et LaKSO ont eu des impacts similaires sur les échantillons métalliques. Notamment, les échantillons d'acier inoxydable 316L et d'aluminium sont restés brillants comme ils l'étaient avant les tests de corrosion. Par contre, les échantillons d'acier galvanisé se sont vus former à leur surface des substances de couleur noirâtre, tandis que les échantillons de cuivre sont passés de la couleur rougeâtre à la couleur noire. La couleur noirâtre indique la présence d'oxyde de cuivre II à leur surface.

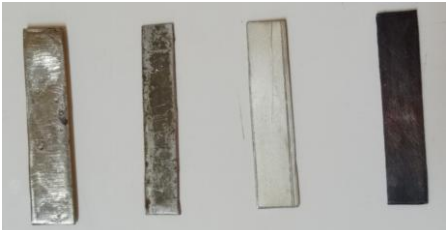
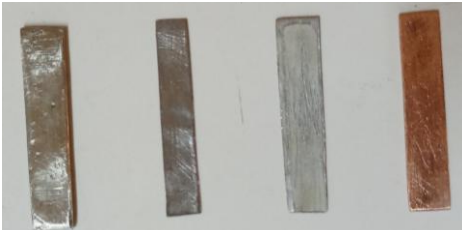
	Après le nettoyage à l'acétone	Après le polissage au papier abrasif
Après 500 h de vieillissement dans LaMSO à 210 °C	(a)  316L GS Al Cu	(b)  316L GS Al Cu
Après 1000 h de vieillissement dans LaMSO à 210 °C	(c)  316L GS Al Cu	(d)  316L GS Al Cu
Après 500 h de vieillissement dans LaKSO à 210 °C	(e)  316L GS Al Cu	(f)  316L GS Al Cu
Après 1000 h de vieillissement dans LaKSO à 210 °C	(g)  316L GS Al Cu	(h)  316L GS Al Cu

Figure 72: Échantillons métalliques après le nettoyage à l'acétone (a,c,e,g) et le polissage au papier abrasif (b,d,f,g) au terme des tests de corrosion par immersion dans (a–d) LaMSO et (e–h) LaKSO à 210 °C pendant (a,b,e,f) 500 h et (c,d,g,h) 1000 h.

La Figure 73 présente les vitesses de corrosion des métaux étudiés pour un usage à 210 °C avec LaMSO et LaKSO. Après 1000 h de vieillissement, les taux de corrosion les plus élevés ont été enregistrés par l'acier galvanisé, suivi par le cuivre, indépendamment de l'espèce d'huile investiguée. Notamment, l'acier galvanisé a présenté respectivement $57 \mu\text{m}\cdot\text{an}^{-1}$ et $43 \mu\text{m}\cdot\text{an}^{-1}$ pour un usage avec LaMSO et LaKSO à température élevée, pendant que le cuivre était approximativement à $40 \mu\text{m}\cdot\text{an}^{-1}$ pour les deux huiles. L'acier inoxydable 316L a présenté les plus faibles taux de corrosion, avec $2 \mu\text{m}\cdot\text{an}^{-1}$ et $1 \mu\text{m}\cdot\text{an}^{-1}$,

respectivement pour LaMSO et LaKSO. Quant à l'aluminium, il a présenté respectivement $9,5 \mu\text{m}\cdot\text{an}^{-1}$ et $8 \mu\text{m}\cdot\text{an}^{-1}$ pour LaMSO et LaKSO.

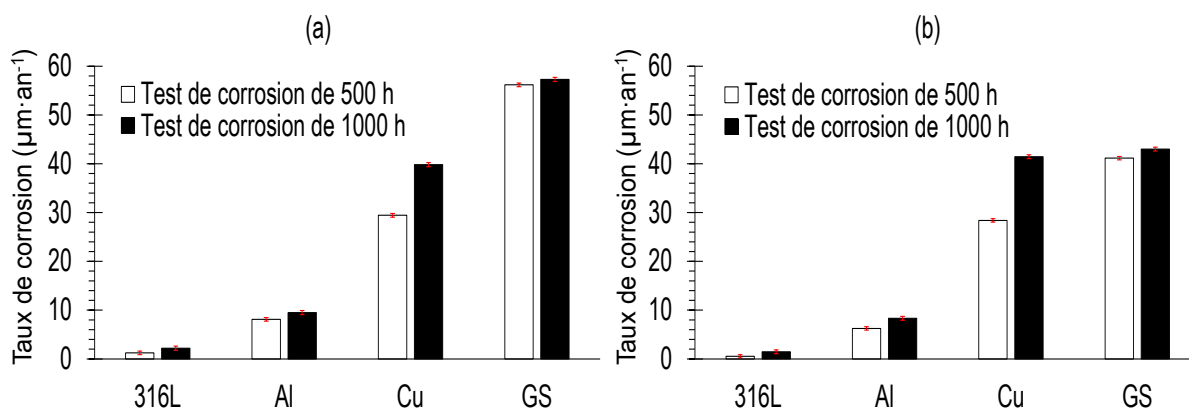


Figure 73: Taux de corrosion des métaux en immersion statique à 210 °C dans a) LaMSO et b) LaKSO.

IV. Discussion

IV.1. Analyse de la stabilité avec le vieillissement en présence des métaux

IV.1.1. Test de compatibilité à température ambiante

Etant des huiles extraites de graines de différentes espèces d'arbres du même genre, le stockage a eu des impacts négligeables et similaires sur les propriétés thermophysiques (figures 66 et 67) des deux huiles après le vieillissement à température ambiante en présence des métaux.

Tout d'abord, les échantillons témoins ont montré que les propriétés des deux huiles sont restées largement stables en l'absence des métaux. Aucune évolution significative n'a été observée pour les propriétés analysées. Ce résultat est en accord avec les suggestions des indices d'iode déterminés, catégorisant LaMSO et LaKSO comme des huiles saturées et non siccatives [149], comme dans la littérature [168,189].

Le point d'éclair s'est annoncé largement stable pour les échantillons d'huiles vieillis en présence de l'acier inoxydable 316L et l'aluminium. Aucune évolution n'a été observée dans ces deux échantillons après une année de vieillissement à température ambiante, tout comme chez les échantillons témoins. Par contre, le point d'éclair des échantillons d'huiles vieillis en présence du cuivre et de l'acier galvanisé, a baissé à 200 ± 10 °C, restant toujours plus élevé que le point d'éclair des fluides conventionnels tels que le Dowtherm A et Xceltherm 600 (Tableau 18). La baisse du point d'éclair dans les échantillons d'huiles vieillis en présence du cuivre et l'acier galvanisé suggère une décomposition des triglycérides contenus dans ces huiles en acide gras libres par une oxydation causée par les métaux concernés à température ambiante [24,149], ce qui est cohérent avec l'augmentation observée de l'indice d'acide et la baisse de

l'indice de peroxyde dans ces échantillons avec le vieillissement (figures 66 et 67). Les études antérieures [21,148,149] ont également rapporté une baisse du point d'éclair, alors que l'indice d'acide augmentait avec le vieillissement.

Le point de fusion est resté pratiquement stable dans les marges d'erreur des mesures pour les échantillons d'huiles vieillis en présence de l'acier inoxydable 316L et l'aluminium après une année de vieillissement à température ambiante, tout comme les échantillons témoins. Cependant, dans les échantillons d'huiles vieillis en présence du cuivre et de l'acier galvanisé, le point de fusion a augmenté respectivement d'environ 4 °C et 2 °C. Cette tendance, expliquée par la saturation des huiles [23,149], a été confirmée par la baisse en indice d'iode des échantillons concernés, avec les échantillons d'huiles vieillis en présence du cuivre qui ont les plus grands points de fusion, présentant les plus faibles indices d'iode et ainsi de suite. L'indice des échantillons d'huiles vieillis en présence de l'acier inoxydable 316L et l'aluminium, ainsi que les échantillons témoins, a présenté une baisse de moins de 10 % par rapport l'indice d'iode des huiles neuves.

La masse volumique des huiles, LaMSO et LaKSO, est restée stable après une année de vieillissement en présence des métaux à température ambiante (Figure 67c), les très faibles variations observées étant dans la marge d'incertitude. Ce résultat suggère un impact très limité des métaux sur la masse volumique des deux huiles.

Bien qu'une différence négligeable, dans la limite de 5 % d'augmentation, ait été observée à 40 °C, la viscosité des échantillons huiles vieillis est restée largement similaire à la viscosité des huiles neuves dans la plage de 60 °C à 100 °C, après une année de vieillissement à température ambiante en présence des métaux.

IV.1.2. Test de compatibilité à 210 °C

LaMSO et LaKSO ont montré des évolutions similaires de leurs propriétés au cours du vieillissement, avec une tendance légèrement plus prononcée pour LaMSO dans toutes les propriétés analysées, à l'exception du point d'éclair et de l'indice d'acide (figures 68 et 69).

Le point d'éclair des deux huiles reste largement stable à 220 ± 10 °C, même après 1000 h de vieillissement à 210 °C en présence des métaux. Cette constance du point d'éclair s'explique par la polymérisation des huiles à haute température [24] ou la formation des produits de dégradation stables [256], rendant ainsi les huiles moins volatiles, malgré l'augmentation de leur acidité. Gomna [24] a obtenu des résultats relativement différents pour des échantillons de RJCO vieillis pendant 1656 h dans les mêmes conditions de test que la présente étude. Le point d'éclair des échantillons de RJCO, y compris ceux vieillis en présence des métaux étudiés ici, a diminué d'environ 20 °C dans tous les cas. Cependant,

les tests de Gomna étant faits sur une durée un peu plus longue et au regard de l'incertitude associée à la méthode de mesure, il serait inapproprié de tirer des conclusions définitives concernant cette différence.

L'augmentation progressive du point de fusion au fil du vieillissement à température élevée en présence des métaux, confirme en partie la tendance à la baisse des indices d'iode [148,149,242]. Comme mentionné précédemment dans la section (III.2.1.1) du chapitre 4, ce phénomène est attribué à la saturation de l'huile, expliquée par la migration des acides gras insaturés vers les acides gras saturés [23,149]. Notamment, l'augmentation du point de fusion a été particulièrement accentuée pour les échantillons d'huiles vieillis en présence du cuivre et de l'acier galvanisé (jusqu'à 38 °C après 1000 h de vieillissement) de telle sorte que ces échantillons présentaient des huiles solides à température ambiante (figures 64 et 65). Ce décalage risque de poser des problèmes de solidification des deux huiles dans les conduites et réservoirs.

En ce qui concerne la masse volumique, aucun changement significatif susceptible d'avoir un impact sur les performances de transfert et de stockage n'a été observé pour les deux huiles. Par conséquent, les masses volumiques des deux huiles, LaMSO et LaKSO, sont considérées stables au cours du processus de vieillissement jusqu'à 1000 h en présence des métaux. La légère augmentation de la masse volumique avec le vieillissement s'explique par l'oxydation des huiles, qui transforme les composés de faible poids moléculaire contenus dans l'huile en composés de poids moléculaire élevé tels que les polymères [148], comme le montre la Figure 64 pour les échantillons d'huiles vieillis en présence de l'acier galvanisé.

Malgré l'augmentation de la viscosité cinématique à faibles températures avec le vieillissement, la viscosité des échantillons d'huiles vieilles reste proche de celle des échantillons d'huiles neuves à 100 °C et devrait être assez similaire à des températures plus élevées [150,239]. Des observations similaires ont été faites pour le RJCO dans les mêmes conditions de test que la présente étude pour un vieillissement de 1656 h [24]. L'augmentation significative de la viscosité des échantillons d'huiles vieillis en présence de l'acier galvanisé et de cuivre est la conséquence de l'excès de polymérisation dû à l'action combinée de l'oxydation à haute température et de l'interaction des huiles avec les métaux concernés. Ce phénomène était plus accentué avec les échantillons d'huiles vieillis en présence de l'acier galvanisé. Ce résultat montre l'effet drastique que la combinaison de la chaleur à température élevée et l'acier galvanisé peut avoir sur la viscosité des deux huiles étudiées, plus particulièrement LaMSO, qui était plus vulnérable à cette oxydation en raison de sa plus faible stabilité par rapport à LaKSO (Tableau 18).

IV.2. Analyse de la compatibilité des deux huiles avec les métaux

L'observation générale issue de cette étude suggère que les propriétés de LaMSO et LaKSO vieilles en présence de l'acier inoxydable 316L et l'aluminium ne diffèrent pratiquement pas de celles observées en leur absence. Par conséquent, il est déduit que l'acier inoxydable 316L et l'aluminium n'ont pas eu d'impact majeur sur les propriétés des deux huiles, que ça soit à température ambiante ou élevée. Cette observation a été confirmée par les teneurs en chrome et en aluminium négligeables (inférieures à 2 ppm) mesurées respectivement dans les échantillons d'huiles vieillis en présence de l'acier inoxydable 316L et l'aluminium à température ambiante et élevée. Ces résultats sont partiellement en accord avec les travaux d'Andari et al. [245] qui ont rapporté que l'acier inoxydable 316L présente une excellente résistance à la corrosion dans plusieurs huiles végétales de différentes qualités à 220 °C. Par contre, Gomna et al. [24] ont vieilli RJCO en présence de plusieurs métaux, y compris ceux investigués ici, dans les mêmes conditions de test que la présente étude pendant 1656 h. Alors que l'acier inoxydable 316L s'est montré compatible avec RJCO, l'aluminium a légèrement accéléré son oxydation. Cette différence de comportement des deux huiles avec RJCO en présence de l'aluminium est probablement due à la différence de composition chimique des trois huiles.

Cependant, après le vieillissement des deux huiles, LaMSO et LaKSO, en présence du cuivre et l'acier galvanisé à température ambiante ou élevée, des modifications ont été observées dans les propriétés. Bien que la masse volumique et le point d'éclair n'aient montré aucun changement notable, les échantillons d'huiles vieillis en présence de ces métaux à 210 °C se sont complètement solidifiés à température ambiante (figures 64 et 65). Néanmoins, les échantillons d'huiles solidifiées sont redevenus liquides à mesure que la température augmentait, et la viscosité de ces échantillons d'huiles à 100 °C est restée proche de celle des huiles neuves. Ces observations concordent avec les résultats d'études sur RJCO dans des conditions similaires pendant 1656 h [24]. L'augmentation de la viscosité des échantillons d'huiles vieillis en présence du cuivre et de l'acier galvanisé est attribuée à un excès de polymérisation causé par les effets combinés de l'oxydation à température élevée et de l'interaction des huiles avec ces métaux. Cette observation a été corroborée respectivement par les teneurs en cuivre et les teneurs en zinc et en fer extrêmement élevées dans les échantillons d'huiles vieillis en présence du cuivre et de l'acier galvanisé à température élevée. Par ailleurs, il convient de noter que ces métaux, le cuivre et l'acier galvanisé n'ont pas eu d'impact majeur sur les propriétés des deux huiles, LaMSO et LaKSO, même après une année de vieillissement à température ambiante.

Sur la base des vitesses de corrosion estimées, la résistance à la corrosion de chaque métal en présence de LaMSO ou LaKSO à température ambiante ou élevée a été classée selon le système proposé par Biernat et al. [203] (Tableau 19). À température ambiante, tous les métaux (316L, Al, Cu et GS) sont classés comme hautement résistants en présence des deux huiles, et aucun des métaux n'a eu un impact

majeur sur les propriétés des deux huiles étudiées. Par conséquent, ils sont tous considérés compatibles avec LaMSO et LaKSO à température ambiante, avec l'acier inoxydable 316L en tête de liste, suivi par l'aluminium. Le cuivre vient en dernière position.

Tableau 19: Indice de résistance des métaux à la corrosion en présence des huiles LaKSO et LaMSO.

Indice de résistance	Symbole	Grade	Taux de corrosion ($\mu\text{m}\cdot\text{an}^{-1}$)	Test à température ambiante		Test à température élevée	
				Usage avec LaMSO	Usage avec LaKSO	Usage avec LaMSO	Usage avec LaKSO
Entièrement résistant	I	1	<0,1	316L	316L	-	-
Hautement résistant	II	2	0,1–5	Al et GS	Al, Cu et GS	316L	316L
		3	5–10	Cu	-	Al	Al
Résistant	III	4	10–50	-	-	Cu	Cu
		5	50–100	-	-	-	-
Résistance réduite	IV	6	100–500	-	-	-	GS
		7	500–1000	-	-	GS	-
Résistance faible	V	8	1000–5000	-	-	-	-
		9	5000–10000	-	-	-	-
Non-résistant	VI	10	>10000	-	-	-	-

À température élevée, l'acier inoxydable 316L et l'aluminium sont classés comme hautement résistants en présence des deux huiles, avec un impact minimal sur leurs propriétés au cours du vieillissement. Ils sont donc compatibles avec elles, l'acier inoxydable offrant la plus grande compatibilité. Toutefois, pour des raisons de coût et de conductivité thermique, l'aluminium pourrait être une option préférable dans plusieurs situations. Par ailleurs, le cuivre, classé comme résistant, et l'acier galvanisé, classé comme ayant une résistance réduite, ont eu un impact plus prononcé sur les propriétés des deux huiles au cours du vieillissement. L'augmentation de la teneur en fer et en zinc dans les échantillons d'huiles vieillis en présence de l'acier galvanisé (LaMSO-GS-500h, LaKSO-GS-1000h, LaKSO-GS-500h et LaKSO-GS-1000h) suggère que l'alliage de zinc de l'acier galvanisé a commencé à céder et à se dégrader rapidement au contact des deux huiles à haute température. Cette dégradation s'est produite principalement au cours des 500 premières heures, comme l'indique le changement minime de la teneur en zinc entre 500 h et 1000 h (figures 68f et 69f), ce qui se traduit par une vitesse de corrosion estimée relativement stable entre 500 h et 1000 h (Figure 73). Par conséquent, l'utilisation de ces métaux, le cuivre et l'acier galvanisé, n'est pas recommandée pour un usage avec les deux huiles dans les applications à température élevée,

en raison de leurs effets négatifs sur la stabilité à long terme de ces huiles et de leur susceptibilité à la corrosion.

IV.3. Limites de l'étude

Cette étude présente des limites qui suggèrent des pistes de recherche potentielles pour l'améliorer et approfondir ses résultats :

Premièrement, les mesures de la masse volumique et de la viscosité cinématique ont été effectuées à des températures inférieures à la température opérationnelle de la microcentrale CSP4Africa, qui est de 210 °C. Plus précisément, les mesures de la viscosité ont été limitées à 100 °C, tandis que celles de la masse volumique n'ont été effectuées qu'à 25 °C pour les échantillons vieillis à température ambiante et 40 °C pour les échantillons vieillis à température élevée. Bien qu'il soit possible d'extrapoler ces résultats à des températures plus élevées en se basant sur le comportement général des huiles végétales [150], des mesures réelles à des températures proches de 210 °C sont nécessaires pour valider les performances attendues de ces deux huiles dans les conditions optimales de fonctionnement de la microcentrale CSP4Africa.

Deuxièmement, les taux de corrosion des métaux testés avec les deux huiles ont été estimés à l'aide de l'équation (15), en utilisant les masses volumiques des bases de données en ligne [257,258], en raison de l'indisponibilité des données des distributeurs locaux. Bien que ces masses volumiques soient cohérentes avec celles calculées à partir des dimensions physiques et poids des métaux testés, elles pourraient quand même introduire des imprécisions dans le calcul des taux de corrosion.

Par ailleurs, les taux de corrosion observés, en particulier pour l'acier inoxydable 316L et l'aluminium, sont relativement faibles. Face à tels résultats, la norme ASTM G31 [253] suggère de prolonger les tests de corrosion conformément à l'équation (16) pour une estimation plus précise du taux de corrosion. Ce qui correspond respectivement à une année et trois années de test à température élevée pour l'aluminium et l'acier inoxydable 316L. Par conséquent, les taux de corrosion rapportés dans cette étude, en particulier pour l'acier inoxydable 316L et l'aluminium, doivent être interprétés comme des approximations.

V. Conclusion

Les huiles des graines de *Lannea microcarpa* (LaMSO) et *Lannea kerstingii* (LaKSO) ont été proposées comme fluides caloporteurs ou de stockage thermique pour la microcentrale CSP4Africa dans le Chapitre 4. Dans ce chapitre, il était question d'investiguer la compatibilité de ces deux huiles avec les métaux couramment utilisés dans le domaine du génie thermique. L'objectif était d'évaluer l'impact de ces métaux sur les propriétés thermophysiques de ces deux huiles destinées à être utilisées comme fluides caloporteurs ou de stockage thermique à 210 °C. Les métaux sélectionnés pour l'étude étaient les suivants : l'acier inoxydable 316L (316L), l'aluminium (Al), le cuivre (Cu) et l'acier galvanisé (GS). Ces métaux sont couramment utilisés pour fabriquer les échangeurs de chaleur, les tuyauteries et les réservoirs de stockage pour les applications à haute température. La compatibilité de ces métaux a été analysée en les immergeant séparément dans les deux huiles à température ambiante pendant une année et à 210 °C pendant 500 h et 1000 h. Les principaux résultats de l'étude peuvent être résumés comme suit :

- À température ambiante, tous les métaux étudiés (316L, Al, Cu et GS) sont classés comme hautement résistants en présence des deux huiles, et aucun d'entre eux n'a eu un impact majeur sur les propriétés thermophysiques des deux huiles étudiées. Ainsi, LaMSO et LaKSO peuvent être stockées en toute sécurité à température ambiante dans des réservoirs fabriqués à partir de ces métaux, sans risque de dégradation accélérée.
- L'acier inoxydable 316L et l'aluminium ont montré une excellente compatibilité avec les deux huiles à température élevée, avec des taux de corrosion largement faibles et un impact négligeable sur les propriétés thermophysiques des deux huiles. En outre, L'acier inoxydable 316L et l'aluminium ont eu un impact similaire sur les propriétés thermophysiques des deux huiles, mais ont présenté des taux de corrosion différents, favorisant le plus l'acier inoxydable 316L parmi les deux métaux.
- Le cuivre et l'acier galvanisé ont accéléré l'oxydation des deux huiles à température élevée, entraînant la formation progressive de couches épaisses de polymère au fil du vieillissement. De plus, les échantillons de cuivre ont pris une teinte noire caractéristique de l'oxyde de cuivre II, tandis que ceux en acier galvanisé présentaient des dépôts noirâtres indiquant une érosion progressive de leur revêtement en zinc. Par conséquent, ces deux métaux ne sont pas recommandés pour une utilisation avec LaMSO et LaKSO dans des applications à température élevée, en raison de leurs effets néfastes sur la stabilité à long terme de ces huiles et de leur vulnérabilité à la corrosion.

En perspective, il serait nécessaire d'étudier l'évolution de la capacité thermique massique et la conductivité thermique des deux huiles après le vieillissement en présence des métaux à température élevée pour une étude plus complète.

Conclusion générale et perspectives

Le développement de la microcentrale solaire à concentration, CSP4Africa, a fourni de cadre d'étude pour la présente thèse. Il était question, d'une part, de proposer un héliostat pleinement opérationnel pour le fonctionnement du champ solaire de la microcentrale CSP4Africa et, d'autre part, d'évaluer les performances de transfert et de stockage thermique de l'huile des graines de *Lannea microcarpa* (LaMSO) et l'huile des graines de *Lannea kerstingii* (LaKSO), en vue de les comparer à l'huile de *Jatropha curcas*, fluide caloporteur précédemment proposé pour la microcentrale CSP4Africa.

Le premier chapitre a porté sur les généralités dans le domaine des héliostats et les huiles végétales comme fluides caloporteurs ou de stockage thermique. D'une part, il a été noté que la performance et la sécurité d'une centrale à tour reposent essentiellement sur la précision de suivi solaire des héliostats. Cette précision est généralement affectée par les sources d'erreur de suivi solaire qui font dévier les taches focales des héliostats du récepteur, causant ainsi une perte d'énergie thermique pouvant aller jusqu'à 40 % de la puissance nominale du champ. Les stratégies de correction des sources d'erreur des héliostats incluent le suivi solaire en boucle fermée, le suivi solaire basé sur un modèle mathématique, et le réagencement, la reconstruction ou la réinstallation rigoureuse de l'héliostat. D'autre part, bien que certaines recherches aient porté sur le potentiel des huiles végétales pour les applications de transfert et de stockage thermique, il existe peu d'études sur leurs propriétés thermophysiques, leurs performances à long terme et leur compatibilité avec les métaux d'ingénierie courants, y compris l'huile des graines de *Lannea microcarpa* et l'huile des graines de *Lannea kerstingii*, des huiles végétales considérées particulièrement stable jusqu'à 120 °C.

Dans le deuxième chapitre, le diagnostic de l'héliostat multifacette de la microcentrale CSP4Africa a révélé cinq sources d'erreur de suivi solaire (l'instabilité de la grille entre les composants, l'incurvation des miroirs, l'insuffisance des couple-moteurs, les jeux de liaison et les liaisons pivot et rotule inappropriées) liées à la structure mécanique, à l'organe d'entraînement et au réglage des miroirs. Les corrections ont consisté à remplacer les moteurs pas-à-pas suite à une étude cinématique ayant déterminée les couples adéquats pour le fonctionnement de l'héliostat, et à proposer une méthode flexible de réglage des miroirs sur la base d'une étude de faisabilité. Les analyses ont montré que la correction de l'instabilité de la grille et les liaisons pivots et rotules inappropriées impliquerait la reconception de l'héliostat multifacette. Par conséquent, ces sources d'erreur n'ont pas été abordées. Après les corrections, des tests de suivi solaire ont été réalisés entre juin 2023 et février 2024, pour évaluer l'impact des améliorations apportées. Ces tests indiquent que l'héliostat est désormais capable de fonctionner dans la période de fonctionnement de la microcentrale CSP4Africa, qui s'étend de 9h30 à 14h30. En outre, lors de ces tests, des précisions de focalisation satisfaisantes ont été observées, avec des déviations plus ou moins inférieures 0,2 m. Toutefois, même s'il était possible de régler efficacement tous

les miroirs de façon flexible en une journée, il était difficile d'obtenir une tache focale carrée de 0,33 m de côté en raison de l'instabilité de la grille qui faisait que les réflecteurs n'avaient pas le même angle. Parallèlement, en tant qu'alternative à l'héliostat multifacette, un héliostat piédestal de faible technicité avec son capteur de suivi en boucle fermée a été conçu pour la microcentrale CSP4Africa. Après l'installation de cet héliostat, des tests journaliers de suivi solaire ont été réalisés sur plusieurs jours afin d'évaluer l'aptitude de l'appareil à maintenir sa tache focale sur la cible. Des résultats satisfaisants ont été obtenus, avec une erreur de suivi solaire inférieure à 1° pour une distance focale de 5 m. Cependant, des tests de suivi solaire sur une année complète, dans différentes positions du champ avec des distances focales variées, sont encore nécessaires pour valider le principe de suivi solaire proposé.

Dans le troisième chapitre, l'huile des graines de *Lannea microcarpa* (LaMSO) et l'huile des graines de *Lannea kerstingii* (LaKSO) ont été investiguées comme fluides caloporteurs ou de stockage thermique pour la microcentrale CSP4Africa, ou plus ouvertement pour les applications à température élevée. Les deux huiles ont été soumises à un vieillissement isotherme à 210 °C pendant 500 h et 1000 h, suivi de l'analyse de leurs propriétés thermophysiques. LaMSO et LaKSO ont toutes les deux présenté une capacité de stockage thermique supérieure à celle de Dowtherm A (le fluide caloporteur communément utilisé dans les centrales à concentration solaire) à 40 °C, avec des capacités thermiques massiques supérieures à celle de Dowtherm A dans l'intervalle de température allant de 30 °C à 300 °C. L'analyse thermogravimétrique a révélé une stabilité thermique notable pour les deux huiles, avec des pertes de masse inférieures à 3 % après 1000 h de vieillissement. Leur masse volumique est restée relativement stable, indiquant une performance constante en tant que fluides caloporteurs ou matériaux de stockage thermique. Malgré l'augmentation de la viscosité à 40 °C, la viscosité à 100 °C est restée comparable entre les échantillons d'huile neufs et vieillis. Par ailleurs, le point d'éclair des deux huiles est resté relativement élevé, autour de 200 °C, même après 1000 h de vieillissement. Cependant, l'augmentation de leur point de fusion due à la saturation pose des défis, car elle pourrait entraîner une solidification dans les tuyauteries ou réservoirs dans certains climats. Globalement, les résultats suggèrent que LaMSO et LaKSO sont des alternatives prometteuses et durables pour les applications CSP jusqu'à 210 °C.

Dans le quatrième et dernier chapitre, la compatibilité des huiles LaMSO et LaKSO avec les métaux couramment utilisés dans le domaine du génie thermique a été explorée. Les métaux sélectionnés pour l'étude étaient les suivants : l'acier inoxydable 316L, l'aluminium, le cuivre et l'acier galvanisé. La compatibilité de ces métaux a été analysée en les immergeant séparément dans des échantillons d'huile de chaque espèce à température ambiante pendant une année, et à 210 °C pendant 500 h et 1000 h. À température ambiante, aucun des métaux investigués n'a eu d'impact significatif sur les propriétés

thermophysiques des deux huiles. Cependant, à 210 °C, le cuivre et l'acier galvanisé ont accéléré leur oxydation, pendant que l'acier inoxydable 316L et l'aluminium ont montré une excellente compatibilité.

L'inaccessibilité à l'énergie dans le Sahel, plus ouvertement en Afrique subsaharienne, pourrait être résolue par des solutions innovantes et adaptées au contexte local. Les centrales solaires à concentration pourraient être l'une de ces solutions, à condition de privilégier la simplicité, la durabilité et l'intégration locale. Le projet CSP4Africa est un aperçu de la façon dont cela est possible. Deux technologies d'héliostat, dont l'une multifacette, limitant les ressources de conception, et l'autre piédestal, de faible technicité, ont été testées avec des résultats prometteurs. De même, l'huile des graines de *Lannea microcarpa* et l'huile des graines de *Lannea kerstingii*, des huiles végétales non consommées à présent, ont été étudiées et testées comme fluides caloporteurs à température élevée avec des résultats satisfaisants. L'exploitation de ces différents composants et matériaux pourrait augmenter l'efficacité de la microcentrale CSP4Africa, tout en réduisant potentiellement le coût de l'électricité produite. Ces avancées technologiques pourraient servir de modèle pour d'autres projets similaires en Afrique subsaharienne et contribuer ainsi à la transition énergétique du continent.

Dans une perspective d'amélioration continue, il serait judicieux d'explorer des modifications structurelles, telles que la stabilisation de la grille des héliostats multifacettes, pour accroître leur précision de suivi solaire. De plus, le développement d'un mécanisme flexible de fixation des miroirs, similaire à celui proposé pour l'héliostat multifacette, pourrait être adapté à l'héliostat piédestal, facilitant ainsi l'incurvation des miroirs. Par ailleurs, la valorisation des huiles LaMSO et LaKSO usagées sous forme de biocarburants, à l'instar des huiles de friture, ou de polymères biodégradables, pourrait offrir une seconde vie à ces huiles.

Bibliographie

- [1] Tete KHS, Soro YM, Sidibé SS, Jones RV. Assessing energy security within the electricity sector in the West African economic and monetary union: Inter-country performances and trends analysis with policy implications. *Energy Policy* 2023;173:113336. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113336>.
- [2] Tarekegne B, Sidortsov R. Evaluating sub-Saharan Africa's electrification progress: Guiding principles for pro-poor strategies. *Energy Research & Social Science* 2021;75:102045. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102045>.
- [3] Nalule VR. 2018. *Energy Poverty and Access Challenges in Sub-Saharan Africa: The role of regionalism*. Cham: Springer Nature, ISBN: 978-3-319-95402-8, 224 p. <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-95402-8>.
- [4] Adom PK, Amuakwa-Mensah F, Agradi MP, Nsabimana A. Energy poverty, development outcomes, and transition to green energy. *Renewable Energy* 2021;178:1337–52. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.06.120>.
- [5] González-Eguino M. Energy poverty: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2015;47:377–85. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.013>.
- [6] Sule IK, Yusuf AM, Salihu M-K. Impact of energy poverty on education inequality and infant mortality in some selected African countries. *Energy Nexus* 2022;5:100034. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2021.100034>.
- [7] International Energy Agency. *World Energy Outlook 2024*, Paris, France, 2024. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/02b65de2-1939-47ee-8e8a-4f62c38c44b0/WorldEnergyOutlook2024.pdf> (accessed October 20, 2024).
- [8] International Energy Agency. *World Energy Outlook 2020*, Paris, France, 2020. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/a72d8abf-de08-4385-8711-b8a062d6124a/WEO2020.pdf> (accessed October 20, 2024).
- [9] World Bank Group. *Connecting Millions to Electricity in Africa With “Mission 300”*. Washington, United States, 2024. <https://www.worldbank.org/en/news/feature/2024/09/19/five-ways-the-world-bank-will-achieve-mission-300> (accessed October 20, 2024).
- [10] International Energy Agency. *World Energy Outlook 2023*, Paris, France, 2023. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/86ede39e-4436-42d7-ba2a-edf61467e070/WorldEnergyOutlook2023.pdf> (accessed October 20, 2024).
- [11] Katoch OR, Sharma R, Parihar S, Nawaz A. Energy poverty and its impacts on health and education: a systematic review. *International Journal of Energy Sector Management* 2024;18:411–31. <https://doi.org/10.1108/IJESM-10-2022-0007>.
- [12] Union Économique et Monétaire Ouest-Africaine. *Atlas de l'énergie dans l'espace UEMOA*, Ouagadougou, Burkina Faso, 2020. https://www.ifdd.francophonie.org/wp-content/uploads/2021/09/Atlas_Energie_UEMOA-OIF-IFDD_2020.pdf.
- [13] International Energy Agency. *Africa Energy Outlook 2022*, Paris, France 2022. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/220b2862-33a6-47bd-81e9-00e586f4d384/AfricaEnergyOutlook2022.pdf> (accessed October 20, 2024).
- [14] Hafner M, Tagliapietra S, De Strasser L. 2018. *Energy in Africa: Challenges and opportunities*. Cham: Springer Nature, ISBN: 978-3319-92219-5, 137 p. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-319-92219-5.pdf>.
- [15] Groupe de la Banque Africaine de Développement. *Maroc : Noor Ouarzazate, l'un des plus grands parcs solaires au monde, contribue à la transition énergétique de l'Afrique*. Abidjan, Côte d'Ivoire 2020. <https://www.afdb.org/fr/news-and-events/maroc-noor-ouarzazate-lun-des-plus-grands-parcs-solaires-au-monde-contribue-la-transition-energetique-de-lafrique-36418> (accessed October 20, 2024).
- [16] Agence Française de Développement. *Le plus grand complexe solaire thermodynamique des pays du Sud à Ouarzazate*. Paris, France, 2020. <https://www.afd.fr/fr/carte-des-projets/le-plus-grand-complexe-solaire-thermodynamique-des-pays-du-sud-ouarzazate> (accessed October 20, 2024).

- [17] N'Tsoukpoe KE, Azoumah KY, Ramde E, Fiagbe AKY, Neveu P, Py X, et al. Integrated design and construction of a micro-central tower power plant. *Energy for Sustainable Development* 2016;31:1–13. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2015.11.004>.
- [18] N'Tsoukpoe KE, Lekombo SC, Kemausuor F, Ko GK, Diaw EHB. Overview of solar thermal technology development and applications in West Africa: Focus on hot water and its applications. *Scientific African* 2023;21:e01752. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01752>.
- [19] Seshie YM. Modélisation et expérimentation d'une microcentrale solaire a concentration. Thèse de doctorat. Institut 2iE, Burkina Faso, 2018. 123p. http://documentation.2ie-edu.org/cdi2ie/opac_css/index.php?lvl=author_see&id=17880.
- [20] Kenda ES, Py X, N'Tsoukpoe KE, Coulibaly Y, Sadiki N. Thermal Energy Storage Materials Made of Natural and Recycled Resources for CSP in West Africa. *Waste Biomass Valor* 2018;9:1687–701. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-9904-2>.
- [21] Kenda ES, N'Tsoukpoe KE, Ouédraogo IWK, Coulibaly Y, Py X, Ouédraogo FMAW. *Jatropha curcas* crude oil as heat transfer fluid or thermal energy storage material for concentrating solar power plants. *Energy for Sustainable Development* 2017;40:59–67. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2017.07.003>.
- [22] Kenda ES. Stockage thermique à base d'éco-matériaux locaux pour centrale solaire à concentration : cas du pilote CSP4Africa. Thèse de doctorat. Institut 2iE (Burkina Faso) & Université de Perpignan Via Domitia (France), 2017. 206 p. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01753832/document>.
- [23] Gomna A, N'Tsoukpoe KE, Le Pierrès N, Coulibaly Y. Thermal stability of a vegetable oil-based thermal fluid at high temperature. *African Journal of Science, Technology, Innovation and Development* 2020;12:317–26. <https://doi.org/10.1080/20421338.2020.1732080>.
- [24] Gomna A. Study of *jatropha curcas* oil for use as high-temperature heat transfer and storage fluid. PhD thesis. Institut 2iE (Burkina Faso), 2020. 151 p. http://documentation.2ie-edu.org/cdi2ie/opac_css/doc_num.php?explnum_id=4016.
- [25] Koua V. Étude expérimentale de l'huile des graines de *Lannea microcarpa* pour son utilisation comme fluide de transfert ou de stockage thermique à haute température. Mémoire de Master. Institut 2iE (Burkina Faso), 2022. 57 p.
- [26] Sattler JC, Röger M, Schwarzbözl P, Buck R, Macke A, Raeder C, et al. Review of heliostat calibration and tracking control methods. *Solar Energy* 2020;207:110–32. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.06.030>.
- [27] Stone KW, Jones SA. Analysis of Solar Two heliostat tracking error sources. American Society of Mechanical Engineers, New York, United States, 1999. <https://www.osti.gov/biblio/20030576>.
- [28] Fire leads to shut down of tower at 392-MW Ivanpah solar power plant in US. NS ENERGY 2016. <https://www.nsenergybusiness.com/news/newsfire-leads-to-shut-down-of-tower-at-392-mw-ivanpah-solar-power-plant-in-us-230516-4901051/> (accessed April 2, 2023).
- [29] Dan Chiras. 2009. Power From The Sun: A Pratical Guide to Solar Electricity, Gabriola Island: New Society Publishers, ISBN: 978-0-86571-621-6, 89 p. https://www.google.bf/books/edition/Power_from_the_Sun/vpQ4rp1R7usC?hl=fr&gbpv=1&dq=power+from+the+sun&printsec=frontcover (accessed January 21, 2022).
- [30] Duffie JA, Beckman WA. 2013. Solar Radiation. Solar Engineering of Thermal Processes. Hoboken: John Wiley & Sons Ltd., ISBN: 978-1-118-67160-3, p. 3–42. <https://doi.org/10.1002/9781118671603.ch1>.
- [31] Behar O, Khellaf A, Mohammedi K. A review of studies on central receiver solar thermal power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2013;23:12–39. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.017>.
- [32] Escobar-Toledo M, Arancibia-Bulnes CA, Iriarte-Cornejo C, Weissman J, Riveros-Rosas D, Cabanillas RE, et al. Heliostat image drift behavior for different error sources. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 2014;6:023117. <https://doi.org/10.1063/1.4872465>.

- [33] Zhu G, Augustine C, Mitchell R, Muller M, Kurup P, Zolan A, et al. Roadmap to Advance Heliostat Technologies for Concentrating Solar-Thermal Power. National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States); 2022. <https://doi.org/10.2172/1888029>.
- [34] Phipps GS. Heliostat beam characterization system-calibration technique. Sandia National Laboratories, California, United States, 1979. <https://www.osti.gov/biblio/6079363>.
- [35] Collado FJ. One-point fitting of the flux density produced by a heliostat. *Solar Energy* 2010;84:673–84. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.01.019>.
- [36] Martínez-Hernández A, Gonzalo IB, Romero M, González-Aguilar J. Drift analysis in tilt-roll heliostats. *Solar Energy* 2020;211:1170–83. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.10.057>.
- [37] Freeman J, Kiranlal EU, Rajasree SR. Study of the errors influencing heliostats for calibration and control system design. International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE-2014), Jaipu-India, May 9–11, 2014. 1–8. <https://doi.org/10.1109/ICRAIE.2014.6909113>.
- [38] Middleton WEK. Giovanni Alfonso Borelli and the Invention of the Heliostat. *Archive for History of Exact Sciences* 1973;10:329–41. <https://www.jstor.org/stable/41133367>.
- [39] Zuidervart HJ. Reflecting ‘Popular Culture’: The Introduction, Diffusion, and Construction of the Reflecting Telescope in the Netherlands. *Annals of Science* 2004;61:407–52. <https://doi.org/10.1080/00033790410001654890>.
- [40] Mills AA. Portable heliostats (solar illuminators). *Annals of Science* 1986;43:369–406. <https://doi.org/10.1080/00033798600200291>.
- [41] Jones SA, Lumia R, Davenport R, Thomas RC, Gorman D, Kolb GJ, et al. Heliostat cost reduction study. Sandia National Laboratories, California, United States, 2007. <https://doi.org/10.2172/912923>.
- [42] Falcone PK. A handbook for solar central receiver design. Sandia National Laboratories, California, United States, 1986. <https://doi.org/10.2172/6545992>.
- [43] Steinmeyer DA. Second generation heliostat with high-volume manufacturing facility defined by General Motors. Sandia National Laboratories, California, United States, 1981. <https://doi.org/10.2172/6325219>.
- [44] Dunder VD. Structural analysis of second-generation heliostats. Sandia National Laboratories, California, United States, 1981. <https://doi.org/10.2172/5354129>.
- [45] Fish MJ, Dellin TA. Heliostat design cost/performance tradeoffs. Sandia National Laboratories, California, United States, 1979. <https://doi.org/10.2172/5718354>.
- [46] Blackmon JB. Design, fabrication, and test of a heliostat for a central receiver solar thermal power plant. Sandia National Laboratories, California, United States, 1975. <https://www.osti.gov/biblio/7331325>.
- [47] NREL. Operational | Concentrating Solar Power Projects 2022. <https://solarpaces.nrel.gov/by-status/operational> (accessed April 30, 2022).
- [48] Mancini TR. Catalog of solar heliostats. IEA SolarPACES Report 2000;3:00. <http://www.fika.org/jb/resources/Heliostat%20Catalog.pdf>.
- [49] Alpert DJ, Houser RM. Performance evaluation of large-area glass-mirror heliostats. Sandia National Laboratories, California, United States, 1988. <https://www.osti.gov/biblio/6981596>.
- [50] Collares M. State of the Art in Heliostats and Definition of Specifications n.d. http://193.146.147.224/deliverables/STAGE_STE_Deliverable_12_1.pdf.
- [51] Mavis CL. A description and assessment of heliostat technology. Sandia National Laboratories, California, United States, 1989. <https://doi.org/10.2172/6799604>.
- [52] Beninga K, Butler B, Sandubrae J, Walcott K. An improved design for stretched-membrane heliostats. Sandia National Laboratories, California, United States, 1989. <https://doi.org/10.2172/6110729>.

- [53] Butler BL, Beninga K, Loomis WC, Royval PJ. Development of stressed membrane heliostat mirror module. Sandia National Laboratories, California, United States, 1987. <https://doi.org/10.2172/6888841>.
- [54] Wajss P, Filipowicz M. A novel, spherical shaped sun tracker. *Polska Energetyka Sloneczna* 2013;1–4, 33–38. <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.baztech-97cb3a89-d4e1-4f96-abaf-1e1a4e970412>.
- [55] Design and demonstration of an improved stretched-membrane heliostat. Sandia National Laboratories, California, United States, 1989. <https://doi.org/10.2172/6991128>.
- [56] Pfahl A. Survey of Heliostat Concepts for Cost Reduction. *Journal of Solar Energy Engineering* 2013;136. <https://doi.org/10.1115/1.4024243>.
- [57] Amsbeck L, Buck R, Pfahl A, Uhlig R. Optical Performance and Weight Estimation of a Heliostat With Ganged Facets. *Journal of Solar Energy Engineering* 2007;130. <https://doi.org/10.1115/1.2804630>.
- [58] Hilton RD. Ganged heliostat. Patent number: US4110010A, 1978.
- [59] Medina O. Unified heliostat array. Patent number: US4832002A, 1989.
- [60] Mills D, Schramek P. Solar energy reflector array. Patent number: WO2002070966A1, 2002.
- [61] Francia G. Multiple mirrored apparatus utilizing solar heat. Patent number: US3466119A, 1969.
- [62] Pfahl A, Coventry J, Röger M, Wolfertstetter F, Vásquez-Arango JF, Gross F, et al. Progress in heliostat development. *Solar Energy* 2017;152:3–37. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.03.029>.
- [63] Schmaelzle PH, Cheung PC. Solar tower system with carousel heliostats. Patent number: US8887711B2, 2014.
- [64] Balz M, Göcke V, Keck T, von Reeken F, Weinrebe G, Wöhrbach M. Stellio – development, construction and testing of a smart heliostat, Cape Town, South Africa: 2016, p. 020002. <https://doi.org/10.1063/1.4949026>.
- [65] Pfahl A, Buck R, LIEDKE P-J, GROSS F. Solar device. Patent number: WO2016202941A2, 2016.
- [66] Pfahl A, Rong A. Low-cost movable heliostat. *AIP Conference Proceedings* 2022;2445:120019. <https://doi.org/10.1063/5.0086923>.
- [67] Luque-Heredia I, Magalhães P, Muller M. 2016. CPV Tracking and Trackers. *Handbook of Concentrator Photovoltaic Technology*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., ISBN: 978-1-118-75565-5, p. 293–338. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781118755655.ch06>.
- [68] Baum VA, Aparasi RR, Garf BA. High-power solar installations. *Solar Energy* 1957;1:6–12. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(57\)90049-X](https://doi.org/10.1016/0038-092X(57)90049-X).
- [69] Jones D. Heliostatic solar energy conversion system. Patent number: US4365618A, 1982.
- [70] Bouamra M, Merzouk M. Cosine Efficiency Distribution with Reduced Tower Shadowing Effect in Rotating Heliostat Field. *Arab J Sci Eng* 2019;44:1415–24. <https://doi.org/10.1007/s13369-018-3558-7>.
- [71] Jones D, Eibling JA. Rotating field collector subsystem Phase I study and evaluation. Stilson and Associates, Columbus, OH (USA); 1982. <https://doi.org/10.2172/6667361>.
- [72] Nsengiyumva W, Chen SG, Hu L, Chen X. Recent advancements and challenges in Solar Tracking Systems (STS): A review. *Renewable Sustainable Energy Rev* 2018;81:250–79. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.085>.
- [73] Zomeworks Corporation. Passive Solar Tracker for Photovoltaic Modules n.d. <http://www.zomeworks.com/photovoltaic-tracking-racks/> (accessed April 1, 2024).
- [74] Parmar J, Parmar AN, Gautam VS. Passive Solar Tracking System, 2015. <https://www.semanticscholar.org/paper/Passive-Solar-Tracking-System-Parmar-Parmar/79affcd91f1088d9f3ad1f48323aaa0962b218a7>.
- [75] Poulek V. Testing the new solar tracker with shape memory alloy actors. *IEEE 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion - WCPEC (A Joint Conference of PVSC, PVSEC and PSEC)*, Waikoloa Village–HI, December 5–9, 1994. <https://doi.org/10.1109/WCPEC.1994.520161>.

- [76] Clifford MJ, Eastwood D. Design of a novel passive solar tracker. *Solar Energy* 2004;77:269–80. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.06.009>.
- [77] Farooqui SZ. A gravity based tracking system for box type solar cookers. *Solar Energy* 2013;92:62–8. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.02.024>.
- [78] Schubnell M, Ries H. Velocity-controlled tracking of the sun. *Solar Energy Materials* 1990;21:207–12. [https://doi.org/10.1016/0165-1633\(90\)90054-5](https://doi.org/10.1016/0165-1633(90)90054-5).
- [79] Kribus A, Vishnevetsky I, Meri M, Yogev A, Sytnik A. Continuous Tracking of Heliostats. *Journal of Solar Energy Engineering* 2004;126:842–9. <https://doi.org/10.1115/1.1668026>.
- [80] Elsayed AM, Elsamahy A, Rady M, Amin MA. An analysis methodology of the effect of using different tracking time-steps on the net energy gain of a CSP power plant. *Journal of Al-Azhar University Engineering Sector* 2017;12:868–76. <https://doi.org/10.21608/aej.2017.19194>.
- [81] Pargmann M, Leibauer M, Nettelroth V, Quinto DM, Pitz-Paal R. It is Not About Time - A New Standard for Open-Loop Heliostat Calibration Methods 2023. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2898838/v1>.
- [82] Glatzmaier G. Multi-Heliostat Wireless Communication Assessment (Phase II Final Report). National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO (United States); 2014. <https://doi.org/10.2172/1505157>.
- [83] Toister E. Flexible Assembly Solar Technology (FAST) Final Technical Report. BrightSource Energy Inc., Jerusalem (Israel); 2014. <https://doi.org/10.2172/1167013>.
- [84] Balz M, Göcke V, Keck T, von Reeken F, Weinrebe G, Wöhrbach M. Stellio—development, construction and testing of a smart heliostat. *AIP conference proceedings*, vol. 1734, AIP Publishing; 2016. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4949026>.
- [85] Kurup P, Akar S, Glynn S, Augustine C, Davenport P. Cost Update: Commercial and Advanced Heliostat Collectors. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO (United States); 2022. <https://doi.org/10.2172/1847876>.
- [86] Lara-Cerecedo LO, Moreno-Cruz I, Pitalúa-Díaz N, Arancibia-Bulnes CA. Modeling of Drift Effects on Solar Tower Concentrated Flux Distributions. *Int J Photoenergy* 2016;2016. <https://doi.org/10.1155/2016/8375361>.
- [87] Gedda M. Traduction française des lignes directrices PRISMA pour l'écriture et la lecture des revues systématiques et des méta-analyses. *Kinésithérapie, la Revue* 2015;15:39–44. <https://doi.org/10.1016/j.kine.2014.11.004>.
- [88] Baheti R, Scott P. Design of self-calibrating controllers for heliostats in a solar power plant. *IEEE Transactions on Automatic Control* 1980;25:1091–7. <https://doi.org/10.1109/TAC.1980.1102527>.
- [89] Malan KJ. A heliostat field control system. Master's thesis. Stellenbosch University (South Africa), 2014. 129 p. <https://scholar.sun.ac.za/items/2107a711-08f1-46cf-b0c5-836766575334>.
- [90] Stone KW. Automatic heliostat track alignment method. Patent number: US4564275A, 1986.
- [91] Stone KW, Jones SA. Analysis of Solar Two heliostat tracking error sources. American Society of Mechanical Engineers, New York, United States, 1999. <https://www.osti.gov/biblio/20030576>.
- [92] Thalhammer ED, Phipps GS. Heliostat beam characterization system. Sandia National Laboratories, California, United States. <https://www.osti.gov/biblio/6070767>.
- [93] Andraka CE, Ho CK, Khalsa SSS. An automated method to correct heliostat tracking errors. Sandia National Laboratories, California, United States, 2011. <https://www.osti.gov/biblio/1106781>.
- [94] Emes M, Jafari A, Pfahl A, Coventry J, Arjomandi M. A review of static and dynamic heliostat wind loads. *Solar Energy* 2021;225:60–82. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.07.014>.
- [95] Wu Z, Gong B, Wang Z, Li Z, Zang C. An experimental and numerical study of the gap effect on wind load on heliostat. *Renewable Energy* 2010;35:797–806. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.09.009>.
- [96] Díaz-Félix LA, Escobar-Toledo M, Weissman J, Pitalúa-Díaz N, Arancibia-Bulnes CA. Evaluation of Heliostat Field Global Tracking Error Distributions by Monte Carlo Simulations. *Energy Procedia* 2014;49:1308–17. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.03.140>.

- [97] Jones SA, Edgar RM, Houser RM. Recent results on the optical performance of solar two heliostats. Sandia National Laboratories, California, United States, 1994. <https://www.osti.gov/biblio/10106656>.
- [98] Strachan JW, Houser RM. Testing and evaluation of large-area heliostats for solar thermal applications. Sandia National Laboratories, California, United States, 1993. <https://doi.org/10.2172/10177805>.
- [99] Stone K, Lopez CW. Evaluation of the Solar One track alignment methodology. American Society of Mechanical Engineers, New York (US) 1995. <https://www.osti.gov/biblio/113325>.
- [100] Hale MJ. Solar two performance evaluation. SAE Technical Paper, 1999. <https://doi.org/10.4271/1999-01-2669>.
- [101] Mavis CL. 10 MW Solar Thermal Central Receiver Pilot Plant heliostat and beam characterization system evaluation, November 1981-December 1986. United States: 1988. <https://doi.org/10.2172/7102805>.
- [102] Joubert H. Development of a web-based control system for a heliostat test facility. Master's thesis. Stellenbosch University (South Africa), 2019. 81 p. <https://scholar.sun.ac.za:443/handle/10019.1/106147>.
- [103] Mavis CL. 10-MWe solar-thermal central-receiver pilot-plant-heliostat experiences. Sandia National Laboratories, Albuquerque United States, 1983. <https://doi.org/10.2172/6274152>.
- [104] Kribus A, Vishnevetsky I, Yogev A, Rubinov T. Closed loop control of heliostats. *Energy* 2004;29:905–13. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(03\)00195-6](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(03)00195-6).
- [105] Gross F, Balz M. Potentially confusing coordinate systems for solar tower plants, Daegu, South Korea: 2020, p. 030017. <https://doi.org/10.1063/5.0028942>.
- [106] Guo M, Wang Z, Sun F. Simulations of reflected sun beam traces over a target plane for an azimuth–elevation tracking heliostat with fixed geometric error sources. *Solar Energy* 2013;97:102–11. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.06.035>.
- [107] Iriarte-Cornejo C, Arancibia-Bulnes CA, Salgado-Transito I, Weissman J, Cabanillas RE, Estrada CA. ABCompensation of heliostat drift by seasonal sampling. *Solar Energy* 2014;105:330–40. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.03.023>.
- [108] Iriarte-Cornejo C, Arancibia-Bulnes CA, Weissman J, Cabanillas RE, Estrada CA. Dynamic Drift Compensation for Heliostats. *Energy Procedia* 2014;49:2109–17. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.03.223>.
- [109] Malan K, Gauché P. Model based Open-loop Correction of Heliostat Tracking Errors. *Energy Procedia* 2014;49:2118–24. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.03.224>.
- [110] Berenguel M, Rubio FR, Valverde A, Lara PJ, Arahall MR, Camacho EF, et al. An artificial vision-based control system for automatic heliostat positioning offset correction in a central receiver solar power plant. *Solar Energy* 2004;76:563–75. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.12.006>.
- [111] Convery MR. Closed-loop control for power tower heliostats. *High and Low Concentrator Systems for Solar Electric Applications VI*, vol. 8108, SPIE; 2011, p. 142–9. <https://doi.org/10.1117/12.898564>.
- [112] Bonanos AM. Error analysis for concentrated solar collectors. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 2012;4:063125. <https://doi.org/10.1063/1.4768546>.
- [113] Guo M, Wang Z, Zhang J, Sun F, Zhang X. Accurate altitude–azimuth tracking angle formulas for a heliostat with mirror–pivot offset and other fixed geometrical errors. *Solar Energy* 2011;85:1091–100. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.03.003>.
- [114] Zaibel R, Dagan E, Karni J, Ries H. An astigmatic corrected target-aligned heliostat for high concentration. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 1995;37:191–202. [https://doi.org/10.1016/0927-0248\(94\)00206-1](https://doi.org/10.1016/0927-0248(94)00206-1).
- [115] W L, Gauche P. Sensitivity analysis of a curved heliostat facet profile 2012. <https://scholar.sun.ac.za:443/handle/10019.1/83973>.

- [116] Ren L, Wei X, Lu Z, Yu W, Xu W, Shen Z. A review of available methods for the alignment of mirror facets of solar concentrator in solar thermal power system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2014;32:76–83. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.006>.
- [117] Sánchez-González A, Caliot C, Ferrière A, Santana D. Determination of heliostat canting errors via deterministic optimization. *Solar Energy* 2017;150:136–46. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.04.039>.
- [118] Landman W, Gauché P. Influence of Canting Mechanism and Facet Profile on Heliostat Field Performance. *Energy Procedia* 2014;49:126–35. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.03.014>.
- [119] Yellowhair J, Ho CK. Heliostat Canting and Focusing Methods: An Overview and Comparison, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection; 2010, p. 609–15. <https://doi.org/10.1115/ES2010-90356>.
- [120] Buck R, Teufel E. Comparison and Optimization of Heliostat Canting Methods. *Journal of Solar Energy Engineering* 2009;131. <https://doi.org/10.1115/1.3027500>.
- [121] Igel EA, Hughes RL. Optical analysis of solar facility heliostats. *Solar Energy* 1979;22:283–95. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(79\)90143-9](https://doi.org/10.1016/0038-092X(79)90143-9).
- [122] Chong KK, Tan MH. Range of motion study for two different sun-tracking methods in the application of heliostat field. *Solar Energy* 2011;85:1837–50. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.04.024>.
- [123] Sánchez-González A. Analytic function for heliostat flux mapping with astigmatism and defocus. *Solar Energy* 2022;241:24–38. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.05.045>.
- [124] Bouamra M, Merzouk M. Cosine Efficiency Distribution of Rotating Heliostat Field. *International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, Tangier–Morocco, December 4–7, 2017. <https://doi.org/10.1109/IRSEC.2017.8477337>.
- [125] Cádiz P, Frassetto M, Silva M, Martínez F, Carballo J. Shadowing and Blocking Effect Optimization for a Variable Geometry Heliostat Field. *Energy Procedia* 2015;69:60–9. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.008>.
- [126] Chong K-K, Tan MH. Comparison Study of Two Different Sun-Tracking Methods in Optical Efficiency of Heliostat Field. *International Journal of Photoenergy* 2012;2012:e908364. <https://doi.org/10.1155/2012/908364>.
- [127] Reda I, Andreas A. Solar position algorithm for solar radiation applications. *Solar Energy* 2004;76:577–89. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.12.003>.
- [128] Blanco-Muriel M, Alarcón-Padilla DC, López-Moratalla T, Lara-Coira M. Computing the solar vector. *Solar Energy* 2001;70:431–41. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00156-0](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00156-0).
- [129] Escobar-Toledo M, Arancibia-Bulnes CA, Peña-Cruz MI, Riveros-Rosas D, Peón-Anaya R, Iriarte-Cornejo C, et al. Analysis of Drift Phenomena in Heliostat Images, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection; 2013, p. 385–92. <https://doi.org/10.1115/ES2012-91187>.
- [130] Camacho EF, Berenguel M. Control of Solar Energy Systems. *IFAC Proceedings Volumes* 2012;45:848–55. <https://doi.org/10.3182/20120710-4-SG-2026.00181>.
- [131] Chock RY, Clucas B, Peterson EK, Blackwell BF, Blumstein DT, Church K, et al. Evaluating potential effects of solar power facilities on wildlife from an animal behavior perspective. *Conservation Science and Practice* 2021;3:e319. <https://doi.org/10.1111/csp2.319>.
- [132] Aiuchi K, Yoshida K, Onozaki M, Katayama Y, Nakamura M, Nakamura K. Sensor-controlled heliostat with an equatorial mount. *Solar Energy* 2006;80:1089–97. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.10.007>.
- [133] Quero JM, Aracil C, Franquelo LG, Ricart J, Ortega PR, Dominguez M, et al. Tracking Control System Using an Incident Radiation Angle Microsensor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2007;54:1207–16. <https://doi.org/10.1109/TIE.2007.893075>.
- [134] Jones SA, Stone KW. Analysis of Strategies to Improve Heliostat Tracking at Solar Two, Sandia National Laboratories, California, United States, 1999. <https://www.osti.gov/biblio/3259>.

- [135] Sánchez-González A, Lozano-Cancelas A, Morales-Sánchez R, Castillo JC. Canting heliostats with computer vision and theoretical imaging. *Renewable Energy* 2022;200:957–69. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.10.014>.
- [136] Berenguel M, Rubio FR, Valverde A, Lara PJ, Arahal MR, Camacho EF, et al. An artificial vision-based control system for automatic heliostat positioning offset correction in a central receiver solar power plant. *Solar Energy* 2004;76:563–75.
- [137] Quero JM, Aracil C, Franquelo LG, Ricart J, Ortega PR, Domínguez M, et al. Tracking control system using an incident radiation angle microsensor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2007;54:1207–16.
- [138] Aiuchi K, Yoshida K, Onozaki M, Katayama Y, Nakamura M, Nakamura K. Sensor-controlled heliostat with an equatorial mount. *Solar Energy* 2006;80:1089–97. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.10.007>.
- [139] Keck T, Schönfelder V, Zwingmann B, Gross F, Balz M, Siros F, et al. High-performance stellio heliostat for high temperature application. *AIP Conference Proceedings* 2022;2445:120014. <https://doi.org/10.1063/5.0086592>.
- [140] Bern G, Schöttl P, Heimsath A, Nitz P. Novel imaging closed loop control strategy for heliostats. *AIP Conference Proceedings* 2017;1850:030005. <https://doi.org/10.1063/1.4984348>.
- [141] Harper PJ, Dreijer J, Malan K, Larmuth J, Gauche P. Use of MEMs and optical sensors for closed loop heliostat control. *AIP Conference Proceedings* 2016;1734:070015. <https://doi.org/10.1063/1.4949162>.
- [142] Swart BD. A Method for accurate measurement of heliostat mirror orientation. Master's thesis. Stellenbosch University (South Africa), 2017. 128 p. <https://scholar.sun.ac.za:443/handle/10019.1/101038>.
- [143] Fairman P, Farrant D, Connor P. Closed loop optical tracking of heliostats. *AIP Conference Proceedings* 2019;2126:030021. <https://doi.org/10.1063/1.5117533>.
- [144] Chong KK, Lim CY, Hiew CW. Cost-effective solar furnace system using fixed geometry Non-Imaging Focusing Heliostat and secondary parabolic concentrator. *Renewable Energy* 2011;36:1595–602. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.11.010>.
- [145] Liang W, Wang Z. Research on Tracking Precision of the Heliostat. In: Goswami DY, Zhao Y, editors. *Proceedings of ISES World Congress 2007 (Vol. I – Vol. V)*, Heidelberg–Berlin, September 18–21, 2009, p. 1764–7. https://doi.org/10.1007/978-3-540-75997-3_361.
- [146] Gunstone F. 2011. *Vegetable Oils in Food Technology: Composition, Properties and Uses*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., ISBN: 978-1-4443-3991-8, 378 p. https://books.google.bf/books?hl=fr&lr=&id=lnk2tdo8_P4C&oi=fnd&pg=PR11&ots=2-Fkmb6S3N&sig=Kgdcfu9D-tSwY5OxkYWpINWQ4YQ&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false.
- [147] Gornay J. Transformation par voie thermique de triglycérides et d'acides gras. Application à la valorisation chimique des déchets lipidiques. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine (France), 2006. 333 p. http://docnum.univ-lorraine.fr/public/INPL/2006_GORNAY_J.pdf.
- [148] Gomna A, N'Tsoukpoe KE, Le Pierrès N, Coulibaly Y. Review of vegetable oils behaviour at high temperature for solar plants: Stability, properties and current applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2019;200:109956. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.109956>.
- [149] Hoffmann J-F. Thermal energy storage system with natural or recycled materials for concentrating solar power plant. PhD thesis. University of Perpignan (France), 2015. 269 p. <https://theses.hal.science/tel-01284834>.
- [150] Hoffmann J-F, Vaitilingom G, Henry J-F, Chirtoc M, Olives R, Goetz V, et al. Temperature dependence of thermophysical and rheological properties of seven vegetable oils in view of their use as heat transfer fluids in concentrated solar plants. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2018;178:129–38. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.12.037>.

- [151] Kahsay MB, Nydal OJ. Degradation of viscosity of vegetable oils employed for thermal energy storage due to oxidation in ambient temperature. *Journal of Energy Storage* 2023;73:108816. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108816>.
- [152] Abedigamba OP, Mndeme FS, Mawire A, Bahadur I. Thermo-physical properties and thermal energy storage performance of two vegetable oils. *Journal of Energy Storage* 2023;61:106774. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106774>.
- [153] N'Tsoukpoe KE, Le Pierrès N, Seshie YM, Coulibaly Y. Technico-economic comparison of heat transfer fluids or thermal energy storage materials: A case study using *Jatropha curcas* oil. *African Journal of Science, Technology, Innovation and Development* 2021;13:193–211. <https://doi.org/10.1080/20421338.2020.1838082>.
- [154] ASTM International. Standard Test Method for Thermal Stability of Organic Heat Transfer Fluids 2020. <https://www.astm.org/d6743-20.html> (accessed January 28, 2024).
- [155] ASTM International. Standard Test Method for Thermal Stability by Thermogravimetry 2021. <https://www.astm.org/e2550-21.html> (accessed January 31, 2024).
- [156] ASTM International. Standard Test Method for Thermal Stability of Chemicals by Differential Scanning Calorimetry 2024. <https://www.astm.org/e0537-20.html> (accessed November 3, 2024).
- [157] Vaskova H, Buckova M. Thermal Degradation of Vegetable Oils: Spectroscopic Measurement and Analysis. *Procedia Engineering* 2015;100:630–5. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.414>.
- [158] Alvarenga BR, Xavier FAN, Soares FLF, Carneiro RL. Thermal Stability Assessment of Vegetable Oils by Raman Spectroscopy and Chemometrics. *Food Anal Methods* 2018;11:1969–76. <https://doi.org/10.1007/s12161-018-1160-y>.
- [159] Majchrzak T, Lubinska M, Róžańska A, Dymerski T, Gębicki J, Namieśnik J. Thermal degradation assessment of canola and olive oil using ultra-fast gas chromatography coupled with chemometrics. *Monatsh Chem* 2017;148:1625–30. <https://doi.org/10.1007/s00706-017-1968-y>.
- [160] Choe E, Min D b. Chemistry of Deep-Fat Frying Oils. *Journal of Food Science* 2007;72:R77–86. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00352.x>.
- [161] Srivastava A, Prasad R. Triglycerides-based diesel fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2000;4:111–33. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(99\)00013-1](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(99)00013-1).
- [162] Fortes ICP, Baugh PJ. Pyrolysis–GC/MS studies of vegetable oils from Macauba fruit. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 2004;72:103–11. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2004.03.005>.
- [163] Mawire A, Phori A, Taole S. Performance comparison of thermal energy storage oils for solar cookers during charging. *Applied Thermal Engineering* 2014;73:1323–31. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.08.032>.
- [164] Schwarzer K, Vieira da Silva ME. Solar cooking system with or without heat storage for families and institutions. *Solar Energy* 2003;75:35–41. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(03\)00197-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(03)00197-X).
- [165] Pikra G, Salim A, Prawara B, Purwanto AJ, Admono T, Eddy Z. Development of Small Scale Concentrated Solar Power Plant Using Organic Rankine Cycle for Isolated Region in Indonesia. *Energy Procedia* 2013;32:122–8. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.05.016>.
- [166] Haraksingh I, Mc Doom IA, Headley OStC. A natural convection flat-plate collector solar cooker with short term storage. *Renewable Energy* 1996;9:729–32. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(96\)88387-X](https://doi.org/10.1016/0960-1481(96)88387-X).
- [167] Maiga M, N'Tsoukpoe KE, Gomna A. Experimental study of *Lannea microcarpa* seed oil as a heat transfer fluid or thermal energy storage material for medium-temperature applications. *Energy Reports* 2024;12:4129–42. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.10.001>.
- [168] Bazongo P, Bassolé IHN, Nielsen S, Hilou A, Dicko MH, Shukla VKS. Characteristics, Composition and Oxidative Stability of *Lannea microcarpa* Seed and Seed Oil. *Molecules* 2014;19:2684–93. <https://doi.org/10.3390/molecules19022684>.
- [169] Lykke AM, Gregersen SB, Padonou EA, Bassolé IHN, Dalsgaard TK. Potential of Unconventional Seed Oils and Fats from West African Trees: A Review of Fatty Acid Composition and Perspectives. *Lipids* 2021;56:357–90. <https://doi.org/10.1002/lipd.12305>.

- [170] Ouedraogo WFA. Diagnostic et correction des contre-performances du champ solaire de CSP4Africa. Mémoire de master. Institut 2iE (Burkina Faso), 2020. 68 p. http://documentation.2ie-edu.org/cdi2ie/opac_css/index.php?lvl=author_see&id=20547.
- [171] Michalsky JJ. *The Astronomical Almanac's* algorithm for approximate solar position (1950–2050). *Solar Energy* 1988;40:227–35. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(88\)90045-X](https://doi.org/10.1016/0038-092X(88)90045-X).
- [172] Ren L, Wei X, Lu Z, Yu W, Xu W, Shen Z. A review of available methods for the alignment of mirror facets of solar concentrator in solar thermal power system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2014;32:76–83. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.006>.
- [173] Maiga M, N'Tsoukpoe KE, Gomna A, Fiagbe YAK. Sources of solar tracking errors and correction strategies for heliostats. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2024;203:114770. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114770>.
- [174] Documentation des systèmes de progression SureStep. AutomationDirect, Georgie, United States, 2021. <https://cdn.automationdirect.com/static/manuals/surestepmanual/surestepmanual.pdf> (accessed March 7, 2022).
- [175] Motor Sizing Calculations. Orientalmotor USA Corp 2022. <https://www.orientalmotor.com/technology/motor-sizing-calculations.html> (accessed March 4, 2022).
- [176] Changzhou Dewo Motor Co., Ltd. Nema 42 closed loop stepper motor with driver. Changzhou, China, 2023. <https://www.dewochina.com/product/nema-42-closed-loop-motor-with-driver.html> (accessed November 1, 2024).
- [177] Ouedraogo DOM. Conception et mise en œuvre du suivi solaire par photodétecteur d'un héliostat piédestal. Mémoire de Master. Institut 2iE (Burkina Faso), 2023. 60 p. http://documentation.2ie-edu.org/cdi2ie/opac_css/index.php?lvl=author_see&id=21256.
- [178] Yibokou KF. Conception, dimensionnement et mise en œuvre d'un héliostat piédestal. Mémoire de Master. Institut 2iE (Burkina Faso), 2022. http://documentation.2ie-edu.org/cdi2ie/opac_css/index.php?lvl=notice_display&id=31084.
- [179] Maiga M, N'Tsoukpoe KE, Gomna A. Design and testing of a low-tech pedestal heliostat with its closed-loop tracking sensor for a micro concentrating solar power plant pilot in the Sahel: Case of CSP4Africa. Submitted Paper 2023.
- [180] Maiga M, N'Tsoukpoe KE, Gomna A. Conception, construction et test d'un héliostat piédestal de faible technicité pour une microcentrale solaire à concentration : Cas de CSP4Africa. 5ème congrès de la Société Ouest Africaine de Physique (SOAPHYS), Bamako (MALI), 18–22 Decembre 2023.
- [181] Rafiq M, Lv YZ, Zhou Y, Ma KB, Wang W, Li CR, et al. Use of vegetable oils as transformer oils – a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2015;52:308–24. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.032>.
- [182] Perrier C, Beroual A. Experimental investigations on insulating liquids for power transformers: Mineral, ester, and silicone oils. *IEEE Electrical Insulation Magazine* 2009;25:6–13. <https://doi.org/10.1109/MEI.2009.5313705>.
- [183] Gao T, Li C, Zhang Y, Yang M, Jia D, Jin T, et al. Dispersing mechanism and tribological performance of vegetable oil-based CNT nanofluids with different surfactants. *Tribology International* 2019;131:51–63. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.10.025>.
- [184] Mechiri SK, Vasu V, Venu Gopal A. Investigation of thermal conductivity and rheological properties of vegetable oil based hybrid nanofluids containing Cu–Zn hybrid nanoparticles. *Experimental Heat Transfer* 2017;30:205–17. <https://doi.org/10.1080/08916152.2016.1233147>.
- [185] Choe E, Min DB. Mechanisms and Factors for Edible Oil Oxidation. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 2006;5:169–86. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2006.00009.x>.
- [186] Cuesta C, Sánchez-Muniz FJ, Garrido-Polonio C, López-Varela S, Arroyo R. Thermoxidative and hydrolytic changes in sunflower oil used in fryings with a fast turnover of fresh oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society* 1993;70:1069–73. <https://doi.org/10.1007/BF02632144>.

- [187] Houhoula DP, Oreopoulou V, Tzia C. The effect of process time and temperature on the accumulation of polar compounds in cottonseed oil during deep-fat frying. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 2003;83:314–9. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1314>.
- [188] Ouédraogo A, Lykke AM, Lankoandé B, Korbéogo G. Potentials for Promoting Oil Products Identified from Traditional Knowledge of Native Trees in Burkina Faso. *Ethnobotany Research and Applications* 2013;11:071–83. <https://ethnobotanyjournal.org/index.php/era/article/view/826/498>.
- [189] Ouilly JT, Bazongo P, Bougma A, Kaboré N, Lykke AM, Ouédraogo A, et al. Chemical Composition, Physicochemical Characteristics, and Nutritional Value of *Lannea kerstingii* Seeds and Seed Oil. *Journal of Analytical Methods in Chemistry* 2017;2017:e2840718. <https://doi.org/10.1155/2017/2840718>.
- [190] Arbonnier M. 2009. Arbres, arbustes et lianes des zones sèches d'Afrique de l'Ouest. Versailles : Editions Quae, ISBN: 978-2-7592-0980-4, 573 p. https://publications.cirad.fr/une_notice.php?dk=508642.
- [191] Sanogo K, Balima LH, Bayala J, van Noordwijk M, Gebrekirstos A. Climate variability impacts on growth of African grape (*Lannea microcarpa* Engl & K. Krause) in West Africa. *Dendrochronologia* 2023;81:126131. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2023.126131>.
- [192] Mangla B, Kohli K, Rabiou S. Review of Medicinal Uses, Phytochemistry, Pharmacological Properties, Extraction Methods and Toxicology of *Lannea microcarpa* (African Grapes). *Current Traditional Medicine* 2021;7:125–37. <https://doi.org/10.2174/2215083805666190626095609>.
- [193] Harouna S, Adama H, Djifaby SPAE, Moussa C, Millogo, Jeanne, et al. Dyeing and Medicinal Plants Used in the Area of Mouhoun in Burkina Faso, 2012. <https://www.environmentaljournal.org/2-3/ujert-2-3-2.pdf>.
- [194] Omijeh JE. Tree Growth Analysis as a Panacea for Sustainable Forest Management in Northeast Nigeria: Study of *Lannea kerstingii* (Anacardiaceae). *Journal of Sustainability and Environmental Management* 2022;1:182–7. <https://doi.org/10.3126/josem.v1i2.45360>.
- [195] Akoudjin M, Kiéma S, Sangare M, César J, Bouyer J, Kabore-Zoungana C. Influence des activités agricoles sur la végétation le long d'un gradient pluviométrique nord-sud du Burkina Faso. *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement* 2016. <https://doi.org/10.4000/vertigo.17015>.
- [196] ISO. Détermination de la teneur en huile par la méthode par extraction à l'hexane (ou à l'éther de pétrole) 2023. <https://www.iso.org/fr/standard/84181.html> (accessed February 21, 2024).
- [197] Presse mécanique CGOLDENWALL 1800W, modèle WDD 151. Amazon 2023. <https://www.amazon.fr/CGOLDENWALL-Machine-%C3%89lectrique-Contr%C3%B4le-Temp%C3%A9rature/dp/B09F3DDM1B> (accessed August 18, 2024).
- [198] A. Wray H. Manual on Flash Point Standards and Their Use: Methods and Regulations. ASTM International; 1992.
- [199] Viswanath DS, Ghosh TK, Prasad DHL, Dutt NVK, Rani KY. 2007. Viscosity of Liquids: Theory, Estimation, Experiment, and Data. Dordrecht: Springer Science & Business Media, ISBN: 978-1-4020-5482-2, 669 p. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4020-5482-2>.
- [200] Sarviya RM, Fuskele V. Review on Thermal Conductivity of Nanofluids. *Materials Today: Proceedings* 2017;4:4022–31. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.304>.
- [201] Tritt TM. 2004. Thermal Conductivity: Theory, Properties, and Applications. New York: Springer, ISBN: 978-0-387-26017-4, 306 p. <https://link.springer.com/book/10.1007/b136496>.
- [202] Tari A. 2003. The Specific Heat Of Matter At Low Temperatures. London: Imperial College Press, ISBN: 978-1-78326-129-1, 360 p. <https://doi.org/10.1142/p254>.
- [203] Vaitilingom G. Fuel quality of biofuels: influences of the specific characteristics of terrestrial and marine vegetable oils on their behavior as substitutes for petroleum products. HDR thesis. Université d'Orléans (France), 2013. 202 p. https://doi.org/10.1/document_570610.pdf.
- [204] Benedikt R. 1895. Chemical Analysis of Oils, Fats, and Waxes and of the Commercial Products Derived Therefrom. London: Macmillan and Company Ltd., ISSN: 1476-4687, 834 p. <https://www.nature.com/articles/052265a0>.

- [205] O'Brien RD. 2008. *Fats and Oils: Formulating and Processing for Applications*. Boca Raton: CRC Press, ISBN: 9780429148064, 2008, 766 p. <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781420061673/fats-oils-richard-brien>.
- [206] Mendonça MA, Coelho Araújo WM, Borgo LA, Araújo HC. Deep-Frying Oil: Heat-Induced Changes. *Journal of Culinary Science & Technology* 2015;13:116–32. <https://doi.org/10.1080/15428052.2014.952481>.
- [207] Pokorny J, Yanishlieva N, Gordon MH. 2001. *Antioxidants in Food: Practical Applications*. Boca Raton: CRC Press, ISBN: 978-0-8493-1222-9, 412 p. https://books.google.bf/books?hl=fr&lr=&id=zTgmJmNcRy0C&oi=fnd&pg=PR11&dq=Antioxidants+in+Food+Michael+H.+Gordon&ots=wPLfv7md2-&sig=YPeKnkYONlxGQhCcYBlcG7iKkrw&redir_esc=y#v=onepage&q=Antioxidants%20in%20Food%20Michael%20H.%20Gordon&f=false.
- [208] Guillén MD, Cabo N. Characterization of edible oils and lard by fourier transform infrared spectroscopy. Relationships between composition and frequency of concrete bands in the fingerprint region. *J Amer Oil Chem Soc* 1997;74:1281–6. <https://doi.org/10.1007/s11746-997-0058-4>.
- [209] Lima MM, Monteiro R. Characterisation and thermal behaviour of a borosilicate glass. *Thermochimica Acta* 2001;373:69–74. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(01\)00456-7](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(01)00456-7).
- [210] Borosilicate Glass - Properties of Borosilicate Glass (Pyrex/Duran) by Goodfellow Ceramic & Glass Division. AZOM 2009. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=4765> (accessed February 22, 2024).
- [211] Akoh CC. Oxidative stability of fat substitutes and vegetable oils by the oxidative stability index method. *Journal of the American Oil Chemists' Society* 1994;71:211–6. <https://doi.org/10.1007/BF02541558>.
- [212] Tamási K, Marossy K. Combined thermal analysis of plant oils. *J Therm Anal Calorim* 2022;147:2047–54. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-10470-y>.
- [213] Borsodi E, Tamási K, Marossy K. Vegetable oils: possible new plasticizers in the rubber industry. *Materials Science and Engineering* 2020;45:20–8. https://matarka.hu/koz/ISSN_2063-6792/vol_45_1_2020_eng/ISSN_2063_6792_vol_45_1_2020_eng_020-028.pdf.
- [214] Hossner LR. *Dissolution for Total Elemental Analysis* 2018:49–64. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c3>.
- [215] Yang Y, Kayan B, Bozer N, Pate B, Baker C, Gizir AM. Terpene degradation and extraction from basil and oregano leaves using subcritical water. *Journal of Chromatography A* 2007;1152:262–7. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2006.11.037>.
- [216] Swagelok Company. Swagelok VCR® Metal Gasket Face Seal Fitting 2024. <https://products.swagelok.com/en/all-products/fittings/vcr-metal-gasket-face-seal-fittings/c/110?clp=true> (accessed May 21, 2024).
- [217] Esteban B, Riba J-R, Baquero G, Rius A, Puig R. Temperature dependence of density and viscosity of vegetable oils. *Biomass and Bioenergy* 2012;42:164–71. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.03.007>.
- [218] Garcia C, Franco P, Zuppa T, Filho NA, Leles M. Thermal stability studies of some cerrado plant oils. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 2007;87:645–8. <https://doi.org/10.1007/s10973-006-7769-x>.
- [219] Rohman A, Man YBC. Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy for analysis of extra virgin olive oil adulterated with palm oil. *Food Research International* 2010;43:886–92. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.12.006>.
- [220] Vongsivut J, Miller MR, McNaughton D, Heraud P, Barrow CJ. Rapid Discrimination and Determination of Polyunsaturated Fatty Acid Composition in Marine Oils by FTIR Spectroscopy and Multivariate Data Analysis. *Food Bioprocess Technol* 2014;7:2410–22. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1251-0>.

- [221] Timilsena YP, Vongsvivut J, Adhikari R, Adhikari B. Physicochemical and thermal characteristics of Australian chia seed oil. *Food Chemistry* 2017;228:394–402. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.02.021>.
- [222] Yuzhen L, Changwen D, Yanqiu S, Jianmin Z. Characterization of rapeseed oil using FTIR-ATR spectroscopy. *J Food Sci Eng* 2014;4:244–9. <https://www.davidpublisher.com/Public/uploads/Contribute/552cb6304219e.pdf>
- [223] Ofori H, Bart-Plange A, Addo A, Dzisi KA. Impact of Different Oil Extraction Techniques on the Physicochemical Properties of *Adansonia digitata* Seed. *International Journal of Food Science* 2023;2023:e6233461. <https://doi.org/10.1155/2023/6233461>.
- [224] The Dow Chemical Company. DOWTHERM™ A Heat Transfer Fluid 2024. <https://www.dow.com/en-us/pdp.dowtherm-a-heat-transfer-fluid.238000z.html> (accessed January 30, 2024).
- [225] NREL. Concentrating Solar Power Projects 2024. <https://solarpaces.nrel.gov/> (accessed March 5, 2024).
- [226] Wang G, Pang S, Jiang T. A brief review of liquid heat transfer materials used in concentrated solar power systems and thermal energy storage devices of concentrated solar power systems. *Engineering Reports* 2023;5:e12576. <https://doi.org/10.1002/eng2.12576>.
- [227] Ashcroft M, Rawlins J. Small-scale concentrated solar power : A review of current activity and potential to accelerate deployment 2013. <https://www.gov.uk/research-for-development-outputs/small-scale-concentrated-solar-power-a-review-of-current-activity-and-potential-to-accelerate-deployment> (accessed July 25, 2024).
- [228] NREL. Holaniku at Keahole Point | Concentrating Solar Power Projects 2024. <https://solarpaces.nrel.gov/project/holaniku-keahole-point> (accessed July 26, 2024).
- [229] Power technology. Holaniku at Keahole Point Micro CSP Thermal Plant 2016. <https://www.power-technology.com/projects/holanikuatkeaholepoi/> (accessed July 26, 2024).
- [230] Bilal Awan A, Khan MN, Zubair M, Bellos E. Commercial parabolic trough CSP plants: Research trends and technological advancements. *Solar Energy* 2020;211:1422–58. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.09.072>.
- [231] NREL. Saguaro Power Plant | Concentrating Solar Power Projects 2024. <https://solarpaces.nrel.gov/project/saguaro-power-plant> (accessed August 4, 2024).
- [232] Yunus MM, Zuru AA, Faruq UZ, Aliero AA. Assessment of physicochemical properties of biodiesel from African grapes (*Lannea microcarpa* Engl. & K. Krause). *Nigerian Journal of Basic and Applied Sciences* 2013;21:127–30. <http://dx.doi.org/10.4314/njbas.v21i2.7>.
- [233] Association Belem Wend Tiiga (BELWET). Le Jatropha 2024. Ouagadougou, Burkina Faso, <https://www.belwet.org/le-jatropha/> (accessed July 30, 2024).
- [234] Thermal Fluids Hub, Inc. DOWTHERM A : Synthetic Organic Heat Transfer Fluid 55 Gallon Drum. United States, 2024. <https://www.thermalfluidshub.com/product/dowtherm-a-heat-transfer-fluid/> (accessed July 30, 2024).
- [235] Radco Industries, Inc. XCEL THERM® 600 - Premium Thermal Oil - Engineering properties 2024. Illinois, United States. <https://www.radcoind.com/fluid/xceltherm-600/> (accessed July 26, 2024).
- [236] UnoClean - A March Industries, Inc. Company. Radco XCEL THERM Hot Oil Liquid Phase Heat Transfer Fluid 2024. <https://www.unoclean.com/Radco-XCEL THERM-600-Heat-Transfer-Fluid.aspx> (accessed July 30, 2024).
- [237] Ndiaye EM, Faye PG, Sow A, Niane K, Ndiaye S, Baldé S, et al. Impact of Storage Conditions on the Physicochemical Characteristics of Baobab (*Adansonia digitata* L.) Seed Oil. *Food and Nutrition Sciences* 2022;13:373–86. <https://doi.org/10.4236/fns.2022.134028>.
- [238] Zongo AS, Vaïtilingom G, Daho T, Caillol C, Hoffmann J-F, Piriou B, et al. Temperature Dependence of Density, Viscosity, Thermal Conductivity and Heat Capacity of Vegetable Oils for Their Use as Biofuel in Internal Combustion Engines. *Advances in Chemical Engineering and Science* 2018;9:44–64. <https://doi.org/10.4236/aces.2019.91004>.

- [239] Hoffmann J-F, Henry J-F, Vaitilingom G, Olives R, Chirtoc M, Caron D, et al. Temperature dependence of thermal conductivity of vegetable oils for use in concentrated solar power plants, measured by 3omega hot wire method. *International Journal of Thermal Sciences* 2016;107:105–10. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.04.002>.
- [240] Olmedo-Torre N, Canals Casals L, Amante García B. Sustainable design of a thermosolar electricity generation power plant in Burkina Faso. *Journal of Environmental Management* 2018;226:428–36. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.043>.
- [241] Wang T. 2011. Soybean Oil. *Vegetable Oils in Food Technology*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., ISBN: 978-1-4443-3992-5, p. 59–105. <https://doi.org/10.1002/9781444339925.ch3>.
- [242] Karak N. 3 - Vegetable oils and their derivatives. In: Karak N, editor. *Vegetable Oil-Based Polymers*, Woodhead Publishing; 2012, p. 54–95. <https://doi.org/10.1533/9780857097149.54>.
- [243] Maiga M, N'Tsoukpoe KE. *Lannea kerstingii* seed oil for sustainable thermal energy storage: Thermophysical properties, medium-temperature stability and interaction with common engineering metals. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2025;282:113367. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2024.113367>.
- [244] Singh B, Korstad J, Sharma YC. A critical review on corrosion of compression ignition (CI) engine parts by biodiesel and biodiesel blends and its inhibition. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2012;16:3401–8. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.042>.
- [245] Andari F, Kittel J, Fernandes J, Godin N, Ter-Ovanesian B, Ropital F. High temperature corrosion in various grades of vegetable and waste oils used for bio-fuel production. *Corrosion Science* 2022;206:110501. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110501>.
- [246] Bhardwaj M, Gupta P, Kumar N. Compatibility of Metals and Elastomers in Biodiesel- A review. *International Journal of Research* 2014;1:376–91. <https://journals.pen2print.org/index.php/ijr/article/view/387>.
- [247] Kugelmeier CL, Monteiro MR, da Silva R, Kuri SE, Sordi VL, Della Rovere CA. Corrosion behavior of carbon steel, stainless steel, aluminum and copper upon exposure to biodiesel blended with petrodiesel. *Energy* 2021;226:120344. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120344>.
- [248] Afonso IS, Nobrega G, Lima R, Gomes JR, Ribeiro JE. Conventional and Recent Advances of Vegetable Oils as Metalworking Fluids (MWFs): A Review. *Lubricants* 2023;11:160. <https://doi.org/10.3390/lubricants11040160>.
- [249] Kaul S, Saxena RC, Kumar A, Negi MS, Bhatnagar AK, Goyal HB, et al. Corrosion behavior of biodiesel from seed oils of Indian origin on diesel engine parts. *Fuel Processing Technology* 2007;88:303–7. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2006.10.011>.
- [250] Haseeb ASMA, Fazal MA, Jahirul MI, Masjuki HH. Compatibility of automotive materials in biodiesel: A review. *Fuel* 2011;90:922–31. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.10.042>.
- [251] Bruun N, Demesa AG, Tesfaye F, Hemming J, Hupa L. Factors Affecting the Corrosive Behavior of Used Cooking Oils and a Non-Edible Fish Oil That Are in Contact with Ferrous Metals. *Energies* 2019;12:4812. <https://doi.org/10.3390/en12244812>.
- [252] Fazal MA, Haseeb ASMA, Masjuki HH. Corrosion mechanism of copper in palm biodiesel. *Corrosion Science* 2013;67:50–9. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.10.006>.
- [253] ASTM International. Standard Guide for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals 2021. <https://www.astm.org/standards/g31> (accessed May 30, 2024).
- [254] ASTM International. Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens 2017. <https://www.astm.org/g0001-03r11.html> (accessed May 30, 2024).
- [255] Biernat K, Ziolkowska M, Wardzińska D. Corrosiveness of Fuels During Storage Processes. *Storage Stability of Fuels*, IntechOpen; 2015. <https://doi.org/10.5772/59798>.
- [256] Chen J, Zhang L, Zhao P, Wang J, Li Q, Yu X. Comparison of non-volatile degradation products formed from different vegetable oils during deep frying of French fries. *International Journal of Food Science & Technology* 2022;57:6763–72. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15921>.

- [257] Huzhou Dongshang Stainless Steel Co.,Ltd. Stainless Steel Density 2024. <https://www.dsstainlesssteel.com/stainless-steel-density/> (accessed September 21, 2024).
- [258] The World Material. Density of Metals, All Common Metal Density Chart & Table PDF. World Material 2024. <https://www.theworldmaterial.com/density-of-metals/> (accessed February 13, 2024).
- [259] Morel J. 1994. Calcul des structures métalliques selon l'eurocode 3. Paris: Eyrolles, ISBN: 978-2-212-11738-7, 332 p. <https://www.eyrolles.com/BTP/Livre/calcul-des-structures-metalliques-selon-l-eurocode-3-9782212117387/>.
- [260] Peterka JA, Derickson RG. Wind load design methods for ground-based heliostats and parabolic dish collectors. Sandia National Laboratories, California, United States, 1992. <https://doi.org/10.2172/7105290>.
- [261] Zoma V, Tarama WJI, Ouédraogo J. Variabilité climatique dans la commune rurale de Seytenga au Burkina Faso. Les Cahiers de l'ACAREF 2022;4:320–34. <https://hal.science/hal-03645488/>.
- [262] Direction de la météorologie du Burkina Faso. Bulletin météorologique décadaire. Ouagadougou, Burkina Faso. <http://wamis.gmu.edu/countries/burkina/bad06072.pdf>; 2016.
- [263] Meteoblue weather. Simulation de données climatiques et météorologiques historiques pour Ouagadougou 2023. https://www.meteoblue.com/fr/meteo/historyclimate/climatemodelled/ouagadougou_burkina-faso_2357048 (accessed October 26, 2023).
- [264] SunEarthtools n.d. https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=fr (accessed October 1, 2023).
- [265] Marinho F, Carvalho CM, Apolinário FR, Paulucci L. Measuring light with light-dependent resistors: an easy approach for optics experiments. Eur J Phys 2019;40:035801. <https://doi.org/10.1088/1361-6404/ab11f1>.
- [266] Aseri TK, Sharma C, Kandpal TC. Estimating capital cost of parabolic trough collector based concentrating solar power plants for financial appraisal: Approaches and a case study for India. Renewable Energy 2020;156:1117–31. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.138>.
- [267] García S, Martín M. Analysis of the performance of concentrated solar power facilities using different thermal fluids. Chemical Engineering Research and Design 2021;168:46–58. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2021.01.030>.
- [268] Vutukuru R, Pegallapati AS, Maddali R. Suitability of various heat transfer fluids for high temperature solar thermal systems. Applied Thermal Engineering 2019;159:113973. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113973>.
- [269] Dowtherm™ A, Thermo Scientific Chemicals. Fisher Scientific 2024. <https://www.fishersci.com/shop/products/dowtherm-a-thermo-scientific/AAH30347AU> (accessed August 5, 2024).
- [270] Vignarooban K, Xu X, Arvay A, Hsu K, Kannan AM. Heat transfer fluids for concentrating solar power systems – A review. Applied Energy 2015;146:383–96. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.125>.
- [271] McTigue JD, Castro J, Mungas G, Kramer N, King J, Turchi C, et al. Hybridizing a geothermal power plant with concentrating solar power and thermal storage to increase power generation and dispatchability. Applied Energy 2018;228:1837–52. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.064>.
- [272] Le Roux D, Olivès R, Neveu P. Multi-objective optimisation of a thermocline thermal energy storage integrated in a concentrated solar power plant. Energy 2024;300:131548. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131548>.

Annexes

Annexe A: Résultats du dimensionnement effectué à l'aide de l'outil "Orientalmotor"

Résultats de dimensionnement (Moteur X)				
Inertie de la charge	J_L	=	1.7700e-4	[kg·m ²]
Vitesse requise	Vm_m	=	20	[tr/min]
Couple requis	J	=	13.05	[N·m]
Couple d'accélération	Ta_-	=	3.7069e-4	[N·m]
Couple de charge	TL_-	=	8.700	[N·m]
Précision d'arrêt requise	$\Delta\theta$	=	1.200	[deg]

Figure A.1: Résultats de dimensionnement du Moteur X avec l'outil "Orientalmotor"

Résultats de dimensionnement (Moteur Y)				
Inertie de la charge	J_L	=	1.8544e-4	[kg·m ²]
Vitesse requise	Vm_m	=	4	[tr/min]
Couple requis	J	=	14.35	[N·m]
Couple d'accélération	Ta_-	=	3.8835e-4	[N·m]
Couple de charge	TL_-	=	9.567	[N·m]
Précision d'arrêt requise	$\Delta\theta$	=	1.200	[deg]

Figure A.2: Résultats de dimensionnement du Moteur Y avec l'outil "Orientalmotor"

Annexe B: Présentation de la fiche technique des nouveaux moteurs pas-à-pas choisis [176]



Model	110HCE12N-B39	110HCE16N-B39	110HCE20N-B39
Step Angle (°)	1.2	1.2	1.2
Motor Length (L)mm	139	180	221
Current A	4.2	6.4	4.2
Resistance Ω	1.2	0.9	1.88
Inductance mH	13	9.5	18
Holding Torque N.m	12	16	20
Encoder Resolution (PPR)	1000	1000	1000
Applicable Driver	3HSS2260	3HSS2260	3HSS2260
Weight Kg	7.5	10	12
Encoder cable options :	2m, 3m, 5m, 8m, 10m, 12m		

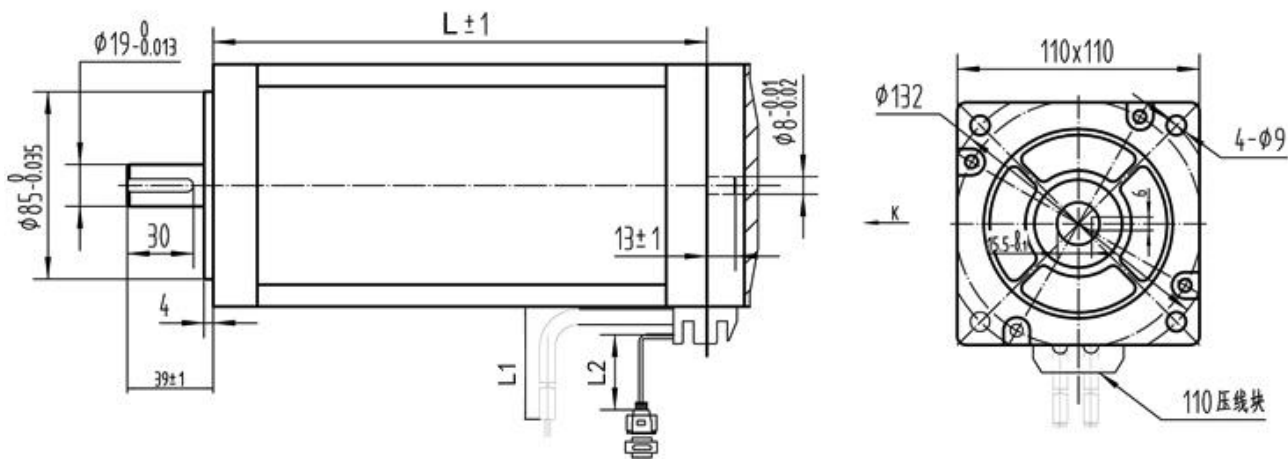


Figure B.1: Présentation des détails techniques des nouveaux moteurs pas-à-pas identiques

Annexe C: Séquences d'images des tests de suivi solaire réalisés entre juin 2023 à février 2024

Les séquences d'images des tests de suivi solaire réalisés entre juin 2023 et février 2024 sont présentées de la Figure C.1 à Figure C.8.



Figure C.1: Séquence d'images de la tache focale lors du test de suivi solaire effectué le 26 juin 2023.

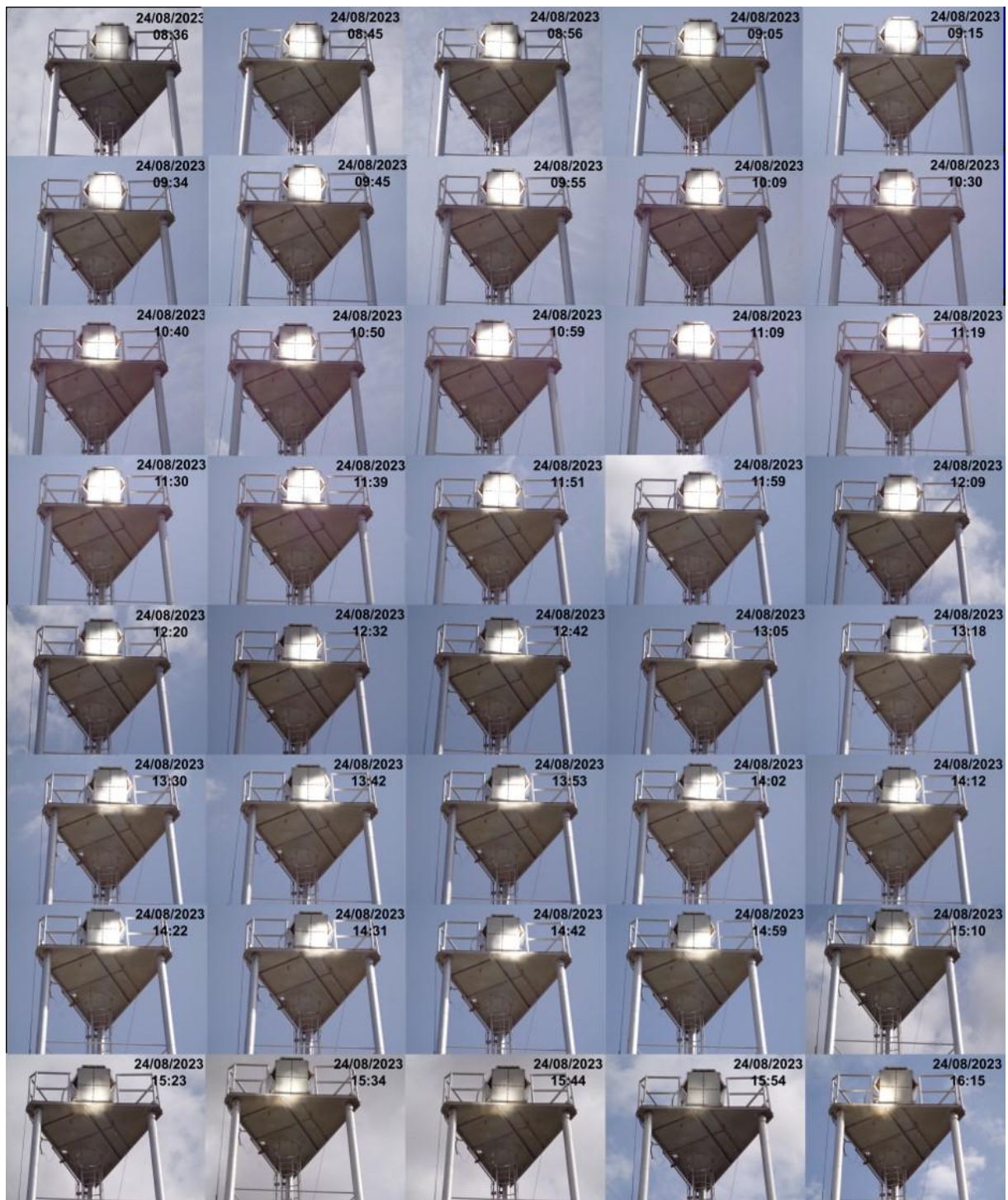


Figure C.2: Séquence d'images de la tache focale lors du test de suivi solaire effectué le 24 août 2023.

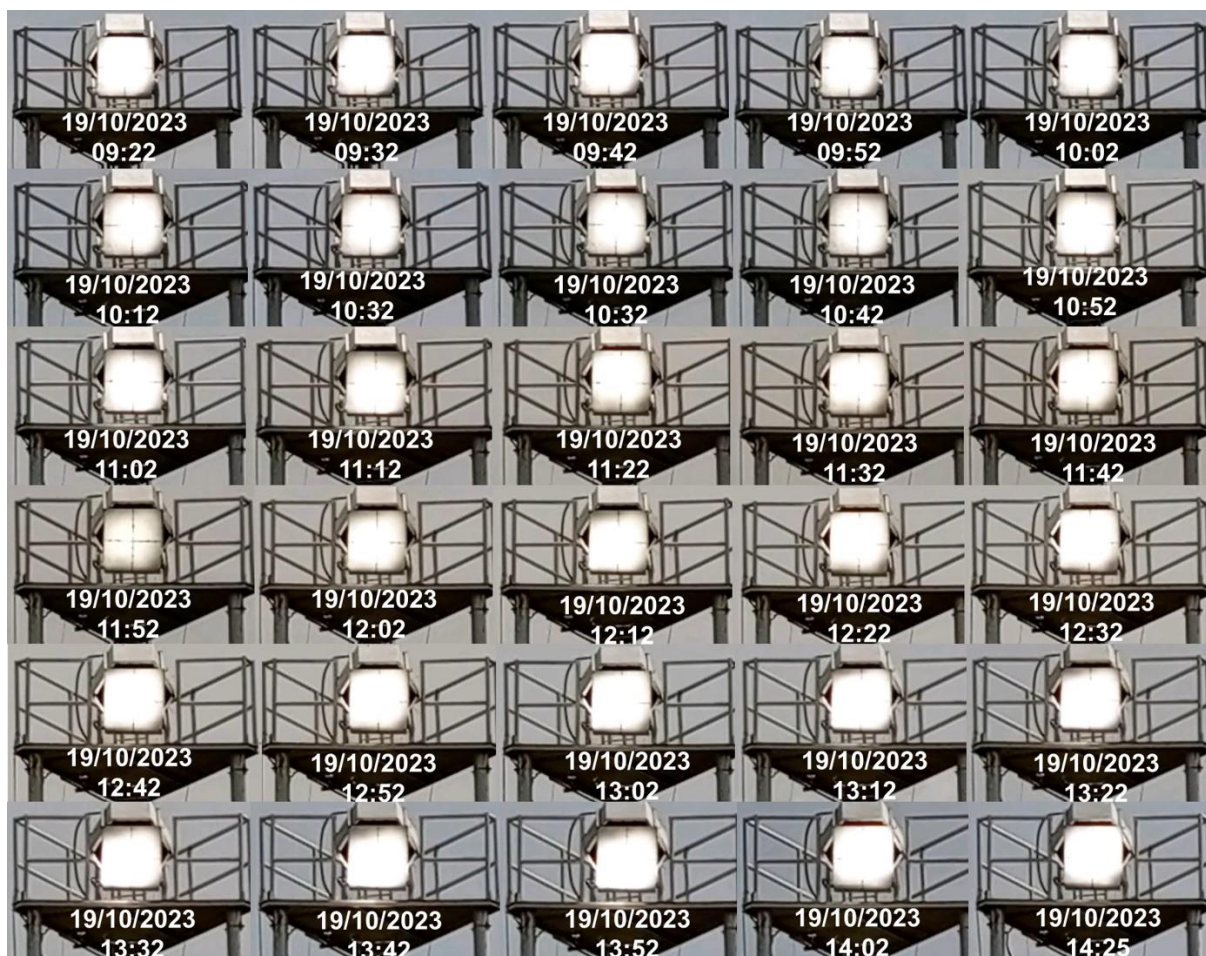


Figure C.3: Séquence d'images de la tache focale lors du test de suivi solaire effectué le 19 octobre 2023.



Figure C.4: Séquence d'images de la tache focale lors du test de suivi solaire effectué le 7 novembre 2023.

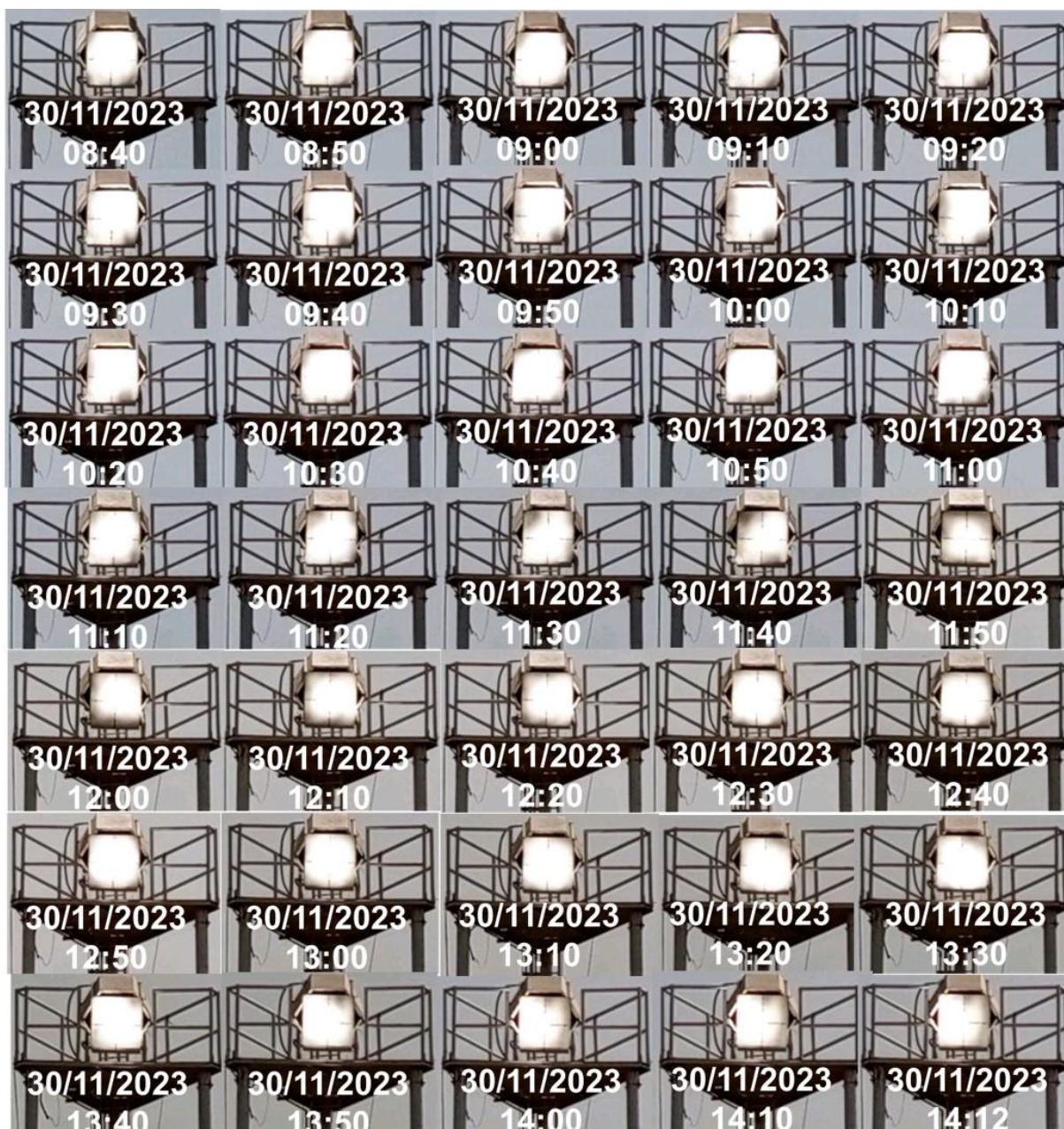


Figure C.5: Séquence d'images de la tache focale lors du test de suivi solaire effectué le 30 novembre 2023.



Figure C.6: Séquence d'images de la tache focale lors du test de suivi solaire effectué le 11 décembre 2023.



Figure C.7: Séquence d'images de la tache focale lors du test de suivi solaire effectué le 13 janvier 2024.



Figure C.8: Séquence d'images de la tache focale lors du test de suivi solaire effectué le 24 février 2024

Annexe D: Collaboration sur une autre technologie d'héliostat : Conception, construction et test d'un héliostat piédestal avec son capteur de suivi solaire en boucle fermée pour la microcentrale solaire CSP4Africa

Le travail présenté ici est un projet qui a été réalisé en collaboration avec deux étudiants de master [177,178], sous la supervision du doctorant, et repose essentiellement sur l'utilisation de matériaux accessibles localement. L'objectif du projet était de concevoir, construire et tester un héliostat piédestal intégrant une approche de suivi en boucle fermée, capable de maintenir la concentration du rayonnement solaire sur le récepteur avec une précision accrue. Cette annexe détaille les différentes étapes de la conception et de la construction de cet héliostat piédestal, ainsi que les tests effectués pour valider son principe de suivi.

▪ D.1. Matériel et méthodes

L'approche méthodologique est organisée en trois étapes. La première étape se focalise sur la conception et le dimensionnement des composants de l'héliostat piédestal. Les composants dimensionnés ont ensuite été construits et assemblés pour former ledit héliostat piédestal, qui par la suite a été testé pour valider le principe de suivi solaire mis en place dans la dernière étape. La conception, le dimensionnement et la construction de chaque composant de l'héliostat sont examinés séparément dans les sous-sections suivantes. La procédure de dimensionnement adoptée est principalement basée sur les recommandations de l'Eurocode 3 relatives à la conception des structures en acier [259].

▪ D.1.1. Conception et dimensionnement des composants de l'héliostat piédestal

▪ D.1.1.1. Structure de support des miroirs

Les dimensions de la structure de support dépendent de celles du miroir qui y sera installé. Les dimensions du miroir dépendent également des dimensions cibles du récepteur de la centrale. Les dimensions du miroir doivent être inférieures aux dimensions cibles du récepteur afin d'éviter les pertes de débordement de la tache focale. Dans ce cas, le récepteur est de type cavitaire avec un diamètre interne de 0,7 m [17]. La cible de la tache focale est la surface circulaire du récepteur, qui a une aire de 0,385 m. Un miroir carré aux spécifications techniques mentionnées dans le Tableau D.1 a été sélectionné pour l'héliostat piédestal. La sélection de ce miroir est essentiellement basée sur la disponibilité locale.

Tableau D.1: Spécifications techniques du miroir sélectionné pour l'héliostat piédestal

Paramètre	Unité	Valeur
Coté	m	0,33
Epaisseur	m	0,003
Aire de la surface réfléchissante	m ²	0,109
Masse	kg	0,82

Dans le but de réduire le coût de l'organe d'entraînement en élargissant la surface réfléchive de l'héliostat [56], 16 miroirs carrés répondant aux spécifications techniques mentionnées un peu plutôt ont été prévus pour la structure de support. Ces 16 miroirs ont été incurvés de sorte que la tache globale de l'héliostat forme un carré de 0,33 m de côté sur le récepteur. Le poids total des miroirs (P_m) est déterminé par l'équation (D.1). n est le nombre de miroirs à installer sur la structure; et m_m [kg] est la masse d'un miroir.

$$P_m [kg] = n \cdot m_m \cdot g \quad (D.1)$$

La méthode présentée par Peterka et Derisson [260], a été utilisée pour déterminer la charge du vent sur l'héliostat à 2 m d'altitude (hauteur maximale de l'héliostat). La vitesse du vent à cette altitude varie de $0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ à $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ au Burkina Faso [261,262]. Cependant, une hypothèse de calcul de $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a été considérée comme cas le plus défavorable pour tenir compte des effets du changement climatique. Selon la méthode de Peterka et Derisson [260], la charge du vent est fonction de deux forces, à savoir la traînée (F_x) et la portance (F_z). Elles sont respectivement déterminées par les équations (D.2) et (D.3). Le Tableau D.2 présente les coefficients de traînée et de portance du vent en fonction de l'élévation de la structure de support (α) et de la direction du vent (β) pour un héliostat isolé. La traînée est maximale lorsque $\alpha = 90^\circ$. De même, la portance est maximale lorsque $\alpha = 30^\circ$. On suppose que $\beta = 0^\circ$, car le vent est principalement orienté sur l'axe nord-sud à Ouagadougou [263]. Donc, $\beta = 0^\circ$ justifie bien la direction du vent comme scénario le plus défavorable dans l'année. C_{Fx} et C_{Fz} sont respectivement les coefficients relatifs à la traînée et à la portance du vent. ρ_{air} [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] est la masse volumique de l'air estimée à $1,225 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; A_{ss} [m^2] est l'aire totale de la structure de support (Figure D.1a).

$$F_x [N] = C_{Fx} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot V^2 \cdot A_{ss} \quad (D.2)$$

$$F_z [N] = C_{Fz} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot V^2 \cdot A_{ss} \quad (D.3)$$

Tableau D.2: Coefficients de traînée et de portance résultant de la charge du vent pour un héliostat isolé [260]

	F_x maximale	F_z maximale	Position de sécurité
Charge maximale			
α	90°	30°	0°
β	0°	0°	0°
F_x	<u>4,0</u>	2,1	0,6
F_z	1,0	<u>2,8</u>	0,9
Charge moyenne			
α	90°	30°	0°
β	0°	0°	0°
F_x	2,0	1,0	0,1
F_z	0,3	1,35	0,1

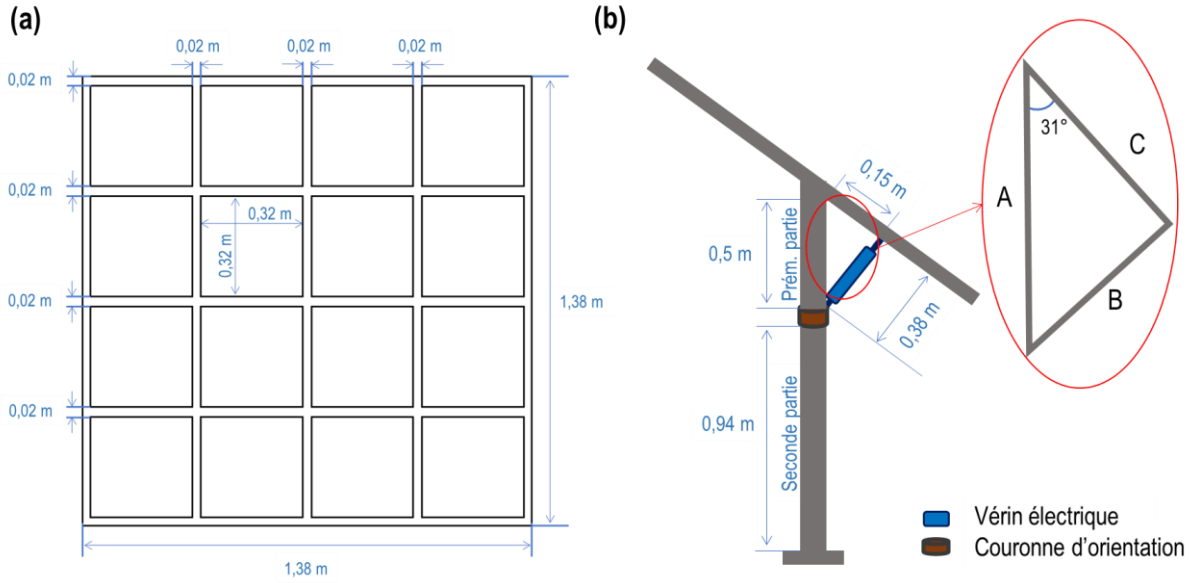


Figure D.1: Présentation technique de a) la vue de dessus de la structure de support des miroirs et de b) la vue de face de l'héliostat piédestal.

L'avant-dernier aspect à considérer est la sélection du tube carré creux en acier qui a été utilisé pour construire la structure de support. Ce tube supporte linéairement la charge provenant des miroirs. En assimilant la structure de support à une poutre simplement soutenue [259], le moment d'inertie minimal requis pour ce tube est obtenu à partir de l'équation (D.4). F_x [m] est la flèche causée par les miroirs suivant l'axe (x) de la structure de support (Figure D.2) ; L [m] est la longueur totale de la structure de support ; P_{Fx} est la charge exercée par les miroirs suivant l'axe x dans le calcul de la flèche ; E [Pa] est le module de Young soit 210 GPa ; I_y [m⁴] est le moment d'inertie du tube suivant l'axe (y) de la structure de support.

$$F_x [m] \leq \frac{L}{200} \text{ avec } F_x [m] = \frac{5}{384} \cdot \frac{P_{Fx} L^4}{EI_y} \quad (D.4)$$

Après la sélection du tube carré creux en acier, l'équation (D.5) est vérifiée pour s'assurer que la structure de support peut résister à la charge provenant des miroirs sous l'influence du vent. σ [Pa] est la contrainte de flexion causée par les miroirs sous l'influence du vent ; σ_e [Pa] est la limite d'élasticité de l'acier soit 235 MPa ; M_i [N·m] est le moment exercé par les miroirs suivant l'axe (i) ; S_i [m³] est le module de section du tube sélectionné suivant l'axe (i) ; P_{Mj} [N] est la charge exercée par les miroirs suivant l'axe (j) dans le calcul du moment.

$$\sigma [MPa] = \frac{M_x}{S_x} + \frac{M_y}{S_y} \leq \sigma_e \text{ avec } M_i [N \cdot m] = \frac{P_{Mj} \cdot L^2}{8} \quad (D.5)$$

La Figure D.2 illustre les forces composantes résultant du poids des miroirs sous l'influence du vent. L'équation (D.6) détermine ces différents composants.

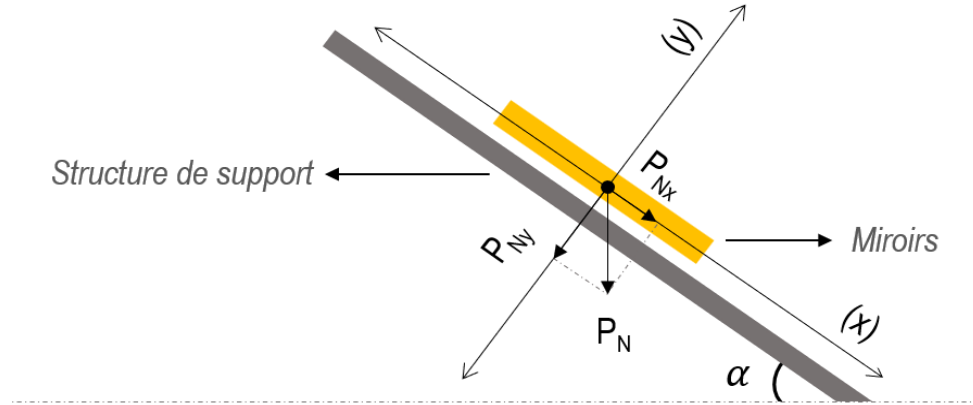


Figure D.2: Inventaire des forces résultant des miroirs sur la structure de support

$$\begin{cases} P_{M_x} = P_M \cdot \sin \alpha \\ P_{M_y} = P_M \cdot \cos \alpha \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} P_{D_x} = P_D \cdot \sin \alpha \\ P_{D_y} = P_D \cdot \cos \alpha \end{cases} \quad (\text{D.6})$$

La charge exercée par les miroirs sur la structure de support est maximale lorsque $\alpha = 0^\circ$ ou soit $\alpha = 90^\circ$. L'option $\alpha = 90^\circ$ a été retenue, car il correspond au scénario pris en compte pour calculer la traînée du vent. En remplaçant α par 90° dans l'équation (D.6), on obtient l'équation (D.7).

$$\begin{cases} P_{M_x} = P_M \\ P_{M_y} = 0 \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} P_{F_x} = P_F \\ P_{F_y} = 0 \end{cases} \quad (\text{D.7})$$

Pour garantir la sécurité de la structure de support [259], la charge exercée par les miroirs à l'état limite ultime (P_{ELU}) a été considérée pour le calcul du moment (Equation (D.8)). De même, la charge exercée par les miroirs à l'état limite de service (P_{ELS}) est prise en compte pour la flèche pour assurer la flexibilité de la structure de support (Equation (D.9)) [259].

$$P_{ELU} [N] = P_M [N] = \frac{1.35 (P_m + F_x)}{L} \quad (\text{D.8})$$

$$P_{ELS} [N] = P_F [N] = \frac{(P_m + F_x)}{L} \quad (\text{D.9})$$

▪ D.1.1.2. Organe d'entraînement

L'organe d'entraînement est composé de deux actionneurs, à savoir le vérin électrique et la couronne d'orientation (Figure D.1b). Le vérin entraîne la structure de support en fonction de l'élévation du soleil, tandis la couronne l'oriente en fonction de l'azimut du soleil. Chacun de ces deux actionneurs est crucial pour le bon fonctionnement de l'héliostat. Ils sont sélectionnés en fonction de la force et du couple demandés par la structure de support sous l'influence du vent. En outre, ils doivent être en mesure de fonctionner dans un climat sahélien, c'est-à-dire un environnement poussiéreux et ensoleillé. Cela correspond à l'indice de protection IP65.

Vérin électrique. La force minimale nécessaire pour entraîner la structure de support en fonction de l'élévation du soleil (F_v) est déterminée par l'équation (D.10). P_{ss} [N] est le poids de la structure de support ; S est le facteur de sécurité qui a été fixé à 1,5.

$$F_v [N] = (P_m + P_{ss} + F_z) \cdot S \quad (D.10)$$

La longueur maximale et minimale de la tige (Figure D.1b) nécessaire au bon fonctionnement du vérin est déterminée par la loi des cosinus (Equation (D.11)). Les trajectoires solaires de l'année 2023 ont été considéré pour la localité de Kamboinsin [264]. L'élévation maximale et minimale du soleil dans cette année est respectivement de 88,87° le 1^{er} septembre et de 31,36° le 23 avril. α est l'angle existant entre la structure de support et le piédestal de l'héliostat.

$$B [mm] = \sqrt{A^2 + C^2 - 2 \cdot A \cdot C \cdot \cos(\alpha)} \quad (D.11)$$

Couronne d'orientation. Le couple minimal nécessaire à l'entraînement de la structure de support en fonction de la trajectoire azimutale du soleil est déterminé par l'équation (D.12). P_{1p} est le poids de la première partie du piédestal en N (Figure D.1b) ; P_v est le poids du vérin électrique en N.

$$C_c [N \cdot m] = (P_m + P_{ss} + P_{1p} + P_v + F_x) \cdot S \quad (D.12)$$

▪ D.1.1.3. Piédestal

Le piédestal est divisé par la couronne d'orientation en deux parties (voir Figure D.1b). La première partie supporte le poids des miroirs, de la structure de support et du vérin électrique, tandis que la seconde partie supporte, en plus du poids de la première partie, le poids de tous les composants de l'héliostat. Toutefois, Il a été supposé que le piédestal soit un tube circulaire creux et continu en acier. Son diamètre extérieur a été fixé à 60 mm et le diamètre intérieur approprié a été déterminé par l'équation (D.5). Le moment de la force exercée sur le piédestal est déterminé par l'équation (D.13). Le scénario le plus défavorable ($\alpha = 90^\circ$) est à nouveau considéré à l'état limite ultime. x [m] est le bras du moment estimé à 0,5 m.

$$M_y [N \cdot m] = 1.35 \cdot [(P_m + P_{ss} + P_v) \cdot g + F_x] \cdot x \quad (D.13)$$

Après le choix du tube circulaire creux en acier, l'élancement réduit du piédestal ($\bar{\lambda}$) est déterminé par l'équation (D.14) pour vérifier si le piédestal est susceptible de se flamber face à la charge provenant des miroirs, de la structure de support et du vérin sous l'influence du vent [259]. λ est l'élancement géométrique du piédestal ; l_{eff} est la longueur effective du piédestal ; et r est le rayon de giration du piédestal.

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{93} \text{ où } \lambda = \frac{l_{eff}}{r} \quad (D.14)$$

Le risque de flambement du piédestal n'existe que si $\bar{\lambda} > 0,2$. Dans ce cas, la vérification de l'équation (D.15) est nécessaire pour clarifier la situation. Les dimensions du tube sélectionné doivent être revues si la condition de l'équation (D.15) n'est pas vérifiée. $\sigma_{appliquée}$ [Pa] est la contrainte axiale appliquée sur le piédestal ; $\sigma_{critique}$ [Pa] est la contrainte critique à ne pas dépasser ; P_{tot} [N] est la charge totale axiale supportée par le piédestal ; χ représente le facteur de réduction du flambement. Sa valeur est obtenue à partir des courbes de flambement fournies dans l'Eurocode 3 [259]; $\Phi(\bar{\lambda})$ est le facteur d'imperfection des courbes de flambement et se détermine en fonction de la classe de section transversale du tube sélectionné et le type de flambement; A [m²] est la surface de la section transversale du tube sélectionné ; et γ_{M1} est le facteur de sécurité partiel pour la résistance au flambement.

$$\sigma_{appliquée} \leq \sigma_{critique} \quad (D.15)$$

Où :

$$\sigma_{appliquée} = \frac{P_{tot}}{A} = \frac{[(P_m + P_{ss} + F_v) \cdot g + F_x]}{A}$$

$$\sigma_{critique} = \chi \cdot \Phi(\bar{\lambda}) \cdot \frac{\sigma_e}{\gamma_{M1}}$$

Dans le présent contexte $\Phi(\bar{\lambda}) = 1$, car la classe de la section transversale de l'acier est de type plastique.

▪ D.1.1.4. Organe de commande

L'organe de commande constitue le cerveau de l'héliostat, contrôlant ainsi la structure de support via des instructions envoyées à l'organe d'entraînement. Il se compose principalement de cinq composants (Figure D.3), à savoir (i) la carte Arduino, (ii) la carte des actionneurs, (iii) le régulateur, (iv) la carte d'acquisition des données, et (v) le capteur de suivi solaire en boucle fermée qui est le capteur LDR à quatre quadrants. Tous ces composants sont disponibles localement au Burkina Faso. L'organe de

commande a été conçu sur la base du principe de suivi solaire proposé pour l'héliostat. Ensuite, un capteur LDR à quatre quadrants a été spécialement conçu pour ce principe, puis un programme de suivi solaire en langage informatique C, utilisant le logiciel Arduino.

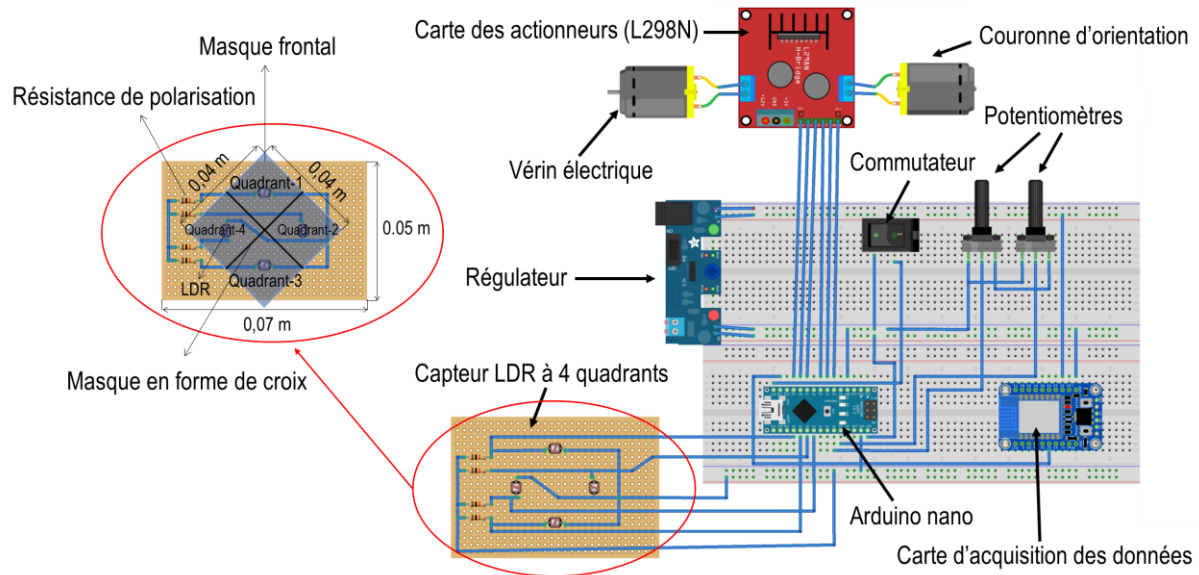


Figure D.3: Schéma de configuration de l'organe de commande de l'héliostat piédestal

Principe de suivi solaire. Le principe de suivi solaire adopté ici est basé sur un capteur LDR à quatre quadrants, qui a été spécialement conçu pour l'héliostat piédestal. Le capteur LDR à quatre quadrants est placé sur le chemin de la tache focale, comme illustré à la Figure D.4. Ses quatre LDRs font face à la tache focale de l'héliostat et sont couverts par un masque frontal (Figure D.3). L'héliostat concentre sa tache focale sur la zone cible du récepteur si les quatre LDRs du capteur sont ombragés par le masque frontal (Figure D.5a), sinon, au moins un des quatre LDR délivrera un signal parce qu'il est illuminé (Figure D.5b). En comparant le signal délivré par les LDRs, la position de l'héliostat peut être réajustée en redirigeant sa tache focale vers la zone cible du récepteur (Figure D.5c). Ce principe de suivi solaire peut être considéré comme une boucle fermée, car l'organe de commande pilote l'organe d'entraînement en vérifiant activement si la tache focale se trouve réellement sur la zone cible du récepteur. Les LDRs des quadrants impairs (1 et 3) suivent l'élévation du soleil, tandis que les LDRs des quadrants pairs (2 et 4) suivent l'azimut du soleil. La différence entre les signaux délivrés par les LDRs des quadrants impairs est notée LDR_{1-3} , tandis que celle des quadrants pairs est notée LDR_{2-4} . La tache focale de l'héliostat est focalisée sur le récepteur si et seulement si les deux différences LDR_{1-3} et LDR_{2-4} se trouvent dans leur plage de référence $[B_{ref}, H_{ref}]$, ce qui traduit également que les quatre LDRs du capteur sont ombragés par le masque frontal, comme mentionné précédemment.

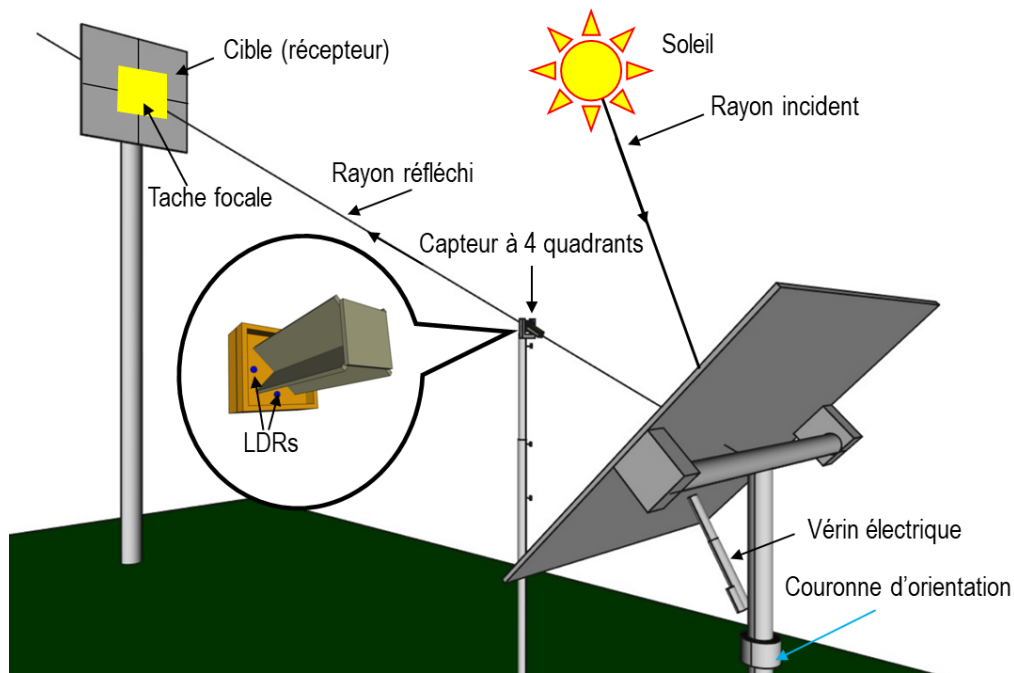


Figure D.4: Illustration du principe de suivi solaire mis en place

Construction du capteur LDR à quatre quadrants. Quatre LDRs aux spécifications techniques mentionnées dans le Tableau D.3 ont été installées équidistamment à 2 cm du centre du circuit imprimé en formant un losange (Figure D.3). La zone de détection (également appelée quadrant) des quatre LDRs est définie également par un masque en forme de croix de 8 cm de long (Figure D.3). L'objectif de ce dernier est d'améliorer la précision de détection du capteur de boucle fermée. Un autre masque frontal couvre les 4 LDRs contre la tache focale afin de savoir si elle est bien concentrée sur la zone cible du récepteur lors du suivi solaire (Figures 5a and 5b).

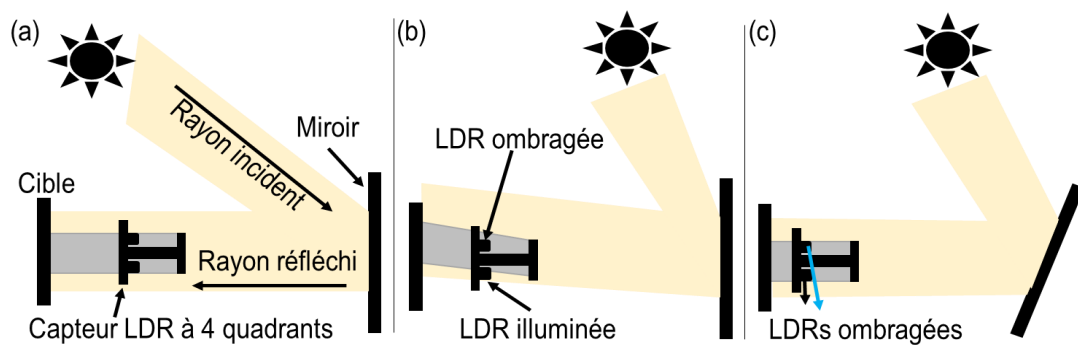


Figure D.5: Illustration du capteur LDR à quatre quadrants a) ombragé par le masque frontal, b) partiellement illuminé par la tache focale, et c) à nouveau ombragé par le masque frontal après correction de l'orientation de l'héliostat.

Le masque frontal est placé au-dessus du masque en croix et a les mêmes dimensions que le losange 0,04 m de long formé par le masque en forme de croix (Figure D.3). Les LDRs sont au centre des quadrants et chacun est connecté à une résistance de polarisation dans un circuit de pont diviseur de tension.

Tableau D.3: Spécifications techniques du LDR sélectionné pour le capteur de boucle fermée

Paramètre	Unité	Valeur
Resistance pour un éclairement de 10 lux	kΩ	30
Résistance à l'obscurité	MΩ	3
Caractéristique de réponse γ	(-)	0,7
Puissance de dissipation	mW	100

Le rôle des résistances de polarisation est d'une part de convertir de manière stable l'éclairement reçu par les LDRs en une plage de tension exploitable par la carte Arduino, et d'autre part de limiter la puissance dissipée par les LDRs. Les quatre résistances de polarisation à sélectionner doivent toutes satisfaire à la condition de l'équation (D.16), qui est déduite de la loi de Joule. R [Ω] est la résistance de polarisation ; r [Ω] est la résistance du LDR pour l'éclairement maximal de la journée (environ 10^5 lux) ; $P_{\max}$ [W] est la puissance de dissipation maximale du LDR ; et V_{cc} [V] est la tension d'alimentation de la carte Arduino, qui est de 5 V.

$$R \geq V_{cc} \cdot \sqrt{\left(\frac{r}{P_{\max}}\right)} - r \quad (\text{D.16})$$

La résistance du LDR est déterminée par l'équation (D.17) [265], qui modélise le fonctionnement du LDR. $\emptyset$ [lux] est l'éclairement reçu par le LDR ; γ est la caractéristique de réponse du LDR ; R_0 (Ω) est la résistance nominale du LDR.

$$r [\Omega] = R_0 \cdot \emptyset^{-\gamma} \quad (\text{D.17})$$

Organigramme du programme de suivi solaire. Un programme informatique en langage C a été proposé pour le principe de suivi solaire mis en place. L'organigramme à la Figure D.6 décrit ce programme. Deux modes de fonctionnement ont été prévus pour l'héliostat, à savoir le mode manuel et le mode automatique. Au début du suivi solaire, l'utilisateur choisit entre ces deux modes. Le fonctionnement manuel permet à l'utilisateur d'ajuster l'orientation de l'héliostat à l'aide d'un pupitre de commande composé de deux potentiomètres et d'un commutateur, tandis que le fonctionnement automatique fait référence à un suivi solaire autonome de l'héliostat en l'absence des nuages. Les différences LDRs1-3 (pour le vérin électrique) et LDRs2-4 (pour la couronne d'orientation) doivent constamment être dans la plage de référence $[B_{\text{ref}}, H_{\text{ref}}]$, car cela signifie que tous les LDRs sont ombragés par le masque frontal, donc la tache focale pointe sur la zone cible du récepteur. Les actionneurs ne se mettent en marche que si l'une des différences LDRs1-3 et LDRs2-4 ne figure plus dans la plage de référence, traduisant qu'au moins un des quatre LDRs est illuminé, donc la tache focale n'est plus sur la cible.

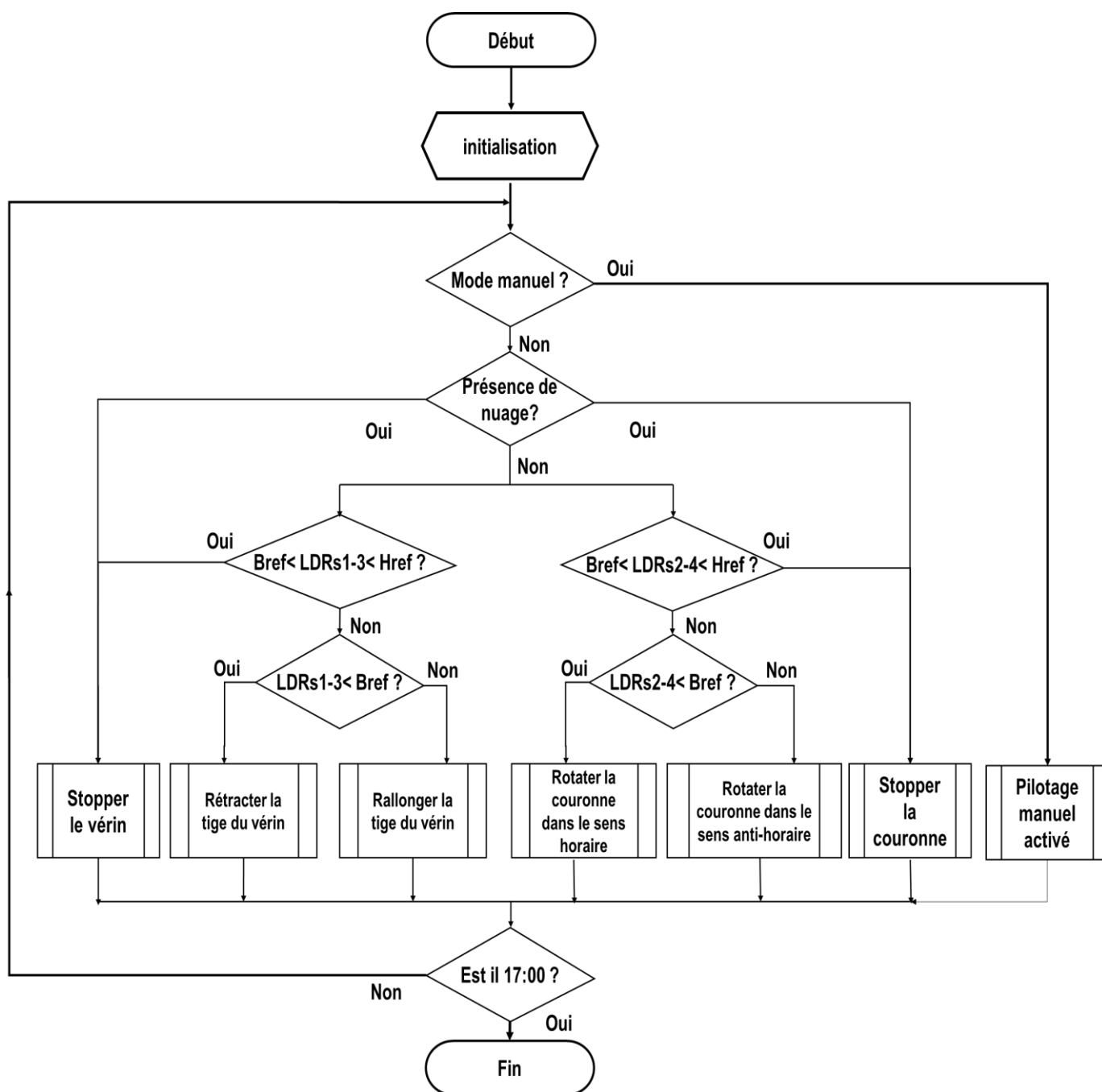


Figure D.6: Logigramme du programme de suivi solaire

▪ D.1.2. Construction des composants de l'héliostat piédestal

Tous les composants de l'héliostat ont été construits localement avec la main d'œuvre locale. Le tube carré creux en acier sélectionné pour la structure de support a été découpé à l'aide d'une meuleuse. Les morceaux de tube ont ensuite été soudés pour former la structure de support des miroirs. Par la suite, une perceuse a servi à réaliser des trous pour les vis destinées à fixer les miroirs sur la structure de support. Ce sont des rondelles en caoutchouc, placées sous les miroirs, qui ont permis d'incurver la surface réfléchissante de l'héliostat de manière à obtenir une tache focale carrée de 0,33 cm de côté.

Le tube circulaire en acier choisi pour le piédestal a également été découpé à l'aide d'une meuleuse. Le support du vérin électrique a été soudé à la première partie du piédestal, tandis que celui de la couronne d'orientation a été soudé à la deuxième partie du socle. Par ailleurs, le vérin électrique et la couronne d'orientation ont été importés dans le pays avec leur carte de contrôle après le dimensionnement.

En ce qui concerne le capteur de boucle fermée, les LDRs ont été installés sur un circuit imprimé et le tout placé dans une petite boîte imprimée en 3D. Le masque frontal et le masque en forme de croix ont tous été fabriqués à partir de carton rigide. Après l'assemblage des composants, l'héliostat a été installé sur la plateforme CSP4Africa ($12,464811^\circ$; $-1,5519127^\circ$).

▪ D.1.3. Tests de fonctionnement de l'héliostat piédestal conçu

Après les vérifications préliminaires, des tests de suivi solaire ont été réalisés pour évaluer la capacité de l'héliostat piédestal conçu à maintenir sa tache focale dans la zone cible du récepteur pendant la période d'avril à juin 2023. Pour cela, il était nécessaire de mettre en place des protocoles expérimentaux pour l'installation de l'organe de commande et la calibration du capteur LDR à quatre quadrants. Durant les tests, la concentration de l'héliostat était faite sur un tableau en bois (gradué en décimètre) pour une distance focale de 5 m (Figure D.7). Le cercle de diamètre 6 dm centré sur le tableau représente la zone cible de la tache. Le diamètre de ce cercle se justifie par la surface réceptrice de la microcentrale CSP4Africa [17].

▪ D.1.3.1. Protocole d'installation de l'organe de commande

Les étapes suivantes ont été prises en compte pour l'installation de l'organe de commande de l'héliostat piédestal :

- i) Étape 1 : Connecter les actionneurs à leur carte de contrôle
- ii) Étape 2 : Connecter le capteur LDR à 4 quadrants et la carte des actionneurs à la carte Arduino.
- iii) Étape 3 : Fixer le capteur LDR à 4 quadrants au trépied et le placer sur le chemin de la tache focale de l'héliostat, c'est-à-dire entre l'héliostat piédestal et la cible.
- iv) Étape 4 : Connecter le régulateur et la carte des actionneurs à une tension d'alimentation de 12 V

▪ D.1.3.2. Protocole de calibration du capteur LDR à 4 quadrants

Avant le test, il est important de s'assurer que le capteur LDR à 4 quadrants est parfaitement installé sur le chemin de la tache focale. Ce processus est appelé la calibration du capteur. Il corrige la position du capteur entre l'héliostat et la cible, et est basé sur les quatre premières étapes suivantes. Après la calibration du capteur LDR à 4 quadrants, le test de suivi solaire pouvait commencer.

- i) Étape 1 : Placer l'interrupteur en position ON pour activer le mode de fonctionnement manuel.
- ii) Étape 2 : Utiliser les deux potentiomètres pour centrer la tache focale à l'intérieur du cercle
- iii) Étape 3 : Orienter rigoureusement le capteur de boucle fermée de manière à ce que les quatre LDRs soient ombragées.
- iv) Étape 4 : Placer l'interrupteur en position OFF pour activer le mode de fonctionnement automatique.
- v) Étape 5 : Prendre la photo de la tache focale sur la cible toutes les 10 à 20 min.

▪ D.1.3.3. Evaluation de l'erreur de suivi solaire

L'erreur de suivi solaire est l'écart entre l'orientation réelle et l'orientation idéale de l'héliostat pendant son fonctionnement (Tableau 1). Elle correspond également à la distance entre la cible et le centroïde de la tache focale pendant le fonctionnement de l'héliostat [26,36]. Cependant, dans la présente étude, l'erreur de suivi solaire correspond à l'écart entre l'orientation réelle de l'héliostat au début et à la fin du suivi solaire, comme illustré à la Figure D.7. Elle est déterminée par l'équation (D.18). Δx [m] est la variation horizontale du centroïde de la tache focale sur l'axe X ; Δy [m] est la variation verticale du centroïde de la tache focale sur l'axe Y ; D_f [m] est la distance focale de l'héliostat.

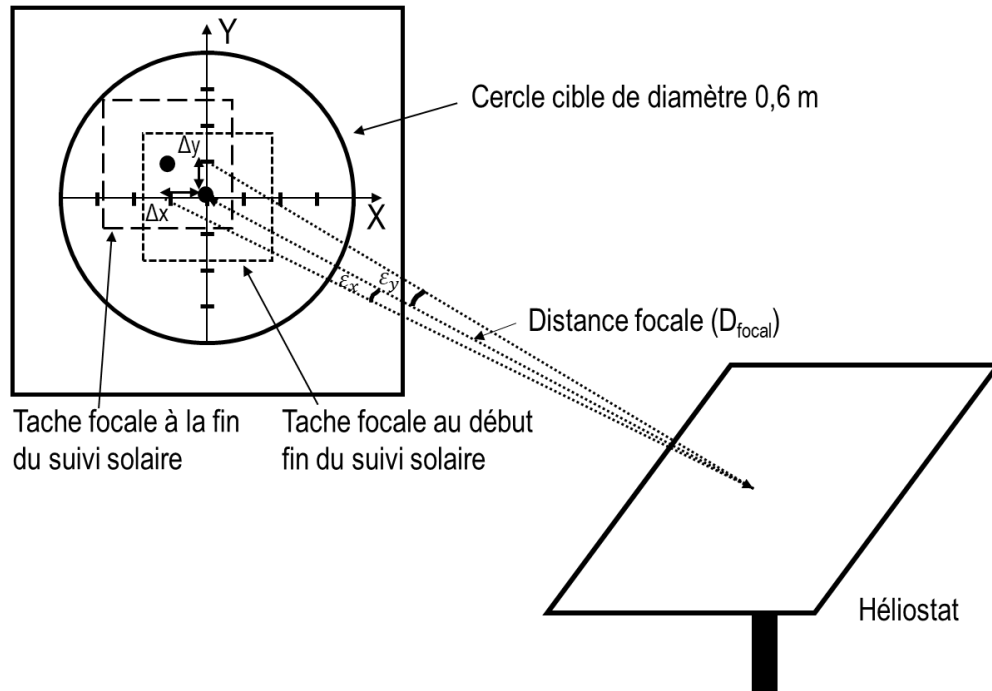


Figure D.7: Illustration de la méthode adoptée pour estimer l'erreur de suivi solaire de l'héliostat piédestal

$$\varepsilon = \text{Arctan} \left(\frac{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}}{D_f} \right) \quad (\text{D.18})$$

▪ D.2. Résultats et discussion

▪ D.2.1. Dimensionnement et choix des composants

Le Tableau D.4 présente les résultats du dimensionnement des composants de l'héliostat piédestal. Le moment d'inertie du tube carré creux approprié doit être supérieur à $0,44 \text{ cm}^4$ pour éviter que la structure de support se déforme face à la charge provenant des miroirs sous l'influence du vent. Un tube avec un moment d'inertie de $0,583 \text{ cm}^4$ a été sélectionné pour la structure de support dans le catalogue. Ce tube constitue celui ayant le moment d'inertie immédiatement supérieur $0,44 \text{ cm}^4$ dans le catalogue utilisé, c'est ce qui justifie son choix. Ses spécifications techniques sont présentées dans le Tableau D.5. La contrainte de flexion causée par les miroirs sur la structure de support avec le tube sélectionné est de 70 MPa. Cette contrainte est environ 3 fois inférieure à la limite d'élasticité de l'acier, qui est de 235 MPa, ce qui signifie que la structure de support est plus résistante avec le tube sélectionné et face à la charge provenant des miroirs sous l'influence du vent.

Tableau D.4: Résultats du dimensionnement des composants de l'héliostat piédestal

Composants	Paramètre	Unité	Valeur
Structure de support des miroirs	Poids total des miroirs	N	131,2
	Trainée du vent	N	44,5
	Portance du vent	N	31,1
	Charge des miroirs à l'état limite ultime	$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	167
	Charge des miroirs à l'état limite de service	$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	124
	Moment d'inertie minimal du tube à sélectionner	cm^4	0,44
	Contrainte de flexion causée par les miroirs	MPa	70
Organe d'entraînement	Force minimale requise pour le vérin électrique	N	423,5
	Longueur minimale nécessaire pour la tige du vérin	mm	374
	Longueur maximale nécessaire pour la tige du vérin	mm	522
	Couple minimal requis pour la couronne d'orientation	$\text{N}\cdot\text{m}$	764
Piédestal	Moment de flexion à l'état limite ultime	$\text{N}\cdot\text{m}$	401
	Diamètre interne maximal	mm	59
	Elancement géométrique	(-)	77
	Elancement réduit	(-)	0,8
	Contrainte axiale appliquée	MPa	2
	Contrainte critique à ne pas dépasser	MPa	94
Organe de commande	Resistance nominal du LDR	Ω	150 356
	Resistance du LDR pour 10^5 lux	Ω	48
	Résistance de polarisation minimale	Ω	62

Tableau D.5: Spécifications techniques du tube carré creux sélectionné

Paramètre	Unité	Valeur
Moment d'inertie	cm^4	0,583
Epaisseur	cm	1,5
Coté	cm	2
Module de section	cm^3	0,637

La force minimale nécessaire à l'entraînement de la structure de support en fonction de l'élévation du soleil est de 423,5 N. Un vérin électrique ayant une force de 2400 N a été sélectionné pour l'héliostat piédestal. Les spécifications techniques de ce vérin sont présentées dans le Tableau D.6.

Tableau D.6: Spécifications techniques du vérin électrique sélectionné

Paramètre	Unité	Valeur
Force	N	2400
Vitesse maximum	mm·s ⁻¹	33
Longueur de la tige	mm	570
Tension d'alimentation	Vdc	24
Classe de protection	–	IP65

Le couple minimal nécessaire à l'entraînement de la structure de support en fonction de la trajectoire azimutale du soleil est de 764 N·m. Une couronne d'orientation ayant un couple de 805 N·m a été sélectionnée pour l'héliostat piédestal. Les spécifications techniques de cette couronne sont présentées dans le Tableau D.7.

Tableau D.7 : Spécifications techniques de la couronne d'orientation sélectionnée

Paramètre	Unité	Valeur
Couple	N·m	805
Vitesse maximum	rpm	0,049
Tension d'alimentation	VDC	24
Classe de protection	–	IP55

Le moment de flexion à l'état limite ultime qui agit sur le piédestal est de 401 N·m. Après avoir fixé le diamètre externe du piédestal à 60,3 mm, ce moment a permis de déduire un diamètre interne maximal de 59 mm pour le piédestal. Un tube circulaire creux d'un diamètre interne de 57,4 mm et d'un diamètre externe de 60,3 mm a été sélectionné comme piédestal pour l'héliostat. Plus de spécifications techniques sur le tube sont données dans le Tableau D.8. La contrainte axiale que la charge à supporter applique sur ce tube est de 2 MPa, tandis que la contrainte critique à ne pas dépasser est de 94 MPa. Il est clair que le tube sélectionné est capable de résister à la charge provenant de tous les composants de l'héliostat sous l'influence du vent.

Tableau D.8: Spécifications techniques du tube circulaire creux sélectionné comme piédestal de l'héliostat

Paramètre	Unité	Valeur
Moment d'inertie	cm ⁴	0,116
Diamètre interne	mm	57,4
Diamètre externe	mm	60,3
Rayon de giration	mm	208,13
Surface transversale	cm ²	2,7

La valeur minimale obtenue pour la résistance de polarisation d'un LDR est de 62Ω . Quatre résistances similaires de 220Ω ont été sélectionnées dans un premier temps pour le capteur de boucle fermée afin de convertir l'éclairement reçu par les LDRs en une plage de tension exploitable par la carte Arduino. La vérification préliminaire permettra d'en savoir plus sur sa capacité à répondre à ce besoin.

▪ D.2.2. Assemblage des composants

La Figure D.8 présente la procédure d'assemblage des composants de l'héliostat piédestal (sans l'organe de commande). Après la construction de la structure de support, les trous destinés à visser les miroirs ont été percés sur celle-ci. La structure de support a ensuite été reliée à la première partie du piédestal à l'aide d'un roulement. La première partie du piédestal, avec la structure de support déjà reliée, a également été couplée à la seconde partie du piédestal par l'intermédiaire de la couronne d'orientation. Le vérin électrique a tout simplement été vissé à son support entre la structure des miroirs et la première partie du piédestal.

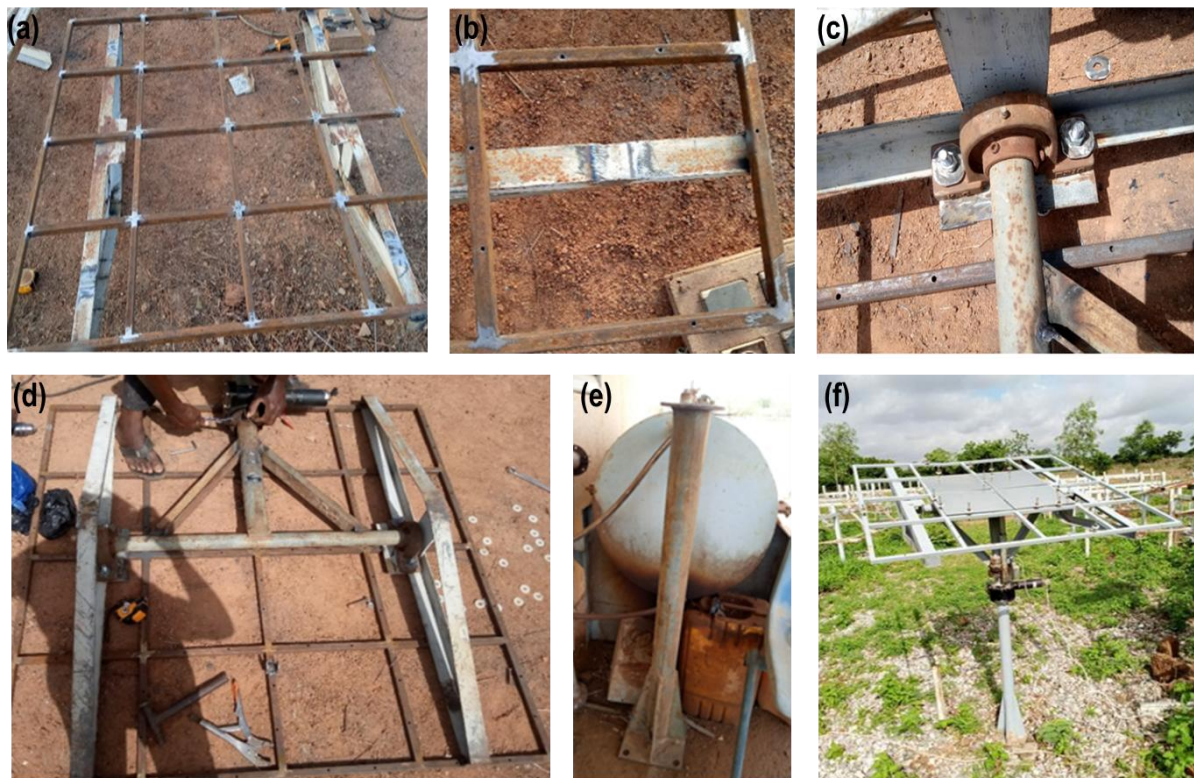


Figure D.8: a) Structure de support des miroirs après la construction b) Zoom sur les trous des vis servant à fixer les miroirs à la structure de support ; c) Connexion de la structure de support à la première partie du piédestal à l'aide d'un roulement ; d) Structure de support reliée à la première partie du piédestal ; e) Seconde partie du piédestal ; f) L'héliostat piédestal construit et installé sur la plateforme CSP4Africa.

À l'exception de l'organe de commande, tous les composants construits ont été peints en gris clair. L'héliostat piédestal conçu a ensuite été installé sur la plateforme de CSP4Africa, comme le montre la Figure D.8f. L'organe de commande de l'héliostat avec son capteur LDR à quatre quadrants est présenté

séparément à la Figure D.9. Tous les composants de L'organe de commande sont disponibles localement. Ils ont également été câblés localement à Kamboinsin.

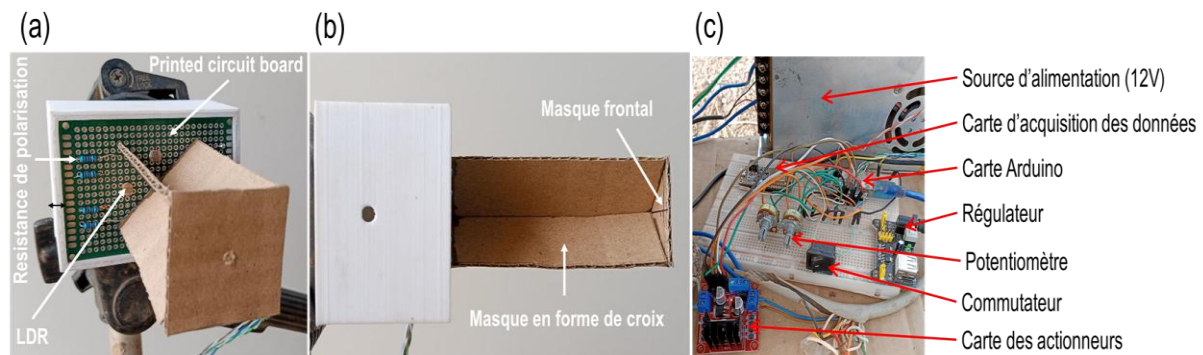


Figure D.9: Capteur LDR à quatre quadrants en a) perspective et b) vue de face, et c) l'organe de commande de l'héliostat

- **D.2.3. Tests de fonctionnement de l'héliostat piédestal**
- **D.2.3.1. Vérifications préliminaires**

Des vérifications préliminaires ont été effectuées pour se rassurer que tous les composants de l'héliostat répondent aux exigences de suivi solaire requises. Pour cela, le vérin électrique et la couronne d'orientation ont été actionnés manuellement pour vérifier respectivement les plages d'inclinaison et d'orientation de la structure de support. Le vérin électrique a pu varier l'inclinaison de la structure de support entre 0° et 90° (Figure D.10a), exactement prévue comme plage de fonctionnement pour le mouvement zénithal de l'héliostat. De même, la couronne d'orientation a pu orienter la structure de support entre 0° et 180° (Figure D.10b), également prévue comme plage de fonctionnement pour le mouvement azimutal de l'héliostat. Ces confirmations étaient nécessaires. Elles impliquent que l'héliostat conçu est à même de fonctionner pendant la disponibilité quotidienne de la ressource solaire à Kamboinsin, c'est-à-dire du lever au coucher du soleil.

Le test de planéité de la structure de support des miroirs a été effectué pour s'assurer que sa surface supérieure est rectiligne. C'est le cas, ce qui confirme que les miroirs peuvent être facilement montés et incurvés sur l'héliostat pour former une tache focale carrée de 0,33 m.

L'inclinaison du piédestal a été vérifiée, car c'est une source d'erreur fréquente dans les champs d'héliostats. L'angle mesuré entre le piédestal et l'horizontale était de $90^\circ \pm 1^\circ$. Cela suggère que le piédestal est approximativement parallèle à la verticale lors de l'implémentation de l'héliostat. Toutefois, il convient de noter que l'inclinaison du piédestal peut apparaître au fil du temps, même si le principe de suivi solaire adopté est à même de corriger la déviation qu'elle peut causer sur la tache focale.

L'organe de commande a été testé à l'aide du pupitre de commande composé de deux potentiomètres et d'un commutateur. En mode automatique, l'héliostat suit le soleil de manière autonome en concentrant la lumière sur la cible. En mode manuel, les deux potentiomètres permettent également d'incliner et d'orienter la structure de support des miroirs de l'héliostat. De plus, le commutateur peut passer du fonctionnement manuel au fonctionnement automatique de l'héliostat et vice versa.



Figure D.10 : Variation de a) l'inclinaison de la structure de support de l'héliostat entre 0° et 90° et de b) l'orientation entre 0° et 180°

Trois capteurs LDR à quatre quadrants avec différentes résistances de polarisation (220 Ω , 1 k Ω et 4,7 k Ω) ont été conçus en tant que capteurs de boucle fermée. Ils ont tous été testés avec l'héliostat. Seul le capteur avec les résistances de polarisation de 4,7 k Ω a fourni des résultats satisfaisants de suivi solaire, c'est-à-dire un suivi maintenant la tache focale à l'intérieur du cercle cible qui représente le récepteur de la microcentrale CSP4Africa. La tache focale sortait du cercle cible avec les deux autres capteurs pendant le fonctionnement de l'héliostat. En effet, elle oscillait autour du cercle cible. Elle était même totalement hors du tableau avec les résistances de polarisation de 220 Ω . Plus la résistance de polarisation était faible, plus le capteur LDR à 4 quadrants était sensible à l'éclairement journalier. Les résistances de polarisation de 4,7 k Ω ont finalement été adoptées pour le capteur de boucle fermée de l'héliostat.

▪ D.2.3.2. Tests d'autocorrection de la déviation de la tache focale

Cas de la déviation verticale de la tache focale. Le centroïde de la tache focale a été dévié de 0,65 m du centre du cercle cible à l'aide du potentiomètre qui contrôle le vérin électrique. Cette opération a été réalisée dans deux directions, à savoir vers le haut (Figure D.11a) et vers le bas (Figure D.11b). Dans les deux cas, l'opération de déviation a pris 5 s. Par la suite, le fonctionnement automatique de l'héliostat a été activé en mettant le commutateur en position OFF. Seul le vérin électrique a été mis en marche par l'organe de commande pour corriger l'erreur de suivi solaire dans les deux cas. Le processus de correction de la déviation vers le haut et vers le bas est présenté respectivement aux figures 11a et 11b. La période de correction a pris 5 secondes dans les deux cas.



Figure D.11 : Test d'autocorrection de la déviation a) vers le haut et b) vers le bas de la tache focale le 24 mai 2023

Cas de la déviation horizontale de la tache focale. Le centroïde de la tache focale a été dévié de 0,65 m du centre du cercle cible à l'aide du potentiomètre qui contrôle la couronne d'orientation. Cette opération a été effectuée dans deux directions, à savoir à droite (Figure D.12a) et à gauche (Figure D.12b). L'action a pris 40 s dans les deux cas. Par la suite, le fonctionnement automatique de l'héliostat a été activé en mettant le commutateur en position OFF. Cette fois-ci, ce sont le vérin électrique et la couronne d'orientation qui ont été mis en marche simultanément par l'organe de commande pour corriger l'erreur de suivi solaire dans les deux cas. En effet, la tache focale était légèrement en dessous du centre du cercle cible dans les deux cas, comme on peut le voir aux figures 12a et 12b. C'est pourquoi l'organe

de commande a également mis en marche le vérin électrique pour corriger également la petite déviation verticale légère. Le processus de correction de la déviation vers la droite et vers la gauche est présenté respectivement aux figures 12a et 12b. La période de correction a duré environ 50 s dans les deux cas.



Figure D.12 : Test d'autocorrection de la déviation a) vers la droite et b) vers la gauche de la tache focale le 24 mai 2023

Cas de la déviation mixte de la tache focale. Le centroïde de la tache focale a été dévié de 0,85 m du centre du cercle cible vers la direction diagonale inférieure gauche (Figure D.13), en utilisant les deux potentiomètres de l'organe de commande. L'action a duré 43 s. Par la suite, le fonctionnement automatique de l'héliostat a été activé en mettant le commutateur en position OFF. L'organe de commande a immédiatement mis en marche le vérin électrique et la couronne d'orientation pour corriger la déviation mixte. Le processus de correction est présenté à la Figure D.13. La période de correction a duré 52 s.

La période de correction de la déviation mixte de la tache focale était approximativement égale à celle de la déviation horizontale. Cela s'explique par le temps de réponse court du vérin électrique, qui est 10 fois inférieur au temps de réponse de la couronne d'orientation lorsqu'il s'agit de corriger une erreur de même ampleur. La période de correction de la déviation mixte correspond donc au temps de réponse de la couronne d'orientation pour corriger la déviation horizontale de la tache focale. Ces tests d'autocorrection

permettent de conclure que l'organe de commande est capable de corriger les erreurs de suivi solaire de l'héliostat, qu'elles soient simplement verticales, simplement horizontales ou mixtes.



Figure D.13 : Test d'autocorrection de la déviation de la tache focale vers la diagonale inférieure gauche le 24 mai 2023

▪ D.2.3.3. Tests journaliers de suivi solaire

L'objectif des tests journaliers de suivi solaire était d'évaluer la capacité de l'héliostat avec son capteur de boucle fermée à garder la tache focale à l'intérieur du cercle cible pendant la période de fonctionnement de la centrale CSP4Africa [17], qui va de 9h30 à 14h30. Les tests ont été effectués les 16, 17, 23 et 24 mai 2023 (Figure D.14 à Figure D.17 respectivement), avec des résultats prometteurs. Lors de ces tests, l'organe de commande a pu garder la tache focale de l'héliostat à l'intérieur du cercle cible, comme en témoignent les séquences d'images des tests effectués (Figure D.14 à Figure D.17). Il faudrait souligner que les nuages perturbent souvent le fonctionnement de l'organe de commande de l'héliostat en raison de la baisse importante de l'intensité de la tache focale. L'héliostat était donc mis en arrêt par un cinquième LDR lorsque le ciel était complètement nuageux. Lors des tests journaliers de suivi solaire, même si des déviations de plus ou moins 0,1 m ont été observées, la tache focale de l'héliostat piédestal est principalement restée concentrée sur la cible.

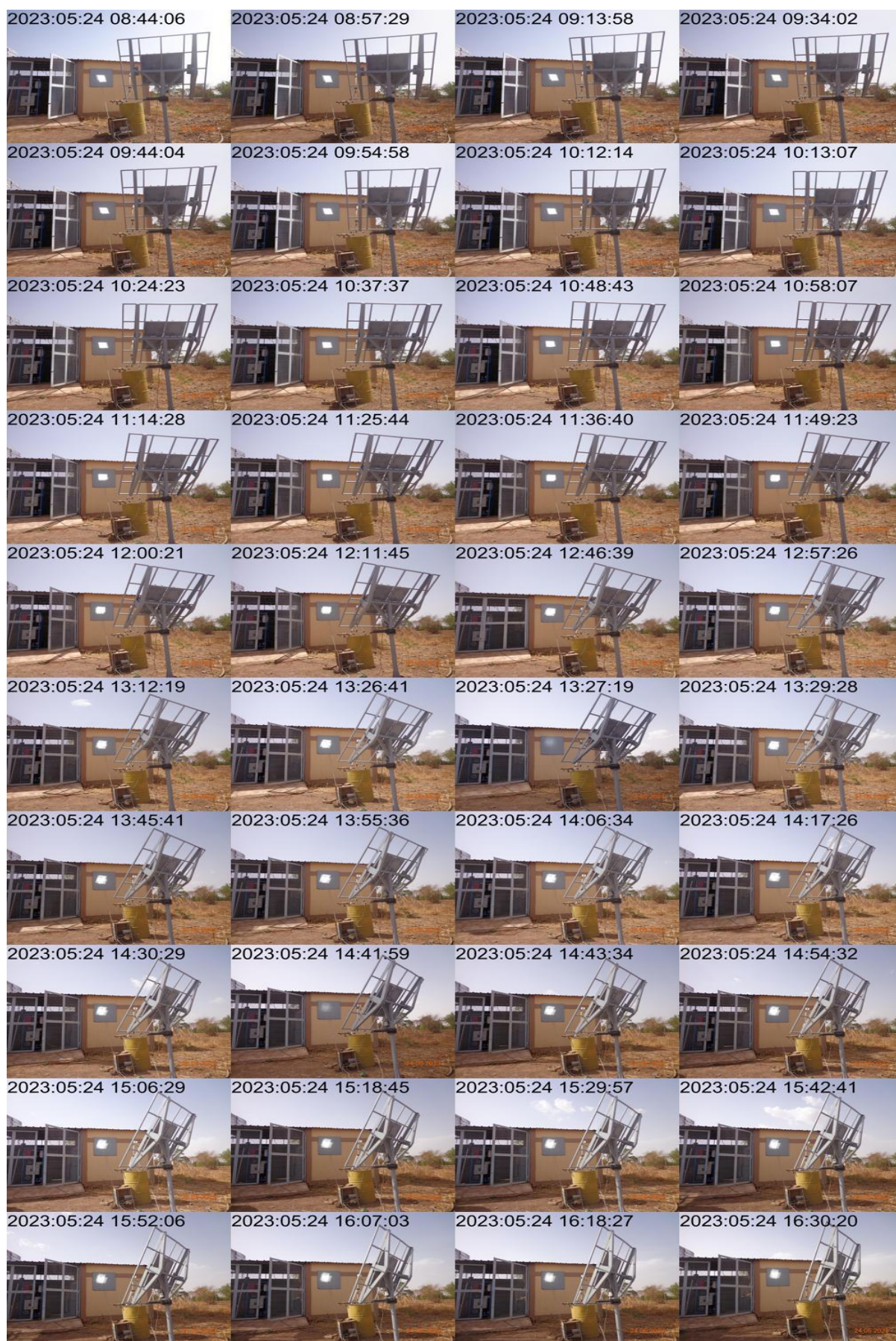


Figure D.14 : Séquence d'images de la tache focale pendant le test de suivi solaire du 24 mai 2023.



Figure D.15: Séquence d'images de la tache focale lors du test de suivi solaire effectué le 16 mai 2023.

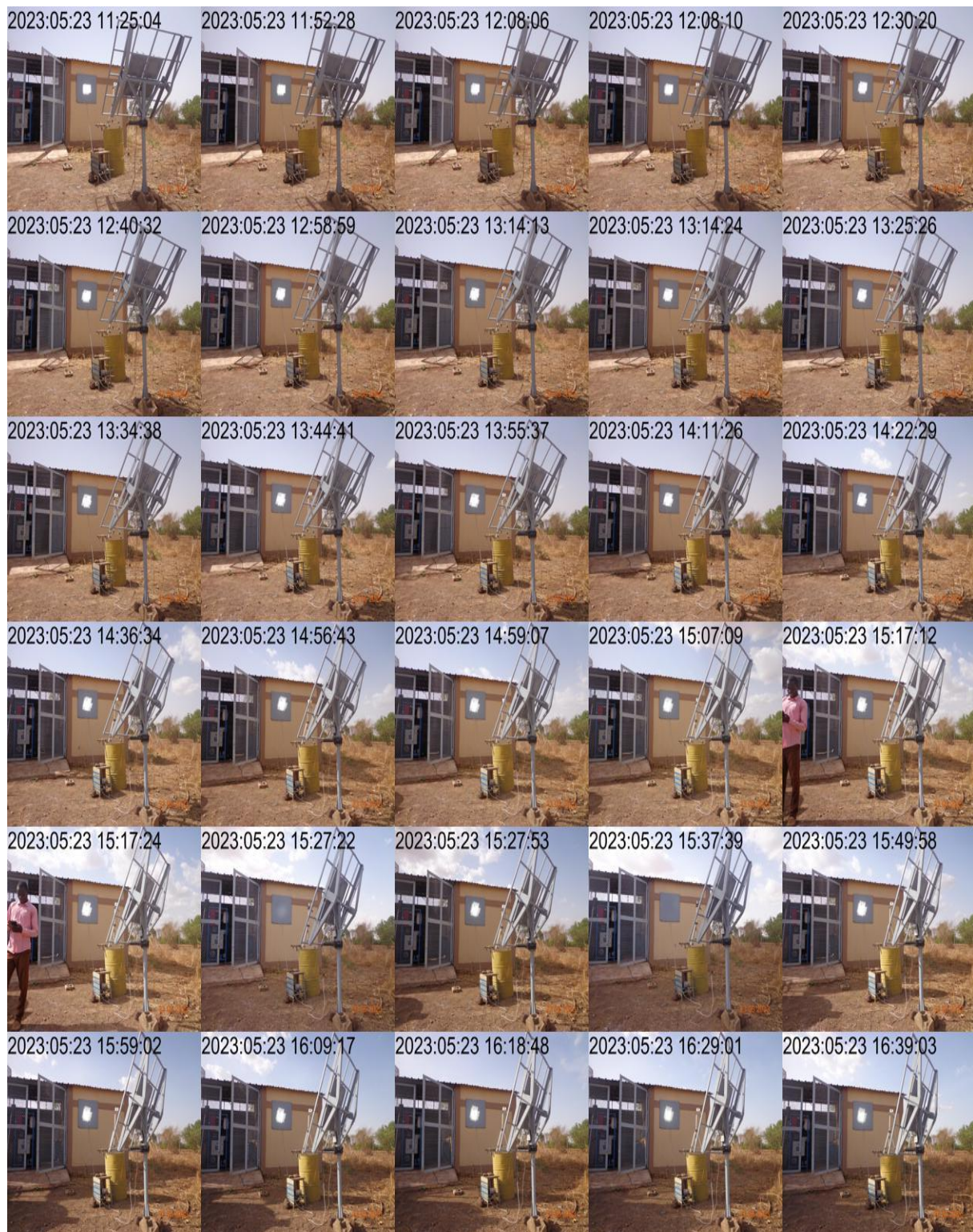


Figure D.16: Séquence d'images de la tache focale lors du test de suivi solaire effectué le 17 mai 2023.

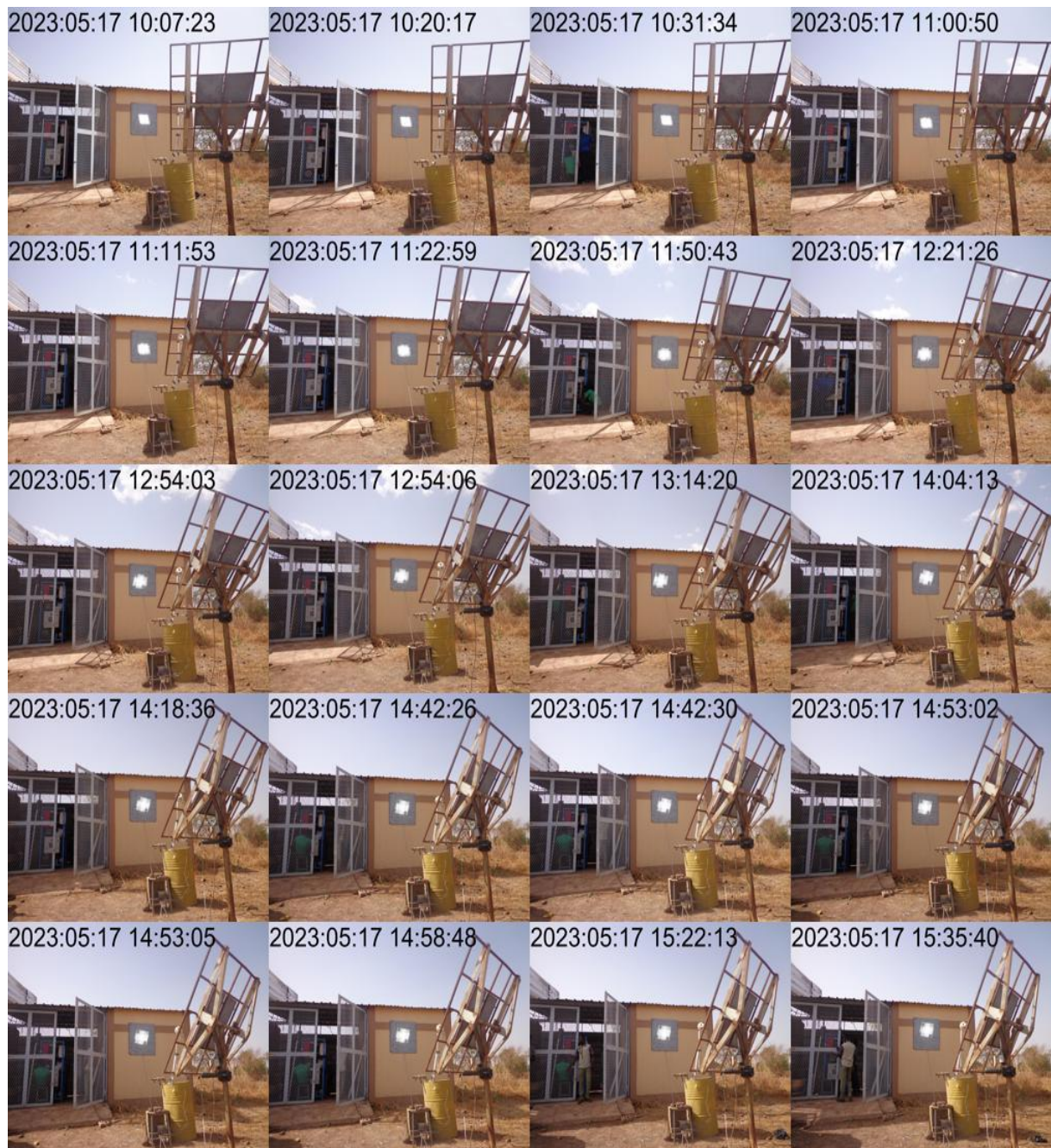


Figure D.17: Séquence d'images de la tache focale lors du test de suivi solaire effectué le 23 mai 2023.

Pendant les tests de suivi solaire, il a été constaté que les taches des miroirs se dispersaient légèrement et de manière continue alors que les miroirs restaient parfaitement incurvés. Les bords de certaines taches étaient même visibles à la fin du test de suivi solaire (Figure D.18b), alors que toutes les taches des miroirs étaient rigoureusement superposées au début du suivi solaire (Figure D.18a).

On suppose que les miroirs sont restés incurvés pendant le test et qu'ils étaient également vissés à la structure de support de l'héliostat. Cependant, en raison de l'incurvation des miroirs (Tableau 3), ils présentaient des angles différents. Donc, la dispersion des taches durant le test de suivi solaire s'explique par les effets cosinus et d'astigmatisme (voir section II.3.2.4) causés par la trajectoire apparente du soleil,

car le lendemain, les taches se retrouvaient superposées de nouveau au début du test de suivi solaire. Une simulation avec 3 miroirs a été réalisée sur le logiciel GeoGebra afin de corroborer cette observation. À la Figure D.19, (D_n) représente le rayon réfléchi par le miroir n lors du test de suivi solaire. On peut observer que tous les (D_n) convergent vers le point C (centre du cercle cible) lorsque le soleil (S) se lève à l'est (Figure D.19a). En revanche, les (D_n) ne convergent plus vers le point C lorsque le soleil se couche à l'Ouest (Figure D.19b). Ce fait est mis en évidence par la dispersion des taches sur la cible, ce qui augmente la taille de la tache focale globale et l'erreur de suivi solaire de l'héliostat.

(a)



(b)



Figure D.18: Tache focale de l'héliostat a) au début et b) la fin du test de suivi solaire réalisé le 17 mai 2023.

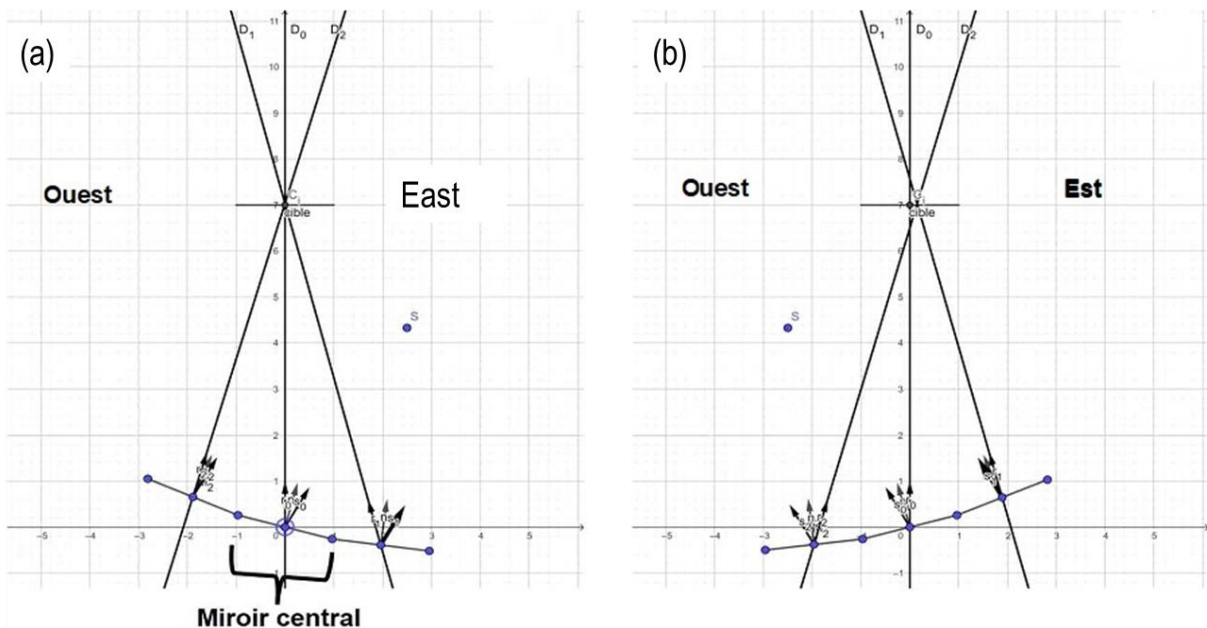


Figure D.19: Simulation de l'incurvation des miroirs sur le logiciel GeoGebra a) au début et b) à la fin du test de suivi solaire.

La variation du centroïde de la tache focale suivant l'axe horizontal et l'axe vertical de la cible a été estimée respectivement à 0,05 m et 0 m à la fin du test de suivi solaire réalisé le 17 mai 2023 (Figure D.18). L'application numérique de l'équation (D.18) permet d'évaluer l'erreur de suivi solaire à $\varepsilon = 0,57^\circ$ pour le test de suivi solaire effectué le 17 mai 2023. Les erreurs de suivi solaire des autres tests réalisés sont présentées dans le Tableau D.9.

Tableau D.9 : Erreurs des tests de suivi solaire réalisés les 16, 17, 23 et 24 Mai 2023

Date du test de suivi solaire	Erreur de suivi solaire
16 Mai 2023	0,49°
17 Mai 2023	0,57°
23 Mai 2023	0,92°
24 Mai 2023	0,74°

Les erreurs de suivi solaire varient en fonction des jours de test. Cette variation peut être attribuée à la précision de calibration du capteur de boucle fermée, ainsi qu'à la trajectoire quotidienne et saisonnière du soleil qui change continuellement au cours de l'année. La même précision de calibration du capteur de boucle fermée n'a pas pu être obtenue à tous les jours, en raison du fait que l'organe de commande devrait être démonté à la fin de chaque test de suivi et remonté juste avant le début du prochain test de suivi. La plus grande précision de calibration du capteur de boucle fermée a sans doute été obtenue au test du 16 mai 2023.

▪ D.2.3.4. Analyse des données de fonctionnement de l'héliostat piédestal

Les profils de fonctionnement du vérin électrique et de la couronne d'orientation, respectivement en fonction des différences « LDRs1-3 » et « LDRs2-4 », lors des tests de suivi réalisés les 16, 17, 23 et 24 mai 2023, sont présentés de la Figure D.20 à la Figure D.23. La plage de référence $[B_{ref}, H_{ref}]$ définit les limites à ne pas dépasser par les différences « LDRs1-3 » et « LDRs2-4 », sinon les actionneurs seront mis en marche par l'organe de commande. La rétraction, l'arrêt et l'extension de la tige du vérin électrique sont représentés respectivement par les états de fonctionnement -1, 0 et 1. De même, la rotation horaire, l'arrêt et la rotation anti-horaire de la couronne d'orientation sont également traduits respectivement par les états de fonctionnement -1, 0 et 1.

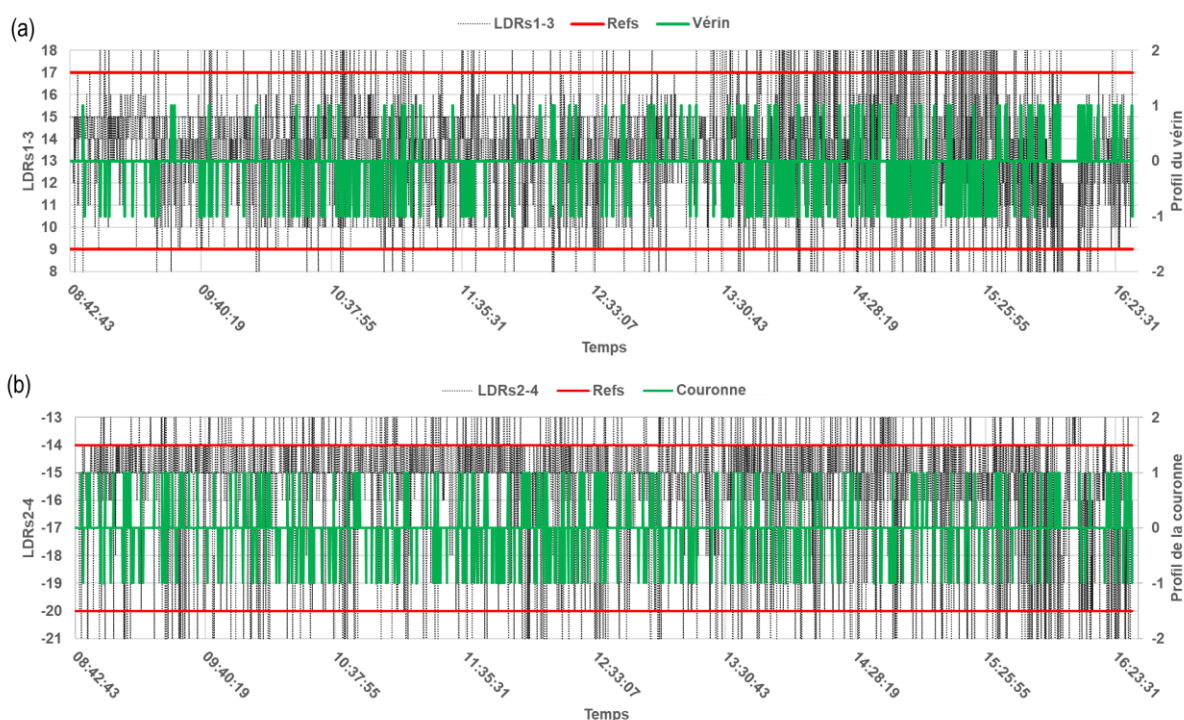


Figure D.20: Profils de fonctionnement du a) vérin électrique et de b) la couronne d'orientation pour le test de suivi solaire réalisé le 24 mai 2023

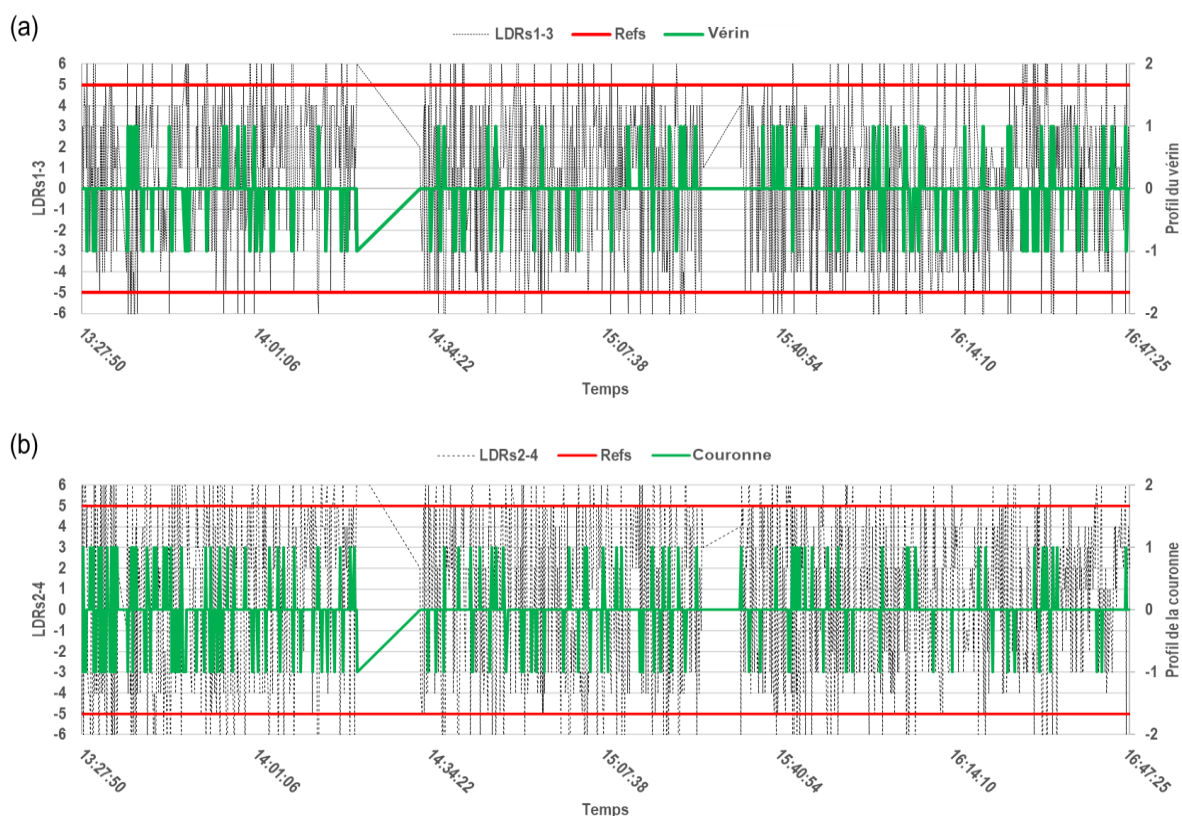


Figure D.21: Profils de fonctionnement du a) vérin électrique et de b) la couronne d'orientation pour le test de suivi solaire réalisé le 16 mai 2023

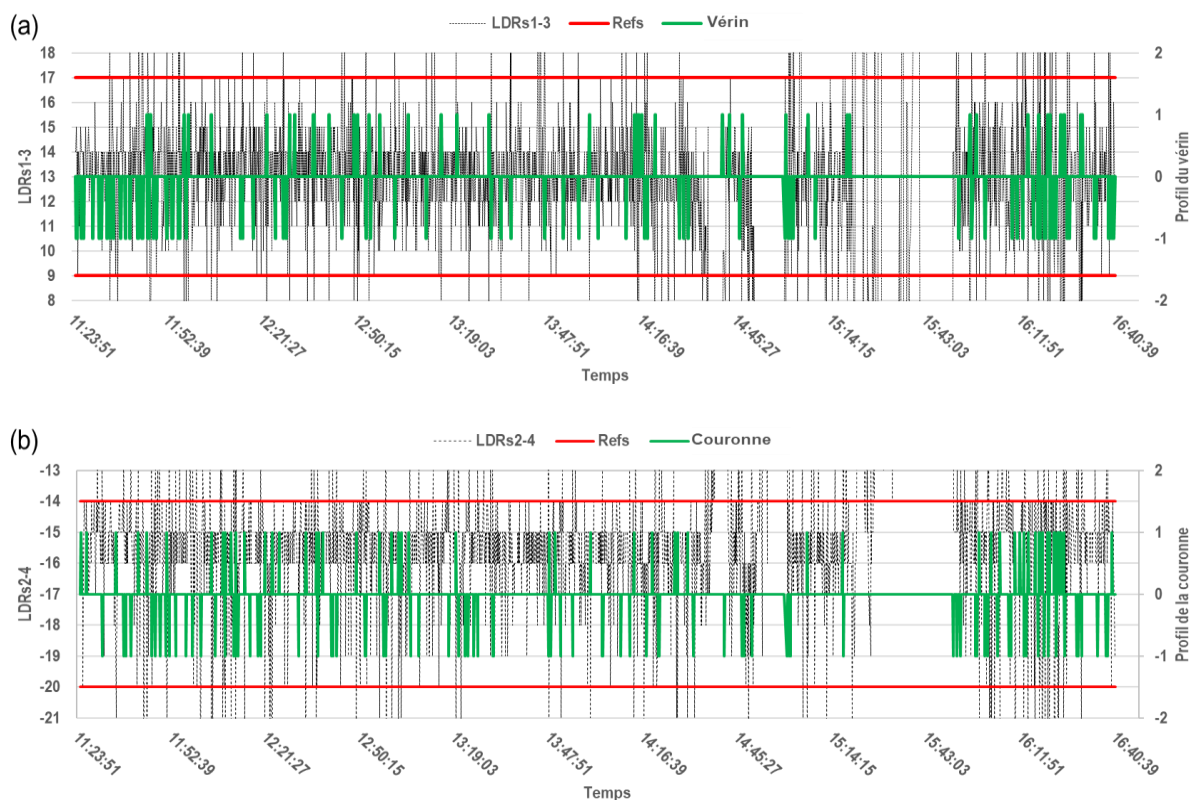


Figure D.22: Profils de fonctionnement du a) vérin électrique et de b) la couronne d'orientation pour le test de suivi solaire réalisé le 17 mai 2023

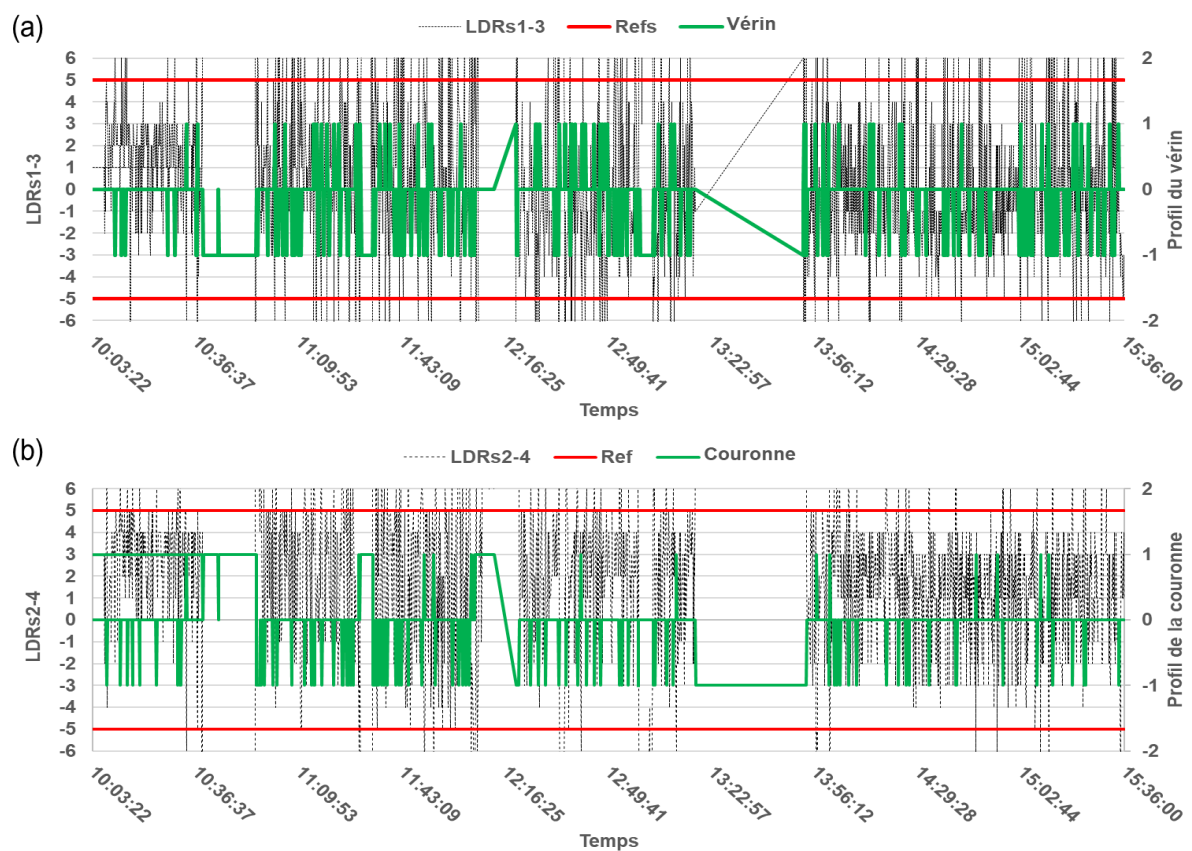


Figure D.23: Profils de fonctionnement du a) vérin électrique et de b) la couronne d'orientation pour le test de suivi solaire réalisé le 23 mai 2023

Pendant les tests de suivi réalisés les 16, 17, 23 et 24 mai 2023 (Figure D.20 à Figure D.23 respectivement), on peut constater que lorsque la différence « LDRs1-3 » dépasse la référence supérieure (H_{ref}), le vérin électrique rétracte sa tige, inversement, lorsque la même différence est en dessous de la référence inférieure (B_{ref}), il rallonge sa tige. Cela s'explique par l'illumination du LDR1 par la tache focale de l'héliostat, et inversement. Le vérin ne se met à l'arrêt que lorsque la différence « LDRs1-3 » se trouve dans la plage de référence [B_{ref} , H_{ref}]. Une observation similaire peut être faite pour la couronne d'orientation lors de ces tests. Elle tourne dans le sens horaire lorsque la différence « LDRs2-4 » dépasse la référence supérieure, et inversement lorsque la différence « LDRs2-4 » est en dessous de la référence inférieure. La couronne d'orientation ne se met à l'arrêt que si la différence « LDRs2-4 » se situe dans la plage de référence.

Par ailleurs, les profils de fonctionnement journaliers des actionneurs ont permis de générer des graphiques illustrant leurs périodes de fonctionnement et d'arrêt lors des tests de suivi solaire réalisés les 16, 17, 23 et 24 mai 2023, illustrés respectivement de la Figure D.24 à la Figure D.27. Ces informations sur les périodes de fonctionnement et d'arrêt montrent que le principe de suivi solaire adopté pour l'héliostat est extrêmement économe en énergie et ne fait fonctionner les actionneurs que pendant, au maximum, 20 % du temps de suivi solaire de l'héliostat. Il convient également de noter que les plages de référence LDRs1-3 et LDRs2-4 limitent efficacement le temps de fonctionnement des actionneurs, tout en gardant la tache focale de l'héliostat dans le cercle cible pendant la période de fonctionnement de microcentrale CSP4Africa.

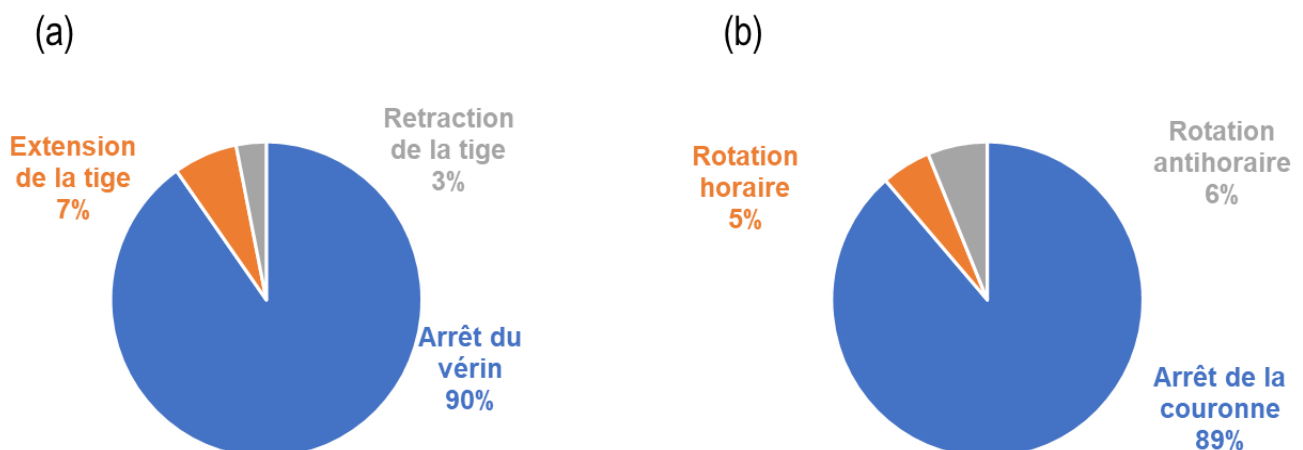
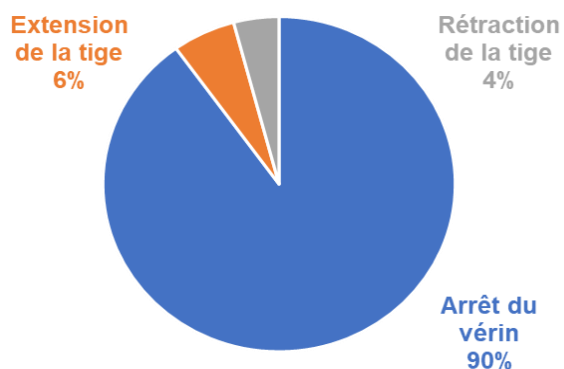


Figure D.24:: Période de fonctionnement et d'arrêt du a) vérin électrique et de b) la couronne d'orientation pour le test de suivi solaire effectué le 24 mai 2023.

(a)



(b)

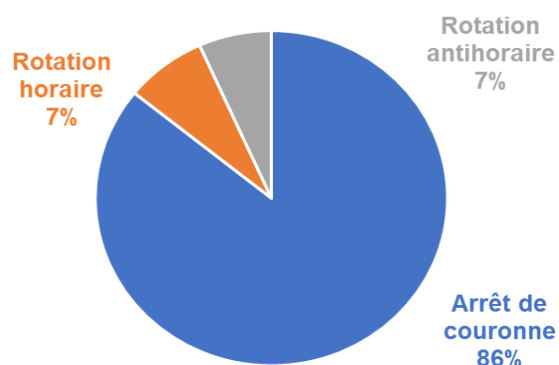
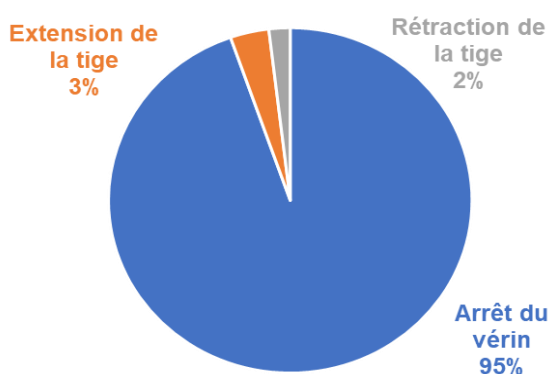


Figure D.25: Période de fonctionnement et d'arrêt du a) vérin électrique et de b) la couronne d'orientation pour le test de suivi solaire effectué le 16 mai 2023.

(a)



(b)

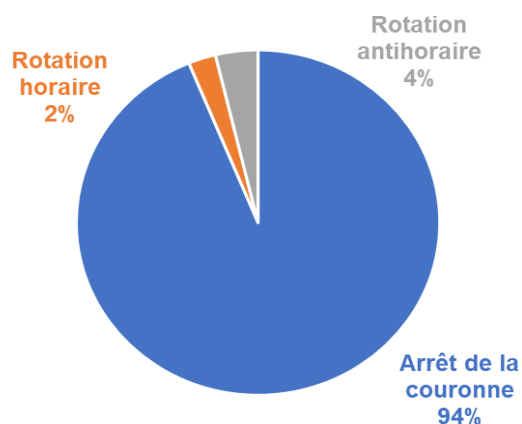
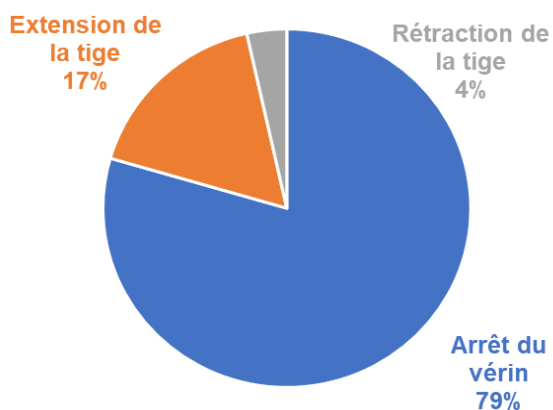


Figure D.26: Période de fonctionnement et d'arrêt du a) vérin électrique et de b) la couronne d'orientation pour le test de suivi solaire effectué le 17 mai 2023.

(a)



(b)

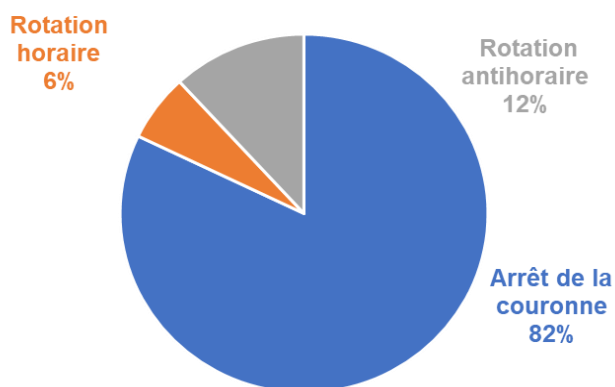


Figure D.27: Période de fonctionnement et d'arrêt du a) vérin électrique et de b) la couronne d'orientation pour le test de suivi solaire effectué le 23 mai 2023.

▪ D.3. Conclusion

Dans ce projet, il était question de proposer un héliostat piédestal fonctionnant en boucle fermée comme alternatif à l'héliostat multifacette de la microcentrale CPS4frica. Le travail a été réalisé en collaboration avec deux étudiants de master sous l'assistance du doctorant. Un héliostat piédestal avec son capteur de suivi solaire en boucle fermée a été conçu, construit et testé en ayant uniquement recours aux matériaux disponibles localement. La conception a impliqué le dimensionnement des quatre composants principaux de l'héliostat piédestal, à savoir la structure de support des miroirs, le piédestal lui-même, l'organe d'entraînement composée d'un vérin et d'une couronne d'orientation, et l'organe de commande composé d'une carte Arduino, d'une carte d'actionneurs, d'un régulateur, d'une carte d'acquisition de données, et d'un capteur de boucle fermée qui est le capteur LDR à quatre quadrants. Les quatre composants principaux ont ensuite été assemblés pour construire l'héliostat piédestal qui répond aux aspirations du projet CSP4Africa. Après l'implémentation de l'héliostat, des tests de suivi solaire ont été réalisés pendant plusieurs jours pour évaluer la capacité de l'appareil avec son capteur de boucle fermée à garder la tache focale à l'intérieur du cercle cible pendant la période de fonctionnement de la microcentrale CSP4Africa, qui va de 9h30 à 14h30. Des résultats satisfaisants ont été obtenus avec une erreur de suivi solaire inférieure à 1° pour une distance focale de 5 m.

Cependant, des tests de suivi solaire sur une année complète dans différentes positions du champ à distance focale plus grande, sont encore nécessaires pour valider le principe de suivi solaire proposé et conclure sur la potentialité de l'héliostat piédestal conçu à résoudre le défi de la concentration solaire sur la microcentrale CSP4Africa.

Annexe E: Présentation botanique et écologique de *Lannea microcarpa* et *Lannea kerstingii*

Le Tableau E.1 présente les similarités et les distinctions principales existantes entre *Lannea microcarpa* et *Lannea kerstingii* en termes de caractéristiques physiques, habitat, répartition géographique et usages traditionnels.

Tableau E.1: Comparaison des caractéristiques de *Lannea microcarpa* et *Lannea kerstingii* [190]

Caractéristique	<i>Lannea microcarpa</i>	<i>Lannea kerstingii</i>
Famille	Anacardiacees	Anacardiacees
Synonymes	<i>Lannea acida</i> ; <i>Lannea djalonica</i>	<i>Lannea barteri</i> ; <i>Lannea acidissima</i>
Nom commun	Raisinier sauvage	Raisinier sauvage
Hauteur maximale	15 m	12 m
Diamètre maximal du tronc	70 cm	40 cm
Écorce	Lisse ou à écailles fines, fibre torse, gris clair et tranche rougeâtre	Lisse à légèrement fissurée, fibre torse en spirale, gris clair et tranche rosée
Feuilles	Alternes, imparipennées, 2 à 4 paires de folioles ovales et opposées	Alternes, imparipennées, 2 à 6 paires de folioles ovales et opposées
Longueur maximale des feuilles	25 cm	25 cm
Limbe	Aspect cireux, points glanduleux, légèrement rugueux	Densément pubescent, poils simples et étoilés
Floraison et fructification	En fin de saison sèche, avant apparition des feuilles	En fin de saison sèche, avant apparition des feuilles
Fleurs	Jaunâtres à 4 pétales et 4 mm de diamètre	Jaunâtres à 4 pétales et 4 mm de diamètre
Fruit	Drupe ellipsoïde, pourpre foncé ou rouge, glabre, jusqu'à 1,4 cm de long	Drupe ellipsoïde, pourpre ou noirâtre, glabre, jusqu'à 1,3 cm de long
Habitat	Savanes sahélo-soudaniennes, sols rocheux ou profonds	Savanes soudaniennes et guinéennes, tous types de sol
Répartition géographique	Du Sénégal au Cameroun	Du Mali à l'Éthiopie, peu commune, très dispersée
Usages médicaux	Traitement du rachitisme, scorbut, fébrifuge, stérilité, coliques néphrétiques, etc.	Traitement du rachitisme, scorbut, douleur, gastrite, diarrhée, épilepsie, etc.
Usages alimentaires	Pulpe des fruits comestible et commercialisée ; Feuilles et rameaux mangés par le bétail	Pulpe des fruits comestible mais moins prisée que celle de <i>Lannea microcarpa</i> ; Feuilles et rameaux mangés par le bétail
Utilisation du bois	Construction, menuiserie, bois de feu et charbon ;	Construction, bois de feu et charbon
Usage du liquide issu du tronc	Cordages et teinture	Teinture pour rites funéraires

Annexe F: Estimation du coût de production à petite échelle des huiles des graines de *Lannea microcarpa* (LaMSO) et *Lannea kerstingii* (LaKSO), et de ceux des autres huiles considérées dans la comparaison économique

▪ **F.1. L'huile des graines de *Lannea microcarpa* (LaMSO) et l'huile des graines de *Lannea kerstingii* (LaKSO)**

Le Tableau F.1 présente les coûts de production des huiles végétales LaMSO et LaKSO extraites à la presse (CGOLDENWALL Oil Press Machine 1800W), sur la base d'une extraction à petite échelle réalisée dans le cadre de cette recherche. Les coûts de production de LaMSO et LaKSO obtenus, respectivement 3890 FCFA·kg⁻¹ et 3470 FCFA·kg⁻¹, sont probablement plus élevés que ceux d'une production à grande échelle. Pour une estimation plus précise du coût unitaire des huiles végétales LaMSO et LaKSO, une production à grande échelle devrait être envisagée, car elle bénéficierait d'économies d'échelle et de processus optimisés.

Tableau F.1 : Estimation du coût de production des huiles végétales LaMSO et LaKSO à petite échelle

Item	Coût unitaire	Quantité par kg de LaMSO	Coût par kg of LaMSO	Quantité par kg de LaKSO	Coût par kg of LaKSO
Matière première					
Fruits	20 FCFA·kg ⁻¹	56 kg	1120 FCFA	50 kg	1000 FCFA
Appareil de production					
Presse	280 000 FCFA·presse ⁻¹	1‰ (Taux amorisation)	28 FCFA	1 ‰ (Taux amorisation)	28 FCFA
Main d'œuvre					
Dépulpage des fruits pour obtenir les noyaux	150 FCFA·h ⁻¹	8 h	1200 FCFA	7 h	1050 FCFA
Décortiquage des noyaux pour extraire les graines	150 FCFA·h ⁻¹	10 h	1500 FCFA	9 h	1350 FCFA
Extraction de l'huile	150 FCFA·h ⁻¹	0,25 h	37,5 FCFA	0,25 h	37,5 FCFA
Divers					
Consommation électrique de la presse	92 FCFA·kWh ⁻¹	0,06 kWh	5.5 FCFA	0,06 kWh	5,5 FCFA
Total			3 890 FCFA		3470 FCFA

▪ F.2. Dowtherm A and Xceltherm 600

C'est un défi d'obtenir des coûts cohérents pour ces deux huiles conventionnelles dans la littérature, car les prix varient considérablement en fonction de plusieurs facteurs, à savoir le temps, le lieu, la pureté de l'huile et la quantité à acheter [153]. Par exemple, nous avons constaté que le coût du Dowtherm A variait entre 300 000 FCFA·t⁻¹ et 90 740 000 FCFA·t⁻¹ [240,266–272]. Le coût du Xceltherm 600 était d'environ 1 650 000 FCFA·t⁻¹ dans une référence de 2018 [271].

Dans cette étude, les prix de Dowtherm A et de Xceltherm 600 ont été obtenus respectivement sur les sites de Thermal Fluid Hub (États-Unis) [234] et d'Unoclean (Angleterre) [236]. Nous avons ensuite ajouté à ces prix les frais de transport et de livraison (10 % du prix de l'huile), et les frais de dédouanement (40 % du prix de l'huile). Par conséquent, les coûts unitaires d'approvisionnement en Dowtherm A et Xceltherm 600 à Ouagadougou, Burkina Faso, ont été estimés respectivement à 24 300 000 FCFA·t⁻¹ et 10 200 000 FCFA·t⁻¹. Récemment (août 2024), une cotation directe pour le Xceltherm 600 (Incoterms : CIF, Ouagadougou, Burkina Faso) auprès de son producteur a estimé son coût à 7 600 000 FCFA·t⁻¹. Compte tenu des frais de douane standard d'environ 40 %, le coût final de Xceltherm 600 s'élèverait à 16 10 560 000 FCFA·t⁻¹. Donc, les prix utilisés dans cette étude sont cohérents avec les devis précédents obtenus auprès des distributeurs mondiaux pour une livraison au Burkina Faso [153] et sont comparables aux coûts cités dans d'autres études menées dans les pays en développement comme l'Inde (pour le Therminol VP-1, une autre huile thermique à base d'oxyde de diphenyle/biphenyle) [266].

▪ F.3. *Jatropha curcas* crude oil (JaCCO) et Refined *Jatropha curcas* crude oil (RJCO)

Les coûts unitaires de JaCCO et RJCO, fournis par Belwet [233], une entreprise locale spécialisée dans la production de ces huiles, sont respectivement de 800 000 FCFA·t⁻¹ et 1 000 000 FCFA·t⁻¹. Ces coûts incluent les frais de livraison depuis l'entreprise jusqu'à la plateforme CSP4Africa en 2023.

Annexe G: Liste des publications, communications et prix scientifiques

▪ G.1. Liste des articles publiés

M. Maiga, K. E. N'Tsoukpoe. *Lannea kerstingii* seed oil for sustainable thermal energy storage: Thermophysical properties, medium-temperature stability and interaction with common engineering metals. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2025; 282:113367. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2024.113367>

M. Maiga, K. E. N'Tsoukpoe, A. Gomna. Experimental study of *Lannea microcarpa* seed oil as a heat transfer fluid or thermal energy storage material for medium-temperature applications. *Energy Reports* 2024; 12:4129–42. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.10.001>

M. Maiga, K. E. N'Tsoukpoe, A. Gomna, Y. A. K. Fiagbe. Sources of solar tracking errors and correction strategies for heliostats. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2024; 203:114770. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114770>

▪ G.2. Article en cours de révision

M. Maiga, D. O. M. Ouédraogo, A. Gomna, K. F. Yibokou, K. E. N'Tsoukpoe, H. N. KENHAGHO. Design and testing of a low-tech pedestal heliostat with its closed-loop tracking sensor for a micro concentrating solar power plant pilot in the Sahel: Case of CSP4Africa. Submitted paper 2024.

▪ G.3. Listes des communications scientifiques

M. Maiga, K.E. N'Tsoukpoe, A. Gomna. Experimental study of *Lannea kerstingii* and *Lannea microcarpa* seed oils as heat transfer fluids or thermal energy storage materials for CSP applications. International conference on energy in Africa, national, regional and local energy mix, Benguerir – Morocco, may 14–16, 2024.

M. Maiga, D. O. M. Ouedraogo, A. Gomna, K. F. Yibokou, K. E. N'Tsoukpoe. Conception, construction et test d'un héliostat piédestal de faible technicité pour une microcentrale solaire à concentration : Cas de CSP4Africa. 5^{ème} Congrès de la Société Ouest-Africaine de Physique, Bamako – Mali, 18–22 décembre 2023.

M. Maiga, K.E. N'Tsoukpoe, A. Gomna. Optimisation de la poursuite solaire d'un héliostat multifacette : Cas de CSP4Africa. Colloque International en Hommage au Professeur Jean Koulidiati, Ouagadougou – Burkina Faso, 31 juillet–2 août 2023.

M. Maiga, K.E. N'Tsoukpoe, A. Gomna. Diagnostic et correction des sources d'erreur de suivi solaire d'un héliostat multifacette : Cas de CSP4Africa. 2^{ème} symposium de la Société de Physique du Sénégal (SPS 2023), Thiès – Sénégal, 16–17 juin 2023.

M. Maiga, K.E. N'Tsoukpoe, A. Gomna. Diagnostic et correction des sources d'erreur de suivi solaire d'un héliostat multifacette : Cas de CSP4Africa. 10^{ème} édition des doctoriales internationales de l'Institut 2iE, Ouagadougou – Burkina Faso, 14–15 décembre 2022.

▪ **G.4. Listes des prix scientifiques**

1^{er} prix du concours « ma thèse en 180 secondes », 9^{ème} édition des doctoriales internationales de l'Institut 2iE, Ouagadougou – Burkina Faso, 13–14 décembre 2021.

2^{ème} prix du jury et prix du public, 4^{ième} édition du concours national « ma thèse en 180 secondes », Agence universitaire de la francophonie, Bobo Dioulasso – Burkina Faso, 30 juin 2022.