



**HAL**  
open science

# Méthode optique hybride pour la caractérisation d'un champ d'héliostats dans une installation solaire à concentration

Pierre-Henri Defieux

► **To cite this version:**

Pierre-Henri Defieux. Méthode optique hybride pour la caractérisation d'un champ d'héliostats dans une installation solaire à concentration. Thermique [physics.class-ph]. Université de Perpignan, 2021. Français. NNT : 2021PERP0014 . tel-03346834

**HAL Id: tel-03346834**

**<https://theses.hal.science/tel-03346834>**

Submitted on 16 Sep 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# THÈSE

Pour obtenir le grade de  
**Docteur**

Délivré par  
**UNIVERSITE DE PERPIGNAN VIA DOMITIA**

Préparée au sein de l'école doctorale  
**Énergie et Environnement ED 305**

Et de l'unité de recherche  
**PROMES-CNRS UPR 8521**

Spécialité :  
**Physique**

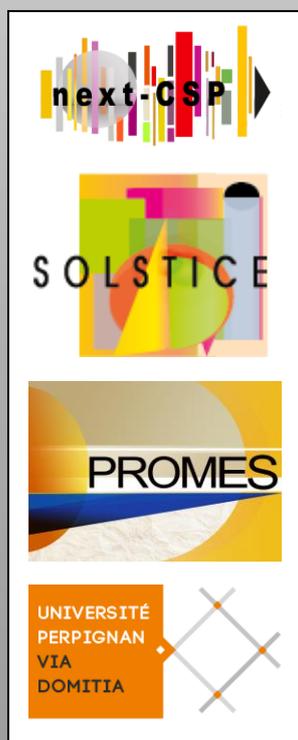
Présentée par  
**Pierre-Henri Defieux**

**Méthode optique hybride pour la  
caractérisation d'un champ d'héliostats dans  
une installation solaire à concentration.**

Soutenue le **25/06/2021** devant le jury composé de

M. Cyril CALIOT, CR, LMAP, Pau  
M. Gilles FLAMANT, DR, PROMES-CNRS, Odeillo  
M. François GOUDAIL, Pr, IOGS, Palaiseau  
M. François HENAULT, IR, IPAG, Grenoble  
M. Thierry LEPINE, MCF, IOGS, Palaiseau  
M. Jérôme PRIMOT, DR, ONERA, Châtillon  
M. Yvan SORTAIS, Pr, IOGS, Palaiseau

Directeur de thèse  
Examineur  
Examineur  
Co-directeur de thèse  
Examineur  
Rapporteur  
Rapporteur



« Faut arrêter ces conneries de nord et de sud ! Une fois pour toutes, le nord, suivant comment on est tourné, ça change tout ! »

*Franck Pitiot alias Perceval, Kaamelott, Livre I, Ambidextrie, écrit par Alexandre Astier.*

## Table des matières

Contexte et introduction .....	9
I. Etat de l'art .....	13
I.1. Méthodes optiques de caractérisation des héliostats dans les installations solaires.....	13
I.1.1. Méthodes optiques et laser .....	13
I.1.2. Utilisation de la réflexion du tube absorbeur pour la reconstruction des défauts.....	15
I.1.3. Techniques de photogrammétrie.....	18
I.1.4. Technique de déflectométrie .....	19
I.2. Méthodes de suivi solaire des concentrateurs .....	23
I.2.1. Méthodes de suivi au Four Solaire d'Odeillo.....	23
I.2.2. Méthode de re-calibration rapide eSolar .....	24
I.2.3. Caméras intégrées à un système en boucle fermée .....	25
I.3. Introduction de la méthode de rétro-visée.....	26
I.3.1. Senseurs de front d'onde .....	26
I.3.2. Méthode SCCAN .....	27
I.3.3. Capteur de champ solaire assigné à système en boucle fermée .....	29
I.3.4. Synthèse .....	31
I.3.5. Première méthode de rétro-visée.....	32
I.4. Etude précédente de la méthode de rétro-visée à quatre caméras .....	34
I.4.1. Etablissement des bases théoriques de la méthode de rétro-visée à quatre caméras	34
I.4.2. Résultats numériques obtenus avec la méthode de rétro-visée à quatre caméras .....	35
I.4.3. Développement expérimental de la méthode de rétro-visée à quatre caméras.....	37
I.4.4. Résultats de la reconstruction des pentes par la méthode analytique, puis par la méthode de rétro-visée à quatre caméras appliquée aux images expérimentales.....	41
I.5. Positionnement et finalité de la présente étude .....	44
II. Méthode de rétro-visée à quatre caméras optimisée .....	47
II.1. Rappel sur le processus de reconstruction de la méthode de rétro-visée à quatre caméras et les premières modifications apportées.....	47
II.1.1. Géométrie et conventions.....	47
II.1.2. Rappel de la théorie de la méthode de rétro-visée à quatre caméras initiale.....	48
II.1.3. Préparation des images brutes au processus de reconstruction des pentes de la méthode de rétro-visée à quatre caméras.....	51
II.1.4. Processus de reconstruction de la méthode de rétro-visée à quatre caméras avant l'étude	55
II.1.5. Première amélioration apportée au calcul de reconstruction des pentes de la méthode de rétro-visée à quatre caméras .....	57

II.2.	Préparation des images brutes au processus de reconstruction des pentes de la méthode optimisée de rétro-visée à quatre caméras .....	58
II.3.	Processus de reconstruction optimisé de la méthode de rétro-visée à quatre caméras .....	63
II.3.1.	Processus de tracé de rayon inverse et de reconstruction .....	63
II.3.2.	Evaluation de la méthode avec le logiciel COSAC .....	65
III.	Etude expérimentale de la méthode de rétro-visée à quatre caméras .....	70
III.1.	Environnement expérimental des campagnes de mesures et préparation du matériel .....	70
III.1.1.	Centrale de Thémis et conditions expérimentales.....	70
III.1.2.	L'héliostat CETHEL III E06 .....	72
III.1.3.	Le matériel expérimental et le logiciel d'acquisition.....	73
III.1.4.	La calibration des caméras et des filtres optiques .....	78
III.1.5.	Les modes d'acquisition des images .....	79
III.2.	Campagnes de mesures et protocoles expérimentaux.....	80
III.2.1.	Protocole de mesure des différentes méthodes.....	80
III.2.2.	Protocole d'évaluation des méthodes .....	81
IV.	Etude de la méthode de reconstruction optimisée de rétro-visée à quatre caméras appliquée au traitement expérimental .....	84
IV.1.	Le profil du Soleil réel .....	84
IV.2.	Le processus de reconstruction des pentes de surface .....	86
IV.3.	Les résultats issus des campagnes expérimentales .....	87
IV.4.	Les améliorations à apporter à la méthode de rétro-visée à quatre caméras.....	97
IV.5.	Synthèse des apports de la méthode optimisée de rétro-visée à quatre caméras à la méthode de rétro-visée à quatre caméras.....	98
V.	Méthodes de rétro-visée à une caméra (de rétro-visée à une caméra par mesures successives et de rétro-visée à une caméra par mesure unique).....	99
V.1.	Pertinence et principe des méthodes de rétro-visée à une caméra .....	99
V.1.1.	Intérêt des méthodes de rétro-visée à une caméra.....	99
V.1.2.	Géométrie et conventions.....	100
V.2.	Méthode de rétro-visée à une caméra par mesures successives .....	102
V.2.1.	Principe de la méthode de rétro-visée à une caméra par mesures successives.....	102
V.2.2.	Etude numérique de la méthode de rétro-visée à une caméra par mesures successives	103
V.3.	Méthode de rétro-visée à une caméra par mesure unique .....	112
V.3.1.	Principe de la méthode de rétro-visée à une caméra par mesure unique.....	112
V.3.2.	Modèle de la méthode de rétro-visée à une caméra par mesure unique .....	112
V.3.3.	Etude numérique de la méthode de rétro-visée à une caméra par mesure unique ..	119

VI. Etude de la méthode de rétro-visé à une caméra de rétro-visée à une caméra par mesure unique appliquée à des images expérimentales .....	131
VI.1. Contexte expérimental.....	131
VI.2. Prétraitement des images expérimentales et contraintes liées au matériel .....	131
VI.3. Reconstruction des pentes de la méthode de rétro-visée à une caméra par mesure unique appliquée aux images expérimentales.....	134
VI.3.1. Reconstruction des pentes par module avec une réflectivité uniforme de 0.85.....	135
VI.4. Interprétations des résultats et identifications des sources d'erreur.....	155
VI.5. Améliorations envisageables de la méthode expérimentale et de son post-traitement ...	157
Conclusions et perspectives .....	159
Financement et remerciements .....	161
Annexe A : Aberration optique : Tilt.....	162
Annexe B : Documentation de l'objectif et du modèle de caméra utilisés.....	163
Annexe C : Courbes de transmission des filtres réfléchissants .....	167
Annexe D : Calculs vectoriels pour connaître l'orientation idéale de l'héliostat .....	168
Annexe E : Calculs des matrices de passage.....	169
Glossaire .....	170
Bibliographie.....	171

# Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier toutes les personnes ayant participé ou contribué à la réalisation de ce travail doctoral. Attention, le verbe « remercier » conjugué à la première personne est sur le point d'être utilisé de façon excessive.

J'adresse tout particulièrement ces remerciements à Cyril Caliot et François Hénault, sans qui ces travaux n'auraient pas vu le jour et qui m'ont co-encadrés. J'éprouve une profonde gratitude pour la confiance qu'ils m'ont accordé dans la réalisation de ce travail et pour l'aide qu'ils m'ont apporté, ce malgré la distance qui nous a séparés. Leur expérience du domaine scientifique m'a été d'une aide considérable pour avancer malgré les difficultés inhérentes à un projet de recherche et pour acquérir la rigueur nécessaire à l'aboutissement d'un travail de recherche. Ils sont et seront pour moi des modèles de rectitude, de curiosité et de collaboration scientifique. J'éprouve également une sincère gratitude vis-à-vis de mon directeur pour la ténacité et l'esprit de cohésion qu'il m'a inculqués durant ces trois années.

Je suis très reconnaissant envers Mathieu Coquand, actuellement docteur et ayant effectué ses travaux de thèse antérieurement aux miens, pour m'avoir instruit et épaulé sur les principaux aspects et problématiques de ce type de sujet durant les premiers mois. Sa présence a été l'opportunité de commencer l'étude avec une aide scientifique déterminante, afin de me plonger au cœur du sujet plus rapidement. J'ai passé de très bons moments d'échange et rires symptomatiques de craquages, comme il en faut pour que le travail reste globalement sérieux. Je le remercie beaucoup et espère qu'il ne m'en veut pas trop pour la sortie de route verglacée, chose que j'évoquerai par la suite.

Je pense également à Emmanuel Guillot, ingénieur de recherche au laboratoire PROMES-CNRS et nouvellement membre de la direction, tout d'abord pour la mise à disposition du matériel nécessaire au travail de thèse. Également, son aide technique m'a permis d'améliorer le dispositif d'acquisition et d'augmenter mes connaissances dans ce domaine. Ceci m'a permis une meilleure prise en main du matériel d'acquisition, chère au travail expérimental. De plus, je tiens à le remercier pour son aide et son écoute concernant les problématiques scientifiques soulevées dans ces travaux. Les discussions que nous avons eu ont souvent été riches de remises en question et le recul me permet de constater qu'elles apportent souvent beaucoup de clarté sur les difficultés rencontrées. Je tiens enfin à le remercier pour le soutien moral dont il a fait preuve lorsqu'il passait dans mon bureau demander des nouvelles, ou peut-être pour vérifier mon état mental. Je remercie Gilles Flamant, directeur du projet Next-CSP dans lequel est inscrite cette thèse, pour avoir présenté mon sujet à SolarPACES 2019 et également pour sa sympathie. Je remercie la direction du laboratoire, notamment Alain Dollet, pour avoir contribué à une meilleure communication entre les doctorants et l'école doctorale ED 305. Je remercie Nicolas Boulet, pour les discussions passionnées autour de l'aviation et de la météorologie ainsi que pour le rhum arrangé à la verveine, Jean-Louis Sans pour son humour et son aide. Je remercie Pépita, Aurore Thierry, Christelle Ferrière et Samia pour leur contribution, leur efficacité et leur sympathie. Je remercie Naoul Autones pour son efficacité, son soutien et sa gentillesse. Je remercie Laurent Lestrade et Georges Pichelin du service informatique

pour leur aide précieuse. Je remercie Alexis Vossier pour sa sympathie et son humour. Je remercie Roger Garcia pour sa collaboration, sa compagnie fort sympathique et son goût pour la fête. Je remercie sincèrement Lucile Barka de m'avoir accueilli au laboratoire le premier jour de mon arrivée et de m'avoir fait découvrir les environs. Sa compagnie ainsi que celle de Joya, Hélène et Srirat ont été très agréable et je les en remercie.

Les expérimentations à la centrale Thémis m'ont permis de connaître William Baltus, dont les compétences, le sérieux et la disponibilité ont été précieux tout au long de cette thèse. Je remercie Antoine Perez, Alex Le Gal, Benjamin Grange et Yann Volut pour m'avoir accueilli dans les installations de Targassonne. Je remercie encore Yann à qui j'ai pu faire part de certaines problématiques techniques et qui a pris de son temps pour moi. Je remercie William pour avoir réparé ma voiture après que celle-ci ait percuté un mur de neige, dans des circonstances très sombres... mais surtout verglacées. Je remercie Benjamin et Anastasiya Badziaka pour l'amitié et le soutien moral qu'ils ont été et resteront je l'espère. Je ne suis pas reconnaissant envers Benjamin pour m'avoir battu beaucoup trop facilement au squash ainsi qu'au badminton, mais j'admire son jeu au tennis. Je remercie les stagiaires, masters, doctorants et autres éphémères du Four pour tout ce qu'ils m'ont apporté en termes de beuveries, de sport, de randonnées et surtout de beuveries. Je pense à Thomas Fasquelle. Je pense à Charlène, Ségolène et Dounia pour les fameux PER toujours à la hauteur de leur réputation, et pour les moments de craquages psychologiques, voire psychiatriques à la fin des grosses journées, à la fois libérateurs et dérangeants. Je pense à Timothée dont la compagnie est également délicieuse et à Guillaume que je compte bientôt amicalement écraser au badminton. Je pense à Anita, arrivée en même temps que moi au laboratoire, avec qui j'ai partagé cette aventure doctorale indélébile et dont l'humour est des plus subtiles, ou presque. Je pense à Plume, charmant hémiptère qui est devenu la mascotte de notre bureau, et que l'on appelle plus communément une punaise. Je pense à Damien, compagnon de musique avec Christophe Pons, et ami. Je pense à Alex Carling que j'apprécie. Je pense à Brice Nicolau et Antoine Sareva qui ont été des compagnons de beuveries et de sport. Je remercie tout le personnel d'une manière générale, et je tiens à souligner le soutien et la sympathie d'Olivier Berthelot que j'apprécie sincèrement. Je pense à Eric Beche pour sa sympathie et ses blagues, à Sylvie pour avoir pris soin de nos bureaux et pour son amour des animaux (surtout des chats) que je partage. Je pense également à Didier Dessors pour le plaisir de partager des blagues, à Jean-Marc Perrin qui est notre gardien à tous, à Michaël Tessonnaud pour sa sympathie et pour son aide lors de l'inauguration des 50 ans du Four Solaire, tout comme Jean-Yves Peroy pour la conception du lit fluidisé, Christophe Escape pour sa bienveillance et sa motivation pour transmettre l'envie de faire de la recherche scientifique durant cet événement. Je remercie les nouvelles personnes arrivées au Four pour leur sympathie, leur cuisine et leur goût pour la danse. J'ai une pensée pour Ayman, qui était à Perpignan et nous a quitté bien tôt.

Je remercie Didier Rives et Jean-Pascal Pernel pour m'avoir accueilli et surtout servi des repas délicieux comme généreux. Ce fut un privilège de manger à leurs tables et de goûter les nouveautés qu'ils proposent, notamment pour les végétariens, afin de s'adapter au régime de chacun. Je remercie Laurent-Georges Thomas pour son accueil et également les membres du CAES pour tous les événements qu'ils ont organisés au laboratoire et qui participent de l'esprit chaleureux tant apprécié. Je remercie mes amis pour leurs encouragements. Je tiens à remercier Jean-Christophe Delagnes, qui m'a soutenu et motivé pendant des moments difficiles. Je remercie Maxime et Kosana. Je remercie Thomas pour son soutien permanent et pour être venu me voir, et également Dorsaf. Je remercie ma famille qui m'a soutenu dans les moments difficiles et que j'embrasse, notamment mon chat qui me sera toujours fidèle, j'en suis certain.



## Contexte et introduction

Dans le contexte de la transition énergétique et du réchauffement climatique, le développement des technologies appliquées aux énergies renouvelables est nécessaire pour assurer la production d'énergie actuelle et future. Tel que montré dans l'article de Donella et Dennis [1], les sources d'énergie fossile, qui sont très majoritairement utilisées depuis plus d'un siècle, ont montré leurs limites en termes de durabilité, notamment à cause des limites en ressources et des conséquences environnementales qui leurs sont associées. Les premières conséquences du réchauffement climatique ainsi que son accélération poussent les sociétés industrialisées à développer de nouvelles méthodes de conversion d'énergie, qui se doivent de réduire l'impact écologique. Le domaine des énergies renouvelables, qui rassemble l'énergie utile convertie à partir de l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, de la biomasse et enfin de la géothermie, est en plein essor. Le développement des technologies liées à l'énergie solaire a notamment connu une augmentation depuis ces dernières décennies. Les centrales solaires à concentration comptent parmi les solutions les plus pertinentes pour produire de l'électricité à partir du rayonnement solaire direct.

Les centrales thermodynamiques convertissent l'énergie solaire en énergie électrique, en passant par l'énergie thermique et mécanique. Ainsi, l'objectif d'un tel dispositif est de concentrer le rayonnement solaire sur un récepteur contenant un fluide à chauffer. Ce dernier est utilisé pour chauffer un circuit d'eau connecté à une turbine et une génératrice, et également pour alimenter un dispositif de stockage thermique, nécessaire à une production électrique indépendante des conditions météorologiques et prolongée de plusieurs heures après le coucher du Soleil. Dans une centrale à tour, cette dernière contient le récepteur et la concentration du rayonnement solaire s'effectue grâce à un champ d'héliostats (cf. FIGURE 0-1). Ces derniers consistent en des structures orientables selon la position du Soleil, regroupant généralement plusieurs miroirs réfléchissants et dont la disposition et la courbure permettent de concentrer le rayonnement vers le récepteur de la tour. L'étape de collection et de concentration du rayonnement direct définit la quantité d'énergie brute que la centrale cherchera à convertir. La maîtrise du suivi solaire des héliostats, le contrôle de leur état de surface ainsi que de l'alignement et de la courbure de leurs miroirs sont nécessaires pour maximiser la collection d'énergie brute et la concentration solaire, desquelles dépend directement la production d'énergie électrique ou le stockage thermique.

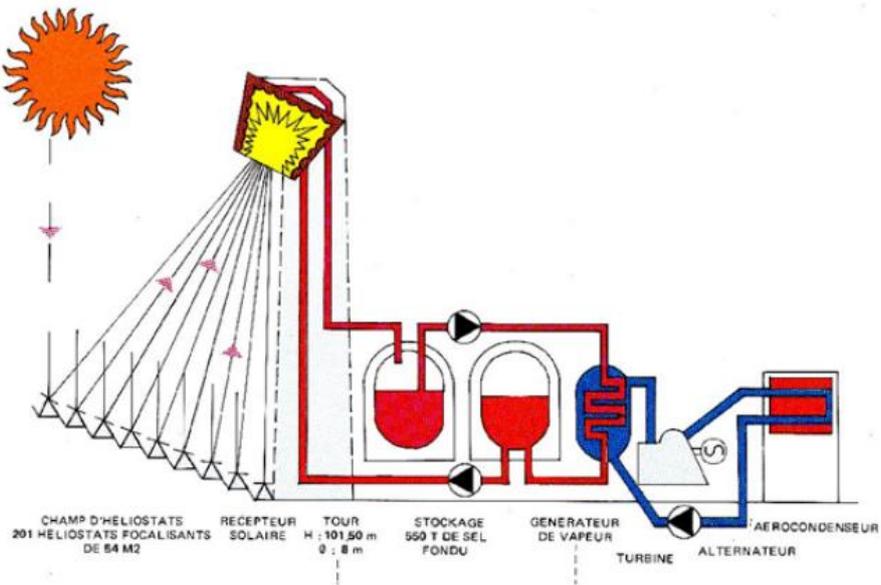


FIGURE 0-1 : Issue de [53] : Schéma du principe de fonctionnement d'une centrale solaire thermodynamique.

Le développement des centrales solaires à concentration a connu une accélération particulièrement liée à l'augmentation du cours du pétrole dans les années quatre-vingt. L'Espagne, qui aujourd'hui compte parmi les plus gros producteurs d'électricité issue de l'énergie solaire concentrée -avec notamment les Etats-Unis-, a été le lieu privilégié de l'avènement des centrales solaires thermodynamiques. Des centrales de types divers, tels que les centrales à miroirs de Fresnel, les centrales à concentrateurs cylindro-paraboliques et les centrales à tour, ont également émergé dans d'autres pays depuis ces dernières décennies. En France, une installation a notamment été réalisée pour la recherche scientifique. Il s'agit du Grand Four Solaire d'Odeillo (cf. FIGURE 0-2), situé en Cerdagne et inauguré en 1969. La centrale à tour Thémis, également située en Cerdagne, constitue une plateforme d'expérimentations scientifiques majeure dans la recherche française liée à l'énergie solaire (cf. FIGURE 0-3).



FIGURE 0-2 : Grand Four Solaire d'Odeillo (France).

Comme l'expérience a pu le montrer, la mise en place et le réglage des systèmes optiques de tels dispositifs demande beaucoup de temps. La durée nécessaire au réglage des 11340 facettes de la grande parabole du Grand Four Solaire a par exemple pris plus de deux ans et demi. D'un point de vue industriel, ce délai n'est pas envisageable car trop important. Le développement de tels technologies soulève donc la problématique du réglage des éléments optiques des centrales solaires à concentration. L'objectif est de disposer de méthodes de contrôle et de réglage des éléments optiques, afin de garantir leur bon fonctionnement.



FIGURE 0-3 : Centrale à tour Thémis de Targassonne (France).

Dans cette étude, une attention particulière est portée aux méthodes de caractérisation des héliostats de centrales thermodynamiques à tour. Ces dispositifs sont susceptibles de subir des altérations en termes de réflectivité et de concentration solaire, notamment à cause de leur propre masse et des conditions météorologiques. En considérant des durées de plusieurs mois à plusieurs années, la structure portante d'un héliostat peut subir une déformation due à sa masse et ainsi altérer le facteur de concentration global. Les phénomènes météorologiques tels que le vent qui peut déformer la structure ou désaligner des miroirs, la grêle qui peut les briser et la poussière qui peut altérer leur réflectivité, ont également un impact non négligeable sur le bon fonctionnement d'un champ d'héliostats. Une étude antérieure [53], réalisée par M. Coquand sous la direction de C. Caliot et la codirection de F. Hénault, avait permis de développer une nouvelle méthode optique de caractérisation des héliostats, décrite auparavant dans un brevet [42] déposé en 2014 par F. Hénault et C. Caliot pour le CNRS. Ces travaux relativement récents font référence à des études antérieures [41] réalisées au laboratoire PROMES-CNRS entre 1983 et 1987 par F. Hénault sous la direction de C. Royère.

Dans ce manuscrit, le travail qui a été réalisé est divisé en sept parties. Tout d'abord, l'état de l'art concernant les méthodes de caractérisation, de calibration et de réglage optique des concentrateurs solaires est présenté. Un second chapitre porte sur les bases théoriques, ainsi que sur l'optimisation numérique de la méthode de rétro-visée à quatre caméras développée dans l'étude

précédente. Cette partie comporte des résultats de simulations diverses permettant de valider partiellement cette méthode. Dans la troisième partie de ce manuscrit, l'attention est portée sur l'étude expérimentale de la méthode de rétro-visée à quatre caméras. Après un rappel nécessaire à la compréhension du dispositif d'acquisition, les modifications qui lui ont été apportées, ainsi qu'au protocole de mesure expérimental, sont explicités. La quatrième partie relate de la méthode de reconstruction optimisée associée à la méthode de rétro-visée à quatre caméras et appliquée à des images expérimentales, afin d'évaluer la capacité de cette méthode à détecter les défauts de pentes à partir d'images réelles. Pour ce faire, les améliorations apportées aux programmes de post-traitement des données sont explicitées. Les résultats issus des campagnes de mesures effectuées à la centrale à tour de Thémis (Targassonne) sont exposés et interprétés. Le cinquième chapitre concerne le développement et l'étude de deux nouvelles méthodes de rétro-visée n'utilisant qu'une seule caméra. Y sont exposés les modèles, ainsi que les résultats de simulations. Les optimisations apportées aux programmes de reconstruction des pentes de surface optique y sont également présentées. La sixième partie expose les résultats expérimentaux issus de l'application d'une des deux méthodes de rétro-visée à une caméra à des images réelles réalisées à la centrale Thémis. Le protocole expérimental ainsi que les traitements numériques permettant d'obtenir les résultats y sont évoqués. Les résultats sont interprétés, les différentes sources d'erreur identifiées sont explicitées et des solutions sont proposées. La septième et dernière partie traite des conclusions sur les travaux réalisés durant l'étude ainsi que des perspectives.

# Chapitre Premier

## I. Etat de l'art

Dans ce chapitre, nous évoquons les méthodes de caractérisation in situ existantes ainsi que les méthodes de suivi solaire utilisées dans les centrales à concentration. Nous introduirons les méthodes de rétro-visée et finalement la méthode de rétro-visée à quatre caméras développée dans l'étude précédente.

### I.1. Méthodes optiques de caractérisation des héliostats dans les installations solaires

#### I.1.1. Méthodes optiques et laser

Les méthodes de caractérisation optique des surfaces datent des années soixante-dix avec notamment celle de Smolka et Caudell [2]. Celle-ci consiste à utiliser la technologie laser afin de détecter des différences locales de phase entre la réflexion d'un laser et celle d'un rayon de référence. Cette méthode permet d'obtenir des résultats dont la précision est de l'ordre du micromètre, mais sa procédure d'acquisition n'a pas été pensée pour des procédures en extérieur. De ce fait, elle ne correspond pas aux attentes d'une application à une centrale solaire à concentration. En 1991, une autre méthode, également basée sur la technologie laser, a été développée dans le but d'être appliquée au solaire. Appelée méthode SHOT (Scanning Hartmann Optical Test) [3], elle permet de caractériser les concentrateurs de grande ouverture et monolithiques. Une seconde méthode, directement issue de la méthode SHOT et appelée VSHOT (Video Scanning Hartmann Optical Test), a été développée en 1996 [4] afin de caractériser les concentrateurs cylindro-paraboliques. La FIGURE I-1 illustre le procédé utilisé dans le cadre de la méthode.

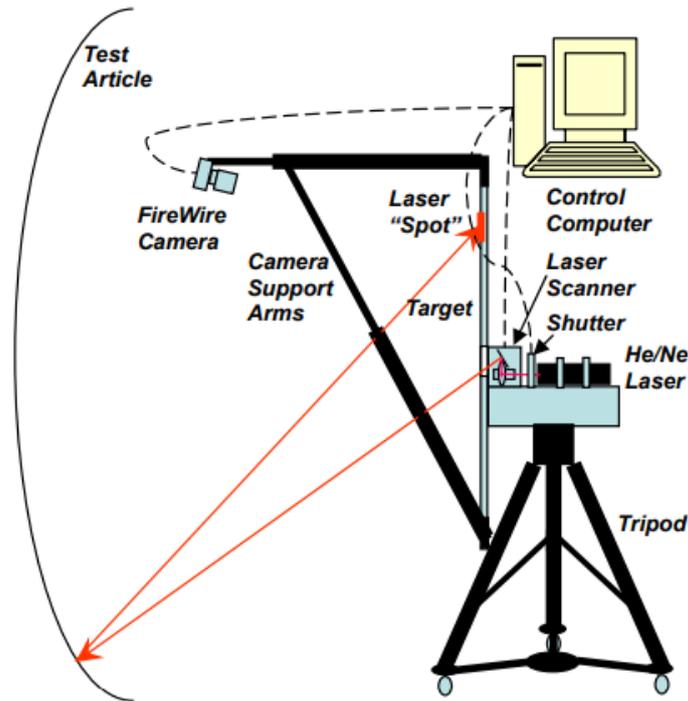


FIGURE I-1: Matériel utilisé pour les acquisitions de la méthode [6].

Dans cette méthode, la réflexion d'un laser est observée sur une cible par une caméra et sa position par rapport à la théorie permet de reconstruire localement la pente du concentrateur. Ce processus est répété pour une série de points afin de reconstruire la pente de la surface optique totale. Afin de garantir le bon fonctionnement de la méthode, le laser doit être placé à une distance environ égale au rayon de courbure du concentrateur par rapport au miroir à caractériser. Cette donnée rend incompatible l'usage de cette méthode sur des héliostats ayant des rayons de courbure de plus de 200 mètres. L'incertitude de la mesure issue de la méthode VSHOT a été estimée à environ 0.10 mrad en 1997 [7]. Selon une étude effectuée par Gray et al. en 2010 [8], la précision de la méthode dépend de l'inclinaison du laser et n'est donc pas répartie de façon uniforme sur la surface du miroir. Ainsi, l'erreur peut varier de 0.2 à 0.45 mrad. La FIGURE I-2 montre la variation de l'erreur en fonction de l'angle du laser.

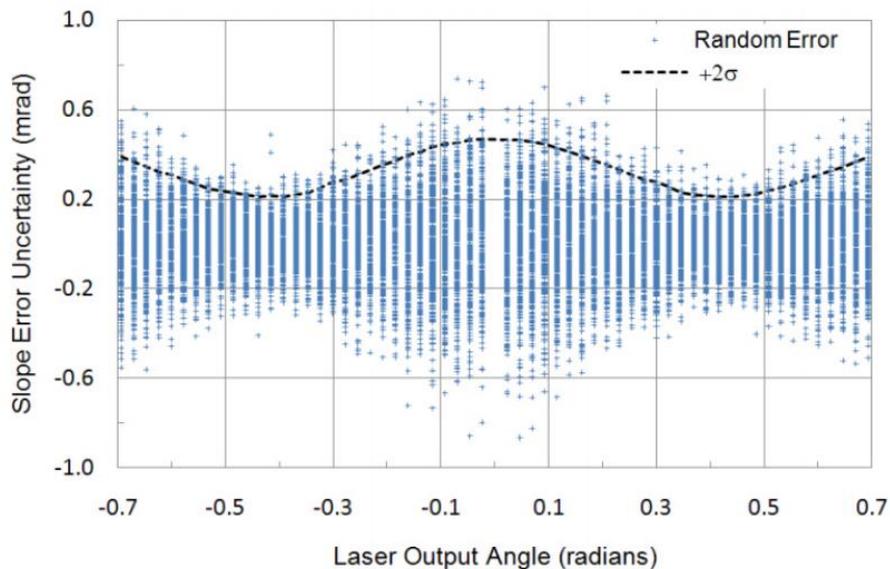


FIGURE I-2: Issue du [53] : Estimation de l'erreur de pente de la méthode VSHOT en fonction de la direction du laser [8].

## I.1.2. Utilisation de la réflexion du tube absorbeur pour la reconstruction des défauts

### I.1.2.A. Méthodes TOPCAT-TOPHAT

Il existe une méthode, appelée TOPCAT (Theoretical Overlay Photographic Collector Alignment Method) [9], permettant d'ajuster les facettes des miroirs cylindro-paraboliques à l'aide de l'image de la réflexion du tube récepteur dans les facettes du concentrateur. L'image de cette réflexion est comparée à une carte de réflexion théorique, ce pour plusieurs points de vue. L'avantage d'un tel procédé est que le résultat des réglages des facettes est visible en temps réel, ce qui permet une meilleure réactivité.

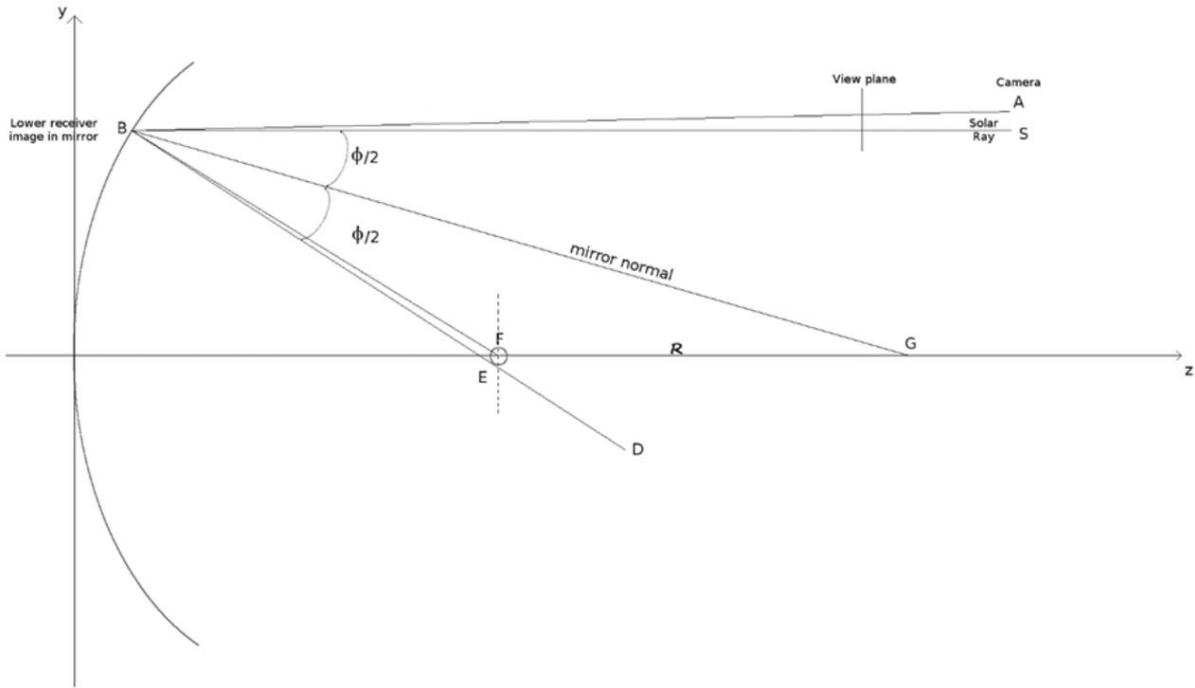


FIGURE I-3: Issue du [53] : Illustration du principe de la méthode.

Le développement théorique de cette méthode est illustré par la FIGURE I-3. Un concentrateur cylindro-parabolique  $y$  est représenté en vue en coupe et le système est considéré comme invariant selon l'axe  $X$ , correspondant à l'axe du tube récepteur. En considérant un rayon provenant de l'infini et atteignant la surface du miroir au point  $B$ , le vecteur normal  $\overrightarrow{BG}$  au miroir à ce point doit coïncider avec la bissectrice de l'angle  $\widehat{SBF}$  et les distances  $FG$  et  $BF$  sont égales. Sachant que ce raisonnement est vrai pour tous les points  $B$  appartenant à la parabole, il est possible de reconstruire la position théorique de la réflexion du tube récepteur dans le miroir, vue à partir d'une caméra placée au point  $A$ . La position du bord inférieur de l'image du récepteur  $\overrightarrow{BD}$  peut-être calculée en tenant compte du vecteur incident  $\overrightarrow{BA}$ , du vecteur normal  $\overrightarrow{BG}$  et du fait que les normes des vecteurs  $\overrightarrow{BA}$  et  $\overrightarrow{BG}$  sont égales :

$$\overrightarrow{BD} = 2 \frac{\overrightarrow{BA} \cdot \overrightarrow{BG}}{\overrightarrow{BG} \cdot \overrightarrow{BG}} \overrightarrow{BG} - \overrightarrow{BA} \quad (1)$$

Les coordonnées du vecteur normal  $\overrightarrow{BG}$  peuvent être calculées en utilisant les équations de la parabole, et celles du point  $E$ , où le vecteur  $\overrightarrow{BD}$  coupe le collecteur, sont obtenues en trouvant la coordonnée en  $Y$  du vecteur  $\overrightarrow{BD}$  :

$$E_Y = B_Y + M(D_Y - B_Y) \quad (2)$$

où  $M$  le facteur d'échelle entre  $\overline{BE}$  et  $\overline{BD}$  s'exprime  $M = \frac{E_z - B_z}{D_z - B_z}$ .

Ces expressions ne permettant pas d'obtenir directement les coordonnées d'un point  $B$  sur le miroir tel que le rayon  $\overline{BD}$  soit tangent au récepteur, il faut utiliser une méthode itérative afin de converger vers la solution [9]. La FIGURE I-4 illustre le dispositif d'alignement utilisé pour les mesures de la méthode TOPCAT.

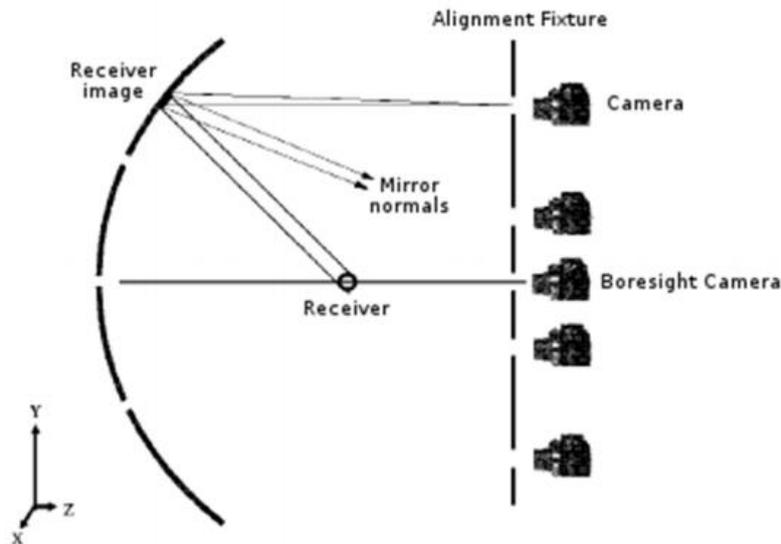


FIGURE I-4 : Schéma du dispositif d'alignement [9].

Le dispositif comporte une caméra pour chaque module du concentrateur, lui-même étant placé en position horizontale. Il y a une caméra supplémentaire utilisée pour aligner le dispositif correctement. Chaque caméra doit être en mesure de voir la réflexion complète du tube dans la facette qu'elle observe. Pour ce faire, il faut respecter une certaine distance entre le dispositif et le concentrateur. Toutes les facettes peuvent ensuite être réalignées manuellement grâce aux images provenant des caméras et des images supplémentaires peuvent être capturées pour corriger l'alignement. Cela permet au système de fonctionner en boucle fermée. Cette méthode a pu être testée en Californie, notamment sur les boucles LS-3 des centrales cylindro-paraboliques SEGS VIII et XI [10] pour lesquelles les mesures ont été réalisées à la chaîne avant de pouvoir effectuer les réglages. La FIGURE I-5 montre le dispositif fixé sur un véhicule afin de gagner en rapidité. Ainsi, les opérateurs mettent 45 minutes pour effectuer les mesures sur chaque boucle, tant que la vitesse du vent n'excède pas les 40 km/h. Une augmentation de la température de 3°C a été observée en sortie de boucle, ce qui correspond à une amélioration de 3.5%.



FIGURE I-5: Dispositif de mesure positionné sur un véhicule [10].

Aux vues des résultats concluants obtenus pour des concentrateurs de centrales cylindro-paraboliques, la méthode TOPCAT a par la suite été adaptée aux champs d'héliostats de centrales à tour [11]. La FIGURE I-6 montre le dispositif d'alignement adapté aux champs d'héliostats.



FIGURE I-6: Cible mobile utilisée lors des mesures [12].

L'application de la méthode TOPHAT nécessite de disposer d'une cible dont les dimensions sont environ égales à celles de l'héliostat à mesurer. Cinq caméras sont placées sur la cible, qui fait face à l'héliostat lors des mesures. La réflexion du récepteur de la centrale à tour ne peut être utilisée pendant les acquisitions, c'est pourquoi les neuf cibles placées sur le dispositif mobile sont utilisées et leurs positions théoriques calculées selon le même principe que la méthode TOPCAT. L'alignement des facettes est corrigé jusqu'à l'obtention d'une image mesurée qui correspond à l'image théorique. Cette méthode risque cependant d'être très longue dans le cas du réglage d'un champ d'héliostats qui en comporte plusieurs centaines. L'accessibilité des héliostats est également

une source potentielle de problèmes. A ce jour, aucune information quant à la fiabilité de cette méthode de mesure n'a été trouvée.

### 1.1.2.B. Méthodes TARMES et QFly

Une autre méthode utilise également le tube absorbeur comme objet, tel que le fait la méthode TOPCAT. C'est la méthode TARMES (Trough Absorber Reflection Measurement System) [13] qui consiste à placer une caméra sur un trépied à environ cent fois la distance focale du concentrateur au voisinage de l'axe optique. La FIGURE I-7 illustre le principe cette méthode.

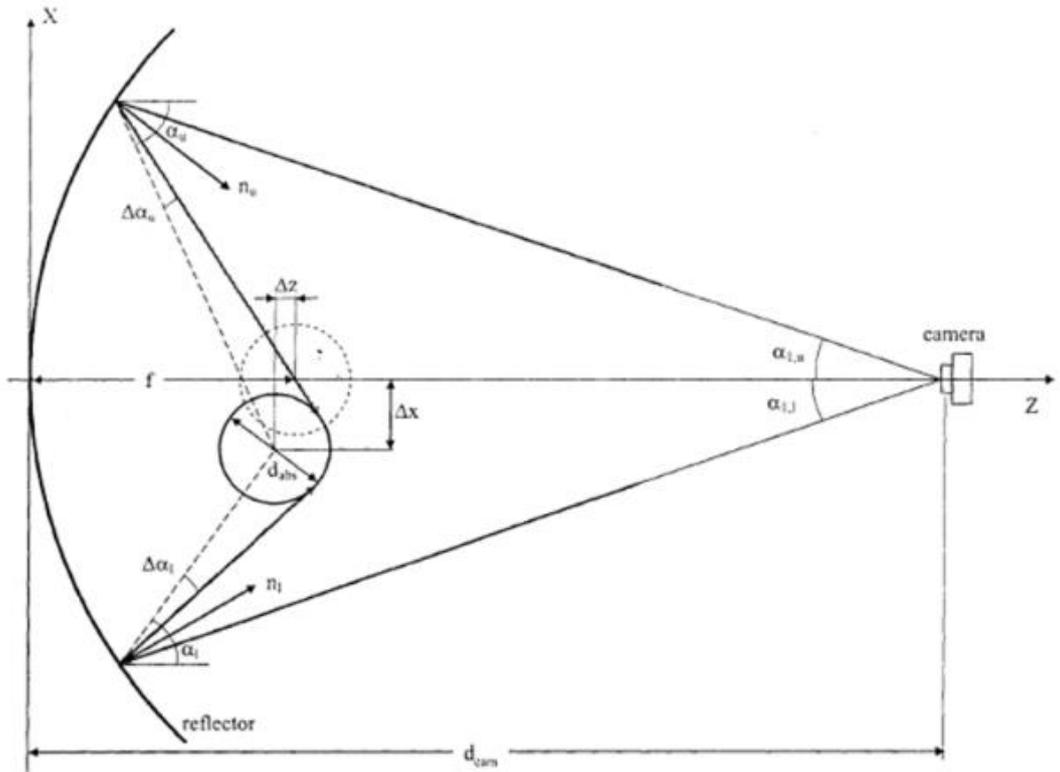


FIGURE I-7 : Géométrie et éléments en jeu dans le processus de tracé de rayon de la méthode TARMES [13].

Le tube absorbeur est légèrement tilté de sa position initiale afin de capturer des images du concentrateur avec plusieurs orientations, et ce depuis plusieurs points de vue. L'image de la réflexion du tube absorbeur par le concentrateur est considérée comme provenant de l'infini. Les pentes sont reconstruites grâce aux images acquises et leur précision est estimée à  $\pm 1 \text{ mrad}$ . Le déplacement du tube récepteur étant peu commode, une méthode appelée QFly et utilisant une caméra aéroportée a été mise en place [14]. Dans cette nouvelle méthode, un drone transportant la caméra survole le concentrateur en position verticale, de manière à prendre des images selon différents angles de vue. Une des limites de cette méthode est la vitesse du vent qui ne doit pas dépasser  $6 \text{ m/s}$ . Cependant, la précision obtenue avec ce type de méthode avoisine le dixième de  $\text{mrad}$ .

### 1.1.3. Techniques de photogrammétrie

Dans cette section, il est question de techniques de métrologie permettant de déterminer la forme d'un objet à partir d'images capturées de celui-ci. La méthode la plus conventionnelle utilisée pour réaliser ce type de reconstruction consiste à faire de la triangulation à partir des images bidimensionnelles. Ce processus, utilisé dans bien des domaines tels que la topographie ou la vision industrielle, est intéressant ici pour reconstruire la géométrie d'objets de façon précise. Appliqué à

cette fin, il est appelé photogrammétrie à bout portant, soit en anglais Close-Range Photogrammetry (CRP).

La méthode CRP est utilisée pour calculer les positions de plusieurs points appartenant à l'objet concerné. Les acquisitions sont réalisées sous forme de photographies et l'utilisation d'estimations telles que les moindres carrés est nécessaire pour calculer les coordonnées des points. Un des premiers systèmes automatisés permettant d'atteindre une précision de 1/500000 dépendante des dimensions de l'objet, a été décrite par Fraser et al. [15] en 1986. Grâce au développement de nouveaux capteurs CCD ainsi qu'à l'amélioration des algorithmes de détections d'objets, la photogrammétrie a pu atteindre et dépasser les performances des théodolites utilisés jusqu'alors en industrie [16].

Ce type de technique a pu ensuite être adapté au domaine du solaire concentré à partir de 1996. Cette année-là, Shortis et al. [17] ont décrit un moyen d'estimer la surface du « BigDish » faisant 400 m<sup>2</sup> de l'Université nationale d'Australie. Plusieurs caméras (quatre au minimum) sont utilisées pour reconstruire la surface du concentrateur et des petites cibles ont été fixées sur toute la surface du miroir. La reconstruction de la surface fait appel au principe de colinéarité et les nombres de caméras et d'images dépendent de la précision souhaitée par l'opérateur. D'autres types de concentrateurs tels que des cylindro-paraboliques ont pu être caractérisés avec cette méthode, comme montré dans [18]. Il ressort de ces mesures que la technique de photogrammétrie est une méthode fiable et précise mais demandant beaucoup de temps et d'énergie. Une version de la méthode appliquée à une centrale à tour a été décrite en 2008 par Röger et al. [19]. Cette version, testée à la plateforme solaire d'Almeria sur l'héliostat n°1500 de la centrale CESA-1, ne nécessite pas de fixer des cibles sur les surfaces optiques car les bords des héliostats sont directement utilisés comme repères. Ce procédé, ainsi que le fait de placer le dispositif de mesure dans la tour, permet de gagner un temps considérable mais provoque une forte chute de la précision de mesure à 1.6 mrad.

#### 1.1.4. Technique de déflectométrie

La déflectométrie est une méthode de caractérisation optique utilisant l'analyse de réflexion de motifs sur des surfaces spéculaires. Le plus souvent, des franges sont projetées sur un écran mais parfois une cible peut être utilisée à la place. La réflexion de ces franges par la surface spéculaire est ensuite mesurée et enregistrée par une caméra numérique. La reconstruction des pentes locales, qui utilise des processus de décalage de phase ou de traitement d'images, demande généralement de prendre deux images, l'une avec des franges horizontales et l'autre avec des franges verticales ayant la même épaisseur. La déflectométrie paraît être une méthode prometteuse en termes de résolution ainsi que de temps d'acquisition. Les principaux éléments de cette méthode sont montrés dans la FIGURE I-8.

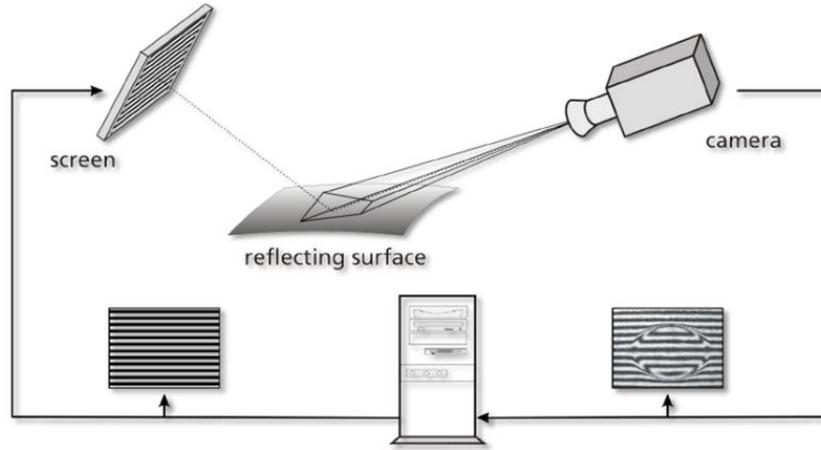


FIGURE I-8: Schéma illustrant le principe de la déflectométrie [20].

Le principe de la déflectométrie est de mesurer la réflexion de motifs projetés sur une surface spéculaire, mais plusieurs façons de les projeter existent : les franges (motifs les plus courants) peuvent être affichées ou projetées sur un écran, ou une cible avec les franges peintes ou imprimées peut également être utilisée. La différence majeure qui réside entre ces deux techniques est la plus grande facilité de changer l'orientation des franges dans le cas où elles sont projetées. Il existe deux principales méthodes d'analyse de franges qui permettent d'extraire les pentes des données mesurées : la méthode par décalage de phase basée sur le même principe que les interféromètres de Fizeau [21] et Zygo. Dans cette approche, la phase optique est considérée comme proportionnelle aux pentes de surface [22]. Le fait d'ajouter une phase connue au signal, soit de translater les franges, permet de retrouver les pentes de surface. En considérant une image de franges dont l'intensité varie de façon sinusoïdale de la forme  $a + b \cos(\varphi + \phi)$  où  $\phi$  est la phase connue et  $\varphi$  une variable. Alors il est possible, à l'aide des formules de trigonométrie usuelles, de retrouver l'expression de la variable  $\varphi$ . L'expression généralisée pour  $n$  signaux est :

$$\varphi = \arctan \left( \sqrt{3} \frac{\sum_{i=1}^n e_i \sin(i-1)\phi}{\sum_{i=1}^n e_i \cos(i-1)\phi} \right) \quad (3)$$

La principale contrainte de la méthode par translation des franges est que celle-ci doit être effectuée de façon précise et contrôlée afin de pouvoir intégrer les différents paramètres au calcul de phase. La seconde méthode évoquée ici est celle par transformée de Fourier qui demande de projeter de nombreuses franges fines pour être fiable et être en mesure de retrouver la phase du signal. Cette fois, un hypothétique signal peut être exprimé de la sorte [23][24] :

$$e(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi f_0 x + \varphi(x, y)] \quad (4)$$

où  $x$  et  $y$  sont les coordonnées dans le plan du détecteur selon deux axes perpendiculaires. Or, il est possible d'écrire :

$$e(x, y) = a(x, y) + c(x, y) \exp(2i\pi f_0 x) + c^*(x, y) \exp(-2i\pi f_0 x) \quad (5)$$

En posant que :

$$c(x, y) = \frac{1}{2} b(x, y) \exp[i\varphi(x, y)] \quad (6)$$

En appliquant la transformée de Fourier en  $x$  de l'équation (5), il est possible d'obtenir le spectre de Fourier (lettres majuscules) avec les fréquences spatiales  $f$  :

$$E(f, y) = A(f, y) + C(f - f_0, y) + C^*(f + f_0, y) \quad (7)$$

Trois maxima sont obtenus dont le plus à droite qui correspond à  $C(f - f_0, y)$  et qui peut être translaté de  $f_0$  pour obtenir  $C(f, y)$ . En appliquant la transformée de Fourier inverse il est possible de récupérer  $c(x, y)$ . Puis en faisant le logarithme complexe :

$$\log[c(x, y)] = \log\left[\frac{1}{2}\right] + i\varphi(x, y) \quad (8)$$

La partie imaginaire du second membre de l'équation est alors suffisante pour retrouver la phase du signal. Dans le domaine du solaire concentré, il existe deux applications de la déflectométrie. Il y a tout d'abord la méthode SOFAST (Sandia Optical Fringe Analysis Slope tool) qui a été conçue aux laboratoires Sandia [25] et qui permet de réaliser des mesures rapides sur les facettes de concentrateurs. Le principe de cette méthode est exposé dans la FIGURE I-9. Des franges sinusoïdales sont projetées grâce à un écran LCD et les caméras sont placées près du centre de courbure de la facette. Les franges sont déplacées trois fois afin d'obtenir quatre images au total. Ce procédé est avantageux de par le contrôle précis de l'affichage des franges. La phase  $\varphi$  est alors retrouvée en utilisant le même principe que la méthode précédente :

$$\tan[\varphi(x, y)] = \frac{I_4 - I_2}{I_3 - I_1} \quad (9)$$

où les  $I_i$  correspondent aux cartes d'intensité des pixels.

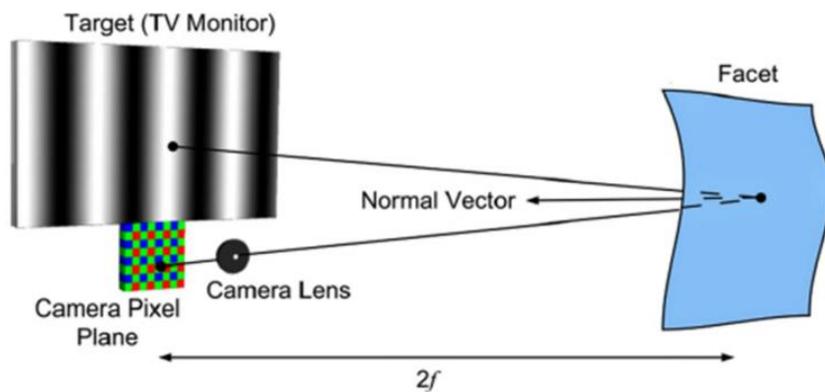


FIGURE I-9: Schéma illustrant le principe de la méthode SOFAST [20].

Une étude, réalisée par Finch et Andraka en 2014 [26], montre que la méthode SOFAST peut atteindre une précision de  $\pm 0.05 \text{ mrad}$  sur les résultats des pentes de facettes. Cette méthode est donc rapide et précise, mais deux de ses principales limites résident dans le fait qu'elle ne peut reconstruire les pentes que d'une seule facette à la fois, et également dans le besoin de placer la caméra au centre de courbure des concentrateurs. Ceci peut devenir problématique dans le cas d'héliostats ayant des rayons de courbure de plusieurs centaines de mètres. La seconde méthode de déflectométrie appliquée au domaine du solaire concentré consiste en un système de mesure des pentes d'héliostats. La méthode conçue par Ulmer et al. en 2011 [27] et dont le principe est montré dans la FIGURE I-10, constitue un bon exemple de ce genre de technique.

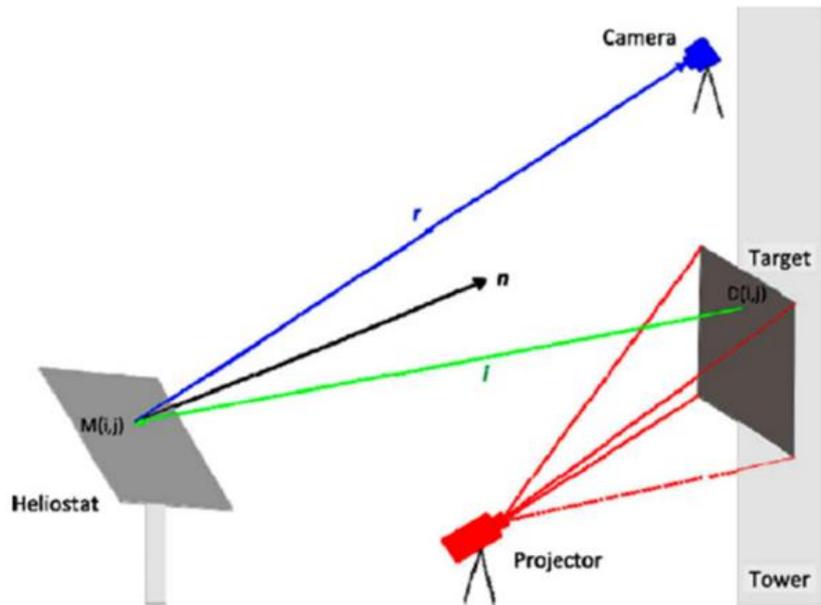


FIGURE I-10: Application de la déflectométrie aux champs d'héliostats [27].

Les franges (horizontales puis verticales) sont projetées sur une cible située non loin du récepteur de la tour, ce en pleine nuit. Une caméra placée sur la tour permet d'acquérir et d'enregistrer la réflexion des franges par l'héliostat à caractériser. En totalité, quatre cibles sont utilisées avec un décalage de phase de  $\frac{\pi}{2}$ . C'est ensuite à l'aide de l'équation (3) que la phase peut être obtenue, puis les normales à l'héliostat. Les acquisitions, qui ont été entièrement automatisées, permettent de prendre des images supplémentaires pour augmenter la précision ou même d'utiliser des longueurs d'onde différentes. Les acquisitions nécessaires pour la caractérisation de tout le champ d'héliostat peuvent être réalisées en une nuit, notamment avec l'aide d'algorithmes de détection de contours. Des tests ont été réalisés à la centrale CESA-1 de la Plataforma Solar de Almeria et les résultats montrent que cette méthode présente des avantages intéressants. La précision obtenue est de  $0.2 \text{ mrad}$  et la résolution est d'environ un million de points par héliostat. Cependant, ce procédé ne permet pas de détecter des erreurs de pentes trop élevées dont le seuil de valeur dépend de la distance entre l'héliostat et la cible. Outre le fait que la projection de franges périodiques identiques implique d'avoir des résultats avec un modulo d'une période, la méthode montre ses limites lorsque les franges se croisent, tel que dans l'exemple de la FIGURE I-11.

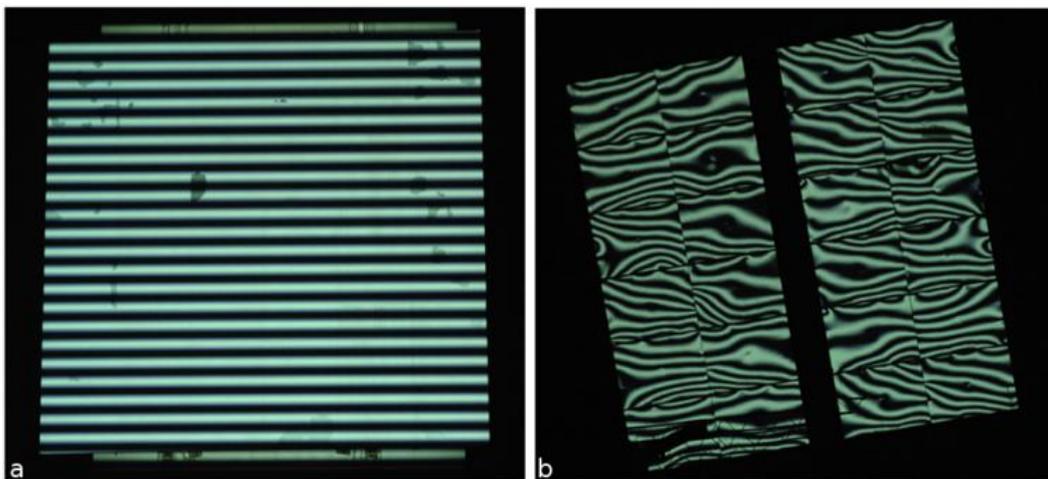


FIGURE I-11: Images de franges projetées sur la cible et réfléchies par les héliostats [27].

En définitive, les méthodes utilisant la technologie laser demande beaucoup de temps d'acquisition selon la résolution souhaitée et l'augmentation de la focale des concentrateurs provoque une baisse de la précision de la mesure. La méthode TOPCAT s'avère efficace sur des concentrateurs cylindro-paraboliques, mais son application à des champs d'héliostat paraît bien plus complexe et consommatrice de temps à cause de la cible à déplacer dans tout le champ solaire. Le peu d'informations au sujet du processus de reconstruction de la méthode TOPHAT est également un inconvénient. Le principal inconvénient de la photogrammétrie est également une longue durée nécessaire à sa mise en place. En effet, il s'agit de contrôler très précisément les positions de la surface optique et du système d'acquisition afin d'éviter les erreurs systématiques. De plus, le raccourcissement de cette durée a pour conséquence directe de faire chuter considérablement la précision de la mesure. La déflectométrie représente des potentialités intéressantes mais sa mise en œuvre dans un champ d'héliostat pose des problèmes tels que les éventuels croisements de franges réfléchies par les surfaces optiques. Les méthodes citées dans cette section sont donc pertinentes dans certains cadres bien précis, mais présentent chacune des inconvénients majeurs lorsqu'appliquées à un champ d'héliostats. C'est la raison pour laquelle il est dans l'intérêt de la technologie du solaire concentré de développer de nouvelles méthodes de mesures des défauts des miroirs.

## 1.2. Méthodes de suivi solaire des concentrateurs

Dans cette section, il est question de méthodes utilisées pour améliorer suivi solaires des concentrateurs. Ces méthodes, toutes comme celles de caractérisation des surfaces optiques abordées plus haut, participent à l'efficacité des concentrateurs.

### 1.2.1. Méthodes de suivi au Four Solaire d'Odeillo

Au Grand Four Solaire d'Odeillo, les rayons du Soleil sont réfléchis horizontalement vers la grande parabole grâce à des héliostats plans disposés sur des terrasses. Chacun d'entre eux dispose d'une caméra en face de la facette centrale et a une orientation indépendante. Un exemple de ces héliostats est montré dans la FIGURE I-12.



FIGURE I-12: Issue de [53] : Héliostat du Grand Four Solaire

Les héliostats sont tout d'abord orientés grâce aux données VSOP87 (Variations Séculaires des Orbites Planétaires) qui permettent de connaître la position du Soleil, puis une vitesse angulaire

de correction est calculée à l'aide correcteur PID (Proportionnel Intégral Dérivé). Ce procédé utilise notamment de la réflexion du Soleil sur la facette centrale et permet de corriger l'orientation de chaque héliostat individuellement [28]. Cette procédure en deux étapes est très efficace car elle permet d'atteindre une grande précision. Elle est cependant peu abordable pour des centrales industrielles comportant plusieurs milliers d'héliostats.

### 1.2.2. Méthode de re-calibration rapide eSolar

La calibration régulière de tout le champ d'héliostats est une autre façon d'améliorer le suivi solaire d'une centrale. La méthode eSolar [29], dont la centrale pilote est montrée dans la FIGURE I-13, a été conçue autour de ce principe. La centrale eSolar est constituée de 2 tours et de 24360 héliostats plans de taille relativement faible, contrairement à beaucoup de centrales industrielles. En effet, chacun des héliostats n'est composé que d'une seule facette d'un mètre carré de surface [30].



FIGURE I-13 : Centrale eSolar en Californie [29].

La calibration du champ solaire est effectuée grâce à une à deux cibles passives carrées de cinq mètres de côté situées à environ 35 m au-dessus du sol, juste en dessous du récepteur de chaque tour. Ces cibles, qui font face à chaque subdivision du champ solaire, sont vues par des caméras positionnées à environ 150 m et reliées au centre de contrôle par fibre optique. Un à un, les héliostats du champ sont programmés afin de renvoyer le flux solaire sur la cible. Pour chacun d'entre eux, le barycentre de la tâche est calculé à partir de l'image capturée par la caméra (cf. FIGURE I-14) et sa comparaison avec le centre de la cible permet d'ajuster l'orientation de l'héliostat. Grâce à ce procédé dont le principe est utilisé dans la plupart des centrales solaires, chaque héliostat du champ est recalibré plusieurs fois par jour afin de maximiser la précision du suivi solaire et de pallier à l'absence de courbure de sa facette. Cette stratégie de cadence de calibration élevée est la raison pour laquelle la méthode eSolar est si particulière.

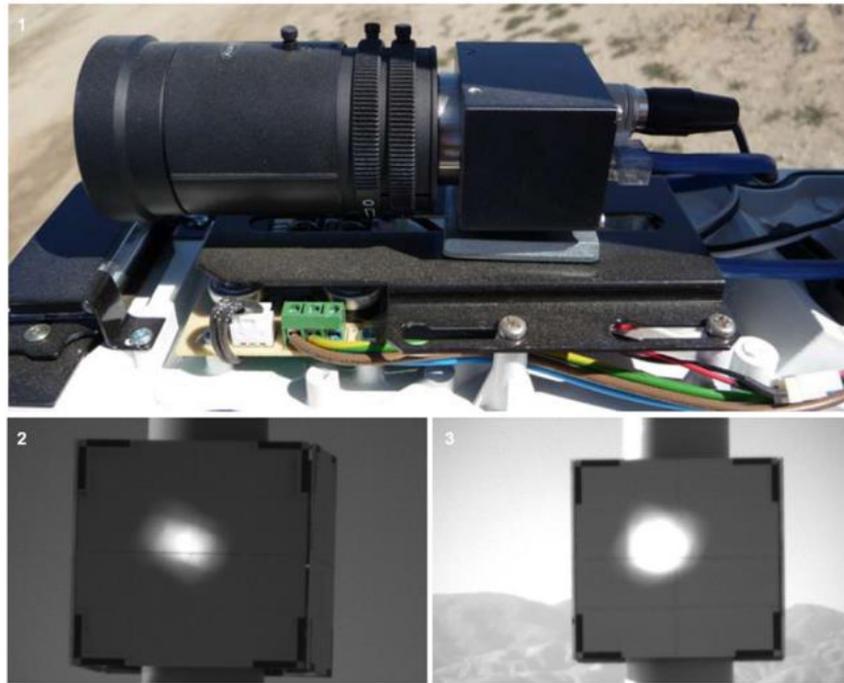


FIGURE I-14: Caméra capturant les images (1) et images des tâches enregistrées (2)(3) [29].

Cependant, l'adaptation de cette méthode de calibration n'est pas évidente. En effet, l'amortissement économique du coût supplémentaire (lié au système de calibration), réalisé grâce à l'économie faite sur les moteurs de suivi solaire, n'est pas une donnée connue. Aux vues du type d'héliostats utilisés dans la centrale eSolar, l'efficacité de la calibration diminue avec l'éloignement des héliostats par rapport à la cible. Ainsi, appliquer la méthode eSolar à une centrale industrielle de plusieurs dizaines de MW thermiques soulèverait bien des problématiques.

### I.2.3. Caméras intégrées à un système en boucle fermée

Au Weizmann Institute of Science en Israël, Kribus et al. [31] ont développé un système en boucle fermée pour l'assistance au suivi solaire basé sur l'utilisation de plusieurs caméras. Les corrections obtenues sont spécifiques à chaque héliostat. La FIGURE I-15 expose le principe de cette méthode.

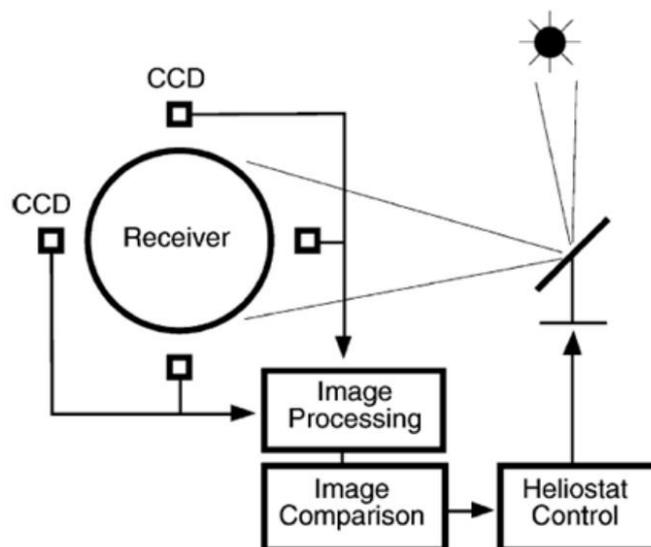


FIGURE I-15 : Schéma du déroulement du processus en boucle fermée [31].

Il y a quatre caméras CCD disposées autour du récepteur et acquérant des images de l'héliostat à caractériser afin de capter la distribution directionnelle du flux incident à la périphérie du récepteur. La FIGURE I-16 montre la plateforme utilisée pour les tests de la méthode. Les images acquises par les caméras permettent de détecter des différences non négligeables entre les valeurs moyennes mesurées par chacune d'entre elles, signalant un défaut de suivi solaire de l'héliostat concerné. Les corrections à mettre en place selon 2 axes sont calculées à partir des comparaisons des images entre 2 caméras placées sur chaque axe. En définitive, ce système permet de corriger l'orientation des héliostats de façon à pallier les effets du vent, si la vitesse du traitement d'images est suffisante.

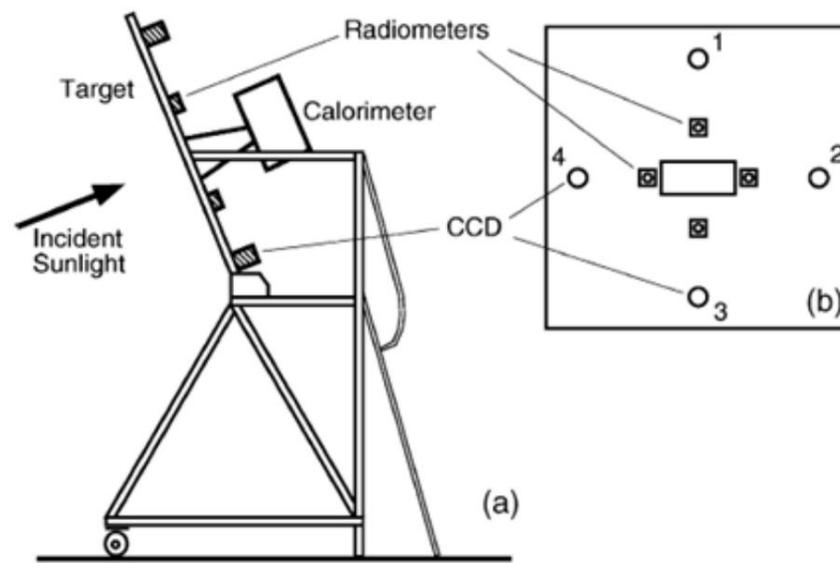


FIGURE I-16: Dispositif utilisé pour la méthode en boucle fermée [31].

Les héliostats de la centrale de l'institut Weizmann, qui sont au nombre est de 64, ont une surface de  $56 \text{ m}^2$  chacun. L'apport de la nouvelle méthode de calibration du champ solaire, dont la précision varie de  $0.1$  à  $0.3 \text{ mrad}$ , a induit une augmentation des performances de la centrale de plus de  $12\%$  [31]. L'étude de l'application d'un tel système de recalibration d'héliostat sur des centrales industrielles plus imposantes, soit comportant des milliers d'héliostats, serait intéressant.

En définitive, les méthodes de recalibration citées plus haut permettent d'augmenter les performances des centrales de démonstration ou des moyens de recherche de façon significative. Dans la plupart des centrales actuelles, la calibration des héliostats est effectuée avant la mise en service, puis le suivi solaire est assuré en boucle ouverte. Le voile du secret industriel empêche d'obtenir des quantités d'informations suffisantes sur les systèmes utilisés dans le domaine commercial.

### 1.3. Introduction de la méthode de rétro-visée

Dans cette section, les méthodes qui ont été les sources d'inspiration pour l'établissement de la méthode de rétro-visée à quatre caméras sont évoquées. La technique des senseurs de front d'onde sera notamment explicitée, ainsi qu'une méthode de caractérisation nocturne utilisant une étoile comme source lumineuse.

#### 1.3.1. Senseurs de front d'onde

Les senseurs qui sont présentés dans cette sous partie sont basés sur le théorème de Malus [21] selon lequel il existe une surface théorique orthogonale au rayon lumineux, appelée front d'onde. Seuls les dioptries et les changements d'indices des milieux traversés provoquent des

perturbations du front d'onde, et c'est en cela que cette notion est intéressante : connaître la forme du front d'onde à un moment donné (grâce au senseur de front d'onde) ainsi que sa source permet de déduire les éléments ou le milieu qui ont été traversés. Etant probablement la prémisse du tout premier senseur de front d'onde, le test de Hartmann -dont découlera le senseur Shack-Hartmann- (cf. FIGURE I-17) consiste à placer le miroir à tester derrière un écran comportant une matrice de trous (dit écran de Hartmann), de l'éclairer via une source placée dans le plan focal, puis à observer les tâches sur un écran également proche du plan focal. Grâce à l'optique géométrique, il est alors possible de retrouver les aberrations transverses  $TA_x$  et  $TA_y$  à partir de la différence entre la position des tâches et leur position théorique.

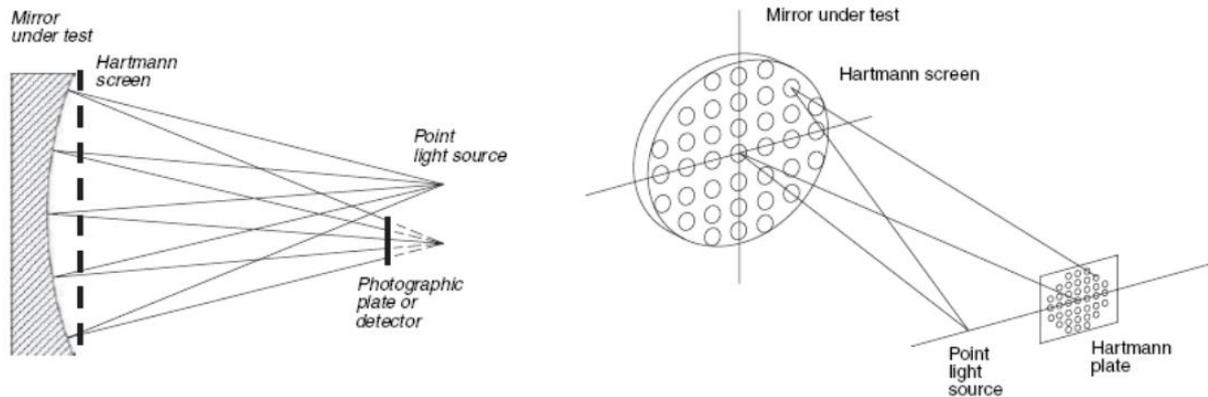


FIGURE I-17: Schéma illustrant le test de Hartmann pour un miroir concave [32].

Les aberrations transverses peuvent être exprimées de la façon suivante [33] :

$$\frac{\partial W(x,y)}{\partial x} = \frac{-TA_x}{r} \quad (10)$$

$$\frac{\partial W(x,y)}{\partial y} = \frac{-TA_y}{r} \quad (11)$$

Depuis, la matrice de trous a été remplacé par une matrice de microlentilles assurant une plus grande précision de la méthode. Cette méthode caractérisation de front d'onde n'est pas destinée à des applications liées à des flux solaires concentrés, mais le principe sur lequel elle est basée a été une source d'inspiration dans [53]. Les applications de cette technique sont multiples et l'on peut citer l'ophtalmologie et l'optique adaptative.

### 1.3.2. Méthode SCCAN

Il est désormais question de la méthode SCCAN (Solar Concentrator Characterization At Night) dont le principe repose également sur l'optique géométrique. L'observation de la réflexion d'une source à l'infini par un paraboloïde, par un observateur situé au foyer de celui-ci doit donner une carte de luminance dans laquelle la totalité de la surface réfléchissante est éclairée. La comparaison de ce résultat théorique, qui concerne un paraboloïde parfait, avec la mesure réelle permet de détecter des défauts de pentes au niveau de la surface optique. Cette méthode, proposée par Arqueros et al. en 2003 [37], utilise une étoile comme source lumineuse à l'infini et permet de mesurer les défauts de pentes d'un héliostat, tel que montré dans la FIGURE I-18. Bien qu'un héliostat réel soit assez éloigné d'un paraboloïde parfait, c'est tout de même ce dernier qui est utilisé comme référence pour reconstruire les défauts de pentes de surface.

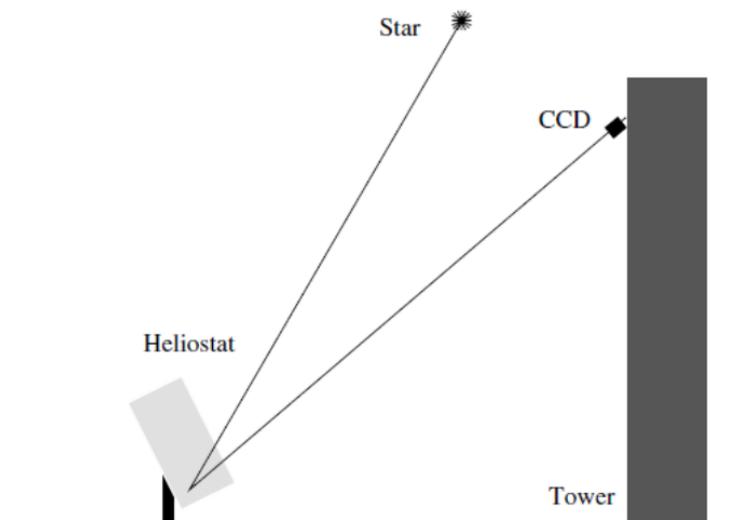


FIGURE I-18: Application de la méthode SCCAN à un champ d'héliostats de centrale à tour [37].

Lors des acquisitions, l'orientation de l'héliostat est contrôlée de façon très précise de sorte à réfléchir la lumière d'une étoile, de préférence isolée, vers une ou plusieurs caméra(s) placée(s) dans la tour (cf. FIGURE I-19). Dans un souci de précision de la mesure, la date de la prise d'images doit être connue avec une précision de 5 *secondes* [37]. Il faut ensuite reconstruire la carte de luminance dans le référentiel de l'héliostat en utilisant un changement de référentiel. Plusieurs acquisitions peuvent être réalisées afin de couvrir le maximum de la surface réfléchissante de l'héliostat et ses pentes sont reconstruites en appliquant la loi de la réflexion à chaque point de sa surface ayant une luminance non nulle à au moins un instant.

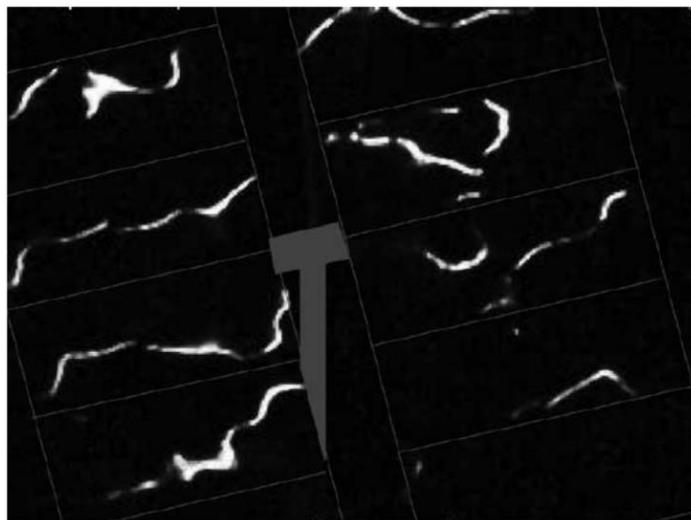


FIGURE I-19: Image de la réflexion d'une étoile par un héliostat [37].

La FIGURE I-20 montre l'ensemble des points qui ont été éclairés au moins une fois durant les acquisitions qui se sont déroulées à la Plateforme Solaire d'Almeria sur un héliostat du champ de la centrale CESA-I, dans le but de tester la méthode. Ce recouvrement de la surface optique de l'héliostat a été possible grâce à une durée de mesure de deux heures au total.

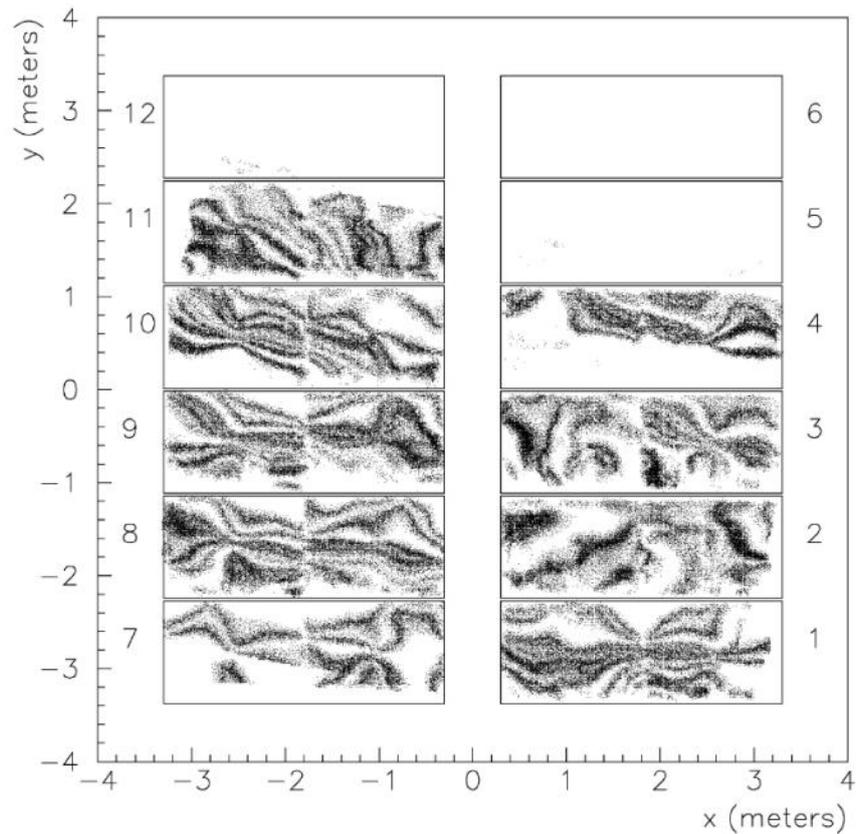


FIGURE I-20: Carte des points de la surface de l'héliostat ayant été éclairés au moins une fois sur les images d'acquisition [37].

L'utilisation de la méthode SCCAN a permis de déceler des défauts d'alignement de certaines facettes l'héliostat, d'offset ou de structure. L'avantage de cette méthode est de pouvoir acquérir les images la nuit et en n'utilisant qu'une seule caméra. Ceci en fait une méthode pertinente, malgré sa précision estimée à  $1 \text{ mrad}$ , inférieure à celle des méthodes évoquées précédemment.

### I.3.3. Capteur de champ solaire assigné à système en boucle fermée

Une méthode de contrôle du champ d'héliostats a été proposée par Collins et al. en 2017 [60] et testée au CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) Energy Center (Australie). Celle-ci est particulièrement intéressante pour des champs solaires comportant un grand nombre d'héliostats de taille relativement faible. Le principe, montré dans la FIGURE I-21, consiste en le balayage horizontal d'une matrice verticale de caméras dans le plan du récepteur afin de mesurer la luminance de chaque héliostat depuis plusieurs points de vue (in fine disposés en une matrice carrée). Ainsi la lumière provenant de chaque héliostat est détectée par toutes les caméras et la totalité du signal est intégrée de sorte à trouver le centroïde de la tache focale de chacun d'entre eux dans le plan du récepteur (cf. FIGURE I-22).

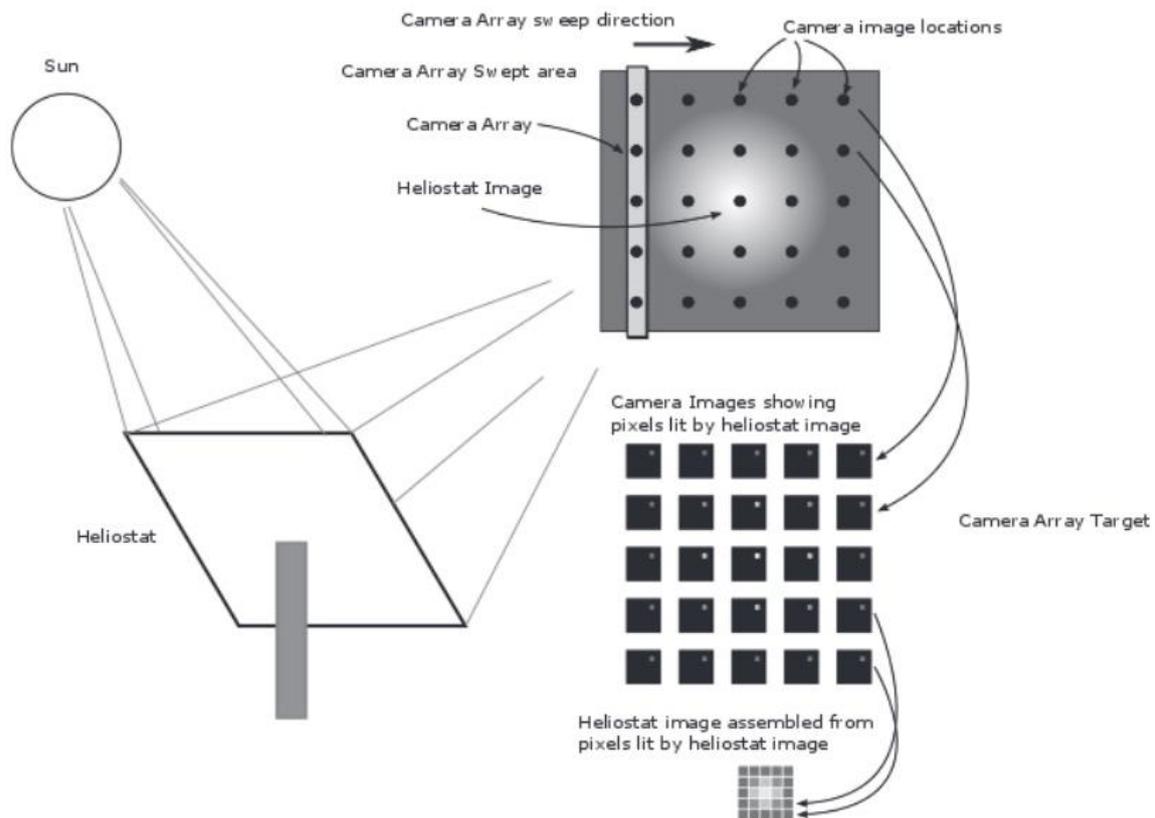


FIGURE I-21: Schéma de principe de la méthode [60].

La méthode a été testée numériquement grâce à un code de tracé de rayon inverse afin de pouvoir dimensionner le montage expérimental. L'erreur de suivi solaire est calculée en prenant la moitié de la différence entre le rayon mesuré issu du centre de l'héliostat et celui obtenu par un calcul théorique. Afin d'intégrer ce procédé dans une boucle fermée, il faudrait être en mesure d'envoyer ces informations au contrôleur de chaque héliostat.

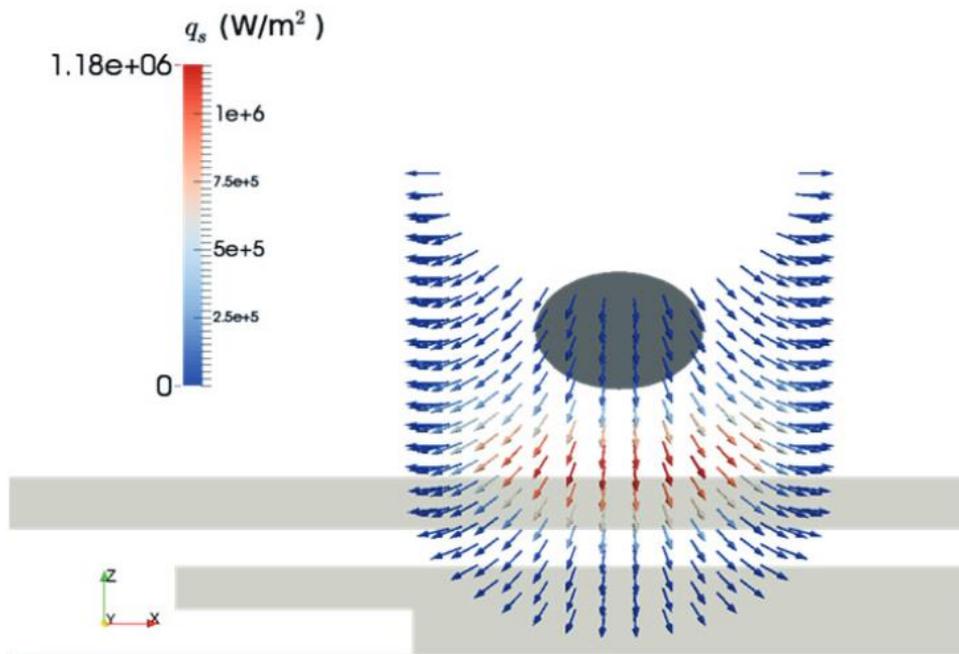


FIGURE I-22: Vecteurs normaux, partant des positions des caméras et colorés en fonction de l'irradiance à chaque position d'une caméra, simulés par tracé de rayon inverse [60].

Des mesures expérimentales ont été effectuées en utilisant une caméra pour reconstruire la carte de luminance de quatre héliostats du champ solaire. La superposition de la carte de luminance théorique avec celle mesurée permet d'identifier les héliostats sur les images expérimentales. Cette méthode de caractérisation s'avère intéressante et pourrait être utilisée de façon automatisée afin d'ajuster l'orientation des héliostats en continu. Cependant, elle est pertinente pour des héliostats de petite taille et sa mise en place sur des structures de plus grande envergure n'est pas évidente.

#### 1.3.4. Synthèse

En définitive, des méthodes de caractérisation de surfaces ont été proposées afin de d'améliorer la qualité de la concentration solaire des concentrateurs. Chaque méthode a été appliquée à un type de concentrateur spécifique, puis parfois réadaptée sur un autre pour étendre son application à des centrales solaires différentes. En 2017, Arancibia-Bulnes et al. [40] ont répertorié la plupart des méthodes de caractérisation des surfaces réfléchives des concentrateurs optiques. La méthode VSHOT est pertinente pour mesurer les défauts de pentes de surface des concentrateurs cylindro-paraboliques avec une erreur de mesure inférieure ou égale à  $0.2 \text{ mrad}$ , ce qui est acceptable aux vues des valeurs typiques de pentes de surfaces rencontrées entre  $0.5$  et  $3.0 \text{ mrad}$ . Les méthodes TARMES et QFly, également adaptées aux concentrateurs cylindro-paraboliques, ont vu leur précision estimée à  $\pm 1.0 \text{ mrad}$  et  $0.1 \text{ mrad}$ , respectivement. Des méthodes basées sur la déflectométrie sont également efficaces sur ce même type de concentrateurs. C'est le cas de la méthode SOFAST dont la précision a été évaluée à  $0.05 \text{ mrad}$ . Une autre méthode utilisant le principe de la déflectométrie a été adaptée à un champ d'héliostats de centrale à tour. Cependant sa mise en place est fastidieuse et soulève des problématiques techniques, donc trop coûteuse en temps pour des applications industrielles. Les méthodes de contrôle de champs solaires sont quant à elles intéressantes avec une précision variant de  $0.1 \text{ mrad}$  à  $0.3 \text{ mrad}$  pour la méthode des caméras en boucle fermées. L'inconvénient de ces méthodes est qu'elles sont efficaces pour des héliostats de petite taille et souvent plans. Dans le cadre du développement industriel des centrales solaires, notamment à tour, il est pertinent de proposer de nouvelles méthodes de caractérisation d'héliostats de tout type, afin d'être en mesure de détecter

les défauts de pentes de ces derniers. Ces méthodes, d'une certaine façon inspirées des senseurs de front d'onde évoqués plus haut, sont présentées et étudiées dans les sections et chapitres suivants.

### 1.3.5. Première méthode de rétro-visée

Durant la thèse de François Hénault, entre 1983 à 1987, une première méthode de rétro-visée a été étudiée [41]. La méthode, qui a dans un premier temps été testée au sur les héliostats plans du Grand Four Solaire d'Odeillo, est basée sur la comparaison entre les images capturées de la réflexion du Soleil sur un héliostat par un appareil photographique, avec la répartition de luminance théorique calculée à l'aide de la méthode des ellipses. La méthode utilise notamment les bords du Soleil, renvoyés le plus souvent au niveau des bords des facettes, afin de détecter une discontinuité. La FIGURE I-23 permet d'illustrer le principe de la méthode : y figure l'appareil photographique situé aux abords de la grande parabole et capturant des images de la réflexion du Soleil par un héliostat plan.

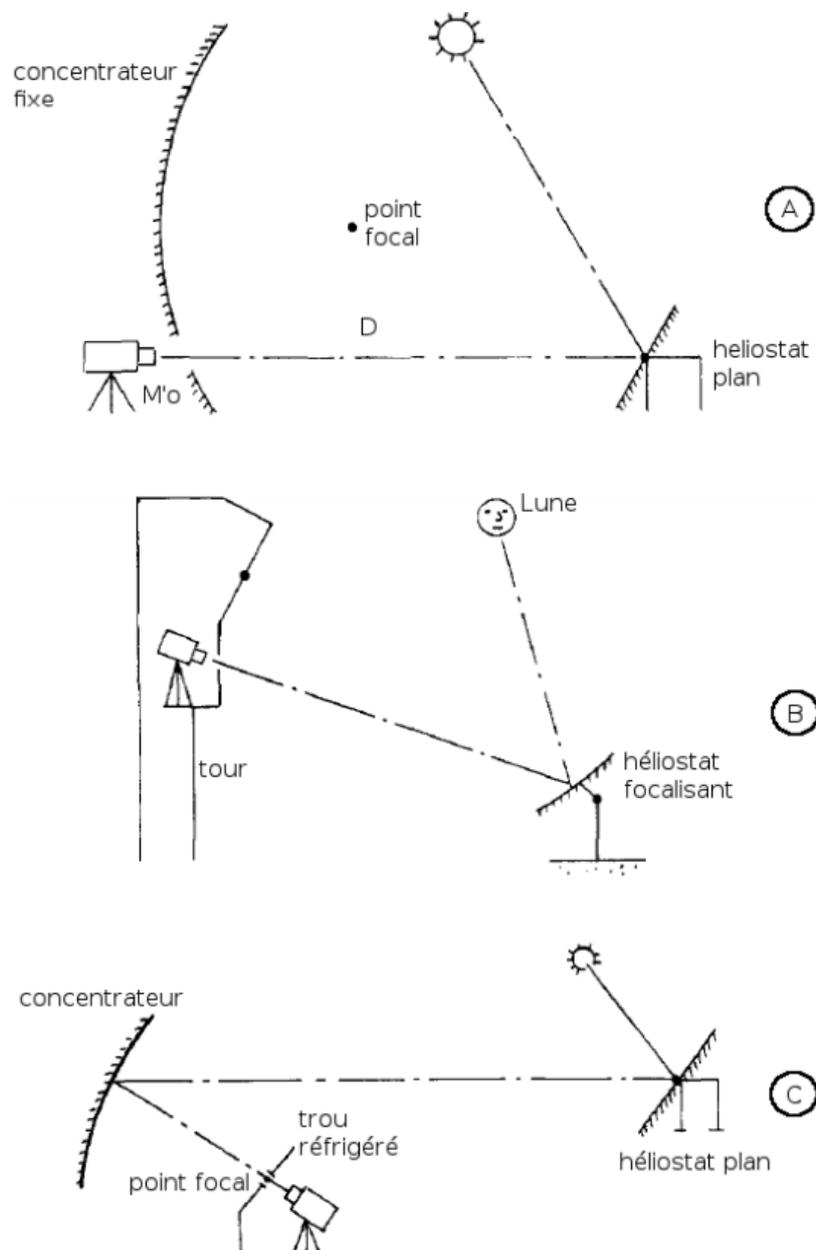


FIGURE I-23: Acquisitions sur un héliostat plan, un héliostat focalisant, puis un concentrateur ponctuel [38].

Les erreurs de réglages des facettes sont reconstruites en comparant l'image capturées par l'appareil photographique à des images théoriques, issues de modèles développés testant plusieurs valeurs de défauts possibles au niveau des facettes. Lorsque les discontinuités mesurées sont quasi-similaires à celles simulées alors la valeur du défaut réel est estimée en fonction du défaut simulé (cf. FIGURE I-24).

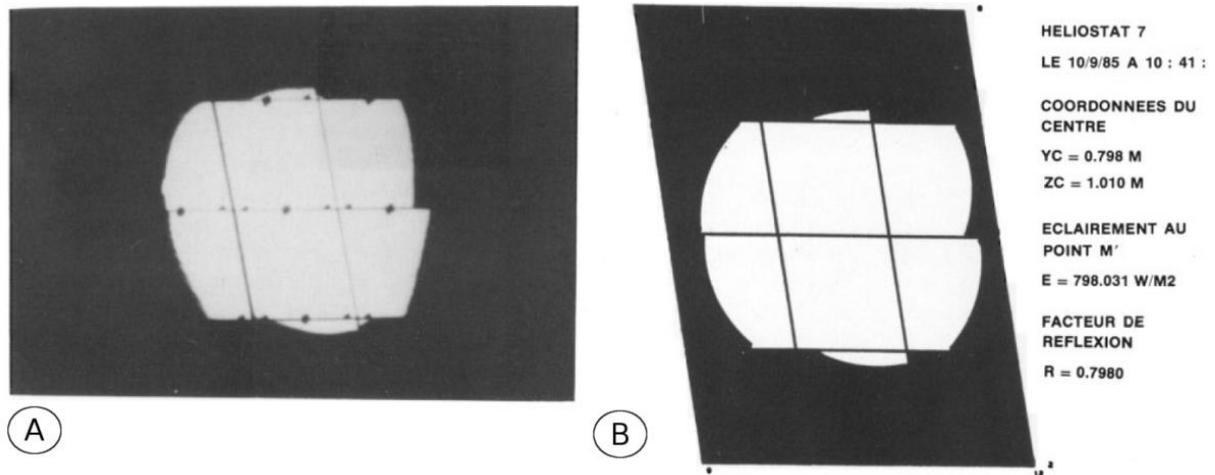


FIGURE I-24 : Photographie de la réflexion du Soleil par un héliostat plan (A), répartition théorique (B) [38].

Ce travail a permis dans le même temps de valider les modèles utilisés pour les simulations ainsi que le principe de la méthode elle-même. Les héliostats de la centrale Thémis de Targassonne (France) ont également été caractérisés en utilisant la même méthode, mais cette fois en se servant de la Lune comme source lumineuse. Le même procédé de comparaison de luminance mesurée et théorique est appliqué, comme le montre la FIGURE I-25.

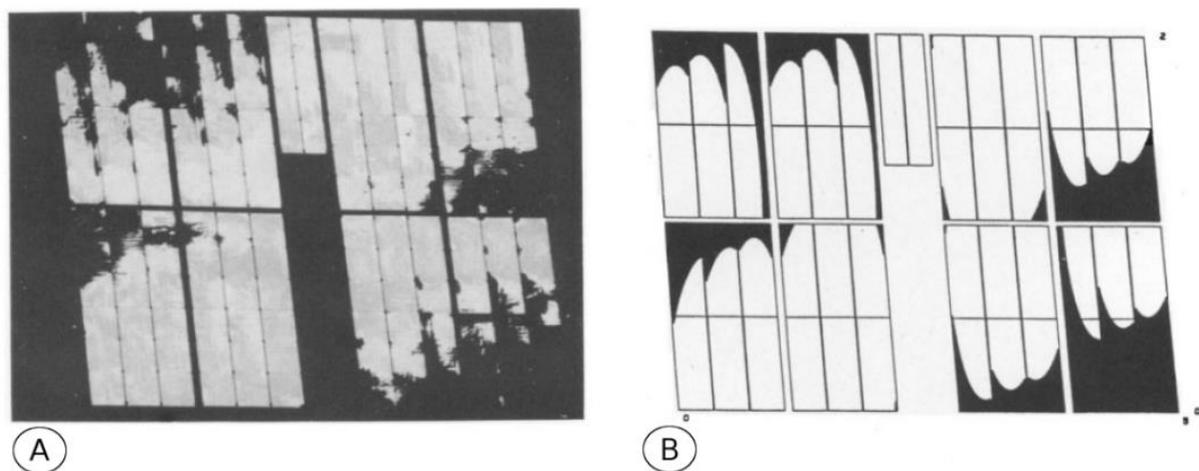


FIGURE I-25: Photographie de la réflexion de la Lune par un héliostat focalisant (A), répartition théorique (B) [38].

Au Grand Four Solaire, les facettes de la grande parabole, planes d'origine, sont déformées mécaniquement afin d'optimiser la concentration solaire. Ce sont des carrés de 50 cm de côté, disposées sur toute la surface parabolique et permettant de focaliser les rayons quasi-parallèles issus des héliostats plans asservis sur le Soleil, vers le foyer. Dans un cas idéal, chacune de ces facettes devrait renvoyer le centre du disque solaire à tout point de sa surface, vers le foyer de la grande parabole. Grâce à cette connaissance théorique de la carte de luminance idéale que devrait mesurer un appareil photographique au foyer, il a été possible d'ajuster la courbure de ces dernières afin d'optimiser la concentration.

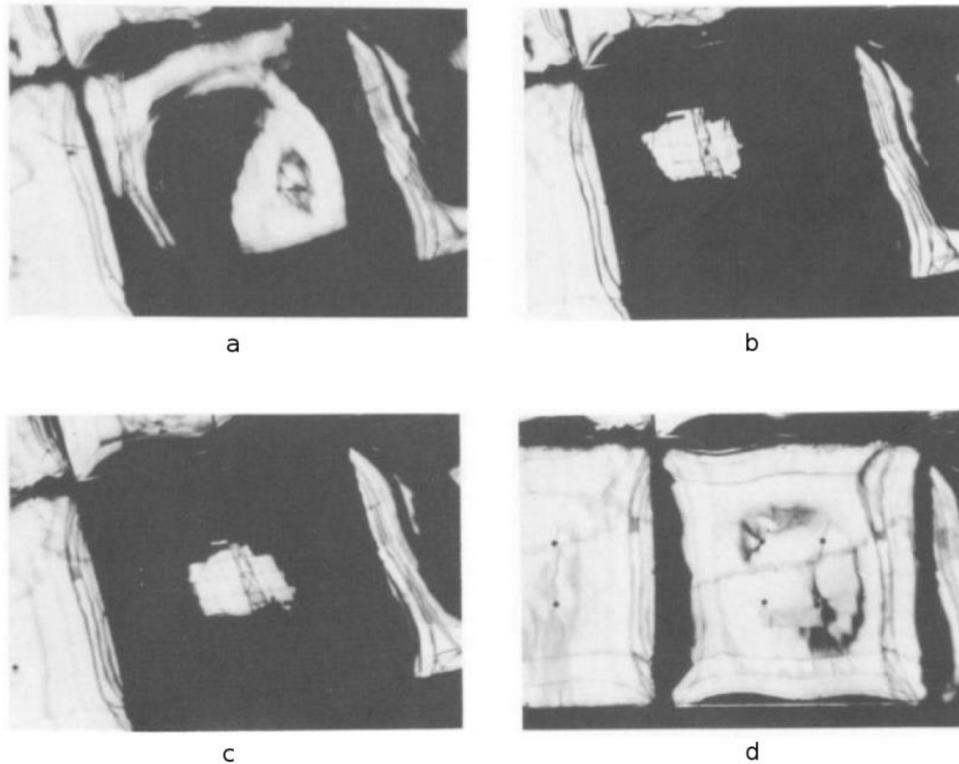


FIGURE I-26: Images illustrant les différentes étapes du réglage des facettes de la grande parabole [38].

L'appareil photographique est donc installé au foyer de la grande parabole et protégé par une densité optique de valeur 4. Le tout est placé derrière un trou réfrigéré de 7 mm de diamètre et permet d'obtenir des images telles que celles de la FIGURE I-26, correspondant aux différentes étapes du réglage des facettes : tout d'abord une image de la facette est capturée (a), puis une seconde image est prise après lui avoir supprimé mécaniquement toute courbure (b). Un premier réglage permet de recentrer l'image en annulant l'erreur de pente (c), puis un second réglage est réalisé afin de rajouter mécaniquement la courbure à la facette et gagner en concentration (d). Ce gain correspond au rapport de la surface de la facette éclairée après l'ajout de la courbure, sur celle avant le dernier réglage. Cette méthode s'avère intéressante pour obtenir des informations sur les défauts de pentes et permet de corriger certains d'entre eux. Le matériel utilisé pendant cette étude ne permettait pas de connaître réellement les variations de luminance présentes au sein du disque solaire réfléchi, ce qui limitait la précision de la méthode. De plus, les défauts présents sur les facettes des héliostats plans ainsi que la courbure des facettes -plus sphérique que parabolique- empêchait d'identifier correctement les bords du disque solaire. Cependant, la méthode de rétro-visée a montré de meilleurs résultats que celle utilisée avant l'inauguration du Grand Four Solaire et son principe a été une source d'inspiration majeure dans la création de la méthode de rétro-visée à quatre caméras.

#### 1.4. Etude précédente de la méthode de rétro-visée à quatre caméras

Dans cette section, nous revenons sur le travail effectué lors de la précédente étude dans le cadre de la thèse de Mathieu Coquand de 2014 à 2017. Nous évoquons, dans ce résumé, les principales étapes de l'établissement la méthode de rétro-visée à quatre caméras.

##### 1.4.1. Etablissement des bases théoriques de la méthode de rétro-visée à quatre caméras

La méthode de rétro-visée à quatre caméras a été brevetée en 2015 [53] par François Hénault et Cyril Caliot. Le principe de la méthode est inspiré de la méthode SCCAN (Solar

Concentrator Characterization At Night) développée par Arqueros et al. [55] -décrite plus haut- qui utilise la réflexion une étoile lointaine sur l'héliostat pour détecter ses défauts de pente, ainsi que du principe des senseurs de front d'onde de type Shack-Hartmann -également décrits plus haut- qui permet de lier la déviation des rayons réfléchis à la pente du front d'onde. La méthode de rétro-visée à quatre caméras utilise quant à elle le Soleil comme source lumineuse et quatre points de vue différents pour reconstruire la pente du front de l'onde réfléchi, ainsi que la pente de surface de l'héliostat. Le développement théorique de la méthode, qui est rappelé et détaillé dans la section II.1.2, repose essentiellement sur les relations de Nijboer, qui relie la déviation du rayon incident à la pente du front d'onde, ainsi que sur la loi de la réflexion de Snell-Descartes qui permet de connaître le lien entre les rayons incidents et réfléchis sur une surface optique en tenant compte de la normale. La première étape du développement de la méthode de rétro-visée à quatre caméras consiste à mettre en relation les angles de déviation d'un rayon réfléchi avec les défauts de pente d'une surface optique. Dans un second temps, la loi de luminance du Soleil est exprimée en tenant compte de l'angle radial solaire, qui est intimement lié à l'angle de déviation du rayon réfléchi. En supposant qu'il est possible, grâce à une fonction d'inversion, de remonter aux valeurs de luminance du profil solaire à partir de l'angle radial, l'on peut mettre les défauts de pentes en relation avec la fonction d'inversion. Ce cheminement théorique, effectué pour chacune des quatre caméras, donne un système de quatre équations à deux inconnus. La résolution de ce système montre qu'il est possible de connaître les défauts de pentes d'une surface optique réfléchissante, à partir de la connaissance de la luminance réfléchi par celle-ci et mesurée par quatre caméras numériques.

#### I.4.2. Résultats numériques obtenus avec la méthode de rétro-visée à quatre caméras

La méthode de rétro-visée appliquée à des images simulées numériquement (cf. FIGURE I-27) permet de montrer que la méthode peut être utilisée pour reconstruire des erreurs d'alignement de facettes d'une amplitude de  $2 \text{ mrad}$  sur un héliostat sphérique de  $200 \text{ mètres}$  de focale avec une précision inférieure à  $0.065 \text{ mrad}$  PTV (Pic-to-Valley) et  $0.017 \text{ mrad}$  RMS (Root-Mean-Squared). La méthode permet notamment d'obtenir les défauts de pentes de la WFE Glossaire, illustrés dans la FIGURE I-28, puis celles de la surface de l'héliostat, montrés dans la FIGURE I-29. La simulation d'un héliostat ayant des défauts d'alignements des facettes a permis d'évaluer la capacité de la méthode à reconstruire des pentes de surface, mais d'autres type de défauts tels que des erreurs de focalisation, du bruit blanc, et même un profil de luminance solaire déformé ont ensuite été ajoutés pour observer leurs conséquences sur les résultats de calcul des pentes. La reconstruction des pentes de la WFE reste tout de même possible avec une erreur locale PTV inférieure à  $0.854 \text{ mrad}$  et une erreur RMS inférieure à  $0.194 \text{ mrad}$ . Les pentes de surface sont également reconstruites et permettent de connaître l'écart en millimètres entre chaque point de la surface de l'héliostat et chaque point de la surface de référence.

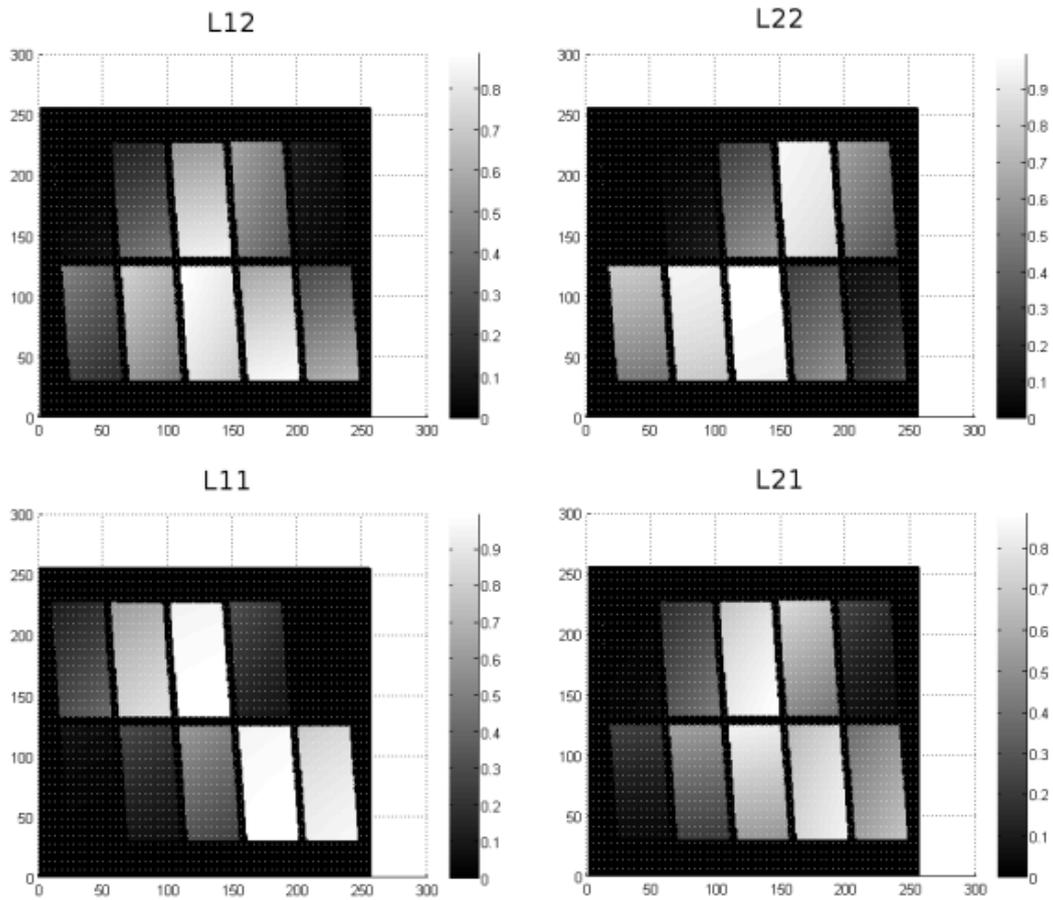


FIGURE I-27 : Issue de [53] : Cartes des luminances simulées, pour les quatre caméras, d'un héliostat sphérique à dix facettes comportant chacune un défaut d'alignement.

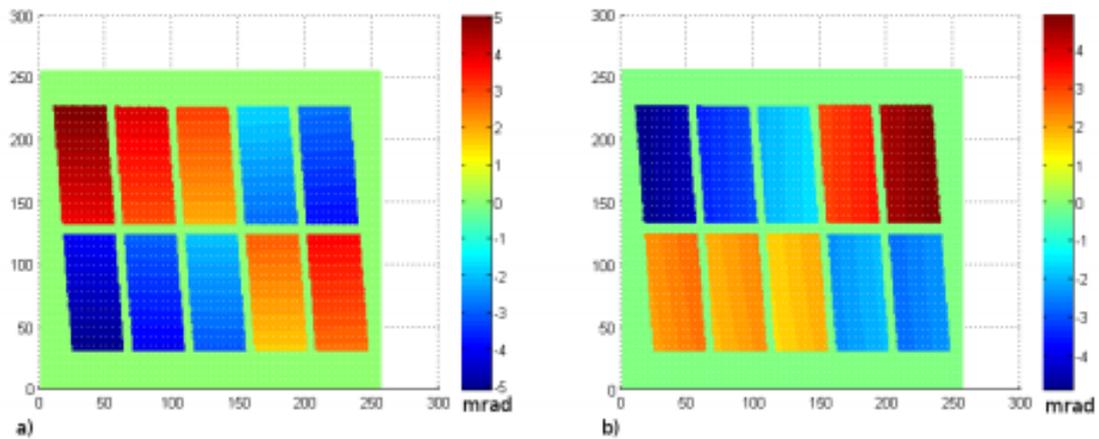


FIGURE I-28 : Issue de [53] : Pentes de la WFE Glossaire reconstruites par la méthode de rétro-visée à quatre caméras selon  $Y'$  (en a)) et selon  $Z'$  (en b)).

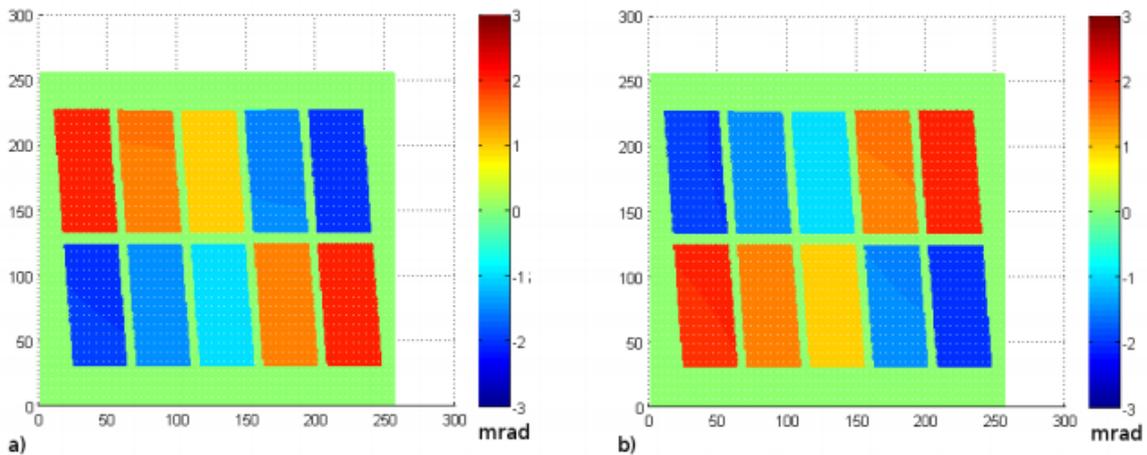


FIGURE I-29: Issue de [53] : Pentes de surface de l'héliostat reconstruites par la méthode de rétro-visée à quatre caméras selon  $Y'$  (en a)) et  $Z'$  (en b)).

La disposition des caméras dans le plan cible contraint le système à ne pouvoir détecter que des erreurs dont la valeur absolue de l'amplitude est inférieure à celle du rayon angulaire du Soleil. Dans ce cadre, l'ajout de caméras, disposées en quadrillage, a été imaginé. Ainsi, l'ajout de 12 caméras, le tout formant un quadrillage de 16 caméras, permettrait d'augmenter l'amplitude des défauts détectables par la méthode. Le résultat de reconstruction des pentes issu d'un tel dispositif dépendrait du quadrillage de caméras ainsi que de l'aire de la cible sur laquelle elles sont disposées.

#### I.4.3. Développement expérimental de la méthode de rétro-visée à quatre caméras

Le développement expérimental de la méthode de rétro-visée à quatre caméras a été effectué en utilisant des caméras appartenant au Grand Four Solaire d'Odeillo (cf. FIGURE I-30). Leur petite taille, leur connexion Ethernet, ainsi que la possibilité de leur fixer des objectifs jusqu'à 150 mm avec des montures pour filtres optiques, ont été des arguments pertinents pour décider de leur utilisation. Le programme de pilotage de ces caméras avait déjà été conçu par Emmanuel Guillot, ingénieur de recherche au laboratoire PROMES. A cela s'ajoutait le gain en temps et en budget qu'apportait ce matériel à disposition.



FIGURE I-30 : Issue de [53] : Caméra utilisée pour les mesures de rétro-visée, avec l'objectif.

En tenant compte de l'ouverture et de la focale des objectifs, et également du fait que les mesures devaient être effectuées sur un seul héliostat, le type d'objectif retenu a 3.9 d'ouverture et 75 mm de focale. Les objectifs, qui sont au nombre de cinq car une cinquième caméra est utilisée pour acquérir des images du Soleil en même temps que la mesure sur l'héliostat, peuvent accueillir des filtres optiques. Ceux-ci se sont rapidement avérés nécessaires pour protéger les capteurs du rayonnement solaire concentré issu de l'héliostat focalisant. Le temps d'exposition, dont la valeur est proche de la milliseconde pour permettre un compromis entre vitesse d'acquisition et qualité d'image, ainsi que la dynamique de 12 bits des caméras ont permis de déterminer la valeur des densités optiques à mettre en place pour protéger le matériel. Des tests in situ ont mis en avant la meilleure résistance des filtres réfléchissants au rayonnement concentré par rapport aux filtres absorbants. Sachant que la valeur de densité optique nécessaire pour protéger efficacement une caméra est de 9 à 10 et que les filtres réfléchissants de densité supérieure à 4 n'existent pas dans le commerce, il a fallu combiner deux filtres par caméra. Cette combinaison est constituée d'un filtre réfléchissant de densité 3 et d'un absorbant de densité 7. La calibration du matériel a nécessité de prendre en compte la non uniformité de la réponse des pixels d'une caméra, ainsi que le vignettage associé aux objectifs. Pour ce faire, il faut avoir à disposition un fond lumineux uniforme, tel que la voûte céleste à l'aube ou au crépuscule, à l'opposé du Soleil. Malheureusement, cette méthode a révélé des problèmes d'uniformité dans la luminosité du ciel. Avec l'aide de l'Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble (IPAG), le vignettage des caméras a finalement pu être quantifié pour plusieurs temps d'exposition en utilisant une sphère intégrante. La FIGURE I-31 présente une image acquise par la caméra n°1 et mettant ce phénomène en évidence.

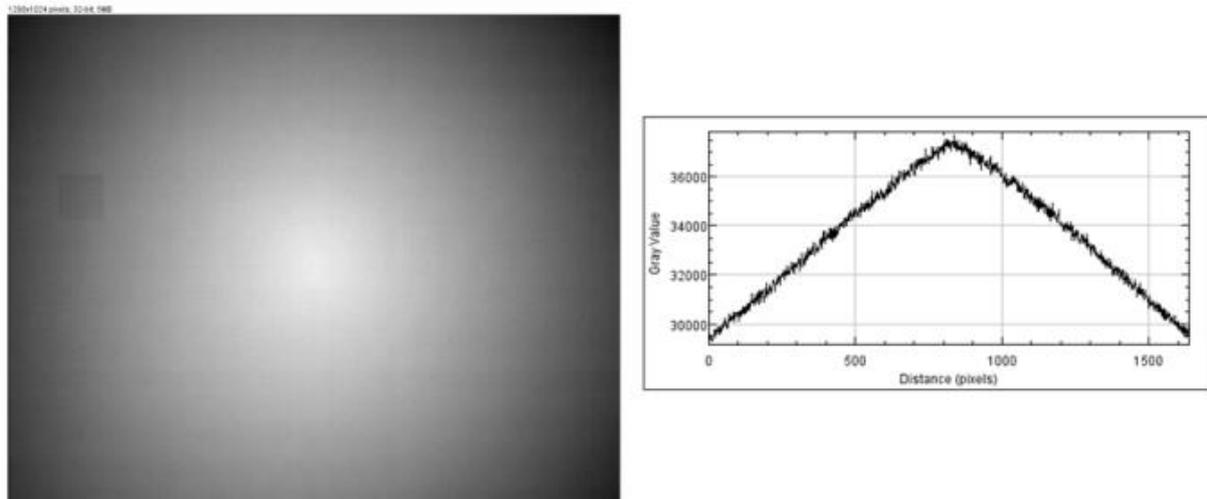


FIGURE I-31: Issue de [53] : Champ plat (voir GlossaireGlossaire), obtenu avec la sphère intégrante de l'IPAG, pour la caméra n°1 avec 3 ms de temps d'exposition.

Il a ensuite été nécessaire de calibrer les filtres optiques pour prendre en compte leurs éventuelles disparités en densité optique, en utilisant une source assez lumineuse pour obtenir un signal conséquent malgré les filtres optiques. Pour ce faire, les caméras ont été placées sur un robot de suivi solaire situé sur le toit du Grand Four Solaire, et ont acquis des images du Soleil avec plusieurs temps d'exposition. Avoir cette source lumineuse commune a permis, en intégrant le signal total obtenu pour chaque caméra, de connaître la différence en intensité totale acquise d'une caméra à l'autre. Ces caractérisations sont effectuées en réalisant une médiane sur 30 images par caméra et seul le signal de valeur supérieure à 10% de la valeur maximale du Soleil est pris en compte dans l'image résultante, dont un exemple par caméra est présenté dans la FIGURE I-32.

Finalement, la normalisation de ces intensités, en prenant la caméra n°5 comme référence, permet d'avoir un facteur correctif à appliquer à chaque caméra.

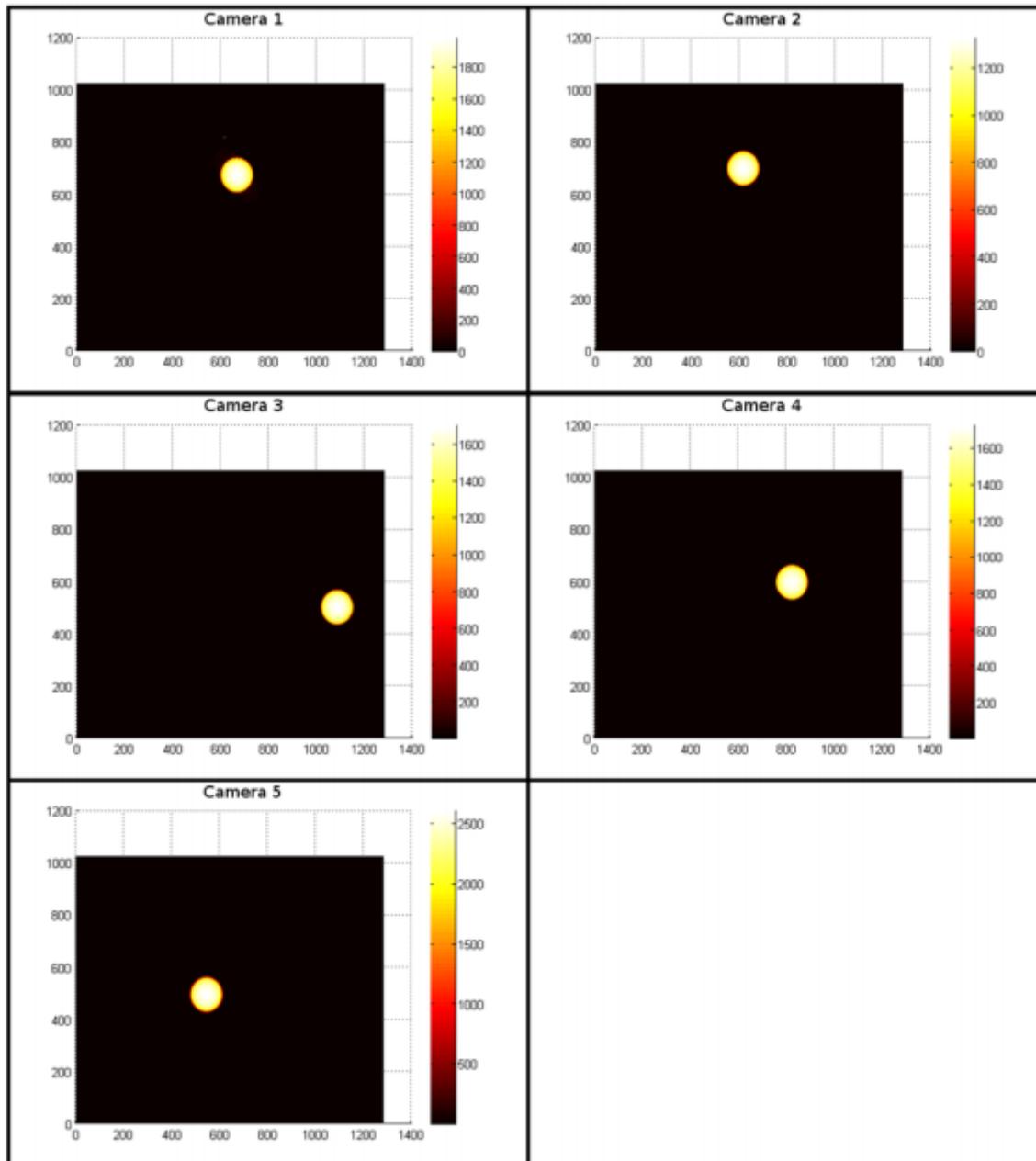


FIGURE I-32: Issue de [53] : Médianes sur 30 images du Soleil réalisées pour les cinq caméras. Le temps d'exposition lors des mesures était de 2 ms.

Le montage expérimental de la méthode de rétro-visée à quatre caméras est essentiellement situé au 1<sup>er</sup> étage de la tour de Thémis de Targassonne, dans les Pyrénées-Orientales. Il composé d'une plaque métallique, appelée cible Mini-Pégase, trouée à certains endroits pour laisser libre champ à des caméras. Un agencement de profilés en aluminium ainsi que des liaisons annulaires permettent de fixer et de disposer les quatre caméras de manière à former un carré de 40 cm de côté. La cible, donc également le plan des caméras, est inclinée de 30° vers le bas. Un schéma descriptif, présenté dans la FIGURE I-33, permet de visualiser le montage associé à la cible Mini-Pégase. Toutes les caméras sont reliées à l'ordinateur via un switch, la cinquième étant sur un robot de suivi solaire situé sur le toit de la tour. Le programme d'acquisition réalisé par Emmanuel Guillot

permet de réaliser les mesures et de modifier certains paramètres tels que le temps d'exposition ou le nombre d'images voulues. Le logiciel associé aux caméras permet quant à lui de les commander à distance et de visualiser le signal pour contrôler leur alignement et le réglage des objectifs.

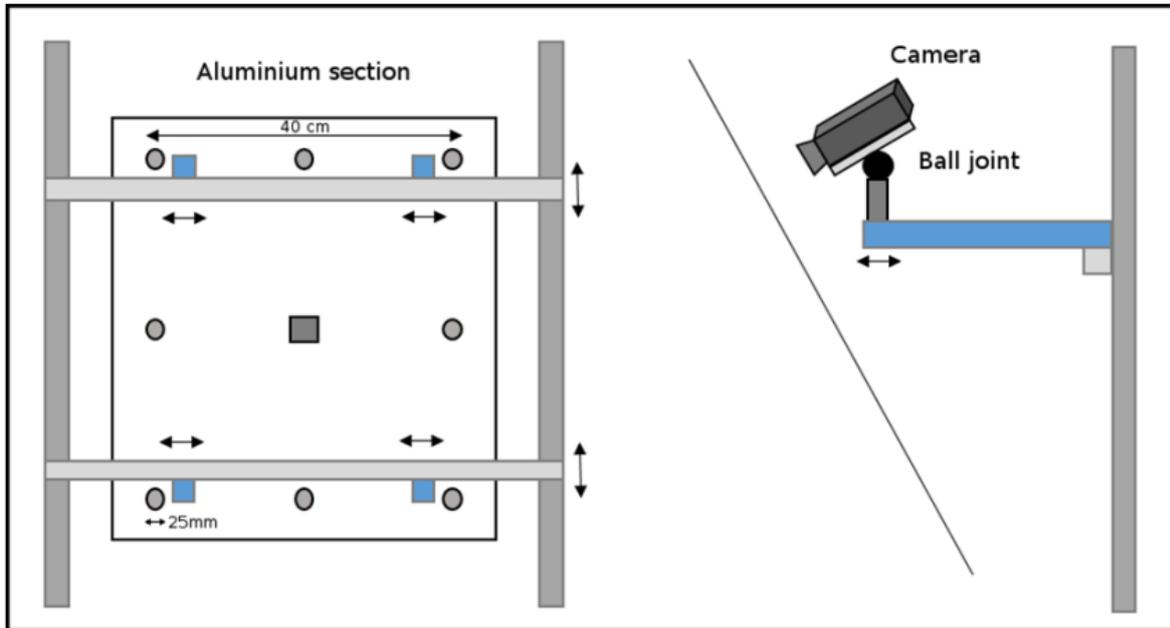


FIGURE I-33: Issue de [53] : Fixations des caméras et degrés de liberté.

Le mode d'acquisition des images devait permettre de réaliser plusieurs images par caméra de façon simultanée (cf. FIGURE I-34). L'héliostat étant en mode de suivi solaire pendant les mesures, il fallait également prendre en compte ses rafraîchissements de suivi qui occurred environ toutes les 3 secondes et qui provoquent une forte fluctuation de la luminance mesurée. Le nombre d'image par seconde était limité par un problème de télescopage des données et s'élevait à environ 5 images par caméra dans le meilleur des cas, avec un temps d'exposition égal à 2 ms. Sachant que les images prises successivement sont considérées comme quasi-identiques et que le bruit de mesure est un signal temporellement dé-corrélé (il n'augmente donc que de  $\sqrt{N}$  pour  $N$  échantillons sommés), le rapport signal sur bruitGlossaire (ou SNR pour Signal Noise Ratio) était donc de  $\frac{5}{\sqrt{5}} = \sqrt{5} = 2.24$ . Après avoir réglé correctement l'alignement des caméras et la mise au point de leurs objectifs, les expérimentations pouvaient avoir lieu. Dans un premier temps, le protocole consistait à prendre plusieurs séries d'images de l'héliostat, puis du Soleil avec la cinquième caméra. Ces données acquises auraient ainsi permis de reconstruire les pentes de surface de l'héliostat et de détecter d'éventuels défauts.

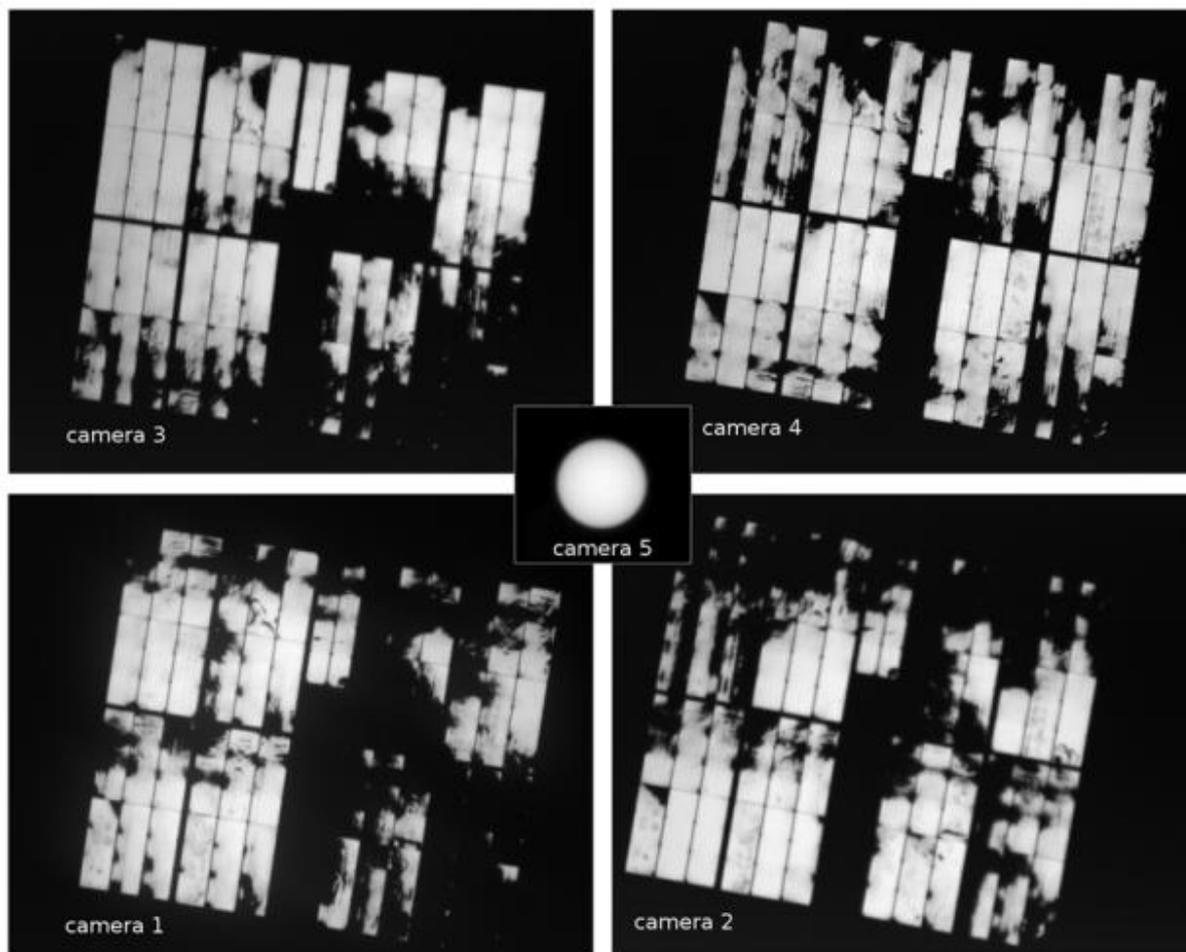


FIGURE I-34: Issue de [53] : Images acquises par les cinq caméras le 08/12/2016 à 16h14 à la centrale Thémis (Targassonne).

Ne disposant pas de données fiables sur la surface de l'héliostat, donc d'aucune référence pouvant servir de comparaison avec les pentes reconstruites par la méthode de rétro-visée, l'on a dû trouver un nouveau protocole de mesure. Celui-ci consiste à effectuer des mesures sur l'héliostat, puis à introduire des défauts d'alignement à deux de ces modules grâce à des vis de réglage des miroirs, avant d'effectuer une seconde série de mesures. La comparaison des deux séries de mesures permettait alors d'annuler les pentes inhérentes à la forme de l'héliostat et d'isoler les défauts de pentes introduits volontairement.

#### I.4.4. Résultats de la reconstruction des pentes par la méthode analytique, puis par la méthode de rétro-visée à quatre caméras appliquée aux images expérimentales

Les images acquises lors des campagnes expérimentales ont été utilisées pour reconstruire les pentes de la surface de l'héliostat E06 de Thémis avec la méthode de reconstruction de rétro-visée à quatre caméras. Il fallait tout d'abord avoir à disposition un profil de luminance du Soleil de bonne qualité. Ce profil a été construit en calculant la médiane sur 50 images issues de la cinquième caméra (cf. FIGURE I-35), puis en traçant 200 rayons –allant du centre du Soleil vers les bords– sur l'image du disque solaire. Ces 200 profils ont ensuite été moyennés et la stricte monotonie de la courbe résultante vérifiée, afin d'assurer que celle-ci est injective. Finalement le profil a été étalonné pour permettre d'associer un angle radial solaire à une valeur de luminance normalisée (cf. FIGURE I-35).

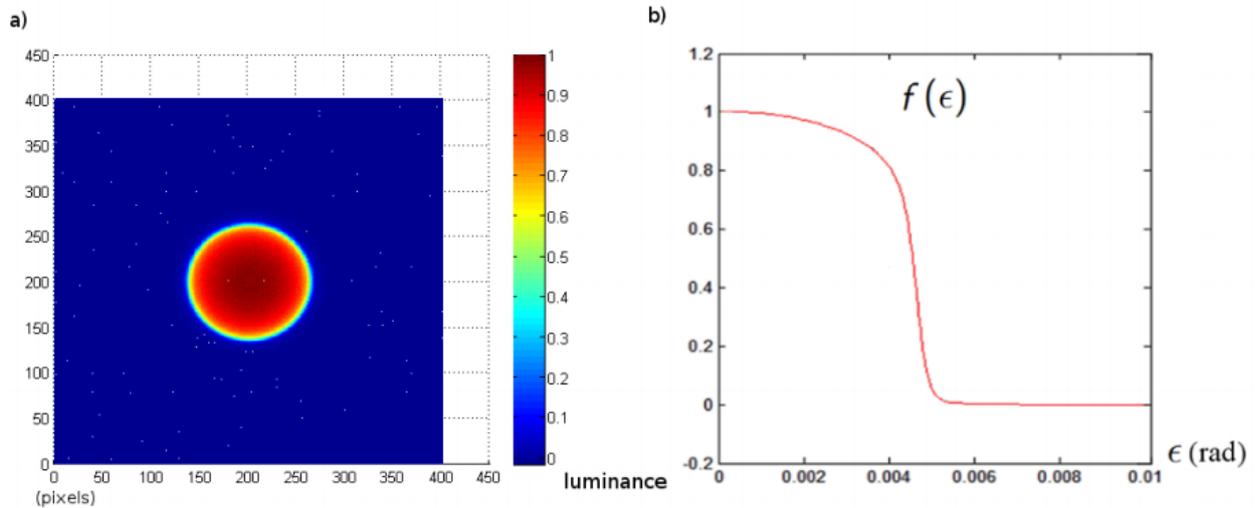


FIGURE I-35: Issue de [53] : (a) Image résultante de la médiane de 50 images du Soleil acquises par la caméra n°5 sur le toit de la tour. (b) Profil de luminance 1D issu de la moyenne des 200 profils de l'image en a).

Le profil de luminance du Soleil mesuré a tout d'abord été introduit dans les simulations COSAC de l'héliostat sphérique à 10 facettes, afin d'évaluer la robustesse de la méthode analytique face au signal bruité issu du profil de luminance d'un Soleil réel. Il ressort de ces tests que la méthode analytique restait efficace pour la plupart des facettes avec une erreur RMS inférieure à  $0.052 \text{ mrad}$ , mais égale à au moins  $0.178 \text{ mrad}$  pour une facette où le signal était trop faible sur une ou plusieurs des quatre images de luminance. Cette valeur était supérieure à l'objectif de  $0.10 \text{ mrad}$  et a montré que la méthode devait être optimisée. Un aperçu de ces résultats de reconstruction de pentes est montré dans la FIGURE I-36. Cette optimisation aboutit à la méthode optimisée de rétro-visée à quatre caméras, testée numériquement par la suite et s'avérant plus fiable.

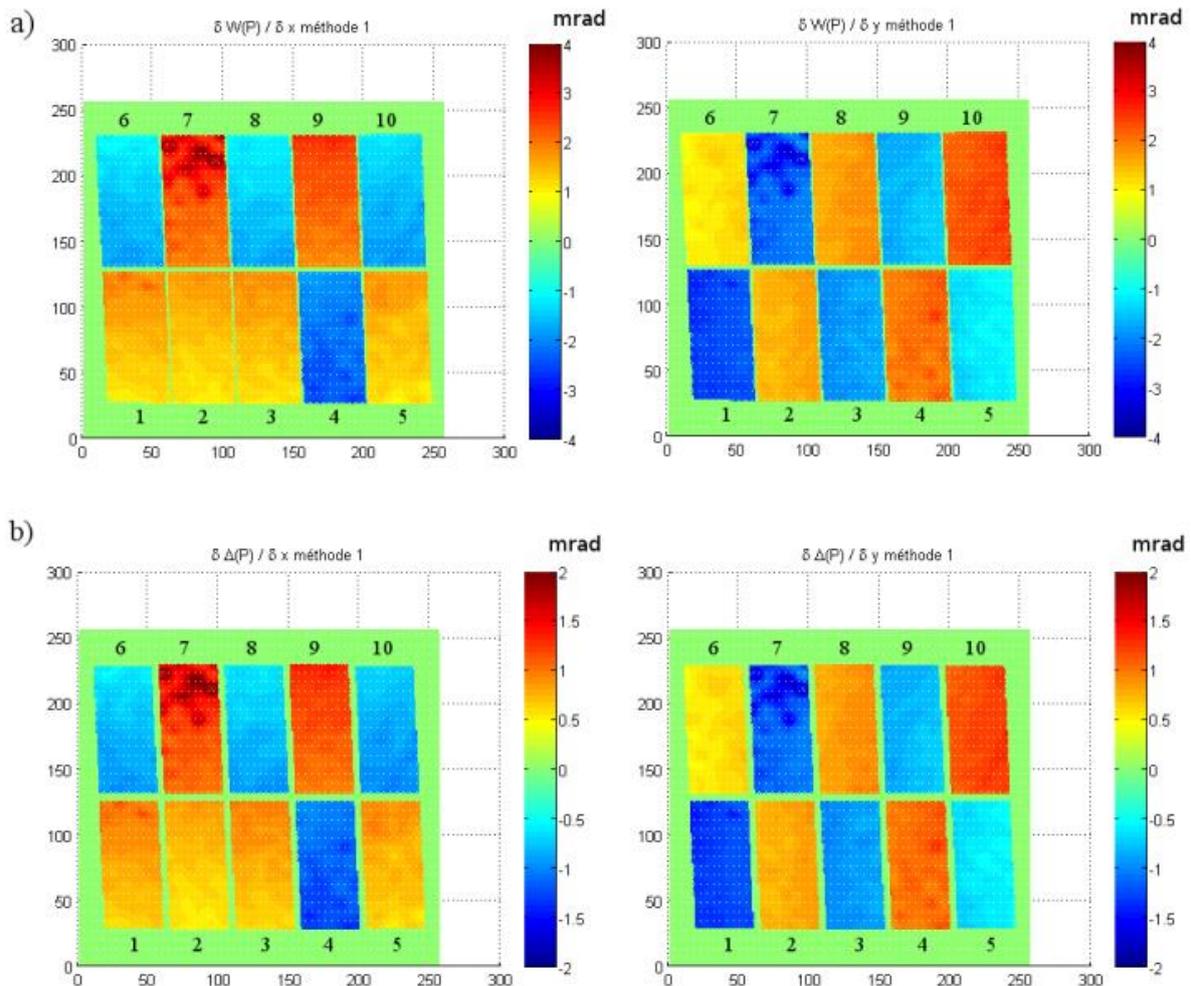


FIGURE I-36: Issue de [53] : Résultats de la reconstruction des pentes par la méthode analytique de l'héliostat sphérique à 10 facettes simulé par COSAC en utilisant un profil de Soleil réel. (a) Pentes de la WFE, (b) pente de surface par rapport à une surface de référence sphérique.

Durant les expérimentations, la valeur des défauts introduits était de  $1.33 \text{ mrad}$  pour le module n°2 et de  $-0.89 \text{ mrad}$  pour le module n°3, les deux selon  $Y'$  (soit en élévation). Les images brutes ont fait l'objet de traitements numériques pour réduire le bruit de mesure Glossaire et corriger les biais liés aux capteurs, puis pour obtenir des images normalisées et utilisables par le programme de reconstruction des pentes. La correction des biais liés aux capteurs a notamment pu être implémentée grâce à la caractérisation préalable des caméras, des objectifs et des filtres optiques évoquée dans la section I.4.3. La reconstruction des pentes de l'héliostat E06 par la méthode de rétro-visée à quatre caméras, dont un exemple est présenté dans la FIGURE I-37, a donné des valeurs RMS inférieures à  $1.061 \text{ mrad}$  et la précision de la reconstruction a été estimée inférieure à  $0.619 \text{ mrad}$ .

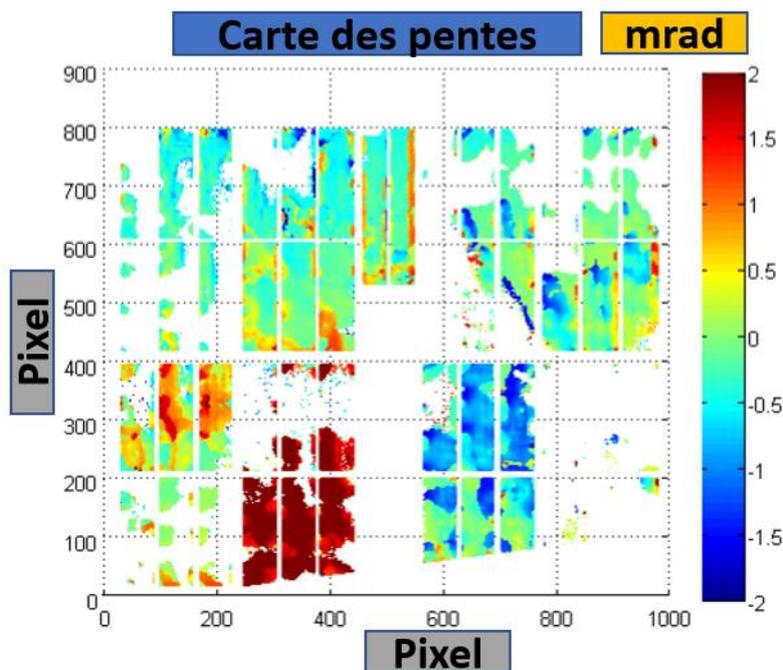


FIGURE I-37: Issue de [53] : Exemple de reconstruction des pentes de surface de l'E06 selon l'axe vertical (Z'), en ayant soustrait le cas sans défauts introduits avec celui comportant des défauts introduits manuellement au module n°2 (en rouge) et n°3 (en bleu à droite du module n°2).

Les sources d'erreur sont multiples dans un contexte d'étude expérimentale, mais certaines mieux connues ou estimées ont été mentionnées. Il y a tout d'abord l'incertitude liée à l'introduction manuelle des défauts sur les modules de l'héliostat, un défaut de mesure probablement lié un filtre de la caméra n°1, le prétraitement des images brutes qui n'était pas parfait et induisait de légers décalages entre les images des différentes caméras, une hypothèse de calcul selon laquelle l'erreur moyenne de suivi solaire est égale à la moyenne des images et qui n'était pas forcément vérifiée, la mise au point des caméras qui reste manuelle et dont la réalisation est suivie pour des raisons pratiques par l'ajout des filtres optiques pouvant potentiellement dérégler la mise au point, et finalement l'espacement de 400 mm, selon Y et Z, entre les caméras, jugé trop important pour les mesures. La contrainte majeure concernant le changement d'espacement entre les caméras était que cela aurait nécessité de percer d'autres trous dans la cible métallique, ou même d'en installer une autre au 1<sup>er</sup> étage de la tour.

### I.5. Positionnement et finalité de la présente étude

La méthode de rétro-visée à quatre caméras, qui a été brevetée en 2015, a été développée entre 2014 et 2017 notamment dans [53]. La précédente étude a permis d'établir les fondements théoriques de la méthode, tout d'abord dans une configuration idéale d'auto-collimation puis dans une configuration plus réaliste en prenant en compte les angles solaires ainsi que les coordonnées de l'héliostat. Une étude numérique a ensuite été réalisée pour estimer la capacité de la méthode analytique à reconstruire les pentes de la WFEGlossaire et de la surface d'un héliostat. Les résultats ont montré que la méthode analytique n'est pas pertinente pour une application sur des images imparfaites telles que les images simulées avec un bruit de mesure ajouté ou les images réelles. Un programme d'optimisation a donc été créé pour répondre à cette problématique. La comparaison, à l'aide d'une fonction de coût, de la luminance calculée analytiquement avec celle mesurée permettait alors de reconstruire les pentes de manière plus robuste face au bruit de mesure ou à la faiblesse du signal. La méthode a donc été conçue en tenant compte des biais liés à la mesure et d'autres problématiques, telles que l'amélioration de la qualité des résultats de reconstruction des

pentés, l'accroissement du nombre de caméras utilisées, les éventuelles modifications à apporter au système d'acquisition, restaient en suspens. Les sources d'erreur, citées dans la section 1.4.4, telles que le prétraitement des images brutes, une hypothèse de calcul, la mise au point manuelle des caméras avant la mise en place des filtres et l'espacement entre les caméras, étaient liées à ces problématiques et avaient une incidence sur la qualité des résultats de reconstruction des pentés. Dans sa première version optimisée -soit la version de rétro-visée à quatre caméras-, la méthode de rétro-visée à quatre caméras était donc plus fiable et robuste face au bruit que la méthode analytique, mais présentait des défauts comme la contamination des données et une sensibilité au bruit de mesure encore réductible.

La présente étude s'inscrit dans la continuité de [53] et avait initialement pour objectifs généraux d'améliorer la méthode de rétro-visée à quatre caméras pour augmenter la qualité des résultats et de l'associer à une autre méthode de mesure pour parvenir à un élargissement de la plage de valeur des défauts optiques détectables. Cette plage concerne donc autant les défauts de courbure, généralement caractérisés par de faibles amplitudes, que les erreurs d'alignement de miroirs ou de pointage de l'héliostat qui peuvent atteindre des amplitudes plus élevées. L'étude a tout d'abord été axée sur l'amélioration de la méthode de rétro-visée à quatre caméras, afin d'obtenir des résultats de meilleure qualité tout en utilisant le même processus de reconstruction. Par la suite, la préparation des images prétraitées à la reconstruction des pentés a été repensée dans l'objectif de simplifier cette étape, d'éviter toute fonction numérique susceptible de déformer l'information contenue dans les images brutes tout en préservant l'efficacité du programme. Parallèlement, un nouveau processus de reconstruction des pentés basé sur le tracé de rayons -dite méthode optimisée de rétro-visée à quatre caméras- a été créé pour répondre à la problématique de la qualité des résultats de la méthode de rétro-visée à quatre caméras. Il a donné de meilleurs résultats que la méthode précédente dans les études numériques et expérimentales présentées dans [50] et [58], respectivement. Dans le cadre des expérimentations à la centrale Thémis de Targassonne, une méthode de rétro-visée utilisant le déplacement du Soleil a été imaginée. Cette méthode, dite de multiplication virtuelle des points de vue, aurait permis de reproduire une mesure à quatre caméras en n'en utilisant seulement deux, grâce au déplacement de la tache focale dans le plan cible. La pertinence d'une telle méthode réside dans le fait que la caractérisation optique d'un héliostat doit être pensée en vue d'une application industrielle. La réduction des coûts liés au matériel, ainsi que la simplification du protocole de mesure in situ pendant le fonctionnement d'une centrale, sont autant d'arguments justifiant l'intérêt à porter à ce type de méthodes. A partir de cette première expérience de pensée a été établie une méthode de rétro-visée à une caméra utilisant la variation de luminance due à la course du Soleil pour détecter les défauts de pentés d'un héliostat. L'intérêt d'une telle méthode réside dans la simplicité du matériel requis et du protocole expérimental. Parallèlement à ce développement, une seconde méthode à une caméra a été créée pour simplifier ce protocole à l'extrême et n'utiliser qu'une seule image de l'héliostat pour détecter les défauts de pentés. Cette seconde méthode à une caméra s'est avérée plus robuste face au bruit de mesure que la première, donc plus à même d'être développée dans un cadre industriel. L'étude de la méthode de rétro-visée à quatre caméras a donc été redirigée vers des méthodes n'utilisant qu'une caméra, théoriquement capables des mêmes résultats avec des moyens et des protocoles bien plus légers et donc plus aisément intégrables dans le fonctionnement quotidien d'une centrale solaire à concentration.

L'efficacité des méthodes de rétro-visée à une caméra ainsi que leur pertinence pour la caractérisation des héliostats dépendent des résultats qu'elles apportent en comparaison avec la méthode à quatre caméras. Les protocoles expérimentaux varient selon les méthodes, mais pas la

structure fonctionnelle du système d'acquisition, ce qui rend possible une éventuelle hybridation entre ces méthodes de reconstruction des défauts de pentes.

## Chapitre 2

### II. Méthode de rétro-visée à quatre caméras optimisée

Dans ce chapitre, nous expliquons le processus de reconstruction de la méthode de rétro-visée à quatre caméras. Nous revenons tout d'abord sur le modèle de la méthode qui a été mis en place dans l'étude précédente. Nous définissons au préalable les conventions de calculs ainsi que les référentiels des différents organes optiques. Nous complétons ensuite cet aperçu théorique de la méthode par les résultats des études numérique et expérimentale obtenus avant notre étude, ainsi que les changements que nous avons apportés pour optimiser le processus.

#### II.1. Rappel sur le processus de reconstruction de la méthode de rétro-visée à quatre caméras et les premières modifications apportées

##### II.1.1. Géométrie et conventions

Pour correctement appréhender le fonctionnement de la méthode de rétro-visée à quatre caméras, il faut pouvoir exprimer les différents éléments optiques ainsi que leur référentiel associé. Le modèle de la méthode de rétro-visée à quatre caméras est basé sur la relation de Snell-Descartes [Eq. 12], qui permet de décrire la réflexion des rayons lumineux sur l'héliostat, ainsi que sur la connaissance que nous avons de la position du Soleil. Le système considéré est composé d'un héliostat focalisant, qui réfléchit le rayonnement solaire vers la cible d'une tour sur laquelle sont placées les quatre caméras.

- $R_R(O, X, Y, Z)$  est le référentiel du plan Récepteur (ou Cible),  $\mathbf{R}_0$  est le vecteur unitaire allant du centre du référentiel de l'héliostat au centre du référentiel du plan Récepteur et  $\mathbf{R}$  est le vecteur unitaire allant d'un point  $P$  de l'héliostat à une caméra  $M_{ij}$ .
- $R_H(O', X', Y', Z')$  est le référentiel du plan de l'Héliostat,  $\mathbf{O}'\mathbf{P}$  est le vecteur allant du centre de l'héliostat  $O'$  à un point de l'héliostat  $P$ ,  $\mathbf{N}_0$  est le vecteur normal unitaire global de l'héliostat,  $\mathbf{N}$  le vecteur normal unitaire à un point  $P$  de l'héliostat.
- $R_S(O'', X'', Y'', Z'')$  est le référentiel du plan Soleil  $\mathbf{S}_0$  est le vecteur unitaire allant du centre du référentiel du plan héliostat au centre du référentiel du plan Soleil et  $\mathbf{S}$  est le vecteur allant d'un point  $P$  de l'héliostat au Soleil.  $A$  et  $H$  sont l'azimut et l'élévation du Soleil à une date, et  $A_H$  et  $H_H$  sont l'azimut et l'élévation de l'héliostat, obtenus grâce à la relation de Snell-Descartes (cf. Annexe D).

Dans  $R_R$ , la réflexion qui a lieu à un point  $P$  sur l'héliostat peut être exprimé en utilisant la relation de Snell-Descartes :

$$\vec{R}_{(R_R)} = 2(\vec{S}_{(R_R)} \cdot \vec{N}_{(R_R)}) \cdot \vec{N}_{(R_R)} - \vec{S}_{(R_R)} \quad (12)$$

Le vecteur  $\vec{R}_{(R_R)}$  est considéré comme constant –tout mouvement parasite de l'héliostat est négligé, contrairement au vecteur  $\vec{N}_{(R_R)}$  normal à la surface de l'héliostat au point  $P$ . L'ensemble des éléments optiques ainsi que les référentiels nécessaires à la compréhension du problème sont schématisés dans la FIGURE II-1 .

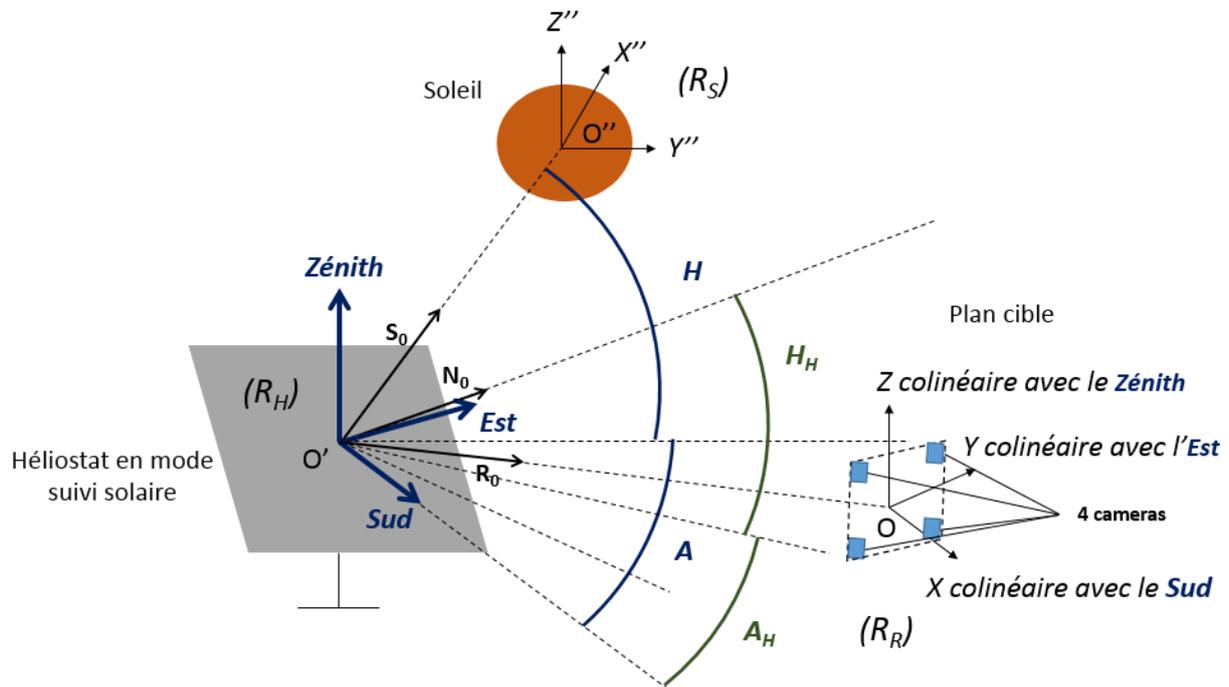


FIGURE II-1: Schéma simplifié des différents éléments des expérimentations sur lesquelles sont basées les simulations.

Les principaux vecteurs sont rappelés dans la TABLE II-1 :

TABLE II-1: Récapitulatif des différents vecteurs utilisés dans les calculs.

Vecteurs	$\vec{N}_{0(R_R)}$	$\vec{R}_{0(R_R)}$	$\vec{S}_{0(R_R)}$	$\vec{N}_{(R_R)}$	$\vec{R}_{(R_R)}$	$\vec{S}_{(R_R)}$
Détails	Normale du centre de l'héliostat $O'$	Du centre de l'héliostat vers le centre de la cible $O$	Du centre de l'héliostat vers le centre du Soleil $O''$	Normale à un point $P$ de l'héliostat	D'un point $P$ de l'héliostat vers le centre de la cible $O$	D'un point $P$ de l'héliostat vers le centre du Soleil $O''$

### II.1.2. Rappel de la théorie de la méthode de rétro-visée à quatre caméras initiale

La méthode de rétro-visée à quatre caméras permet de caractériser les surfaces optiques réfléchissantes en utilisant le Soleil comme source étendue et en mesurant la répartition de la luminance réfléchi au point focal selon quatre points de vue. Le modèle de la méthode relie les valeurs de luminance ainsi mesurées aux pentes de la WFEGlossaire et permet ensuite de retrouver les pentes de la surface optique. Un schéma de principe de la méthode est présenté dans la FIGURE II-2.

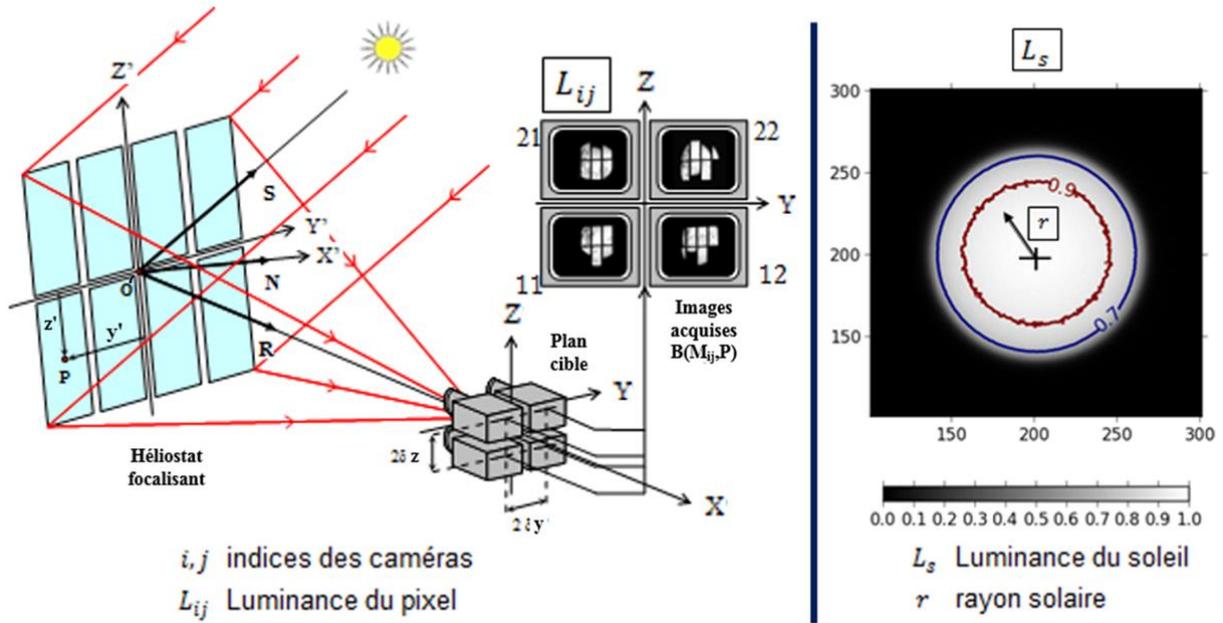


FIGURE II-2 : (A gauche) Schéma du principe de la méthode de rétro-visée à quatre caméras. (A droite) Image du Soleil dont l'intensité est normalisée à l'unité (iso-contours à 0.7 et 0.9).

Les développements théoriques de la méthode de rétro-visée à quatre caméras ont été présentés dans [44]. Nous rappelons ici les bases du modèle ainsi que les relations pertinentes pour la suite de l'étude. Nous considérons tout d'abord le cas d'un héliostat dans une configuration d'incidence normale. Ce cas permet de simplifier la démonstration amenant au calcul des pentes de surface. Les vecteurs introduits dans la section II.1.1 sont quasi-colinéaires, ainsi une erreur peut être ajoutée facilement au vecteur  $N$ . La caméra est située à l'origine  $O$  du référentiel du plan récepteur, le centre du référentiel du plan de l'héliostat  $O'$  est sur l'axe optique de la caméra et le centre du référentiel du plan du Soleil  $O''$  est aligné avec  $O$  et  $O'$ . La caméra mesure la réflexion du Soleil à travers la surface réfléchissante de l'héliostat, dont chaque point est exprimé selon des coordonnées cartésiennes  $P(y', z')$ . Si les miroirs de l'héliostat sont sans défaut, un rayon incident, provenant du centre du disque solaire, qui est réfléchi à un point  $P$ , atteint l'origine du référentiel du plan récepteur  $O$ . Un défaut opto-mécanique  $\Delta(P)$  à ce point peut être vu comme la déviation du rayon incident provenant du Soleil, donc comme les déviations  $\alpha_{def}$  et  $\beta_{def}$  dans  $R_s$  et réciproquement ces rayons ont des déviations opposées exprimées ci-dessous :

$$\tan(\alpha_{def}) = \frac{dy}{D} \quad \tan(\beta_{def}) = \frac{dz}{D} \quad (13)$$

où  $dx$  et  $dy$ , aberrations transverses dans le référentiel du plan récepteur, consistent en les différences, selon les axes  $Y$  et  $Z$  respectivement, entre un rayon réfléchi par un héliostat sans défaut et un rayon réfléchi par un avec défaut(s).  $D$  est la distance  $O'O$  entre l'origine du référentiel du plan de l'héliostat et l'origine du référentiel du plan récepteur. En utilisant les relations de Nijboer,  $dy$  et  $dz$  peuvent être reliés aux dérivées (pentes) de l'erreur de front d'onde, ou Wave Front Error (WFE) :

$$dy = D \frac{\partial W(P)}{\partial y} \quad dz = D \frac{\partial W(P)}{\partial z} \quad (14)$$

La TABLE II-2 résume les principaux concepts intervenant dans les calculs théoriques.

TABLE II-2: Récapitulatif des principales grandeurs utilisées dans les calculs.

Grandeurs	$W(P)$	$\frac{\partial W(P)}{\partial}$	$\Delta(P)$	$\frac{\partial \Delta(P)}{\partial}$
Description	Front d'onde réfléchi au point $P$	Pente du front d'onde réfléchi au point $P$	Défaut de surface de l'héliostat au point $P$	Pente du défaut de surface de l'héliostat au point $P$

Le schéma présenté dans la FIGURE II-3 met en lumière la différence entre les fonctions  $\Delta$  et  $W$  :

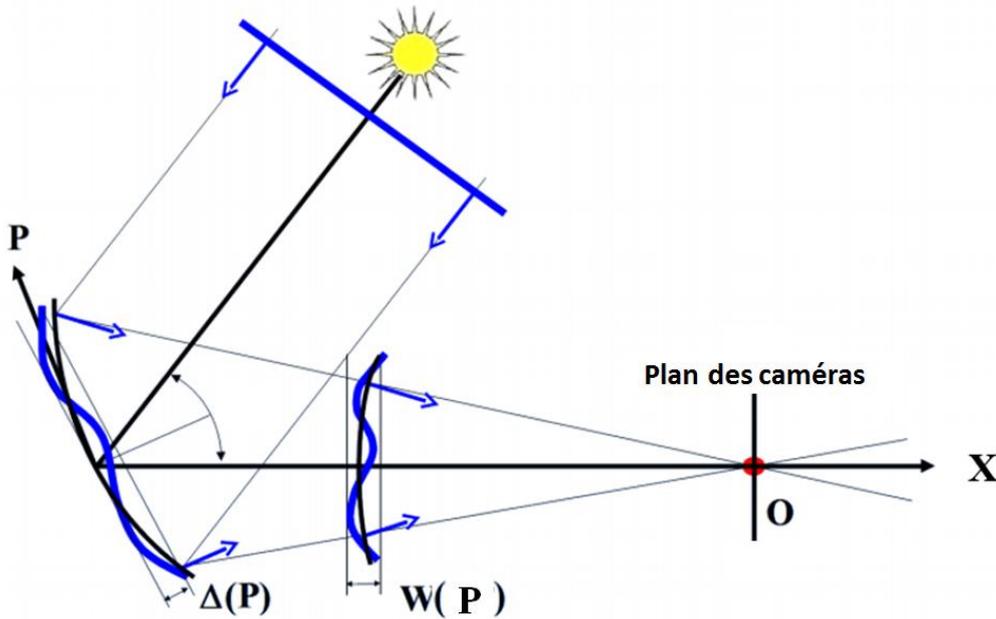


FIGURE II-3 : Issue de [53] : Schéma illustrant les fonctions  $\Delta$  et  $W$ .

En configuration d'incidence normale,  $Y$  et  $Y'$  (respectivement  $Z$  et  $Z'$ ) coïncident et les déviations angulaires valent le double des erreurs opto-mécaniques. Tel que montré dans [4], en combinant (13)-(14) et en utilisant l'approximation des petits angles ( $\tan(x) \approx x$ ), les expressions des déviations angulaires deviennent :

$$\alpha_{def} = 2 \frac{\partial \Delta(P)}{\partial y'} \quad \beta_{def} = 2 \frac{\partial \Delta(P)}{\partial z'} \quad (15)$$

Les déviations angulaires totales sont composées de celles liées aux défauts ainsi que de la position des caméras :

$$\alpha = 2 \frac{\partial \Delta(P)}{\partial y'} - \frac{y'}{D} \quad \beta = 2 \frac{\partial \Delta(P)}{\partial z'} - \frac{z'}{D} \quad (16)$$

Considérons un profil solaire décrit par sa loi de luminance angulaire :

$$L(\varepsilon) = L_0 f(\varepsilon) \quad (17)$$

où  $L_0$  est la luminance au centre du Soleil,  $\varepsilon$  l'angle radial solaire égal à  $\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}$  et  $f(\varepsilon)$  une fonction monotone décroissante égale à 1 au centre du Soleil ( $\varepsilon = \varepsilon_0$ ). En insérant les expressions des déviations angulaires (18) dans le profil de luminance du Soleil (19), et en négligeant les variations de réflectivité des miroirs, l'expression de la luminance angulaire devient :

$$L(\varepsilon) = L_0 f \left( \sqrt{\left(2 \frac{\partial \Delta(P)}{\partial y'} - \frac{y'}{D}\right)^2 + \left(2 \frac{\partial \Delta(P)}{\partial z'} - \frac{z'}{D}\right)^2} \right) \quad (18)$$

Puis, la fonction  $K(M_{ij}, P)$  est définie comme le carré de la fonction inverse de  $f(\varepsilon)$  sur l'intervalle  $[0, \varepsilon_0]$  pour chaque caméra  $M_{ij}$  :

$$K(M_{ij}, P) = \left[ f^{-1} \left( \frac{L(M_{ij}, P)}{L_0} \right) \right]^2 \quad (19)$$

Il y a donc un système de quatre équations à deux inconnues et dont la résolution donne :

$$\frac{\partial \Delta(P)}{\partial y'} = \frac{D}{16\delta y} [K(M_{22}, P) - K(M_{12}, P) + K(M_{21}, P) - K(M_{11}, P)] \quad (20)$$

$$\frac{\partial \Delta(P)}{\partial z'} = \frac{D}{16\delta z} [K(M_{22}, P) + K(M_{12}, P) - K(M_{21}, P) - K(M_{11}, P)] \quad (21)$$

En considérant un héliostat dans une configuration de suivi solaire dans une installation solaire à concentration, alors les relations doivent être modifiées pour tenir compte de l'orientation de l'héliostat :

$$\frac{\partial \Delta(P)}{\partial z'} = \frac{D}{16\cos(A)\delta z} [K(M_{22}, P) - K(M_{21}, P) + K(M_{12}, P) - K(M_{11}, P)] \quad (22)$$

$$\frac{\partial \Delta(P)}{\partial y'} = \frac{D}{16\cos(H)\delta y} [K(M_{22}, P) - K(M_{12}, P) + K(M_{21}, P) - K(M_{11}, P)] - \sin(A) \tan(H) \frac{\partial \Delta(P)}{\partial z'} \quad (23)$$

Il est donc possible de reconstruire les pentes de surfaces d'un héliostat en connaissant l'espacement entre les caméras, leur distance à l'héliostat, ainsi que le profil de luminance du Soleil.

### II.1.3. Préparation des images brutes au processus de reconstruction des pentes de la méthode de rétro-visée à quatre caméras

Les images acquises lors d'expérimentations ou les images simulées numériquement ne sont pas directement utilisables par le programme de reconstruction des pentes. Les images de l'héliostat provenant des quatre caméras doivent être superposables entre elles, quasiment au pixel près pour que le calcul des pentes fonctionne. Un tel prérequis est possible en faisant subir aux images brutes de multiples prétraitements affectant le moins possible les données récoltées.

- Les  $N$  images expérimentales brutes nécessitent au préalable un filtrage médian : pour chaque pixel de l'image, sa valeur résultante est la valeur médiane des  $N$  valeurs acquises. Ce filtrage permet de réduire le bruit de d'un facteur  $\sqrt{N}$  et d'obtenir l'image d'entrée  $I$ .
- Les images résultantes du filtrage médian sont ensuite corrigées pour pallier les biais liés au matériel expérimental tel que le champ plat Glossaire et l'inhomogénéité des valeurs de densités optiques (cf. FIGURE II-4). Les images simulées brutes ne nécessitent généralement pas de filtrage médian ni de correction du champ plat et de la densité optique, mais subissent les autres étapes de prétraitement.

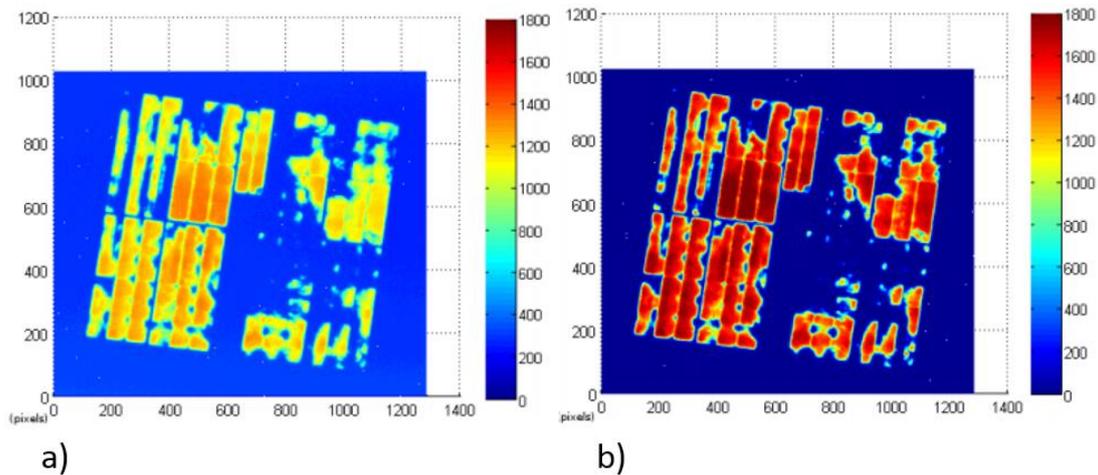


FIGURE II-4 : Issue de [53] : (en a)) Image de l'héliostat résultante du filtre médian. (en b)) Image de l'héliostat après correction du champ plat et du facteur lié aux densités optiques.

- Le gradient de Sobel est appliqué aux images selon  $Y'$  et  $Z'$ , ce qui permet d'obtenir une carte des contours des facettes, car ces zones présentent majoritairement les plus forts gradients de luminance. Les contours sont ensuite binarisés pour faciliter la suite du processus (cf. FIGURE II-5).
- L'usage de la transformée de Hough permet de détecter les lignes droites présentes au sein des lignes de contours des facettes. L'on obtient donc une carte contenant les lignes correspondant aux bords droits des facettes (cf. FIGURE II-5).

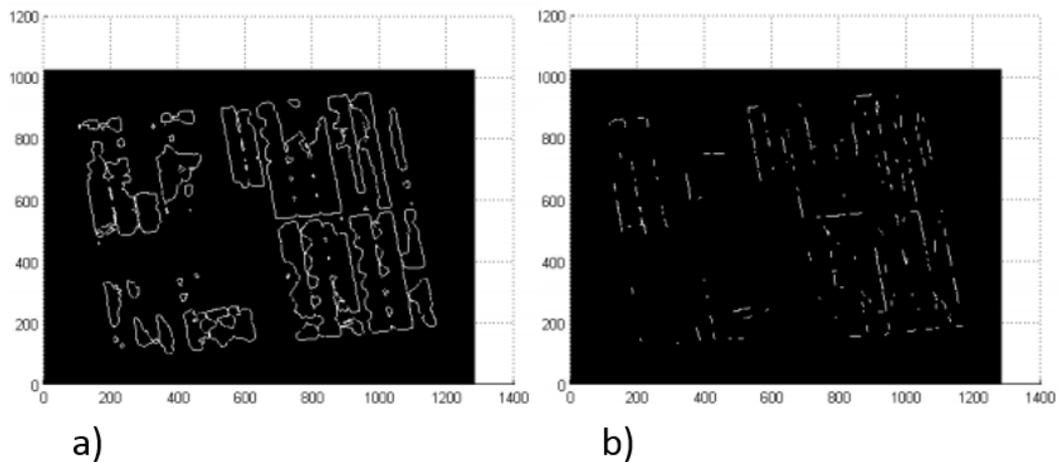


FIGURE II-5 : Issue de [53] : (en a)) Image du gradient de Sobel appliqué à l'image de l'héliostat. (en b)) Image des lignes droites détectées grâce à la transformée de Hough.

- Cette image subit des rotations successives de  $0.005^\circ$  dans une plage allant de  $-20^\circ$  à  $20^\circ$ . À chaque rotation, l'on effectue une corrélation croisée de l'image avec une image binaire d'une ligne verticale. L'angle pour lequel l'intégrale de la corrélation est maximale correspond à l'angle de rotation à appliquer à l'image de l'héliostat pour la redresser.
- L'étape suivante consiste à inscrire l'image de l'héliostat dans un rectangle : tout comme pour les rotations successives, des transformations affines sont appliquées successivement à l'image des lignes et l'on lui applique une corrélation croisée avec l'image binaire d'une ligne verticale. La transformation affine pour laquelle l'intégrale de la corrélation croisée est

maximale correspond à la transformation affine à appliquer à l'image de l'héliostat pour le transformer en rectangle parfait (cf. FIGURE II-6).

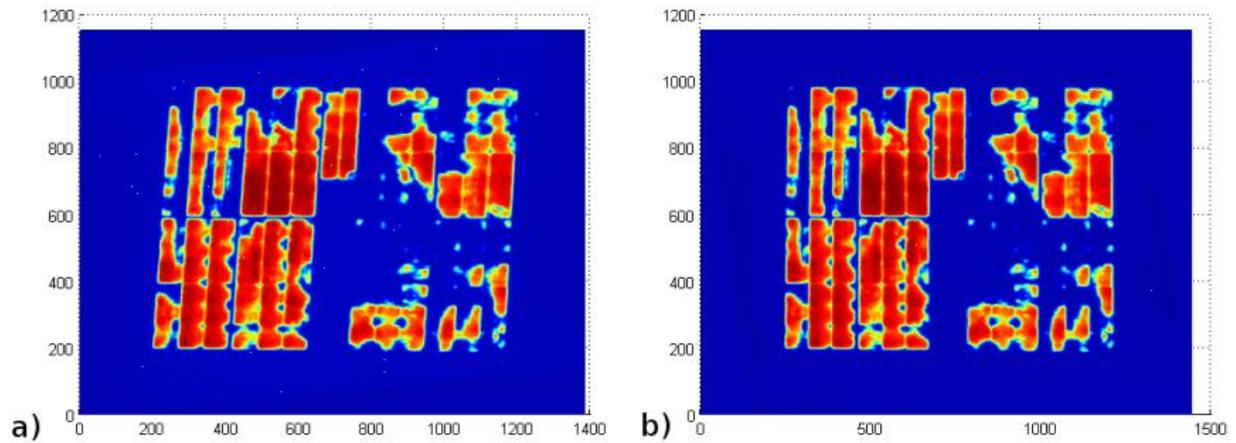


FIGURE II-6 : Issue de [53] : (en a)) Image de l'héliostat avant le processus de transformation affine et après (en b)).

- Un découpage des zones sans signal qui entourent l'image de l'héliostat est opéré et un redimensionnement de l'image est réalisé grâce à une fonction d'interpolation. Ceci permet d'obtenir une image entièrement occupée par l'image de l'héliostat. En faisant cela pour les images provenant des autres caméras, l'on peut s'assurer que les images ont la même taille et sont superposables entre elles, donc utilisables pour le calcul des pentes (cf. FIGURE II-7).

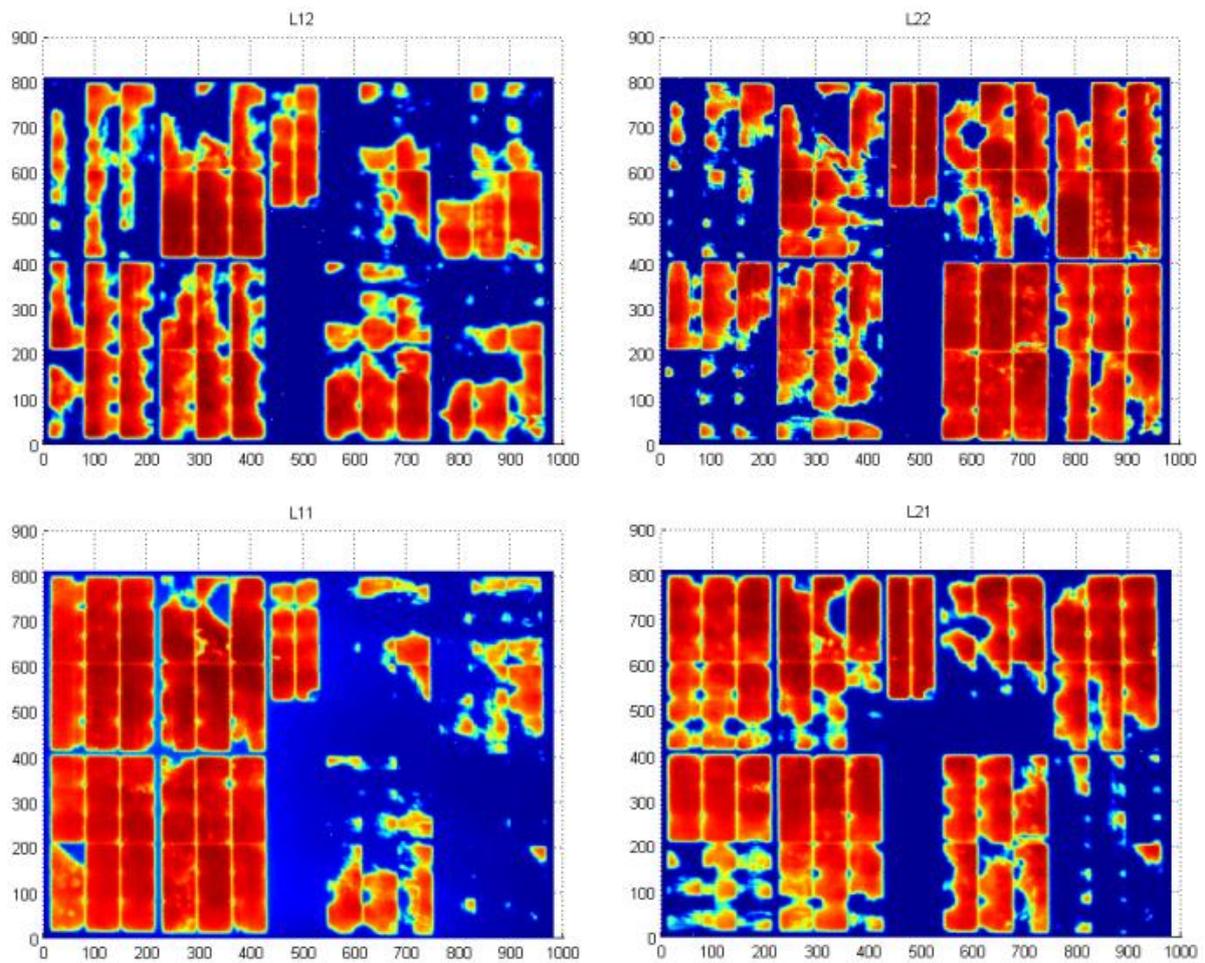


FIGURE II-7 : Issue de [53] : Quatre images de l'héliostat après la dernière étape du processus de préparation, à savoir le découpage et le redimensionnement.

L'ensemble du processus de préparation des images brutes est résumé dans le diagramme de la FIGURE II-8 ci-dessous :

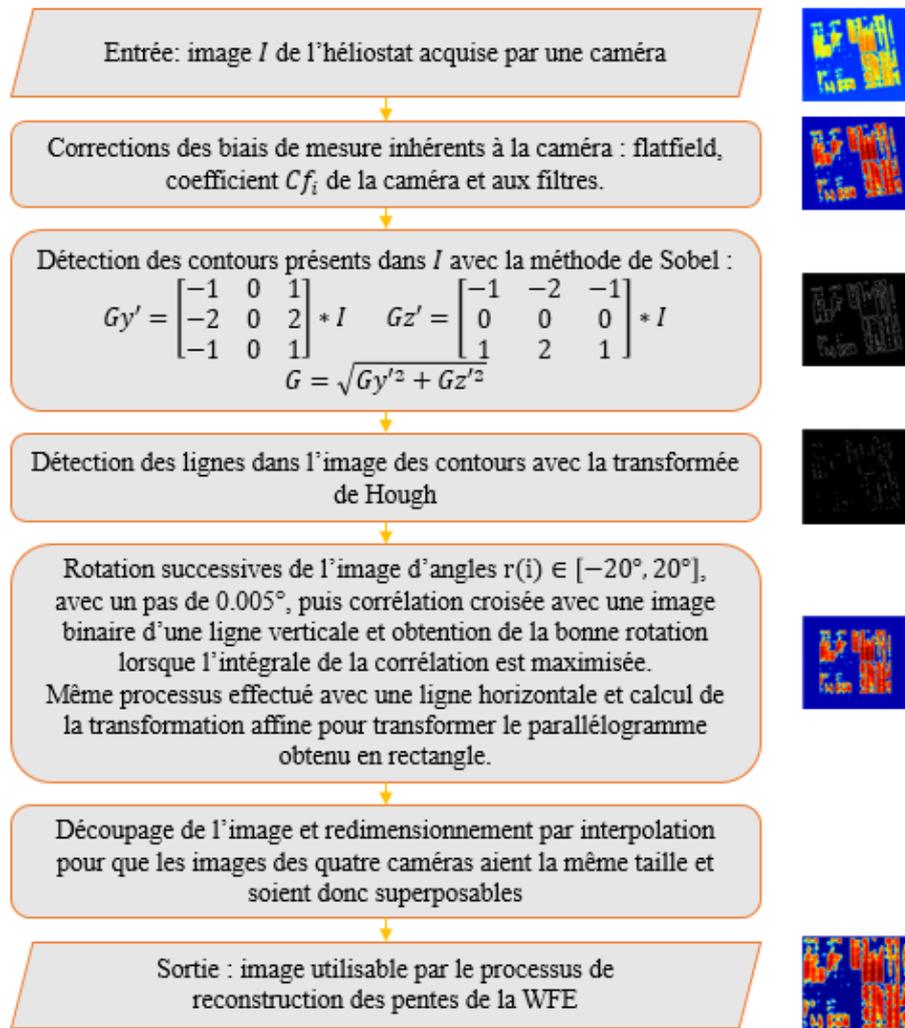


FIGURE II-8: Diagramme simplifié du processus de prétraitement des images utilisé dans la méthode de rétro-visée à quatre caméras.

#### II.1.4. Processus de reconstruction de la méthode de rétro-visée à quatre caméras avant l'étude

La méthode de rétro-visée à quatre caméras, résumée dans le diagramme de la FIGURE II-9, est un processus utilisé pour augmenter la robustesse de la méthode de calcul analytique de calcul des pentes face au bruit de mesure. Le calcul des pentes analytique initial de la méthode est remplacé par l'utilisation d'une fonction de coût. Au lieu de calculer analytiquement deux pentes de la WFE – une selon l'axe  $Y'$  et l'autre selon l'axe  $Z'$  - pour chaque pixel de l'image, les valeurs de couples de pentes, ou couples de solutions, varient. Ceci permet de trouver la meilleure solution pour chaque pixel. Chaque couple de solutions induit une valeur de luminance correspondante, qui est comparée à la valeur réelle du pixel en utilisant l'erreur quadratique. Ce processus est effectué pour les quatre caméras, les erreurs quadratiques sont ajoutées et cette somme correspond à la fonction de coût. Le couple de solutions, qui minimise la fonction de coût, constitue alors la meilleure solution et donc le couple de pente de la WFE, qu'il faut ensuite exprimer dans le référentiel de l'héliostat pour obtenir ses pentes de surfaces.

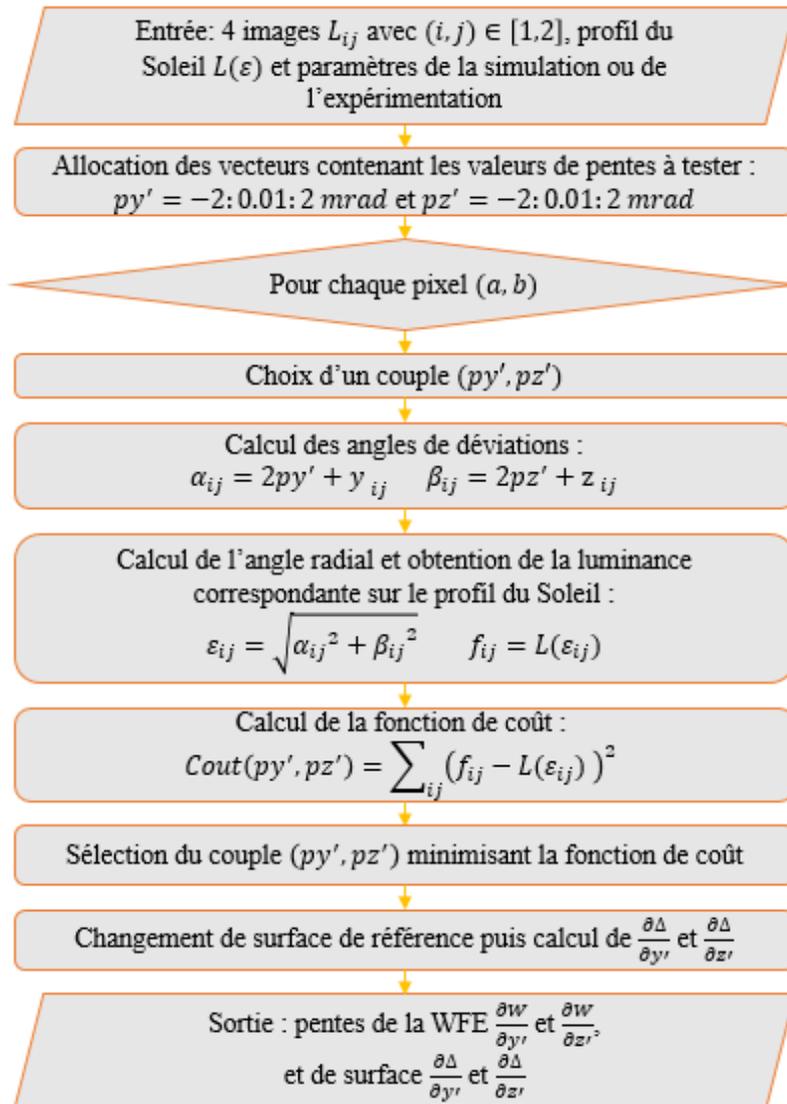


FIGURE II-9: Diagramme simplifié du calcul de reconstruction des pentes utilisé dans la méthode de rétro-visée à quatre caméras.

Les principales étapes du calcul sont les suivantes :

- Dans un premier temps, toutes les valeurs de pentes à tester par le programme pour chaque pixel selon l'axe  $Y'$  et  $Z'$ , sont enregistrés dans les vecteurs  $py'$  et  $pz'$ , respectivement.
- Ensuite, les déviations  $\alpha_{ij}$  et  $\beta_{ij}$  associées à ces valeurs de pentes sont calculées.
- Puis l'angle radial correspondant  $\varepsilon_{ij}$  est calculé. Cet angle de déviation résultant est lié à une valeur de luminance  $f_{ij}$  dans le profil du Soleil.
- La comparaison de cette luminance théorique avec la mesure  $L(\varepsilon_{ij})$  est ajoutée à celles provenant des autres caméras pour donner la fonction de coût  $Cost(py', pz')$ . La fonction de coût exprime l'erreur quadratique entre les mesures de luminance faites par les quatre caméras et les luminances calculées par le programme.

- La minimisation de la fonction de coût permet de retrouver le couple de pentes  $(py', pz')$  pour lequel la différence entre le calcul et la mesure est minimale.
- Le résultat intermédiaire correspond à deux cartes des pentes de la WFE, une selon  $Y'$  et l'autre selon  $Z'$ .

Finalement, la surface de référence de la WFE devient celle de l'héliostat et les pentes sont exprimées dans ce nouveau référentiel. Le résultat final est donc composé de deux autres cartes de pentes de surface de l'héliostat, selon les deux axes.

#### II.1.5. Première amélioration apportée au calcul de reconstruction des pentes de la méthode de rétro-visée à quatre caméras

Dans le cas simple d'un héliostat en auto-collimation Glossaire évoqué dans la section II.1.2, le plan des caméras est orthogonal à l'axe optique. De ce fait, les caméras forment un carré et aucun effet de perspective ne vient affecter la mesure. Or, ce n'est plus le cas lorsque la situation implique un héliostat non aligné avec l'axe optique et en mode suivi solaire. Dans le référentiel de l'héliostat, les caméras ne forment plus un carré mais un parallélogramme quelconque, ce qui a pour conséquence de modifier leurs coordonnées. Cet effet est illustré par les graphiques de la FIGURE II-10. Nous avons donc quantifié cette déformation du plan cible perçue depuis le référentiel de l'héliostat, pour la prendre en considération dans les calculs de pentes. Notons  $\vec{C}_i$  le vecteur contenant les coordonnées d'une caméra  $i$  (avec  $i = 1,2,3,4$ ),  $\vec{P}_i$  celui contenant ses coordonnées en prenant en compte l'effet de perspective et  $\vec{C}_p$  le vecteur contenant les coordonnées du centre de la cible :

$$\vec{P}_i = \begin{pmatrix} x_{i,réel} \\ y_{i,réel} \\ z_{i,réel} \end{pmatrix} = \vec{C}_i - \vec{R} \cdot (\vec{C}_i \vec{C}_p \times \vec{R}) \quad (24)$$

Ainsi, les coordonnées réelles des caméras sont modifiées du point de vue du référentiel de l'héliostat. Nous avons mis ces nouvelles positions sur un graphique afin de mieux visualiser le résultat de ce calcul.

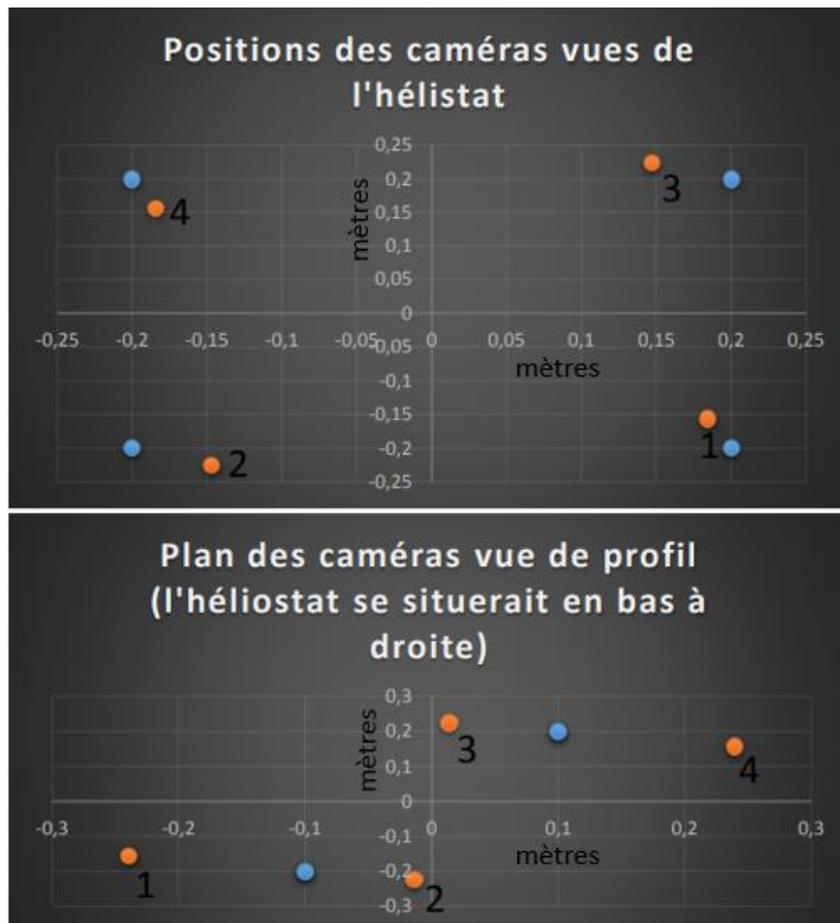


FIGURE II-10 : Graphiques montrant la conséquence de l'effet de perspective sur les coordonnées des caméras vues depuis le référentiel de l'héliostat selon Y et Z (en haut) et selon X et Z (en bas). Les points bleus correspondent aux coordonnées des caméras sans effet de perspective, contrairement aux points oranges.

## II.2. Préparation des images brutes au processus de reconstruction des pentes de la méthode optimisée de rétro-visée à quatre caméras

Les images brutes acquises par les quatre caméras subissent une première étape de prétraitement pour supprimer les images prises lors d'un rafraîchissement du suivi solaire de l'héliostat (grâce à un programme qui détecte les fortes variations de luminances dans une série d'images), pour réduire le bruit de mesure dû aux caméras en réalisant un filtrage médian, pour prendre en compte les facteurs correctifs liés aux filtres optiques de chaque caméra, et pour enlever le bruit lié au capteur, ainsi que le phénomène de vignettage dû aux objectifs. Après avoir subi ces premières corrections, nous appliquons un programme de prétraitement aux images pour les rendre superposables entre elles :

- Après avoir effectué un premier seuillage pour mieux délimiter les bords de l'héliostat, il s'agit d'utiliser le gradient de Sobel pour détecter les lignes présentes au niveau des bords des facettes, tel que montré dans la FIGURE II-11.

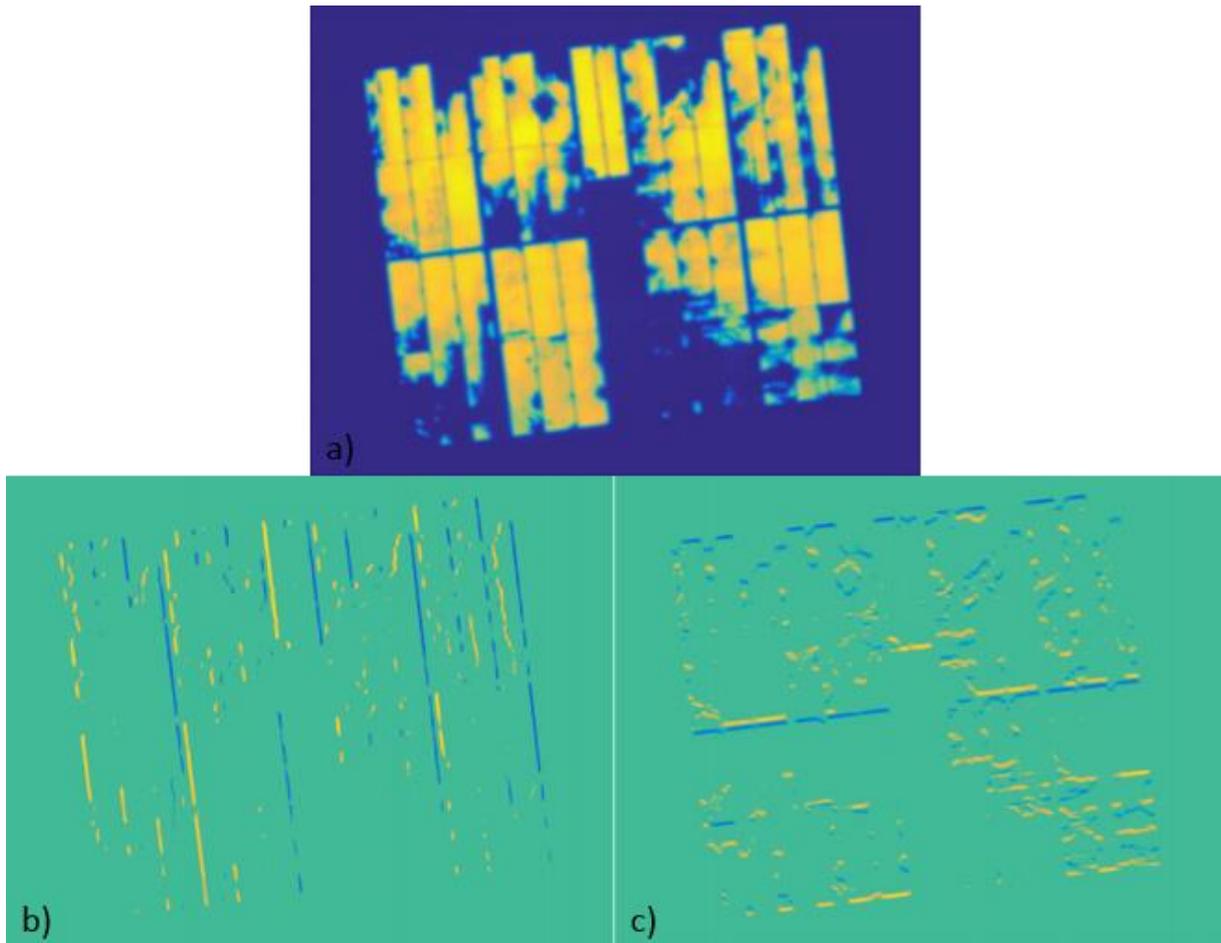


FIGURE II-11 : (en a)) Image de l'héliostat issue du filtrage médian ; (en b)) Gradient de Sobel de l'image selon  $Y'$  ; selon  $Z'$  (en c))

- Puis nous effectuons la transformée de Fourier sur les images de gradient afin d'estimer l'angle de rotation à appliquer aux images pour les redresser. Un exemple de transformée de Fourier est présenté dans la FIGURE II-12.

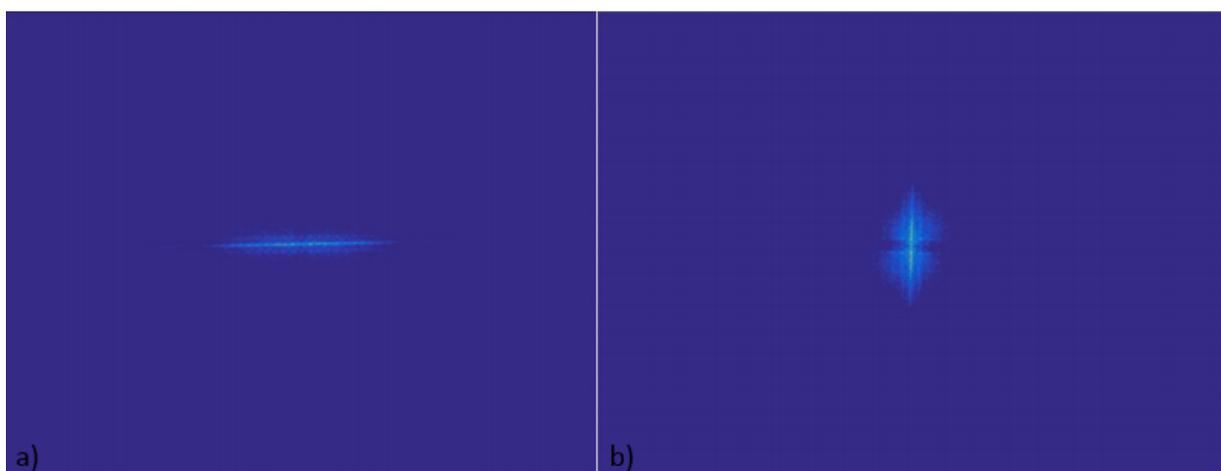


FIGURE II-12 : (en a)) Image de la transformée de Fourier du gradient de Sobel selon  $Y'$  et selon  $Z'$  (en b)).

- Cet angle de rotation est calculé en réalisant un histogramme des angles détectés sur l'image de la transformée de Fourier (cf. FIGURE II-13), puis en déterminant le barycentre de l'histogramme. Ce processus est réalisé deux fois pour chaque axe, pour obtenir un résultat

plus précis qu'avec une simple itération. L'angle résultant est finalement une moyenne des angles estimés.

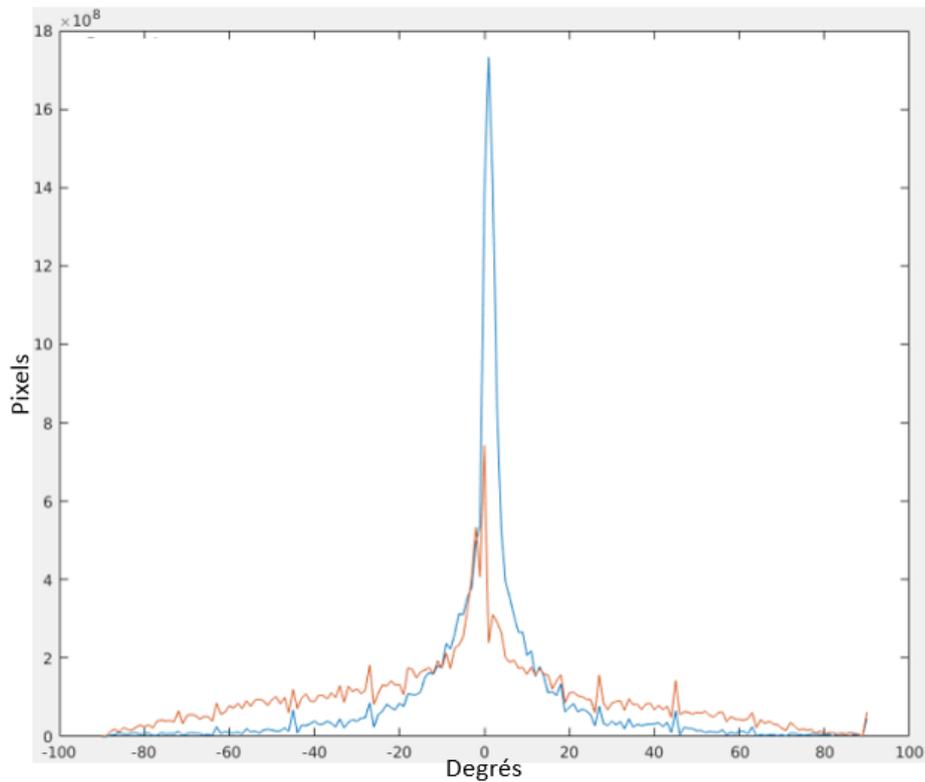


FIGURE II-13 : Histogrammes du nombre de pixels par angle de rotation, réalisé à partir des transformées de Fourier.

- Le recentrement des images de gradient est ensuite réalisé en prenant l'image de la caméra n°1 comme référence, puis en calculant les fonctions qui traduisent l'intensité cumulée de luminance d'une image le long chaque axe. Les zones de forte intensité correspondent aux bords des facettes et de l'héliostat (cf. FIGURE II-14). En calculant ces fonctions selon les deux axes pour chaque image, il est possible par corrélation croisée, ou par superposition du premier pic, de les superposer entre elles.

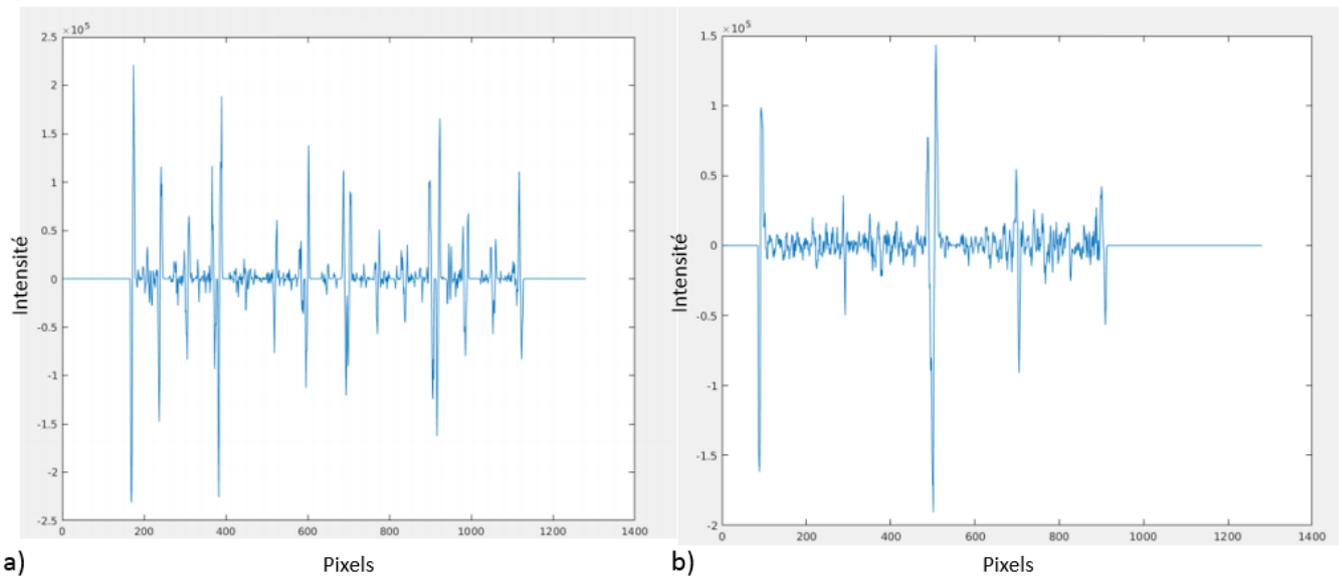


FIGURE II-14 : (en a)) Fonction sommant les luminances le long de l'axe Y' et selon Z' (en b)). Les pics les plus prononcés correspondent aux bords des facettes de l'héliostat.

La première version du programme utilisait une superposition des images de gradient axée sur le premier pic, c'est-à-dire sur un seul bord de l'héliostat par axe et qui permet d'atteindre une précision de superposition de deux à trois pixels. Ce processus a été renforcé dans les versions ultérieures par une seconde étape comprenant une superposition par corrélation croisées des fonctions permettant d'atteindre une précision en-dessous du pixel. Ainsi, la rotation ainsi que la translation sont estimées pour chaque image de gradient et peuvent être appliquées aux images brutes. Un exemple d'image ayant subi toutes ces transformations est montré dans la FIGURE II-15. De plus, la nouvelle version du programme propose une transformation de l'image de l'héliostat afin d'obtenir un rectangle parfait, car celui-ci apparaît comme un parallélogramme quelconque à cause de l'effet de perspective. Cette étape, qui utilise une approximation, est réalisée grâce à un outil provenant de IDL (Interactive Data Language) et est présentée dans [58].

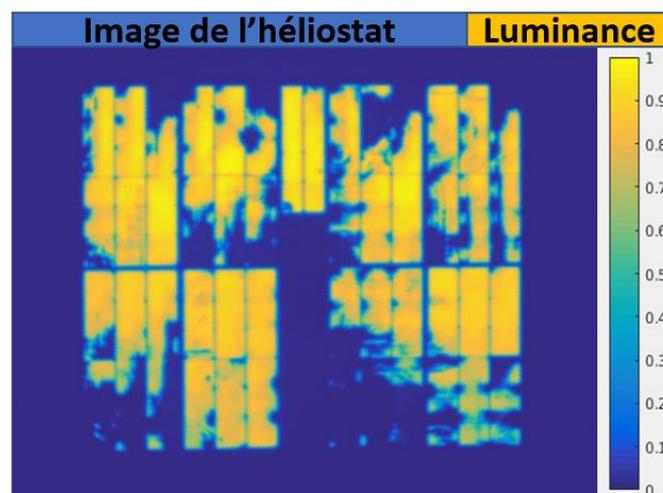


FIGURE II-15 : Image de l'héliostat après avoir été redressée et recentrée par le processus de préparation au calcul des pentes.

Le diagramme de la FIGURE II-16 permet de résumer les principales étapes du processus de préparation des images aux calculs de reconstruction des pentes. Il est pertinent de rappeler que les

images d'entrée sont prétraitées au préalable pour réduire les effets des biais liés au système d'acquisition (bruit d'obscurité, champ plat, incertitude sur la valeur de la densité optique).

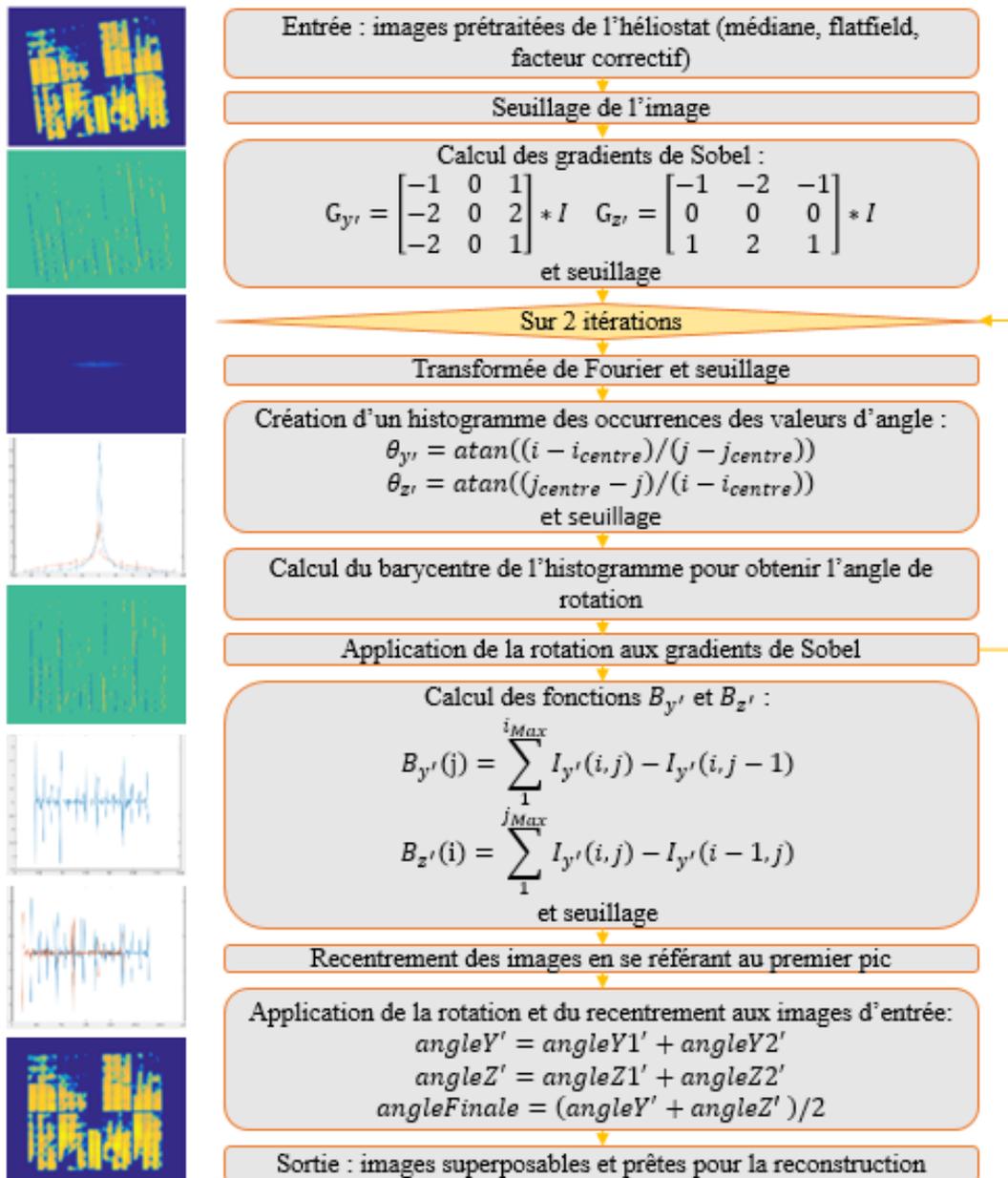


FIGURE II-16: Diagramme du processus du prétraitement des images brutes pour les rendre utilisables par le programme de reconstruction des pentes.

La différence notable qui existe entre ce processus de préparation des images et celui de la méthode de rétro-visée à quatre caméras est l'absence de redimensionnement des images. En effet, dans la méthode précédente, l'objectif est que les images de l'héliostat doivent couvrir tout le champ. Ceci nécessite notamment d'utiliser une fonction d'interpolation pour agrandir l'image d'un héliostat. Or dans le processus de la méthode optimisée de rétro-visée à quatre caméras, nous nous affranchissons de cette contrainte, dont l'utilisation est un risque supplémentaire de déformer les données brutes.

## II.3. Processus de reconstruction optimisé de la méthode de rétro-visée à quatre caméras

### II.3.1. Processus de tracé de rayon inverse et de reconstruction

La méthode optimisée de rétro-visée à quatre caméras est une amélioration de la méthode de rétro-visée à quatre caméras, utilisant un processus de tracé de rayons inverse pour obtenir les pentes de surface de l'héliostat. Les pentes sont toujours calculées en utilisant une fonction de coût, mais la géométrie de l'héliostat est prise en compte pour chaque couple de solutions testées dans le processus. Pour chacun de ces couples, le chemin inverse d'un rayon est tracé de chaque caméra au Soleil et la luminance correspondante est comparée à la valeur réelle du pixel en utilisant l'erreur quadratique, comme dans la méthode précédente (cf. II.1.4). Dans ce processus, la forme de l'héliostat et les changements référentiels sont déjà pris en compte pour chaque rayon tracé, ce qui permet d'obtenir directement le résultat des pentes de surface dans le bon référentiel. De plus, le prétraitement des images brutes, nécessaire pour les rendre utilisables dans le calcul des pentes de surface, a été simplifié et utilise désormais des processus limitant la perte de données brutes.

Pour les simulations, la forme de l'héliostat est approximée par une sphère et le vecteur  $\overrightarrow{O'P'}$  sur sa surface est calculé dans le référentiel de l'héliostat  $R_H$  en tenant compte de sa distance focale  $D$  [Eq. 25]. Le vecteur unitaire  $\vec{N}_P$ , qui est normal à la surface de l'héliostat au point  $P$ , est ensuite calculé [Eq. 26]. Dans un premier temps, Ces deux vecteurs sont exprimés dans le référentiel de la tour  $R_F$  en utilisant les angles azimutaux  $\alpha_N$  et élévation  $h_N$  de l'héliostat.

$$\overrightarrow{O'P'}_{R_H} = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r^2/4D + r^4/64D^3 \\ y' \\ z' \end{pmatrix} \quad (25)$$

$$\vec{N}_{P_{R_H}} = \begin{pmatrix} u_{P_{R_H}} \\ v_{P_{R_H}} \\ w_{P_{R_H}} \end{pmatrix} = \frac{1}{d'_P} \begin{pmatrix} 1 \\ \partial x'(y', z')/\partial y' - y'(1 + r^2/8D^2)/2D \\ \partial x'(y', z')/\partial z' - z'(1 + r^2/8D^2)/2D \end{pmatrix} \quad (26)$$

où

$$d'_P = \sqrt{1 + (\partial x'(y', z')/\partial y' - y'(1 + r^2/8D^2)/2D)^2 + (\partial x'(y', z')/\partial z' - z'(1 + r^2/8D^2)/2D)^2}$$

Les coordonnées des quatre caméras  $M_i$  sont tout d'abord exprimées dans le plan du référentiel de la cible  $R_T$ , qui est incliné de 30 *degrés* par rapport à la verticale, puis dans le référentiel de la tour  $R_F$  pour calculer la direction des vecteurs réfléchis par l'héliostat [Eq. 27].

$$\overrightarrow{O'M_i}_{R_F} = P_{R_T \rightarrow R_F} \overrightarrow{O'M_i}_{R_T} = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\pi/6) & 0 & -\sin(\pi/6) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\pi/6) & 0 & \cos(\pi/6) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x'_i \\ y'_i \\ z'_i \end{pmatrix} \quad (27)$$

Le vecteur  $\overrightarrow{PM_i}$ , qui correspond au rayon réfléchi de l'héliostat vers les caméras, est ensuite calculé en utilisant (25) et (27), son vecteur unitaire correspondant est noté  $\vec{R}_{P_i}$ . En utilisant le vecteur normal à la surface de l'héliostat  $\vec{N}_{P_{R_F}}$  et les rayons réfléchis  $\vec{R}_{P_i}$ , les vecteurs  $\vec{S}_{P_i_{R_F}}$  (de l'héliostat au Soleil) peuvent être calculés en utilisant la loi de réflexion de Snell-Descartes dans le référentiel de la tour  $R_F$  [Eq. 28]. Ils sont exprimés dans le référentiel Soleil  $R_S$ , en utilisant les angles azimutaux  $\alpha_S$  et élévation  $h_S$  du Soleil [Eq. 29]. Les 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> composantes de  $\vec{S}_{P_i_{R_S}}$  sont utilisées pour trouver les angles  $\varepsilon_i$  [Eq. 30] et donc obtenir la luminance.

$$\vec{S}_{P_i_{R_F}} = 2 \left( \vec{N}_{P_{R_F}} \cdot \vec{R}_{P_i} \right) \cdot \vec{N}_{P_{R_F}} - \vec{R}_{P_i} \quad (28)$$

$$\vec{S}_{P_{iR_S}} = \begin{pmatrix} u''_{P_{iR_S}} \\ v''_{P_{iR_S}} \\ w''_{P_{iR_S}} \end{pmatrix} = P_{R_F \rightarrow R_S} \vec{S}_{P_{iR_F}} = \begin{bmatrix} \cos(a_S)\cos(h_S) & \sin(a_S)\cos(h_S) & \sin(h_S) \\ -\sin(a_S) & \cos(a_S) & 0 \\ -\cos(a_S)\sin(h_S) & -\sin(a_S)\cos(h_S) & \cos(h_S) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u''_{P_{iR_F}} \\ v''_{P_{iR_F}} \\ w''_{P_{iR_F}} \end{pmatrix} \quad (29)$$

$$\varepsilon_i = \sqrt{v''_{P_{iR_S}}^2 + w''_{P_{iR_S}}^2} \quad (30)$$

Le programme de reconstruction utilise donc le calcul de tracé de rayon pour comparer des valeurs de luminance théoriques à la mesure. Il permet également d'estimer la réflectivité spéculaire, supposée identique aux quatre caméras. Le processus de calcul des pentes peut être résumé en cinq étapes :

- Les paramètres d'entrée tels que la position et l'orientation de l'héliostat, les coordonnées des caméras et du Soleil sont enregistrées. Deux vecteurs contenant les valeurs de pentes à tester sont également initialisés. Les quatre images provenant des caméras sont également enregistrées.
- Pour chaque pixel, l'on choisit un couple de pentes à tester en faisant varier les deux vecteurs.
- Le calcul de tracé de rayon inverse est effectué pour chaque caméra, en prenant en compte la valeur du couple de pentes ainsi que de la caméra concernée. Ce calcul permet d'obtenir une valeur théorique de luminance mesurée à ce pixel pour chaque caméra.
- Chaque valeur de luminance est comparée (de façon quadratique) à la valeur mesurée par chaque caméra. Ce processus permet d'obtenir une valeur d'erreur quadratique totale pour chaque couple de pentes à ce pixel, ce qui correspond à une valeur de fonction de coût.
- Le couple de pente correspondant à la valeur minimale de la fonction de coût est sélectionné pour être attribué à ce pixel et le processus entier se répète pour reconstruire toute la carte des pentes.

L'ensemble du processus de calcul des pentes est résumé dans la FIGURE II-17. Un algorithme d'optimisation, basé sur l'algorithme de Nelder-Mead [49], a été implémenté dans cette méthode et permet de converger vers la meilleure solution plus rapidement qu'avec une simple boucle de test. De plus, l'efficacité de ce code est meilleure lorsqu'il démarre directement avec des solutions de première estimation, c'est-à-dire des pentes calculées analytiquement au préalable. Par conséquent, nous utilisons les résultats de la méthode analytique comme solutions de première estimation. Le code d'optimisation converge ensuite vers la valeur minimale de la fonction de coût. De plus, les résultats sont directement dans le référentiel final et l'influence de la forme de l'héliostat est prise en compte. Nous n'avons donc pas besoin d'appliquer les calculs de référentiels et la soustraction des aberrations inhérentes à l'héliostat après les résultats de calculs des pentes. Tous ces avantages en font une méthode plus directe et plus rapide que la méthode de rétro-visée à quatre caméras.

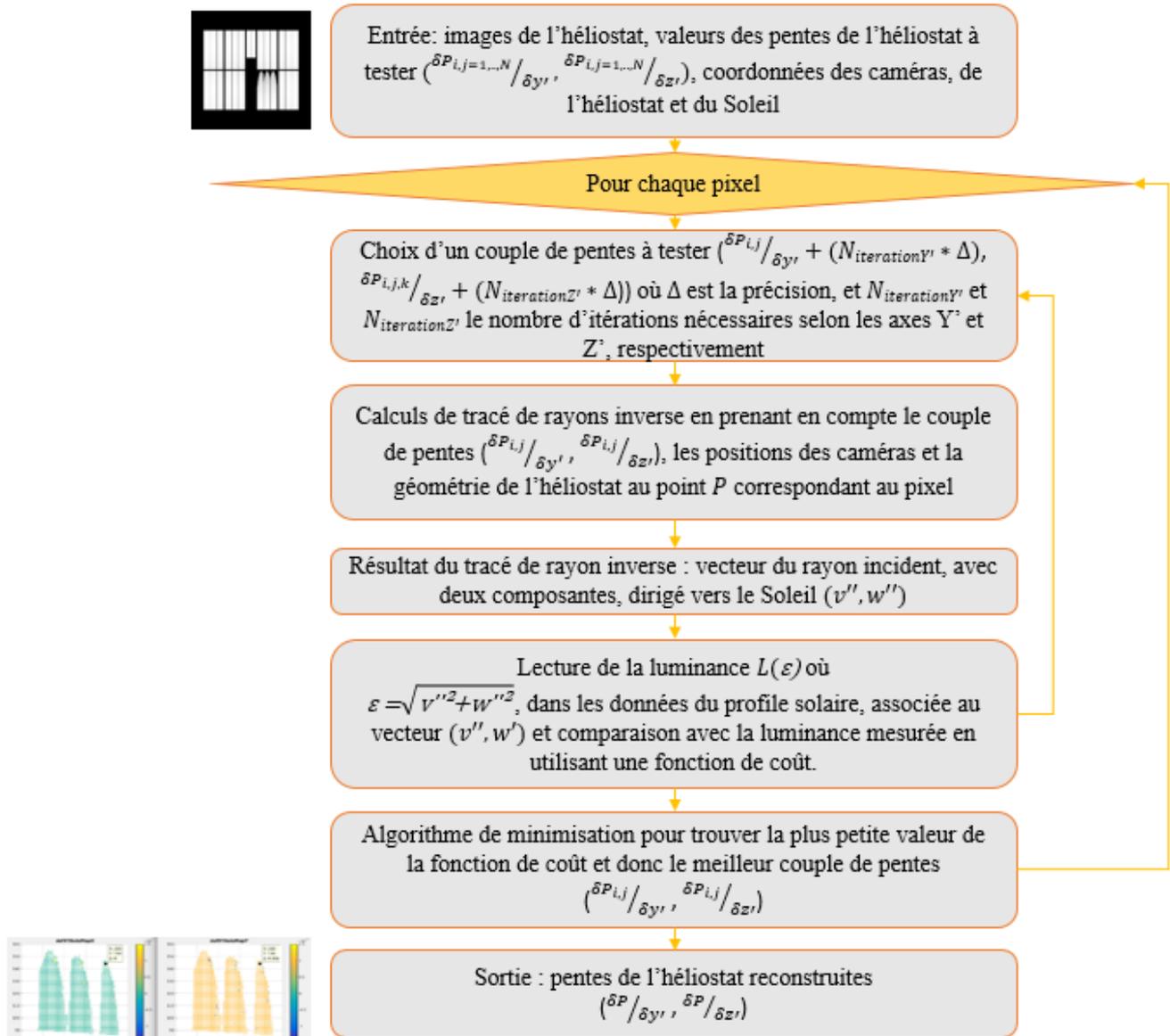


FIGURE II-17: Diagramme simplifié du processus de calcul des pentes de la méthode optimisée de rétro-visée à quatre caméras.

## II.3.2. Evaluation de la méthode avec le logiciel COSAC

### II.3.2.A. Présentation du logiciel COSAC

Le logiciel COSAC (Calculs Optiques Simplifiés pour Analyse de Combinaisons) est un moteur de calcul par tracé de rayons, comportant environ 50 000 lignes de code en langage Fortran 77, développé par F. Hénault à partir de 1983. A l'origine dédié au calcul de concentration de l'énergie solaire pour les installations d'Odeillo (Grand Four Solaire) et de Targassonne (Centrale Thémis), il a ensuite été adapté à l'instrumentation optique dans le cadre du spatial et de l'observation astrophysique. COSAC a notamment été utilisé pour étudier la faisabilité de la méthode quatre caméras [53]. La méthode de lancer de rayon utilisée par ce logiciel consiste à calculer des trajectoires de rayons lumineux en fonction des surfaces qu'ils rencontrent et de la source. La force de COSAC se situe dans la pluralité des référentiels qu'il est possible d'implémenter pour positionner des organes optiques. Dans le mode séquentiel, qui est le mode par défaut, le logiciel écarte du calcul les rayons dont le chemin ne correspond pas à ce qui est prévu par l'utilisateur et permet de gagner en temps de calcul. En revanche, dans le mode non-séquentiel le logiciel calcule le

cheminement des rayons sans prendre en compte l'ordre imposé par l'utilisateur, ce qui permet de rendre compte des processus de diffusion et de réflexions multiples, mais qui prend sensiblement plus de temps de calcul.

Pour simuler une mesure expérimentale, il faut définir la longueur d'onde des rayonnements, les coordonnées des caméras et de la pupille. Ensuite la géométrie de l'héliostat est introduite dans la partie non séquentielle du calcul de tracé de rayon, ainsi que le fichier comprenant le profil 2D de luminance du Soleil. Il y a également les fichiers de sortie contenant les cartes de luminance de l'héliostat simulé et des résultats intermédiaires du processus de calcul. Dans cette étude, un héliostat de la centrale électrique de la tour Thémis à Targassonne a été simulé (cf. FIGURE II-18). La surface de l'héliostat est de plus de  $50\text{ m}^2$  et les quatre caméras sont proches du récepteur de la tour, à environ  $130\text{ m}$  de l'héliostat. Pour la validation numérique de la méthode de reconstruction, un héliostat a été simulé avec des défauts connus sur deux de ses modules. Les défauts sont de  $-1\text{ mrad}$  et  $+1\text{ mrad}$  autour de l'axe  $Y'$  (donc selon  $Z'$ , en élévation) sur les 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> modules respectivement. Aucun défaut d'azimut n'est introduit autour de l'axe  $Z'$ . Nous avons utilisé deux profils de Soleil différents pour générer la source et nous avons comparé les résultats. Le premier profil solaire est une version modifiée de la formule José [Eq. 31], établie empiriquement par P. D. José en 1957 dans [66], et le second est un profil solaire bruité issu des images réelles du soleil. L'héliostat, qui est considéré en mode de suivi solaire, réfléchit les rayons du Soleil vers les quatre caméras.

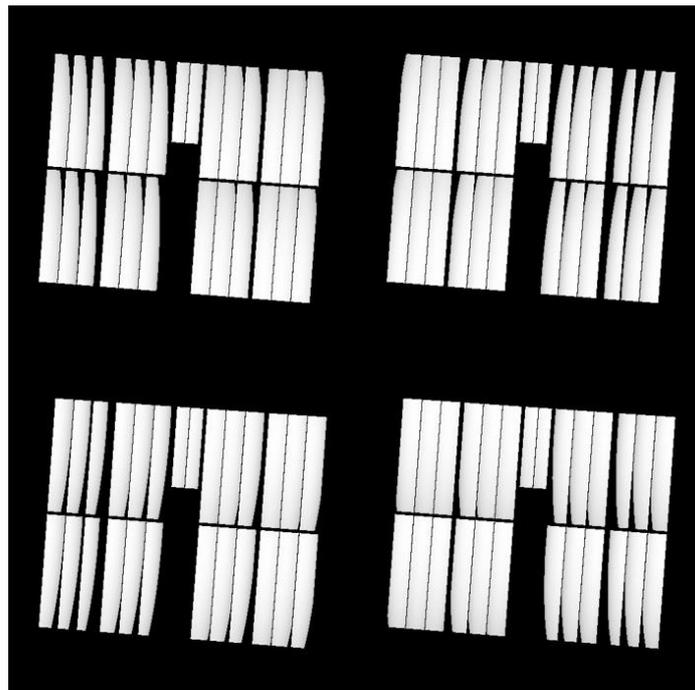


FIGURE II-18: Images de l'héliostat simulé par COSAC selon les points de vue des quatre caméras.

### II.3.2.B. Profils de luminance des sources

Pour simuler la réflexion un héliostat de la centrale Thémis, nous devons générer une source qui agira comme le Soleil. Le profil solaire a déjà été mesuré et son aspect global est relativement connu, mais il dépend des conditions météorologiques au moment de l'expérimentation. Pour réaliser cette étude, le profil du Soleil a été mesuré, moyenné (cf. FIGURE II-19) puis utilisé comme donnée d'entrée dans le logiciel COSAC. Il correspond à un fichier contenant les valeurs de luminance en fonction de l'angle apparent, et un seuil lui est appliqué pour supprimer les luminances des bords du disque, dont les valeurs sont plus faibles que l'intensité du bruit de mesure.

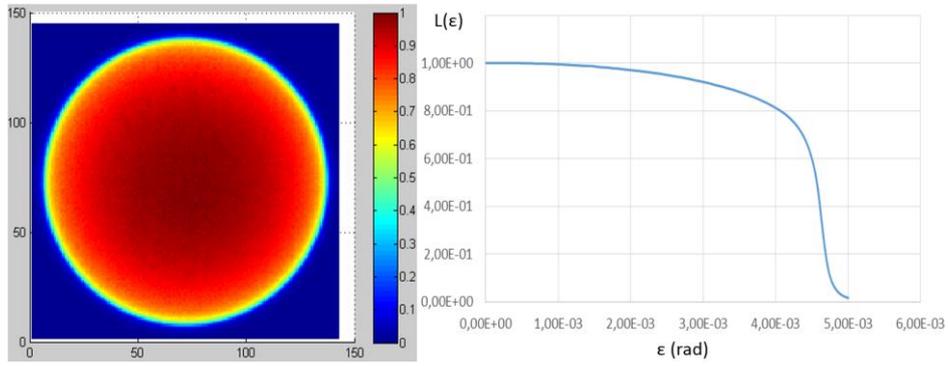


FIGURE II-19 : Médiane de 100 images du Soleil (gauche) et profil de luminance 1D résultant (droite).

Le profil bruité du soleil contient un signal résiduel provenant du bruit de mesure de la caméra et des conditions météorologiques pendant les acquisitions. Pour tester et valider la méthode de rétro-visée à quatre caméras numériquement, un profil solaire sans bruit de mesure est d'abord envisagé [FIGURE II-20]. Par conséquent, un profil solaire basé sur la formule José a été généré [Eq. 31] et les paramètres, qui sont le coefficient  $A$  et la puissance  $\xi$  (initialement égal à 2), ont été ajustés pour trouver la meilleure similitude possible avec l'apparence du profil solaire réel. Les angles  $\varepsilon$  et  $\varepsilon_{MAX}$  expriment respectivement l'angle apparent et la taille angulaire du Soleil. Ce profil analytique est donc utilisé pour valider la méthode de rétro-visée, tandis que le profil issu d'images réelles est utilisé pour tester la robustesse de la méthode face au bruit de mesure.

$$L(\varepsilon) = A + (1 - A) \sqrt{1 - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{MAX}}\right)^\xi} \quad (31)$$

où  $A = 0.679$  ;  $\varepsilon_{MAX} = 4.360 \text{ mrad}$  et  $\xi = 2.222$

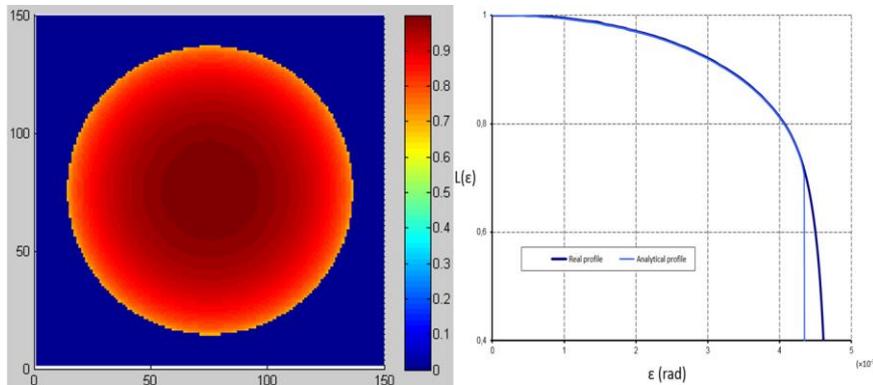


FIGURE II-20: Soleil générée à partir de la formule modifiée de José (à gauche) et son profil de luminance 1D (bleu clair) comparé au profil du Soleil issu d'images réelles (bleu foncé) jusqu'à 4.360 mrad (à droite).

### II.3.2.C. Résultats de reconstruction des pentes

Les résultats de la méthode optimisée de rétro-visée à quatre caméras montrent qu'elle est meilleure que la méthode de rétro-visée à quatre caméras, dont les résultats selon l'axe  $Y'$  était contaminés par des valeurs de pentes parasites. Les résultats de la méthode optimisée de rétro-visée à quatre caméras ont une erreur relative moindre et sont nettement moins sensibles à la contamination des données selon l'axe  $Y'$  (cf. FIGURE II-21). Les facettes ayant des défauts introduits contiennent les zones réfléchies du Soleil, qui sont plus proches des bords du disque solaire. Or, ces zones du disque sont susceptibles de provoquer des erreurs : la forte variation en luminance avec l'angle apparent qui y règne nécessiterait un pas d'incrémentations des pentes plus précis que dans le reste du disque pour minimiser correctement la fonction de coût. C'est pourquoi les valeurs des

pixels formant le contour du signal mesuré sur les facettes ont été négligées. Ce processus d'érosion a été appliqué pour supprimer les valeurs de luminance pour les pixels proches des bords des facettes, là où les rayons issus des bords du disque sont plus susceptibles d'apparaître. TABLE II-3 résume les résultats obtenus avec les différentes méthodes.

TABLE II-3 : Récapitulatif des valeurs d'erreurs relatives obtenues avec les différentes méthodes de reconstruction des pentes.

Méthode	Sun profile	Module	
		2	3
		Erreur relative selon Y' / Z' axis (%)	
Analytique	Formule de José généralisée	15.5 / 0.7	14.7 / 0.9
	Mesuré	14.6 / 11.6	14.2 / 13.1
Optimisée	Formule de José généralisée	14.7 / 1.8	13.8 / 2.1
	Mesuré	16.3 / 10.1	17.8 / 7.1
Optimisée avec le calcul de tracé de rayon inverse	Formule de José généralisée	0.5 / 0.6	0.5 / 0.5
	Mesuré	1.5 / 1.6	1.1 / 4.2

En utilisant le profil analytique du Soleil, l'erreur relative est d'environ 0,5% selon les axes Y' et Z', contre 14% et 2% respectivement selon Y' et Z' avec la méthode de rétro-visée à quatre caméras. Avec le profil du Soleil réel, l'erreur relative est d'environ 1,3% selon Y' et 2,9% selon l'axe Z', contre 8.6% et 17% respectivement selon Y' et Z' avec la méthode de rétro-visée à quatre caméras. Un aperçu des résultats des méthodes de rétro-visée à quatre caméras et optimisée de rétro-visée à quatre caméras est présenté dans la FIGURE II-21.



## Chapitre 3

### III. Etude expérimentale de la méthode de rétro-visée à quatre caméras

Dans ce chapitre, il est question de la mise en œuvre de la méthode expérimentale de rétro-visée à quatre caméras. Les expérimentations se font à la centrale Thémis de Targassonne (France). Le matériel, dont la mise en place doit tenir compte de la position de l'héliostat utilisé pour les acquisitions, nécessite une calibration préalable effectuée au 8<sup>e</sup> étage du Grand Four Solaire d'Odeillo. Le mode d'acquisition des images ainsi que le protocole expérimental mis en place durant les campagnes de mesures sont détaillés dans ce chapitre.

#### III.1. Environnement expérimental des campagnes de mesures et préparation du matériel

##### III.1.1. Centrale de Thémis et conditions expérimentales

Les campagnes de mesures se déroulent à la centrale Thémis de Targassonne à une altitude d'environ 1700 m, dans les Pyrénées Orientales (France). Cette installation solaire à concentration, qui appartient au Conseil Général des Pyrénées Orientales, a été inauguré en 1983 elle culmine à 101.5 m de hauteur et fait face à un champ de 201 héliostats de 54 m<sup>2</sup> chacun, dont 106 sont opérationnels à ce jour (cf. FIGURE III-1). Ayant pour objectifs de démontrer la faisabilité de la technologie des centrales à tour et de développer des outils pour la conception et l'étude de telles installations, la centrale de Thémis a été reliée au réseau EDF jusqu'en 1986, comme évoqué dans [53]. Ce projet pilote avait comme objectif d'intégrer les retours d'expériences dans l'optique d'une utilisation industrielle de cette technologie. Le financement de la centrale prend fin en septembre 1986 à cause du nouveau contexte économique et pétrolier, puis elle devient un observatoire pour la détection de rayonnements gamma cosmiques. A partir de 2003, elle est réutilisée comme démonstrateur pour des projets de recherches tel que PEGASE (Production of Electricity from Gas and Solar Energy) et Next-CSP (Concentrated Solar Power) dont la présente étude fait actuellement partie et qui consiste en le développement d'une technologie basée sur un récepteur à particules portées à haute température (800°C) [57].



FIGURE III-1 : Photographie du site de Thémis (Targassonne, France) avec son récepteur à tour et son champ d'héliostats.

Les expérimentations se déroulent au premier étage de la tour, qui se situe à 75.9 m de hauteur, au niveau d'une cible métallique passive non réfrigérée appelée Mini-Pégase (cf. FIGURE III-2). L'accès à la cible est rendu possible par un ascenseur ou des escaliers. Des escaliers et des échelles permettent l'accès jusqu'au 4<sup>e</sup> et dernier étage, puis une échelle pour atteindre le toit de la tour. La mise en place du matériel nécessaire aux méthodes à une caméra est incluse dans celle de la méthode à quatre caméras. Nous avons donc effectué les mêmes positionnements de caméras ainsi que les mêmes câblages que pour cette méthode : à savoir, les quatre caméras placées derrière la cible passive, qui est percée à au moins quatre endroits, disposés tels les sommets d'un carré, pour leur laisser le champ libre lors de l'acquisition. La cible est située à environ 1.80 m de hauteur par rapport au plancher du 1<sup>er</sup> étage et la mise en place des caméras derrière celle-ci est effectuée en s'aidant d'une table pour se surélever. L'ordinateur ainsi que le switch sont placés sur cette table et les câbles Ethernet réalisent la liaison entre ces différents organes. Une cinquième caméra est placée sur le robot de suivi solaire lui-même situé sur le toit de la tour et sa mise en place doit être effectuée en utilisant plus d'une vingtaine de mètres d'échelle, pour être en mesure de la relier au switch par un câble Ethernet.

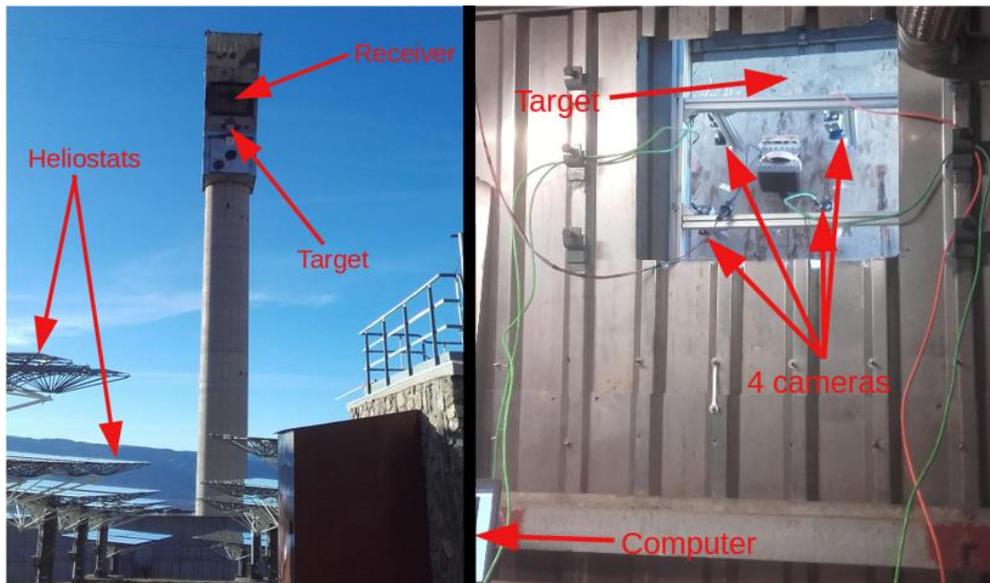


FIGURE III-2 : (A gauche) Photographie de la tour de la centrale Thémis. (A droite) Photographie de la cible Mini-Pégase vue depuis l'intérieur de la tour.

Chaque caméra doit être alignée correctement et le réglage du grandissement doit être réalisé manuellement. Tous ces ajustements et vérifications impliquent, notamment pour la caméra située sur le toit de la tour, de prendre le temps de se déplacer entre l'ordinateur et les caméras pour tenir compte de leurs retours et parvenir à des réglages optima. Les conditions météorologiques propices à des mesures de qualité sont un Soleil non obstrué par des nuages et des rafales de vents ne dépassant pas 25 à 30  $km/h$ , pour éviter que les mesures de la caméra n°5 ne soient perturbées par les vibrations provenant du robot de suivi solaire.

### III.1.2. L'héliostat CETHEL III E06

L'héliostat CETHEL III E06 (que nous appellerons E06) a été utilisé pour réaliser des campagnes de mesures dans le cadre de [53] – de 2014 à 2017 - pour des raisons pratiques. En effet, cet héliostat avait fait l'objet de mesures de photogrammétrie en 2012 par une équipe CENER espagnol (Centro Nacional de Energías Renovables). Il était donc le seul héliostat sur lequel l'on disposait des données sur ses surfaces réfléchissantes (en plus de sa géométrie théorique initiale) et constituait une opportunité pour valider la méthode de rétro-visée à quatre caméras. Finalement, les résultats issus de l'étude de photogrammétrie se sont avérés trop bruités pour être utilisés comme comparaison de la méthode de rétro-visée à quatre caméras. Le E06 est placé à un endroit du champ d'héliostats qui permet un alignement commode des caméras, et les données issues de la précédente thèse concernent ce même héliostat. Nous avons donc choisi de conserver le même choix d'héliostat, montré dans la FIGURE III-3, pour effectuer nos mesures.

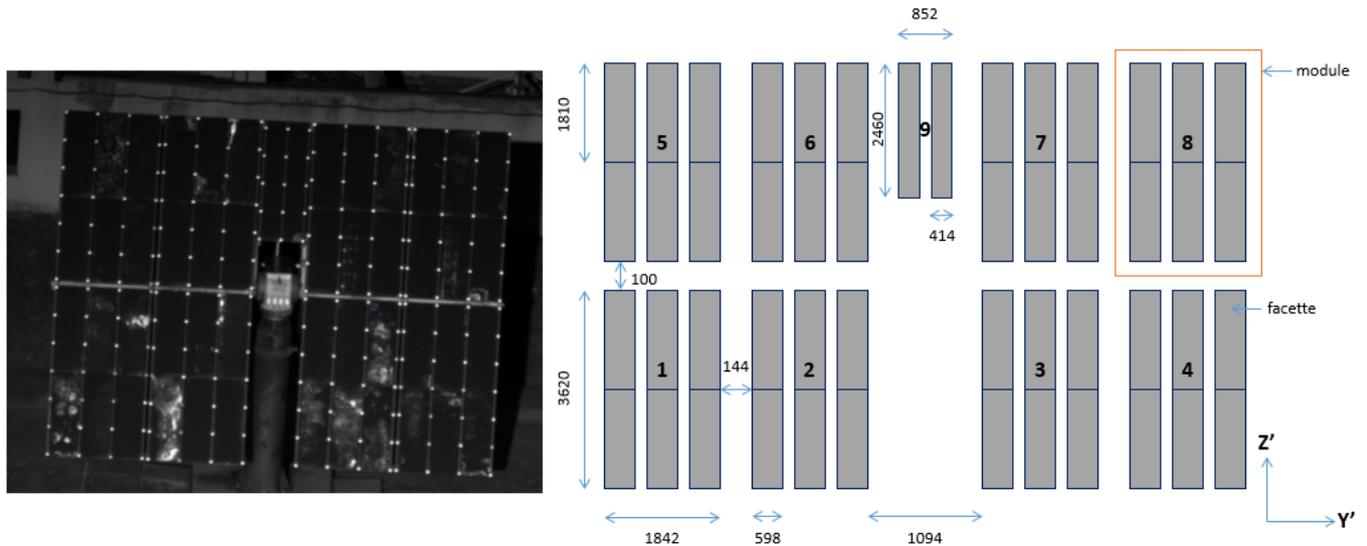


FIGURE III-3: (A gauche) Photographie de l'héliostat en position neutre avec une des quatre caméras sans les filtres optiques. (A droite) Schéma de la disposition des miroirs de l'héliostat E06.

Comme précisé dans [53], l'héliostat E06 est composé de 9 modules, dont 8 sont composés de 6 facettes identiques. Le module n°9 est quant à lui composé de deux facettes plus allongées. Les facettes sont des miroirs cylindro-paraboliques d'axe  $Y'$ , ils possèdent donc une courbure selon l'axe  $Z'$  mais n'en possèdent aucune selon l'axe  $Y'$ . Le rayon de courbure  $R_{fac}$  est identique pour toutes les facettes et dans chaque module, et elles sont positionnées sur une sphère de rayon  $R_{fac}$ . La distance focale de chaque module est donc égale à  $f_{mod} = R_{fac}/2$ . Les modules sont positionnés sur la structure de l'héliostat qui est parabolique de rayon  $R_{struct}$  et donc de focale égale à  $f_{struct} = R_{struct}/2$ . Ce jeu de miroirs et de distances focales permet de faire varier la distance focale de l'héliostat en modifiant sa structure.

### III.1.3. Le matériel expérimental et le logiciel d'acquisition

Afin de mener à bien cette étude, nous disposons d'outils matériels et numériques nous permettant d'acquérir des images dans des conditions de rayonnement solaire concentré. Nous disposons de cinq caméras CMOS (cf. Annexe B) avec leurs filtres (cf. Annexe C), de câbles Ethernet, d'un ordinateur dédié en partie à l'expérimentation, ainsi que d'un switch. Ce matériel, piloté par un programme d'acquisition, permet de collecter et d'enregistrer des images en temps réel. Un schéma présenté dans la FIGURE III-4 résume les principaux éléments du système d'acquisition ainsi que leur agencement.

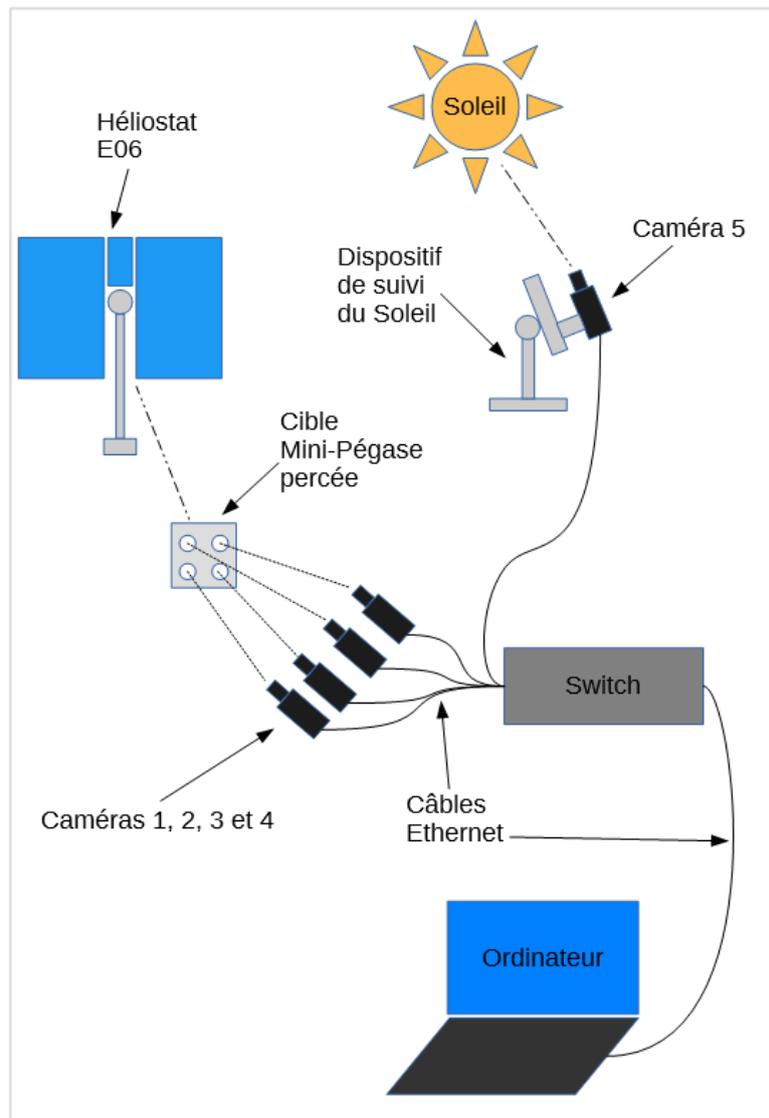


FIGURE III-4: Schéma simplifié du matériel d'acquisition et de son agencement, utilisé lors des campagnes expérimentales de la méthode de rétro-visée à quatre et une caméra(s).

Les caméras utilisées pour l'acquisition des données sont des capteurs CMOS ayant une dynamique de 10 bits et une résolution de 1024 par 1280. Elles sont chacune complétées d'un objectif TAMRON d'une distance focale de 75 mm et ayant une ouverture allant de 3.9 à 32. Chaque capteur de caméra est également protégé par un jeu de filtres dont la densité résultante vaut 10. Les choix des objectifs, des densités ainsi que les tests qui y ont mené ont été réalisés dans le cadre de [53] et sont présentés dans la TABLE III-1. La cible Mini-Pégase permet de protéger l'électronique des caméras ainsi que l'opérateur contre le rayonnement concentré, pendant que celles-ci visent l'héliostat E06. La cible est une plaque métallique, comportant des trous disposés en carré de 40 centimètres de côté pour laisser passer les objectifs des quatre caméras, inclinée de 30 degrés vers le bas. Chaque caméra est fixée au dispositif grâce à une petite plaque en métal amovible liée à un barreau profilé par une liaison annulaire, réglable par une vis. La caméra n°5 est quant à elle fixée au robot de suivi solaire par une plaque métallique, elle-même liée au robot par une liaison annulaire également réglable par une vis. Les caméras sont reliées à un switch par des câbles Ethernet RJ45 et un câble du même type est utilisé pour relier le switch à l'ordinateur portable. Le switch permet de collecter et de redistribuer efficacement les données collectées par les caméras de façon à optimiser

la vitesse d'acquisition. La FIGURE III-5 montre les différents groupes d'éléments du système d'acquisition.

TABLE III-1 : Récapitulatif des principaux éléments du matériel expérimental avec leur description.

MATÉRIEL	DESCRIPTION	RÔLE
5 Caméras : UI-5240RE-M- GL PoE Rev. 2	 <ul style="list-style-type: none"> <li>- Temps d'exposition : 2, 3 ou 4 ms.</li> <li>- Dynamique : 10 bits.</li> <li>- 1280 X 1024 pixels.</li> </ul>	Acquisition des images du Soleil et de l'héliostat en prenant plusieurs temps d'exposition.
5 Objectifs : TAMRON 1A1HB	 <ul style="list-style-type: none"> <li>- Distance focale : 75 mm.</li> <li>- Ouverture : 3,9 à 32.</li> </ul>	Grossissement permettant d'observer l'héliostat avec la plus grande précision possible.
10 Densités Optiques : 7 + 3 DO	 <ul style="list-style-type: none"> <li>- DO : 10 par caméra.</li> </ul>	Observation de flux intenses provenant du Soleil et d'un héliostat.
1 Switch : NetGear ProSafe	 <ul style="list-style-type: none"> <li>- Alimentation par le réseau public.</li> <li>- 8 ports Ethernet</li> <li>10/100/1000 Mbits.s<sup>-1</sup>.</li> </ul>	Centralisation des données issues des caméras.
7 câbles Ethernet :	 <ul style="list-style-type: none"> <li>- Débit : 100 Moctets.s<sup>-1</sup>.</li> </ul>	Transmission des données entre les caméras et le Switch, puis entre le Switch et l'ordinateur.

Pour des raisons pratiques, seulement quatre des cinq caméras sont utilisées pour les expérimentations, car la caractérisation de la caméra n°1 a mis en lumière un défaut non négligeable faussant potentiellement les données acquises par cette caméra. Pour pallier ce manque, nous utilisons la caméra n°5 pour acquérir des images du Soleil avant puis après les mesures à quatre caméras ; mesures au cours desquelles la caméra n°5 fait office de caméra n°1.



FIGURE III-5 : (En a) Photographie de la cible Mini-Pégase vue de derrière par l'opérateur, avec les quatre caméras fixées sur l'armature métallique. (En b) Photographie du robot de suivi solaire situé sur le toit de la tour Thémis de Targassonne. (En c) Emplacement de la caméra n°5 sur le robot de suivi solaire pour capturer des séries d'images de l'astre, avant et après les prises d'images de l'héliostat par les quatre caméras.

Le logiciel d'acquisition utilisé pour piloter les caméras est Ueye, conçu par IDS (Imaging Development System). Il permet de gérer la connexion des caméras, d'afficher leur état de fonctionnement et de visualiser leur point de vue. Le logiciel est particulièrement utile pour régler la mise au point sur l'héliostat ou le Soleil, ainsi que pour l'alignement des caméras. L'acquisition des données se fait par un programme appelé « cam.sh » qui permet de contrôler les principaux paramètres de mesure tels que le temps d'exposition, la cadence de prise d'images, l'ordre dans lequel les caméras acquièrent les images et les éventuels temps de latences nécessaires entre deux prises d'images. Les principaux paramètres et leur valeur associée sont consignés dans la TABLE III-2. Ce programme est utilisé dans un second temps, une après que le logiciel Ueye a permis de placer correctement les caméras et de régler leur mise au point.

TABLE III-2 : Tableau récapitulatif des paramètres pertinents dans les acquisitions de la méthode de rétro-visée à quatre caméras.

PARAMETRES	VALEUR
Temps d'exposition	2 millisecondes
Retard entre deux caméras	0 ou 50 millisecondes
Nombre d'images par caméra	2 ou 101

#### III.1.4. La calibration des caméras et des filtres optiques

La calibration relative des caméras avec leurs filtres permet de corriger les différences d'intensité mesurées selon l'ensemble considéré. En ce qui concerne les caméras seules, le travail a été effectué dans le cadre de [53] à l'aide notamment d'une sphère intégrante et cela permet de tenir compte, pour chaque caméra, du signal présent sur les images en obscurité, ainsi que du champ plat dans le prétraitement des images expérimentales. Malgré ces corrections, le signal varie d'une caméra à l'autre et ces différences sont dues aux filtres optiques dont les caractéristiques varient quelque peu par rapport à celles mentionnées dans les constructeurs. Ceci avait également été pris en compte dans la thèse [53], mais le travail de caractérisation des filtres doit être effectué fréquemment, notamment avant une campagne de mesures. Il nous faut donc évaluer les différences en intensité mesurée pour les prendre en compte dans les traitements des données expérimentales issues des campagnes de mesures. Pour ce faire, il faut que les caméras acquièrent simultanément des images du Soleil :

- Nous les installons sur un robot de suivi solaire positionné au 8<sup>e</sup> étage du Grand Four Solaire d'Odeillo.
- Une fois que le dispositif d'acquisition est correctement installé, nous réglons l'alignement des caméras, puis leur mise au point. Nous pouvons alors démarrer l'acquisition des données et obtenir une centaine d'images par caméra, dans un intervalle de temps de quelques secondes. Cette durée est négligeable devant la durée nécessaire pour que la course du Soleil affecte sa luminance de manière significative. Nous considérons donc que les 100 images par caméra concernent une source immobile et que toutes les caméras prennent leurs images simultanément.
- Pour chaque caméra, nous vérifions que la caméra a été correctement fixée au robot de suivi solaire en s'assurant que la première ainsi que la centième image sont quasi-superposables.
- Ensuite nous appliquons un filtre médian, c'est-à-dire que chaque pixel a une valeur résultante égale à la médiane des cent valeurs de ce pixel sur les cent images.
- Nous ôtons le signal d'obscurité de l'image résultante et également le champ plat. Nous appliquons le champ plat à l'image médiane et obtenons l'image finale.
- L'intégralité du signal de cette image est sommée, nous avons alors une quantité de luminance mesurée totale pour chaque caméra et nous pouvons les comparer.
- La caméra n°1 (qui est également la caméra n°5 tel qu'évoqué dans la section III.1.3), qui a la valeur maximale, est choisi comme étant la référence, son facteur correctif est donc égale à 1, tandis qu'il varie jusqu'à 1.9 pour d'autres caméras (cf. TABLE III-3). Ces facteurs correctifs seront donc multipliés aux images acquises et permettront de corriger les écarts de densité optique des filtres. Le choix des chiffres significatifs des facteurs correctifs dépend de la valeur maximale des pixels des images. Ceux-ci contiennent des valeurs (d'intensité à un pixel) contenues dans une plage d'environ 1000 à 3000. Un quatrième chiffre significatif du facteur correctif peut potentiellement modifier le résultat de la correction de l'intensité d'un à quelques pixel(s) et reste donc pertinent.

TABLE III-3 : Tableau regroupant les valeurs de facteurs correctifs utilisés pour chaque caméra.

Caméra	Facteur correctif
1 et 5	1.0000
2	1.9195
3	1.5802
4	1.5126

### III.1.5. Les modes d'acquisition des images

Le mode d'acquisition des images détermine la quantité de données collectées dans un intervalle de temps et également l'ordre dans lequel les caméras acquièrent ces images. Ces paramètres ont une grande influence sur le rapport signal sur bruit, ou SNR pour Signal-to-Noise Ratio, et sur le caractère simultané de la prise d'images par toutes les caméras. Dans le cadre des mesures de la méthode de rétro-visée à quatre caméras, l'objectif est d'acquérir le plus d'images possibles par caméra pendant une durée inférieure au délai de rafraîchissement de l'héliostat, soit moins de trois secondes. Le programme permettant de contrôler et d'opérer le mode d'acquisition a été développé par E. Guillot. Ce programme, écrit en langage C, est inspiré de celui utilisé pour les caméras utilisées au Grand Four Solaire. Tel que détaillé dans [53], ce programme d'acquisition permet de capturer des images quasi-simultanément par les quatre caméras. Cependant, en utilisant ce programme nous sommes susceptibles de rencontrer des problèmes de télescopage des données lors de leur enregistrement. La conséquence est qu'il est rare d'obtenir plus de dix images par seconde et par caméra.

Dans le but d'augmenter le SNR ou de réduire la durée des mesures, nous avons décidé d'améliorer le système d'acquisition. Le switch utilisé pour nos expérimentations peut être configuré pour réaliser un channel bonding (cf. FIGURE III-6). Cela consiste à lier deux canaux d'entrée de données pour que celles-ci soient gérées plus efficacement par l'ordinateur. Sachant que nous disposons de quatre caméras en fonctionnement quasi-simultané pendant les expérimentations, il est judicieux de créer deux canaux de transfert, chacun prenant en compte deux caméras. L'ordinateur n'a alors plus que deux canaux d'entrée à gérer et l'enregistrement des données est plus rapide, ce qui permet aux caméras d'acquérir et de transmettre plus d'image à la seconde. Dans le cadre de la validation des méthodes de rétro-visée à une caméra, nous avons privilégié la réduction de la durée d'acquisition à l'augmentation du SNR, car l'objectif est d'obtenir des images les plus semblables possibles de l'héliostat. Désormais, il est possible d'acquérir environ sept images par seconde et par caméra, sans erreur de télescopage.

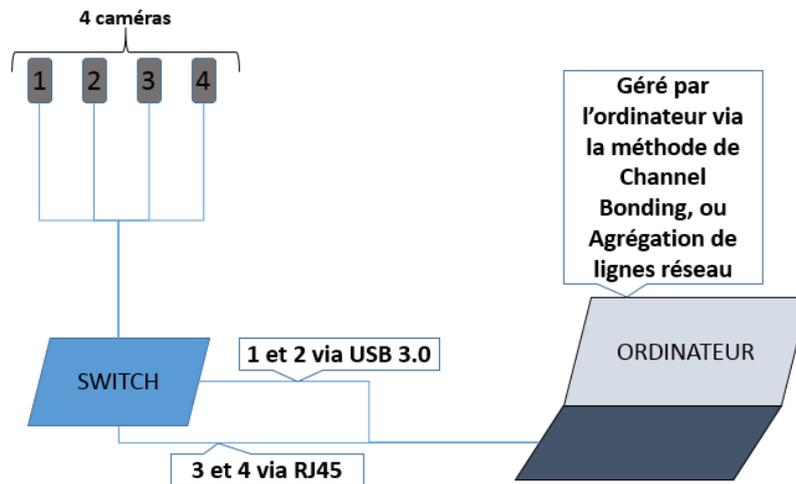


FIGURE III-6 : Schéma simplifié du processus de channel bonding (agrégation de lignes de réseau).

## III.2. Campagnes de mesures et protocoles expérimentaux

### III.2.1. Protocole de mesure des différentes méthodes

Le protocole de mesure de la méthode de rétro-visée à quatre caméras consiste à acquérir quasi-simultanément quatre images de l'héliostat (soit une par caméra) lorsque celui-ci est en mode de suivi solaire (rayonnement concentré dirigé vers le plan des caméras) (cf. FIGURE III-7). Pour ce faire, nous sommes reliés par radio au technicien responsable du champ solaire, W. Baltus, qui peut piloter l'héliostat depuis son poste de commande. Lorsque notre matériel est correctement installé et réglé, l'opérateur oriente l'héliostat de sorte à réfléchir le rayonnement solaire vers la cible Mini-Pégase, puis le verrouille en mode suivi solaire. La tache focale reste donc centrée sur la cible et l'acquisition des caméras est lancée. Cependant, l'héliostat ajuste son orientation de façon discontinue pour maintenir la tache focale centrée et chaque rafraîchissement a lieu environ toutes les trois secondes. Durant cet intervalle l'héliostat reste immobile, ce qui a pour effet de laisser la tache focale se déplacer légèrement du fait de la course du Soleil. L'objectif reste donc d'acquérir assez d'images en un temps suffisamment court pour négliger le déplacement de la tache focale. Mais le principal inconvénient de ce type de fonctionnement est la fluctuation de la tache focale provoquée périodiquement par chaque rafraîchissement de l'héliostat. L'acquisition des images doit absolument se dérouler entre ces réorientations de l'héliostat pour éviter que les fluctuations de luminances qui en découlent ne corrompent les données.

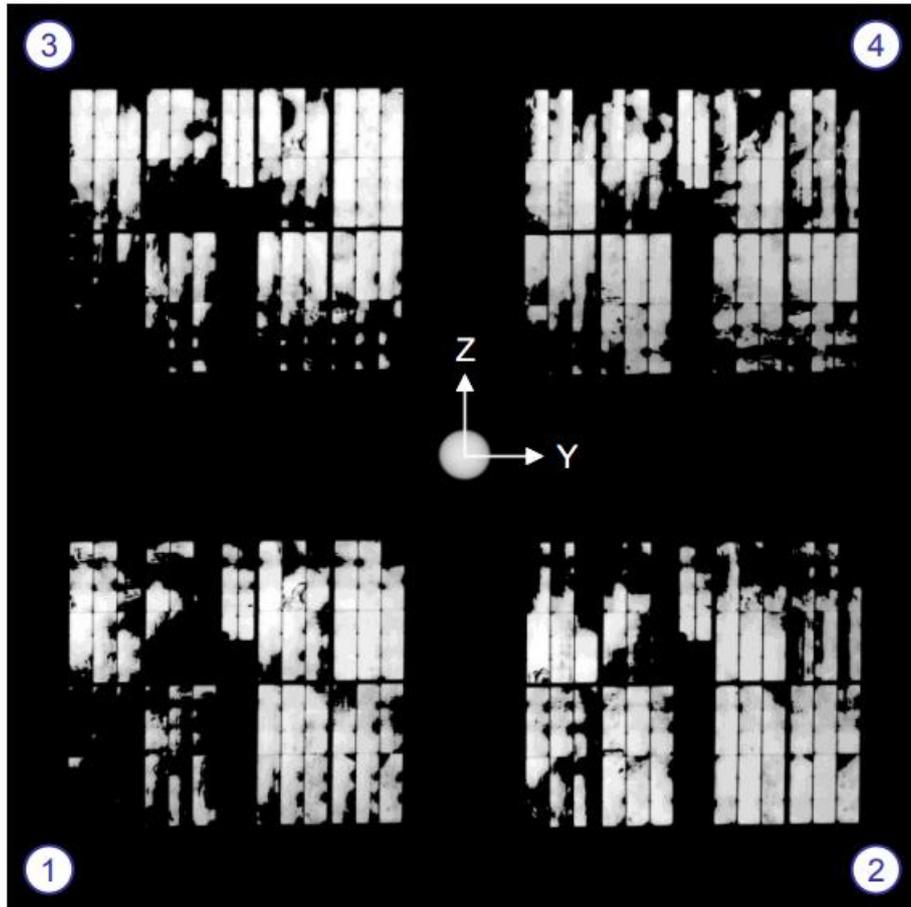


FIGURE III-7 : issue de [53] : Images prétraitées et préparées de l'héliostat sans défaut introduit, provenant des images de la campagne du 21 Décembre 2017, acquises quasi-simultanément par les quatre caméras, avec au centre l'image du Soleil résultante provenant de celle qui est placée sur le toit de la tour.

### III.2.2. Protocole d'évaluation des méthodes

L'objectif des méthodes de rétro-visée est de détecter, ainsi que de quantifier les erreurs de pentes d'un héliostat dans une installation solaire à concentration. L'évaluation et la validation de telles méthodes nécessitent de les appliquer à un cas parfaitement connu et de comparer les résultats de reconstructions issus des méthodes avec les informations que nous avons de ce cas. Il nous faut donc un héliostat dont la géométrie est parfaitement connue et qui nous sert de cas test pour évaluer les reconstructions des méthodes de rétro-visée. Malgré la connaissance des plans et de la géométrie théorique d'un héliostat, nous devons prendre en compte que celui-ci subit les effets de son propre poids et de la météorologie. A long terme, ceci a pour conséquence de déformer sa structure, d'altérer les propriétés de réflexion de ses miroirs, ainsi que de les désaligner ou de les déformer. L'héliostat perd donc sa forme et ses propriétés initiales, et ne peut être utilisé comme référence connue pour évaluer et valider nos méthodes de rétro-visée. De plus, connaître avec précision la géométrie de surface d'un héliostat, tel que le E06 de Thémis, nécessite d'employer des méthodes de caractérisation relativement coûteuses et ne prenant pas en compte d'éventuelles déformations structurelles ultérieures.

Dans ce contexte, nous avons choisi d'utiliser un protocole de mesure, présenté dans la FIGURE III-8, permettant de contourner le problème de la géométrie réelle de l'héliostat pour évaluer les méthodes de rétro-visée.

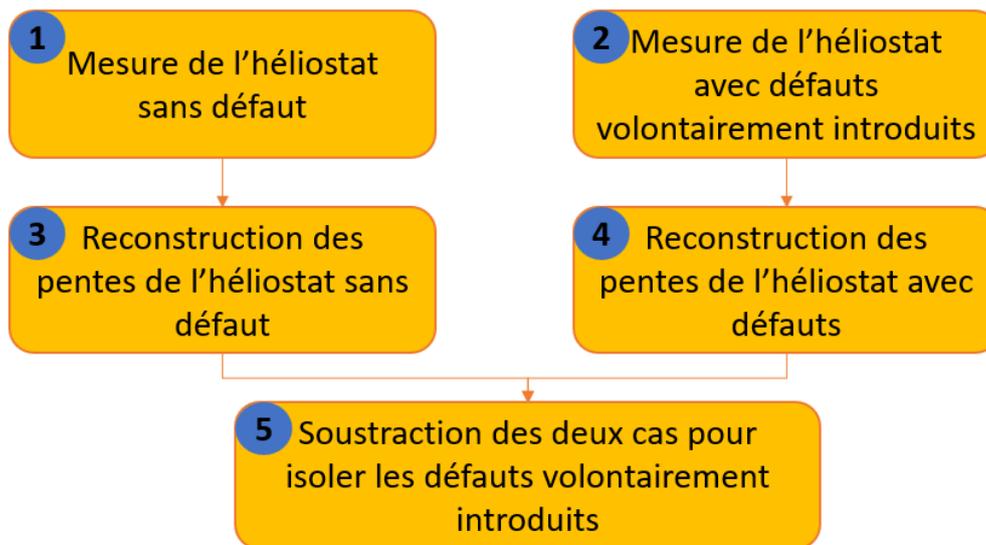


FIGURE III-8 : Diagramme du protocole utilisé pour évaluer une méthode de reconstruction des pentes de surface.

Ce protocole a déjà été utilisé dans [53] et il consiste à calculer la différence entre deux cas qui présentent les mêmes inconnues, ainsi qu'une différence de pente introduite manuellement sur l'un d'eux :

- Une première mesure par les méthodes de rétro-visée est effectuée sur l'héliostat de référence, pour que ses pentes soient reconstruites.
- Ensuite, le technicien applique manuellement des défauts de pentes connus à l'héliostat, et ses pentes sont reconstruites par les méthodes de rétro-visée.
- Le premier résultat de reconstruction est soustrait au second et la différence qui en résulte correspond aux pentes que les méthodes de rétro-visée sont sensées détecter.

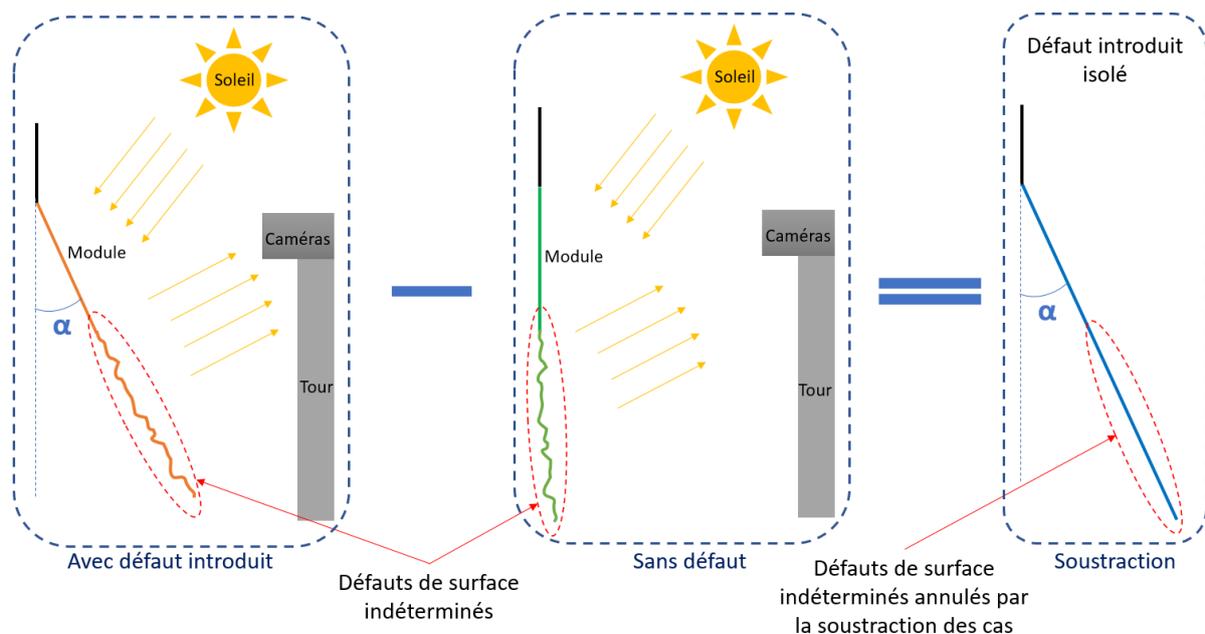


FIGURE III-9 : Schéma montrant le principe de la soustraction des cas avec et sans défaut(s) introduit(s) permettant d'annuler les pentes inhérentes à la structure et au vieillissement de l'héliostat.

Nous supposons que la géométrie réelle de l'héliostat de référence, qui est la principale inconnue, est constante tout au long de la réalisation des mesures. Ainsi, la soustraction des résultats de pentes permet d'annuler cette inconnue et donc de s'en affranchir. Parallèlement, introduire volontairement des défauts de pentes à l'héliostat de référence permet de maîtriser les pentes devant être détectées par les méthodes, donc d'assurer notre connaissance du cas test. Ainsi, le résultat de la soustraction des pentes est comparé aux défauts qui ont été introduits par le technicien et permet d'évaluer la capacité des méthodes de rétro-visée à détecter un défaut de pente. Les modules étant alignés grâce à trois vis, l'amplitude des défauts introduits est directement liée au nombre de tour de vis effectués par le technicien (cf. FIGURE III-10).

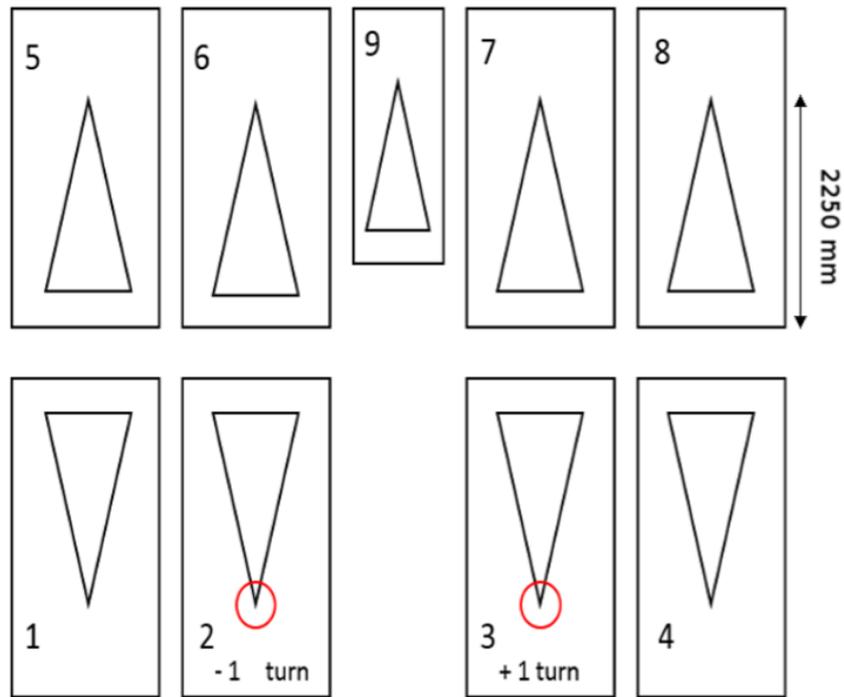


FIGURE III-10 : issue de [53] : Positionnement des vis de réglage des modules.

Dans notre cas, ce nombre est égal à  $-1$  sur le module n°2 et  $+1$  sur le module n°3. Sachant qu'un tour de vis correspond à  $2\text{ mm}$  de déplacement, cela nous permet de déduire la valeur des défauts introduits :  $\frac{\pm 2\text{ mm}}{2250\text{ mm}} = \pm 0.89\text{ mrad}$  selon le module. Nous disposons donc du matériel ainsi que d'un protocole nous permettant de réaliser des campagnes de mesures pour la validation de méthodes de rétro-visée.

## Chapitre 4

### IV. Etude de la méthode de reconstruction optimisée de rétro-visée à quatre caméras appliquée au traitement expérimental

Dans cette section, nous détaillons la démarche suivie pour traiter les données une fois les acquisitions terminées. Nous expliquons notamment de quelle façon est généré le profil 2D du Soleil, nous détaillons les processus prétraitement et de préparation des images brutes ainsi que la reconstruction des erreurs de pente.

#### IV.1. Le profil du Soleil réel

Les méthodes de rétro-visée nécessitent de connaître le profil de luminance du Soleil, au moment des acquisitions. Il sera utilisé dans les calculs de tracé de rayons inverse qui permettent de retrouver les erreurs de pentes. La cinquième caméra, placée sur un robot de suivi solaire, permet d'acquérir des images du Soleil pour établir son profil 2D. Tel qu'évoqué dans la section III.1.5, la collecte et l'enregistrement des images acquises quasi-simultanément par les quatre caméras demandent beaucoup de ressources au système d'acquisition. L'ajout en simultané des données provenant de la cinquième caméra risquent de provoquer des problèmes de télescopage ou des retards de transmission d'images, et n'est donc pas pertinent dans le protocole de mesure. Par conséquent, nous devons différer les mesures de la cinquième caméra pour optimiser la fluidité des transferts de données issus des quatre caméras. Pour ce faire, nous avons choisi de réaliser deux groupes de mesures du Soleil : une première juste avant les mesures sur héliostat, puis une seconde juste après celles-ci. Ainsi, nous obtenons deux profils de luminance du Soleil que nous moyennons, afin d'approcher le profil de luminance instantané. Dans un souci de simplification du matériel et du processus de caractérisation des filtres, nous utilisons la caméra n°1 dotée des filtres de la caméra n°5 pour réaliser cette tâche (les filtres de la caméra n°1 présentent des défauts détectés lors de la caractérisation du matériel). Il faut également noter que la mise au point de l'objectif pendant la mesure sur Soleil a été modifiée cours de l'étude afin d'être plus cohérent : auparavant, la mise au point pendant les mesures sur le Soleil était réalisée selon la netteté de ce dernier, et était donc différente de celle effectuée pour l'héliostat. Or depuis les nouvelles campagnes de mesures effectuées entre 2018 et 2020, la mise au point réalisée sur l'héliostat est appliquée au Soleil sans aucun ajustement (en plus des mesures avec ajustement), afin que le profil de luminance restitué au travers l'héliostat pendant les acquisitions à quatre caméras soit mesuré avec la même mise au point que celui issu directement des mesures sur le Soleil.

Pour obtenir un profil de luminance du Soleil, nous avons besoin de deux séries d'acquisitions de 100 images chacune, dont une est effectuée avant les mesures à quatre caméras et la seconde juste après. Le fait d'effectuer ces deux séries permet de moyennner les profils de luminance obtenus pour approcher le profil présent pendant les mesures à quatre caméras. Nous réalisons environ six

séries d'images au total afin de maximiser nos chances d'obtenir deux séries de qualité. Comme pour le prétraitement des images de l'héliostat, un filtre médian est appliqué à la centaine d'images de la première série. Plus concrètement, chaque pixel de l'image résultante correspond à la médiane des 100 valeurs mesurées à ce même pixel sur les images expérimentales. Avant de choisir une série d'images et de réaliser ce filtrage, nous devons au préalable analyser les données pour statuer sur la fiabilité des celles-ci. En effet, en cas de rafales de vent ou de passages nuageux imprévus, l'image du Soleil peut fluctuer ou être altérée. Or, ceci peut avoir un effet non négligeable sur le profil du Soleil reconstruit et donc sur les résultats de pentes finaux. Lorsque ce premier filtrage est réalisé, les informations sur le bruit inhérent à la caméra ainsi que le champ plat sont retirés de l'image médiane. Pour finir, l'image est normalisée, puis moyennée avec l'image issue de la seconde série de mesures du Soleil. Ceci nous permet d'obtenir un profil de luminance 2D du Soleil (cf. FIGURE IV-1), qui est directement utilisable par les algorithmes de reconstructions les méthodes de rétro-visée.

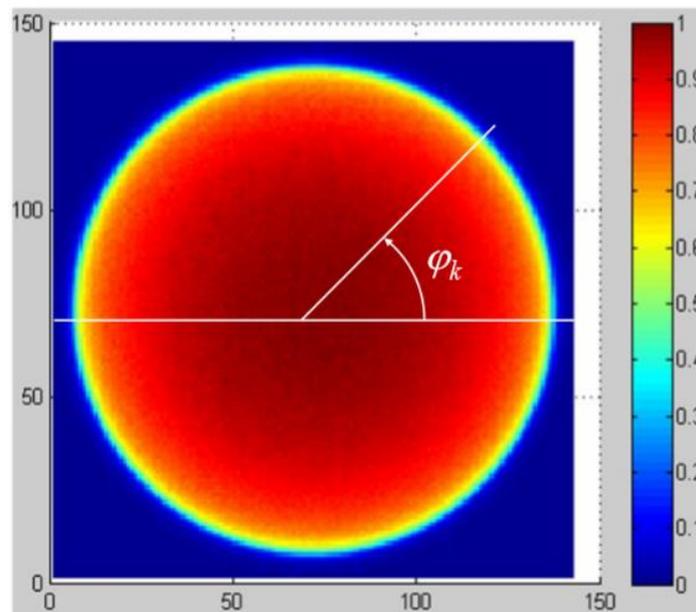


FIGURE IV-1 : issue de [58] : Résultante des médianes sur les deux séries de 100 images chacune du Soleil à partir de laquelle seront tracés les 200 profils espacés de l'angle polaire  $\varphi_k$  où  $k = 1, \dots, 200$ . La moyenne des 200 profils permettra d'obtenir le profil de luminance 1D du Soleil.

Cependant, la méthode de rétro-visée à quatre caméras nécessite d'avoir à disposition un profil de luminance 1D du Soleil. Pour ce faire, un programme échantillonne 200 profils de luminance en fonction de l'angle radial solaire, puis les moyenne (cf. FIGURE IV-1). Le profil résultant présente des fluctuations qui ne permettent pas d'assurer la monotonie de la courbe nécessaire pour l'inversion. En effet, les valeurs de luminance se situant dans la zone proche du centre du Soleil peuvent parfois fluctuer, notamment à cause du bruit de mesure. Dans les versions initiales, le programme fixait la valeur maximale de luminance aux 5 pixels les plus proches du centre du Soleil pour garantir la monotonie de la fonction. Dans les nouvelles versions, le profil de luminance du Soleil est approché à l'aide d'une fonction analytique de José. Nous avons ainsi deux profils 1D, l'un issu des images du Soleil acquises avant les mesures sur héliostat et l'autre issu du Soleil mesuré à postériori. Nous moyennons ces deux profils et obtenons la courbe de luminance du Soleil en fonction de l'angle radial.

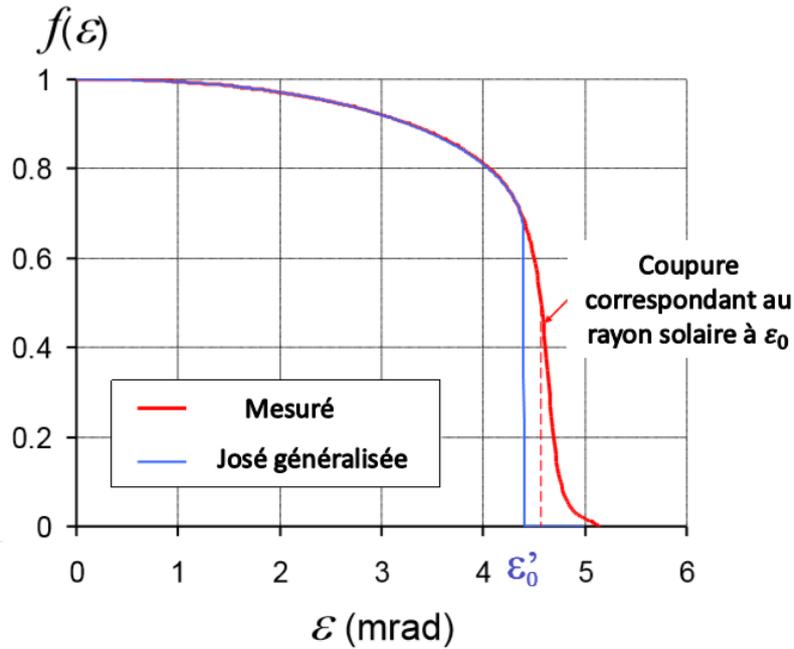


FIGURE IV-2 : issue de [58] : Profil 1D de luminance du Soleil obtenu en moyennant 200 profils (en rouge) et profil issu de la formule de José généralisée (en bleu).

Le profil ainsi obtenu permet de retrouver une valeur d'angle radial solaire  $\varepsilon$  à partir d'une valeur de luminance normalisée  $f(\varepsilon)$ . Cette relation est directement utilisée dans le programme de reconstruction des pentes. On retrouve  $\varepsilon_0$ , la demi taille angulaire du Soleil correspondant à un seuil de luminance égal à 0.5. Il est également important de noter  $\varepsilon_0'$ , la demi taille angulaire du Soleil pour laquelle la fonction modifiée de José correspond raisonnablement au profil de luminance mesuré.

#### IV.2. Le processus de reconstruction des pentes de surface

Tel que détaillé dans la section II.2, les images brutes issues des quatre caméras doivent subir un prétraitement pour pallier les biais liés aux capteurs, puis une préparation afin de les rendre utilisables par le programme de reconstruction des pentes de surface. Nous pouvons rappeler ici les principales étapes de ce processus de nettoyage et de préparation qui commence par la correction du champ plat et du bruit de mesure. S'ensuit l'application du facteur correctif lié à chaque capteur qui compense leurs différences de gains. Les images subissent alors chacune une rotation et une translation de sorte à être toutes superposables entre elles. Une avant dernière étape de préparation consiste à définir une échelle correspondant à l'héliostat réel et à appliquer un masque aux images, afin de ne prendre en compte que les zones des images situées sur les surfaces réfléchissantes de l'héliostat. Ceci permet de retirer les signaux parasites situés entre les facettes.

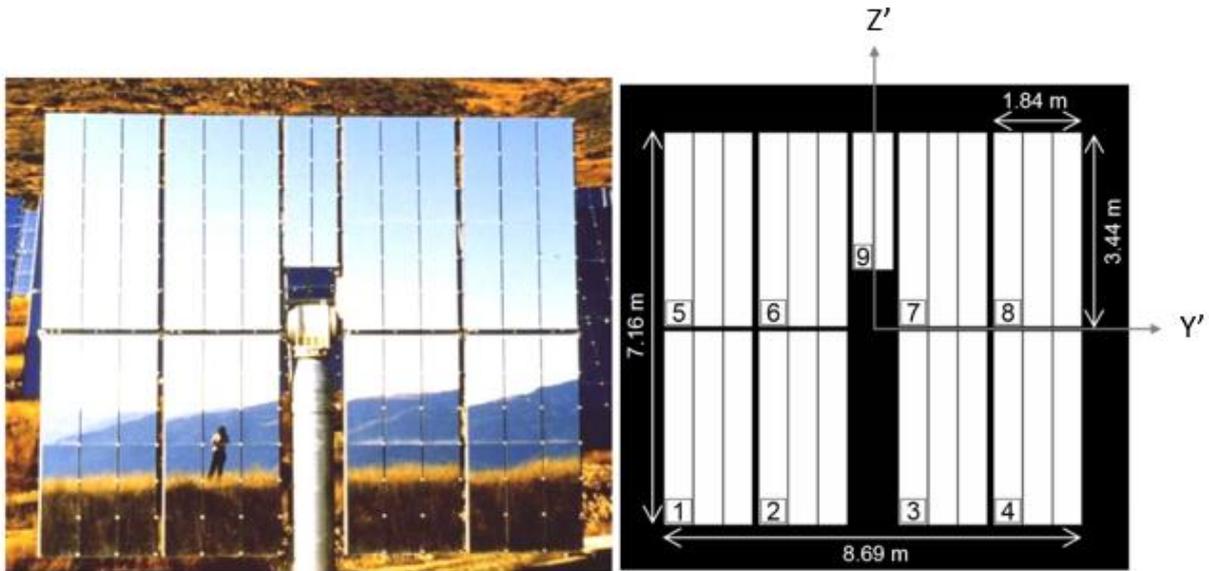


FIGURE IV-3 : issue de [58] : (A gauche) Photographie de l'héliostat (CETHEL III) E06. (A droite) Image du masque appliqué aux images afin de retirer les signaux parasites situés hors des surfaces réfléchissantes.

Finalement, des solutions de première estimation sont éventuellement calculées pour optimiser la reconstruction des pentes à venir, en évaluant les pentes de surface de l'héliostat à partir des pentes de la WFE, puis en prenant en compte les expressions de premier ordre des aberrations optiques. Le calcul de tracé de rayon, résumé dans la FIGURE II-17, peut alors être utilisé pour reconstruire les pentes de surface : les rayons sont lancés depuis les quatre caméras vers la surface de l'héliostat qui contient des erreurs de pentes de surface  $\partial\Delta(P)/\partial y'$  et  $\partial\Delta(P)/\partial z'$ , qui sont à trouver. Après réflexion sur l'héliostat, les rayons se dirigent vers le disque solaire et leurs coordonnées angulaires sont calculées dans le référentiel du Soleil pour obtenir un angle radial. La luminance, correspondant à l'angle solaire calculé par tracer de rayon inverse, est utilisée pour calculer la fonction de coût : elle est basée sur la somme des écarts quadratique issus de chaque caméra entre cette luminance calculée à partir d'erreurs de pentes supposées et la luminance mesurée expérimentalement. La minimisation de cette fonction de coût permet alors de trouver les erreurs de pentes caractérisant la surface réfléchissante à l'étude. Dans la version récente du programme, cette fonction de coût prend en compte la réflectivité à chaque point  $P$  de l'héliostat (pixel) et n'est pas prise en compte si la valeur d'erreur quadratique dépasse le seuil de 0.1, établi empiriquement.

### IV.3. Les résultats issus des campagnes expérimentales

Dans cette section nous exposons les résultats expérimentaux obtenus grâce à la méthode de rétro-visée à quatre caméras et présentés dans [58]. Le processus de reconstruction des pentes utilisé est celui de la méthode optimisée de rétro-visée à quatre caméras. En considérant que les pertes en concentrations solaire ne doivent pas excéder 4% et que ces pertes peuvent être approximées tel que dans [58] par  $\delta C = (\sigma/\varepsilon_0)^2$ , où  $\sigma$  est l'écart type des erreurs angulaires des rayons réfléchis et  $\varepsilon_0$  le rayon angulaire du Soleil, cela nous contraint à une erreur angulaire maximale de 0.5 *mrad*. Nous définissons une valeur de précision égale à un cinquième de cette valeur, soit 0.1 *mrad* et par conséquent une précision finale égale à  $\sqrt{2} * 0.1 \approx 0.14$  *mrad* à cause des mesures différentiels effectuées en expérimentation. Considérons tout d'abord la campagne expérimentale du 21 Novembre 2017 à 15h11 au cours de laquelle nous avons introduit simultanément deux défauts sur l'héliostat : un défaut d'alignement sur le module n°2 estimé à  $-1.33$  *mrad* en élévation et un autre sur le module n°3 estimé à  $+0.89$  *mrad*, également en

élévation. Ces valeurs de défauts correspondent à  $-1.5$  tour appliqué à la vis de réglage basse du module n°2 et  $+1$  tour à celle du module n°3. Les angles solaires valaient environ  $-37$  degrés en azimut et  $+20$  degrés en élévation. L'incertitude liée à l'introduction manuelle des défauts a été estimée dans [53] à  $0.27$  mrad. De ce fait, l'objectif initial d'atteindre  $0.14$  mrad d'incertitude sur la mesure des défauts est limité par cette dernière valeur. Les étapes de prétraitement et de préparation des images brutes au calcul de reconstruction des pentes ont été réalisées après les acquisitions. La FIGURE IV-4 montre les images résultantes de l'héliostat dans le cas où des défauts ont été introduits manuellement. Le profil de luminance du Soleil a été approché avec une fonction de José modifiée afin d'obtenir une fonction de luminance radiale monotone à même d'être utilisée dans la méthode optimisée de rétro-visée à quatre caméras.

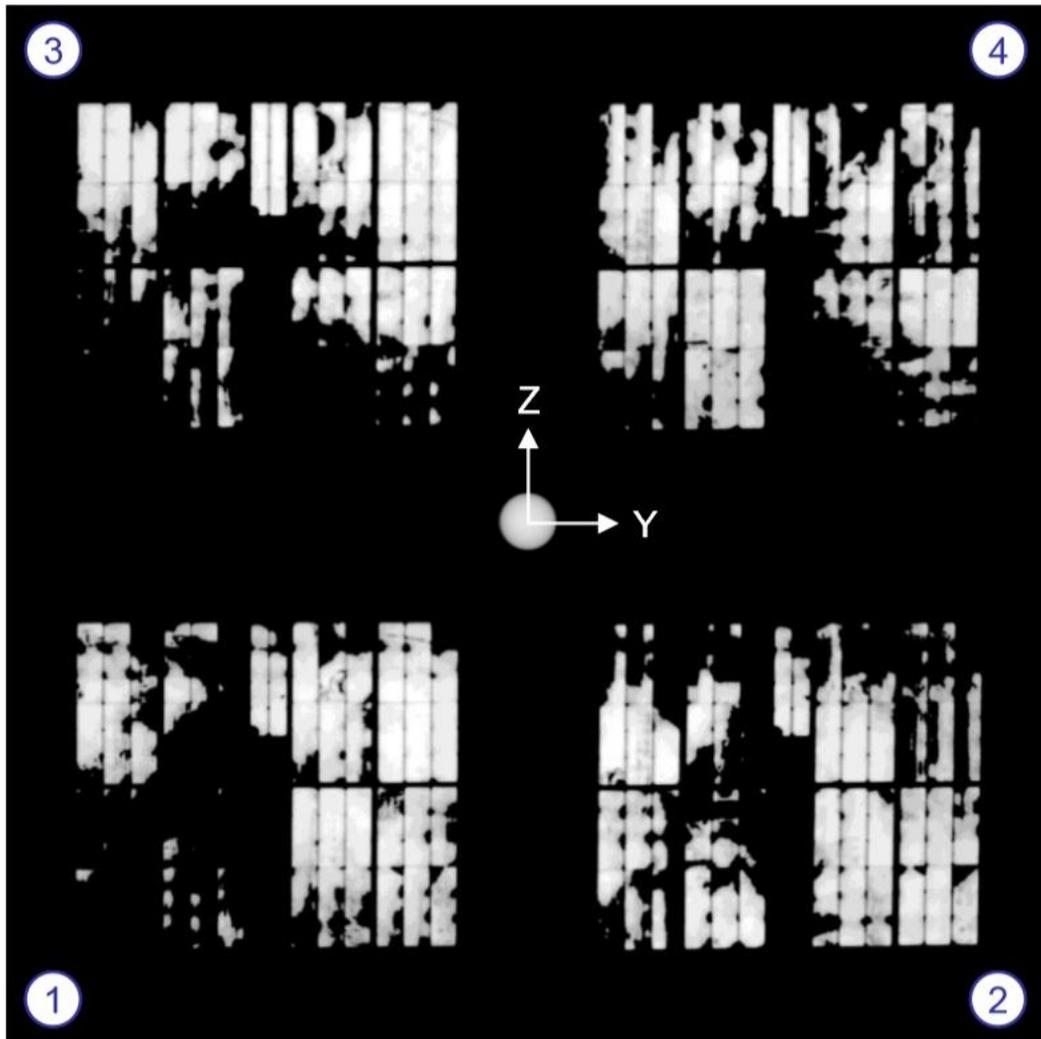


FIGURE IV-4 : issue de [58] : Images brutes prétraitées et préparées de l'héliostat avec défauts introduits provenant des images de la campagne du 21 Décembre 2017, acquises quasi-simultanément par les quatre caméras, avec au centre une image du Soleil traitée provenant de celle qui est placée sur le toit de la tour.

Les mesures ont été effectuées dans le cadre du protocole présenté dans la section III.2 et la FIGURE IV-5 montre les résultats. Ainsi, des images de l'héliostat sans défaut volontairement introduit ont été acquises et leurs pentes calculées selon  $Y'$  et  $Z'$  (en (a) et (b) respectivement), puis d'autres avec les défauts introduits grâce aux vis de réglage des modules également (en (c) et (d) respectivement). Les différences selon  $Y'$  et  $Z'$  de ces pentes (en (e) et (f) respectivement) ont été calculées afin d'isoler les pentes des défauts volontairement introduits au module n°2 et n°3. Nous pouvons constater que les pentes de surface apparaissent de manière éparse et bruitée sur chaque

cas mesuré, notamment en raison de la faible couverture spatiale sur les cartes de luminance mesurées.

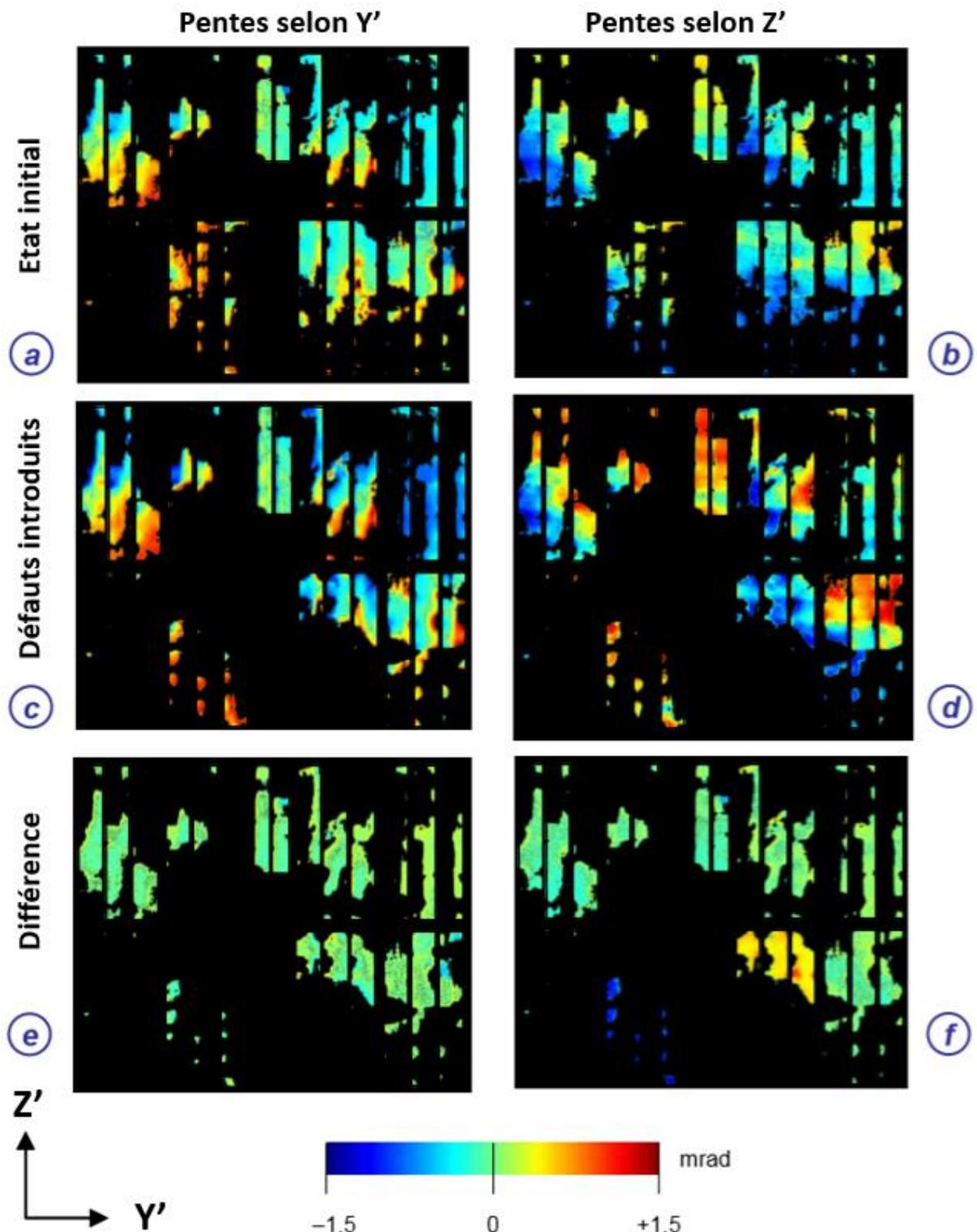


FIGURE IV-5 : issue de [58] : Pentes reconstruites à partir de mesures effectuées sur l'héliostat E06, ainsi que leur différence. Pentes à l'état initial selon  $Y'$  et  $Z'$  en (a) et (b) respectivement. Pentes dans le cas de défauts volontairement introduits selon  $Y'$  et  $Z'$ , en (c) et (d) respectivement. Différences selon  $Y'$  et  $Z'$  des pentes du cas sans et avec défaut(s), en (e) et (f) respectivement.

Les différences entre les cas avec et sans défaut(s) sont en vue détaillée dans la FIGURE IV-6 pour les modules concernés ayant subi un désalignement volontaire, soit le n°2 et n°3. Les cartes de pentes présentent des points manquants résultant d'une élimination lors du processus de reconstruction des pentes. En effet, la fonction de coût utilisée dans ce processus ne doit pas dépasser un certain seuil (fixé empiriquement à 0.1) sous peine de ne pas prendre en compte le pixel concerné. Cependant, nous pouvons constater que les différences de pentes présentent un décalage selon  $Z'$  lié aux défauts introduits volontairement en élévation sur l'héliostat. Nous avons moyenné les valeurs de pentes selon  $Z'$  sur toute la surface de chaque module afin d'obtenir une estimation des erreurs d'inclinaison détectées pour chacun d'eux. Les résultats donnent des valeurs en élévation de  $-1.57 \text{ mrad}$  et  $+0.80 \text{ mrad}$  pour les modules n°2 et n°3 respectivement. Ces résultats correspondent aux valeurs des défauts qui ont été manuellement introduits à l'héliostat pendant la campagne de mesures et les écarts de valeurs d'erreurs détectées en élévation sont donc  $|\delta h_2| = 0.24 \text{ mrad}$  et  $|\delta h_3| = 0.08 \text{ mrad}$ , pour les modules n°2 et n°3 respectivement. Ces résultats sont compatibles avec la valeur de l'incertitude estimée, liée aux vis de réglage des modules. La zone entourée en rouge correspond probablement à une forte erreur de pente locale sur le module n°3. Les valeurs très élevées qui y figurent biaisent le résultat de la valeur moyenne. Les résultats des pentes selon  $Y'$  (donc azimutales) sont également cohérents avec l'expérience, avec des valeurs d'incertitude estimées à  $|\delta a_2| = 0.08 \text{ mrad}$  et  $|\delta a_3| = 0.04 \text{ mrad}$ . Ils sont donc compatibles avec l'objectif de  $0.14 \text{ mrad}$ .

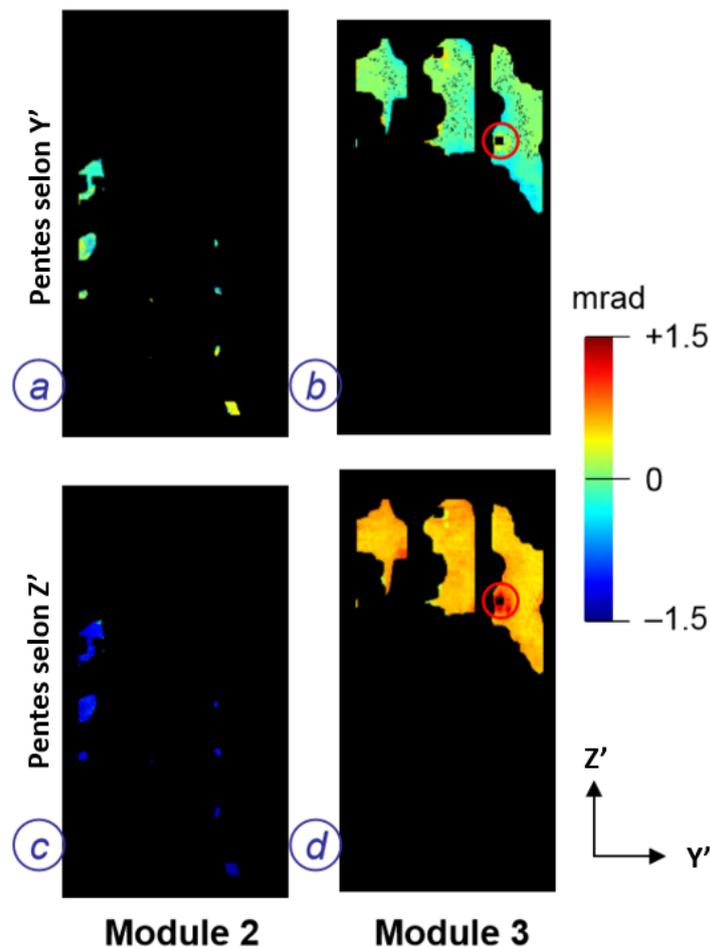


FIGURE IV-6 : issue de [58] : Différence des pentes aux modules n°2 et n°3, selon  $Y'$  en (a) et (b) et selon  $Z'$  en (c) et (d).

La TABLE IV-1 permet de résumer les résultats des calculs de pentes obtenus par la méthode de rétro-visée à quatre caméras pour le cas sans défaut introduit. La TABLE IV-2 contient quant à elle

les résultats du cas avec défauts manuellement introduits et la TABLE IV-3 contient les différences de pentes entre ces deux cas. Chaque tableau présente les valeurs des pentes moyennées pour chaque module, la couverture spatiale qui dépend de la multiplication des fonctions de masque (permettant de ne prendre en compte que les pixels dont les valeurs de luminances sont non nulles dans les cas avec et sans défaut(s)). En définitive, la couverture spatiale correspond au ratio du nombre de pixels d'un module pris en compte sur le nombre de pixel total du module. Figurent également les valeurs PTV (Peak To Valley), RMS (Root Mean Square) et finalement les moyennes des valeurs sur tout l'héliostat. Les résultats de l'étude à prendre en compte pour évaluer la précision de la détection des erreurs de pentes par la méthode sont la TABLE IV-3 ainsi que les parties e) et f) de la FIGURE IV-5. Les valeurs qui y figurent correspondent à la différence des cas avec et sans défaut(s) introduit(s), et permettent de calculer les valeurs d'erreurs RMS du défaut d'alignement sur chaque module, en tenant compte de milliers de pixels pour chacun d'entre eux (3200 et 16000 pour les modules n°2 et 3 respectivement). Cela permet ensuite d'estimer l'erreur RMS moyenne pour tout l'héliostat. En supposant que la distribution de l'erreur est Gaussienne, l'écart-type (correspondant à l'erreur RMS) est considéré comme une bonne approximation de l'incertitude expérimentale de l'erreur d'alignement. En définitive, les valeurs d'erreurs RMS par module sont relativement basses et leur valeurs moyennes (égales à 0.22 et 0.15 *mrاد* respectivement selon Y' et Z') sont de bons indicateurs de la précision de la méthode de reconstruction. L'incertitude de la mesure expérimentale des erreurs d'alignements est alors d'environ 0.2 *mrاد*.

TABLE IV-1 : issue de [58] : Résultats des calculs de pentes dans le cas sans défaut lors de la campagne de mesures du 21 Décembre 2017.

Numéro de module	Couverture spatiale	Pentes selon Y'			Pentes selon Z'		
		Moyenne (mrad)	PTV (mrad)	RMS (mrad)	Moyenne (mrad)	PTV (mrad)	RMS (mrad)
1	0.000	1.066	0.041	0.020	-1.076	0.028	0.014
2	0.110	0.581	2.785	0.471	0.013	2.568	0.644
3	0.380	-0.118	2.667	0.378	-0.154	2.629	0.410
4	0.261	-0.086	2.813	0.460	0.244	3.079	0.610
5	0.304	0.157	2.965	0.526	-0.231	2.603	0.586
6	0.062	-0.060	2.417	0.498	0.272	2.364	0.516
7	0.237	-0.079	2.840	0.456	-0.051	3.087	0.531
8	0.201	-0.532	1.520	0.122	-0.021	2.335	0.209
9	0.498	-0.126	1.829	0.217	0.474	1.618	0.392
Moyenne		0.089	2.209	0.350	-0.059	2.257	0.435

TABLE IV-2: issue de [58] : Résultats des calculs de pentes dans le cas avec défauts manuellement introduits lors de la campagne de mesures du 21 Décembre 2017.

Numéro de module	Couverture spatiale	Pentes selon Y'			Pentes selon Z'		
		Moyenne (mrad)	PTV (mrad)	RMS (mrad)	Moyenne (mrad)	PTV (mrad)	RMS (mrad)
1	0.000	-0.166	0.112	0.046	1.141	0.083	0.034
2	0.041	0.802	1.692	0.308	0.521	1.966	0.370
3	0.195	-0.246	2.089	0.394	-0.604	1.434	0.252
4	0.309	0.019	2.326	0.395	0.288	2.540	0.586
5	0.306	0.252	2.689	0.548	-0.124	2.647	0.541
6	0.062	-0.023	2.299	0.558	0.293	2.403	0.475
7	0.236	-0.046	2.638	0.573	-0.044	2.639	0.573
8	0.143	-0.723	1.237	0.163	-0.166	1.738	0.252
9	0.547	-0.050	1.723	0.211	0.551	1.768	0.320
Moyenne		-0.020	1.867	0.355	0.206	1.913	0.378

TABLE IV-3 : issue de [58] : Résultats, de la différence des pentes des cas sans et avec défaut(s) manuellement introduits, mesurés le 21 Décembre 2017.

Numéro de module	Couverture spatiale	Pentes selon Y'			Pentes selon Z'		
		Moyenne (mrad)	PTV (mrad)	RMS (mrad)	Moyenne (mrad)	PTV (mrad)	RMS (mrad)
1	0.000						
2	0.017	-0.085	1.884	0.404	-1.571	1.396	0.210
3	0.181	-0.044	2.501	0.203	0.796	1.874	0.163
4	0.253	-0.040	2.148	0.328	0.069	1.555	0.166
5	0.283	-0.086	1.849	0.151	-0.042	1.339	0.146
6	0.057	-0.041	2.337	0.199	0.063	1.191	0.128
7	0.200	0.000	1.981	0.210	0.127	1.707	0.144
8	0.138	0.218	1.566	0.098	0.183	1.624	0.120
9	0.470	-0.116	1.726	0.198	-0.045	1.151	0.155
Moyenne		-0.024	1.999	0.224	-0.053	1.480	0.154

Considérons maintenant la campagne de mesure effectuée le 15 Mars 2019 entre 14h25 et 15h55 heure locale. Les angles solaires se situaient entre  $+40.7$  et  $+43.5$  *degrés* pour l'azimut et entre  $37.2$  et  $35.9$  *degrés* pour l'élévation. Un défaut d'alignement en élévation a été introduit seulement sur le module n°3 en faisant un tour de vis de réglage (équivalent à une valeur de désalignement égale à  $+0.89$  *mrad*). La mesure a permis d'obtenir une valeur de défaut détecté égale à  $0.70$  *mrad*, soit un écart de valeur d'erreur égal à  $0.19$  *mrad*. Ce résultat est compatible avec ceux de la campagne de mesure effectuée le 21 Novembre 2017. Ce cas a également été l'occasion d'estimer la robustesse des surfaces réfléchives de l'héliostat face aux conditions météorologiques et face à l'effet du poids sur la structure. Les cartes des erreurs de surface de l'héliostat ont donc été reconstruites, à l'aide d'un algorithme de transformée de Fourier itérative. Le calcul des erreurs de surface, qui correspondent à la fonction  $\Delta(P)$ , sont utilisées dans le cadre de l'optique adaptative depuis quelques décennies, tel que montré dans [58]. Les résultats de cette reconstruction sont présentés dans la FIGURE IV-7.

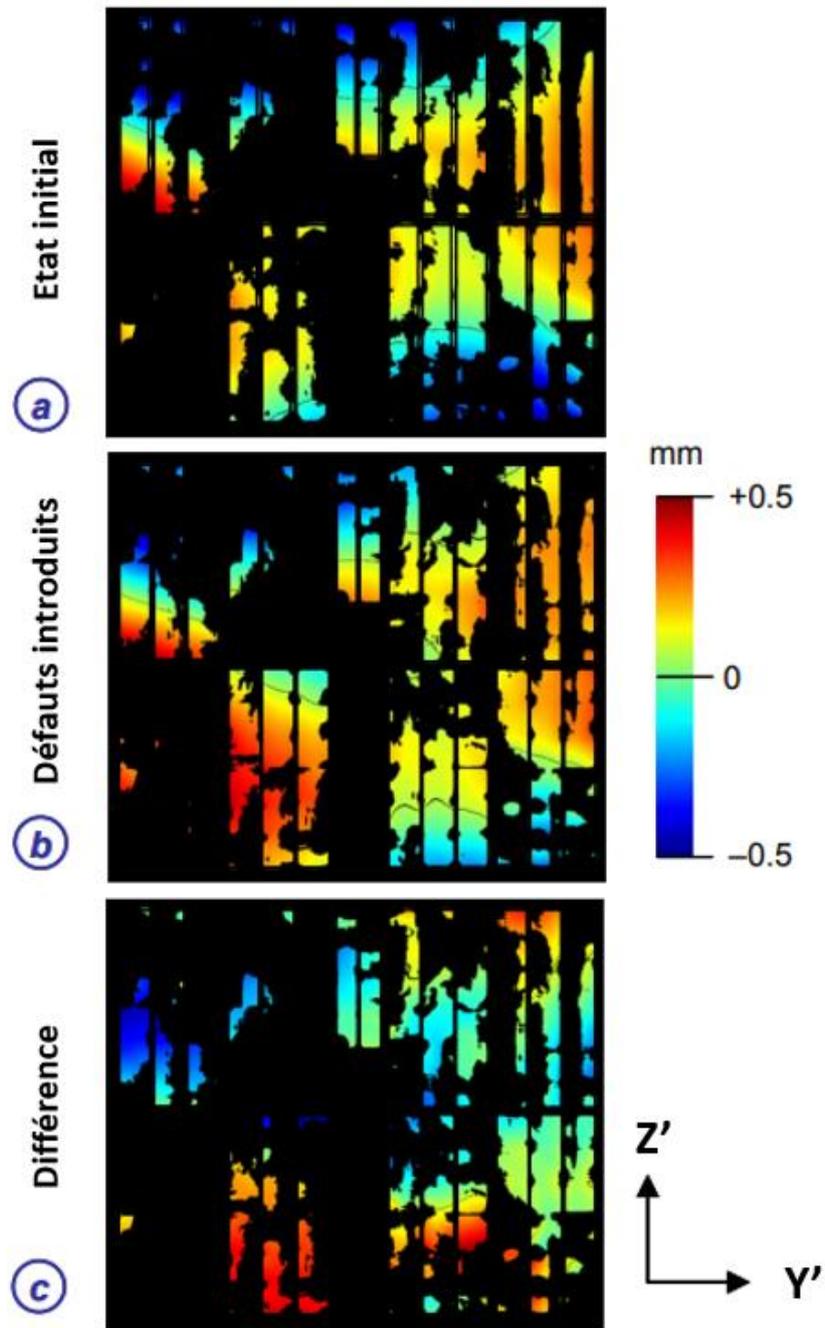


FIGURE IV-7 : issue de [58] : Résultats de la reconstruction de surface de l'héliostat E06 dans le cas sans défaut introduit (a), avec défaut manuellement introduit sur le module n°3 (b) ; puis différence entre les deux cas (c).

L'analyse des erreurs de surface, qui est plus difficile que celle des erreurs de pentes de surface, est à considérer ici avec un certain recul. En effet, la faible couverture en signal des modules suggère que les erreurs sont plus importantes que ne le prévoient les résultats (qui ne dépassent guère 1 mm PTV). De plus, les algorithmes utilisés dans la reconstruction des pentes et des surfaces ne sont pas sensibles aux erreurs de « piston » correspondant à un déplacement selon l'axe  $X'$  et qui pourraient affecter chaque module, sans toutefois dégrader les performances de concentration de manière significative. Une conséquence favorable du calcul des erreurs de surface est la faible intensité du bruit dans les cartes résultantes, grâce au compromis réalisé entre les erreurs de pentes selon les deux directions orthogonales. Ainsi, les résultats d'erreurs de surface peuvent être considérés comme fiables malgré l'absence de référence.

Les cartes des erreurs de surface permettent de confirmer les résultats obtenus plus haut sur les erreurs de pentes. Elle révèle une déformation de l'héliostat entre les mesures du cas sans et avec défaut. Dans le cas d'une structure parfaitement rigide, les erreurs de surface devraient être uniformes pour chaque module (sauf pour le module n°3 qui a subi un désalignement). Ceci est relativement le cas pour les modules n°6 et 9, mais pas pour le reste de l'héliostat. Nous pouvons noter par exemple que le module n°2 présente une déformation, due probablement à l'effet du vent ou de son propre poids. Les résultats numériques sont présentés dans la TABLE IV-4 pour le cas sans défaut, dans la TABLE IV-5 pour le cas avec défaut au module n°3 et leur différence dans la TABLE IV-6.

TABLE IV-4 : issue de [58] : Résultats numériques de la reconstruction des erreurs de surfaces dans le cas sans défaut introduit.

Numéro de module	Erreurs de surface			
	Couverture spatiale	Moyenne (mm)	PTV (mm)	RMS (mm)
1	0.000			
2	0.110	0.011	0.482	0.116
3	0.380	-0.112	0.661	0.117
4	0.261	-0.239	0.819	0.190
5	0.304	-0.133	0.816	0.199
6	0.062	-0.040	0.409	0.074
7	0.237	-0.072	0.563	0.106
8	0.201	-0.063	0.506	0.096
9	0.498	0.025	0.729	0.204
Moyenne		-0.078	0.623	0.138

TABLE IV-5 : issue de [58] : Résultats numériques de la reconstruction des erreurs de surfaces dans le cas avec un défaut introduit au module n°3.

Numéro de module	Erreurs de surface			
	Couverture spatiale	Moyenne (mm)	PTV (mm)	RMS (mm)
1	0.000			
2	0.041	0.059	0.363	0.067
3	0.195	-0.079	0.883	0.168
4	0.309	-0.151	0.774	0.183
5	0.306	-0.099	0.655	0.150
6	0.062	-0.023	0.496	0.082
7	0.236	-0.136	0.705	0.130
8	0.143	-0.069	0.597	0.127
9	0.547	-0.027	0.987	0.263
Moyenne		-0.066	0.683	0.146

TABLE IV-6 : issue de [58] : Résultats numériques de la différence entre les cas sans et avec défaut introduit.

Numéro de module	Erreurs de surface			
	Couverture spatiale	Moyenne (mm)	PTV (mm)	RMS (mm)
1	0.000			
2	0.017	0.081	0.658	0.157
3	0.181	0.095	0.819	0.189
4	0.253	0.079	0.325	0.034
5	0.283	0.028	0.327	0.068
6	0.057	0.020	0.121	0.016
7	0.200	-0.058	0.279	0.059
8	0.138	0.010	0.281	0.054
9	0.470	-0.069	0.409	0.078
Moyenne		0.023	0.403	0.082

En définitive, il apparaît que la méthode de rétro-visée à quatre caméras est capable de caractériser des surfaces optiques telles que celles d'un héliostat focalisant dans un mode de suivi solaire. Les valeurs parfois relativement élevées d'erreurs relatives des résultats de reconstruction des pentes soulignent la nécessité d'améliorer la méthode par différents moyens que nous évoquons dans la section suivante.

#### IV.4. Les améliorations à apporter à la méthode de rétro-visée à quatre caméras

La précision de mesure atteinte au cours des campagnes expérimentales a été estimée à environ  $0.2 \text{ mrad}$  RMS, soit deux fois l'objectif initial de  $0.1 \text{ mrad}$ . Les sources d'erreur ainsi que d'éventuelles solutions sont donc présentées ici :

- La principale source d'erreur provient des caméras qui sont affectées par un bruit de mesure significatif, estimé de 3 à 4% PTV. Ce bruit est dû à un nombre trop faible d'images par caméra utilisées pour obtenir des images moyennées. La solution serait d'acquérir plus d'images par caméras de l'héliostat en utilisant des câbles Ethernet avec une plus grande bande passante et d'augmenter la capacité du switch.
- Une autre source d'erreur provient du programme d'acquisition qui ne nous permet pas de visualiser les images en temps réel pendant les acquisitions. De ce fait, nous ne pouvons pas vérifier l'alignement des caméras ou la mise au point des objectifs durant les mesures, sachant que ces ajustements sont susceptibles d'être modifiés lors de la mise en place des filtres optiques sur les objectifs. Afin de pallier ce problème, il faudrait modifier le programme d'acquisition pour être en mesure de visualiser les images en temps réel et de bénéficier d'une meilleure réactivité en cas de défauts de réglage.
- La cible passive Mini-Pégase comporte également des contraintes lors des acquisitions, notamment à cause du phénomène de dilatation thermique de la plaque percée qui peut entraîner une occultation, un désalignement des caméras ou dans une moindre mesure une augmentation du phénomène de vignettage. La mise en place d'un support mécanique adapté pourrait améliorer les conditions d'acquisition et une visualisation en temps réel des images (telle qu'évoquée dans le point précédent) pourrait être utile pour rectifier rapidement d'éventuels problèmes.
- La validation des programmes de prétraitement, de préparation et de reconstruction, utilisés dans la méthode optimisée de rétro-visée à quatre caméras, sont en partie validés, mais présentent néanmoins des sources potentielles d'erreurs telles que l'approximation permettant de transformer l'image de l'héliostat en un rectangle parfait. Cette étape, présente dans la version récente du programme et détaillée dans [58], permet de pallier l'effet de perspective qui déforme l'image de l'héliostat en un parallélogramme quelconque.
- Une autre source d'erreur que nous pouvons relever consiste en la couverture spatiale des modules de l'héliostat, qui reste relativement faible pour certains d'entre eux à cause notamment de grandes erreurs de pentes -supérieures à  $1 \text{ mrad}$ - et à un faible nombre de caméras utilisées pour les mesures. Ceci a pour conséquence de n'offrir qu'une faible quantité d'informations disponible pour certains modules et donc un résultat de pente moins fiable. Il a été démontré dans [60] qu'un nombre accru de caméras disposées en matrice carrée est pertinent pour dépasser cette limite. Disposer les caméras en une matrice rectangulaire pourrait également permettre de reproduire virtuellement une matrice carrée en se servant d'un balayage de la cible par la tache focale de l'héliostat. Un procédé analogue, utilisant une matrice verticale de caméras mouvante, est notamment montré dans [61] dans le cadre de la détection d'erreurs de suivi solaire appliquée à des héliostats de taille relativement faible.

#### IV.5. Synthèse des apports de la méthode optimisée de rétro-visée à quatre caméras à la méthode de rétro-visée à quatre caméras

La méthode de rétro-visée à quatre caméras consiste à combiner des images quasi-simultanément acquises par quatre caméras placées dans le plan cible -proche du plan récepteur- afin de reconstruire les erreurs de pentes de surface des héliostats. Les améliorations expérimentales ainsi que la méthode de reconstruction optimisée de rétro-visée à quatre caméras ont été réalisées dans le but de préparer la méthode de rétro-visée à quatre caméras à une reconstruction d'erreurs de pentes à partir d'images réelles. Les campagnes expérimentales ont été effectuées sur le site de Targassonne (France), à la centrale à tour Thémis. Ce type de mesure d'erreurs de pentes réalisées sur un héliostat en mode de suivi solaire, et dont la précision atteint environ  $0.2 \text{ mrad}$ , est une première. Dans cette étude, les calculs des erreurs de surface ont permis d'évaluer la capacité de la méthode de rétro-visée à contribuer à la caractérisation des déformations de surface de l'héliostat dues au vent ou à son propre poids. Les principales sources d'erreur ainsi que les éventuelles solutions ont été évoquées dans la section précédente. Les améliorations qui seront apportées à la méthode de rétro-visée dans le cadre d'une prochaine étude pourraient permettre d'atteindre la précision souhaitée initialement, soit  $0.1 \text{ mrad}$ .

## Chapitre 5

### V. Méthodes de rétro-visée à une caméra (de rétro-visée à une caméra par mesures successives et de rétro-visée à une caméra par mesure unique)

Dans ce chapitre, nous expliquons la démarche qui a été mise en place pour évaluer et valider numériquement les méthodes de rétro-visée à une caméra. Nous exposons les avantages de ces méthodes ainsi que les potentialités qui en découlent. Nous détaillons les processus de reconstruction des méthodes de rétro-visée à une caméra et nous présentons les cas simulés numériquement. Les programmes utilisés pour les simulations sont présentés et les résultats des reconstructions des pentes sont interprétés puis comparés entre eux.

#### V.1. Pertinence et principe des méthodes de rétro-visée à une caméra

##### V.1.1. Intérêt des méthodes de rétro-visée à une caméra

Au cours de la présente étude, nous avons décidé de développer des méthodes de rétro-visée à une caméra. Ce choix implique de délaissier d'autres développements de la méthode de rétro-visée à quatre caméras, ainsi que les études expérimentales d'une méthode à  $N$  caméras. La théorie et la validation numérique de cette dernière ont été établies dans [60] et montrent qu'elle permettrait d'augmenter la précision de la méthode de rétro-visée, notamment grâce à une prise en compte plus importante de la tache focale induite par l'héliostat au niveau du plan cible, et grâce à la multiplication des estimations de défauts de pentes. La mise en place expérimentale d'un tel dispositif nécessite de modifier le système d'acquisition pour le rendre plus performant et d'élaborer une nouvelle structure pour fixer les caméras et protéger l'opérateur. Tout ceci implique donc un temps de développement que nous n'avions pas à notre disposition.

L'avantage non négligeable lié au développement de méthodes de rétro-visée à une caméra réside en la réduction drastique des sources d'erreurs inhérentes aux capteurs, par la réduction du nombre de caméras. La reconstruction des erreurs de pentes n'est alors plus dépendante de calibrations relatives entre quatre caméras, dont l'incertitude augmente celle du résultat. De plus, les méthodes de rétro-visée à une caméra ont l'avantage de ne nécessiter que peu de modifications du protocole de mesure et aucune concernant le matériel d'acquisition actuel. Il est également intéressant de noter que l'hybridation entre plusieurs méthodes optiques de rétro-visée pourrait s'avérer être un atout pour la précision de la détection des défauts de pentes et reste une piste à explorer.

Le matériel dont nous disposons nous permettait donc d'élargir les façons de reconstruire les défauts de pentes et nous avons choisi de les développer pour les raisons citées plus haut. Lors d'expérimentations antérieures à la centrale Thémis de Targassonne, nous avons pensé à utiliser le mouvement du Soleil pour multiplier les points de vue et donc s'affranchir d'une partie des caméras.

En effet, en mettant l'héliostat en mode stationnaire, le mouvement de balayage du plan cible par la tache focale mouvante permettrait de reproduire virtuellement le mouvement d'une caméra. Etant courbe, la course du Soleil rendrait possible la reproduction de quatre points de vue non alignés dans le plan cible. La principale limite de cette expérience de pensée est la faible courbure de la trajectoire du Soleil, qui limiterait l'information disponible selon un des deux axes. En effet, dans le cas hypothétique d'une trajectoire quasi-rectiligne, la reconstruction des défauts de pentes ne pourrait être effectuée que selon un axe. L'utilisation de deux caméras pourrait alors pallier ce défaut et permettre de virtuellement reproduire quatre points de vue. Nous avons cependant choisi de poursuivre le développement d'une méthode dont le matériel serait simplifié à l'extrême telle que celle à une caméra, pour les raisons explicitées plus haut.

La trajectoire du Soleil pouvait donc être utilisée différemment qu'en reproduisant des points de vue dans le plan cible : chaque point de l'héliostat renvoie une certaine valeur de luminance dépendante de la position du Soleil et de l'orientation de l'héliostat. Ainsi, en gardant l'héliostat dans son mode stationnaire et en capturant deux images pendant le balayage de la tache focale sur le plan cible, il est possible de connaître l'évolution de la luminance en fonction du temps en tout point de l'héliostat. Connaissant la géométrie de la surface de l'héliostat et la trajectoire du Soleil, il est alors possible de comparer l'évolution de la luminance mesurée avec l'évolution théorique de celle-ci en tout point de l'héliostat. La multiplication des mesures de luminance durant le balayage de la tache focale permet d'augmenter le nombre de points dans chaque courbe de luminance et est plus appropriée au programme optimisé de reconstruction des pentes de surface.

Une seconde méthode de rétro-visée à une caméra a été développée dans le but d'apporter une plus grande robustesse face au bruit de mesure. Cette nouvelle méthode est encore plus radicale que la précédente en ce qui concerne la simplification des moyens utilisés. En effet, elle ne nécessite que la capture d'une seule image de l'héliostat pour reconstruire ses pentes de surface. Chaque point de l'héliostat renvoie une valeur de luminance dépendante des coordonnées du Soleil et de l'orientation de l'héliostat. La connaissance de la géométrie de surface de celui-ci ainsi que de la trajectoire du Soleil permet de calculer la carte de luminance théorique renvoyée par les surfaces réfléchissantes. La comparaison de cette carte de luminance avec la mesure permet de détecter les défauts de pentes de surface de l'héliostat. Cette méthode de reconstruction nécessite moins de temps d'expérimentation et n'est pas limitée par les capacités du système d'acquisition en raison du peu de données à transmettre. Nous avons donc deux nouvelles méthodes de rétro-visée dont la mise en place expérimentale ne consomme que peu de temps grâce à la simplicité des protocoles qui sont aisément insérés entre les mesures à quatre caméras.

### V.1.2. Géométrie et conventions

Les modèles des méthodes à une caméra sont, tout comme la méthode à quatre caméras, basés sur la relation de Snell-Descartes [Eq. 12], qui permet de décrire la réflexion des rayons lumineux sur l'héliostat, ainsi que sur la connaissance que nous avons de la trajectoire du Soleil. Le système considéré est composé d'un héliostat focalisant, qui réfléchit le rayonnement solaire vers le récepteur d'une tour (cf. FIGURE V-1).

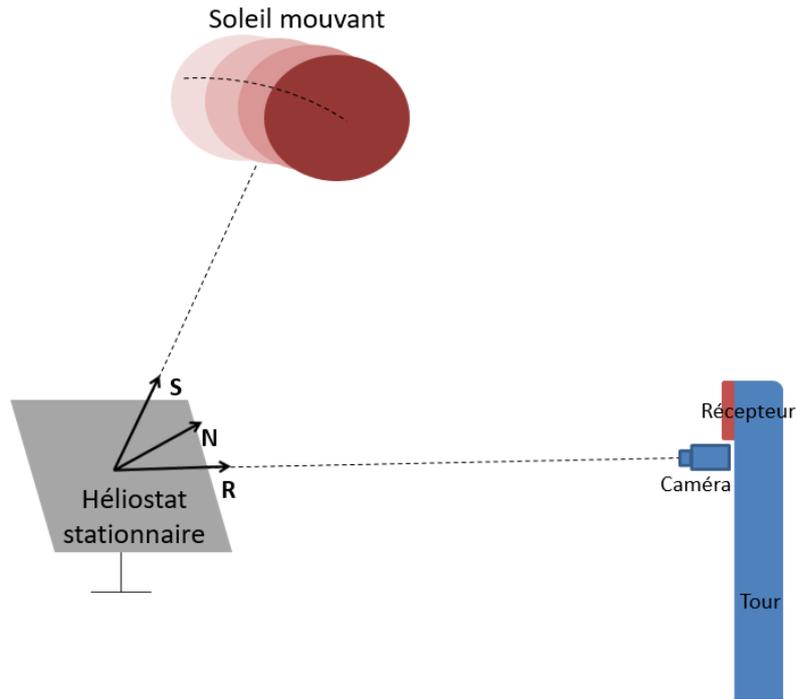


FIGURE V-1: Schéma simplifié d'une mesure par caméra avec l'héliostat en mode stationnaire.

- $R_R(O, X, Y, Z)$  est le référentiel du plan Récepteur (ou Cible),  $\mathbf{R}_0$  est le vecteur unitaire allant du centre du référentiel de l'héliostat au centre du référentiel du plan Récepteur et  $\mathbf{R}$  est le vecteur unitaire allant d'un point P de l'héliostat à la caméra.
- $R_H(O', X', Y', Z')$  est le référentiel du plan de l'Héliostat,  $\mathbf{O}'\mathbf{P}$  est le vecteur allant du centre de l'héliostat  $O'$  à un point de l'héliostat  $P$ ,  $\mathbf{N}_0$  est le vecteur normal unitaire global de l'héliostat,  $\mathbf{N}$  le vecteur normal unitaire à un point  $P$  de l'héliostat.
- $R_S(O'', X'', Y'', Z'')$  est le référentiel du plan Soleil  $\mathbf{S}_0$  est le vecteur unitaire allant du centre du référentiel du plan héliostat au centre du référentiel du plan Soleil à la date initiale ( $t = 1$ ) et  $\mathbf{S}$  est le même vecteur exprimé dans  $R_S$  à chaque date.  $A(t)$  et  $H(t)$  sont l'azimut et l'élévation du Soleil à une date, et  $A_H$  et  $H_H$  sont l'azimut et l'élévation de l'héliostat à  $t = 1$ , obtenus grâce à la relation de Snell-Descartes (cf. Annexe D). Tous les angles sont exprimés dans le système trigonométrique et l'azimut est tel que :  $A(t) = 2\pi - A_{conv}(t)$ , où  $A_{conv}(t)$  est le système conventionnel pour l'azimut ( $> 0$  vers l'Ouest depuis le Sud)

Dans  $R_R$ , la réflexion qui a lieu à un point  $P$  sur l'héliostat peut être exprimé en utilisant la relation de Snell-Descartes rappelée ici :

$$\vec{R}_{(R_R)} = 2(\vec{S}_{(R_R)} \cdot \vec{N}_{(R_R)}) \cdot \vec{N}_{(R_R)} - \vec{S}_{(R_R)} \quad (12)$$

Le vecteur  $\mathbf{R}_{(R_R)}$  est considéré comme constant –tout mouvement parasite de l'héliostat est négligé, le vecteur  $\mathbf{N}_{(R_R)}$  normal à la surface de l'héliostat à  $P$  est également supposé constant et le vecteur  $\mathbf{S}_{(R_R)}$  allant de  $P$  au Soleil est obtenu et exprimé dans  $R_S$ . En considérant que  $\mathbf{R}_{(R_R)}$  et  $\mathbf{N}_{(R_R)}$  sont constants,  $\mathbf{S}_{(R_R)}$  peut alors être considéré comme constant, mais la matrice de passage  $P_{R_R \rightarrow R_S}(t)$  utilisée pour exprimer le vecteur dans  $R_S$  dépend du temps à cause du mouvement du Soleil (cf. Annexe E). Par conséquent, l'expression de  $\mathbf{S}$  dans  $R_S$  change à chaque date et également la luminance qui lui est associée.

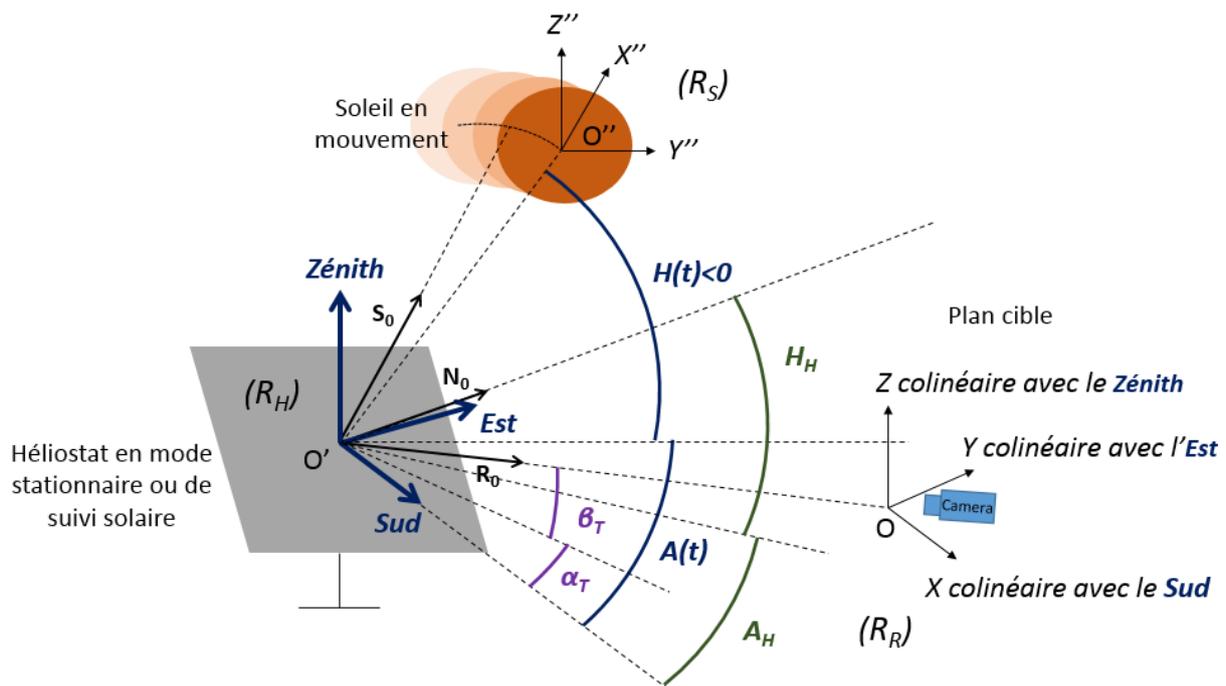


FIGURE V-2: Schéma simplifié des différents éléments des expérimentations sur lesquelles sont basées les simulations.

Les principaux vecteurs sont rappelés dans la TABLE V-1.

TABLE V-1: Récapitulatif des différents vecteurs utilisés dans les calculs.

Vecteurs	$\vec{N}_{0(R_R)}$	$\vec{R}_{0(R_R)}$	$\vec{S}_{0(R_R)}$	$\vec{N}_{(R_R)}$	$\vec{R}_{(R_R)}$	$\vec{S}_{(R_R)}$
Détails	Normale du centre de l'héliostat $O'$	Du centre de l'héliostat vers le centre de la cible $O$	Du centre de l'héliostat vers le centre du Soleil $O''$	Normale à un point $P$ de l'héliostat	D'un point $P$ de l'héliostat vers le centre de la cible $O$	D'un point $P$ de l'héliostat vers le centre du Soleil $O''$

## V.2. Méthode de rétro-visée à une caméra par mesures successives

Dans cette section, il est question du modèle ainsi que de l'étude numérique de la méthode de rétro-visée à une caméra par mesures successives qui consiste à mesurer la luminance réfléchiée par l'héliostat stationnaire à plusieurs dates, afin de reconstruire ses pentes de surface.

### V.2.1. Principe de la méthode de rétro-visée à une caméra par mesures successives

La méthode de rétro-visée à une caméra par mesures successives, dite de mesures successives, suppose un héliostat figé dont l'orientation permet la concentration du soleil vers une caméra située proche de son point focal. L'orientation de l'héliostat étant figée, la course du soleil est utilisée pour que la tache focale traverse la zone de la caméra. Plusieurs images à différents temps du passage de la tache focale peuvent être enregistrées pour obtenir sur chaque pixel une évolution temporelle de la luminance. Le déplacement du soleil provoque une évolution de la luminance réfléchiée à chaque pixel en fonction du temps. Cette évolution peut être décrite par une trajectoire sur le profil de luminance 2D (qui doit être connu) de la source étendue. Comme l'illustre

la FIGURE V-3, chaque point de l'héliostat peut donc être projeté au fil du temps sur le disque solaire. Chaque trajectoire projetée est influencée par les erreurs de pentes locales. Ces erreurs de pentes peuvent être retrouvées pour chacun des points en comparant chaque trajectoire mesurée avec la trajectoire idéale associée à un point.

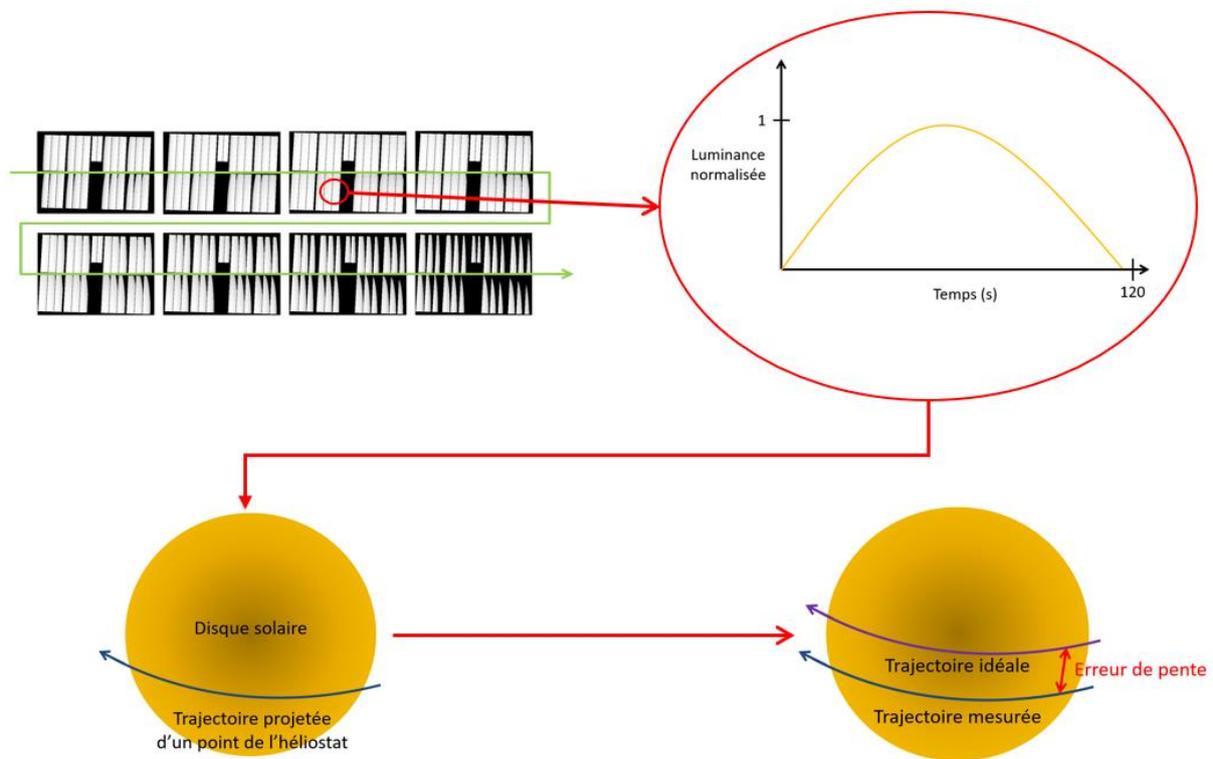


FIGURE V-3 : Illustration de la trajectoire projetée d'un point de l'héliostat à partir de la courbe de luminance mesurée à ce point, puis comparaison de celle-ci avec la trajectoire idéale permettant de retrouver les erreurs de pentes locales.

## V.2.2. Etude numérique de la méthode de rétro-visée à une caméra par mesures successives

Dans cette partie, le programme de reconstruction de la méthode à une caméra par mesures successives est tout d'abord décrit. Dans un second temps, les résultats de l'étude numérique portant sur cette méthode sont présentés et des conclusions sont apportées concernant les limites de cette dernière.

### V.2.2.A. Description de la méthode de reconstruction par comparaison de courbes de luminances optimisée

Dans un premier temps, les images d'entrée –simulées ou mesurées- sont classées dans l'ordre chronologique et l'évolution de la luminance en fonction du temps est enregistrée pour chaque pixel. Dans un second temps et également pour chaque pixel, l'algorithme de tracé de rayons inverse –écrit en langage Matlab et utilisant les équations (25) à (30)- calcule, en prenant en compte les coordonnées du système ainsi que la surface de l'héliostat, les courbes de luminances théoriques en fonction du temps pour chaque valeur de couple de pentes à tester (cf. FIGURE V-4).

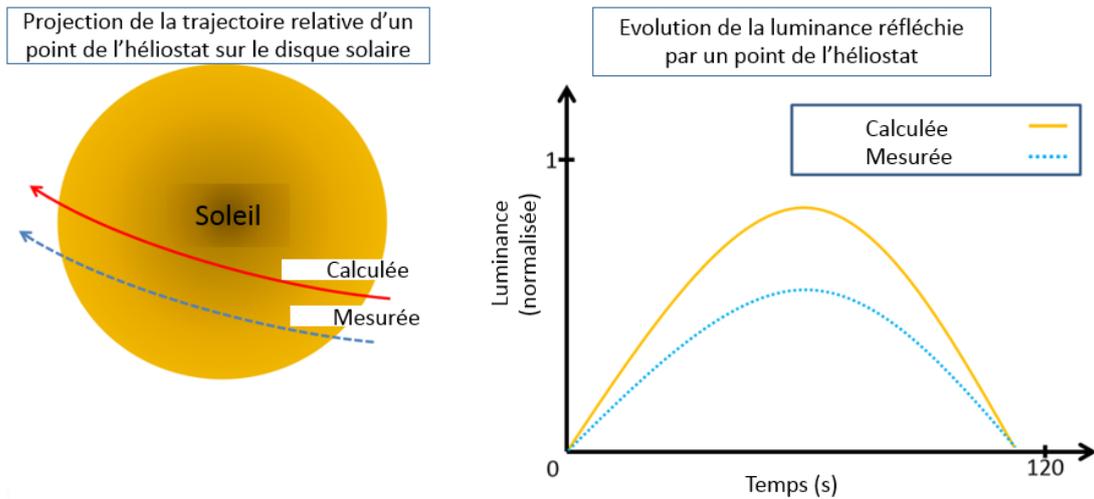


FIGURE V-4 : Schéma illustrant le lien entre la projection d'un point de l'héliostat sur le profil de luminance solaire 2D et la variation de luminance qui y est mesurée.

Chaque courbe de luminance calculée est comparée à la courbe mesurée pour ce pixel et la déviation entre les valeurs est enregistrée dans une fonction de coût. La minimisation de cette fonction de coût permet de trouver le couple de pentes considéré comme le plus approprié à la courbe de luminance mesurée. Ce processus est répété pour tous les pixels dont la luminance est non-nulle à la date initiale et le résultat consiste en deux cartes de pentes, une selon l'axe  $Y'$  et l'autre selon  $Z'$ . Le processus de la méthode de rétro-visée à une caméra par mesures successives est illustré dans le diagramme de la FIGURE V-5 ci-dessous :

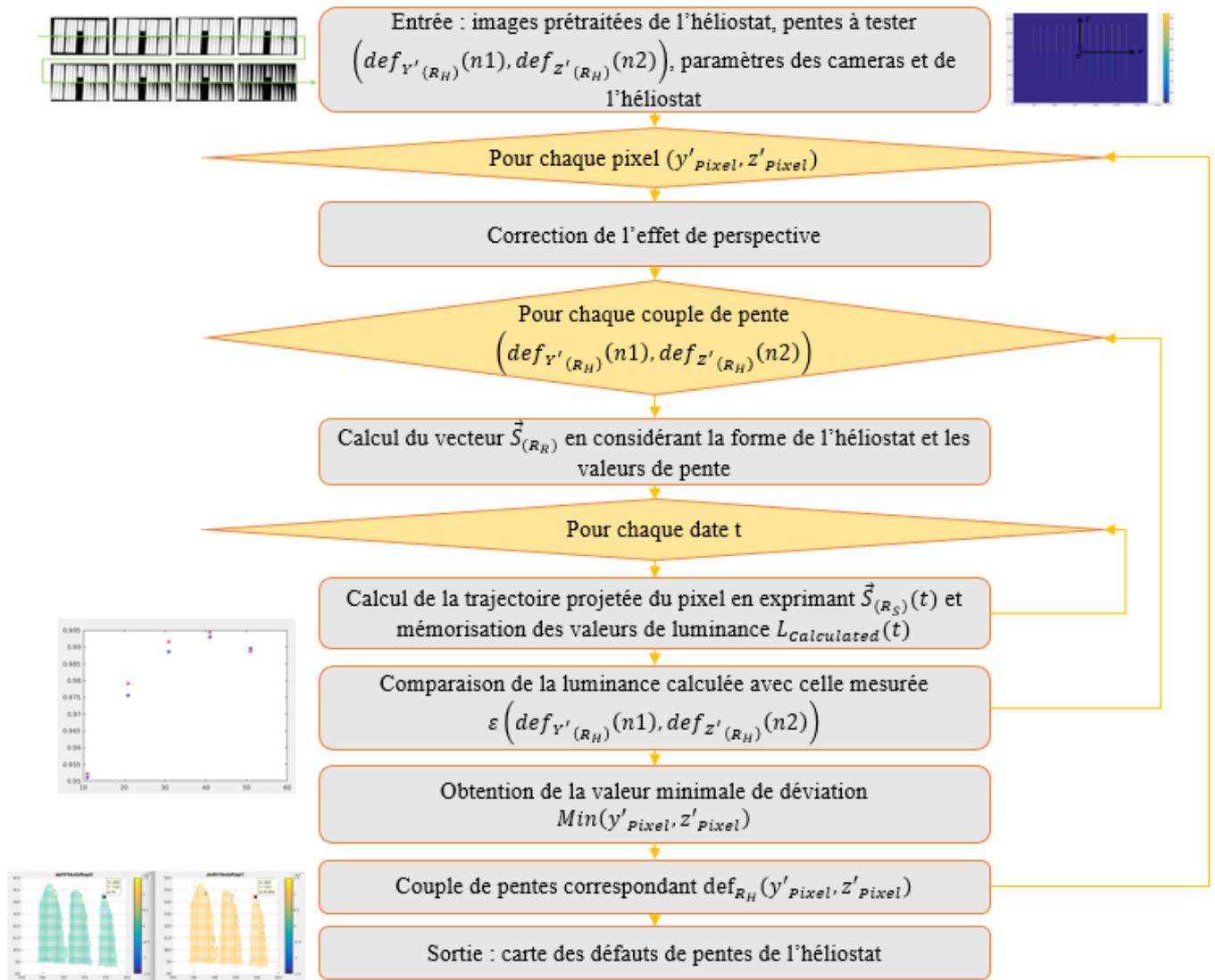


FIGURE V-5 : Diagramme simplifié du processus de reconstruction optimisé de la méthode de rétro-visée à une caméra par mesures successives.

Tel que décrit dans la section II.3.1, les coordonnées de la caméra, de l'héliostat et du Soleil ainsi que la loi de réflexion de Snell-Descartes permettent de calculer les trajectoires des rayons lumineux et de reconstruire les pentes de surface de l'héliostat :

- La connaissance préalable de la structure de l'héliostat (cf. FIGURE V-6) et de la courbure de ses miroirs permet d'obtenir une carte contenant les vecteurs normaux à sa surface.

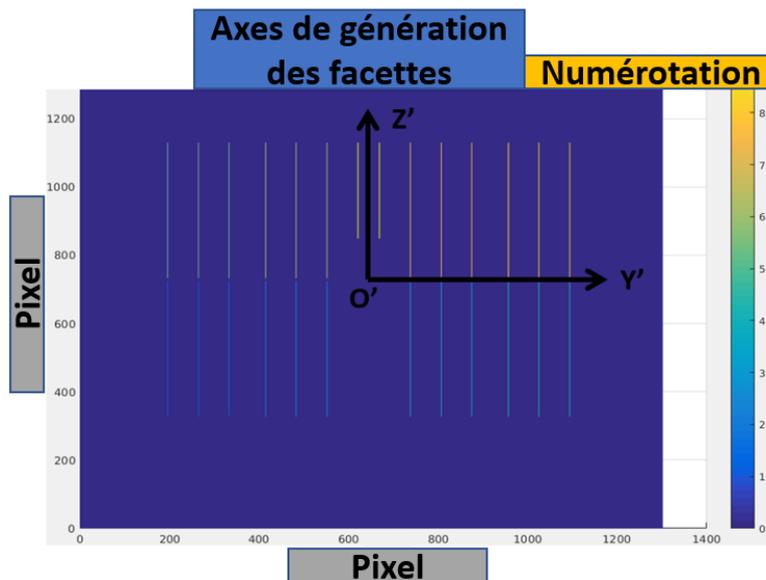


FIGURE V-6 : Carte des axes associés aux miroirs de l'héliostat (E06 de la centrale Thémis), à partir desquels est reconstituée la surface idéale de celui-ci.

- Nous pouvons alors calculer les vecteurs réfléchis et incidents, nécessaires pour décrire la réflexion des rayons lumineux sur l'héliostat. Le calcul est effectué dans le sens inverse du chemin des rayons lumineux, soit de la caméra vers le Soleil en tenant compte de la structure et de la courbure de l'héliostat. La FIGURE V-7 montre le résultat de la projection d'un point de l'héliostat sur le disque solaire à plusieurs dates.

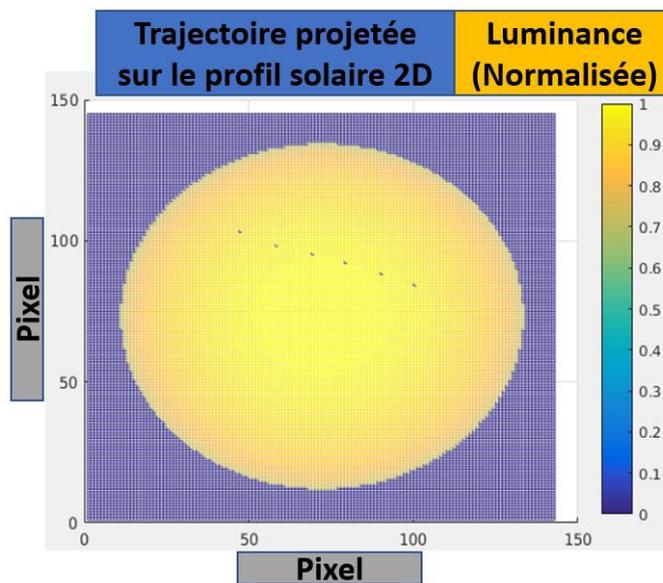


FIGURE V-7 : Trajectoire projetée sur le disque solaire d'un pixel de la carte de luminance de l'héliostat à intervalle de temps régulier.

- Ce processus de tracé de rayon inverse est réalisé pour chaque date de mesure (donc pour des positions du Soleil différentes) et permet d'obtenir une courbe de luminance en fonction du temps pour chaque valeur de couple de pentes (les composantes étant l'azimut et l'élévation).
- Pour chaque pixel nous faisons varier la valeur du couple de pentes de surface avec un pas d'incrément de  $0.25 \text{ mrad}$ , dans une plage de  $\pm 1.5 \text{ mrad}$ . Le changement de la valeur des

pentés à chaque itération induit une variation du vecteur normal au point de l'héliostat correspondant. Cette variation est calculée puis prise en compte à chaque itération, ce qui permet de générer une courbe de luminance différente pour chaque couple de pentés. Un exemple de courbe de luminance est montré dans la FIGURE V-8.

- Chacune des courbes de luminance est comparée grâce à une fonction de coût à la courbe enregistrée issue de la mesure expérimentale ou de la simulation.

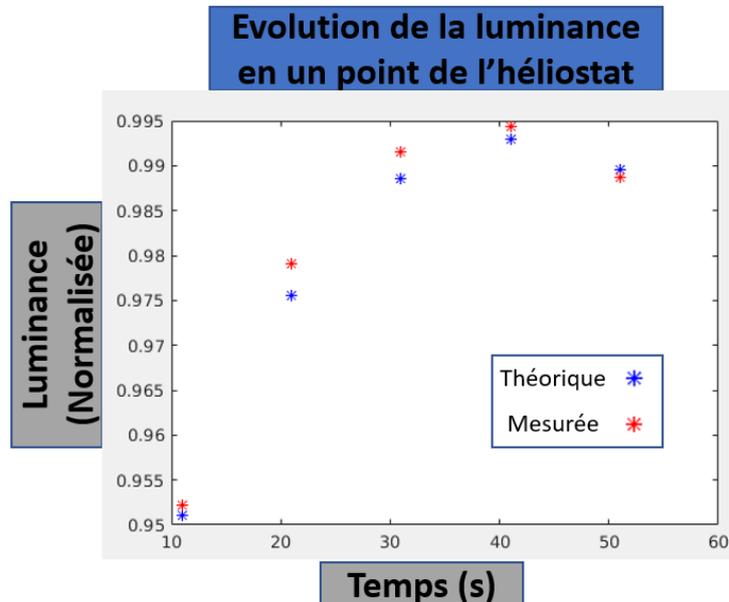


FIGURE V-8 : Exemple d'une courbe de luminance calculée (en bleu) et mesurée (en rouge) à un pixel de la carte de luminance de l'héliostat simulé avec COSAC.

- Cette fonction de coût est minimisée et permet d'obtenir le meilleur couple de pentés à ce pixel. Le processus est effectué pour tous les pixels pour lesquels la luminance à la date initiale de la mesure est non nulle.

Le calcul de la position du Soleil à chaque date est réalisé à l'aide du programme open source Solar Position Algorithm (SPA) conçu par le National Renewable Energy Laboratory (NREL), voir [51] et [52]. Les paramètres d'entrée de ce programme sont notamment la date de l'expérimentation, le fuseau horaire du site, la position géographique ainsi que l'altitude de l'installation expérimentale et la température moyenne du site, pour ne mentionner que les plus importants. Le programme permet d'obtenir les valeurs angulaires de zénith, d'élévation, d'azimut et bien d'autres, associés à la position du Soleil à chaque seconde et avec une incertitude de  $\pm 0.0003^\circ$ , soit environ  $5.2e - 3 \text{ mrad}$ . Les effets de cette incertitude peuvent être négligés dans les calculs de tracé de rayon.

### V.2.2.B. Simulation d'un héliostat de la centrale Thémis par le programme de tracé de rayon inverse

#### V.2.2.B.a Description du cas simulé

Le programme de reconstruction de la méthode de rétro-visée à une caméra par mesures successives peut servir à simuler des surfaces optiques réfléchissant un Soleil (utilisées ensuite comme images d'entrée pour les calculs de reconstruction des erreurs de pente), afin d'évaluer la cohérence et la convergence de la méthode en conservant ses propres hypothèses de calcul. Dans cette section, il est question de simuler un héliostat de la tour de Thémis (cf. FIGURE V-9), située à Targassonne dans les Pyrénées Orientales. L'héliostat est précisément le E06. Il fait environ  $54 \text{ m}^2$ , comporte 9 modules composés chacun (pour la plupart) de 6 facettes courbées. Ses dimensions, sa

structure ainsi que la courbure de ses miroirs sont implémentées dans le programme et permettent de simuler la réflexion idéale des rayons solaires par cet héliostat. Tous ces paramètres sont pris en compte dans le calcul de tracé de rayon inverse et le résultat est une carte de la luminance renvoyée par l'héliostat à chaque date. Ce processus de simulation est effectué tout d'abord pour le cas d'un héliostat sans aucun défaut introduit, puis dans le cas d'un héliostat dont le module n°3 est désaligné de  $1 \text{ mrad}$  autour de l'axe  $Y'$  (donc un défaut selon  $Z'$ ). Ceci permet d'avoir, comme pour des mesures expérimentales, un résultat de pentes sans défaut introduit à soustraire du résultat de pentes avec défauts introduits. Ce protocole est nécessaire pour s'assurer que l'erreur de pente à détecter est maîtrisée par l'expérimentateur.

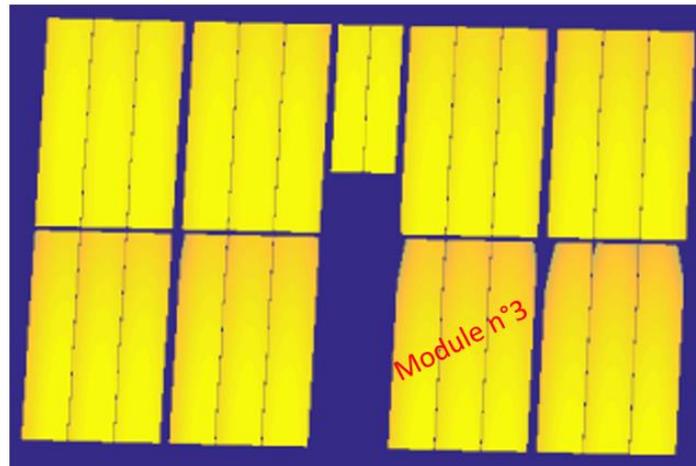


FIGURE V-9 : Héliostat simulé avec le programme de tracé de rayon inverse écrit en langage Matlab.

#### V.2.2.B.b Résultats issus de la simulation d'un module d'héliostat par tracé de rayon inverse

Par souci de gain de temps, seul le module n°3 de l'héliostat a été simulé. La surface totale maximale éclairée pendant le passage du Soleil est de  $13860 \text{ pixels}$ . Le pas d'incrément utilisé pour tester les valeurs des erreurs de pentes a été revu à la hausse pour diminuer le temps de calcul et vaut  $0.25 \text{ mrad}$ . La valeur maximale en absolu des erreurs de pentes vaut  $1.5 \text{ mrad}$  et 6 mesures sont effectuées en  $50 \text{ secondes}$ , ce qui correspond à une mesure toutes les  $10 \text{ secondes}$ . Les résultats issus des simulations montrent que la méthode de rétro-visée à une caméra par mesures successives est capable de détecter les erreurs de pentes d'un héliostat simulé en prenant en compte sa géométrie. Cette étape permet de constater les limites de la méthode, en termes de déviation standard, dans certaines zones de l'héliostat qui reflètent les bords du Soleil. Ces zones (en bleu foncé dans la FIGURE V-10) correspondent à un faible nombre d'échantillons de luminance (un à deux), ce qui cause une augmentation de l'incertitude des valeurs de pentes. L'erreur relative est de  $1.7\%$  pour les pentes selon  $Y'$  et  $2.7\%$  selon  $Z'$  qui est l'axe selon lequel a été introduit le défaut d'alignement (cf. FIGURE V-11). Ces premières valeurs d'erreur relative sont pertinentes pour s'assurer de la capacité de la méthode à converger vers un résultat cohérent prenant en compte une géométrie plus complexe qu'un miroir plan. Il y a cependant quelques pixels dans les zones hautes des bords droits des facettes pour lesquels les valeurs d'erreurs de pentes sont faussées, probablement à cause d'un manque d'échantillons de luminance. En effet, ces pixels de cette zone sont éclairés seulement une à deux fois (contrairement aux autres pixels de l'image qui comptent généralement cinq à six mesures) au cours des 6 acquisitions (cf. FIGURE V-10). Par conséquent, les courbes de luminances qui y sont mesurées comportent un échantillonnage plus faible, ce qui réduit la précision de la méthode. Une fréquence d'échantillonnage plus élevée (ex : 1 image toutes les 4 secondes, au lieu des 10 secondes actuelles) pourrait résoudre ce problème pour beaucoup de pixels, mais la contrepartie est la diminution de l'évolution de la luminance d'une mesure à l'autre. Or une

variation trop faible de la luminance ne permet pas de converger efficacement vers la solution, donc l'incertitude reste relativement élevée à ces pixels. Ainsi, un faible nombre d'échantillons constitue probablement une limite irrémédiable de cette méthode de reconstruction et supprimer certains pixels (ceux qui ne présentent pas suffisamment d'échantillons), au prix d'une perte d'informations, est une amélioration envisageable pour réduire l'erreur relative globale (d'un module entier).

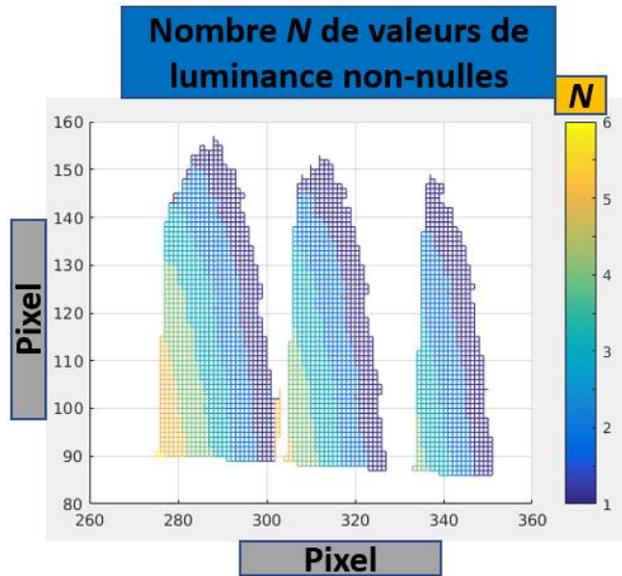


FIGURE V-10 : Carte du nombre d'occurrences de luminance non-nulle pour chaque pixel du module n°3 de l'héliostat, au fil des mesures.

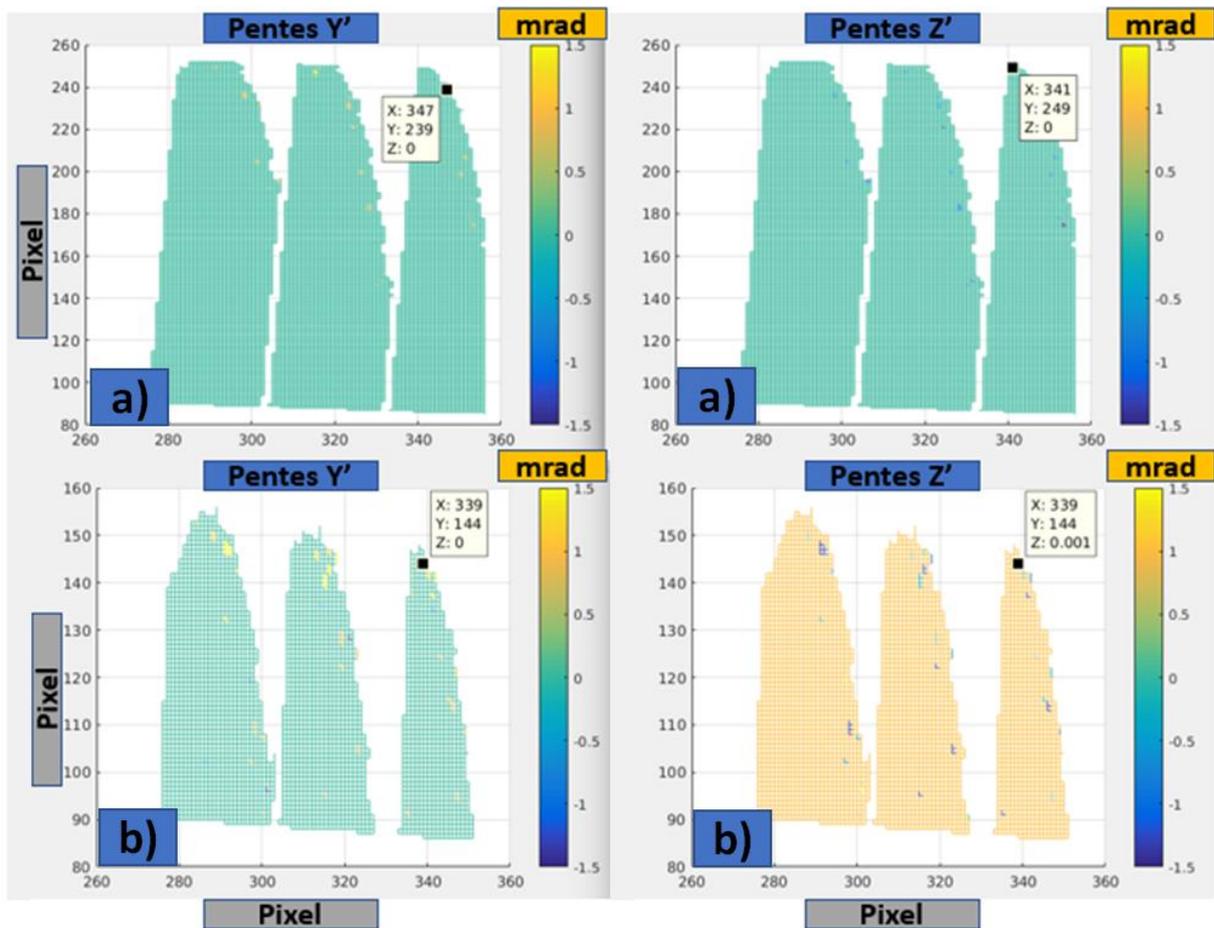


FIGURE V-11 : Carte des pentes du module n°3 reconstruites selon l'axe  $Y'$  et l'axe  $Z'$  de ce module dans le cas sans défaut introduit au module a), avec défaut b).

Dans un souci d'évaluation des limites de cette méthode en conditions réelles, nous avons ajouté un bruit aux images simulées, qui s'apparenterait au bruit de mesure rencontré dans des mesures expérimentales. Il est question d'un bruit blanc Gaussien de déviation standard égale à environ 1.7%, soit des valeurs de bruit contenues à environ 99.7% entre  $\pm 5\%$  de la valeur maximale de luminance. Ce test, illustrés dans la FIGURE V-12, montrent que le nombre de pixels ayant des valeurs d'erreurs de pentes biaisées augmente fortement. Ces pixels concernent toujours les bords des facettes mais également l'ensemble du module, avec une plus forte densité au centre des miroirs. Ces derniers correspondent à des valeurs de luminance réfléchies provenant du centre du disque solaire, là où les variations de luminance en fonction de l'angle apparent sont faibles. Les trajectoires projetées de ces points sont donc très sensibles aux variations de luminance induites par le bruit ajouté (une faible variation de luminance peut correspondre à une variation relativement forte de l'angle apparent, donc de l'erreur de pente) et localement la méthode ne converge plus vers le résultat attendu. L'erreur relative passe donc à 62.8% selon  $Y'$  et 80.8% selon  $Z'$ . Cela signifie qu'à l'échelle du module, la méthode ne converge plus vers une solution cohérente.

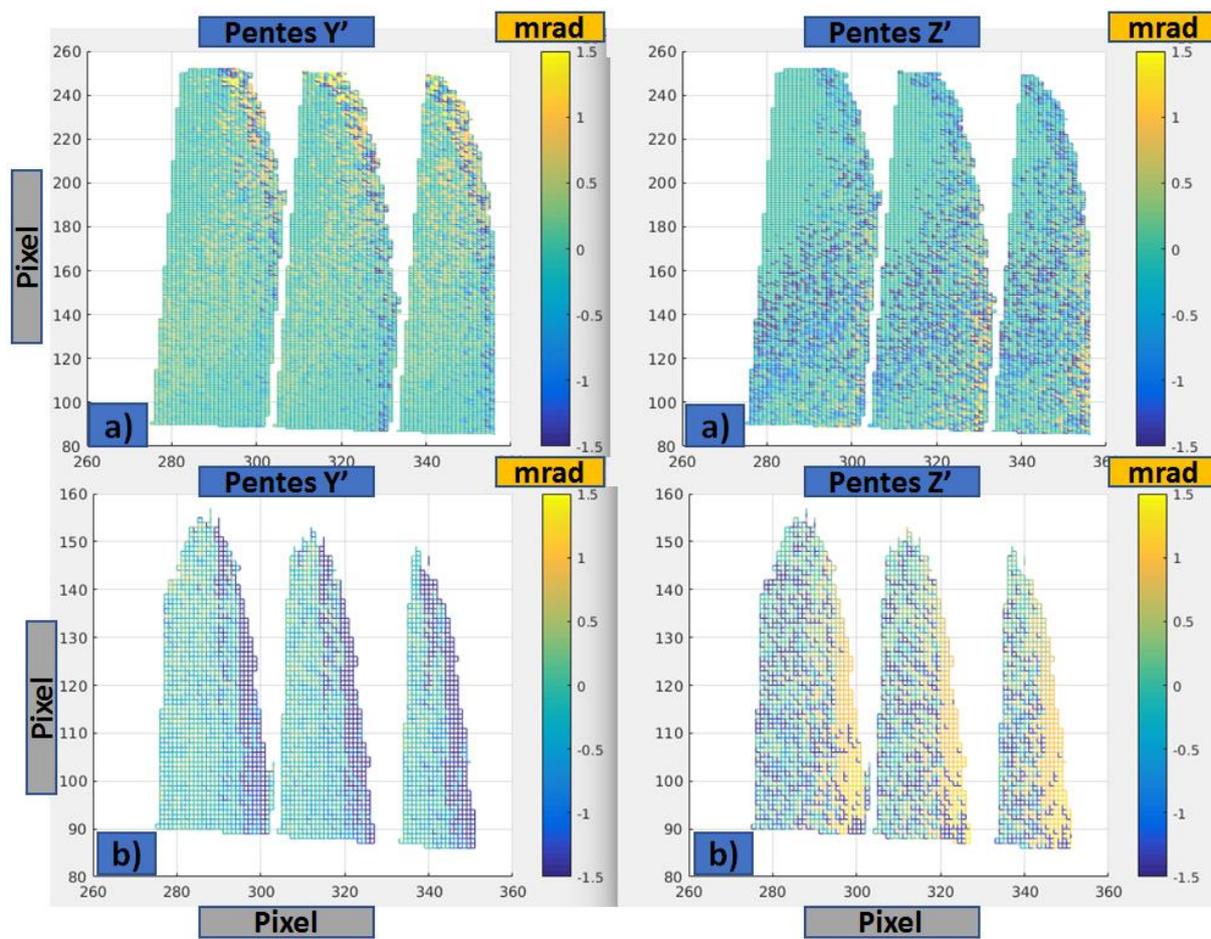


FIGURE V-12: Carte des pentes du module n°3 reconstruites selon l'axe Y' et l'axe Z' de ce module, avec un bruit ajouté aux images simulées. Cas sans défaut ajouté au module a) et avec défaut b).

Les valeurs numériques obtenues aux cours de cette étude sont résumées dans la TABLE V-2 et la TABLE V-3. La couverture spatiale correspond au ratio du nombre de pixels dont la pente est reconstruite sur le nombre total de pixels contenus dans le module. La moyenne des valeurs de pente aux pixels est effectuée et la valeur minimale de pente détectée dans le module est ôtée de la valeur maximale pour obtenir la valeur PTV. L'erreur RMS est ensuite calculée en faisant la moyenne des erreurs quadratiques. Les valeurs de couverture spatiales chutent drastiquement lorsque l'on passe du cas sans défaut au cas avec défaut introduit, car la surface éclairée est beaucoup plus faible dans ce dernier. Les valeurs moyennes sont correctes dans le cas où aucun bruit n'a été ajouté aux images simulées (cf. TABLE V-2), mais deviennent incohérentes lorsque ce dernier est pris en compte. Ceci est dû à la forte disparité dans valeurs de pentes qu'il engendre et qui est visible par l'augmentation des valeurs PTV et RMS dans la TABLE V-3.

TABLE V-2 : Résultats obtenus par la méthode de rétro-visée à une caméra par mesures successives pour la simulation du module n°3 par le programme de tracé de rayon inverse de la méthode.

Cas	Couverture spatiale	Pentes Y'			Pentes Z'		
		Moyenne (mrad)	PTV (mrad)	Erreur RMS (mrad)	Moyenne (mrad)	PTV (mrad)	Erreur RMS (mrad)
Sans défaut	0,601	0,002	1,500	0,037	-0,002	1,500	0,049
Avec	0,183	0,017	3,000	0,154	0,973	3,000	0,225

défaut							
Différence	0,182	0,017	3,000	0,154	0,973	3,000	0,225

TABLE V-3 : Résultats obtenus par la méthode de rétro-visée à une caméra par mesures successives pour la simulation du module n°3 par le programme de tracé de rayon inverse de la méthode, avec un bruit Gaussien ajouté.

Cas	Couverture spatiale	Pentes Y'			Pentes Z'		
		Moyenne (mrad)	PTV (mrad)	Erreur RMS (mrad)	Moyenne (mrad)	PTV (mrad)	Erreur RMS (mrad)
Sans défaut	0,604	0,000	4,000	0,471	-0,332	3,250	0,747
Avec défaut	0,185	-0,587	3,500	0,981	-0,209	3,500	1,590
Différence	0,185	-0,628	3,250	0,996	0,192	6,000	1,446

### V.3. Méthode de rétro-visée à une caméra par mesure unique

Dans cette section, il est question du modèle ainsi que de l'étude numérique de la méthode de rétro-visée à une caméra par mesure unique qui consiste à mesurer la luminance réfléchiée par l'héliostat à un seul instant, afin de reconstruire ses pentes de surface.

#### V.3.1. Principe de la méthode de rétro-visée à une caméra par mesure unique

La méthode de rétro-visée à une caméra par mesure unique est basée sur le principe du zonage de l'image de l'héliostat en parties possédant de nombreux pixels (éventuellement disjoints) pour lesquels les erreurs de pentes sont identiques.

L'image de l'héliostat représente une carte de luminance provenant de la réflexion du disque solaire. Par tracé de rayon inverse (en partant de la caméra) et en connaissant la réflectivité du miroir ainsi que le profil de luminance de la source étendue, il est possible de déduire la zone réfléchiée du disque solaire à chaque point de l'héliostat. Connaître la luminance de chaque point de la surface optique revient donc à projeter chacun de ces points sur le profil de luminance 2D de la source étendue (ici le Soleil). Cependant, effectuer ce raisonnement pour un seul point ne permet d'obtenir que la ligne d'iso-luminance sur laquelle se situe la position projetée du point. En supposant que la pente de surface d'un miroir peut être discrétisée et en considérant un groupe de points sur un morceau de pente constante, il est théoriquement possible d'utiliser la connaissance des positions relatives de ces points entre eux sur la surface optique afin de trouver leurs positions projetées sur le disque solaire.

#### V.3.2. Modèle de la méthode de rétro-visée à une caméra par mesure unique

Cette section comporte deux approches différentes permettant de décrire un modèle. La première consiste en la description du modèle en considérant la source étendue (ici le Soleil) comme référentiel principal, tandis que la seconde se réfère au système caméra-héliostat.

##### V.3.2.A. Approche du profil Soleil 2D

Dans cette approche, nous considérons le cas d'un système en auto-collimation (source, caméra et héliostat alignés le long de l'axe optique) par souci de simplicité. Considérons trois points  $P_1$ ,  $P_2$  et  $P_3$  à la surface d'un héliostat, formant un triangle  $P_1P_2P_3$  quelconque. L'observation de la luminance réfléchiée par l'héliostat permet d'attribuer une valeur de luminance à chacun des trois points. Dans le cas d'un héliostat dit parfait et en auto-collimation, tous les points doivent renvoyer la luminance maximale associée au centre géométrique du disque solaire  $O''$ . Supposons

que toute pente de surface peut être vue comme la combinaison de multiples pentes de valeurs constantes, et donc qu'elle est divisible en plusieurs aires de valeurs de pentes constantes. Nous choisissons une aire de pente de surface constante, contenant les trois points  $P_1$ ,  $P_2$  et  $P_3$  et dont le centre  $O'$  renvoie le centre du Soleil. Ainsi, la projection du triangle  $P_1P_2P_3$  sur le disque solaire implique que les rapports entre les distances  $P_1P_2$ ,  $P_2P_3$  et  $P_1P_3$  sont conservés, car aucune déformation n'entre en jeu (cf. FIGURE V-13). Les distances sont elles-mêmes aisément retrouvées à l'aide d'un changement de référentiel et sont nécessaires pour calculer les éventuelles erreurs de pentes de surface.

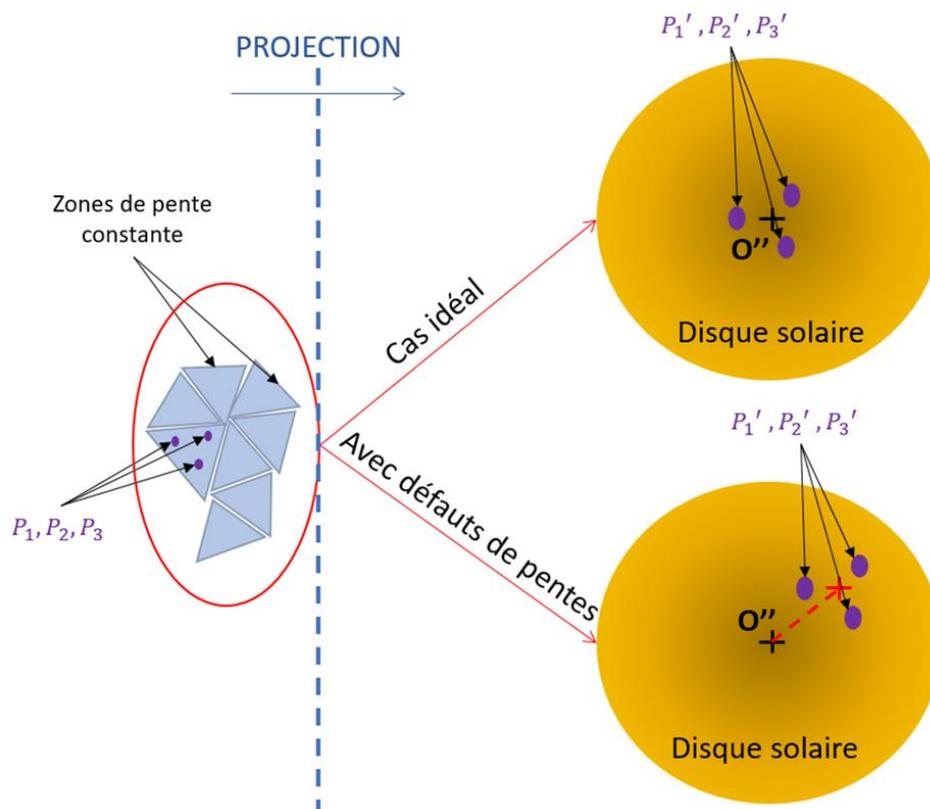


FIGURE V-13 : Schéma illustrant le principe de l'approche par le profil 2D du Soleil permettant de reconstruire les pentes de surface de l'héliostat.

Dans la réalité, des défauts opto-mécaniques peuvent être présents sur la surface de l'héliostat et chacun de ces défauts peut être approché de la même façon que les pentes de surface : discrétisé en plusieurs aires d'erreurs de pentes constantes. En poursuivant cette approche, nous en déduisons que localement, un défaut présent sur l'aire contenant les points  $P_1$ ,  $P_2$  et  $P_3$  correspond à une erreur de tilt (cf. Annexe A). Cette situation, qui n'implique toujours aucune déformation de la projection du triangle  $P_1P_2P_3$  sur le disque solaire, correspond à une translation du triangle projeté sur celui-ci (cf. FIGURE V-14).

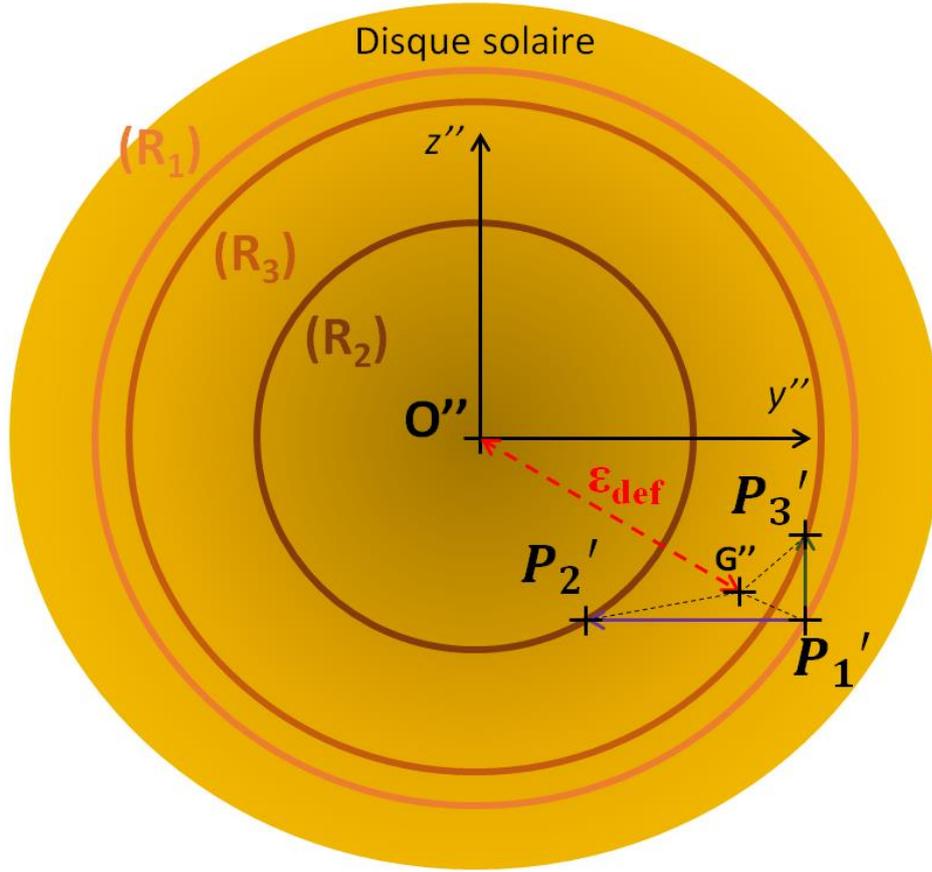


FIGURE V-14 : Schéma de la géométrie permettant de remonter aux défauts de pente.

Connaître la valeur de la luminance de chaque point permet d'accéder à l'emplacement du triangle  $P_1P_2P_3$  sur le profil de luminance 2D du Soleil, considéré comme symétrique de révolution. Notons  $Proj(P_1P_2P_3)$  la projection du triangle  $P_1P_2P_3$  sur le disque solaire, qui dépend de la pente de surface  $P_{surf}(P_1P_2P_3)$  aux points  $P_1$ ,  $P_2$  et  $P_3$ , ainsi que de l'erreur de pente de surface  $(\frac{\partial \Delta(P_1P_2P_3)}{\partial y''}, \frac{\partial \Delta(P_1P_2P_3)}{\partial z''})$ , de sorte que :

$$Proj\left(P_{surf,y''}(P_1P_2P_3), P_{surf,z''}(P_1P_2P_3), \frac{\partial \Delta(P_1P_2P_3)}{\partial y''}, \frac{\partial \Delta(P_1P_2P_3)}{\partial z''}, P_1P_2P_3\right) = P_1'P_2'P_3' \quad (32)$$

Ayant une valeur de luminance propre, chaque point peut être placé sur un cercle d'isoluminance de sorte que :

$$y_{P_1'}^2 + z_{P_1'}^2 = R_1^2 \quad (33)$$

Puis :

$$y_{P_2'}^2 + z_{P_2'}^2 = R_2^2 \quad (34)$$

Et :

$$y_{P_3'}^2 + z_{P_3'}^2 = R_3^2 \quad (35)$$

De plus, la norme du vecteur  $\overline{P_1'P_2'}$  est connue et permet de trouver les coordonnées des points  $P_1'$  et  $P_2'$  :

$$(y_{P_2'} - y_{P_1'})^2 + (z_{P_2'} - z_{P_1'})^2 = P_1'P_2'^2 \quad (36)$$

En considérant le cas simple du vecteur  $\overrightarrow{P_1'P_2'}$  colinéaire à l'axe  $y''$ , soit que  $z''_{P_2'} - z''_{P_1'} = 0$ , nous pouvons développer les termes de cette équation de la façon suivante :

$$y_{P_2'}^2 - 2y_{P_2'}y_{P_1'} + y_{P_1'}^2 = P_1'P_2'^2 \quad (37)$$

Or, grâce à l'équation du cercle ( $R_2$ ) nous avons :

$$y_{P_1'}^2 - 2y_{P_1'}\sqrt{R_2^2 - z_{P_2'}^2} + R_2^2 - z_{P_2'}^2 - P_1'P_2'^2 = 0 \quad (38)$$

Le déterminant de cette équation, qui vaut  $4P_1'P_2'^2$ , est strictement positif. Il y a donc deux solutions mathématiques possibles, dont une liée à un sens inadéquat du vecteur  $\overrightarrow{P_1'P_2'}$  que nous pouvons éliminer. Il reste donc :

$$y_{P_1'} = \frac{-\sqrt{R_2^2 - z_{P_2'}^2} - 2P_1'P_2'}{2} \quad (39)$$

Or cette solution est en fait double, car elle implique que  $z_{P_2'}$  peut être positif ou négatif. Pour résoudre ce problème, qui est symétrique, il faut donc contraindre les solutions possibles en prenant en compte le troisième point du triangle  $P_1'P_2'P_3'$ . En raisonnant comme précédemment avec le vecteur  $\overrightarrow{P_1'P_3'}$  et avec la même simplification, à la différence près que le vecteur est colinéaire à l'axe  $z''$ , nous trouvons une double solution dont l'expression est :

$$z_{P_1'} = \frac{-\sqrt{R_3^2 - y_{P_3'}^2} + 2P_1'P_3'}{2} \quad (40)$$

Or  $z_{P_1'} = z_{P_2'}$ , donc le signe de  $z_{P_2'}$  est contraint par le vecteur  $\overrightarrow{P_1'P_3'}$  et il n'y a plus qu'une seule solution permettant de trouver  $y_{P_1'}$ . Il ne reste plus ensuite qu'à calculer la seconde coordonnée du point  $P_1'$  en utilisant l'équation (Eq. 33) du cercle ( $R_1$ ) :

$$z_{P_1'} = \sqrt{R_1^2 - y_{P_1'}^2} \quad (41)$$

Il est ensuite aisé de retrouver les coordonnées manquantes des points  $B$  et  $C$  :

$$y_{P_2'} = P_1'P_2' + y_{P_1'} \quad (42)$$

$$z_{P_3'} = P_1'P_3' + z_{P_1'} \quad (43)$$

Nous avons donc les coordonnées des sommets du triangles  $P_1'P_2'P_3'$ , soit sa position par rapport au centre du disque solaire. En considérant la projection  $O''_1$  du point  $O'$  de l'aire de pente constante (sensé renvoyer le centre  $O''$  du Soleil) sur le disque solaire, nous pouvons obtenir la valeur de la translation  $\overrightarrow{O''O''_1}$  qui correspond au défaut de pente. Ce raisonnement nous a permis de montrer qu'il est possible d'établir une expression analytique des défauts de pentes en partant de la connaissance de la luminance renvoyée par trois points, de leurs positions dans le référentiel de l'héliostat, ainsi qu'en supposant que ces trois points sont situés sur une aire à erreur de pente localement constante.

### V.3.2.B. Approche par les équations de Nijboer

Cette approche a été établie afin de faire un parallèle direct avec le modèle de la méthode de rétro-visée à quatre caméras (cf. section II.1.2). Ce dernier utilise la multiplication des points de vue observant chaque point de mesure sur la surface optique afin de calculer la pente locale, alors que le

présent modèle utilise la multiplication des points de mesure sur la surface optique depuis un seul point de vue, afin de calculer la pente à plus grande échelle.

Dans un souci de simplicité, nous considérons tout d'abord le cas académique d'un héliostat dans une configuration d'auto-collimation (le Soleil, la caméra et l'héliostat sont alignés le long de l'axe optique). Tel que dans la section II.1.2, ce cas permet de simplifier la démonstration amenant au calcul des pentes de surface. Les vecteurs introduits dans la section II.1.1 sont quasi-colinéaires, donc une erreur peut être ajoutée facilement au vecteur  $\vec{N}$ . La caméra est située à l'origine  $O$  du référentiel du plan récepteur, le centre du référentiel du plan de l'héliostat  $O'$  est sur l'axe optique de la caméra et le centre du référentiel du plan du Soleil  $O''$  est aligné avec  $O$  et  $O'$ . La caméra mesure la réflexion du Soleil à travers la surface réfléchissante de l'héliostat, dont chaque point est exprimé selon des coordonnées cartésiennes  $P(y', z')$ . Si les miroirs de l'héliostat sont parfaits, un rayon incident, provenant du centre du disque solaire, qui est réfléchi à un point  $P$ , atteint l'origine du référentiel du plan récepteur  $O$ . Un défaut opto-mécanique  $\Delta(P)$  à ce point peut être vu comme la déviation du rayon incident provenant du Soleil, donc comme les déviations  $\alpha_{def}$  et  $\beta_{def}$  dans  $R_S$  et réciproquement ces rayons ont des déviations opposées exprimées ci-dessous :

$$\tan(\alpha_{def}) = \frac{dy}{D} \quad \tan(\beta_{def}) = \frac{dz}{D} \quad (44)$$

où  $dx$  et  $dy$ , aberrations transverses dans le référentiel du plan récepteur, consistent en les différences, selon les axes  $Y$  et  $Z$  respectivement, entre un rayon réfléchi par un héliostat sans défaut et un rayon réfléchi par un avec défaut(s).  $D$  est la distance  $O'O$  entre l'origine du référentiel du plan de l'héliostat et l'origine du référentiel du plan récepteur. En utilisant les relations de Nijboer,  $dy$  and  $dz$  peuvent être reliées aux dérivées (pentes) de l'erreur de front d'onde (rappel des notions dans la TABLE V-1) :

TABLE V-4: Rappel des principales grandeurs utilisées dans les calculs.

Grandeurs	$W(P)$	$\frac{\partial W(P)}{\partial}$	$\Delta(P)$	$\frac{\partial \Delta(P)}{\partial}$
Description	Front d'onde réfléchi au point $P$	Pente du front d'onde réfléchi au point $P$	Défaut de surface de l'héliostat au point $P$	Pente du défaut de surface de l'héliostat au point $P$

$$dy = D \frac{\partial W(P)}{\partial y} \quad dz = D \frac{\partial W(P)}{\partial z} \quad (45)$$

En configuration d'auto-collimation,  $Y$  et  $Y'$  (respectivement  $Z$  et  $Z'$ ) coïncident et les déviations angulaires valent le double des erreurs opto-mécaniques :

$$\frac{\partial W(P)}{\partial y} = 2 \frac{\partial \Delta(P)}{\partial y'} \quad \frac{\partial W(P)}{\partial z} = 2 \frac{\partial \Delta(P)}{\partial z'} \quad (46)$$

Tel que montré dans [53], en combinant (45)-(46) et en utilisant l'approximation des petits angles ( $\tan(x) \approx x$ ), les expressions des déviations angulaires deviennent :

$$\alpha_{def} = 2 \frac{\partial \Delta(P)}{\partial y'} \quad \beta_{def} = 2 \frac{\partial \Delta(P)}{\partial z'} \quad (47)$$

Supposons que tout défaut opto-mécanique peut être vu comme la combinaison de multiples erreurs de tilts constants (cf. FIGURE V-15), donc qu'il est divisible en plusieurs aires de valeurs de tilt constantes.

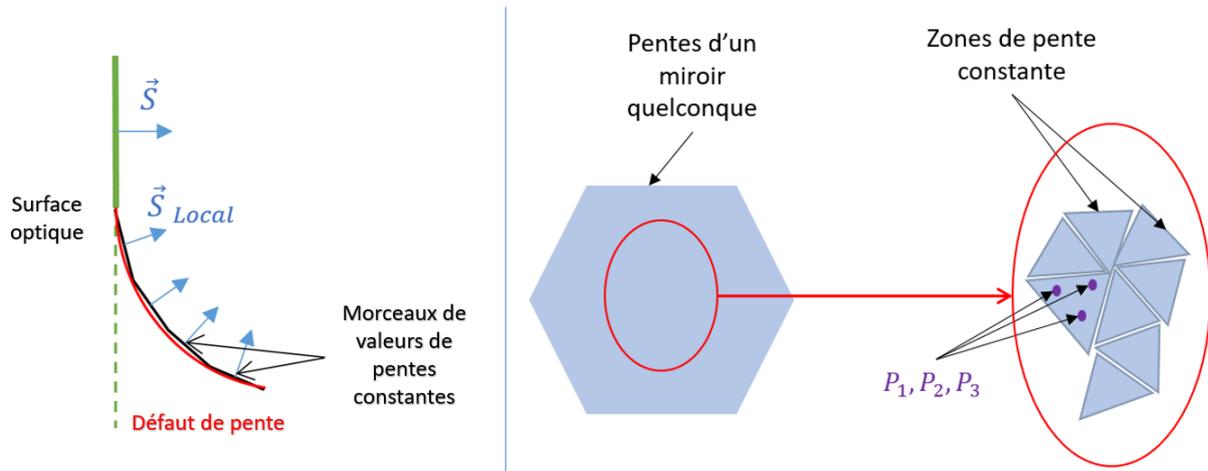


FIGURE V-15 : Schéma illustrant la discrétisation d'un défaut opto-mécanique quelconque en plusieurs erreurs de valeurs de tilts constants.

Considérons maintenant une aire, dont le centre est  $O'_1$ , mais que nous nommerons  $O'$  pour plus de commodité. La zone est donc sensée renvoyer le centre du Soleil au point  $O'$ . Pour considérer ce qui se produit à un point quelconque  $P$  de cette aire, il est nécessaire de prendre en compte la déviation angulaire liée à la position du point  $P$  par rapport au point  $O'$  :

$$\tan(\alpha_P) = \frac{y'_P}{D} \quad \tan(\beta_P) = \frac{z'_P}{D} \quad (48)$$

où  $y'_P$  et  $z'_P$ , sont les distances, respectivement selon  $Y'$  et  $Z'$ , du centre de l'aire à un point  $P$ .

Or, tel qu'illustré dans la FIGURE V-16, observer le point  $P$  selon  $y'$  revient à observer le centre de l'aire en lui ajoutant un défaut de pente de surface de  $\alpha_P$ , soit une WFE de  $2\alpha_P$ . Le même raisonnement s'applique selon  $z'$ .

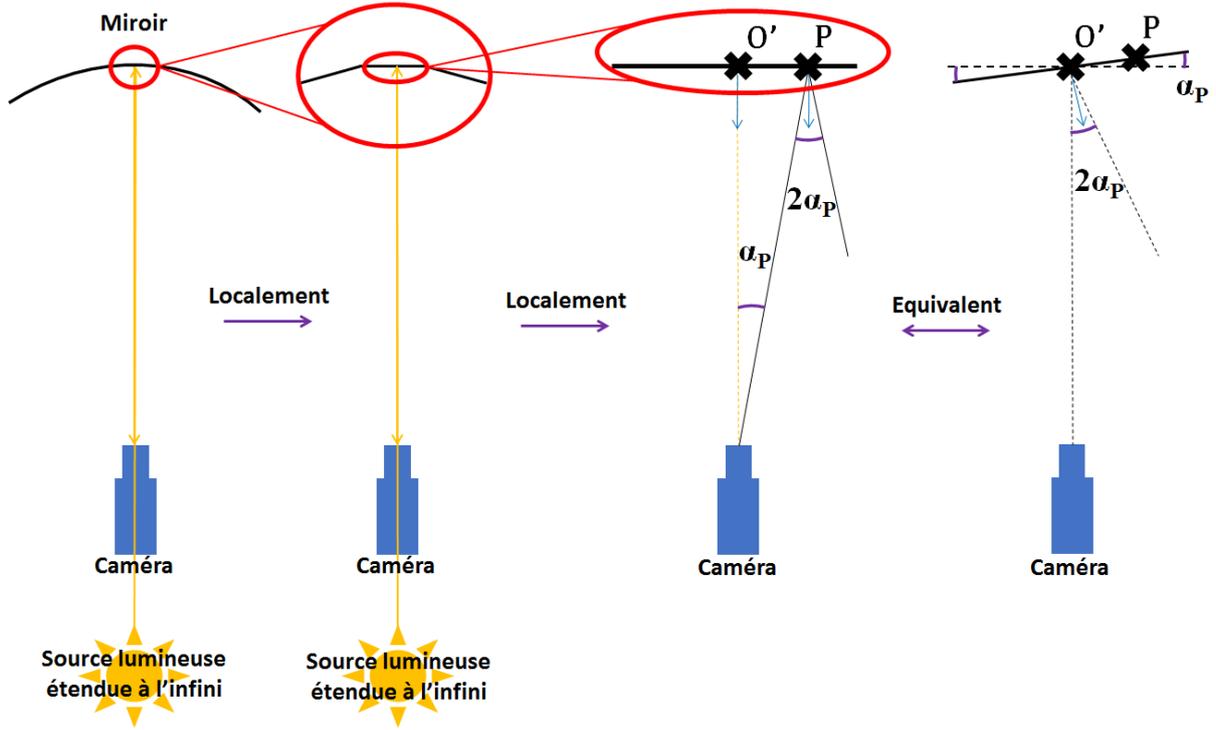


FIGURE V-16: Schéma simplifié illustrant la déviation induite par l'observation d'un point appartenant à une zone à pente constante.

En ajoutant la déviation angulaire due à l'erreur opto-mécanique et celle due à la position du point  $P$ , et en utilisant la même approximation, l'expression de la déviation angulaire totale à  $P$  est :

$$\alpha = 2 \frac{\partial \Delta(P)}{\partial y'} + 2 \frac{y'P}{D} \quad \beta = 2 \frac{\partial \Delta(P)}{\partial z'} + 2 \frac{z'P}{D} \quad (49)$$

Considérons un profil solaire décrit par sa loi de luminance angulaire :

$$B(\varepsilon) = B_0 f(\varepsilon) \quad (50)$$

où  $B_0$  est la luminance au centre du Soleil,  $\varepsilon$  l'angle radial solaire égal à  $\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}$  et  $f(\varepsilon)$  une fonction monotone décroissante égale à 1 au centre du Soleil ( $\varepsilon = \varepsilon_0$ ). En insérant les expressions des déviations angulaires (49) dans le profil de luminance du Soleil, en tenant compte du facteur de réflectivité  $R(P)$  à chaque point de l'héliostat et en considérant que tout point appartient à une aire de valeur de tilt constante, nous obtenons une nouvelle expression de la distribution de la luminance :

$$B(P) = R(P) B_0 f \left( \sqrt{\left( 2 \frac{\partial \Delta(P)}{\partial y'} + 2 \frac{y'P}{D} \right)^2 + \left( 2 \frac{\partial \Delta(P)}{\partial z'} + 2 \frac{z'P}{D} \right)^2} \right) \quad (51)$$

Définissons maintenant la fonction  $K(P)$  comme le carré de la fonction inverse de  $f(\varepsilon)$  sur l'intervalle  $[0, \varepsilon_0]$  :

$$K(P) = \left[ f^{-1} \left( \frac{B(P)}{R(P) B_0} \right) \right]^2 \quad (52)$$

Le développement de cet élément donne :

$$K(P) = 4 \left( \frac{\partial \Delta(P)}{\partial y'} \right)^2 + 4 \left( \frac{\partial \Delta(P)}{\partial z'} \right)^2 + 8 \frac{\partial \Delta(P)}{\partial y'} \frac{y'P}{D} + 8 \frac{\partial \Delta(P)}{\partial z'} \frac{z'P}{D} + 4 \left( \frac{y'P}{D} \right)^2 + 4 \left( \frac{z'P}{D} \right)^2 \quad (53)$$

En se basant sur le modèle des zones à valeurs de tilt constantes et sur le fait que trois points ( $P_1, P_2, P_3$ ) sont situés sur une même zone, nous nous retrouvons avec un système de trois équations à deux inconnues  $\frac{\partial \Delta(P)}{\partial y'}$  et  $\frac{\partial \Delta(P)}{\partial z'}$ . Nous pouvons combiner les trois équations en se référant au modèle (donc en posant que  $\frac{\partial \Delta(P)}{\partial y'}$  et  $\frac{\partial \Delta(P)}{\partial z'}$  sont constants pour les trois points), ce qui permet d'éliminer les carrés d'inconnues. Nous pouvons ensuite établir les expressions des erreurs de pentes :

$$\frac{\partial \Delta(P_i)}{\partial y'} = \frac{(z'_{P_1} - z'_{P_2})[(K(P_1) - K(P_3))(z'_{P_1} - z'_{P_2}) + (K(P_1) - K(P_2))(z'_{P_1} - z'_{P_3}) + B_{z'}]}{(z'_{P_1} - z'_{P_2})(y'_{P_1} - y'_{P_3}) - (z'_{P_1} - z'_{P_3})(y'_{P_1} - y'_{P_2})}$$

$$\frac{\partial \Delta(P_i)}{\partial z'} = \frac{(y'_{P_1} - y'_{P_2})[(K(P_1) - K(P_3))(y'_{P_1} - y'_{P_2}) + (K(P_1) - K(P_2))(y'_{P_1} - y'_{P_3}) + B_{y'}]}{(y'_{P_1} - y'_{P_2})(z'_{P_1} - z'_{P_3}) - (y'_{P_1} - y'_{P_3})(z'_{P_1} - z'_{P_2})} \quad (54)$$

$$\text{où } B_{z'} = \frac{4(z'_{P_1} - z'_{P_3})(y'_{P_1}{}^2 + z'_{P_1}{}^2 - y'_{P_2}{}^2 - z'_{P_2}{}^2) - 4(z'_{P_1} - z'_{P_2})(y'_{P_1}{}^2 + z'_{P_1}{}^2 - y'_{P_3}{}^2 - z'_{P_3}{}^2)}{D^2}$$

$$\text{et } B_{y'} = \frac{4(y'_{P_1} - y'_{P_3})(y'_{P_1}{}^2 + z'_{P_1}{}^2 - y'_{P_2}{}^2 - z'_{P_2}{}^2) - 4(y'_{P_1} - y'_{P_2})(y'_{P_1}{}^2 + z'_{P_1}{}^2 - y'_{P_3}{}^2 - z'_{P_3}{}^2)}{D^2}$$

Les formules obtenues montrent que le calcul des erreurs de pentes dépend de la position des points et de la connaissance de la distribution de luminance du profil solaire. Plus précisément, ces expressions montrent qu'il est possible de détecter des défauts opto-mécaniques, en utilisant seulement une image de l'héliostat et en connaissant la position des caméras, de l'héliostat et du Soleil, ainsi que son profil de luminance et la réflectivité.

### V.3.3. Etude numérique de la méthode de rétro-visée à une caméra par mesure unique

#### V.3.3.A. Description de la méthode de reconstruction par comparaison de cartes de luminance

La méthode de rétro-visée à une caméra par mesure unique est basée sur le postulat que toute erreur de pente peut être discrétisée en de multiples aires à valeur d'erreur de pente constante. En théorie, il est possible de reconstruire ces aires en connaissant la position et la luminance renvoyée par au minimum trois points chacune.

Le programme optimisé de reconstruction de la méthode de rétro-visée à une caméra par mesure unique reconstruit la carte des erreurs de pentes par sélection de zones successives, dont le nombre de pixels n'est pas limité (cf. FIGURE V-17). En considérant que chaque zone sélectionnée possède une pente constante, il calcule la luminance théorique que celle-ci devrait réfléchir en chaque pixel. Pour la première itération, la zone à étudier est l'héliostat entier. A la deuxième itération, le groupe de pixels à étudier est composé des pixels qui n'ont pas été sélectionnés à l'itération précédente pour former une zone de pente constante. Ainsi, la taille des zones sélectionnées diminue au fur et à mesure que le code progresse dans la reconstruction. Le nombre total de zones à reconstruire (et donc le temps de calcul) dépend directement du nombre d'ajustements à effectuer pour que tous les pixels de l'héliostat soient correctement reconstruits, ou que la dernière zone contienne un nombre de pixels négligeable (inférieur à 20).

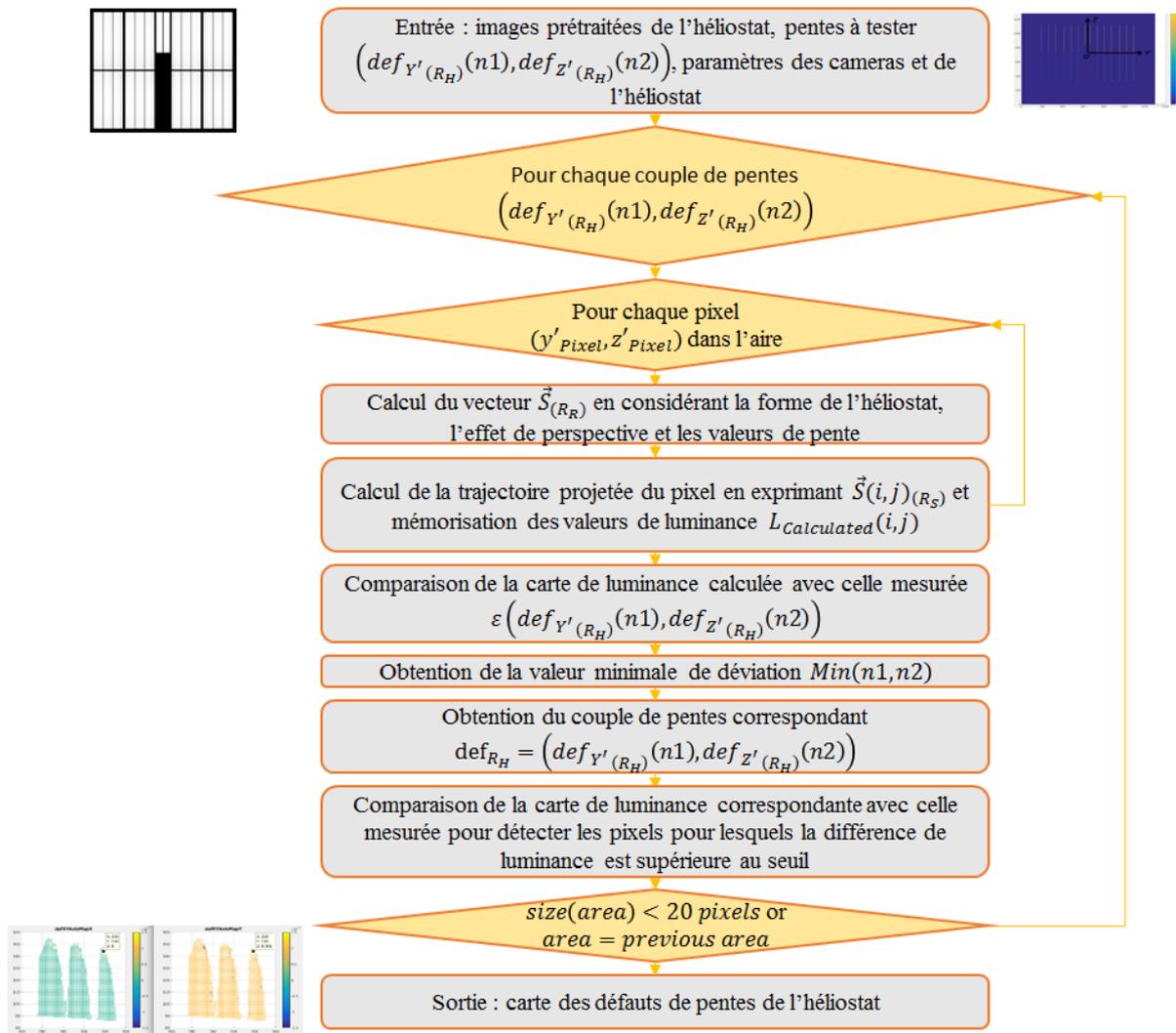


FIGURE V-17 : Diagramme du processus de reconstruction des pentes de surface optimisé de la méthode de rétro-visée à une caméra par mesure unique.

Tel que présenté dans le diagramme ci-dessus, la première étape du calcul de reconstruction consiste à considérer l'héliostat entier comme une zone à erreurs de pentes constantes :

- La carte des luminances réfléchies est calculée pour toutes les valeurs de couples de pentes possibles et chacune de ces cartes est comparée à la mesure.
- Ces résultats de comparaison sont enregistrés dans une fonction d'erreur (cf. FIGURE V-18) et la minimisation de celle-ci permet de trouver la meilleure valeur du couple de pentes. Idéalement et dans le cas d'une unique erreur de suivi de l'héliostat, la carte finale des luminances calculées, qui correspond à la meilleure valeur de couple de pentes, est comparée avec l'image mesurée et aucune différence significative n'est enregistrée entre les deux images. Dans ce cas précis, le processus se borne donc à cette étape.
- Dans les cas plus probables d'une combinaison de plusieurs types d'erreurs (erreur de suivi, désalignements de miroirs et défauts de courbure) des différences en luminance entre les deux images existent pour une multitude de pixels, qui sont enregistrés et forment une nouvelle zone à reconstruire (si les différences dépassent une valeur seuil).

- Le calcul des luminances réfléchies, la comparaison avec les luminances mesurées à cette zone, ainsi que la minimisation de la fonction d'erreur (cf. FIGURE V-18) sont réappliqués à ces pixels. Que l'on se trouve dans le cas d'un défaut de pointage de l'héliostat ou dans un cas complexe comprenant des défauts d'alignement et/ou de courbure, la minimisation de la fonction d'erreur doit permettre d'identifier les pentes qui sont à même, par la simulation, de reproduire la carte de luminance mesurée. Cette étape de sélection des couples d'erreurs de pentes est réalisée à partir d'une fonction de coût comportant trois critères : la couverture spatiale de la zone, les écarts moyens et les écarts quadratiques. Ceci permet d'approcher, par le tracé de rayon inverse, la carte de luminance mesurée en tenant compte de la géométrie imparfaite de l'héliostat réel.
- Puis la carte des luminances calculées correspondant à la meilleure valeur de couple de pentes est comparée à la luminance mesurée, et tous les pixels dont les valeurs de luminance calculées ne correspondent pas à la mesure sont enregistrés et forment une nouvelle zone à reconstruire. Ce processus a lieu jusqu'à l'absence d'une nouvelle zone ou bien jusqu'à ce que sa taille soit négligeable ( $< 20 \text{ pixels}$ ).

La fonction de coût utilisée prend donc en compte trois critères à minimiser :

Le premier critère rend compte de la fraction de couverture spatiale non reconstruite par rapport à la surface totale exploitable de la zone considérée :

$$S_1 = 1 - \left( \frac{N_{théorique}}{N_{expérimentale}} \right) \quad (55)$$

où  $N_{théorique}$  est le nombre de pixels reconstruit par la méthode et  $N_{expérimentale}$  le nombre de pixels mesurés et exploitables (dont la luminance est supérieure à un seuil équivalent à la valeur moyenne du bruit de mesure) dans la zone concernée à l'itération courante. Ce critère tend vers zéro pour une surface reconstruite s'approchant de la surface mesurée et exploitable.

Le deuxième critère renseigne sur l'écart moyen entre les valeurs de luminance reconstruites et mesurées dans la zone considérée lors d'une itération. Ce qui correspond à la valeur absolue de la moyenne normalisée des écarts locaux en luminance entre la mesure et la théorie :

$$S_2 = \frac{\left| \sum_1^{N_{théorique}} (L_{théorique} - L_{expérimentale}) \right|}{N_{théorique} * L_{max}} \quad (56)$$

où  $L_{théorique}$  désigne la luminance reconstruite par la méthode pour un pixel et  $L_{expérimentale}$  la luminance mesurée pour ce même pixel.  $L_{max}$  correspond à la luminance maximale (provenant du centre du disque solaire) et est utilisée pour normaliser la moyenne des écarts. Ce critère tient compte des compensations lorsque les différences de luminances alternent en signe et tend vers zéro si les écarts se compensent en moyenne (ce qui indique un niveau moyen de luminance identique).

Le troisième critère évalue l'écart entre les profils de luminances reconstruites et mesurées avec un écart quadratique moyen normalisé. Ce critère tend vers zéro lorsque le niveau moyen ainsi que la variation spatiale de la luminance sont identiques :

$$S_3 = \frac{\sum_1^{N_{théorique}} (L_{théorique} - L_{expérimentale})^2}{N_{théorique} * L_{max}^2} \quad (57)$$

La minimisation de la fonction de coût est effectuée grâce à l'approche « Closest-point » dont le principe repose sur l'obtention d'une solution combinant les minima de chaque critère que l'on considère sans pondération. Initialement, et pour les reconstructions de modules d'héliostat simulés (cf. section V.3.3.B), la fonction de coût correspond à la racine carré de la somme quadratique des critères :

$$S = \min\left(\sqrt{[S_1]^2 + [S_2]^2 + [S_3]^2}\right) \quad (58)$$

Cette méthode d'optimisation, qui reste parmi les plus élémentaires, est évoquée dans l'étude [63] et consiste donc à trouver le point appartenant au front de Pareto étant le plus proche du point utopique (ici (0,0,0)). Si chaque critère est représenté sur un axe d'un repère orthonormé, cela revient à obtenir le point du front de Pareto le plus proche de l'origine, tel que montré dans la FIGURE V-18.

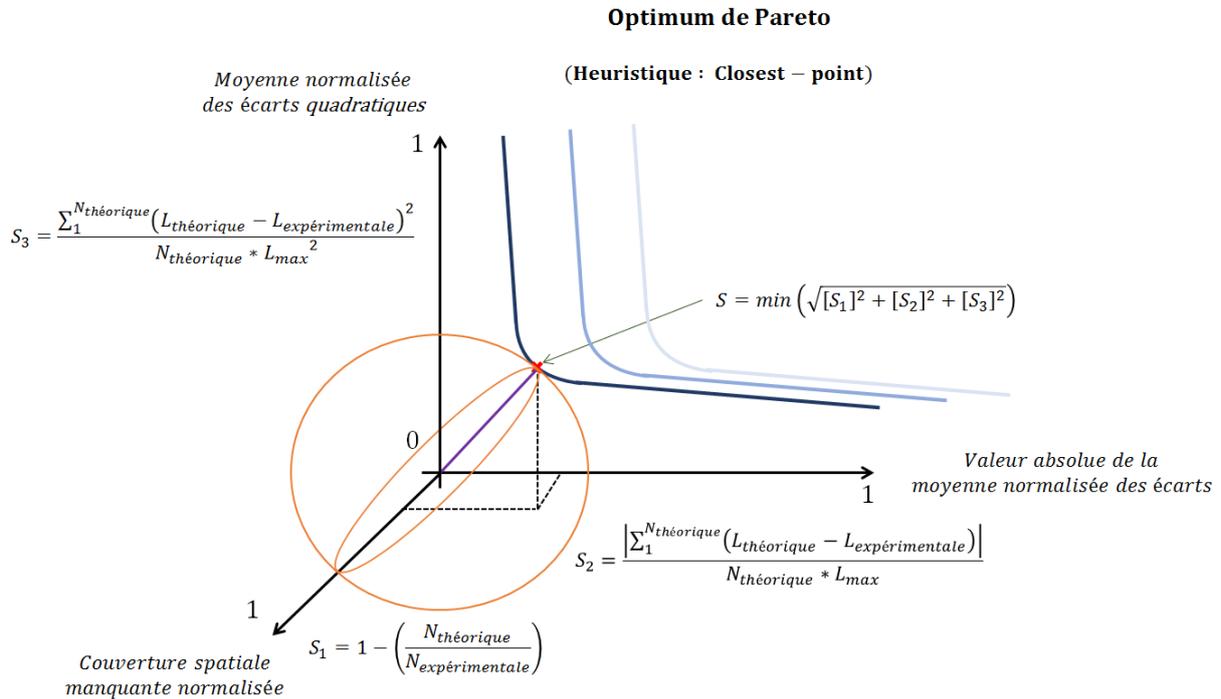


FIGURE V-18: Schéma explicitant les composantes de la fonction de coût utilisée pour la reconstruction des cas simulés et la méthode de l'optimum de Pareto. La fonction de coût sera ensuite modifiée pour la reconstruction des cas expérimentaux (cf. Eq. (59)).

Cependant, l'expression de la fonction sera ensuite modifiée (à partir du Chapitre VI), car les reconstructions à partir d'images réelles montrent que les critères de la fonction de coût ne sont plus comparables entre eux lorsque appliqués à des données expérimentales. Pour pallier ce problème, le critère  $S_1$  sera utilisé comme un seuil (dont la valeur vaut 0.80) et une pondération sera appliquée au critère  $S_3$ , de sorte que l'expression de la fonction de coût devienne :

$$S = \begin{cases} 10 & , S_1 \geq 0.80 \\ \min\left(\sqrt{[S_2]^2 + (10 * [S_3]^2)}\right) & , S_1 < 0.80 \end{cases} \quad (59)$$

Pour chaque couple de pentes testé, le code génère une carte de la luminance réfléchiée par une surface optique idéale (ici un module d'héliostat idéal). La composante de la fonction de coût minimisant la fraction de points non reconstruits sur le module ( $S_1$ ), permet de sélectionner des pentes qui sont partagées par un grand nombre de pixels. La seconde composante, liées à la valeur absolue des écarts ( $S_2$ ), favorise la sélection de pentes dont le niveau moyen de la luminance

résultante est équivalent à celui de la luminance mesurée. Enfin, la troisième composante de la fonction de coût, exprimant l'erreur quadratique moyenne ( $S_3$ ), permet de sélectionner un couple de pentes qui réduit les écarts locaux entre la luminance théorique générée et la mesure. Ces trois composantes doivent permettre d'assurer un éclairage proche de celui observé, de garantir une valeur de luminance moyenne cohérente avec la mesure ainsi que de réduire les solutions possibles en approchant l'allure globale de la luminance mesurée. Les composantes influencent le choix de la carte de luminance à chaque itération, dans les limites imposées par deux seuils : un premier (valant  $0.10 \times \rho$ , où  $\rho$  est la réflectivité) permet de ne considérer que les pixels ayant une valeur de luminance mesurée supérieure et un second (0.10, 0.25 selon les cas, ou  $\rho$  dans le cas d'une reconstruction ne nécessitant qu'une seule itération) permet de reconstruire les pixels dont la différence de luminance (entre la théorie et la mesure) est inférieure à ce seuil.

La méthode de rétro-visée à une caméra par mesure unique peut être utilisée pour identifier des défauts de pointage si à la première itération la zone à reconstruire contient l'ensemble de l'héliostat. De la même manière une erreur d'alignement d'un module peut être identifiée si la zone à reconstruire à la première itération contient l'ensemble du module. Il faut noter que les pixels concernés par les bords du disque solaire constituent souvent les dernières zones à reconstruire, du fait de l'allure de la loi de luminance du profil solaire : la variation de la luminance du profil solaire est beaucoup plus élevée aux bords du disque qu'au centre, donc la luminance théorique attribuée à une zone réfléchissant le centre du Soleil varie moins selon l'erreur de pente, que celle attribuée à une zone réfléchissant les bords du disque solaire. Ainsi, l'incertitude, liée au pas d'incrémentations des valeurs d'erreurs de pente, peut être suffisamment faible pour faire correspondre une valeur d'erreur de pente à des pixels renvoyant le centre du disque solaire, mais peut être trop élevée pour des pixels (de la même zone) renvoyant les bords du disque. Or, la méthode de rétro-visée à une caméra par mesure unique termine la reconstruction d'une pente de surface si la taille de la dernière zone concernée est inférieure à 20 *pixels*, car dépassé ce seuil arbitraire, le nombre de pixels utilisés pour la reconstruction est trop faible pour obtenir un résultat fiable. Les derniers pixels à être reconstruits sont donc plus souvent des pixels dont les valeurs de luminance correspondent aux bords du disque et le programme est rarement capable de tous les reconstruire. Ceci a pour conséquence de provoquer une perte d'information : le nombre de pixels reconstruits est presque toujours inférieur au nombre de pixels ayant une valeur de luminance exploitable.

Une erreur de pointage d'un héliostat ou d'alignement d'un module (ou d'une facette) sera détectée et quantifiée à la première itération par la méthode de rétro-visée à une caméra par mesure unique qui sélectionnera une large majorité des pixels de la surface considérée puisqu'ils partagent tous le même défaut de pente réel. Dans cette même logique, nous pouvons induire que les erreurs de courbure nécessiteront un plus grand nombre d'itérations pour être reconstruites. En effet, une erreur de courbure sera, lors de sa reconstruction par la méthode, découpée itérativement en un certain nombre de zones de pentes constantes et l'approximation locale de sa valeur dépendra de la sensibilité attribuée à la détection de nouvelles zones à reconstruire, donc du nombre de zones qui la composent. Cette sensibilité est dépendante du seuil à partir duquel la différence entre la luminance calculée et la luminance mesurée à un pixel est considérée comme suffisante pour inscrire ce dernier dans la zone à reconstruire lors de la prochaine itération.

#### *V.3.3.B. Résultats de la reconstruction des pentes d'un module d'héliostat simulé*

Tel que décrit dans la section V.2.2.B, nous avons simulé un héliostat de Thémis en utilisant un programme de tracé de rayons inverse et un fichier contenant le profil réel du Soleil mesuré. Cette simulation permet d'avoir une carte de la luminance réfléchie par l'héliostat vers la caméra, et d'y appliquer la reconstruction des pentes de la méthode de rétro-visée à une caméra par mesure

unique pour vérifier sa convergence vers le résultat attendu. L'objectif est d'évaluer la reconstruction et de constater d'éventuels défauts de convergence de la méthode. La reconstruction a été testée sur un module, ici le n°3 (cf. FIGURE V-22). Pour cette reconstruction, la valeur de l'écart entre la luminance simulée et celle reconstruite, à partir de laquelle les points sont recalculés vaut 0.10. Les pentes varient entre  $\mp 1.50 \text{ mrad}$  avec un pas de  $0.10 \text{ mrad}$ . La reconstruction est d'abord effectuée pour le cas d'un module sans défaut introduit, puis dans le cas de ce même module ayant subi un désalignement de  $+1.00 \text{ mrad}$  selon  $Z'$ , soit une rotation autour de l'axe  $Y'$ .

Une première analyse de la fonction de coût utilisée dans la méthode de reconstruction (cf. Eq. (58) dans la section V.3.3.A) permet de comprendre l'influence de chaque critère sur le choix des couples de pentes. Pour ce faire, le processus est limité à une unique itération, théoriquement suffisante pour reconstruire totalement le module (car il est question ici d'un tilt parfait introduit à un module simulé, donc d'une pente constante spatialement) :

- Fraction de la surface éclairée non reconstruite, critère  $S_1$  (cf. FIGURE V-19) : l'affichage des valeurs du critère  $S_1$  montre qu'il y a un plateau contenant toutes les valeurs minimales. Le couple minimisant toutes les valeurs correspond à  $0.30 \text{ mrad}$  selon  $Y'$ , et  $-0.50 \text{ mrad}$  selon  $Z'$  (indice 19 selon  $Y'$ , et 11 selon  $Z'$ ) dans le cas sans défaut. Pour ne réaliser qu'une itération, le programme doit comptabiliser tous les pixels malgré les fortes différences en distribution spatiale de la luminance qu'il peut y avoir avec le résultat attendu, c'est pourquoi le critère reste faible pour un grand nombre de couples de pentes (même ceux induisant des luminances non nulles dans d'autres zones du module que la zone éclairée ici). Dans le cas avec défaut, le plateau de valeur minimales est principalement décalé vers les valeurs de pentes plus élevées et positives selon  $Z'$ . Dans ce cas, le résultat correspond à une pente de  $0.50 \text{ mrad}$  selon  $Y'$  et  $0.10 \text{ mrad}$  selon  $Z'$ , soit à l'indice 21 selon  $Y'$  et 17 selon  $Z'$ .

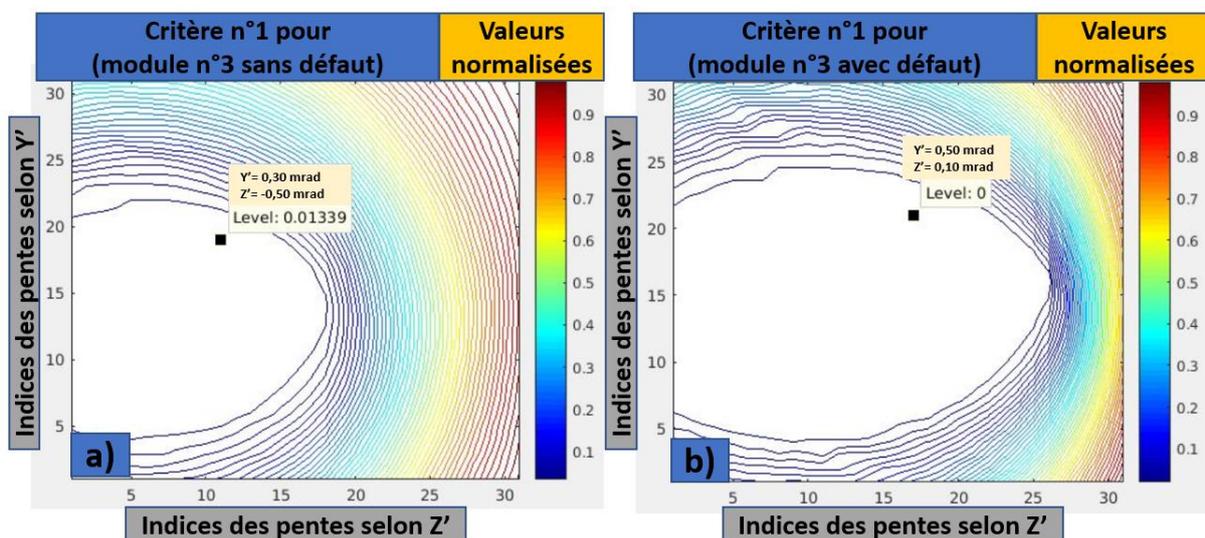


FIGURE V-19 : Carte des valeurs du critère n°1 de la fonction de coût dans le cas du module n°3 sans défaut (en a) ; avec défaut (en b)).

- Ecart absolu moyen à la luminance mesurée, critère  $S_2$  (cf. FIGURE V-20) : la visualisation des valeurs du critère  $S_2$  dans le cas sans défaut montre que les valeurs minimales forment un contour. A l'intérieur de celui-ci, on observe une légère augmentation des valeurs du critère, car cette zone correspond à des pentes négatives selon  $Z'$  (indices inférieurs à 16) qui maximisent le niveau moyen de

luminance (les pentes négatives selon  $Z'$  qui induiraient une baisse du niveau moyen de luminance sont inférieures à  $-1.50 \text{ mrad}$ , soit à l'indice 1 selon  $Z'$ ). Dans le cas avec un défaut introduit au module, le contour est décalé vers les valeurs positives et plus fortes selon  $Z'$  (tout comme le plateau formé par le critère  $S_1$  dans le cas avec défaut). De plus, ce contour est plus marqué et l'augmentation des valeurs en son centre l'est aussi. Ceci est dû au fait que, dans ce cas, le niveau moyen est plus faible que dans le cas sans défaut, et donc qu'une diminution de la valeur de la pente selon  $Z'$  (voire des pentes négatives) induirait une différence (ici un surplus) de luminance moyenne bien plus élevé que par rapport au cas sans défaut.

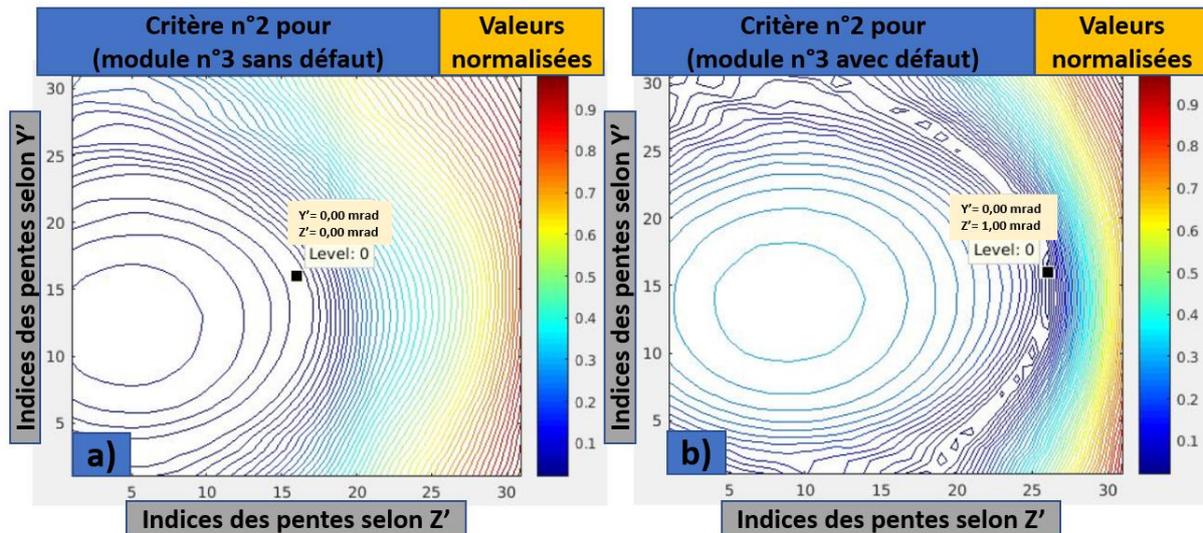


FIGURE V-20 : Carte des valeurs du critère n°2 de la fonction de coût dans le cas du module n°3 sans défaut (en a)) ; avec défaut (en b)).

- Ecart quadratique moyen entre la théorie et la mesure, critère  $S_3$  (cf. FIGURE V-21) : la visualisation des valeurs du critère ( $S_3$ ) dans le cas sans défaut montre que les valeurs minimales forment un contour (qui ici ressemble à un plateau car les valeurs au centre du contour augmentent très peu) comportant une légère pointe centrée autour de  $0.00 \text{ mrad}$  selon  $Y'$  et  $Z'$  (soit l'indice 16 selon  $Y'$  et  $Z'$ ). Tout comme pour les critères précédents, il y a un décalage vers les valeurs de pentes positives et plus élevées selon  $Z'$  lorsque l'on observe le cas avec un défaut introduit au module. La pointe est plus marquée et toujours centrée autour de  $0.00 \text{ mrad}$  selon  $Y'$  et  $Z'$  (soit l'indice 16 selon  $Y'$  et  $Z'$ ). De plus, l'augmentation au centre du contour devient plus prononcée, car une diminution des valeurs de pentes selon  $Z'$  (voire des pentes négatives) induirait une augmentation plus forte de l'écart quadratique moyen (que dans le cas sans défaut). En effet, en cas de pente négatives selon  $Z'$  (jusqu'à  $-1.50 \text{ mrad}$ ), la zone éclairée du module serait beaucoup plus étendue et irait notamment jusqu'à sa partie haute, c'est-à-dire à l'opposé de celle éclairée actuellement. Ceci aurait pour conséquence de maximiser les écarts locaux dans cette zone et donc l'écart quadratique moyen sur le module.

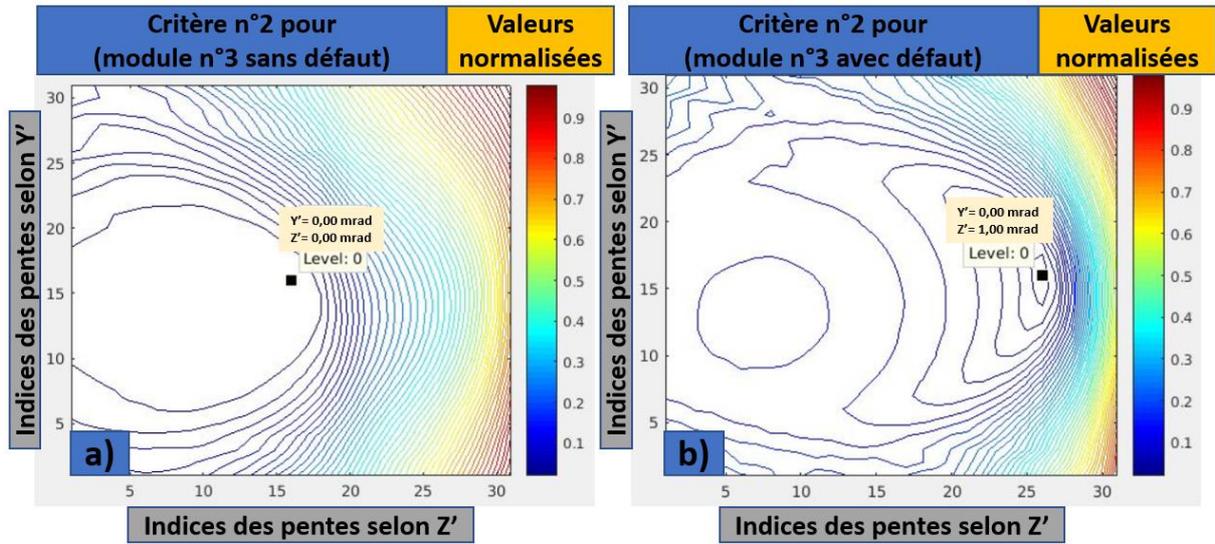


FIGURE V-21: Carte des valeurs du critère n°3 de la fonction de coût dans le cas du module n°3 sans défaut (en a)) ; avec défaut (en b)).

Les reconstructions sont ensuite réalisées avec un nombre non contraint d'itérations, afin d'évaluer la capacité de la méthode de rétro-visée à une caméra par mesure unique à reconstruire les pentes du module de façon plus fine :

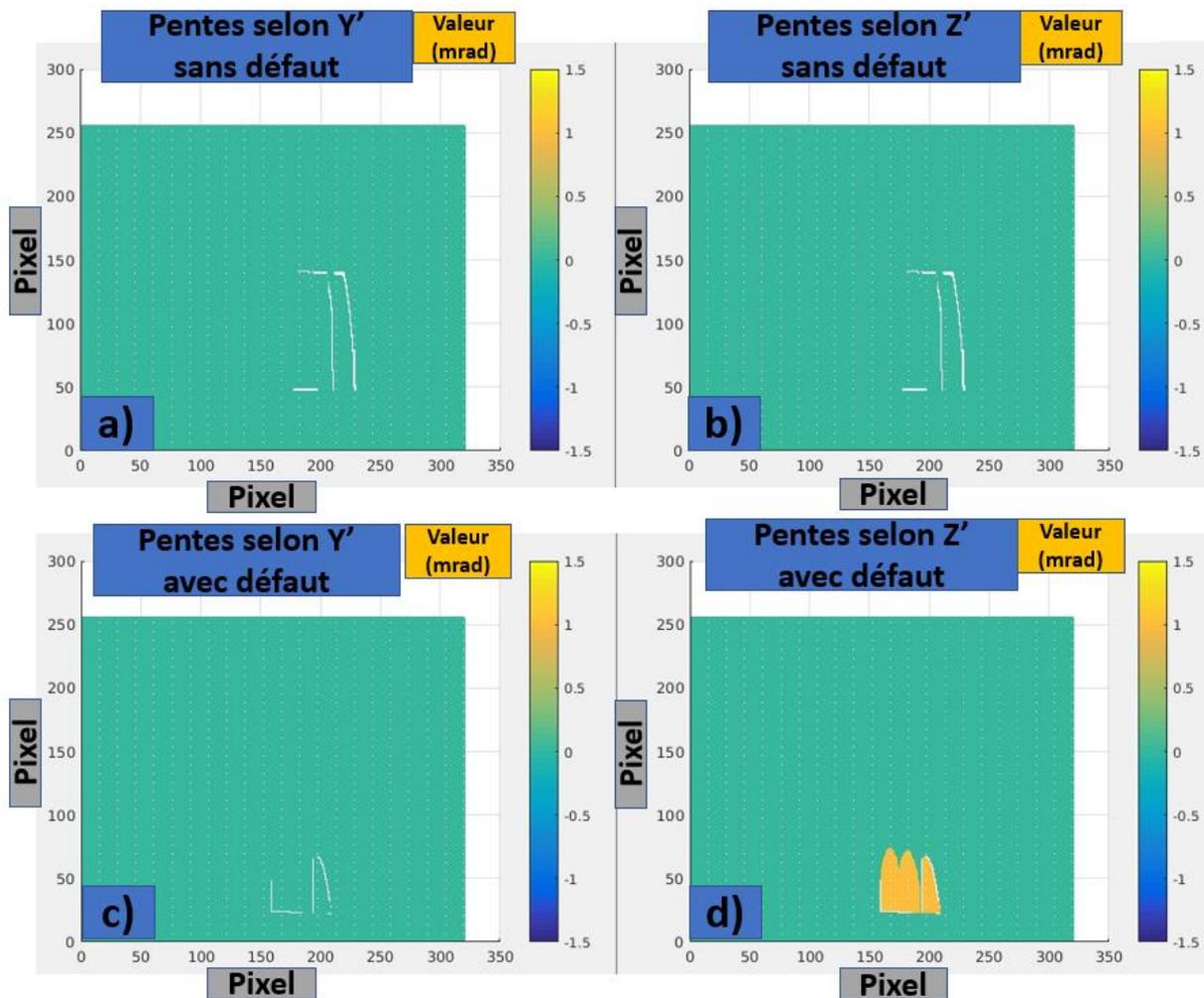


FIGURE V-22 : Carte des pentes du module n°3 reconstruites par la méthode de rétro-visée à une caméra par mesure unique selon l'axe Y' et l'axe Z' de ce module, avec une des images simulées par le programme Matlab. Reconstruction selon l'axe Y' dans le cas sans défaut (en a)), selon l'axe Z' (en b)), puis dans le cas avec défaut (en c) et d)).

Les valeurs NaN (Not a Number) présentes sur les cartes de pentes de surface (zones blanches) sont dues au seuil de 0.10, qui permet de ne prendre en compte que les valeurs de luminance suffisamment éloignées des bords du disque solaire. Les tableaux ci-dessous (TABLE V-5, TABLE V-6) regroupent les résultats numériques obtenus avec la méthode à une caméra par mesure unique.

TABLE V-5 : Résultats obtenus de la méthode de rétro-visée à une caméra par mesure unique pour la reconstruction du module n°3 par le programme de tracé de rayon inverse de la méthode.

Cas	Couverture spatiale	Pentes Y'			Pentes Z'		
		Moyenne (mrad)	PTV (mrad)	Erreur RMS (mrad)	Moyenne (mrad)	PTV (mrad)	Erreur RMS (mrad)
Sans défaut	0.69	0.00	<0.01	<0.01	0.00	<0.01	<0.01
Avec défaut	0.42	0.00	<0.01	<0.01	1.00	<0.01	<0.01
Différence	0.31	0.00	<0.01	<0.01	1.00	<0.01	<0.01

Les premières simulations sont effectuées sans ajout de bruit sur les images. Les résultats de la reconstruction par la méthode de rétro-visée à une caméra par mesure unique (cf. TABLE V-5) montrent que la méthode converge vers le résultat escompté avec une erreur relative de 0% selon  $Y'$  et  $Z'$ , et les valeurs de pentes sont homogènes (valeur de déviation standard égale à 0.00 *mrad*). Ce premier résultat montre que la méthode converge vers la solution. Nous avons ensuite perturbé l'image simulée initiale en ajoutant un bruit blanc gaussien de déviation standard égale à 1.7% de la luminance maximale, de sorte à ce que 99.73% du bruit soit contenu dans une plage de  $\pm 5\%$  de la luminance maximale (cf. FIGURE V-23).

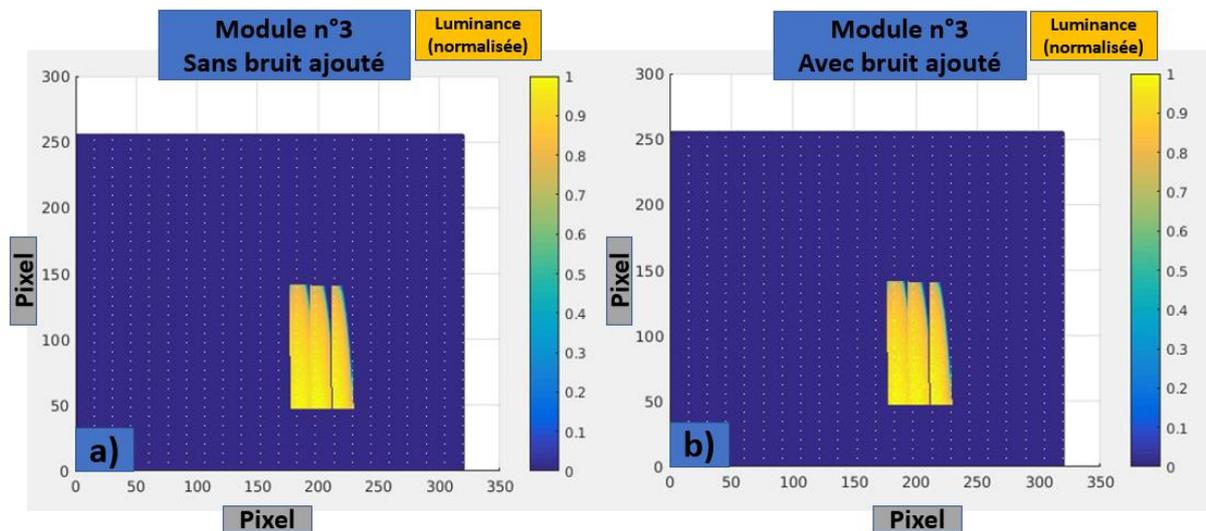


FIGURE V-23 : Image du module n°3 de l'héliostat simulé (ici sans défaut) avec le programme de tracé de rayon inverse (en a)) et avec un bruit Gaussien ajouté (en b)).

Cette perturbation n'a pas d'effet significatif sur les résultats de la reconstruction des pentes (cf. TABLE V-6). L'erreur relative reste à 0% selon  $Y'$  et  $Z'$ . Nous pouvons constater sur la FIGURE V-24 que le résultat est quasi-identique au cas sans bruit ajouté. Ceci peut s'expliquer par le fait que les pentes sont reconstruites par zones dont la taille, qui est supérieure à 20 *pixels*, permet de négliger l'impact de quelques pixels bruités sur les valeurs de la fonction de coût. Ces pixels bruités n'ont donc pas d'effet significatif sur les valeurs d'erreurs de pente attribuées à chaque zone. Ceci permet de montrer la robustesse de la fonction de coût face au bruit ajouté.

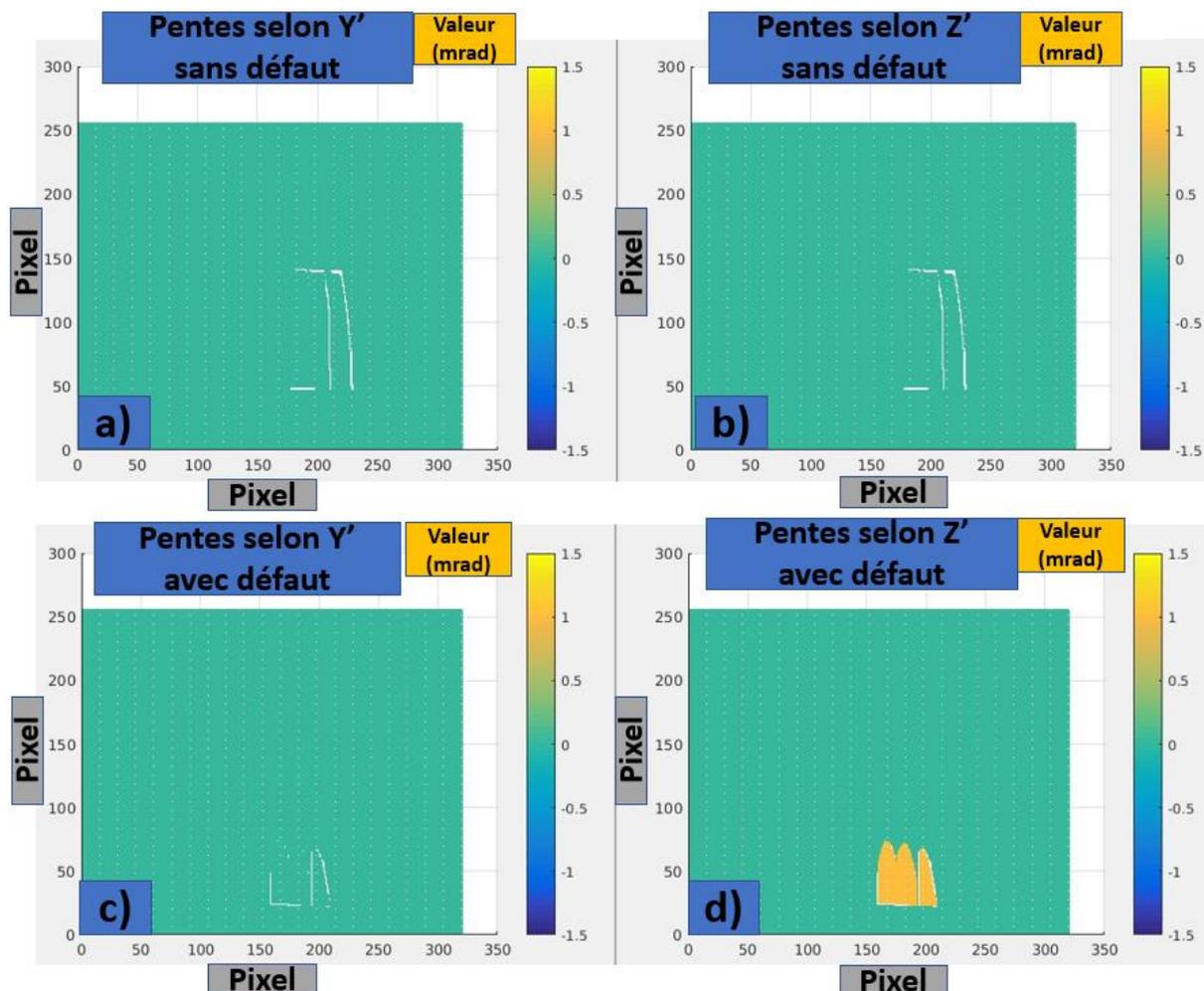


FIGURE V-24 : Carte des pentes du module n°3 reconstruites par la méthode de rétro-visée à une caméra par mesure unique selon l'axe Y' et l'axe Z' de ce module, avec une des images simulées par le programme Matlab et un bruit ajouté. Reconstruction selon l'axe Y' dans le cas sans défaut (en a)), selon l'axe Z' (en b)), puis dans le cas avec défaut (en c) et d)).

TABLE V-6 : Résultats obtenus par la méthode de rétro-visée à une caméra par mesure unique pour la simulation du module n°3 par le programme de tracé de rayon inverse de la méthode, avec un bruit Gaussien ajouté.

Cas	Couverture spatiale	Pentes Y'			Pentes Z'		
		Moyenne (mrad)	PTV (mrad)	Erreur RMS (mrad)	Moyenne (mrad)	PTV (mrad)	Erreur RMS (mrad)
Sans défaut	0.69	0.00	<0.01	<0.01	0.00	<0.01	<0.01
Avec défaut	0.42	0.00	<0.01	<0.01	1.00	<0.01	<0.01
<b>Différence</b>	0.31	0.00	<0.01	<0.01	1.00	<0.01	<0.01

Malgré l'ajout du bruit de mesure, les valeurs de pentes sont toujours homogènes (avec des valeurs de déviation standard égales à  $0.00 \text{ mrad}$ ). Ainsi, ces simulations ont permis de valider numériquement la méthode de rétro-visée à une caméra par mesure unique et son algorithme de reconstruction en tenant compte d'une géométrie complexe d'héliostat (CETHEL III, Thémis). Les résultats montrent que la reconstruction des pentes par la méthode converge vers le résultat

attendu, ce avec une erreur relative nulle, et avec une meilleure robustesse face au bruit que la méthode de rétro-visée à une caméra par mesures successives.

## Chapitre 6

### VI. Etude de la méthode de rétro-visé à une caméra de rétro-visée à une caméra par mesure unique appliquée à des images expérimentales

#### VI.1. Contexte expérimental

Le protocole de la méthode à une caméra par mesure unique est moins exigeant que ceux des deux méthodes précédentes (optimisée de rétro-visée à quatre caméras et de rétro-visée à une caméra par mesures successives) car il ne requiert qu'une seule image de l'héliostat. Cette image doit contenir suffisamment de points de luminance sur la surface de l'héliostat afin d'avoir une reconstruction fiable des erreurs de pentes (bon éclairage/couverture spatiale de l'héliostat). Compte tenu des données acquises grâce aux précédents protocoles, nous n'avons qu'à sélectionner une image qui contient suffisamment d'informations de luminance réfléchie pour reconstruire les pentes de surface de l'héliostat, sachant que son orientation et la date d'acquisition sont enregistrées pendant la mesure.

#### VI.2. Prétraitement des images expérimentales et contraintes liées au matériel

Pour évaluer et valider expérimentalement cette nouvelle méthode de reconstruction, le protocole de mesure, explicité dans la section III.2.2, consiste à capturer des images de l'héliostat sans défaut introduit, puis à acquérir des images de ce même héliostat après avoir introduit manuellement des défauts d'alignement à deux de ses modules, le n°2 et 3. Dans cette section nous exposons les résultats de la reconstruction des pentes par la méthode de rétro-visée à une caméra par mesure unique des images issus de la campagne expérimentale du 30 septembre 2019 à la centrale de Thémis, à Targassonne (France). Les mesures de l'héliostat sans défaut introduit ont été effectuées à 15h 00min 02sec, les angles solaires correspondant sont  $26.34^\circ$  en azimut et  $41.40^\circ$  en élévation. Puis, les mesures de l'héliostat avec défauts introduits ont été effectuées à 15h 18min 41sec, et les angles solaires correspondant sont  $32.06^\circ$  en azimut et  $39.72^\circ$  en élévation. Durant cette campagne de mesures, des acquisitions à quatre caméras ont été effectuées (cf. chapitre IV) et nous avons sélectionné les images d'une caméra déjà installée afin d'évaluer la méthode de rétro-visée à une caméra par mesure unique. Nous avons choisi d'utiliser les images capturées par la caméra n°3. Les images brutes sont tout d'abord prétraitées afin de leur retirer le signal parasite issu du capteur et des effets liés à l'objectif. Il s'agit du bruit présent sur les images réalisées dans le noir ainsi que le phénomène de champ plat. La valeur de chaque pixel de l'image est ensuite multipliée par le facteur correctif qui permet de corriger la différence entre la valeur réelle de la densité optique et celle attendue. La valeur de chaque pixel de l'image est enfin divisée par la valeur maximale mesurée lorsque la caméra visait directement le Soleil, afin de normaliser les valeurs de luminance en fonction de la valeur maximale au centre de l'astre.

A l'origine, les calculs de reconstructions ont été effectués avec un simple ordinateur portable et les temps de calculs dépassaient aisément les 100 heures. Pour des raisons de temps de calcul, l'image prétraitée doit être redimensionnée afin de réduire le temps nécessaire à la reconstruction des pentes. Initialement d'une taille de  $1024 \times 1280$ , l'image est réduite à une taille de  $256 \times 320$  (cf. FIGURE VI-1). Cependant, ceci induit inévitablement une perte en résolution spatiale. Ce compromis permet de reconstruire les pentes de surface en quelques dizaines d'heures et la parallélisation du programme sur le serveur de calcul du laboratoire PROMES-CNRS d'Odeillo permet de réduire ce temps entre 1 et 4 heures. En effet, pour mieux comprendre, améliorer et estimer l'efficacité du programme de reconstruction nous devons avoir accès aux valeurs de la fonction de coût à chaque itération et pour chaque couple de pentes. En situation d'utilisation normale de la méthode de rétro-visée à une caméra par mesure unique, la reconstruction des images sera plus rapide grâce à un algorithme d'optimisation qui trouvera le couple de pentes sans les tester tous.

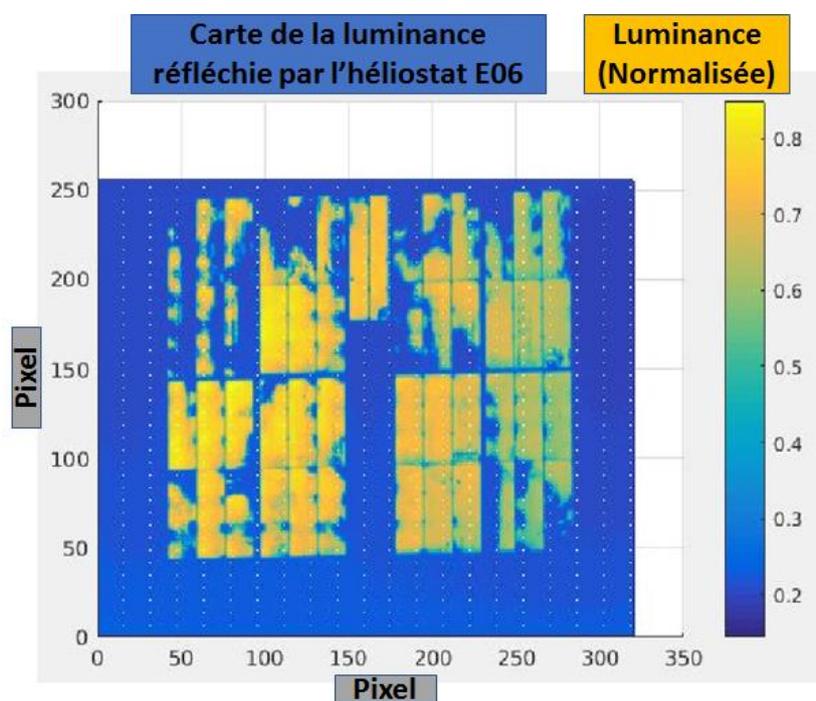


FIGURE VI-1: Carte redimensionnée des luminances réfléchies par l'héliostat E06.

L'analyse préliminaire des images expérimentales (cf. FIGURE VI-1) permet de faire quelques constatations ayant une influence sur les résultats de reconstruction des pentes de surface :

- L'héliostat n'est pas intégralement illuminé par la réflexion du Soleil, et certains modules sont quasi-invisibles. Ceci a pour conséquence de limiter la surface de l'héliostat utilisable par le programme. De plus, il faut s'assurer que les zones éclairées du cas sans défaut sont similaires à celles du cas avec défauts introduits, afin de pouvoir soustraire les cas entre eux sans perdre trop d'information (pour être reconstruit, un pixel doit être illuminé dans les deux cas).
- Les facettes éclairées n'apparaissent pas uniformes et certaines zones d'affaiblissement de la luminance réfléchie trahissent la présence des vis de fixation qui déforment les miroirs. Comme cela a pu être constaté sur une image de l'héliostat prise lors de campagnes de mesures précédentes sans densité optique, certaines facettes sont fissurées ou brisées et n'apparaissent que partiellement sur les images expérimentales (cf. FIGURE VI-2). De plus,

certaines zones présentent les symptômes d'un changement de réflectivité dû aux effets du temps comme la poussière ou la détérioration chimique. Ainsi, certaines zones de la surface de l'héliostat n'auront pas la même réflectivité ou ne pourront tout simplement pas être prises en compte dans la reconstruction des pentes de surface. L'inhomogénéité de la réflectivité sur la surface de l'héliostat risquent de biaiser les résultats de pentes assignés à chaque itération à une zone sélectionnée par le programme et induire des erreurs dans la carte des pentes résultante.

Exemples de zones potentiellement problématiques lors des mesures sur l'héliostat E06 de la centrale Thémis

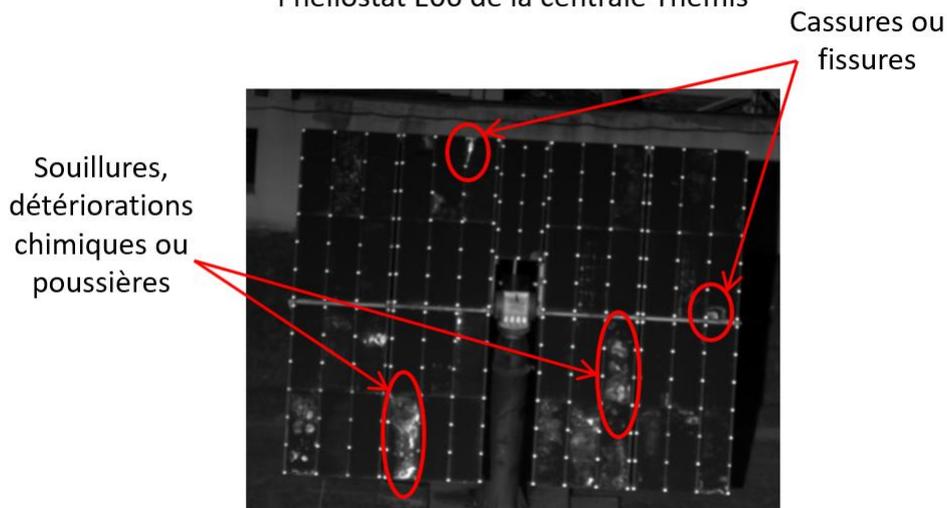


FIGURE VI-2 : Photographie de l'héliostat E06 de la centrale Thémis avec des indications sur l'état probable de ses surfaces optiques.

L'héliostat est orienté à l'aide de moteurs pas à pas et la valeur d'un pas codeur est environ  $0.14 \text{ mrad}$ . Cependant, tel qu'évoqué dans [53], l'incertitude liée à l'introduction manuelle des défauts à ses modules doit être estimée, afin de connaître la marge d'erreur acceptable du résultat attendu. Les défauts sont introduits aux modules grâce à des écrous disposés derrière les facettes. Or il est admis qu'un tour de vis appliqué à un module correspond à une translation de  $2 \text{ mm}$  de l'écrou et également du module. Une mesure de la valeur exacte de ce défaut a été réalisée durant les travaux, mais difficilement notamment à cause de l'absence de support permettant une mesure dans des conditions stables. L'incertitude a cependant été estimée à  $0.3 \text{ mm}$ , et correspond à une incertitude double, soit  $0.6 \text{ mm}$ , lorsque nous procédons à la soustraction des cas permettant d'isoler les défauts à détecter. Or, la distance séparant les axes de vis est  $2250 \text{ mm}$ , donc l'incertitude sur l'angle introduit vaut environ  $\frac{0.6}{2250} \approx 0.27 \text{ mrad}$ . Cette valeur d'incertitude ne permet pas d'atteindre une incertitude de  $0.1 \text{ mrad}$  (objectif initial de cette étude). De plus, l'introduction du défaut de pente n'est pas parfaitement uniforme (une seule vis est dérégulée). C'est pourquoi l'erreur de pente introduite ne peut pas être considérée comme un tilt parfait. Une certaine courbure (induisant des valeurs de luminance parfois modifiée par rapport à ce que prévoit la théorie) est à prendre en compte.

### VI.3. Reconstruction des pentes de la méthode de rétro-visée à une caméra par mesure unique appliquée aux images expérimentales

La reconstruction des pentes de surface (utilisant la fonction de coût issue de l'équation (59) de la section V.3.3.A) a tout d'abord été appliquée au cas sans défaut introduit. Deux cartes de pentes ont été générées, une selon  $Y'$  et l'autre selon  $Z'$ . Le paramétrage du programme de reconstruction des pentes a dû tenir compte du temps de calcul et de la connaissance des héliostats de la centrale Thémis. Malgré l'objectif initial d'atteindre une incertitude de  $0.1 \text{ mrad}$ , le pas de discrétisation des valeurs d'erreur de pente à identifier a été fixé à  $0.20 \text{ mrad}$ , afin de ne pas avoir un temps de calcul trop important. L'objectif de la reconstruction sur des images expérimentales est avant tout de montrer que la méthode de rétro-visée à une caméra par mesure unique est capable de détecter les défauts de pentes de surface et que les valeurs mesurées permettent d'approcher la valeur réelle du défaut de pente introduit. Ainsi, une précision de  $0.20 \text{ mrad}$  constituait un compromis correct. La plage de variation des pentes a été fixée à  $\mp 4.00 \text{ mrad}$ , sachant que la valeur absolue des défauts introduit est d'environ  $0.89 \text{ mrad}$  selon  $Z'$  et nulle selon  $Y'$ , ce qui laisse une marge plus que suffisante. La réflectivité de l'héliostat a été prédéfinie comme homogène et valant 0.85. Des tests sur des images expérimentales avaient tout d'abord été effectués en utilisant une réflectivité variable, intégrée à la fonction de coût du programme de reconstruction optimisé. Les résultats préliminaires montraient que l'introduction de la réflectivité comme variable était pertinent pour approcher la réflectivité réelle globale de l'héliostat, mais que certaines variations locales ne correspondaient pas à la mesure. Les conséquences sur les résultats du choix libre de la réflectivité par le programme de reconstruction ne sont donc pas maîtrisées et nous avons décidé de fixer la réflectivité afin d'éviter tout biais lié à ce paramètre. La valeur de 0.85 est inspirée des valeurs mesurées par J.J. Beziau et B. Bonduelle dans [62]. La réflectivité des miroirs propres  $y$  est estimée à 0.90, que nous avons minoré de 5% par rapport au maximum afin de tenir compte du vieillissement et de la poussière. Le seuillage du signal est également important pour reconstruire les pentes de surface à partir du signal de qualité, sans être parasité par le bruit de mesure. Le programme, qui utilise la détection des points ayant une différence de luminance non négligeable entre la valeur théorique et la mesure, doit disposer d'un seuil suffisamment bas pour être précis et avoir une bonne résolution spatiale, mais ne doit pas prendre en compte les signaux parasites. Le seuil en dessous duquel les différences de luminance ne sont pas prises en compte a été grossièrement estimé à 25% du signal maximal mesuré sur le Soleil. Or, les luminances sont normalisées et ce seuil vaut donc 0.25.

Lors des mesures, la direction de pointage de l'héliostat n'est pas rigoureusement accessible car l'orientation de l'héliostat donnée à l'opérateur par le système de suivi ne correspond pas aux conditions d'une réflexion spéculaire quasi-parfaite. Cette incertitude sur la direction de pointage de l'héliostat est provoquée par des offsets sur les directions de suivi en azimut et en élévation, ce qui influence les pentes reconstruites et en particulier celles selon l'axe  $Y'$ . Il est possible à l'œil nu de remarquer une tendance (valeurs de luminances hautes réfléchies en grande partie par le côté gauche de l'héliostat) sur les images (cf. FIGURE VI-3). Cette tendance peut être expliquée par l'incertitude sur le pointage, une variation de la réflectivité ou une combinaison des deux. Une approche consisterait à reconstruire la pente moyenne de l'héliostat en ne réalisant qu'une seule itération de calcul sur tous les points éclairés de celui-ci, en utilisant les valeurs de pas codeurs fournies par l'opérateur et en faisant fortement varier les valeurs d'erreurs de pentes (afin de pallier l'écart entre l'orientation réelle et la théorie). L'on obtiendrait alors une pente dont la valeur dépendrait de l'orientation de la structure, mais qui serait biaisée par la présence de défauts des pentes présents sur certains modules. De plus, un tel procédé prendrait un temps de calcul conséquent. Nous avons choisi une autre approche consistant à augmenter la plage de variation des

valeurs de pentes à tester tout en calculant la direction de pointage de l'héliostat par les lois de réflexion spéculaire (connaissant la position des centres du Soleil, de l'héliostat et de la caméra). C'est pourquoi nous avons choisi de faire varier les pentes à identifier sur une plage de  $\mp 4.00 \text{ mrad}$  (au lieu de  $\mp 1.50 \text{ mrad}$  pour les simulations).

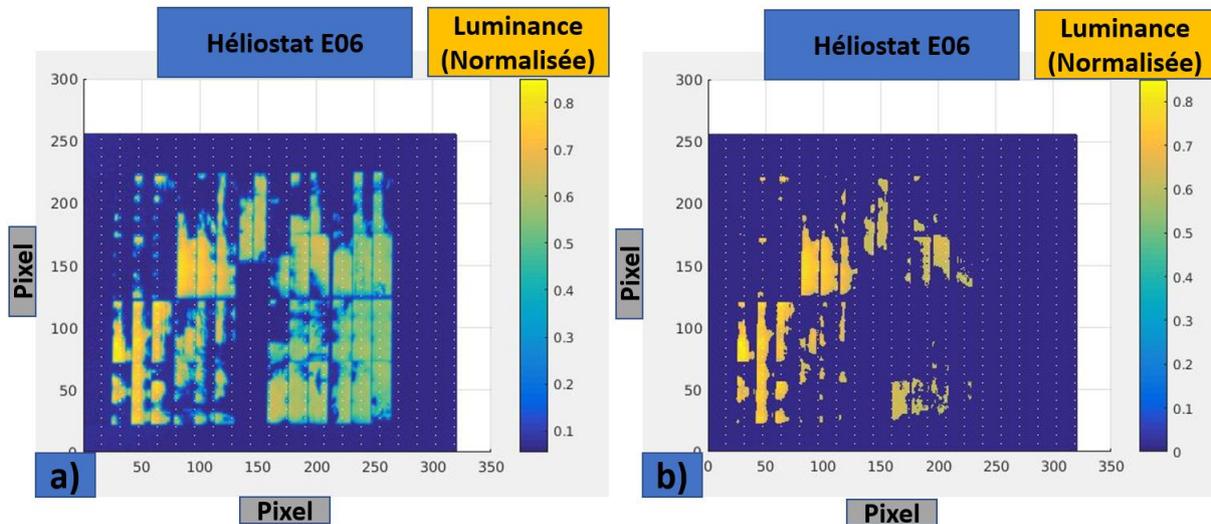


FIGURE VI-3 : Carte de luminance de l'héliostat E06 a) et carte de luminance avec les valeurs supérieures à 70% du maximum afin de mieux distinguer les valeurs issues du centre du disque solaire. La faible fraction de surface supposée réfléchir les valeurs issues du centre du disque trahit la présence de zones ayant une réflectivité plus faible que la moyenne b). Il est notamment aisé de remarquer que la partie droite de l'héliostat réfléchit la majeure partie des valeurs élevées de luminance.

### VI.3.1. Reconstruction des pentes par module avec une réflectivité uniforme de 0.85

#### VI.3.1.A. Influence de la fonction de coût dans une reconstruction expérimentale

Cette section permet de mettre en lumière l'influence de chaque terme de la fonction de coût, dans le cas de la reconstruction du module n°3 seul (et sans défaut) et n'utilisant qu'une itération. La fonction de coût (détaillée dans la section V.3.3.A et issue de l'équation (59)) permet de sélectionner, à chaque itération d'une reconstruction, le couple de valeurs d'erreurs de pente considéré comme le plus pertinent (c'est-à-dire minimisant la valeur de la fonction) à assigner à une zone contenant de multiples pixels. La minimisation de la fonction de coût expérimentale (cf. Eq. (59)) consiste plus précisément en la minimisation de la somme quadratique pondérée de deux types d'erreurs, effectuée lorsqu'une erreur initialement calculée est inférieure à une valeur seuil : cette première erreur (qui agit donc à la manière d'un seuil) est liée à la surface éclairée non reconstruite ( $S_1$ ), puis il y a les deux autres dont une qui est liée à l'écart par rapport au niveau moyen de luminance mesurée ( $S_2$ ) et une troisième (pondérée par un facteur 10) qui est liée à l'erreur quadratique moyenne entre la théorie et la mesure ( $S_3$ ).

Une première description assez théorique de la fonction de coût avait donc déjà été effectuée dans la section V.3.3.A et la présente section expose les premières observations liées à cette fonction dans le contexte d'une reconstruction d'images expérimentales. L'objectif est de mettre le rôle théorique de chaque critère de la fonction en relation avec l'observation, afin de dégager une logique systématique applicable aux reconstructions exposées dans les sections suivantes :

- Surface éclairée non reconstruite, critère  $S_1$  : l'affichage des valeurs du critère ( $S_1$ ) montre qu'il y a un plateau (elliptique) de valeur minimale englobant les couples d'erreurs de pente nulles et même négatives (entre  $-1.20$  et  $0.20 \text{ mrad}$  selon  $Y'$ , et entre  $-2.00$  et  $0.00 \text{ mrad}$

selon  $Z'$ ). Cela correspond aux indices entre 15 et 22 selon  $Y'$ , et entre 11 et 21 selon  $Z'$ , dans la FIGURE VI-4. Il y a de telles valeurs, car pour une pente nulle la partie haute des facettes est sensée contenir des valeurs de luminances issues des bords du disque solaire ainsi que des espaces sans signal (en dehors du disque) (cf. FIGURE V-23). Le critère  $S_1$  a alors tendance à sélectionner des valeurs d'erreur de pentes dans le plateau (dont des négatives), afin d'obtenir une couverture spatiale proche entre la théorie et la mesure. Ceci tend donc à rapprocher les valeurs du couple d'erreurs de pente vers les valeurs nulles ou négatives si du signal (même faible, tel que dans la FIGURE VI-13) est présent sur toute la surface du module (cf. FIGURE VI-5) : ce qui ne pose pas de problème particulier si l'erreur expérimentale est nulle, mais qui est a priori désavantageux si l'erreur de pente expérimentale est positive ( $+0.89 \text{ mrad}$ ). Une variation de la valeur théorique de la réflectivité n'a aucun effet sur ce critère. Pour les reconstructions expérimentales, ce critère est utilisé comme un seuil (cf. Eq. (59)) : les couples de pentes à tester seront pris en compte seulement si la valeur de ce critère est inférieure à 80%.

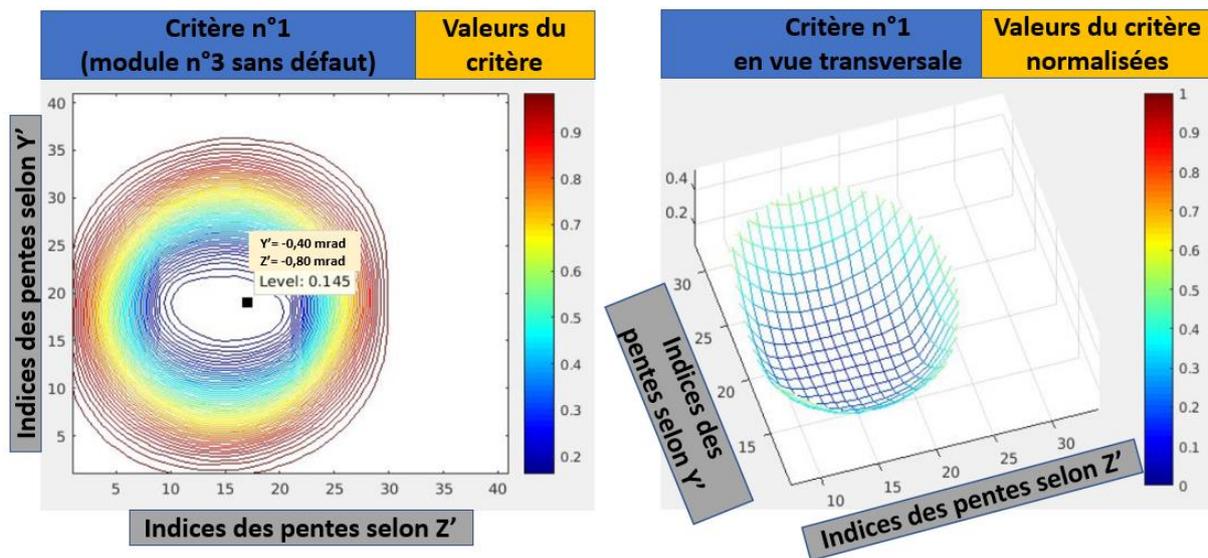


FIGURE VI-4 : Carte des valeurs du critère n°1 de la fonction de coût dans le cas du module n°3 sans défaut.

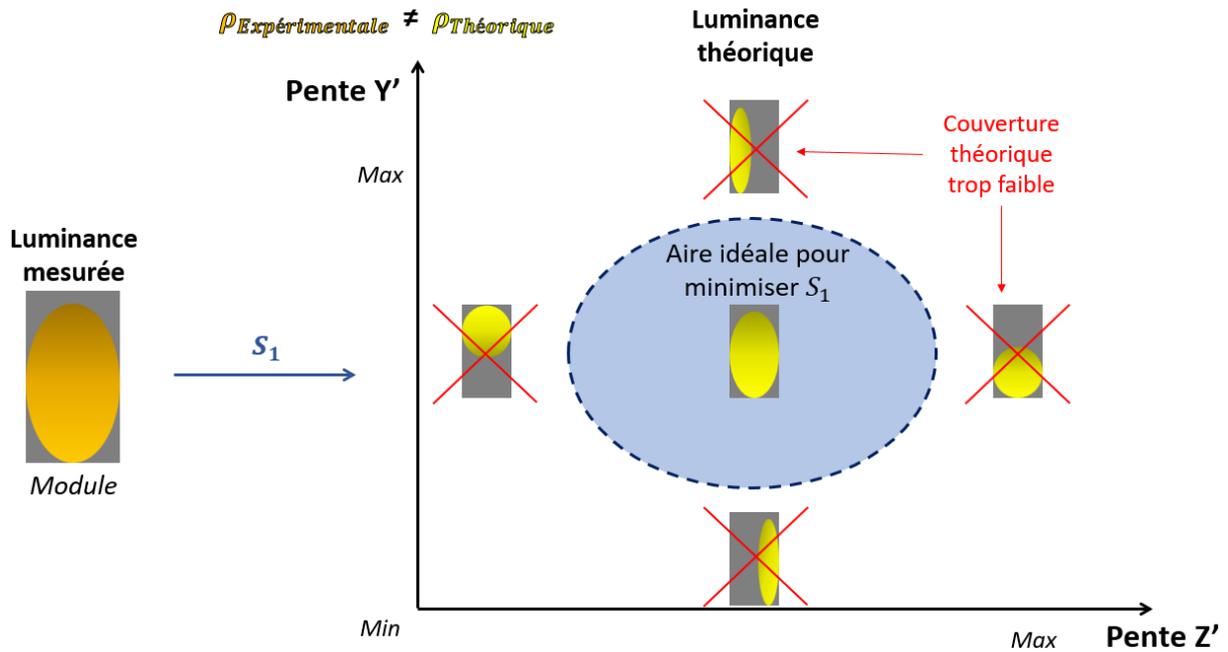


FIGURE VI-5 : Illustration de la minimisation du critère n°1.

- Ecart absolu moyen à la luminance mesurée, critère  $S_2$  : la visualisation des valeurs du critère  $S_2$  montre que les valeurs minimales forment un contour se confondant parfois avec les bords du plateau elliptique qui apparaît pour le critère  $S_1$  (cf. FIGURE VI-6). A l'intérieur de la zone plateau pour  $S_1$ , on observe une forte augmentation des valeurs du critère  $S_2$ . Ceci est la conséquence des niveaux moyens de luminance théoriques supérieurs aux niveaux expérimentaux, à cause d'une réflectivité expérimentale différente de celle fixée dans l'algorithme de reconstruction (cf. FIGURE VI-7). Dans le cas particulier d'une réflectivité surestimée par le modèle, la minimisation du critère  $S_2$  entraînera une sélection de couples de pente qui diminuent la luminance réfléchie (cf. FIGURE VI-8).

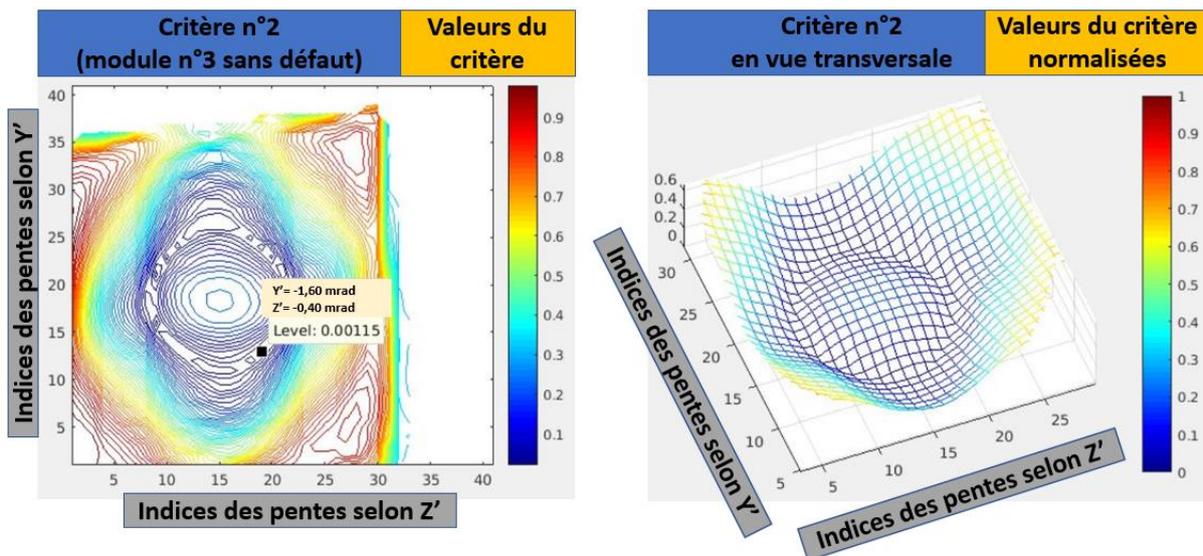


FIGURE VI-6 : Carte des valeurs du critère n°2 de la fonction de coût dans le cas du module n°3 sans défaut.

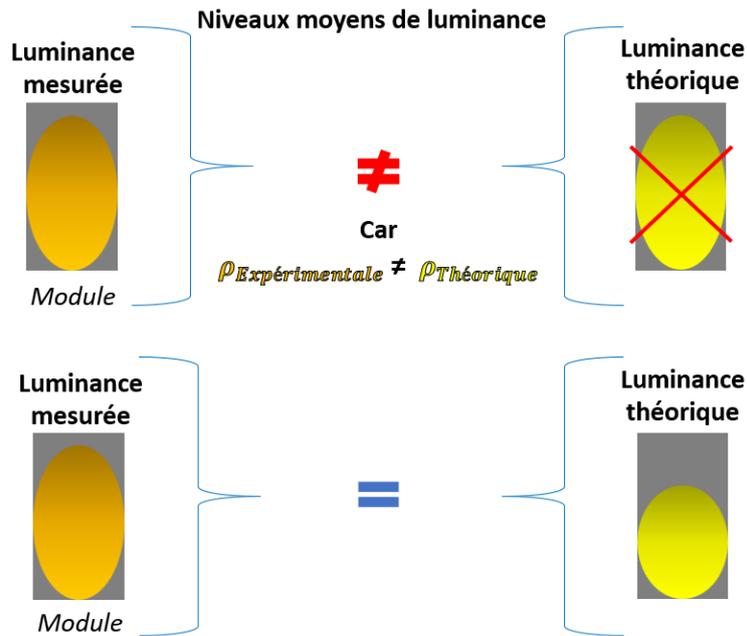


FIGURE VI-7 : Illustration du biais induit par la méconnaissance de la réflectivité réelle sur la surface de l'héliostat pour la minimisation du critère n°2.

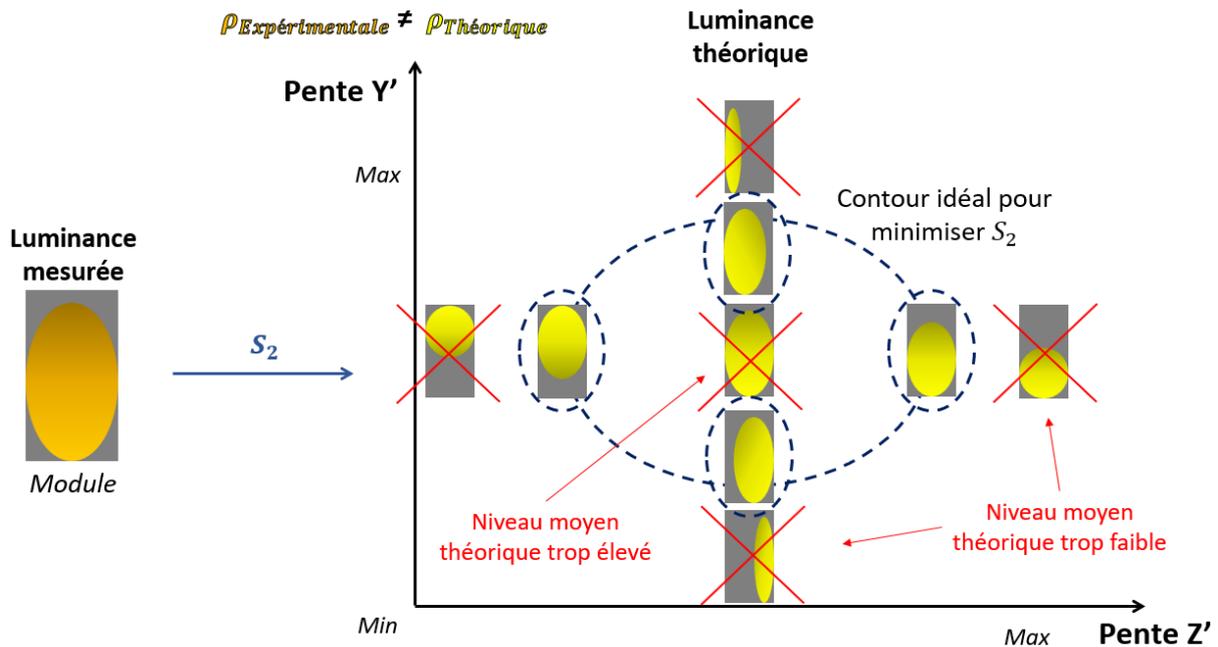


FIGURE VI-8 : Illustration de la minimisation du critère n°2. Il est important de noter la quasi-équivalence entre les solutions situées sur le contour et que les solutions situées à l'intérieur du contour sont rejetées (dans la plupart des cas) car leurs niveaux de luminance sont trop élevés (à cause d'une surestimation de la réflectivité expérimentale) et induisent une forte augmentation des écarts moyens entre la théorie et la mesure.

- Ecart quadratique moyen entre la théorie et la mesure, critère  $S_3$  : la visualisation des valeurs du critère ( $S_3$ ) montre que les valeurs minimales sont inscrites dans une portion du plateau elliptique formée par le critère  $S_1$ . Le critère  $S_3$  ne permet pas à lui seul d'identifier le couple de pente optimum malgré une très légère augmentation des valeurs du critère au centre du plateau (cf. FIGURE VI-9). Les causes les plus probables sont : la distribution de la luminance expérimentale qui est souvent relativement constante (sur un module) contrairement à la théorie (qui présente un gradient de luminance plus fort) augmentant l'erreur quadratique

locale, et la réflectivité expérimentale qui est probablement surestimée. Ce critère a tendance à sélectionner des valeurs d'erreurs de pente dont la distribution spatiale de la luminance résultante est proche de la distribution spatiale expérimentale (cf. FIGURE VI-10). Cependant, il perd de son influence lorsque la distribution de la luminance expérimentale est quasi-constante sur le module, car aucun couple d'erreurs de pente ne minimise fortement le critère plus que d'autres dans le contour (cf. FIGURE VI-11). Pour les reconstructions expérimentales, ce critère est pondéré par un facteur 10, afin d'être comparable au critère  $S_2$  (cf. Eq. (59)).

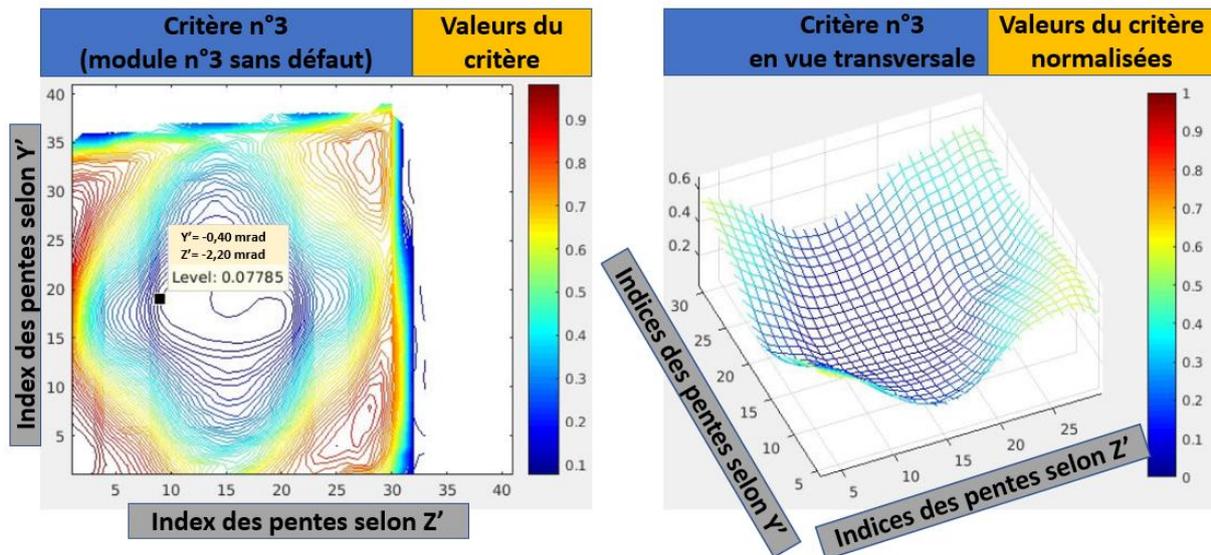


FIGURE VI-9 : Carte des valeurs du critère n°3 de la fonction de coût dans le cas du module n°3 sans défaut.

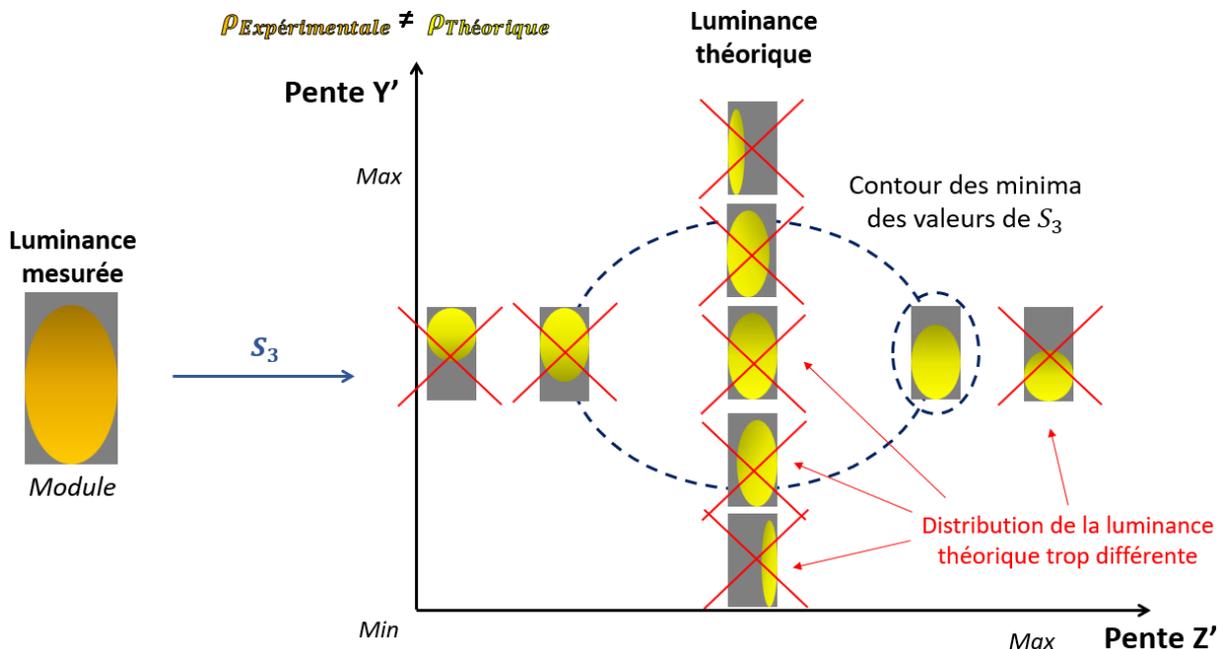


FIGURE VI-10 : Illustration de la minimisation du critère n°3, dans le cas d'une distribution spatiale de luminance mesurée non-constante. Il est important de noter que les solutions présentes sur le contour des minima sont pour la plupart rejetées car leur distribution en luminance est trop différente de l'expérimentale, et que les solutions situées à l'intérieur du contour sont également rejetées (dans la plupart des cas) car leurs niveaux de luminance sont trop élevés (à cause d'une surestimation de la réflectivité expérimentale) et induisent une légère augmentation de l'erreur quadratique moyenne.

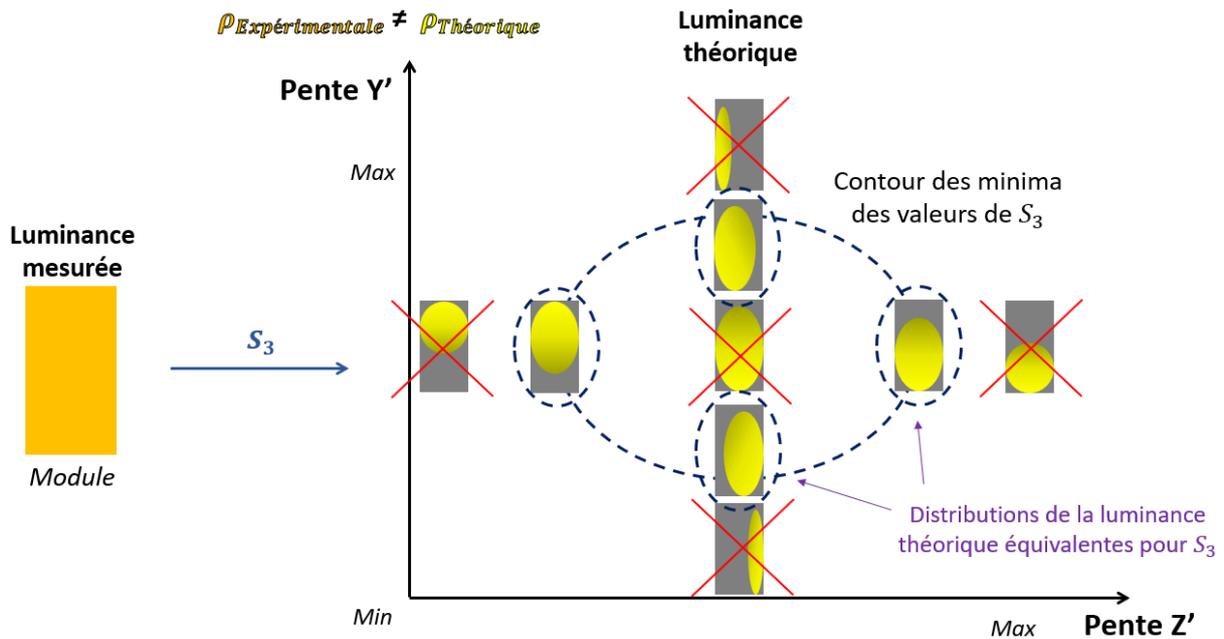


FIGURE VI-11 : Illustration de la minimisation du critère n°3, dans le cas d'une distribution spatiale de luminance mesurée quasi-constante. Il est important de noter que la plupart des solutions présentes sur le contour des minima ne sont plus rejetées car l'erreur quadratique moyenne par rapport à la mesure est affectée de façon quasi-équivalente par les différentes distributions théoriques.

#### VI.3.1.B. Résultats des reconstructions de pentes de modules avec une unique itération

Dans un premier temps, la reconstruction des pentes a été effectuée pour le module n°3 puis le module n°2 individuellement, et en ne réalisant qu'une seule itération qui tient compte de tous les points mesurés sur un module. Ce procédé permet d'évaluer la capacité de la méthode de rétro-visée à une caméra par mesure unique à estimer grossièrement l'erreur d'alignement d'un module et d'évaluer la pertinence du choix de la fonction de coût sur les résultats. Les pentes du module n°3 ont donc tout d'abord été reconstruites dans les cas sans (cf. FIGURE VI-12), puis avec défaut(s) manuellement introduit(s) (cf. FIGURE VI-13).

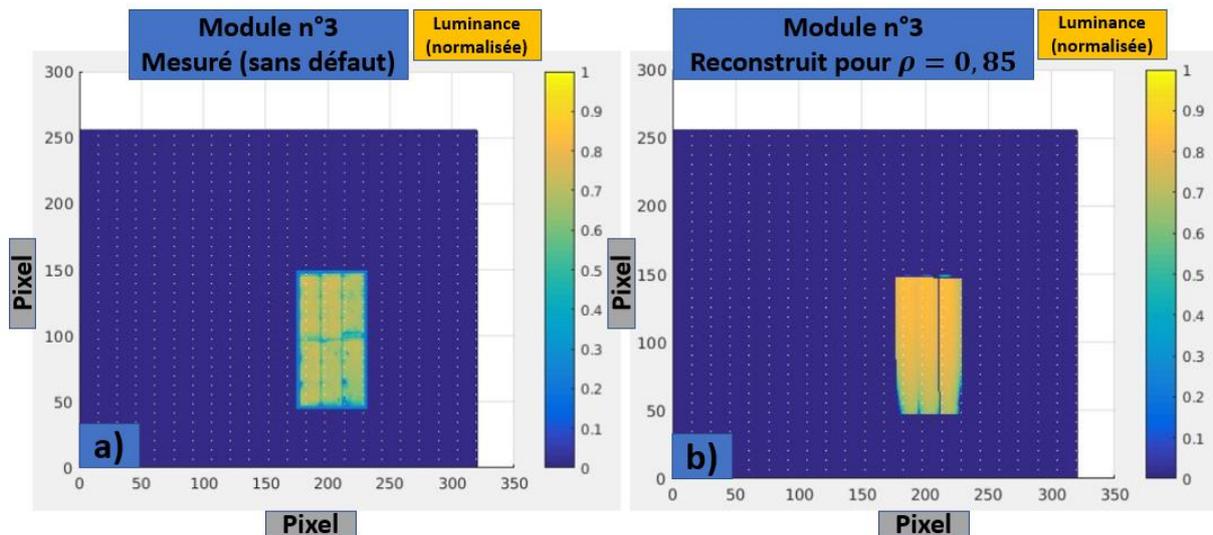


FIGURE VI-12 : Module n°3 de l'héliostat de Thémis dans le cas sans défaut introduit, mesuré en a) et reconstituit par la méthode en b) en n'utilisant qu'une seule itération.

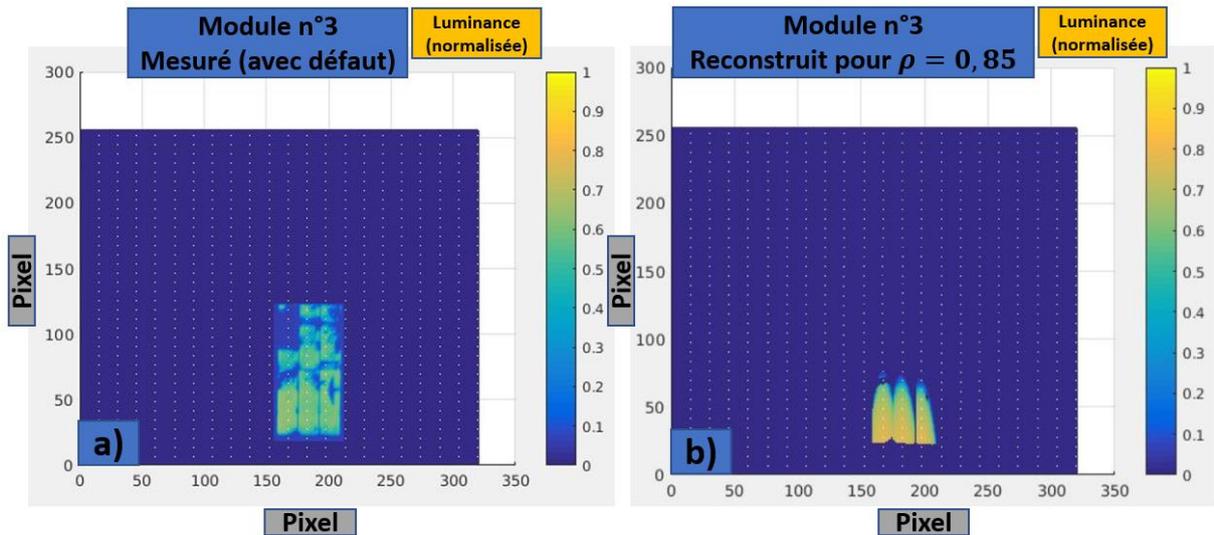


FIGURE VI-13 : Module n°3 de l'héliostat de Thémis dans le cas avec défauts introduits, mesuré (en a)), reconstruit par la méthode (en b)) en n'utilisant qu'une seule itération et une réflectivité de 0.85.

Les résultats, résumés dans la TABLE VI-1, montrent que la méthode de rétro-visée à une caméra par mesure unique avec une seule itération converge vers un résultat ( $-2.20 \text{ mrad}$  selon  $Z'$ ) qui ne correspond pas à ce qui est attendu d'un héliostat a priori sans défaut introduit (donc sensé avoir une valeur de pente négligeable). Selon  $Y'$ , elle détecte une pente valant  $-0.40 \text{ mrad}$ , afin d'augmenter la couverture spatiale sur le module. Dans le cas avec défaut, la méthode détecte une pente selon  $Z'$  valant  $1.00 \text{ mrad}$  et nulle selon  $Y'$ , qui est cohérente avec la valeur du défaut ( $0.89 \text{ mrad}$  selon  $Z'$  et  $0.00 \text{ mrad}$  selon  $Y'$ ). La valeur négative de pente détectées selon  $Z'$  dans le cas sans défaut illustre une des limites de la fonction de coût utilisée dans la méthode : une variation spatiale très faible de la luminance sur le module (cf. FIGURE VI-12) ne permet pas de privilégier un couple de valeur d'erreurs de pente fiable, car les solutions sont multiples et quasi-équivalentes pour chacun des critères de la fonction de coût. Par exemple, une forte pente positive ou bien négative selon  $Z'$  induirait une luminance concentrée respectivement sur la partie basse ou la partie haute du module (donc une carte de luminance résultante très différente selon le signe), mais induirait très peu de changements sur la valeur de la fonction de coût. Les résultats de reconstruction du module sans défaut exposés ici sont exactement dans ce cas de figure, c'est pourquoi des pentes négatives (non pertinentes) ont été sélectionnées selon  $Y'$  et  $Z'$ . Les cartes de la fonction de coût sont montrées dans la FIGURE VI-14. Pour pallier ce problème, il faudrait utiliser un critère dépendant de la valeur de la luminance intégrée sur tout le module (dont la valeur serait proche, en cas de faible variation spatiale mesurée, de celle d'un cas théorique sans défaut introduit). Cette valeur pourrait être comparée à ce qui est attendu théoriquement et ceci permettrait de considérer qu'une luminance relativement constante (et suffisamment élevée) mesurée sur tout le module correspond à des valeurs d'erreurs de pente faibles (proches de zéro). Cependant, l'ajout d'un tel critère risquerait d'introduire de nouveaux biais dans les choix du programme basés sur la fonction de coût, dont l'étude et la rectification nécessiterait plus de temps.

TABLE VI-1: Résultats des pentes reconstruites pour le module n°3 avec une itération et une réflectivité fixée à 0.85. Le défaut réel introduit est égal à  $+0.89 \text{ mrad}$  selon  $Z'$  et nul selon  $Y'$ .

Cas	Pentes $Y'$	Pentes $Z'$
	Valeur (mrad)	Valeur (mrad)
Sans défaut	-0.40	-2.20

Avec défaut	0.00	1.00
-------------	------	------

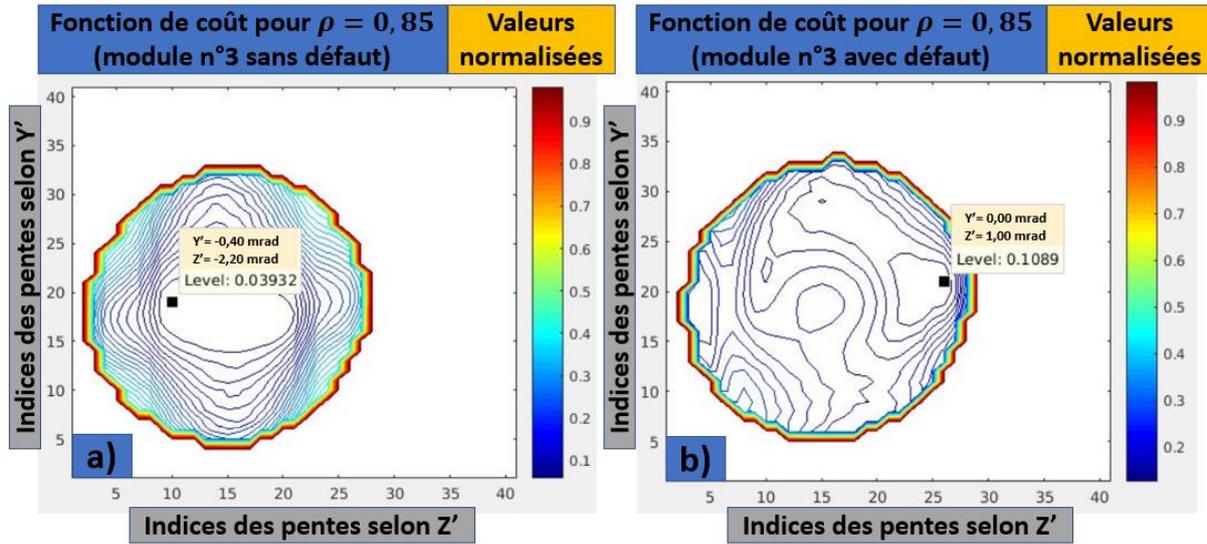


FIGURE VI-14: Carte des valeurs normalisées de la fonction de coût lors de la reconstruction du module n°3 avec une unique itération et une réflectivité valant 0.85, dans le cas sans défaut introduit (en a)), avec défauts (en b)).

Une carte des valeurs de la fonction de coût pour tous les couples de pentes testés a été générée pour chaque cas (cf. FIGURE VI-14). On peut remarquer qu'une majorité de valeur de couples de pentes ne sont pas pris en compte (zone blanche autour du contour rouge), car pour les reconstructions expérimentales, le critère  $S_1$  est utilisé comme un seuil : les couples de pentes à tester sont pris en compte seulement si la valeur de ce critère est inférieure à 80%. Dans le cas sans défaut introduit et pour  $\rho = 0.85$ , la valeur minimale de la fonction se situe en  $Y' = 19$  et  $Z' = 10$ , ce qui correspond à  $-0.40$  et  $-2.20$  mrad, respectivement. La couverture spatiale est relativement élevée dans la carte de luminance issue de la mesure (tout comme le serait une carte de luminance théorique avec une valeur d'erreur de pente négative et faible en amplitude selon  $Y'$ , ainsi que négative et moyenne à forte selon  $Z'$ ). De plus, les hautes valeurs de luminance mesurées induisent la sélection d'un défaut d'amplitude suffisante (et ici de signe négatif) afin de diminuer l'erreur quadratique moyenne. De ce fait, le critère minimisant les écarts locaux ( $S_3$ ) favorise une pente négative selon  $Y'$  et négative de plus forte amplitude selon  $Z'$  (ce couple de valeurs de pentes est situé dans le contour de  $S_3$ , il est donc quasi-équivalente à d'autres couples et n'est pas fiable en soi). Le critère lié au niveau moyen de luminance ( $S_2$ ) favorise une pente négative, de forte amplitude selon  $Y'$  et faible selon  $Z'$  (ce couple de pentes n'est pas fiable lorsque considérée seul, car il est également quasi-équivalent à d'autres situées dans le contour de minima du critère  $S_2$ , tel que schématisé dans FIGURE VI-8), afin de diminuer la différence entre la luminance moyenne mesurée et théorique due aux niveaux de luminance tout de même plus élevés dans la carte théorique. Le critère de couverture spatiale ( $S_1$ ) tend quant à lui à sélectionner des couples de pentes présents dans le plateau de valeurs minimales (correspondant à des pentes nulles à négatives et d'amplitude forte, en particulier selon  $Z'$ ). Finalement, les contours de  $S_2$  et  $S_3$ , ainsi que le plateau de valeurs minimales de  $S_1$  concordent (sur la carte des couples de pentes possibles) pour une valeur de pente négatives et de forte amplitude selon  $Z'$  et négative de faible amplitude selon  $Y'$ . Ce cas montre bien qu'un couple de pentes (souvent quasi-équivalent à d'autres) sélectionné indépendamment par un critère ne permet pas de prédire le résultat final de la fonction de coût. En effet, ce résultat dépend en grande partie de la concordance des zones à valeurs minimales de chaque critère. La différence

des niveaux de luminance entre la théorie et la mesure est la conséquence d'une surestimation locale de la réflectivité, car des tests supplémentaires effectués avec une valeur plus faible de celle-ci (cf. FIGURE VI-15 et FIGURE VI-16) tendent à réduire la valeur de l'erreur de pente selon  $Y'$  (et à changer complètement celle selon  $Z'$ , pour une raison de distribution quasi-constante de la luminance sur le module rendant  $S_3$  inefficace pour contraindre les solutions possibles, citée plus haut et illustrée dans la FIGURE VI-11). Le défaut détecté selon  $Y'$  dans le cas où la réflectivité vaut 0.85 provient donc en majeure partie du critère  $S_2$  qui compense la surestimation de la réflectivité.

Dans le cas avec défauts introduits et pour  $\rho = 0.85$  (cf. FIGURE VI-13), la valeur de la pente reconstruite vaut  $0.00 \text{ mrad}$  selon  $Y'$  et  $1.00 \text{ mrad}$  selon  $Z'$ . Il est aisé de remarquer que la carte de la fonction de coût (cf. FIGURE VI-14) présente une différence (ou asymétrie) plus marquée entre les valeurs correspondant à des pentes négatives et des pentes positives selon  $Z'$ , que dans le cas sans défaut. En effet, dans le cas avec défauts la distribution spatiale de la luminance mesurée sur le module est plus fortement asymétrique, donc sélectionner une pente positive de  $1.00 \text{ mrad}$  selon  $Z'$  diminue davantage l'erreur quadratique moyenne ( $S_3$ ) que des pentes valant  $-1.00 \text{ mrad}$  (pour lesquelles la zone éclairée du module théorique serait dans sa partie haute, soit à l'opposé de celle dans la carte de luminance mesurée). De plus, le fait d'avoir pondéré ce critère par 10 permet de le rendre comparable au critère  $S_2$  et donc d'augmenter son influence dans le choix de la fonction de coût. Cependant, la seule présence de ce critère n'est pas suffisante pour obtenir un résultat cohérent : les niveaux de luminance mesurés sont si faibles (devant les niveaux de luminance théoriques) qu'ils induiraient une erreur de pente beaucoup trop importante afin de réduire l'erreur quadratique, tout comme l'erreur liée au niveau moyen ( $S_2$ ).

Les zones de la carte de luminance mesurée initiale dont les valeurs sont faibles (inférieures à 0.10) sont directement ôtées de la carte théorique. C'est pourquoi la couverture spatiale théorique peut s'approcher de l'expérimentale sans qu'il n'y ait besoin de diminuer la surface d'éclairage par une pente très forte (positive ou négative). A contrario, le niveau expérimental moyen de luminance est relativement faible comparé à la simulation (à cause de la surestimation locale de la réflectivité) et nécessite des valeurs de pentes extrêmement fortes (et donc totalement incohérentes physiquement) dans la carte théorique pour être approché. Ainsi, la minimisation de l'écart avec le niveau moyen de luminance mesurée ( $S_2$ ) et celle des niveaux de luminance locaux (donc de l'erreur quadratique moyenne) ( $S_3$ ) tendent à choisir des pentes très élevées en valeur absolue selon  $Y'$  et/ou  $Z'$ , à cause des niveaux mesurés relativement faibles. Cependant, le critère de couverture spatiale ( $S_1$ ) tend à choisir une pente nulle ou négative d'amplitude moyenne (jusqu'à  $-0.60 \text{ mrad}$ ) selon  $Y'$  et  $Z'$  (afin d'atteindre la même couverture spatiale). Les zones de valeurs minimales des trois critères concordent finalement pour une valeur négative d'amplitude moyenne selon  $Y'$  et une valeur positive et faible selon  $Z'$ . Le critère  $S_1$  permet in fine de réduire les amplitudes de pentes favorisées par  $S_2$  et  $S_3$ . Ainsi, la valeur de pente négative selon  $Y'$  est due à l'influence des critères  $S_2$  et  $S_3$  qui forcent l'image théorique à atteindre les mêmes niveaux de luminance (moyen et locaux) que la mesure, dont la réflectivité est surestimée.

Des tests (résumés dans la TABLE VI-2) effectués avec une valeur de réflectivité locale du module égale à 0.75 (cf. FIGURE VI-15 et FIGURE VI-16) dans le cas sans défaut montrent que la pente selon  $Z'$  diminue en valeur absolue ( $-2.00 \text{ mrad}$ ). Ceci est dû au fait que la surface reconstruite peut être plus importante (que dans le cas où  $\rho = 0.85$ ) : la baisse de la valeur de la réflectivité induit une baisse de l'écart entre les niveaux (moyens et locaux) de luminance théoriques et mesurés, qui permet de sélectionner des valeurs de pentes qui induisent une plus grande couverture spatiale théorique (cela ne fait plus autant augmenter  $S_2$  et  $S_3$  qu'avec  $\rho = 0.85$ ). Les critères  $S_2$  et  $S_3$  favorisent des pentes négatives selon  $Y'$  et  $Z'$  (car ils sont inadaptés à la situation

d'un module quasi-uniformément éclairé comme c'est encore le cas ici), et le critère  $S_1$  favorise toujours des pentes négatives selon  $Z'$  afin maximiser la couverture spatiale (celle-ci est en théorie plus élevée si la pente vaut  $-2.00 \text{ mrad}$  que  $0.40 \text{ mrad}$  selon  $Z'$ , tel que l'on peut le constater dans les FIGURE VI-16 et FIGURE VI-17, respectivement).

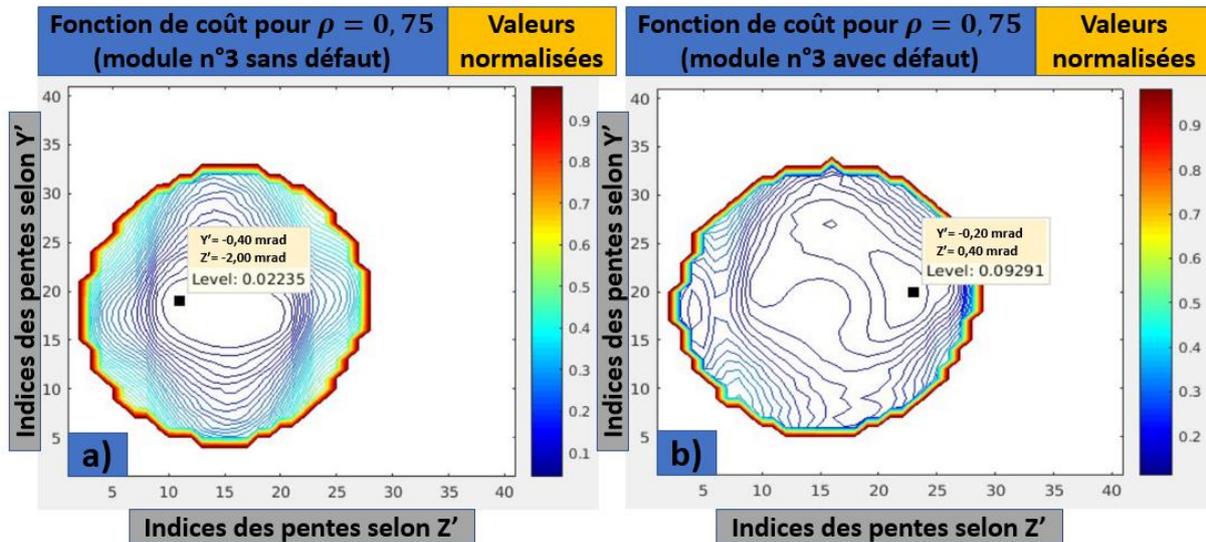


FIGURE VI-15 : Carte des valeurs normalisées de la fonction de coût dans le cas du module n°3 sans défaut (en a)) et avec défaut (en b)) en considérant une réflectivité valant 0.75.

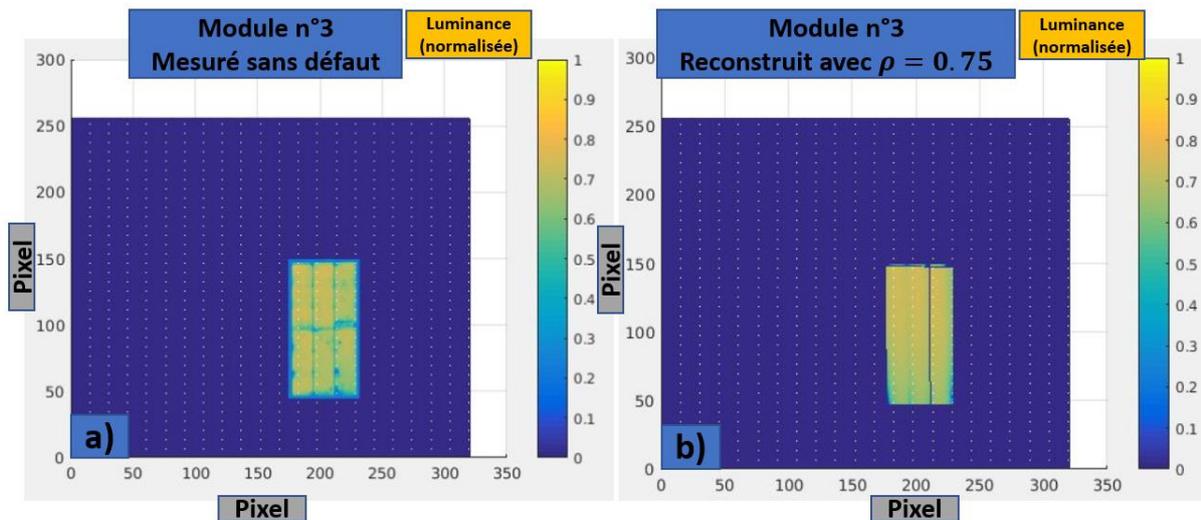


FIGURE VI-16 : Carte des luminances mesurées du module n°3 sans défaut a). Carte des luminances reconstruite par la méthode en considérant une réflectivité valant 0.75 b).

Dans le cas avec défaut et  $\rho = 0.75$  (cf. FIGURE VI-15 et FIGURE VI-17), l'amplitude de la pente selon  $Z'$  devient légèrement plus faible ( $0.40 \text{ mrad}$ ), car les valeurs de pentes sélectionnées par le critère  $S_2$  sont moins fortes en amplitude (que pour  $\rho = 0.85$ ). La valeur de la pente selon  $Z'$  (dont la valeur attendue est environ  $0.89 \text{ mrad}$ ) reste donc positive mais est faible, à cause de l'importante couverture spatiale mesurée, liée au fait que le défaut manuellement introduit n'est pas un désalignement parfaitement uniforme spatialement (dans ce cas précis, la luminance dans la partie haute du module devrait comporter moins de zones éclairées que présentement).

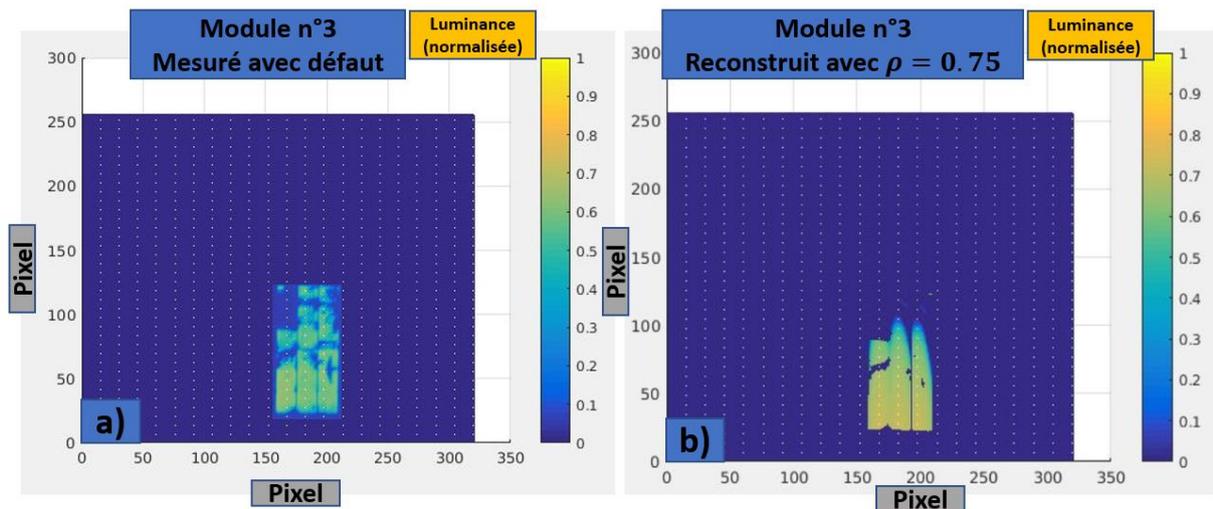


FIGURE VI-17: Carte des luminances mesurées du module n°3 avec défaut a). Carte des luminances reconstruite par la méthode en considérant une réflectivité valant 0.75 b).

TABLE VI-2: Résultats des pentes reconstruites pour le module n°3 avec une itération et une réflectivité fixée à 0.75. Le défaut réel introduit est égal à +0.89 mrad selon Z' et nul selon Y'.

Cas	Pentes Y'	Pentes Z'
	Valeur (mrad)	Valeur (mrad)
Sans défaut	-0.40	-2.00
Avec défaut	-0.20	0.40

Les pentes de surface du module n°2 ont ensuite été reconstruites en considérant que  $\rho = 0.85$  (cf. FIGURE VI-19 et FIGURE VI-20). Les résultats pour le cas sans défaut (cf. FIGURE VI-19), regroupés dans la TABLE VI-3, montrent qu'une pente négative valant  $-1.80 \text{ mrad}$  a été détectée selon Z', ainsi qu'une pente nulle selon Y'. Dans le cas avec défauts, la pente identifiée vaut  $-2.00 \text{ mrad}$  selon Z' et  $1.40 \text{ mrad}$  selon Y' (la valeur réelle du défaut introduit est  $-0.89 \text{ mrad}$  selon Z' et nulle selon Y').

Dans le cas sans défaut (cf. FIGURE VI-18 et FIGURE VI-19), on peut cependant observer une variation spatiale légèrement plus élevée que dans le cas du module n°3 sans défaut, qui concentre les valeurs hautes dans la partie supérieure du module n°2 et qui a contraint le programme à choisir une pente négative selon Z'.

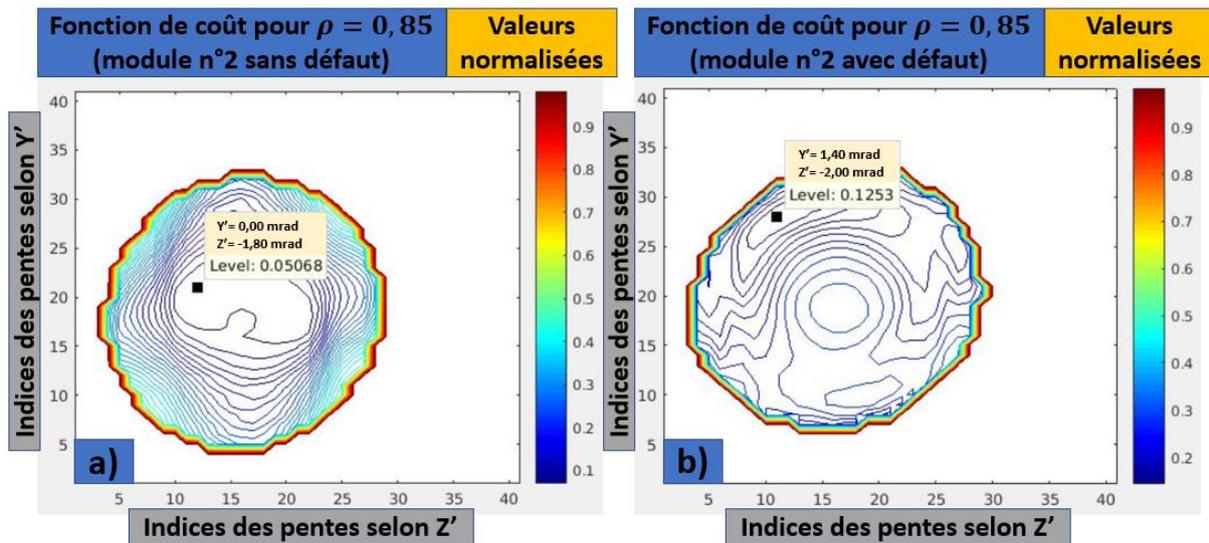


FIGURE VI-18 : Carte des valeurs normalisées de la fonction de coût dans le cas du module n°2 sans défaut (en a)) et avec défaut (en b)) en considérant une réflectivité valant 0.85.

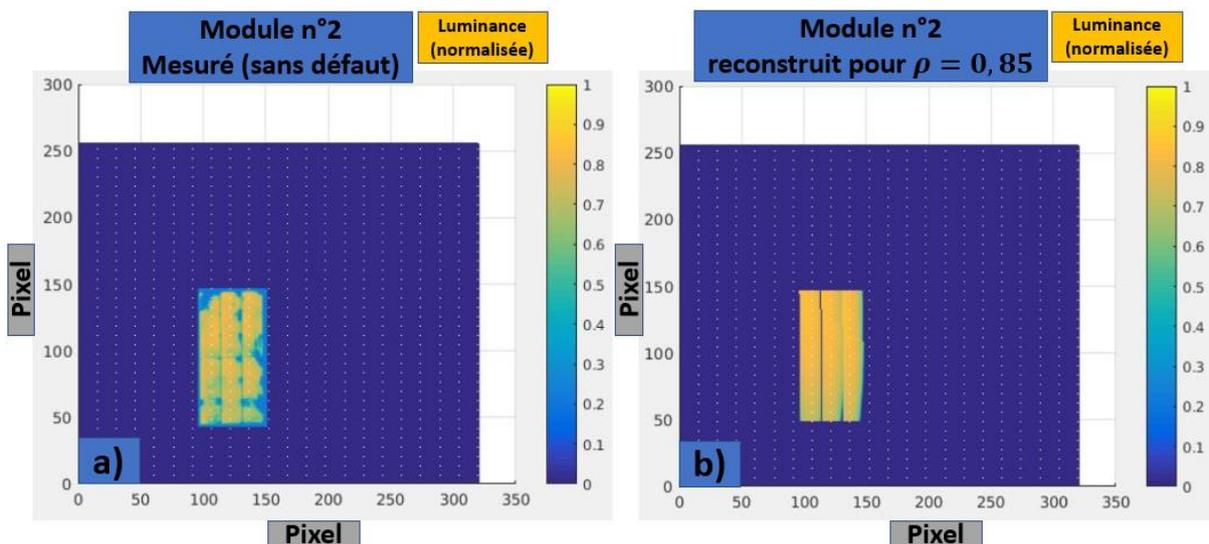


FIGURE VI-19 : Module n°2 de l'héliostat de Thémis dans le cas sans défaut introduit, mesuré (en a)), reconstruit par la méthode en n'utilisant qu'une seule itération et une réflectivité de 0.85 (en b)).

Dans le cas avec défauts introduits (cf. FIGURE VI-18 et FIGURE VI-20), les valeurs de luminances fortes renvoyées par le module n°2 sont situées sur la partie gauche de ses facettes (et globalement sur la partie gauche du module entier), donc le critère d'erreur quadratique ( $S_3$ ) est plus faible pour des solutions induisant des distributions de luminance théorique dont les fortes valeurs sont situées dans la partie gauche du module (comme dans la mesure). Cependant, les niveaux de luminance restent si faibles (à cause de la surestimation de la réflectivité) que des valeurs de couples d'erreurs pente très fortes (donc incohérentes) sont privilégiées par ce critère. Le critère du niveau moyen ( $S_2$ ) est minimal pour des valeurs de pentes positives et d'amplitude forte selon  $Y'$ . Le critère de couverture spatiale manquante ( $S_1$ ) permet cependant de diminuer les amplitudes des valeurs de pentes (comme pour la reconstruction du module n°3). Ainsi, des pentes positives selon  $Y'$  (1.40 mrad) sont sélectionnées pour obtenir une augmentation des niveaux de luminance à mesure que l'on s'approche de la partie gauche des facettes, ainsi qu'un léger décentrement des valeurs maximales vers la partie gauche du module entier. Une pente négative et de forte amplitude valant

$-2.00 \text{ mrad}$  est sélectionnée selon  $Z'$ , afin de minimiser l'écart entre le niveau moyen de luminance théorique et expérimentale ( $S_2$ ), et de minimiser l'écart quadratique moyen ( $S_3$ ).

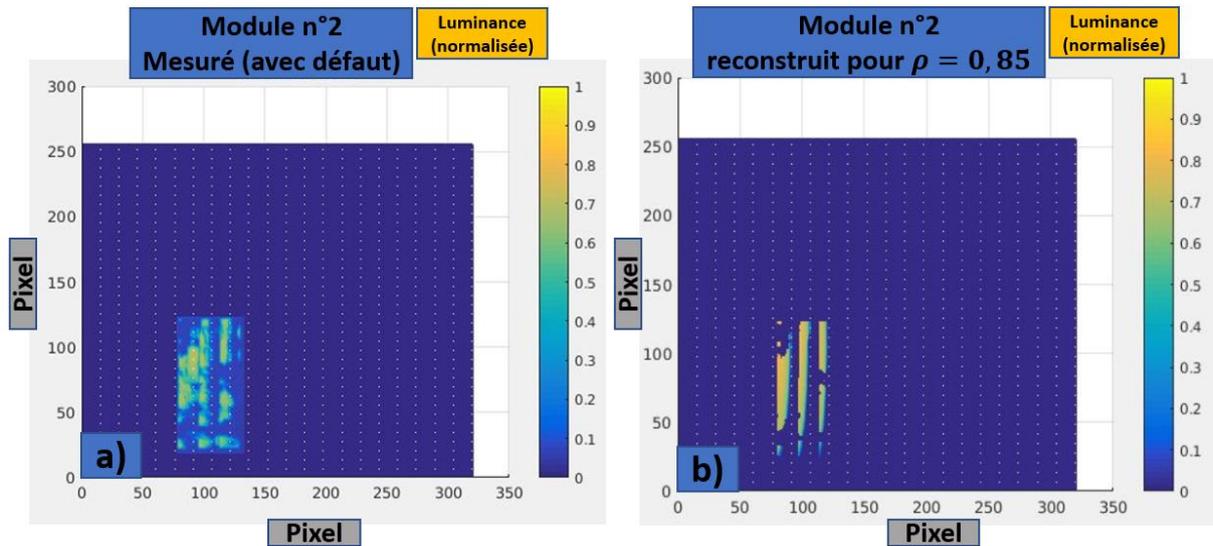


FIGURE VI-20: Module n°2 de l'héliostat de Thémis dans le cas avec défauts introduits, mesuré (en a)), reconstruit par la méthode en n'utilisant qu'une seule itération et une réflectivité de 0.85 (en b)).

TABLE VI-3: Résultats des pentes reconstruites pour le module n°2 avec une itération et une réflectivité fixée à 0.85. Le défaut réel introduit est égal à  $-0.89 \text{ mrad}$  selon  $Z'$  et nul selon  $Y'$ .

Cas	Pentes $Y'$	Pentes $Z'$
	Valeur (mrad)	Valeur (mrad)
Sans défaut	0.00	-1.80
Avec défaut	1.40	-2.00

Au vu de l'incertitude liée à la valeur réelle de la réflectivité locale sur la surface de l'héliostat et des conséquences néfastes d'une surestimation de ce paramètre sur les résultats, nous avons effectué (comme pour le module n°3) des reconstructions (résumées dans la TABLE VI-4) en fixant sa valeur à 0.75 (cf. FIGURE VI-21 et FIGURE VI-22). Dans le cas du module n°2 sans défaut introduit avec une réflectivité à 0.75, les valeurs de pentes reconstruites selon  $Z'$  diminuent légèrement. Cet effet est directement lié au fait que l'écart entre les niveaux moyens et locaux de luminance entre la théorie et la mesure est plus faible (que dans le cas avec  $\rho = 0.85$ ). De ce fait, les pentes favorisées par les critères  $S_2$  et  $S_3$  ont des amplitudes plus faibles.

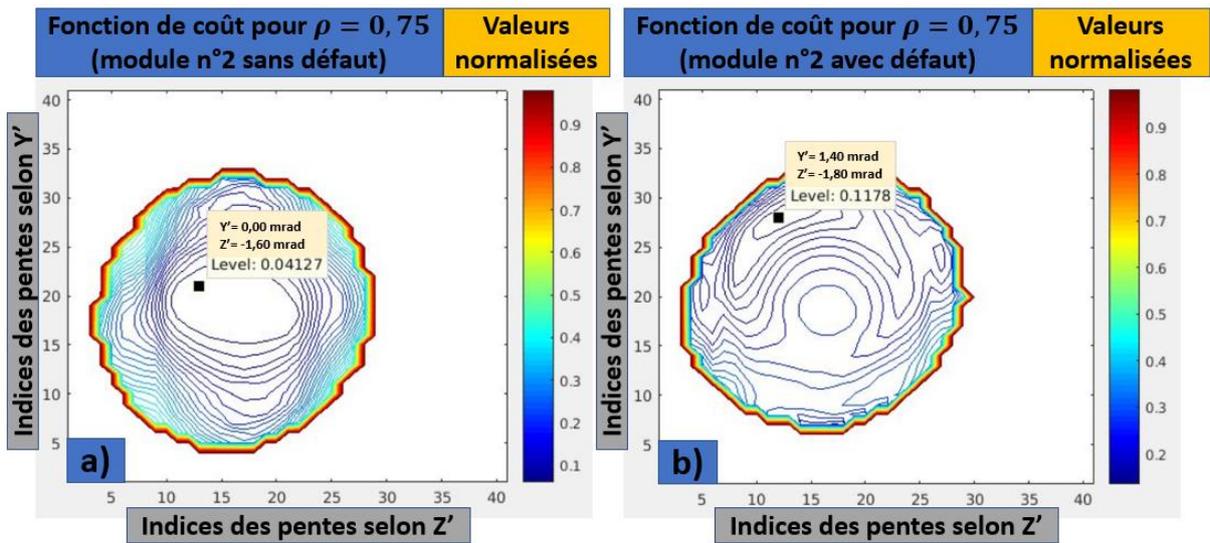


FIGURE VI-21 : Carte des valeurs normalisées de la fonction de coût dans le cas du module n°2 sans défaut en considérant une réflectivité valant 0.75.

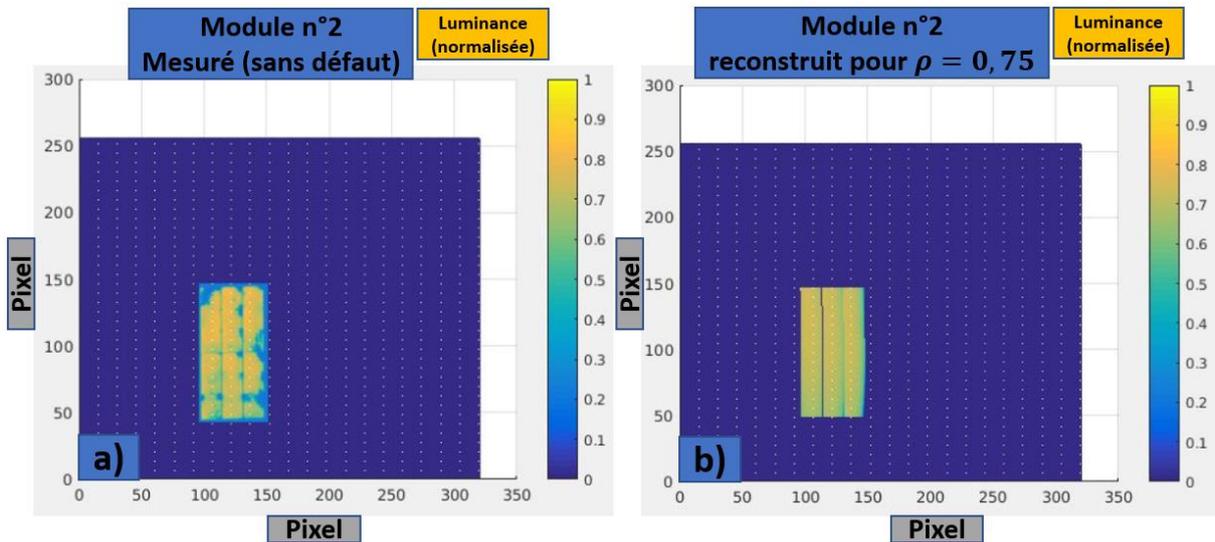


FIGURE VI-22 : Carte des luminances mesurées du module n°2 sans défaut a). Carte des luminances reconstruite par la méthode en considérant une réflectivité valant 0.75 b).

Dans le cas avec défauts (cf. FIGURE VI-23), le raisonnement quasiment identique avec celui du cas comprenant une réflectivité de 0.85, et la pente selon  $Z'$  est légèrement plus faible que dans le cas sans défaut (grâce à la diminution de l'écart entre les niveaux moyens et locaux de luminance, entre la théorie et la mesure). Au vu de l'impact de la valeur de la réflectivité (initialement supposée uniforme et valoir 0.85), nous avons décidé de la fixer à 0.75 pour chaque module, afin de procéder aux reconstructions suivantes.

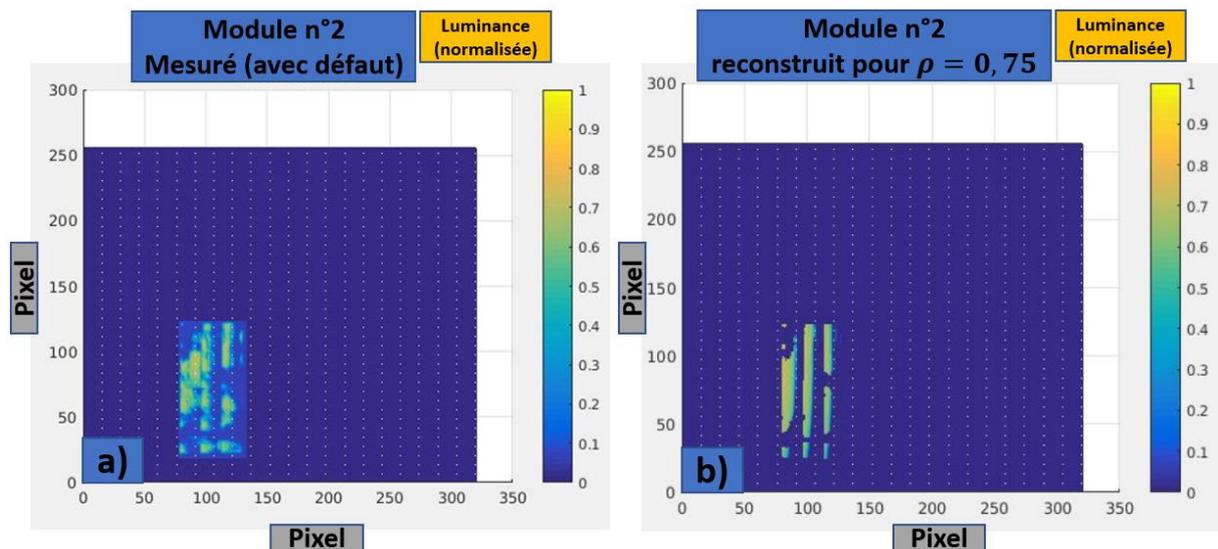


FIGURE VI-23: Carte des luminances mesurées du module n°2 avec défaut a). Carte des luminances reconstruite par la méthode en considérant une réflectivité valant 0.75 b).

TABLE VI-4: Résultats des pentes reconstruites pour le module n°2 avec une itération et une réflectivité fixée à 0.75. Le défaut réel introduit est égal à  $-0.89$  mrad selon  $Z'$  et nul selon  $Y'$ .

Cas	Pentes $Y'$	Pentes $Z'$
	Valeur (mrad)	Valeur (mrad)
Sans défaut	0.00	-1.60
Avec défaut	1.40	-1.80

### VI.3.1.C. Résultats avec un nombre non contraint d'itérations et une réflectivité locale de 0.75

Nous avons ensuite reconstruit les pentes de surface des deux modules en postulant que la réflectivité vaut 0.75 et en laissant libre le nombre d'itérations nécessaires. Ceci permet, contrairement aux reconstructions grossières précédentes (cf. VI.3.1.B), d'évaluer la capacité de la méthode de rétro-visée à une caméra par mesure unique à reconstruire les pentes de surfaces de chaque module plus finement. Le processus commence par une première itération (tel que décrit précédemment) puis les zones dont les valeurs de luminance théoriques s'écartent de la mesure locale de plus de 0.25 sont sélectionnées pour former une nouvelle zone à reconstruire et démarrer une nouvelle itération. Ce seuil permet d'agir sur la précision spatiale de la reconstruction : plus il est faible, plus les petites variations d'erreurs de pentes sont prises en compte, mais au prix d'un temps de calcul beaucoup plus important et d'une incertitude plus élevée dans la reconstruction de chaque zone (les zones sont plus petites en nombre de pixels, ce qui induit moins de données d'entrée pour estimer la pente). Ce processus se répète tant que des zones de plus de 20 pixels sont détectées et qu'une zone identique n'est pas resélectionnée. Pour ces nouveaux calculs, l'approche est légèrement différente car le nombre d'itérations est laissé libre, donc l'algorithme peut sélectionner les zones problématiques (trop différentes de la mesure) afin de les reconstruire différemment au cours des prochaines itérations. Le fait d'être dans une configuration de nombre d'itérations non contraint permet au programme de reconstruire le module plus finement. Cependant, le raisonnement permettant de comprendre le choix des pentes réalisé par la fonction de coût reste identique à celui des reconstructions avec une unique itération.

La soustraction, selon chaque axe, des pentes reconstruites à partir des cas avec et sans défaut est donnée dans la FIGURE VI-26 pour le module n°3 et dans la FIGURE VI-29 pour le module n°2. Les résultats sont résumés dans la TABLE VI-5 et la TABLE VI-6. Pour le cas du module n°3 sans défaut (cf. FIGURE VI-24), les valeurs de pentes sont assez proches de celles provenant des reconstructions à une seule itération. Les pentes valent en moyenne  $-2.00 \text{ mrad}$  selon  $Z'$  et de  $-0.60 \text{ mrad}$  selon  $Y'$ .

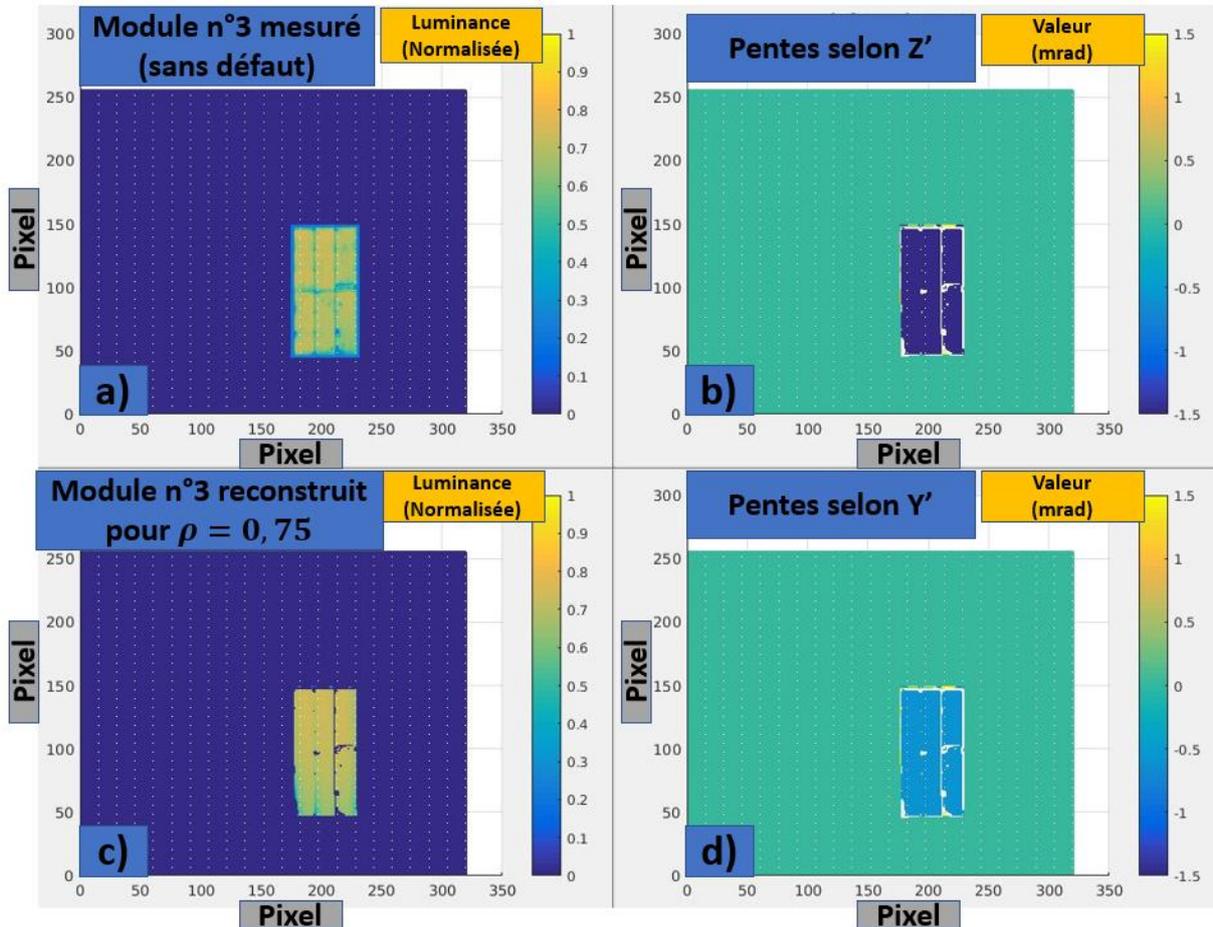


FIGURE VI-24 : Résultats de la reconstruction des pentes de surface du module n°3 dans le cas sans défaut introduit pour une réflectivité locale estimée à 0.75. Image expérimentale du module (en a)), pentes selon l'axe  $Z'$  (en b)), pentes selon l'axe  $Y'$  (en c)), et image du module reconstruite par la méthode (en d)).

Pour le cas avec défaut (cf. FIGURE VI-25) : la partie basse du module est relativement bien reconstruite (beaucoup de valeurs à  $1.00 \text{ mrad}$ ). Les pentes selon  $Y'$  sont également cohérentes car négatives mais très faibles (beaucoup de valeurs à  $-0.20 \text{ mrad}$ ). Cependant, la partie haute du module contient beaucoup de pixels pour lesquels la réflectivité semble varier fortement et même baisser drastiquement (endroits non éclairés sur le module). A cause de cette faible couverture spatiale, le programme reconstruit les erreurs de pentes par zones dont la taille diminue à mesure que l'on se rapproche de la partie haute du module, ce qui augmente l'incertitude du résultat de reconstruction car il y a moins de points de mesure en entrée pour évaluer l'erreur de pente de chaque zone. De plus, sur une carte de la luminance théorique reconstruite pour un défaut positif (tel que celui réellement introduit au module), seuls des niveaux de luminance nuls à extrêmement faibles devraient figurer sur sa partie haute, ce qui n'est pas le cas expérimentalement. Afin de répondre à ce problème, le programme sélectionne des pentes négatives et fortes selon  $Z'$ , ainsi que négatives et plus modérées selon  $Y'$  dans cette partie, car c'est une situation dans laquelle la luminance théorique atteint des valeurs proches des mesures dans cette région du module. Ceci a

pour effet de biaiser la valeur moyenne résultante de la pente du module qui ne vaut que  $0.57 \text{ mrad}$  selon  $Z'$  et qui vaut  $-0.24 \text{ mrad}$  selon  $Y'$ . En définitive, la valeur réelle ainsi que la variation spatiale de la réflectivité sur le module restent méconnues, et une meilleure connaissance de ces paramètres permettrait d'améliorer les résultats d'erreur de pentes de la méthode de rétro-visée à une caméra par mesure unique.

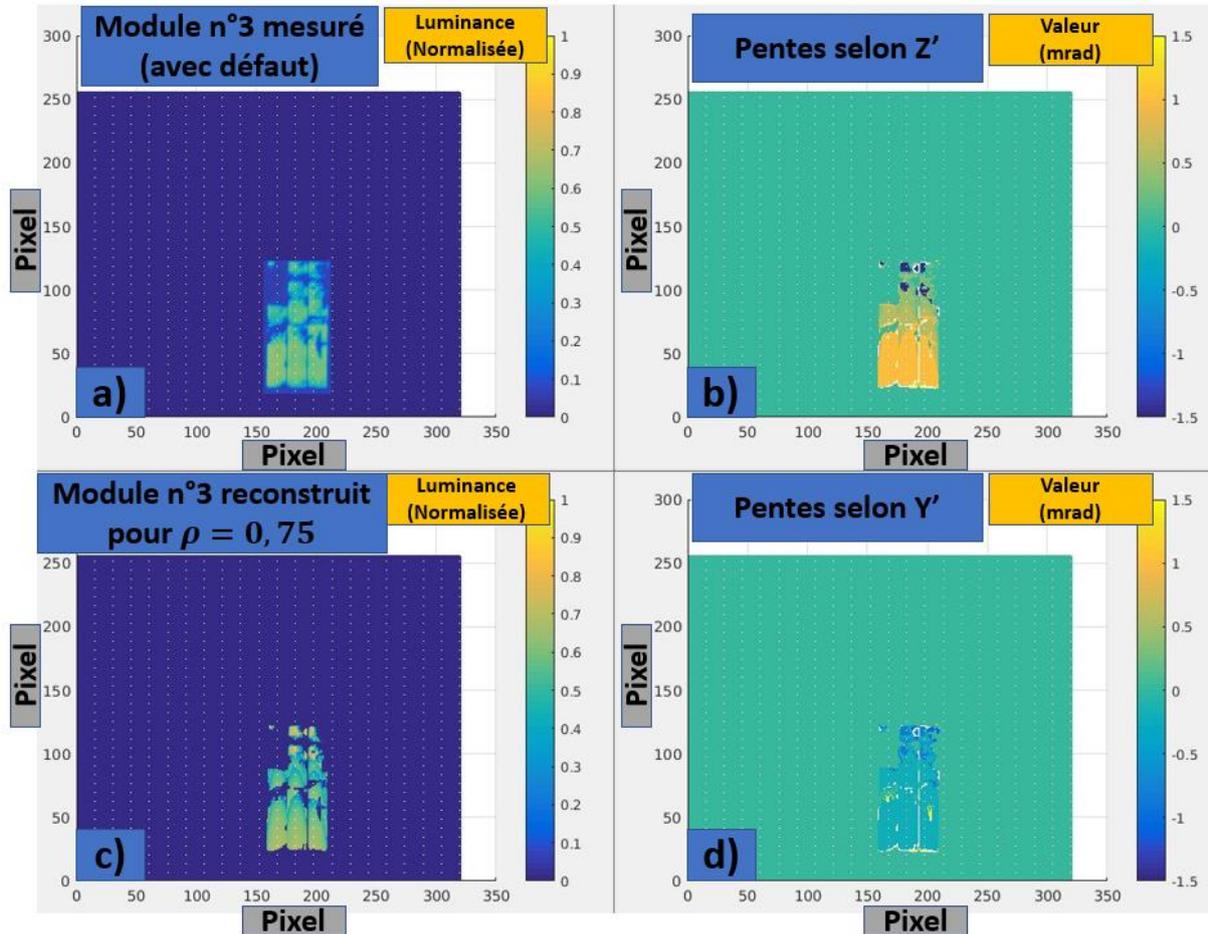


FIGURE VI-25 : Résultats de la reconstruction des pentes de surface du module n°3 dans le cas avec défaut introduit pour une réflectivité locale estimée à 0.75. Image expérimentale du module (en a)), pentes selon l'axe  $Z'$  (en b)), pentes selon l'axe  $Y'$  (en c)), et image du module reconstruite par la méthode (en d)).

Les cartes de luminance de la soustraction des cas sont présentées dans la FIGURE VI-26. Leur analyse (pour les modules n°2 et n°3) est présentée plus bas, sous les résultats du module n°2.

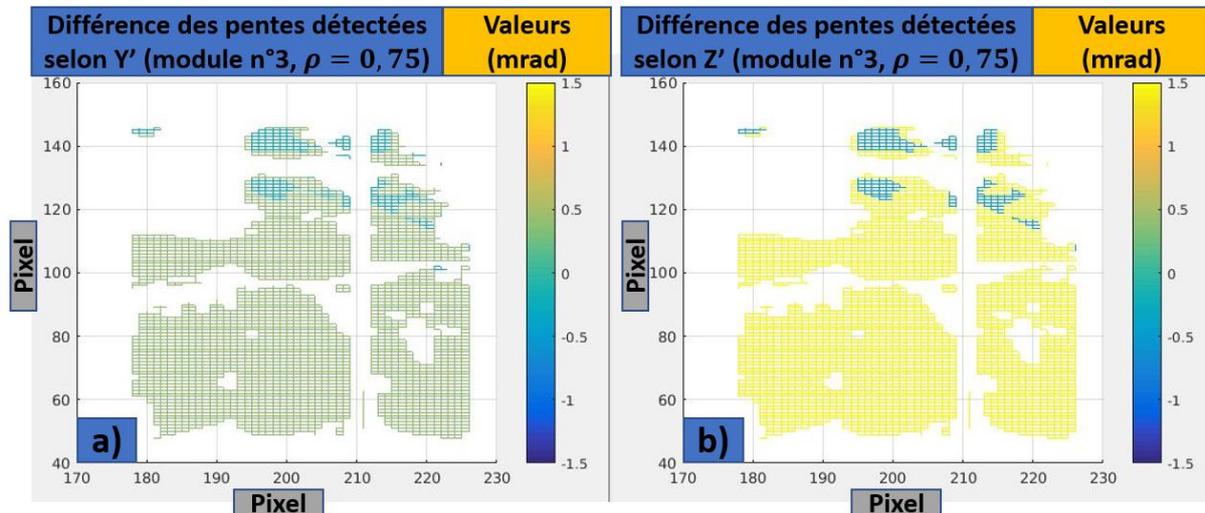


FIGURE VI-26 : Résultat de la soustraction des cas pour le module n°3.

TABLE VI-5 : Récapitulatif des résultats de reconstruction de pentes pour le module n°3 avec un nombre non contraint d'itérations. Le défaut réel introduit est égal à +0.89 mrad selon Z' pour le module n°3, -0.89 mrad selon Z' pour le module n°2 et nul selon Y' pour les deux modules.

Module n°3	Couverture spatiale	Pentes Y'			Pentes Z'		
		Moyenne (mrad)	PTV (mrad)	Erreur RMS (mrad)	Moyenne (mrad)	PTV (mrad)	Erreur RMS (mrad)
Sans défaut	0.80	-0.60	0.60	0.60	-2.00	2.00	2.00
Avec défaut	0.57	-0.24	1.00	0.28	0.57	3.40	0.84
<b>Différence</b>	0.53	0.36	0.80	0.39	2.56	3.40	1.85

Dans le cas du module n°2 sans défaut (cf. FIGURE VI-27), des pentes globalement négatives et de très faible amplitude (valeur moyenne des pentes égale à  $-0.20$  mrad) ont été sélectionnées selon Y'. Cependant, des pentes négatives est relativement élevées sont présentes selon Z' (valeur moyenne des pentes égale à  $-1.40$  mrad). A certains endroits, de fortes valeurs de pentes (positives et négatives) sont sélectionnées car la luminance y est très faible, donc le programme a dû augmenter fortement les valeurs de pentes afin d'atteindre des niveaux moyens de luminance théoriques proches de la mesure.

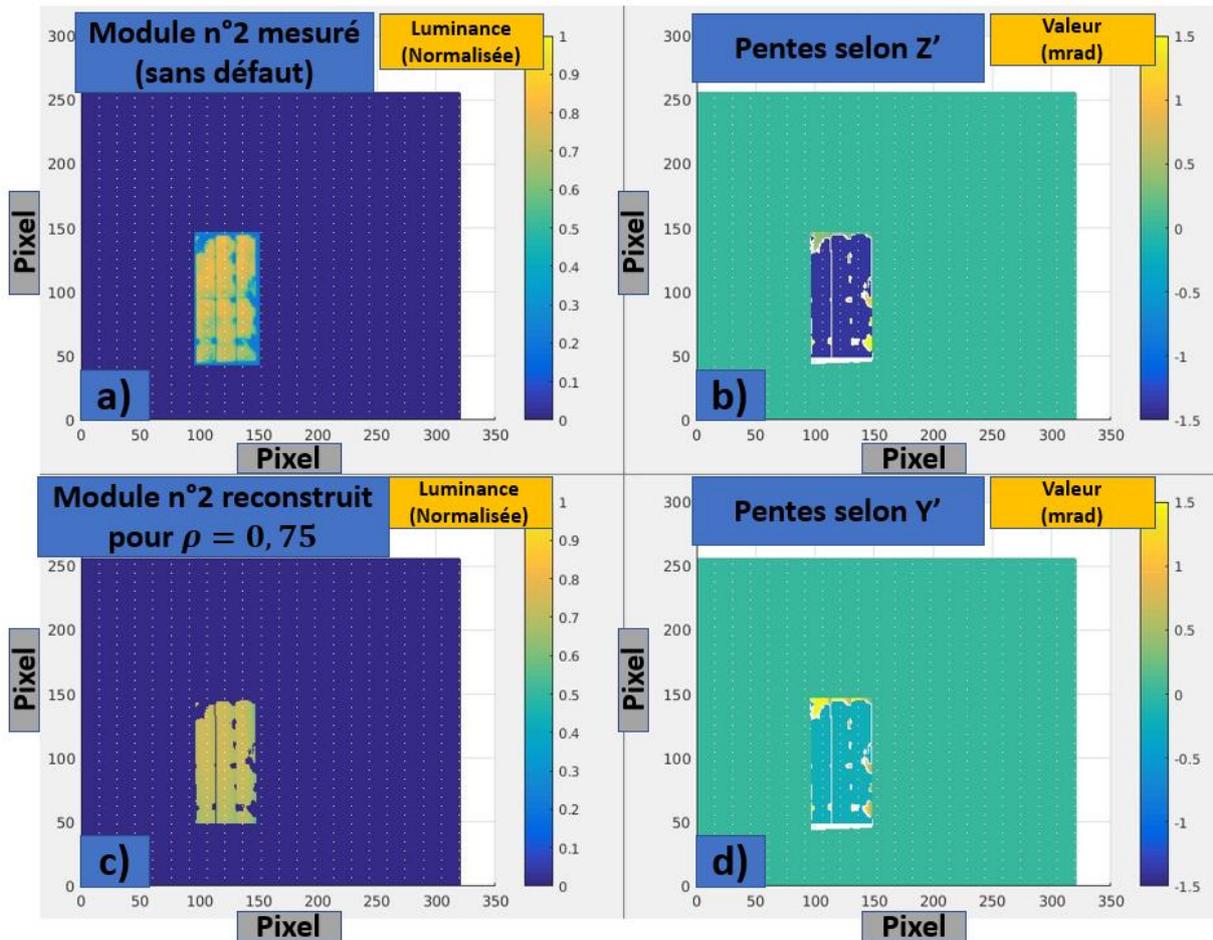


FIGURE VI-27 : Résultats de la reconstruction des pentes de surface du module n°2 dans le cas sans défaut introduit pour une réflectivité locale estimée à 0.75. Image expérimentale du module (en a)), pentes selon l'axe Z' (en b)), pentes selon l'axe Y' (en c)), et image du module reconstruite par la méthode (en d)).

La carte de luminance mesurée du module n°2 avec défaut (cf. FIGURE VI-28) montrent que beaucoup d'endroits de sa surface sont très peu (voire nullement) éclairés et les niveaux de luminances sont plutôt faibles, malgré une tendance à l'augmentation dans la partie haute du module. Des pentes négatives et fortes sont sélectionnées selon Z' (valeur moyenne des pentes égale à  $-2.06 \text{ mrad}$ ) afin d'atteindre un niveau moyen de luminance et une distribution spatiale proches de la mesure, donc de minimiser les critères  $S_2$  et  $S_3$ . Les pentes selon Y' proviennent du même processus (valeur moyenne des pentes égale à  $1.16 \text{ mrad}$ ), sauf à certains endroits de fortes valeurs de pentes (positives et négatives) où la luminance est très faible, donc où le programme a dû augmenter fortement les valeurs de pentes afin d'atteindre des niveaux moyens de luminance théoriques proches de la mesure (tel que dans le cas sans défaut).

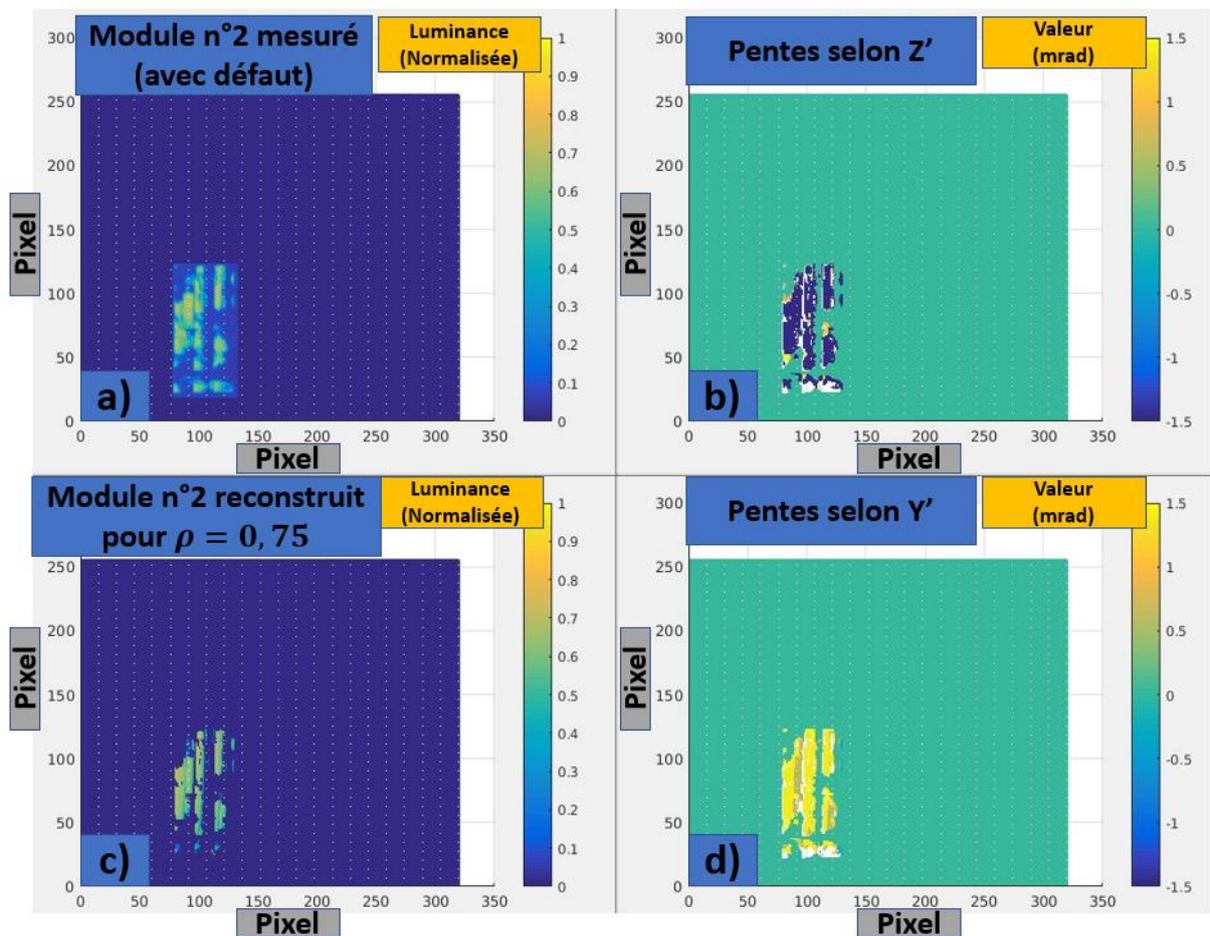


FIGURE VI-28 : Résultats de la reconstruction des pentes de surface du module n°2 dans le cas avec défaut introduit pour une réflectivité locale estimée à 0.75. Image expérimentale du module (en a)), pentes selon l'axe Z' (en b)), pentes selon l'axe Y' (en c)), et image du module reconstruite par la méthode (en d)).

La soustraction des cas (cf. FIGURE VI-29), qui est nécessaire pour isoler les défauts de pentes introduits manuellement et évaluer la capacité du programme à les détecter, montre que les valeurs de pentes selon Y' pour le module n°3 sont non nulles (valeur moyenne égale à  $0.36 \text{ mrad}$ ) à cause des valeurs négatives détectées dans le cas sans défaut (légèrement plus fortes en amplitude que celles dans le cas avec défaut). Pour le module n°2, les pentes selon Y' sont positives et d'amplitude moyenne (valeur moyenne égale à  $1.37 \text{ mrad}$ ), à cause des valeurs positives détectées dans le cas avec défaut. Les pentes selon Z' du module n°3 sont positives donc cohérentes avec le défaut introduit, car sa partie inférieure contient une erreur de pente qui va en diminuant à mesure que l'on s'approche de la partie haute du module (ce qui est également cohérent avec l'idée d'un défaut de tilt imparfait provoquant une légère courbure). Cependant, la valeur moyenne résultante est trop élevée ( $2.56 \text{ mrad}$ ), malgré la présence de valeurs négatives (bien que moins nombreuses que les zones à valeurs de pentes positives) dans la partie haute du module, qui ont des amplitudes très élevées et biaisent le résultat moyen. Cette forte amplitude résultante est due au défaut négatif détecté dans le cas sans défaut. Les pentes selon Z' détectées sur le module n°2 sont cohérentes (valeur moyenne égale à  $-0.66 \text{ mrad}$ ), mais sont biaisées par le défaut négatif détecté (comme pour le module n°3) dans le cas sans défaut introduit.

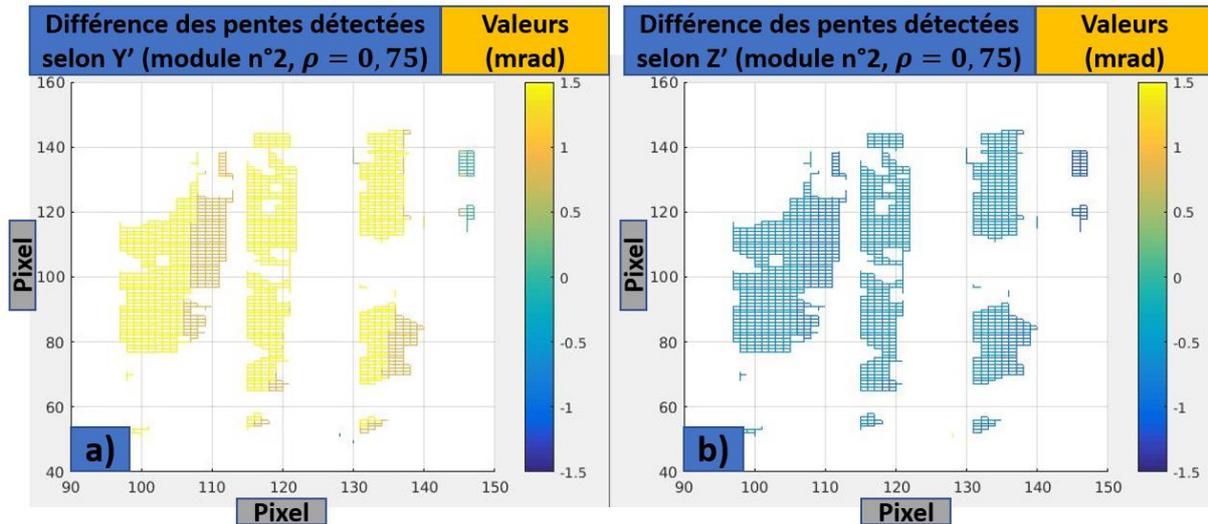


FIGURE VI-29 : Résultat de la soustraction des cas pour le module n°2.

TABLE VI-6 : Récapitulatif des résultats de reconstruction de pentes pour le module n°2 avec un nombre non contraint d'itérations. Le défaut réel introduit est égal à  $+0.89 \text{ mrad}$  selon  $Z'$  pour le module n°3,  $-0.89 \text{ mrad}$  selon  $Z'$  pour le module n°2 et nul selon  $Y'$  pour les deux modules.

Module n°2	Couverture spatiale	Pentes $Y'$			Pentes $Z'$		
		Moyenne (mrad)	PTV (mrad)	Erreur RMS (mrad)	Moyenne (mrad)	PTV (mrad)	Erreur RMS (mrad)
Sans défaut	0.75	-0.20	0.20	0.20	-1.40	1.40	1.40
Avec défaut	0.30	1.16	2.40	1.24	-2.06	3.20	1.19
<b>Différence</b>	0.28	1.37	2.40	1.43	-0.66	3.20	0.29

#### VI.4. Interprétations des résultats et identifications des sources d'erreur

La valeur de l'incertitude sur l'introduction du défaut ( $0.27 \text{ mrad}$ ) est supérieure à l'objectif d'atteindre une incertitude de  $0.1 \text{ mrad}$  que nous souhaitons atteindre et pourrait expliquer certains écarts entre la valeur théorique du défaut introduit et la valeur calculée par la méthode de reconstruction. En ce qui concerne la méthode de rétro-visée ainsi que son post-traitement, nous avons identifié plusieurs sources d'erreur probables (pour certaines déjà d'actualité lors des expérimentations de la méthode de rétro-visée à quatre caméras) et dont la résolution pourrait améliorer la qualité des résultats :

- Le réglage de l'alignement de la caméra ainsi que celui de l'objectif nécessitent de visualiser le point de vue de la caméra, ce qui n'est plus possible lorsque celle-ci acquiert des images de l'héliostat. De ce fait, un défaut d'alignement n'est quasiment plus perceptible durant les mesures. De plus, il y a toujours une incertitude sur le réglage de l'objectif car nous devons visser les filtres à celui-ci et la manœuvre peut potentiellement induire des modifications parasites au focus. Le centrage de l'image de l'héliostat dans le champ de la caméra ainsi que sa netteté ne sont vérifiables qu'à posteriori, ce qui a pour conséquences de rallonger le temps d'acquisition en cas de problème ou de faire baisser la qualité des images brutes en cas de dérèglages plus subtiles. Ce point a été évoqué dans la section IV.4 pour la méthode optimisée de rétro-visée à quatre caméras.

- La cible non-réfrigérée Mini-Pégase derrière laquelle est disposée la caméra se dilate à cause de l'augmentation de sa température. Cet effet nous contraint à ne pas pouvoir placer la tache focale de l'héliostat pendant trop longtemps, sous peine de provoquer un gondolement de la plaque métallique qui en atteignant la caméra, la désaligne ou induit un décalage des orifices idéalement situés devant les filtres. Tout ceci a pour conséquence d'ajouter une incertitude sur la qualité des résultats d'acquisitions, et de contraindre l'opérateur à écourter les mesures. Ce point a également été évoqué dans la section IV.4 pour la méthode optimisée de rétro-visée à quatre caméras.
- L'héliostat E06 est placé idéalement pour réaliser des observations depuis la cible Mini-Pégase, mais son état de surface s'est dégradé au fil des années. Les zones comportant des cassures, des fissures, des poussières ou des dégradations chimiques sont des sources d'erreur supplémentaires dans le traitement des données. De plus, l'introduction manuelle des défauts (dont l'incertitude est estimée à  $0.27 \text{ mrad}$ ) ne permet pas d'atteindre l'incertitude souhaitée initialement pour les méthodes de rétro-visées, soit  $0.1 \text{ mrad}$ .
- Le post-traitement des données prend en compte la réflectivité globale de l'héliostat et est capable de faire varier ce paramètre localement afin de trouver le meilleur compromis. Cependant, notre connaissance de la réflectivité des héliostats de la centrale Thémis est limitée et nous ne pouvons qu'estimer sa valeur globale. Nous avons constaté, lors de tests avec variation locale de réflectivité, que l'assignation de valeurs de réflectivité plus faibles que la moyenne à certaines zones était tout à fait pertinente, mais qu'elle n'était pas justifiable physiquement pour d'autres (et biaise donc le résultat final). En conséquence, nous avons décidé d'imposer une valeur de réflectivité globale sur toute la surface de l'héliostat, en sachant que cela induit un biais dans les zones ayant une réelle variation de ce paramètre.
- Bien qu'améliorée, la fonction de coût est trop influencée par la valeur de la réflectivité. Elle peut être performante lorsqu'appliquée à des images qui se rapprochent de la théorie (d'un héliostat idéal), mais induit des biais lorsque la luminance mesurée est influencée par une variation de la réflectivité. Le cas (improbable avec un héliostat idéal, sans ou avec défaut(s)) d'une luminance réfléchie quasi-constante sur tout un module (cf. FIGURE VI-11), est typiquement le genre de situation que le programme ne reconstruit pas de façon fiable.
- La fonction de coût utilisée dans le programme de reconstruction converge vers la solution en testant l'intégralité des combinaisons de variables. Cette façon de procéder est trop coûteuse en temps de calcul et l'utilisation d'algorithme d'optimisation permettrait d'accélérer ce temps de calcul et d'introduire d'autres variables dans la reconstruction des pentes, telles que la variation des angles de l'héliostat induite par l'incertitude liée à son mode de suivi solaire discret.
- L'héliostat est orienté grâce à des moteurs pas à pas (la valeur d'un pas codeur est environ  $0.14 \text{ mrad}$ ) et il est impossible de connaître son orientation avec exactitude. Par conséquent il existe une erreur de tilt parasite résultant de ce biais irrémédiable. Mais celle-ci risque d'être majorée avec l'erreur provenant du suivi solaire : le suivi solaire de

l'héliostat s'effectue d'une façon discrète et le temps de rafraîchissement de son orientation se situe entre 2 et 3 s. Pendant cette durée, le Soleil continue de se mouvoir et l'héliostat n'est plus correctement aligné pour renvoyer la tache focale vers la caméra. Dans le cadre d'une mesure à une caméra avec l'héliostat en mode de suivi solaire (pertinent uniquement pour la méthode de rétro-visée à une caméra par mesure unique), cela peut s'avérer problématique car le programme de reconstruction inclut l'hypothèse que l'alignement est parfait. Ceci rajoute un biais supplémentaire à celui qui est inhérent au système d'orientation de l'héliostat.

La résolution des problématiques évoquées ici est susceptible d'améliorer la méthode de rétro-visée à une caméra de rétro-visée à une caméra par mesure unique, par conséquent des solutions sont proposées dans la section suivante.

## VI.5. Améliorations envisageables de la méthode expérimentale et de son post-traitement

Afin d'améliorer la qualité des résultats, nous proposons des solutions à court et moyen terme, consistant en des modifications de la méthode de rétro-visée à une caméra de rétro-visée à une caméra par mesure unique :

- La modification du système d'acquisition (caméras) et du programme de pilotage des mesures sur héliostat et sur Soleil, afin d'être en mesure de visualiser les images des caméras en temps réel et de détecter plus rapidement les défauts de réglages d'alignement et de focus.
- Le profil spatial de luminance du Soleil varie selon la longueur d'onde considérée. Ainsi, l'utilisation de filtres spectraux permettrait de sélectionner des longueurs d'onde légèrement différentes pour lesquelles ce profil est moins plat que pour le cas de la lumière visible (particulièrement au niveau du centre du disque solaire). Ceci permettrait de mieux distinguer entre elles, donc de mieux reconstruire, les zones d'une surface optique renvoyant des luminances issues du centre du disque solaire.
- Deux solutions pourraient être apportés pour pallier la dilatation thermique de la cible Mini-Pégase ou ses conséquences : éloigner la structure métallique qui maintient les caméras et agrandir les orifices, afin d'éviter une augmentation du vignettage, et/ou installer une cible refroidie.
- Un autre héliostat que le E06, en meilleur état que celui-ci, pourrait être utilisé pour les expérimentations, à condition d'adapter la cible Mini-Pégase en agrandissant les orifices pour les caméras. Cependant, l'introduction des défauts est réalisée de la même façon pour tous les héliostats et la limite en précision reste pour le moment infranchissable avec les moyens actuels. La méthode de rétro-visée à une caméra pourrait cependant être mise en place sur d'autres type d'héliostats tels que ceux du CSIRO [64], plus légers et plus petits afin de réduire les risques de déformation par gravité et de détérioration des capteurs optiques par le rayonnement concentré.
- La méconnaissance de la réflectivité de surface de l'héliostat est une des principales limitations de la méthode de reconstruction. La valeur moyenne de ce paramètre ainsi que ses variations locales, qui ne peuvent être qu'approchées avec une méthode numérique, nécessitent à long terme une méthode de caractérisation spécifique

appliquée en amont des reconstructions. Il pourrait s'agir de placer un faisceau laser visible incident à chaque point de la surface de l'héliostat et de mesurer sa réflexion afin d'obtenir une carte de la réflectivité de surface. Cette méthode nécessiterait un temps d'acquisition conséquent, mais permettrait d'évaluer la réflectivité de surface avec moins d'incertitude qu'en utilisant une caméra. En effet, la valeur maximale de luminance, mesurée sur l'image de la surface de l'héliostat par la caméra, peut tout à fait correspondre à la réflexion du centre du disque solaire, mais également à une autre zone, car l'ignorance de la réflectivité locale de surface empêche de conclure sur la valeur réelle de la luminance incidente. Cependant, des solutions à court terme peuvent être envisagées afin d'estimer les valeurs moyenne et locale de la réflectivité de façon plus efficace que dans la présente étude. Une prise d'image sans filtre optique de l'héliostat renvoyant le fond du ciel vers la caméra pourrait être effectuée avant les mesures en tir, afin de procéder à une détection grossière des zones à proscrire pour le calcul de reconstruction (cf. FIGURE VI-2). Cette détection pourrait être confiée à un programme de traitement d'image capable de repérer les fortes variations de niveaux de gris par rapport à une valeur de référence moyennée correspondant au fond du ciel. Ceci permettrait de supprimer, en amont du calcul des pentes de surface, les zones potentiellement biaisées. Le programme pourrait par la suite estimer les variations locales relatives de la réflectivité de surface. De plus, cette première mesure du fond du ciel réfléchi par l'héliostat pourrait être comparée à une mesure directe du fond du ciel par la caméra, afin d'estimer la réflectivité de surface absolue.

- De nouveaux tests de la fonction de coût ainsi que la modification (ex : pondération des critères) ou l'ajout de critères pourraient améliorer les résultats de la méthode de reconstruction ainsi que sa robustesse.
- L'optimisation de la fonction de coût par l'utilisation d'un algorithme tel que celui de Nelder-Mead [49], utilisé dans le programme de reconstruction de la méthode de rétro-visée à quatre caméras, permettrait de converger vers les meilleures combinaisons de pentes de surface sans tester toutes les possibilités. Le gain de temps engendré serait alors utile pour prendre en compte l'incertitude liée à l'orientation de l'héliostat pendant les mesures.
- Le filtre médian appliqué aux images expérimentales (du Soleil, et des quatre caméras pour la méthode optimisée de rétro-visée à quatre caméras) n'est pas forcément le plus fiable pour réduire le bruit de mesure. Il existe d'autres méthodes, telles que la « Total Variation Denoising Method » dont l'implémentation numérique est détaillée dans [65]. Des tests réalisés avec plusieurs méthodes afin d'aboutir à une comparaison permettrait de sélectionner un traitement numérique plus efficace.

Les solutions proposées pourraient contribuer à l'amélioration des méthodes de rétro-visée à une ou quatre caméra(s). Les modifications liées aux programmes de calculs sont plutôt envisageables à court terme, contrairement à celles liées au matériel expérimental.

## Conclusions et perspectives

En définitive, cette étude a permis d'optimiser le processus de reconstruction des pentes de surface de la méthode de rétro-visée à quatre caméras, de contribuer à sa validation expérimentale, et de développer deux nouvelles méthodes de rétro-visée à une caméra, dont une a pu être appliquée à des données expérimentales.

Tout d'abord, une étude bibliographique nous a permis de constater que peu de méthodes de caractérisation des héliostats dans les centrales à tour utilisant des caméras existent. Dans un cadre plus général, les méthodes de caractérisation et de calibration des surfaces optiques concentratrices sont le plus souvent confinées à un type précis de centrale et ne peuvent s'appliquer que difficilement à des centrales à tour. De plus, le matériel utilisé dans la plupart des méthodes est relativement coûteux et sa mise en place demande un temps considérable. La méthode de rétro-visé à quatre caméras, qui avait répondu à ce besoin de développer de nouvelles méthodes de caractérisation ou de calibration des héliostats, avait été mise en place et étudiée préalablement. Cette méthode est basée sur la mesure de luminance par quatre caméras dans le plan cible et permet de reconstruire les erreurs de pentes à la manière d'un senseur de front d'onde.

Dans la présente étude, nous avons tout d'abord modifié la méthode de rétro-visée à quatre caméras afin d'obtenir des résultats équivalents à meilleures, avec des procédés numériques nécessitant moins d'étapes de calculs. Nous avons notamment développé des programmes permettant d'effectuer les traitements préliminaires à l'utilisation des images dans le calcul des pentes, et n'utilisant aucune déformation de l'image brute. Nous avons également développé un programme de calcul des pentes de surface basé sur le même modèle que la méthode initiale, mais utilisant un calcul de tracé de rayons inverse des rayons lumineux. Ces modifications ont été validées numériquement grâce à la simulation de cas réels par le programme de tracé de rayon inverse lui-même et par le logiciel COSAC. Grâce aux campagnes expérimentales réalisées au cours des travaux et à l'adaptation des programmes aux données expérimentales, la méthode de rétro-visée à quatre caméras ainsi que son processus de reconstruction ont pu être validés expérimentalement.

Après avoir réalisé ces travaux sur la méthode de rétro-visée à quatre caméras, nous avons décidé de développer des méthodes utilisant le mouvement naturel du soleil pour détecter les défauts de pentes de surface. De plus, nous nous sommes placés dans une démarche industrielle de réduction des coûts du matériel d'acquisition et de simplification de celle-ci afin de réduire le temps d'installation. Il s'agissait de développer de nouvelles méthodes de rétro-visée n'utilisant qu'une caméra dans le plan cible, capables des mêmes résultats que la méthode qui en utilise quatre. Dans un premier temps, nous avons développé la méthode de rétro-visée à une caméra par mesures successives, basée la comparaison entre l'évolution de la luminance attendue et celle mesurée, lorsque le Soleil est réfléchi vers la caméra par l'héliostat en mode stationnaire. Cette méthode s'est avérée intéressante sur des images simulées, mais très sensible au bruit qui leur fut ensuite ajouté. La faiblesse de cette méthode réside dans le fait que le calcul des pentes de surface est local et que le moindre écart de luminance dû au bruit a des conséquences fortes sur le résultat. De plus la prise d'images successives, durant le balayage de la tache focale sur le plan cible, nécessite un protocole expérimental encore trop contraignant.

Nous avons ensuite envisagé une méthode à une caméra, dite de rétro-visée à une caméra par mesure unique, qui pour être moins sensible au bruit réalise les calculs de pentes en prenant en compte plusieurs points de mesure simultanément, au lieu d'un seul pour la méthode de rétro-visée à une caméra par mesures successives. Cette méthode qui reconstruit les pentes de surface à partir d'une seule image, a l'avantage de nécessiter un protocole expérimental relativement simple et peu contraignant. La méthode de rétro-visée à une caméra par mesure unique a été appliquée à des images simulées et a montré des résultats suffisamment pertinents pour envisager de reconstruire les erreurs de pentes de surface d'un héliostat réel. Cette étape a donc été réalisée et a permis de faire le bilan sur les sources d'erreur probables liées à la méthode expérimentale et au programme de post-traitement des données. Il en ressort que l'étude de la fonction de coût, dont l'influence sur les résultats de reconstruction est majeure, est primordiale pour parvenir à améliorer la robustesse de la méthode et à diminuer l'incertitude.

Les travaux effectués durant cette étude ont permis de simplifier la méthode expérimentale de rétro-visée et développer deux nouvelles façons d'aborder le calcul des pentes de surface d'un héliostat. A défaut de multiplier le nombre de caméras pour obtenir la pente locale à la surface des miroirs, il est possible de multiplier virtuellement ce nombre en laissant la tache focale défiler dans le plan de la caméra grâce au mouvement naturel du Soleil et à un héliostat en mode stationnaire. Il est également possible de conserver une seule caméra et de multiplier le nombre de points de mesure afin de reconstruire les pentes de surfaces par zones successives à partir d'une seule mesure. Nous avons donc entrevu les possibilités de reconstruction des pentes de surfaces optiques à partir de modèles basés sur des approches diverses. Cependant, le développement complet de la méthode de rétro-visée à une caméra de rétro-visée à une caméra par mesure unique nécessiterait de répondre aux problématiques soulevées par les tests expérimentaux. Dans le cadre de la méthode expérimentale, cela nécessite de disposer d'une vision en temps réelle de la caméra permettant de régler les problèmes d'alignements ou de focus. Modifier la cible mini-pégase ou les fixations des caméras permettrait aussi de placer les caméras dans un environnement plus stable, et d'éviter les contacts avec la cible métallique lorsque celle-ci se dilate à cause de la chaleur du rayonnement concentré. Dans le cadre du post-traitement des données expérimentales, cela nécessite d'améliorer notre connaissance de la réflectivité des héliostats afin d'être en mesure de la faire varier dans les calculs de reconstruction sans induire de biais sur les résultats de pentes de surface. Cela passe également par l'optimisation de la fonction de coût permettant de converger vers le résultat en diminuant les combinaisons de variables à tester, donc le nombre d'itérations à effectuer. L'introduction de l'incertitude sur l'orientation de l'héliostat durant le suivi solaire serait également pertinente, afin de prendre en compte un éventuel tilt dû au temps de latence entre deux rafraichissements de son suivi.

Les méthodes de rétro-visée se sont révélées pertinentes dans le cadre numérique et également expérimental. De ce fait, il est possible d'envisager leur adaptation et leur utilisation dans le cadre industriel. De plus, nécessitant des dispositifs ainsi que des protocoles expérimentaux relativement proches, et étant dans une certaine mesure complémentaires, ces méthodes pourraient potentiellement faire l'objet d'hybridations futures.

## Financement et remerciements

Ce projet a reçu un financement du programme de recherche et d'innovation European Union's Horizon 2020 au terme de l'accord de subvention No 727762, projet Next-CSP et a été supporté par le programme "Investissements d'Avenir" géré par l'Agence Nationale de Recherche (ANR) sous contrat ANR-10-LABX-22-01 (Labex SOLSTICE) et ANR-10-EQPX-49 (Equipex SOCRATE).

## Annexe A : Aberration optique : Tilt

Cette annexe expose en détail la nature du tilt, aberration optique qui est évoquée tout au long de ce manuscrit. La représentation de ce défaut sur un front d'onde vue de face, ainsi que sa dérivée sont montrées dans la FIGURE 0-1. Un tilt selon un axe correspond alors à une inclinaison du front d'onde autour de l'autre axe. Les valeurs de la dérivée (pentes) correspondent à un piston non nul selon  $X$  et nul selon  $Y$ .

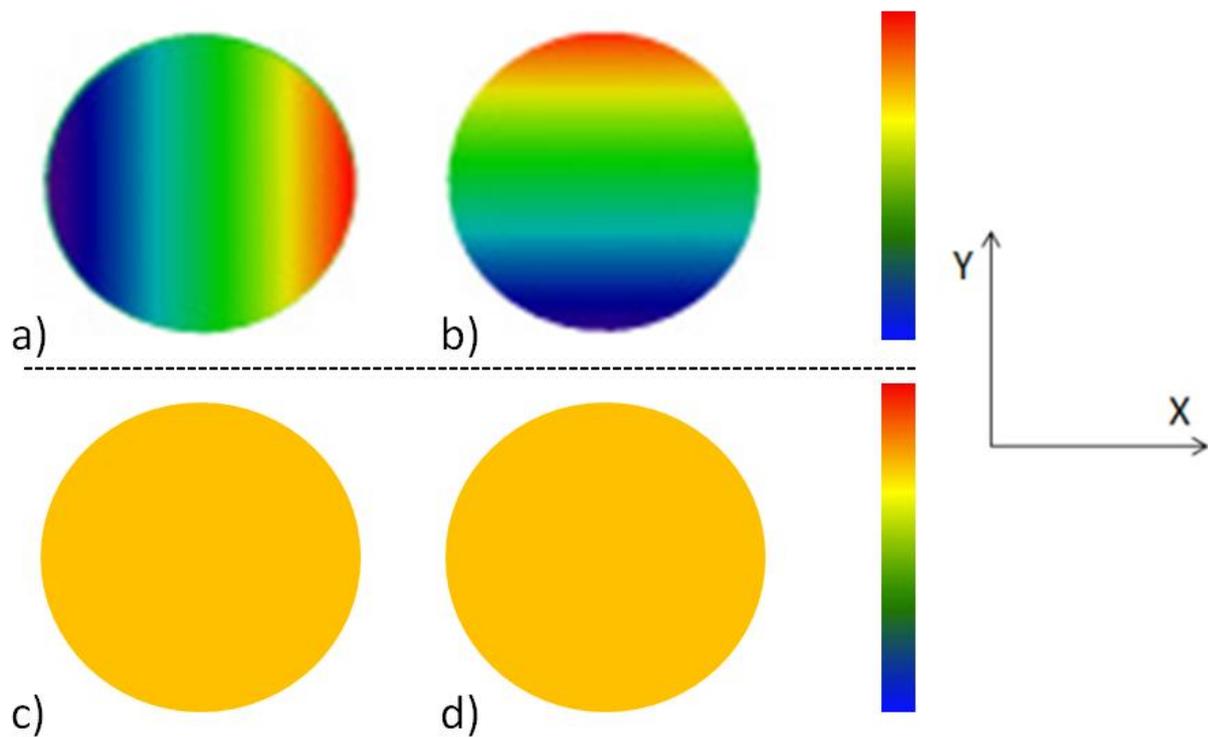


FIGURE 0-1 : Tilt selon  $X$  (a)), selon  $Y$  (b)), dérivée selon  $X$  (c) et dérivée selon  $Y$  (d)).

## Annexe B : Documentation de l'objectif et du modèle de caméra utilisés



Description	Données
	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Distance focale : 75 mm</li><li>▪ Cercle d'images maximal : 2/3"</li><li>▪ Plage d'ouverture (F) : 3.9-32</li><li>▪ Distance à l'objet minimale (M.O.D.) : 0,5 m</li><li>▪ Angle de vision (HxV) : 6,9° X 5,2°</li><li>▪ Tirage optique arrière : 27,12 mm</li><li>▪ Profondeur d'immersion : 4,0 mm</li></ul>

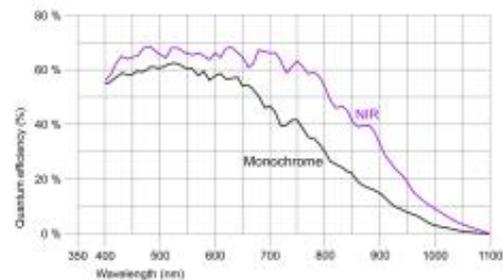
FIGURE 0-1 : Description de l'objectif fixé aux caméras pour l'observation de l'héliostat E06 de la centrale Thémis et du Soleil.



### Spécification

#### Capteur

Type de capteur	CMOS Monochrome
Mode d'obturation	Global / Rolling / Global Start
Caractéristique du capteur	Linéaire
Méthode de lecture du capteur	Progressive scan
Classe de pixels	SXGA
Résolution	1,31 Mpx
Résolution (h x v)	1280 x 1024 Pixel
Rapport hauteur/largeur	5:4
CAN	10 bit
Profondeur des couleurs (caméra)	12 bit
Classe de capteur optique	1/1,8"
Surface optique	6,784 mm x 5,427 mm
Diagonale du capteur optique	8,69 mm (1/1,84")
Taille de pixel	5,3 µm
Fabricant	e2v
Désignation du capteur	EV76C560ABT
Amplification (complet/RVB)	4x/-
AOI (zone d'intérêt) horizontale	Même fréquence d'image
AOI (zone d'intérêt) verticale	Augmente la fréquence d'image
AOI (zone d'intérêt) largeur d'image / pas	16 / 4
AOI (zone d'intérêt) hauteur d'image / pas	4 / 2
AOI (zone d'intérêt) trame de position (horizontale/verticale)	2 / 2
Compartimentage horizontal	Même fréquence d'image
Compartimentage vertical	Augmente la fréquence d'image
Méthode de Compartimentage	M/C automatique
Facteur de Compartimentage	2
Sous-échantillonnage horizontal	-
Sous-échantillonnage vertical	-
Méthode de sous-échantillonnage	-
Facteur de sous-échantillonnage	-



Sous réserve de modifications techniques (2017-06-05)

Page 1 sur 3

[www.ids-imaging.fr](http://www.ids-imaging.fr)

IDS Imaging Development Systems GmbH

Dimbacher Str. 6 - 8 · 74182 Obersulm · Allemagne · Tél +49 7134 96196-0 · Fax +49 7134 96196-99 · E-mail [info@ids-imaging.com](mailto:info@ids-imaging.com)

## UI-5240RE-M-GL PoE Rev.2

### Modèle

Plage de fréquence de pixel	7 MHz - 71 MHz
Fréquence d'image mode Freerun	50,0 fps
Fréquence d'image du déclencheur (maximale)	48,0 fps
Temps d'exposition (minimal - maximal)	0.009 ms - 2000 ms
Consommation	2,2 W - 2,9 W
Mémoire d'images	64 MB
Particularités	Mode ligne, Processeur de mise à l'échelle, Séquenceur, Mode logarithmique, Correction des pixels défectueux côté capteur, Trame d'exposition fine, AOI multiples

### Conditions ambiantes

Les valeurs de température indiquées ci-dessous se réfèrent à la température externe du boîtier de la caméra.

Température de l'appareil pendant le fonctionnement	0 °C - 55 °C / 32 °F - 131 °F
Température de l'appareil pendant le stockage	-20 °C - 60 °C / -4 °F - 140 °F
Humidité de l'air (relative, sans condensation)	0 % - 100 %

### Connexions

Port interfaces	GigE M12, vissable
Connexion E/S	Fiche Binder 8 pôles (série Binder 712 : 09-0427-020-08)
Alimentation en tension	12 V-24 V ou PoE

### Affectation des broches / connexion E/S

1	Entrée déclencheur, avec coupleur optoélectronique (+)
2	Entrée tension d'alimentation (VCC) 12-24 V DC
3	General Purpose I/O (GPIO) 1
4	Masse (GND)
5	Sortie flash, avec coupleur optoélectronique (+)
6	Sortie flash, avec coupleur optoélectronique (-)
7	Entrée déclencheur, avec coupleur optoélectronique (-)
8	General Purpose I/O (GPIO) 2



### Forme

Raccord de l'objectif	Monture C
Indice de protection	IP65/67
Dimensions H/W/L	41,0 mm x 53,0 mm x 39,7 mm
Poids	175 g

Sous réserve de modifications techniques (2017-06-05)

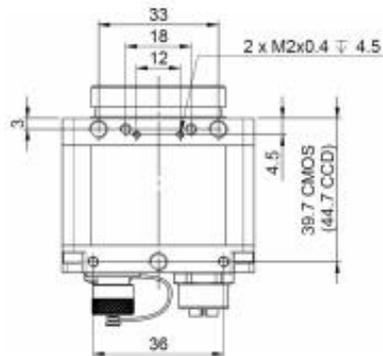
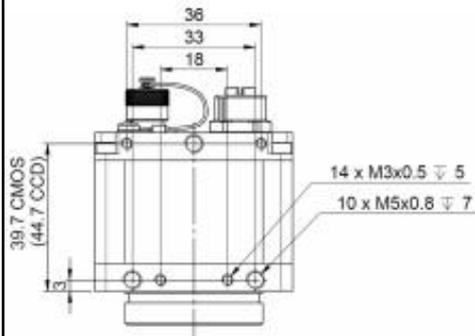
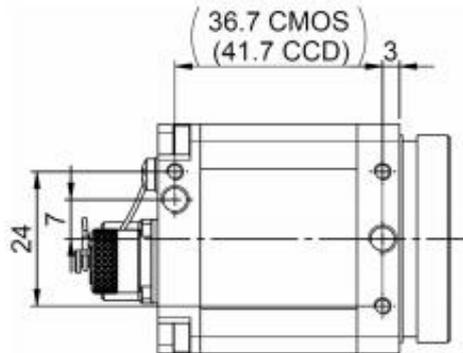
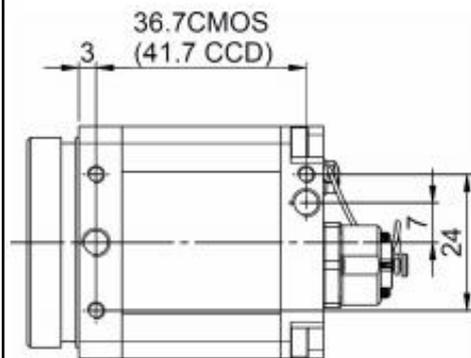
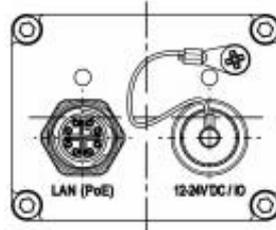
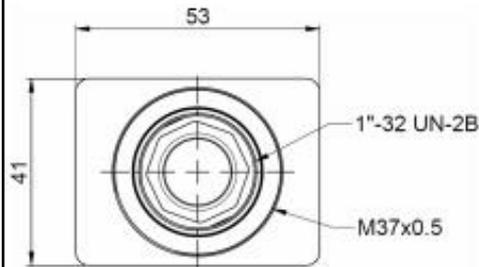
Page 2 sur 3

[www.ids-imaging.fr](http://www.ids-imaging.fr)

IDS Imaging Development Systems GmbH

Dimbacher Str. 6 - 8 · 74182 Obersulm · Allemagne · Tél +49 7134 96196-0 · Fax +49 7134 96196-99 · E-mail [info@ids-imaging.com](mailto:info@ids-imaging.com)

## UI-5240RE-M-GL PoE Rev.2



Sous réserve de modifications techniques (2017-06-05)

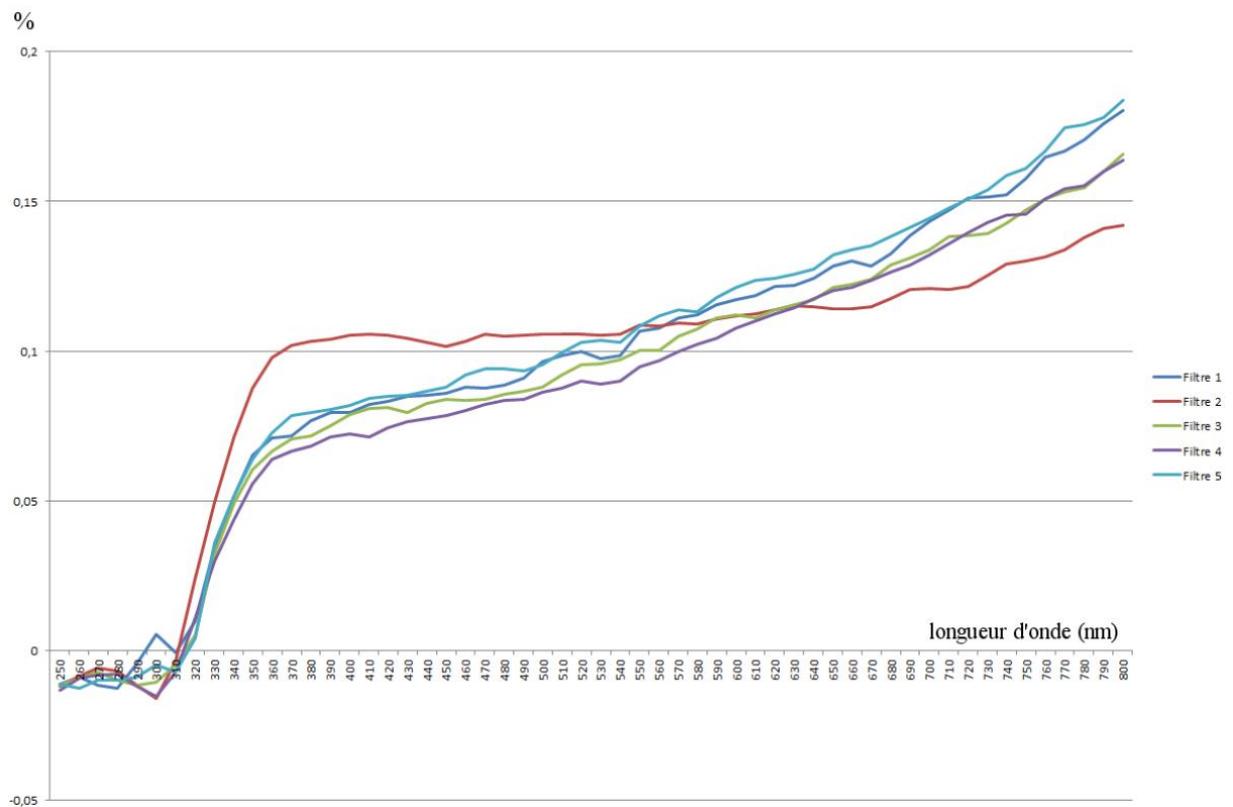
Page 3 sur 3

[www.ids-imaging.fr](http://www.ids-imaging.fr)

IDS Imaging Development Systems GmbH

Dimbacher Str. 6 - 8 · 74182 Obersulm · Allemagne · Tél +49 7134 96196-0 · Fax +49 7134 96196-99 · E-mail [info@ids-imaging.com](mailto:info@ids-imaging.com)

## Annexe C : Courbes de transmission des filtres réfléchissants



*Courbe de transmission des filtres optiques réfléchissants de densité 3, fixés aux objectifs des caméras pendant les mesures sur héliostat et sur Soleil. Courbes réalisées à l'étude à l'aide du spectromètre Perkin Elemer Lambda 900 du laboratoire PORMES.*

## Annexe D : Calculs vectoriels pour connaître l'orientation idéale de l'héliostat

Cette annexe explicite le raisonnement mathématique permettant de calculer le vecteur normal d'une surface optique à partir de la relation de Snell-Descartes (14). Celle-ci s'exprime de la façon suivante :

$$\vec{R}_{0(R_R)} = 2 \left( \vec{S}_{0(R_R)} \cdot \vec{N}_{0(R_R)} \right) \vec{N}_{0(R_R)} - \vec{S}_{0(R_R)} \quad (D1)$$

Il est ensuite possible de faire :

$$\begin{aligned} & (B1) \cdot \vec{S}_{0(R_R)} \\ \Leftrightarrow_{(a)} \vec{S}_{0(R_R)} \cdot \vec{R}_{0(R_R)} &= 2 \left( \vec{S}_{0(R_R)} \cdot \vec{N}_{0(R_R)} \right) \left( \vec{S}_{0(R_R)} \cdot \vec{N}_{0(R_R)} \right) - \left\| \vec{S}_{0(R_R)} \right\|^2 \\ \Leftrightarrow_{(b)} \vec{S}_{0(R_R)} \cdot \vec{R}_{0(R_R)} &= 2 \left( \vec{S}_{0(R_R)} \cdot \vec{N}_{0(R_R)} \right)^2 - 1 \\ \Leftrightarrow_{(c)} \vec{S}_{0(R_R)} \cdot \vec{N}_{0(R_R)} &= \sqrt{\frac{1 + \vec{S}_{0(R_R)} \cdot \vec{R}_{0(R_R)}}{2}} \end{aligned} \quad (D2)$$

Puis (D2) est injectée dans (D1), ce qui permet d'obtenir (D3) :

$$\begin{aligned} \vec{R}_{0(R_R)} &= 2 \left( \sqrt{\frac{1 + \vec{S}_{0(R_R)} \cdot \vec{R}_{0(R_R)}}{2}} \right) \vec{N}_{0(R_R)} - \vec{S}_{0(R_R)} \\ \Leftrightarrow_{(d)} \vec{N}_{0(R_R)} &= \frac{(\vec{S}_{0(R_R)} + \vec{R}_{0(R_R)})}{\sqrt{2 * (1 + (\vec{S}_{0(R_R)} \cdot \vec{R}_{0(R_R)}))}} \end{aligned} \quad (D3)$$

Ce qui permet de trouver les angles de l'héliostat :

$$A_H = \text{atan} \left( \frac{y_{N_0}}{x_{N_0}} \right) \text{ et } H_H = -\text{asin} \left( \frac{z_{N_0}}{\left\| \vec{N}_{0(R_R)} \right\|} \right) \quad (D4)$$

## Annexe E : Calculs des matrices de passage

Dans cette annexe, les calculs matriciels permettant d'obtenir les matrices de passage  $P_{R_H \rightarrow R_R}$  et  $P_{R_R \rightarrow R_S}(t)$  sont détaillés :

$$P_{R_H \rightarrow R_R} = \begin{bmatrix} \cos(A_H) & -\sin(A_H) & 0 \\ \sin(A_H) & \cos(A_H) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos(H_H) & 0 & \sin(H_H) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(H_H) & 0 & \cos(H_H) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos(A_H) * \cos(H_H) & -\sin(A_H) & \cos(A_H) * \sin(H_H) \\ \sin(A_H) * \cos(H_H) & \cos(A_H) & \sin(A_H) * \sin(H_H) \\ -\sin(H_H) & 0 & \cos(H_H) \end{bmatrix} \quad (E1)$$

$$P_{R_R \rightarrow R_S}(t) = \begin{bmatrix} \cos(H(t)) & 0 & -\sin(H(t)) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(H(t)) & 0 & \cos(H(t)) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos(A(t)) & \sin(A(t)) & 0 \\ -\sin(A(t)) & \cos(A(t)) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(A(t)) * \cos(H(t)) & \sin(A(t)) * \cos(H(t)) & -\sin(H(t)) \\ -\sin(A(t)) * (-1) & \cos(A(t)) * (-1) & 0 \\ \cos(A(t)) * \sin(H(t)) & \sin(A(t)) * \sin(H(t)) & \cos(H(t)) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(A(t)) * \cos(H(t)) & \sin(A(t)) * \cos(H(t)) & -\sin(H(t)) \\ \sin(A(t)) & -\cos(A(t)) & 0 \\ \cos(A(t)) * \sin(H(t)) & \sin(A(t)) * \sin(H(t)) & \cos(H(t)) \end{bmatrix} \quad (E2)$$

où les composantes  $P_{R_R \rightarrow R_S}(t)(2, j = 1, \dots, 3)$  sont multipliées par  $(-1)$  à cause du référentiel du Soleil ( $R_S$ ) non direct.

## Glossaire

Auto-collimation – Terme désignant une méthode de détermination du foyer d'une lentille. Dans cette étude, ce nom est attribué à la situation d'un héliostat, de caméras et du Soleil alignés le long de l'axe optique. Le parallèle avec le sens premier du terme est directement lié au fait que les caméras sont placées au foyer de l'héliostat.

Bruit de mesure (d'une caméra) – Signal parasite venant se superposer au signal utile mesuré par une caméra. Ce bruit est composé du bruit d'obscurité, du bruit photonique et du bruit de quantification.

Correction de champ plat – Correction appliquées aux images d'une caméra afin d'annuler les effets de la variation de sensibilité des pixels du détecteur ainsi que des éléments sur le chemin optique. Le phénomène le plus effectif est le vignettage et est dû à la présence de l'objectif.

Wave Front Error (WFE) – terme couramment utilisé pour désigner l'erreur de front d'onde. Le front d'onde correspond à une surface d'égale phase, ici d'une onde lumineuse. Ce concept est pratique pour décrire les perturbations que subissent les ondes en traversant des milieux. Dans le cas d'une onde lumineuse réfléchi par un miroir, le front d'onde réfléchi dépend notamment de la surface du miroir.

## Bibliographie

1. D. Meadows, J. Randers. Limits to Growth. The 30-Year Update. 2004.
2. T.P. Caudell, F.M. Smolka. Surface profile measurement and angular detection monitoring using a scanning laser beam: a noncontact method. *Appl. Opt.*, 17(20) :3284-3289, October 1978.
3. Wood RL Wendelin TJ, JorgensenGJ. Shot: a method for characterizing the surface figure and optical performance of point focus solar concentrators. *Solar engineering*. New York: American Society of Mechanical Engineers, pages 555-560, 1991.
4. J.K. Gruetzner, R.M. Houser, R.M. Edgar, S.A. Jones, D.R. Neal. Vshot: a tool for characterizing large, imprecise reflectors. SAND-96-2272C, pages 1-11, 1996.
5. Z. Lu, W. Yu H.Wu, J. Xiao, X. Wei. A review of available methods for surface shape measurement of solar concentrator in solar thermal power applications. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 16 :2539-2544, March 2012.
6. R. Gee, T. Wendelin, K. May. Video scanning hartmann optical testing of state-of-the-art parabolic trough concentrators. ASME 2006 International Solar Energy Conference, 2006.
7. R.M. Houser, R.M. Edgar, S.A. Jones, J.K. Gruetzner. Vshot measurement uncertainty and sensitivity study. Energy Conversion Engineering Conference, Proceedings of the 32nd Intersociety, 3 :1877-1882, 1997.
8. T. Wendelin, A. Gray, A. Lewandowski. Visual scanning hartmann optical tester (vshot) uncertainty analysis. Contract 303, pages 275-3000, 2010.
9. T.A. Moss, R.B. Diver. Practical field alignment of parabolic trough solar concentrators. *J. Sol. Energy Eng.*, 129 :153-159, May 2007.
10. J.K. Gruetzner, R.M. Houser, R.M. Edgar, S.A. Jones, D.R. Neal. Vshot: a tool for characterizing large, imprecise reflectors. SAND-96-2272C, pages 1-11, 1996.
11. Z. Lu, W. Yu, W. Xu, Z. Shen, L. Ren, X. Wei. A review of available methods for the alignment of mirror facets of solar concentrator in solar thermal power system. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 32 :76-83, 2014.
12. US Department of Energy. Tophat for the alignment & focus of heliostat mirror facets.
13. K. Pottler, E. Lüpfert, S. Ulmer, B. Heinz. Slope error measurements of parabolic troughs using the reflected image of the absorber tube. *J. Sol. Energy Eng.*, 131(011014) :1-5, February 2009.
14. C. Hilgert, S. Ulmer, M. Röger, C. Prah, B. Stanicki. Airborne shape measurement of parabolic trough collector fields. *Sol. Energy*, 91 :68-78, March 2013.
15. D. Brown, C. Fraser. Industrial photogrammetry: New developments and recent applications. *The Photogrammetric Record*, 12(68) :197-217, October 1986.
16. M. Shortis, G. Ganci. A comparison of the utility and efficiency of digital photogrammetry and industrial theodolite system. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 31 :182-187, 1996
17. G. Johnston, M. Shortis. Photogrammetry: an available surface characterization tool for solar concentrators, part i: measurements and surfaces. *ASME Journal of Solar Energy Engineering*, 118(3) :146-150, 1996.

18. G.H.G. Johnston, M.R. Shortis, K. Pottler, E. Lüpfert. Photogrammetry: A powerful tool for geometric analysis of solar concentrators and their components. *J. Sol. Energy Eng.*, 127 :94-101, February 2005.
19. S. Ulmer, M. Röger, C. Prah. Fast determination of heliostat shape and orientation by edge detection and photogrammetry. *Proceedings of the 14th SOLARPACES Symposium*, 2008.
20. M. Heizmann, S. Höffer. Deflectometry for the inspection of specular surfaces. 2011.
21. Emil Wolf Max Born. *Principle of Optics*. Pergamon Press, 1970.
22. H. Cho, H. Park, D. Hong. A two dimensional phase-shifting method for deflectometry. *Proceedings of SPIE*, 2008.
23. S. Kobayashi, M. Takeda, H. Ina. Fourier transform method of fringe reflection methods applied to dish concentrators. *J. Opt. Soc. Am.*, 72(1) :156-160, 1982.
24. S. Kobayashi, M. Takeda, H. Ina. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry. *J. Opt. Soc. Am.*, 72 :156-160, 1982.
25. C.E. Andraka, N.S. Finch. Uncertainty analysis and characterization of the sofast mirror facet characterization. *J. Sol. Energy Eng.*, 136(011003) :1-7, February 2014.
26. B. Myer, K. Trapeznikov, C. Liebner, C.E. Andraka, S. Sadlon. Rapid reflective facet characterization using fringe reflection techniques. *J. Sol. Energy Eng.*, 136(011002) :1-11, February 2014.
27. C. Prah, W. Reinalter, B. Belhomme, S. Ulmer, T. März. Automated high resolution measurement of heliostat slope errors. *Sol. Energy*, 85 :681-687, February 2011.
28. R. Rodriguez, J.-L. Sans, E. Guillot, N. Boullet. Presentation of the third generation control system of the 63 heliostats field of the 1000 kw big solar furnace in odeillo. *SOLARPACES*, 2014.
29. Rauscher. Prosilica gc750 solar power plant uses gige cameras for mirror alignment. Technical report, Rauscher, 2009.
30. D. Wasyluk, C. Tyner. esolar's modular, scalable molten salt power tower reference plant design. *Energy Procedia*, 49 :1563-1572, 2014.
31. A. Yogev, T. Rubinov, A. Kribus, I. Vishnevetsky. Closed loop control of heliostats. *Energy*, 29 :905-913, 2004.
32. D. Malacara. *Optical Shop Testing*. Wiley-Interscience, 2007.
33. D. Malacara-Doblado, D. Malacara-Hernandez. What is a hartmann test ? *Appl. Opt.*, 54(9) :2296-2301, March 2015.
34. R. Ragazzoni. Pupil plane wavefront sensing with an oscillating prism. *J. Mod. Opt.*, 43(2) :289-293, 1996.
35. L. Manojlovic. Quadrant photodetector sensitivity. *Appl. Opt.*, 50(20) :3461-3469, July 2011.
36. R.G. Lane, T.Y. Chew, R.M. Clare. A comparison of the shack-hartmann and pyramid wavefront sensors. *Opt. Commun.*, 268 :189-195, 2006.
37. A. Valverde, F. Arqueros, A. Jimenez. A novel procedure for the optical characterization of solar concentrators. *Sol. Energy*, 75 :135-142, 2003.
38. C. Royère, F. Hénault. Concentration du rayonnement solaire : Analyse et évaluation des réponses impulsionnelles et des défauts de réglage de facettes réfléchissantes. *J. Optics*, 20(5) :225-240, 1989.
39. C.A. Arancibia-Bulnes, M.I. Peña-Cruz, A. Mutuberría, R. Díaz-Urbe, M. Sánchez-González. A survey of methods for the evaluation of reflective solar concentrator optics. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 69, 673–684, 2017.
40. A. Camilo, C.A. Arancibia-Bulnes, M. I. Peña-Cruz, A. Mutuberría, R. Díaz-Urbe, M. Sánchez-González. A survey of methods for the evaluation of reflective solar concentrator optics, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, p. 673-684, ISSN 1364-0321, 2017.

41. F. Hénault. Concentration du rayonnement solaire par simple et double réflexion : Contribution aux méthodes de réglage et de contrôle des surfaces réfléchrices à facettes. PhD thesis, Université Paris XI Orsay, 1987.
42. F. Henault, C. Caliot. Facility for concentrating cosmic radiation equipped with a reflective optical surface control system, WO2015144699, 2014.
43. F. Henault, C. Royere. Concentration du rayonnement solaire : analyse et évaluation des défauts de réglage de facettes réfléchissantes. *Revue de Physique Appliquée*, 24 (5), pp.563-576, 1989.
44. M. Coquand, F. Hénault, C. Caliot. Backward-gazing method for measuring solar concentrators shape errors. *Appl. Opt.* 56, 2029–2037, 2017.
45. M. Coquand, C. Caliot, F. Hénault. Tracking and shape errors measurement of concentrating heliostats. *Proc. of SPIE vol. 10379 103790N-1*, 2017.
46. M. Coquand, F. Hénault, C. Caliot. Numerical identification of mirror shapes with the backward-gazing method using an actual solar profile. *AIP Conference Proceedings, SolarPACES 2017, 2033, 040010*, 2018.
47. F. Hénault. COSAC : un logiciel de calculs optiques version 2.9.7., 2019.
48. P. Jose, "The flux through the focal spot of a solar furnace," *Solar Energy* vol. 1, p. 19-22, 1957.
49. J.A. Nelder, R. Mead. "A simplex method for function minimization", *Comput. J.*, 7, pp. 308–313, 1965.
50. P.-H. Defieux, C. Caliot, F. Hénault. Hybrid optical method for characterizing a heliostat field in a concentrated solar power plant. *AIP Conference Proceedings 2303, 100002, SolarPACES 2019, 2020*.
51. A. Andreas, I. Reda. Nrel's solar position algorithm (spa), 2003.
52. I. Reda, A. Andreas. Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications. 55 pp. NREL Report No. TP-560-34302, Revised January 2008, 2003.
53. M. Coquand. Méthode de rétrovisée pour la caractérisation de surfaces optiques dans une installation solaire à concentration. PhD thesis, Université de Perpignan Via Domitia, 2017.
54. F. Hénault, C. Caliot. Installation concentratrice de rayonnement cosmique équipée d'un système de contrôle de surface optique réfléchissante, 2014.
55. A. Valverde, F. Arqueros, A. Jimenez. A novel procedure for the optical characterization of solar concentrators. *Sol. Energy*, 75 :135-142, 2003.
56. L. Manojlovic. Quadrant photodetector sensitivity. *Appl. Opt.*, 50(20) :3461-3469, July 2011.
57. Next-CSP: High temperature concentrated solar thermal power plant with particle receiver and direct thermal storage, 2016.
58. F. Hénault, C. Caliot, M. Coquand, P.-H. Defieux, and E. Guillot. Sun backward gazing method with four cameras: experimental results. *Applied Optics*, vol.59, issue 31, pp. 9861-9877, 2020.
59. F. Roddier, C. Roddier. "Wavefront reconstruction using iterative Fourier transforms," *Applied Optics*. vol. 30, p 1325-1327, 1991.
60. F. Hénault, M. Coquand, P.-H. Defieux, C. Caliot. Sun backward gazing method with multiple cameras for characterizing solar concentrators. *Solar Energy*, vol. 166, p.103-114, 15 May 2018.
61. M. Collins, D. Potter, A. Burton. "Design and simulation of a sensor for heliostat field closed loop control," *AIP Conference Proceedings vol. 1850, n° 030009*, 2017.
62. J.J. Beziau, B. Bonduelle. Themis Heliostat Field. In: J. Gretz, A. Strub, W. Palz (eds) *Thermo-Mechanical Solar Power Plants. Solar Energy R&D in the European Community*, vol 2. Springer, Dordrecht, 1985.

63. A.-T. Nguyen, S. Reiter, P. Rigo. "A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis", *Applied Energy*, vol. 113, p. 1043-1058, 2014.
64. P. Schramek, D. R. Mills, W. Stein, P. Le Lièvre. « Design of the Heliostat Field of the CSIRO Solar Tower", *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 131(2), 024505, 2009.
65. C. R. Vogel, M. E. Oman. "Iterative Methods for Total Variation Denoising. *SIAM Journal on Scientific Computing*", 17(1), 227–238, 1996.
66. P. D. Jose. "The flux through the focal spot of a solar furnace", vol. 1, issue 4, p. 19 –22, 1957.

## Résumé

Afin de favoriser la transition énergétique et d'assurer la production d'énergie actuelle et future, la technologie des centrales solaires thermodynamiques figure parmi les plus intéressantes. La mise en place et la maintenance de tels dispositifs nécessite d'être en mesure de caractériser, de calibrer et de régler les éléments optiques permettant la collection et la concentration du flux solaire direct. Cette étude traite tout particulièrement des héliostats de centrales à tour, dont le bon fonctionnement dépend de son suivi solaire correct, de l'alignement de ces miroirs ainsi que de leur courbure. Ce manuscrit propose une étude concernant des méthodes dites de « rétro-visée » permettant de détecter les défauts de pentes de surface des héliostats. L'étude concerne tout d'abord l'optimisation numérique puis expérimentale d'une méthode utilisant quatre caméras, et dont le développement a été effectué à partir de travaux antérieurs. Le principe de cette méthode repose sur la connaissance du profil de luminance du Soleil, associé à l'observation de l'héliostat depuis quatre points de vue. L'étude porte ensuite sur le développement et l'étude de deux méthodes de rétro-visée n'utilisant qu'une seule caméra. Les principes de ces méthodes sont également basés sur la connaissance du profil de luminance solaire, mais différent dans la façon de reconstruire les pentes de surface. A défaut d'observer l'héliostat depuis plus points de vue, la première des deux nouvelles méthodes utilise le mouvement naturel du Soleil pour multiplier virtuellement les points de vue, tandis que la seconde utilise la multiplication des points de mesures à la surface de l'héliostat. La seconde méthode de rétro-visée à une caméra est ensuite appliquée à des images expérimentales, réalisées durant les campagnes de mesures. Les sources d'erreur sont identifiées et les améliorations à apporter sont proposées à la fin de ce manuscrit, dans la perspective d'un développement à l'échelle industrielle.

## Abstract:

In order to promote the energy transition and ensure current and future energy production, the technology of thermodynamic solar power plants is among the most interesting. The installation and maintenance of such devices require being able to characterize, calibrate and adjust the optical elements allowing the collection and concentration of direct solar flux. This study concerns more especially the heliostats of tower power plants, whose proper functioning depends on their correct solar tracking, the alignment of these mirrors and their curvature. This manuscript proposes a study concerning so-called "backward-gazing" methods allowing the detection of surface slope defects of heliostats. First of all, the study concerns the numerical and then experimental optimization of a method using four cameras, for which the development was carried out from previous work. The principle of this method is based on knowing the brightness profile of the Sun, associated with the observation of the heliostat from four points of view. The study then turns to the development and study of two backward-gazing methods using only one camera. The principles of these methods are also based on the knowledge of the solar brightness profile, but differ in the way of reconstructing the surface slopes. Rather than observe the heliostat from multiple points of view, the first of the two new methods uses the natural movement of the Sun to virtually multiply the points of view, while the second uses the multiplication of the measurement points on the surface of the heliostat. The second backward-gazing method with one camera is then applied to experimental data, obtained during the measurement campaigns. The sources of error are identified and the

improvements to be made are proposed at the end of this manuscript, in the perspective of an industrial scale development.

