



Université du Québec  
à Rimouski

**CONCEPTION MÉCANIQUE ET PROGRAMMATION D'UN SYSTÈME DE  
CAPTATION ET DE TRANSPORT D'ÉNERGIE SOLAIRE CONCENTRÉE PAR  
FIBRES OPTIQUES**

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en ingénierie

en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences appliquées (M.Sc.A.)

PAR

© **GABRIEL DUGAS**

**Décembre 2018**



**Composition du jury :**

**Abderrazak El Ouafi, président du jury, Université du Québec à Rimouski**

**Ahmed Chebak, directeur de recherche, Université du Québec à Rimouski**

**Younès Messaddeq, codirecteur de recherche, Université Laval**

**Mathieu Picard, examinateur externe, Université de Sherbrooke**

Dépôt initial le 09/09/2018

Dépôt final le 21/12/2018



# UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI

Service de la bibliothèque

## Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.



## ***REMERCIEMENTS***

Je tiens à remercier les professeurs Ahmed Chebak et Younès Messaddeq pour la direction, les conseils, le support, l'accès au financement et la confiance accordée pour la réussite de ce projet. Je tiens à remercier également Richard Lafrance et Steeve Morency pour leur aide en fabrication mécanique et leurs critiques constructives pour la conception du système. S'ajoute à la liste Elton Soares et Stepan Gorgutsa, pour leur collaboration dans différentes étapes du projet lors de leurs études postdoctorales, Simon Thibault ainsi que Denis Brousseau pour la conception optique du système.

Je tiens aussi à remercier les collègues du bureau de maîtrise pour les bons moments passés, Dominique Lafontaine, David Delaunay, Pierre-Olivier Morisset, Damien Gourgue, Guillaume Billaud, Roxanne Brion-Roby, Younès Echerfaoui, Alexandre Dionne, Alexandre Guibs, Jihed Ben Tahar et Bruno Tremblay.

Finalement, je tiens à souligner l'appui et le support de ma famille, Judith, Pierre-Paul, Caroline, Ève et Érica et de ma copine, Isabelle, qui m'a apporté une aide énorme lors de la rédaction du mémoire.



## *RÉSUMÉ*

Ce mémoire présente la conception et la réalisation de la partie électromécanique d'un système de captation et de transport par fibres optiques d'énergie solaire extrêmement concentrée. Le but de la recherche est de trouver la bonne configuration mécanique du système en plus d'une stratégie de suivi solaire de précision.

Tout d'abord, la conception et la fabrication d'un système simple et robuste accueillant trois collecteurs solaires paraboliques munis de câbles de fibres optiques sont réalisées. Différents critères ont été inclus dans le processus de conception, incluant des déflexions et des jeux mécaniques minimaux, une fabrication boulonnée permettant un transport compact et un assemblage rapide et finalement, un niveau d'ajustement suffisant pour assurer la collimation des composants optiques. La méthode de conception assistée par ordinateur jointe à la méthode d'analyse par éléments finis ont permis de concevoir et d'évaluer le comportement de la structure avant sa fabrication. Un outil de collimation avec trois lasers a été fabriqué, calibré et utilisé pour vérifier les performances désirées du système mécano-optique développé.

En ce qui concerne le suivi solaire de précision, les méthodes par boucle ouverte et fermée ont été étudiées et considérées. La première méthode peut être très précise en utilisant des algorithmes astronomiques, mais la mécanique et l'ajustement initial du système limite généralement les résultats. Par contre, la deuxième méthode en boucle fermée est très précise lors des journées sans nuage, mais perd son orientation rapidement lors des dégradations météorologiques. Un algorithme de poursuite solaire hybride se basant sur les deux méthodes a alors été développé, combinant la précision de la méthode de calcul du NREL (National Renewable Energy Laboratory) avec la rétroaction d'un capteur de position solaire permettant la correction de l'erreur. Une précision absolue sous les  $0,025^\circ$  a été atteinte.

Finalement, différents câbles solaires ont été testés en utilisant le système développé. La dernière itération du câble a une efficacité de transmission de 47% avec 80W de puissance à la sortie et 5800x de concentration optique à l'entrée. Un four à convection thermique avec stockage dans un bain de sel solaire fondu a été testé comme application en l'alimentant par le câble solaire. Des résultats préliminaires intéressants ont été obtenus montrant que la température du bassin de sel a atteint  $100^\circ\text{C}$ , alors que l'air en circulation a atteint  $60^\circ\text{C}$ .

*Mots clés* : Énergie solaire concentrée, Guide d'ondes solaire, Fibres optiques, Poursuite solaire, Contrôle hybride, Énergie renouvelable.



## *ABSTRACT*

This thesis presents the design and implementation of the electromechanical part of a highly concentrated solar energy capture and transport system. The purpose of the research is to find the correct mechanical configuration of the system in addition to a precision solar tracking strategy.

First, the design and manufacture of a simple and robust system hosting three parabolic solar collectors equipped with fiber optic cables are realized. Various criteria were included in the design process, such as minimal deflections and mechanical backlashes, a bolted manufacture allowing compact transport and fast assembly and finally, a level of adjustment sufficient to ensure the collimation of all optical components. The computer-assisted design method combined with the finite element analysis method made it possible to design and evaluate the behavior of the structure before its fabrication. A collimation tool with three lasers has been built, calibrated and used to verify the desired performance of the developed opto-mechanical system.

In regards to precision solar tracking, open and closed loop methods have been studied and considered. The first method can be very accurate using astronomical algorithms, but the mechanics and initial adjustments of the system usually limits the results. On the other hand, the closed-loop method is very precise during cloudless days, but loses its orientation quickly during weather degradations. A hybrid solar tracking algorithm based on both methods was then developed, combining the precision of the National Renewable Energy Laboratory (NREL) calculation method with the feedback of a solar position sensor to correct the error. An absolute precision below  $0,025^\circ$  has been reached.

Finally, different solar cables were tested using the developed system. The last iteration of the cable has a transmission efficiency of 47% with 80W of power at the output and 5800x of optical concentration at the input. A thermal convection oven with storage in a molten solar salt bath, feeded by the solar cable, was tested. Interesting preliminary results have been obtained in that the temperature of the salt tank has reached  $100^\circ\text{C}$ , while the circulating air has reached  $60^\circ\text{C}$ .

*Keywords* : Concentrated solar energy, Solar wave guide, Optical fiber, Solar Tracking, Hybrid control, Renewable energy



## *TABLE DES MATIÈRES*

REMERCIEMENTS . . . . .	vii
RÉSUMÉ . . . . .	ix
ABSTRACT . . . . .	xi
TABLE DES MATIÈRES . . . . .	xiii
LISTE DES TABLEAUX . . . . .	xv
LISTE DES FIGURES . . . . .	xvii
LISTE DES ABRÉVIATIONS . . . . .	xxi
LISTE DES SYMBOLES . . . . .	xxiii
INTRODUCTION GÉNÉRALE . . . . .	1
Mise en contexte . . . . .	2
Problématique . . . . .	7
Objectifs . . . . .	8
Méthodologie . . . . .	9
Organisation du mémoire . . . . .	10
CHAPITRE 1	
GÉNÉRALITÉ SUR L'ÉNERGIE SOLAIRE ET LES SYSTÈMES DE CAPTATION MODERNES . . . . .	11
1.1 Introduction . . . . .	11
1.2 Énergie solaire . . . . .	12
1.3 Projets existants de transmission d'énergie solaire . . . . .	14
1.4 Configuration mécanique des systèmes CSP . . . . .	17
1.5 Algorithme de suivi solaire . . . . .	21
1.6 Solutions commerciales existantes de suivi solaire . . . . .	23
1.7 Conclusion . . . . .	25
CHAPITRE 2	
CONCEPTION ET FABRICATION DU COLLECTEUR SOLAIRE . . . . .	27
2.1 Introduction . . . . .	27

2.2	Conception du collecteur solaire <i>ECOsend</i> . . . . .	27
2.2.1	Conception des concentrateurs solaires . . . . .	31
2.2.2	Conception du système de poursuite solaire . . . . .	38
2.2.3	Conception du cadre de support et de la base . . . . .	40
2.3	Dimensionnement du système <i>ECOsend</i> . . . . .	42
2.4	Fabrication, assemblage et mise en marche du système <i>ECOsend</i> . . . . .	48
2.5	Conclusion . . . . .	51
CHAPITRE 3		
ALGORITHME DE POURSUITE SOLAIRE . . . . .		53
3.1	Introduction . . . . .	53
3.2	Importance du suivi solaire de haute précision . . . . .	53
3.3	Sélection de l’algorithme de poursuite solaire . . . . .	57
3.4	Implantation de l’algorithme de poursuite solaire . . . . .	60
3.5	Résultats expérimentaux et analyse . . . . .	64
3.6	Conclusion . . . . .	69
CHAPITRE 4		
PERFORMANCES DU CÂBLE SOLAIRE ET APPLICATION DE FOUR SOLAIRE		73
4.1	Introduction . . . . .	73
4.2	Performances du câble solaire . . . . .	73
4.3	Application de four solaire . . . . .	75
4.4	Conclusion . . . . .	78
CONCLUSION GÉNÉRALE . . . . .		79
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES . . . . .		83
ANNEXE I		
FICHE TECHNIQUE DE <i>DUAL-AXIS SLEW DRIVE WDE3</i> DE LA COMPAGNIE <i>H-FANG</i> . . . . .		87
ANNEXE II		
FICHE TECHNIQUE DU CAPTEUR SOLAIRE ISSTX . . . . .		89
ANNEXE III		
RÉSULTATS BRUTS ET TRAITÉS DES ESSAIS DE POURSUITE SOLAIRE . . . . .		93

## *LISTE DES TABLEAUX*

1	Matrice de Pugh pour la sélection du type de pivot . . . . .	21
2	Données nécessaires au calcul des efforts mécaniques . . . . .	43
3	Déviatiion de la moyenne des erreurs . . . . .	68



## *LISTE DES FIGURES*

1	Irradiation normale directe annuelle et journalière . . . . .	3
2	Répartition des climats arides . . . . .	4
3	Démonstration d'impression 3D par énergie solaire concentrée . . . . .	5
4	ECOsendis lors de la première journée d'essais . . . . .	6
5	Croissance de la puissance mondiale de l'énergie photovoltaïque installée . .	11
6	Distribution <i>AM0</i> , <i>AM1.5</i> globale et <i>AM1.5</i> directe . . . . .	13
7	Position solaire au-dessus du <i>COPL</i> pour l'année 2018 . . . . .	14
8	Configuration <i>Alt-Az</i> et Équatoriale . . . . .	18
9	Comparaison des trois types de configurations principales pour la poursuite solaire à deux axes . . . . .	19
10	<i>Dual-axis slew drive</i> de la compagnie <i>H-Fang</i> . . . . .	19
11	Esquisse <i>SolidWorks</i> utilisée comme référence pour la conception d' <i>ECOsendis</i>	30
12	Simulation avec <i>GuiPlop</i> de la déformation du miroir sous l'effet de la gra- vité, en position horizontale et supporté par 18 points d'appui . . . . .	33
13	Encastrement des bascules pour la cellule de 18 points d'appui . . . . .	34
14	Zone de jonction et d'ajustement de la cellule du primaire sur le télescope . .	35
15	Vue arrière de la cellule du miroir primaire . . . . .	36
16	Vue isométrique du support du miroir secondaire . . . . .	37
17	Vue isométrique d'un télescope . . . . .	38
18	Cadre de soutien des concentrateurs solaires . . . . .	41
19	Déflexion du cadre de support calculée par la <i>MEF</i> . . . . .	47
20	Début de l'assemblage des concentrateurs solaires . . . . .	48
21	Assemblage final d' <i>ECOsendis</i> avant le transport vers le <i>COPL</i> pour son ins- tallation . . . . .	49

22	<i>ECO</i> sends en fonction lors de l'automne 2017 . . . . .	50
23	Image du soleil sur l'entrée du câble solaire : bon positionnement en A et mauvais positionnement en B . . . . .	54
24	Nombre de fibres optiques en fonction de l'erreur angulaire de poursuite solaire	56
25	Poursuite solaire par échelon, guide d'utilisateur <i>CEXIO</i> de <i>Siemens</i> . . . . .	58
26	Organigramme simplifié de l'algorithme de poursuite solaire hybride en élévation . . . . .	63
27	Erreur de poursuite solaire obtenue en azimut et en zénith avec l'algorithme en boucle ouverte programmé avec une erreur acceptable de $\pm 0,02^\circ$ . . . . .	66
28	Erreur de poursuite solaire obtenue en azimut et en zénith avec l'algorithme hybride programmé avec une erreur acceptable de $\pm 0,02^\circ$ (sans traitement des données) . . . . .	67
29	Erreur de poursuite solaire obtenue en azimut avec l'algorithme hybride et programmé avec une erreur acceptable de $\pm 0,02^\circ$ (avec données centrées en ordonnée) . . . . .	69
30	Erreur de poursuite solaire obtenue en zénith avec l'algorithme hybride programmé avec une erreur acceptable de $\pm 0,02^\circ$ (avec données centrées en ordonnée) . . . . .	70
31	Erreur de poursuite solaire réelle obtenue avec l'algorithme hybride programmé à $\pm 0,02^\circ$ . . . . .	71
32	Erreur de poursuite solaire obtenue en azimut avec l'algorithme hybride programmé avec une erreur acceptable de $\pm 0,01^\circ$ (avec données centrées en ordonnée) . . . . .	72
33	Câble solaire de dernière génération en fonction lors de l'automne 2017 . . . . .	75
34	Déshydrateur solaire en fonction lors des essais de l'automne 2017 . . . . .	76
35	Température du bassin de sel en fonction du temps avec une alimentation de 70W . . . . .	77
36	Erreur de poursuite solaire obtenue en azimut et en zénith avec l'algorithme hybride programmé avec une erreur acceptable de $\pm 0,5^\circ$ (sans traitement des données) . . . . .	93

37	Erreur de poursuite solaire réelle obtenue avec l'algorithme hybride programmé à $\pm 0,5^\circ$ . . . . .	94
38	Erreur de poursuite solaire obtenue en azimut et en zénith avec l'algorithme hybride programmé avec une erreur acceptable de $\pm 0,25^\circ$ (sans traitement des données) . . . . .	95
39	Erreur de poursuite solaire réelle obtenue avec l'algorithme hybride programmé à $\pm 0,25^\circ$ . . . . .	96
40	Erreur de poursuite solaire obtenue en azimut et en zénith avec l'algorithme hybride programmé avec une erreur acceptable de $\pm 0,125^\circ$ (sans traitement des données) . . . . .	97
41	Erreur de poursuite solaire réelle obtenue avec l'algorithme hybride programmé à $\pm 0,125^\circ$ . . . . .	98
42	Erreur de poursuite solaire obtenue en azimut et en zénith avec l'algorithme hybride programmé avec une erreur acceptable de $\pm 0,025^\circ$ (sans traitement des données) . . . . .	99
43	Erreur de poursuite solaire réelle obtenue avec l'algorithme hybride programmé à $\pm 0,025^\circ$ . . . . .	100
44	Erreur de poursuite solaire obtenue en azimut et en zénith avec l'algorithme hybride programmé avec une erreur acceptable de $\pm 0,0125^\circ$ (sans traitement des données) . . . . .	101
45	Erreur de poursuite solaire réelle obtenue avec l'algorithme hybride programmé à $\pm 0,0125^\circ$ . . . . .	102
46	Erreur de poursuite solaire obtenue en azimut et en zénith avec l'algorithme hybride programmé avec une erreur acceptable de $\pm 0,01^\circ$ (sans traitement des données) . . . . .	103
47	Erreur de poursuite solaire réelle obtenue avec l'algorithme hybride programmé à $\pm 0,01^\circ$ . . . . .	104
48	Erreur de poursuite solaire obtenue en azimut et en zénith avec l'algorithme hybride programmé avec une erreur acceptable de $\pm 0,005^\circ$ (sans traitement des données) . . . . .	105
49	Erreur de poursuite solaire réelle obtenue avec l'algorithme hybride programmé à $\pm 0,005^\circ$ . . . . .	106



## *LISTE DES ABRÉVIATIONS*

<b>AM</b>	Air-Masse
<b>CAO</b>	Conception Assistée par Ordinateur
<b>CFD</b>	Computational Fluid Dynamics
<b>CERCP</b>	Chaire d'Excellence en Recherche du Canada sur l'Innovation en Photonique
<b>COPL</b>	Centre d'Optique, Photonique et Laser
<b>DNI</b>	Direct Normal Irradiation
<b>ECOsends</b>	Extremely COncentrated Solar ENergy Delivery System
<b>FPGA</b>	Field Programable Gate Arrays
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>HSC</b>	High Speed Counter
<b>HMI</b>	Human Machine Interface
<b>LRIO</b>	Laboratoire de Recherche en Ingénierie Optique
<b>MEF</b>	Méthode des Éléments Finis
<b>NREL</b>	National Renewable Energy Laboratory
<b>NRELSPA</b>	National Renewable Energy Laboratory Solar Position Algorithm
<b>NTP</b>	Network Time Protocol
<b>PWM</b>	Pulse Width Modulation
<b>SPA</b>	Solar Position Algorithm

**PAC** Programmable Automation Controller

**PLC** Programmable Logic Controller

**UQAR** Université du Québec à Rimouski

**UTC** Temps Universel Coordonné

## *LISTE DES SYMBOLES*

<b>A</b>	Surface de la plateforme solaire normale au vent
<b>C<sub>D</sub></b>	Coefficient de traînée d'une parabole
<b>D</b>	Force de traînée due au vent
<b>D<sub>CG-BT</sub></b>	Distance entre le centre de gravité de la plateforme et la base de la transmission dans l'axe Z lorsque la plateforme pointe à l'horizon. L'axe Z pointe au zénith en tout temps.
<b>D<sub>CG-Y</sub></b>	Distance entre le centre de gravité de la plateforme et le point de pivot d'élévation de la transmission dans l'axe Y lorsque la plateforme pointe au zénith. L'axe Z pointe au zénith en tout temps.
<b>D<sub>CG-Z</sub></b>	Distance entre le centre de gravité de la plateforme et le point de pivot d'élévation de la transmission dans l'axe Z lorsque la plateforme pointe au zénith. L'axe Z pointe au zénith en tout temps.
<b>G<sub>sc</sub></b>	Constante solaire
<b>H<sub>support</sub></b>	Hauteur du support
<b>L<sub>plateforme</sub></b>	Épaisseur de la plateforme
<b>L<sub>qped</sub></b>	Empreinte au sol du quadripied de support
<b>M<sub>totale</sub></b>	Masse totale du système
<b>M<sub>suspendu</sub></b>	Masse totale supportée par la transmission
<b>r</b>	Rayon de l'image du soleil
<b>R</b>	Rayon du câble solaire
<b>Re</b>	Nombre de Reynolds
<b>S</b>	Surface du câble solaire

<b>T</b>	Couple appliqué sur différentes parties de la structure
<b>V<sub>critique</sub></b>	Vitesse du vent en condition critique
<b>V<sub>opération</sub></b>	Vitesse du vent en condition d'opération
<b>V<sub>solmax</sub></b>	Vitesse de mouvement du soleil attendu, équivalent à la vitesse de rotation de la terre
<b>V<sub>solmin</sub></b>	Vitesse de mouvement minimal du soleil au zénith
<b><math>\Delta_{ISSDX}</math></b>	Différence mesurée par le capteur entre l'angle du vecteur solaire et celui du système de la plateforme de suivi.
<b><math>\Delta_{max}</math></b>	Erreur maximale de poursuite solaire
<b><math>\Delta_{\theta}</math></b>	Différence entre l'angle du vecteur solaire et celui de la plateforme de poursuite solaire
<b><math>\theta_{max}</math></b>	Erreur angulaire maximale de poursuite solaire
<b><math>\theta_{plat}</math></b>	Angle du vecteur du système de poursuite solaire projeté en élévation
<b><math>\theta_{sol}</math></b>	Angle du vecteur solaire projeté en zénith
<b><math>\mu</math></b>	Viscosité dynamique de l'air
<b><math>\rho</math></b>	Densité de l'air
<b><math>\ni</math></b>	Erreur acceptable dans la stratégie de poursuite par échelons

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

À ce jour, la majorité des activités humaines est centrée sur des procédés nécessitant un apport en énergie. Cette contribution énergétique a lieu généralement durant l'utilisation ou la fabrication d'un produit. Nous pouvons penser, par exemple, aux maisons modernes. Elles ont un coût énergétique d'utilisation en plus d'avoir un coût initial pour leur fabrication. Au Canada, la consommation moyenne d'électricité par habitant est d'environ 16 000 *kWh* et au Québec, elle grimpe à plus de 25 000 *kWh* par année ([Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles 2014](#)). C'est cette maîtrise de l'utilisation de l'énergie qui permet aux humains de jouir d'un niveau de confort supérieur aux générations précédentes.

Différentes problématiques dans nos sociétés sont liées à cette dépendance à l'énergie. Les changements climatiques, par exemple, sont largement dus à l'augmentation des émissions des gaz à effet de serre ([IPCC 2013](#)). Ces derniers sont libérés, entre autres, lors de la transformation des ressources fossiles en électricité ou en travail mécanique. De plus, ces problématiques environnementales élargissent davantage la séparation entre les pays développés et les zones défavorisées du globe ([IPCC 2014](#)). Il y a donc une problématique environnementale et socioéconomique reliée à l'exploitation et à l'accès à l'énergie.

Afin de diminuer l'impact de l'utilisation de l'énergie sur ces problématiques, un effort global de recherche est en cours pour développer l'exploitation des ressources énergétiques renouvelables disponibles sur terre. Les principales sources développées sont l'éolien, les ressources biologiques, le potentiel hydraulique, la géothermie et l'énergie solaire. Chaque technologie présente des avantages et des inconvénients dépendant, entre autres, de la disponibilité de la ressource sur le site d'exploitation. Par exemple, des panneaux solaires photovoltaïques n'auront pas le même coût du Kilowatt-heure produit s'ils sont installés en Arizona ou en Islande à cause de la différence significative du potentiel solaire entre ces deux zones. Pour le moment, il ne semble pas exister de solution universelle aux problématiques de production et d'accès à l'énergie, mais plutôt différentes issues pour chacune des zones du globe.

## Mise en contexte

La décision d'entreprendre ce projet de recherche se base, essentiellement, sur deux réflexions. Tout d'abord, l'effort mondial de transition vers les énergies vertes permettra, à terme, d'utiliser les énergies fossiles seulement dans les cas où aucune autre solution n'est possible. Toutefois, la majorité des projets d'envergure existants tente de transformer la radiation solaire directement en électricité, avec des panneaux photovoltaïques par exemple<sup>1</sup>. Ceci est explicable par la présence de réseaux de distribution déjà en place et par la polyvalence indiscutable de l'énergie électrique. Par contre, l'acte de changer les photons en électricité, peu importe la méthode, comporte une ou plusieurs transformations incluant différentes pertes. Un panneau moderne, mais pas encore commercialisable, peut atteindre un rendement supérieur à 45% ([National Renewable Energy Laboratory 2018](#)). Il reste toutefois un travail énorme d'ingénierie pour rendre ces technologies accessibles au public, sachant que le rendement attendu d'un panneau commercial ne dépasse pas les 20%. Cette efficacité relativement faible permet d'ouvrir l'interrogation suivante : a-t-on avantage à toujours transformer l'énergie reçue en électricité pour mieux l'utiliser ? Pour répondre à cette question, considérons l'exemple suivant :

Un panneau photovoltaïque récupère l'énergie solaire et la transforme en énergie électrique avec un certain rendement. L'électricité alimente par la suite le laser d'une table de découpe d'acier automatisée, toujours avec un certain rendement. L'énergie initialement était sous forme photonique, transformée en électricité, puis à nouveau en photons afin de couper l'acier. Cet exemple permet de présenter une situation dans laquelle, si un développement technologique avait lieu, il y aurait moyen d'utiliser l'énergie solaire sous sa forme naturelle pour couper l'acier et ce, avec une possibilité de rendement supérieur en évitant deux transformations.

---

1. Notons que puisque ce document traite d'énergie solaire, les autres sources d'énergies renouvelables seront omises dans la majorité des explications et comparaisons.

La seconde réflexion concerne la répartition de la ressource solaire sur terre. Comme présenté précédemment, certaines zones du globe sont favorables à différents types d'énergie. La figure 1 (ASTM 2013) présente une carte du DNI (Direct Normal Irradiation) solaire moyen annuel et journalier.

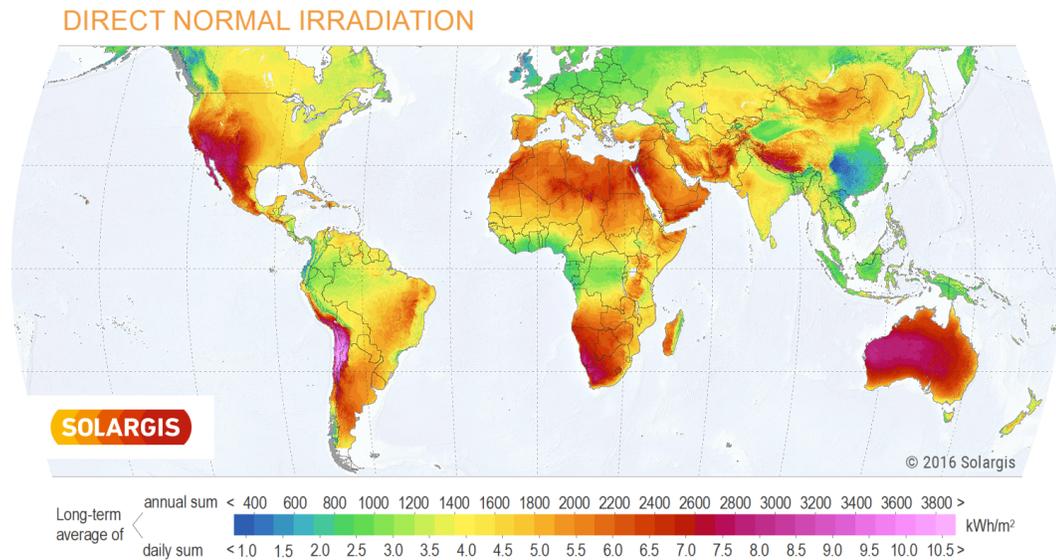


Figure 1: Irradiation normale directe annuelle et journalière

Cette carte apporte une seconde interrogation : est-ce que les différentes zones à haut potentiel solaire du globe ont des ressources naturelles communes ? En observant la figure 2 (Millennium Ecosystem Assessment 2005), il est notable qu'une forte corrélation entre les zones considérées arides et les zones à haut potentiel solaire existe. En effet, les zones désertiques de la planète sont excellentes pour collecter l'énergie solaire. Les zones arides regorgent aussi d'une ressource en quantité phénoménale : le sable, sous différentes compositions. Ce dernier, constitué majoritairement de silice, peut être transformé d'une poudre vers un matériau solide par un procédé appelé le frittage. Ce procédé permet de créer des liens solides entre les particules du sable sans les faire fondre complètement. Cette technique est utilisée dans la métallurgie des poudres, la céramique et depuis quelques années, dans l'impression 3D par laser.

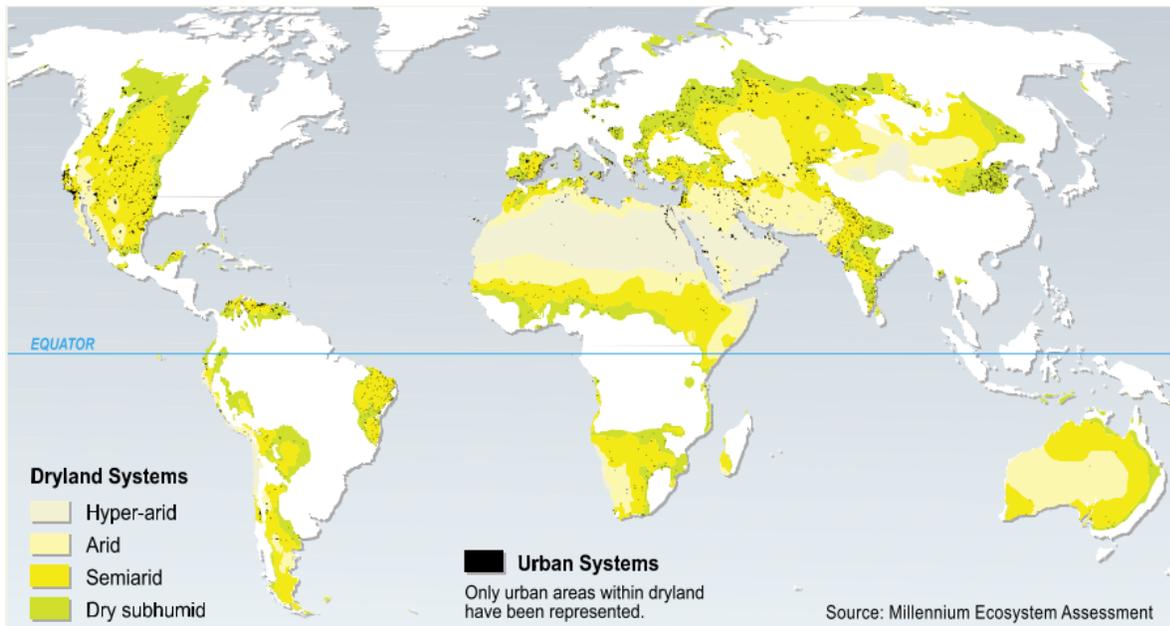


Figure 2: Répartition des climats arides

Ces deux interrogations combinées se résument comme suit : que peut-on faire avec une source radiative solaire et du sable ?

Ce mémoire traite de la première partie d'un projet à long terme portant sur la fabrication de matériau de construction utilisant à la fois le sable et l'énergie solaire sous leur forme naturelle. Le projet s'inspire d'une preuve de concept réalisée par Markus Kayser ([Kayser 2011](#)). Ce dernier a construit un prototype utilisant une lentille de Fresnel pour fusionner du sable et en faire un bol par un processus d'impression 3D. La figure 3 ([Kayser 2011](#)) montre l'installation et le résultat final de l'expérience de M. Kayser.

Le projet fût rendu public par une courte vidéo et aucune donnée scientifique n'ont été publiées. Toutefois, ce fût une source d'inspiration majeure pour notre équipe. Malgré la réussite de l'expérience, le prototype de M. Kayser reste difficile à implémenter en industrie. L'utilisation d'une lentille de Fresnel seulement apporte un problème où le point focal est de plus en plus évasé en fonction de la distance entre le soleil et le zénith. Le fonctionnement de système n'est donc possible et efficace que sur une courte période de la journée.



Figure 3: Démonstration d'impression 3D par énergie solaire concentrée

Un second projet majeur d'inspiration est celui du groupe de Takashi Nakamura de l'entreprise *Physical Science Inc.* En partenariat avec la *Nasa*, ils ont réalisé plusieurs prototypes de concentrateurs solaires pour injecter un flux de photons dans un guide d'ondes de fibres optiques (Nakamura 2009, Nakamura & Smith 2010). Leur but est d'explorer les possibilités d'utiliser l'énergie solaire concentrée comme outil pour coloniser d'autres corps célestes. Une efficacité totale de transmission de 37,8% est mesurée pour le prototype final, toutefois des efficacités au-delà de 50% ont été atteintes sur certains prototypes initiaux. Ceux-ci n'avaient pas, par exemple, de miroir secondaire ou de tige de quartz utilisée pour assembler les sorties des câbles solaires de plusieurs concentrateurs. En 2011, Nakamura publie les résultats sur la possibilité de création d'oxygène par réduction carbothermique. Une température de presque 2000°C a été atteinte dans le réacteur, rendant la réaction possible (Nakamura & Smith 2011). Aussi, la possibilité de construire des habitations par impression 3D de régolithe (sol lunaire) fût mis à l'épreuve (Nakamura & Smith 2011). La figure 3 (Nakamura & Smith 2011) montre une couche simple d'impression obtenue. À noter que le projet n'a pas été poussé plus loin en termes d'impression.

Comme mentionné initialement, le mémoire traite d'une seule partie du projet : la collection et le transport de l'énergie solaire. La figure 4 présente le modèle final en fonction

lors de la première journée d'essais. Trois groupes de recherche sont impliqués dans cette première phase : la *CERCP* (Chaire d'Excellence en Recherche du Canada sur l'Innovation en Photonique), le *LRIO* (Laboratoire de Recherche en Ingénierie Optique) et l'*UQAR* (Université du Québec à Rimouski). La *CERCP* développe un câble solaire à fibres optiques à très haute densité de puissance et le *LRIO* s'occupe du design des miroirs. L'*UQAR*, quant à elle, est responsable du développement du système électromécanique complet et de la conduite de la majorité des expériences menées en collaboration avec la *CERCP*. Les sections suivantes traitent en détail de la problématique, des objectifs, de la méthodologie du projet de maîtrise et de l'organisation du mémoire.



Figure 4: ECOsends lors de la première journée d'essais

## Problématique

La problématique d'un projet d'études graduée est généralement une situation qui requiert une solution n'existant pas, ou n'ayant tout simplement pas été étudiée. Dans le cas d'un projet multidisciplinaire comme celui-ci, chaque équipe doit répondre à ses propres problématiques, tout en gardant en tête celles de leurs collègues. La problématique à laquelle l'*UQAR* fait face se place comme complément au projet de la *CERCP*. L'innovation dans cette recherche est principalement liée à la nouvelle méthode d'injection de la lumière dans la fibre optique. Afin de rendre ce projet viable, le *LRIO* a réalisé un design optique permettant l'injection optimale de la lumière dans le câble solaire. Toutefois, le design optique et le câble solaire à eux seuls ne peuvent pas fonctionner sans une plateforme mécanique afin d'avoir un collecteur solaire complet. C'est ici qu'intervient l'*UQAR*. Le défi est donc divisé en deux problématiques distinctes :

1. Le système optique requiert une structure mécanique simple et robuste ;
2. La structure mécanique requiert un pointage solaire de précision.

Le système optique comporte trois éléments, soit le miroir primaire, le miroir secondaire et le câble de fibres optiques. Le positionnement relatif de ces composantes doit être précis et rigide. La configuration unique requiert une solution sur mesure, incluant un niveau d'ajustement minimal et une méthode d'alignement précise.

Finalement, afin de réaliser les essais, l'axe du centroïde du système optique doit être colinéaire avec le vecteur solaire et ce, sur une période de temps soutenue allant de quelques minutes jusqu'à une journée entière. Les solutions disponibles sur le marché n'offrent pas un degré de précision suffisamment élevé ([Prinsloo 2015](#)). Une solution électromécanique complète doit donc être mise en place pour répondre aux besoins. Ceux-ci sont définis dans la section suivante.

## Objectifs

Le but principal de ce projet de recherche est de concevoir, fabriquer et tester la partie électromécanique d'un système robuste et précis de captation et de transport par fibres optiques d'énergie solaire extrêmement concentrée. En effet, comme établi dans la section précédente, les problématiques sont liées à l'absence de support mécanique pour le système optique et au besoin d'un système de poursuite solaire plus précis que ce qu'offre le marché. Afin de s'assurer de la réussite du projet, des objectifs claires et précis sont mis en place.

Le premier objectif est la conception d'un support mécanique rigide permettant de maintenir le tube optique. Ce dernier est composé d'un miroir primaire parabolique  $F/2$  de  $750\text{mm}$  de diamètre et d'un miroir secondaire. Le verre utilisé pour le primaire est de  $15,875\text{mm}$  d'épaisseur et le pourtour est perpendiculaire à la surface du miroir sur les extrémités (à ne pas confondre avec un miroir dont le contour est perpendiculaire au sol). L'angle avec le sol du pourtour est de  $7^\circ$ . La masse attendue est de  $14,5\text{Kg}$  et le centre du miroir est percé sur un diamètre de  $180\text{mm}$ . Le miroir secondaire plan, placé à  $1175\text{mm}$  du centre du primaire, est de  $200\text{mm}$  de diamètre et de même épaisseur. Finalement, l'entrée du câble optique est localisée à  $275\text{mm}$  du secondaire. Étant donné que les spécifications du câble optique changent d'une itération à l'autre lors du développement et de la recherche de sa configuration optimale, il est convenu d'utiliser une plateforme permettant d'interchanger facilement le câble.

Le deuxième objectif est le développement d'un système précis de poursuite solaire. La précision requise de pointage vers le soleil est de  $0,1^\circ$  et doit être conservée en tout temps. Cette valeur est utilisée à la fois pour le dimensionnement des composants et pour le développement de l'algorithme de poursuite solaire. Le collecteur solaire à développer, appelée *ECOsends* (Extremely COncentrated Solar ENergy Delivery System), doit pouvoir soutenir trois systèmes optiques complets. Les hypothèses et la méthodologie sont couvertes dans la section suivante.

## Méthodologie

La méthodologie permet de répondre à la problématique et aux hypothèses de départ en mettant en place une démarche efficace pour en vérifier la validité. Les objectifs définis dans la section précédente peuvent être atteints et vérifiés indépendamment l'un de l'autre, ce qui permet de séparer la démarche méthodologique en deux phases.

Dans la première phase, il faut supporter mécaniquement les outils d'optique. L'hypothèse est donc qu'il est possible de concevoir un système mécanique simple et robuste permettant de soutenir le tube optique fourni par la *CERCP*. Pour ce faire, une étude des configurations de concentrateurs solaires et de télescopes est d'abord réalisée. La solution retenue doit répondre aux critères de rigidité tout en demeurant relativement simple dans le but d'initier la diminution des coûts de production. Un logiciel de conception numérique, *SolidWorks*, est utilisé pour modéliser la structure en détail, évaluer sa masse et son centre de gravité et affiner les géométries. Par la suite, deux logiciels permettant une analyse par éléments finis, soit *SolidWorks Simulation* et *GUIplot*, sont utilisés pour analyser les déformations des éléments principaux et estimer la validité du prototype final avant sa fabrication. Finalement, un prototype est fabriqué et l'alignement des composantes est validé à l'aide d'un outil au laser fabriqué sur mesure. Si l'alignement du produit final est conservée sur la course totale du concentrateur solaire, alors la première hypothèse est considérée valide.

La deuxième phase concerne le développement du système de poursuite solaire. Comme mentionné dans les objectifs, il faut être en mesure de pointer le soleil avec une précision de  $0,1^\circ$  d'erreur maximum. La seconde hypothèse est donc qu'il est possible de faire un système de poursuite solaire atteignant cette précision. Pour ce faire, une étude des solutions disponibles sur le marché est d'abord réalisée. Un algorithme de poursuite solaire est ensuite développé et un outil de mesure de la position solaire de précision est ajouté à la structure mécanique afin de corriger l'erreur de poursuite. Si cet outil donne un résultat inférieur à l'erreur maximale, alors la seconde hypothèse est vérifiée.

## Organisation du mémoire

Le mémoire est divisé en quatre chapitres en plus d'une introduction et d'une conclusion générales. L'introduction générale décrit le contexte, la problématique, les objectifs fixés et la méthodologie employée.

Le premier chapitre est une revue de littérature exposant l'état de l'art dans le domaine des systèmes de transport d'énergie solaire concentrée. On y retrouve des informations générales sur l'énergie solaire, les types de concentrateurs solaires, les méthodes de guidage, les systèmes de contrôle disponibles sur le marché ainsi qu'un survol des autres projets en développement dans le monde.

Le deuxième chapitre couvre l'ensemble du développement de la structure mécanique du collecteur solaire *ECOsends* et du choix des composants. Une analyse fonctionnelle y est présentée, suivie de la conception par ordinateur, de l'analyse par éléments finis, de la fabrication et finalement, de la mise en marche du prototype.

La troisième chapitre est consacré au développement de la méthode de poursuite solaire. Une explication détaillée sur les raisons de l'importance d'un suivi de précision débute le chapitre, y succède un développement de la méthode et de l'algorithme utilisés, de l'implantation réelle et finalement, une discussion des résultats obtenus et des suggestions pour une future itération.

Le quatrième chapitre présente brièvement les résultats globaux du projet, soit ceux de la transmission de l'énergie solaire par fibres optiques, et ceux de la mise à l'épreuve d'un four solaire réalisé en stage avant d'entreprendre le projet de maîtrise.

Finalement, la conclusion générale présente un résumé des travaux effectués et des recommandations pour les travaux futurs.

# CHAPITRE 1

## GÉNÉRALITÉ SUR L'ÉNERGIE SOLAIRE ET LES SYSTÈMES DE CAPTATION MODERNES

### 1.1 Introduction

L'énergie solaire est une source stable et disponible pour une durée extrêmement longue. Pour cette raison, plusieurs pays commencent la longue transition énergétique, délaissant les produits pétroliers et augmentant leurs surfaces de collection en panneaux photovoltaïque (PV) ou en puissance solaire concentrée (CSP). La Chine est actuellement le pays avec la plus forte croissance en surface PV, avec une puissance totale installée de plus de 131GW en 2017 (Masson & Brunisholz 2018). Toutefois, ceci ne représente qu'environ 1% de sa demande en électricité. Un autre pays moins peuplé, comme l'Allemagne par exemple, a une puissance installée de 42GW, représentant 7,5% de leur production d'énergie [(Masson & Brunisholz 2018)]. Le graphique de la figure 5 présente la croissance de la puissance solaire photovoltaïque mondiale installée.

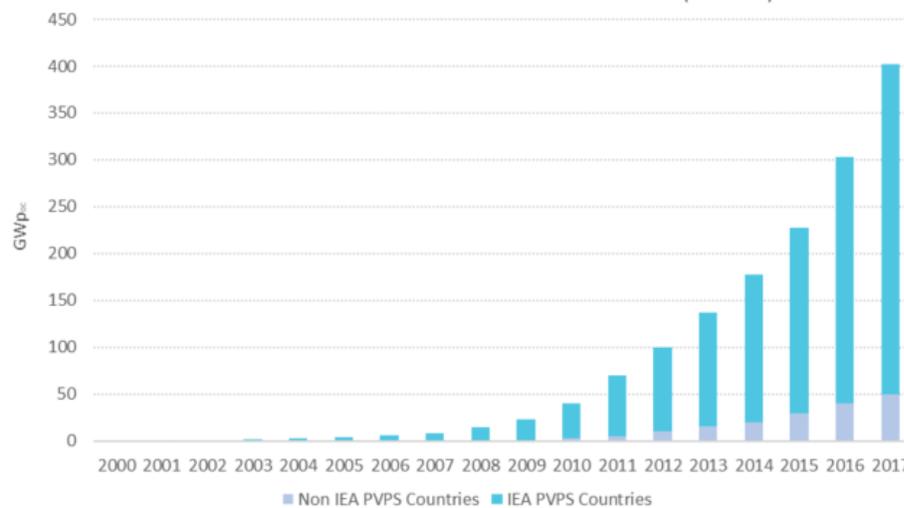


Figure 5: Croissance de la puissance mondiale de l'énergie photovoltaïque installée

Cette croissance est toutefois ralentie par l'efficacité des systèmes solaires disponibles. Un effort de recherche mondial est en cours pour augmenter le rendement des systèmes PV classiques, tout en explorant d'autres technologies, comme les systèmes photovoltaïques concentrés (CPV), les centrales solaires thermiques concentrées (CSP) et comme couvert dans ce mémoire, les systèmes de transport d'énergie solaire sous forme photonique pour diverses applications.

Ce chapitre présente l'essentiel des connaissances nécessaires à la compréhension du projet. Une revue de littérature sur les systèmes avec guide d'ondes est présentée, suivi des différents assemblages mécaniques et des stratégies de poursuite solaire modernes. Finalement, une présentation de certaines solutions clés en main disponibles sur le marché est effectuée.

## 1.2 Énergie solaire

Afin de réaliser correctement un projet basé sur l'énergie solaire, il est important d'avoir certaines connaissances sur le soleil. Généralement, il est représenté comme un corps noir de  $5777\text{ K}$ . La constante solaire  $G_{sc}$  représente la quantité d'énergie reçue par unité de temps sur une unité de surface perpendiculaire à la direction de propagation de la radiation et localisée sur la surface de l'atmosphère à la distance moyenne terre-soleil. Cette dernière est de  $1367\text{ W/m}^2$ . L'organisme s'occupant d'émettre ou d'accepter ces mesures est le *World Radiation Center (WRC)*. Cette constante varie annuellement de plus de 3% et peut être calculée.

La constante solaire seule n'est pas particulièrement utile si on ne considère pas la distribution spectrale de cette énergie et l'atténuation atmosphérique. La puissance réelle à la surface terrestre est normalisée par un facteur appelé *Air-Masse*, ou  $AM$ . Ce facteur permet d'estimer la densité de puissance normale au vecteur solaire obtenue sur la surface terrestre selon la masse d'air traversée, lorsque le soleil est au zénith, le facteur est appelé  $AM1$ . Si la masse d'air traversée est le double de l'épaisseur de l'atmosphère, alors le facteur est  $AM2$

et ainsi de suite. La figure 6<sup>1</sup> présente la distribution énergétique *AM1.5*, soit 48,2° d'angle par rapport au zénith. La distribution spectrale, aussi présente sur la figure 6, est importante lorsqu'on évalue la performance d'un produit spécifique, par exemple un panneau PV. L'efficacité est variable selon la longueur d'onde et il serait faux de se fier seulement à l'apport énergétique totale. Dans le cas du projet avec la *CERCP*, la fibre de silice bloque la lumière au-dessus de  $2\mu\text{m}$ . Ces pertes sont intrinsèques au système et doivent être considérées.

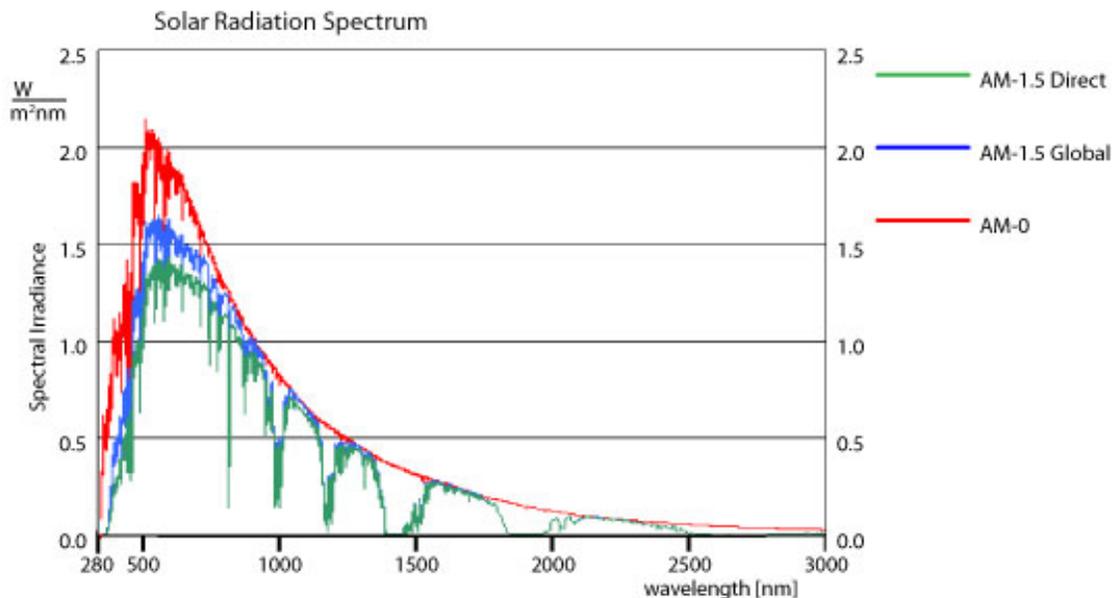


Figure 6: Distribution *AM0*, *AM1.5* globale et *AM1.5* directe

Il est aussi important de bien comprendre le positionnement du soleil dans le ciel lors du dimensionnement ou de la conception d'une technologie solaire. Le facteur *AM* défini dans le paragraphe précédent est variable sur toute la journée, tout comme la durée d'ensoleillement au cours de l'année. Les références privilégiées pour décrire la position du soleil par rapport au site sont les angles d'azimut et d'élévation. L'angle d'élévation est nul lorsque le soleil pointe au zénith et atteint 90° à l'horizon. L'angle d'azimut quant à lui est nul lorsque le soleil est au nord, est de 90° à l'est, 180° au sud et 270° à l'ouest. L'angle qu'occupe

1. <http://www.greenrhinoenergy.com/solar/radiation/spectra.php>

le soleil dans le ciel est de  $0,53^\circ$ . Ces données peuvent être calculées avec différents algorithmes astronomiques. Celui utilisé dans ce mémoire est le *NRELSPA* (National Renewable Energy Laboratory Solar Position Algorithm). Différents outils et logiciels sont disponibles pour visualiser le trajectoire annuelle selon la date et la géolocalisation. La figure 7 montre un exemple réalisé avec un logiciel gratuit<sup>2</sup> permettant de voir la trajectoire du soleil au-dessus du *COPL* (Centre d'Optique, Photonique et Laser) pour l'année 2018. Le bâtiment sur la figure n'est qu'une représentation fictive pour montrer l'ombrage et ne représente pas le *COPL*.

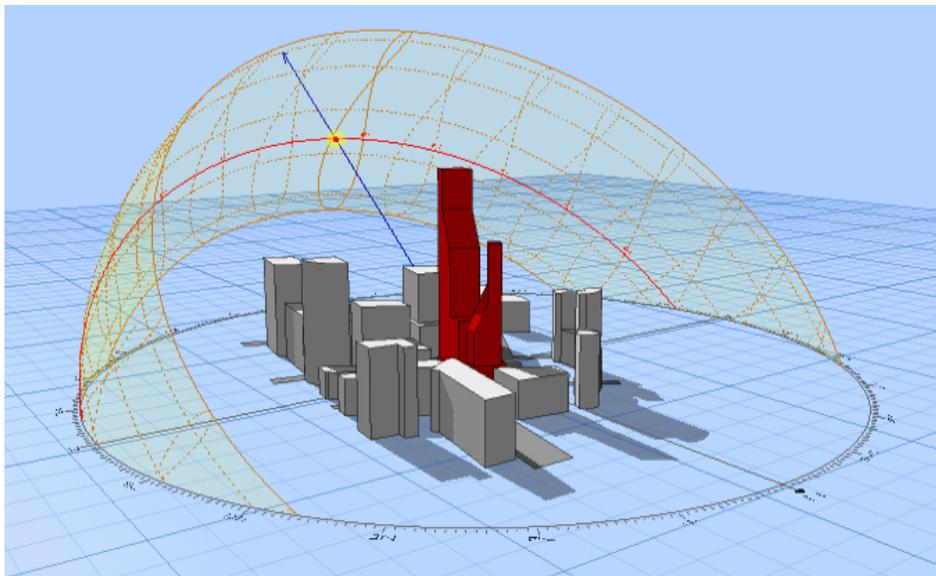


Figure 7: Position solaire au-dessus du *COPL* pour l'année 2018

### 1.3 Projets existants de transmission d'énergie solaire

Malgré l'aspect novateur de notre approche pour la transmission de l'énergie solaire par fibres optiques, l'équipe n'est pas la première à s'attaquer à cette tâche. Depuis plus d'une

---

2. <http://www.andrewmarsh.com>

trentaine d'années, il y a eu une multitude de projets de différentes envergures. Cette section présente un retour sur les accomplissements des autres équipes à travers le monde.

Il est important de noter que cette section ne se veut pas un remplacement des revues de littérature des autres auteurs, mais plutôt un complément avec les projets récents et une mise en valeur de certains projets. En effet, une recherche exhaustive des projets antérieurs a été réalisée par ([Kandilli & Ulgen 2007](#)) en 2007. Cette recherche divise les projets en six catégories différentes, basées sur l'application liée à la transmission solaire :

1. L'éclairage,
2. La génération de puissance,
3. La chirurgie,
4. L'alimentation de photo-bioréacteur,
5. Les réactions photo-chimique (génération d'hydrogène, etc.),
6. Les lasers alimentés par énergie solaire concentrée.

Les premières traces du transport de l'énergie solaire par fibres optiques dans la littérature datent de 1982, où une équipe française apporte un modèle théorique de la faisabilité du projet ([Cariou et al. 1982](#)) et des premières estimations d'efficacité avec les technologies de l'époque. La même équipe publie d'autres articles dans les années subséquentes, incluant un travail d'importance sur les limites d'une fournaise alimentée par fibres optiques ([Cariou et al. 1985](#)). Dans cette application, des températures dépassant les 1500° celcius sont attendues. Ces résultats sont dépassés par ceux de Nakamura ([Nakamura & Smith 2010](#)) qui obtient environ 2000° celcius 25 ans plus tard. L'oeuvre de Cariou ([Cariou et al. 1985](#)) met l'emphase sur un des défis de cette technologie, soit le pourcentage de captation lorsque plusieurs fibres sont jointes au point focal. Suite aux articles de Cariou, quelques autres groupes de recherche se sont ajoutés, notamment le groupe de Liang ([Liang et al. 1998](#)) qui développe une méthode d'injection d'énergie solaire avec fibres hexagonales très efficace et obtient une

densité de puissance de  $5,7W/m^2$ . Dans la même période, une autre équipe dirigée par Feuermann publie une série de trois articles sur leur version d'un système de transport d'énergie solaire par fibres optiques (Feuermann & Gordon 1999, Feuermann et al. 2001, 2002). Un modèle comprenant plusieurs petits miroirs paraboliques injectant dans une fibre à la fois est présenté et mis à l'épreuve. Par contre, un problème d'importance est soulevé, celui des pertes de puissance par fuites de lumière dans la fibre, même en utilisant un angle en dessous de l'ouverture numérique de la fibre. Ce problème est toujours existant et un design optique rigoureux doit être mis en place pour optimiser la performance. En 2007, Kandilli publie une revue de littérature exhaustive en plus de présenter une système avec un miroir parabolique hors-axe et un câble optique constitué de fibres de différents diamètres (Kandilli & Ulgen 2007). L'année suivante, il publie une analyse de l'exergie du système pour des applications dans un bâtiment (Kandilli et al. 2008). Finalement, l'équipe de Nakamura a publié au fil du temps une série d'articles sur la possibilité d'utiliser l'énergie solaire concentrée pour la colonisation de la lune (Nakamura et al. 2002, Nakamura 2009, Nakamura & Smith 2010, 2011). Différents systèmes optiques et différentes fibres sont présentés, avec une efficacité totale atteignant 38%. Toutefois, des suggestions d'optimisation propose qu'une efficacité totale de 65% est possible. Les éléments communs de tout ces projets sont au niveau de l'utilisation d'un miroir primaire parabolique et d'un système de poursuite solaire de précision. La configuration des systèmes et la méthode d'injection des rayons solaires change d'un projet à un autre.

Du côté commercial, il existe à date une seule un compagnie, *Parans*<sup>3</sup>, qui commercialise un produit de transport d'énergie solaire par fibres optiques et ce, pour l'éclairage de bâtiment. Aucune donnée scientifique n'est disponible quant à l'efficacité réelle du produit, ni le type de fibres optiques utilisés. La concentration optique se fait par lentilles.

---

3. <http://www.parans.com/index-en.cfm>

## 1.4 Configuration mécanique des systèmes CSP

La configuration mécanique du système *ECOsends* à développer représente la manière utilisée pour assembler les différentes fonctions du système. En ce qui concerne l'assemblage optique, la méthode est définie par la configuration optique développée par le *LRIO* et devra, essentiellement, être équivalente à un télescope d'observation. La seule configuration réelle à déterminer dans notre projet réside donc dans la partie dynamique du système et comment les composantes y sont installées.

L'analyse fonctionnelle complète d'*ECOsends* est réalisée dans le second chapitre. Toutefois, pour simplifier la compréhension de cette section, considérons le système comme étant constitué d'une base au sol, d'un mécanisme de pivot et d'une plateforme solaire. Cette dernière est mobile par rapport à la base et orientée vers le soleil de manière dynamique et continue. Il existe deux familles principales de systèmes pour réaliser ce mouvement telles que présentées dans dans la figure 8<sup>4</sup> : les montures équatoriales et celles communément appelées altitude-azimuth ou *Alt-Az*.

Une monture équatoriale est un assemblage qui compense la rotation de la terre pour l'observation des astres. Il comporte deux axes, soit l'axe de déclinaison et l'axe polaire. Ce dernier est parallèle à l'axe de rotation de la terre. Le second axe est utilisé pour incliner le télescope afin de pointer sur l'astre à observer. Ce type de monture a un avantage non négligeable, qui est celui d'avoir un seul moteur en fonction durant la journée. C'est cette raison qui favorise cette technique pour la photographie astronomique : le système est très stable. Toutefois, une monture équatoriale, par sa configuration, est généralement massive et dispendieuse à réaliser. De plus, la mise à l'échelle est difficile lorsqu'il s'agit d'avoir une grande surface de collection.

---

4. <https://scienceatyourdoorstep.files.wordpress.com/2017/10/alt-az-vs-eq-mounts.gif?w=617&h=342>

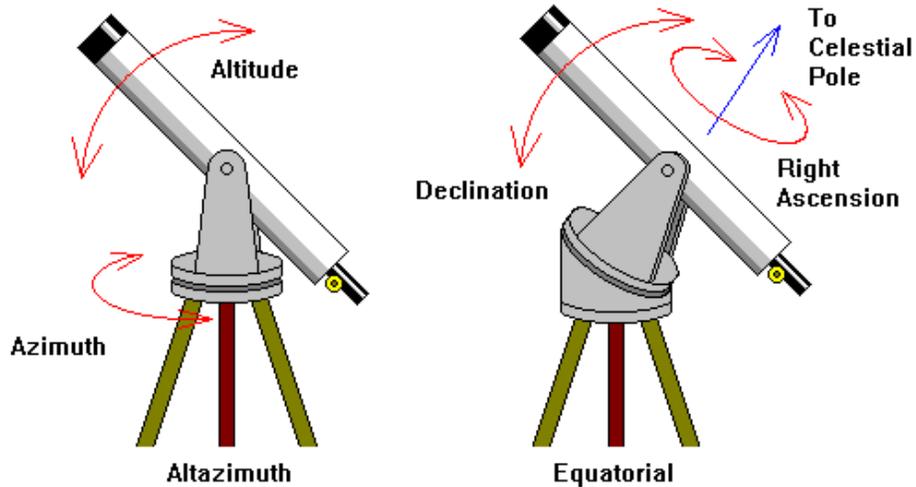


Figure 8: Configuration *Alt-Az* et Équatoriale

La configuration de type *Alt-Az*, quant à elle, permet le suivi solaire en utilisant deux moteurs indépendants permettant d'ajuster l'axe d'élévation, aussi appelé zénith ou altitude, et l'axe d'azimut. L'indépendance des deux axes est basée sur le fait que le mouvement d'un moteur n'engendre pas d'erreur dans le champ de l'autre. Pour atteindre cette condition, il faut que les axes soient parfaitement perpendiculaires et que la plateforme soit mise à niveau avec le champ gravitationnel. L'avantage principal de cette configuration est qu'elle est généralement compacte et légère, réduisant significativement les coûts de matériaux et d'installation.

Le mécanisme de pivot du système peut être réalisé de différentes manières. Il existe trois types principaux de mécanismes partagés sur les différents axes : le *dual axis slew ring*, la combinaison d'un *single axis slew ring* et d'un vérin linéaire ou encore, la combinaison de deux vérins linéaires. Les trois méthodes donnent un résultat semblable, mais doivent être réalisées de manière différente mécaniquement. La figure 9<sup>5</sup> présente une comparaison des ces trois systèmes. À noter que chacune de ces configurations sont disponibles commercialement

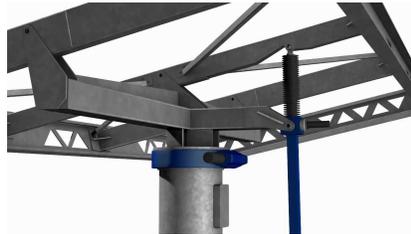
---

5. <http://micropowergrids.com.au>; <https://sentinel solar.com/>; <https://www.eco-worthy.com>

et n'influencent pas l'algorithme de poursuite solaire de ce mémoire. Seule la commande finale envoyée aux moteurs serait modifiée.



(a) *Dual axis slew drive*



(b) *Single axis slew drive* et vérin linéaire



(c) Double vérin linéaire

Figure 9: Comparaison des trois types de configurations principales pour la poursuite solaire à deux axes

Le *dual axis slew ring* est une transmission comprenant deux axes de rotation perpendiculaires dans le même boîtier. Les *slew rings* sont un type de roulement à billes ou à rouleaux supportant les efforts axiaux, radiaux et les moments de chavirement. Généralement, ces roulements sont dentelés sur la couronne extérieure, permettant le couplage à une vis sans fin. Un moteur électrique ou hydraulique applique une puissance sur cette vis afin de faire tourner l'axe. La solution finale est très compacte, généralement peu onéreuse et mécaniquement simple à installer. La figure 10 montre le *dual axis slew drive* utilisé pour le projet actuel.



Figure 10: *Dual-axis slew drive* de la compagnie *H-Fang*

Toutefois, cette configuration a un inconvénient : lors du déplacement en élévation, la masse totale du système doit être supportée en porte-à-faux afin d'éviter une collision avec le support ou alternativement, une partie de la plateforme solaire doit être retirée pour rapprocher le centre de gravité de l'axe de pivot en élévation, réduisant la charge à supporter en porte-à-faux. Dans le premier cas, il faut surdimensionner mécaniquement le système afin de supporter la charge et assumer une consommation électrique plus élevée de la part du moteur en élévation. Dans le second cas, un design mécanique plus complexe est à considérer et une perte de surface utile par rapport à celle occupée au sol est à prévoir.

La seconde configuration de mécanisme de pivot utilise un seul *slew ring* pour le pivot en azimut et un vérin linéaire combiné à des roulements à billes pour l'axe en zénith. Cette configuration est mécaniquement plus difficile à réaliser et demande une bonne précision de fabrication et d'assemblage pour assurer la perpendicularité des axes. Toutefois, l'avantage réside dans la manière dont la charge utile est supportée. Il est possible d'avoir une configuration où une faible masse est supportée en porte-à-faux sans avoir une perte de surface utile. Cette solution n'a pas été retenue pour le prototype à cause de la complexité plus élevée en comparaison avec la solution clés en main du *dual axis slew ring*.

Finalement, la troisième configuration est celle où les deux axes sont contrôlés par des actionneurs linéaires. Cette solution est probablement la moins coûteuse, mais la plus complexe. L'axe de pivot en azimut ne fait pas un mouvement circulaire, mais plutôt un mouvement d'est en ouest semblable à celui en élévation. La complexité intervient dans le fait que l'orientation de la plateforme solaire change d'angle durant la journée. Par exemple, le bas de la plateforme le matin peut devenir le côté gauche en soirée. Mécaniquement, les éléments d'un télescope doivent garder leur rigidité dans différents angles. Bien que ce ne soit pas la meilleure méthode pour le solaire concentré, comme dans le projet actuel, cette technique est très intéressante pour le PV ou lorsque l'alignement des composants optiques n'est pas influencé significativement par leur masse. Le tableau 1 présente sous une forme compacte le processus décisionnel décrit précédemment.

Tableau 1: Matrice de Pugh pour la sélection du type de pivot

<b>Critères de décisions</b>	<b>Pondération</b>	<b><i>Dual axis slew drive</i></b>	<b><i>Single axis slew drive et vérin linéaire</i></b>	<b>Double vérin linéaire</b>
<b>Précision</b>	2	0	-1	-1
<b>Coût</b>	1	0	0	0
<b>Facilité d'intégration</b>	1	0	-1	-1
<b>Harmonie avec le système optique</b>	1	0	1	-1
<b>Total pondéré</b>		0	-2	-4

### 1.5 Algorithme de suivi solaire

La poursuite solaire peut être gérée de différentes manières. Généralement, il existe deux méthodes principales : la boucle ouverte et la boucle fermée. Un système en boucle fermée prend ses décisions selon les informations qui sont mesurées par un ou plusieurs capteurs externes. Par exemple, des photodiodes disposées en quadrant auront une différence de courant entre elles si le soleil n'est pas aligné avec le centroïde de ce système. Le programme pourra donc envoyer une commande aux moteurs pour égaliser ces courants et continuer de capter un maximum d'énergie solaire. Une boucle ouverte, quant à elle, se fie sur un algorithme de calcul et une rétroaction du système sans contact avec le soleil. La rétroaction peut être, par exemple, un inclinomètre ou un encodeur installé sur les moteurs. Un algorithme astronomique est utilisé pour calculer la position du soleil selon la position du système, généralement programmé par l'équipe de mise en place. Ce système connaît toujours la position du soleil, mais demeure aveugle. Il existe aussi une troisième famille de poursuite solaire, mais très peu utilisée : les systèmes hybrides. Ce type d'algorithme combine le meilleur des deux solutions précédentes en filtrant les points négatifs de ceux-ci. Par exemple, un système en boucle ouverte peut avoir une rétroaction d'un capteur optique permettant de corriger un

désalignement de la structure, ou un système en boucle fermée peut avoir un algorithme en boucle ouverte en arrière plan pour l'aider à trouver le soleil en matinée ou encore dans les moments nuageux.

Le chapitre 3 présente en détail les raisons du choix de l'algorithme hybride utilisé dans ce projet. Toutefois, il est important de couvrir le fonctionnement de l'algorithme en boucle ouverte utilisée comme pilier du programme. Il s'agit du *NRELSPA*. Ce calcul astronomique est considéré comme le plus précis actuellement, avec des prédictions allant jusqu'à  $0,0003^\circ$  d'erreur et ce, jusqu'à l'an 6000 ([National Renewable Energy Laboratory 2004](#)). D'autres algorithmes sont disponibles et présentent des avantages, comme un temps de calcul plus rapide. Toutefois, la précision est de premier plan et ceux-ci ne seront pas utilisés. Le fonctionnement du *NRELSPA* est couvert en détail dans le rapport de Ibrahim Reda et Afshin Andreas ([Reda et al. 2008](#)). Afin de bien l'utiliser, il faut toutefois en comprendre ses bases.

En premier lieu, l'algorithme est un calcul de mouvement d'astre adapté au soleil. Le temps est un facteur d'importance dans ce calcul. Malgré l'accès facile au temps local à la seconde près, l'utilisation de cet horloge ne donne pas une précision absolue. La première étape est de calculer le jour, le siècle et le millénaire sur le calendrier Julien, en utilisant le temps universel (UT) et le jour, le siècle et le millénaire éphéméride Julien, en utilisant le temps terrestre (TT). Par la suite, il faut calculer la position de la terre relative au centre du soleil puis la nutation causée par la lune. Une correction est ajoutée par la suite pour prendre en considération l'erreur due à l'aberration atmosphérique. Cette correction permet d'avoir la position apparente du soleil dans le ciel et non la position réelle du soleil par rapport à la terre. Pour terminer le calcul, une transformation géométrique permet d'avoir les informations sur la position apparente du soleil peu importe la localisation sur terre. Une cinquantaine d'équations sont requises pour y arriver. Le code source pour réaliser ce calcul est fourni par le *NREL*.

## 1.6 Solutions commerciales existantes de suivi solaire

Lorsqu'il est question de suivi solaire, il est normal de s'interroger sur les solutions existantes sur le marché. Après tout, il existe déjà des centaines de centrales solaires avec une poursuite dans les deux axes. La majorité des solutions ont un algorithme implanté dans un *PLC* (Programmable Logic Controller), un *PAC* (Programmable Automation Controller), une carte *FPGA* (Field Programmable Gate Arrays) ou un microcontrôleur comme un *Arduino* par exemple (Prinsloo 2015). Comparativement à la section précédente, les produits présentés sont disponibles pour être achetés et comprennent l'électronique complète. Ce sont des solutions clés en main. La majorité des systèmes proposés sont couverts par Prinsloo dans une revue exhaustive des solutions disponibles sur le marché (Prinsloo 2015).

Le premier système est celui développé par *Sandia National Laboratories* et nommé le *SolarTrak*. Ce dernier est fabriqué par la compagnie *TapTheSun*<sup>6</sup>. Le *SolarTrak* est un système à microcontrôleur utilisant un algorithme en boucle ouverte basé sur la date, l'heure locale, la latitude, la longitude et le fuseau horaire. Un système de poursuite en boucle ouverte est supérieur à celui avec un capteur optique lors des périodes faiblement nuageuses, mais doit être calibré avec minutie. Le système a une précision de  $0,05^\circ$  selon le fournisseur.

Un second produit est le *SunTrack* fabriqué par la compagnie *P4Q*<sup>7</sup>. Ce produit est disponible pour contrôler des moteurs AC, DC24V ou encore un système hydraulique. Il utilise une solution en boucle ouverte et peut accueillir des outils de mesure comme un inclinomètre ou un capteur solaire. Toutefois, la précision estimée est de l'ordre de  $0,1^\circ$ . Il n'est pas précisé si le système est basé sur un microcontrôleur, un *PLC* ou autre.

Une des solutions disponibles sur le marché est le *Solar Position Algorithm* proposé

---

6. <http://www.tapthesun.com/solartrak.html>

7. <http://www.suntrackpro.com/>

par *Siemens* avec leur *PLC S7-1214*. Malheureusement, ils n'offrent plus la solution clés en main pour les systèmes solaires, mais la bibliothèque du programme est toujours disponible. Le code proposé dans cette solution est basé sur l'algorithme *NRELSPA*. Ce dernier est le plus précis actuellement. La différence majeure avec les autres solutions commerciales est la liberté de modifier le logiciel selon les besoins du projet. Comme couvert dans le chapitre 3, cette solution a été retenue dans le but de donner suite au projet de Prinsloo, en y ajoutant une boucle de retour via un capteur optique. La compagnie propose une précision allant jusqu'à  $0,05^\circ$ . Toutefois, les solutions en boucle ouverte dépendent énormément de la qualité mécanique et de l'alignement initial pour obtenir cette précision.

Dans le même ordre d'idée que le système de *Siemens*, *National Instruments* offre une solution en boucle ouverte avec le *CompactRIO* (plateforme *FPGA* et *LabVIEW*). L'algorithme utilise des coordonnées *GPS*, l'heure, la date et le fuseau horaire pour calculer la position du soleil en boucle ouverte. La poursuite se fait à l'aide de *PID*, contrairement aux fonctions par échelon des autres produits. La solution de *National Instrument* offre un degré de liberté très grand pour la modification et l'ajout de fonctions dans le code. Toutefois, la précision attendue n'est pas répertoriée et le coût d'acquisition est très élevé.

*Allen Bradley* offre aussi une solution de poursuite solaire clés en main en boucle ouverte avec une rétroaction par un inclinomètre. Toutefois, la précision estimée est de  $0,1^\circ$ . Ce système est avantageux pour l'installation de parcs solaires, offrant une possibilité de connecter en réseau plusieurs collecteurs. La solution *Siemens* est très semblable à cette solution et a été sélectionnée dans notre projet à cause des données disponibles dans la littérature, servant de comparaison avec les résultats obtenues ([Prinsloo 2015](#), [Tang 2012](#)).

Plusieurs autres systèmes commerciaux sont aussi disponibles et présentent généralement le même type d'avantage : contrôle à distance, prévision pour parcs solaires, interface utilisateur Web, couplage de plusieurs plateformes, acquisition de données, etc. Toutefois, aucune solution industrielle n'offre la précision et la flexibilité désirée dans ce projet et ce pour un coût raisonnable. C'est pour cette raison qu'une solution sur mesure est nécessaire. Le

choix final d'utiliser l'automate de *Siemens* repose principalement sur la solution de boucle ouverte déjà disponible dans le logiciel *TIA Portal* et non sur les capacités du matériel.

## **1.7 Conclusion**

Ce chapitre a permis d'acquérir des connaissances de base sur la ressource solaire, autant au niveau de la définition physique de l'astre et de son positionnement dans le ciel, que du côté de la répartition de l'énergie et de son état d'exploitation actuel. Les différentes technologies solaires industrielles ont été présentées avec un regard sur les différentes configurations mécaniques pouvant s'appliquer au projet *ECOsend*s. De plus, les grandes lignes derrière les méthodes de poursuite solaire et les solutions clés en main ont été présentés. Finalement, une revue de littérature a couvert les principaux projets d'importance connexes à celui du mémoire. Le prochain chapitre présente en détail les enjeux de la conception mécanique, de la modélisation jusqu'à la fabrication et l'installation, en passant par l'analyse avec la méthode des éléments finis.



## CHAPITRE 2

### CONCEPTION ET FABRICATION DU COLLECTEUR SOLAIRE

#### 2.1 Introduction

Une grande partie du succès du projet *ECOsends* repose sur la qualité de la structure mécanique. Le terme qualité n'est pas nécessairement lié au degré de précision de la fabrication, mais plutôt dans la considération de nombreux facteurs, comme les perturbations du vent, la localisation des centres de masse des différentes composantes et l'harmonie de fonctionnement du prototype.

Ce chapitre présente la conception, le dimensionnement et la fabrication du collecteur solaire *ECOsends*. Tout d'abord, une description des spécifications optiques et de l'approche utilisée par la *CERCP* pour atteindre les objectifs est effectuée. S'en suit une analyse fonctionnelle du système avec une présentation de la modélisation des différentes parties. Par la suite, le dimensionnement des composantes principales est réalisé, analytiquement et numériquement via la méthode des éléments finis. Finalement, un aperçu de la fabrication et de l'installation est présenté.

#### 2.2 Conception du collecteur solaire *ECOsends*

Le système *ECOsends* est utilisé pour délivrer de l'énergie solaire hautement concentrée sur une distance de plusieurs mètres. Bien que d'autres équipes de recherche aient expérimenté le transport de l'énergie solaire par fibres optiques, les rendements sont généralement faibles. De plus, le facteur de concentration optique est relativement peu élevé, soit de l'ordre de 1000X. À noter que cette densité de puissance peut être considérée comme très élevée dans d'autres secteurs de l'énergie solaire, comme le *CPV*. La majorité des pertes se trouve

généralement dans la méthode d'injection de la lumière dans les fibres. Il existe quelques exceptions où une seule fibre était utilisée et dont le rendement était élevé, soit de l'ordre de 66% avec une densité de puissance à la sortie de  $11Ksun$  (Liang et al. 1998, Feuermann et al. 2002). L'originalité de notre projet réside dans une technique novatrice d'injection de lumière dans une grande quantité de fibres optiques simultanément.

Il est possible d'injecter la radiation solaire directement dans un ensemble de fibres optiques. Toutefois, les espaces géométriques entre les fibres engendrent des pertes importantes. La technique la plus utilisée est un polissage hexagonal de l'extrémité des fibres afin d'éliminer les espaces vides et augmenter la captation (Liang et al. 1998). Ceci pose un problème lorsqu'il est nécessaire d'utiliser des fibres avec un cœur de silice. Afin de conserver leur flexibilité, ces dernières ont un diamètre de l'ordre de  $600\mu m$ . Il faut donc un nombre important de fibres individuelles pour former un câble. Le polissage des extrémités devient une tâche onéreuse et extrêmement longue à réaliser. L'expertise de la CERCP en matériaux vitreux leur a permis de développer une nouvelle méthode de fabrication où des fibres optiques de silice fondu sont fusionnées entre elles, puis sur la sortie d'une lentille sphérique. Ceci permet d'injecter la lumière localisée au point focal d'un système de concentration imagé avec un facteur de concentration optique de 5800X. Les fibres utilisées, qui sont à haute efficacité dans le visible, ont une ouverture numérique de 0,4 et permettent le transport sur une longue distance avec une atténuation de l'ordre de  $1dB$  par kilomètre. À noter que le facteur de concentration optique est actuellement limité par l'ouverture numérique de la fibre. Des nouvelles fibres sont en développement afin d'optimiser ce paramètre. Des estimations préliminaires prévoient une ouverture numérique de 0,6 pour la prochaine génération.

Le but premier de cet ouvrage est de concevoir le collecteur solaire comme un banc de test où les limitations ne sont pas au niveau de l'optique de concentration, ni au niveau de la poursuite solaire. De cette manière, il est possible de mettre à l'épreuve différentes itérations du câble solaire dans des conditions optimales.

Le design des composantes optiques de concentration solaire (miroir primaire, miroir secondaire et lentille sphérique) a été réalisé par le *LRIO*. Afin de diminuer la longueur du câble solaire et éviter les courbes supplémentaires, il a été décidé d'utiliser une configuration semblable à un télescope de type Cassegrain. Ces télescopes utilisent un miroir primaire hyperbolique concave et un secondaire hyperbolique convexe. Le centre du miroir primaire est percé et le point focal se trouve à l'arrière de ce dernier. Cette configuration présente des avantages pour l'observation d'astres, mais dans notre cas, elle permet surtout une installation plus simple pour l'injection dans le câble solaire. Toutefois, les miroirs hyperboliques sont plus difficiles à fabriquer et leur coût est plus élevé. Il est toutefois possible d'utiliser des miroirs comme pour un télescope de type Newton. Cette configuration utilise un miroir primaire concave parabolique et généralement, un miroir secondaire plan installé à 45 degrés. En approchant la lentille d'entrée du câble solaire près du miroir secondaire, il est possible d'enlever l'angle et de placer les deux miroirs en parallèle. Le résultat est une solution compacte avec les propriétés optiques désirées. La figure 11 présente le design optique sur lequel la conception mécanique s'appuie. Les dimensions d'intérêts présentées sur cette figure sont les suivantes :

- Miroir primaire :  $\varnothing_{ext}750mm$ ,  $\varnothing_{centre}180mm$ ,  $F/2$ , 14, 5Kg, 15, 875mm d'épaisseur,
- Miroir secondaire :  $\varnothing_{ext}200mm$ , 15, 875mm d'épaisseur,
- Distance primaire/secondaire : 1175mm,
- Distance secondaire/câble solaire : 275mm.

Le collecteur solaire *ECOsends* doit accueillir trois systèmes de concentration solaire décrit ci-haut et faire un suivi solaire avec une précision de l'ordre de  $\pm 0,1^\circ$ . L'ajout de plusieurs télescopes permet de faire différentes expériences en parallèle, d'avoir un potentiel total de 600W et d'être opérationnel en tout temps, même lors d'un possible bris de miroir ou de câble solaire.

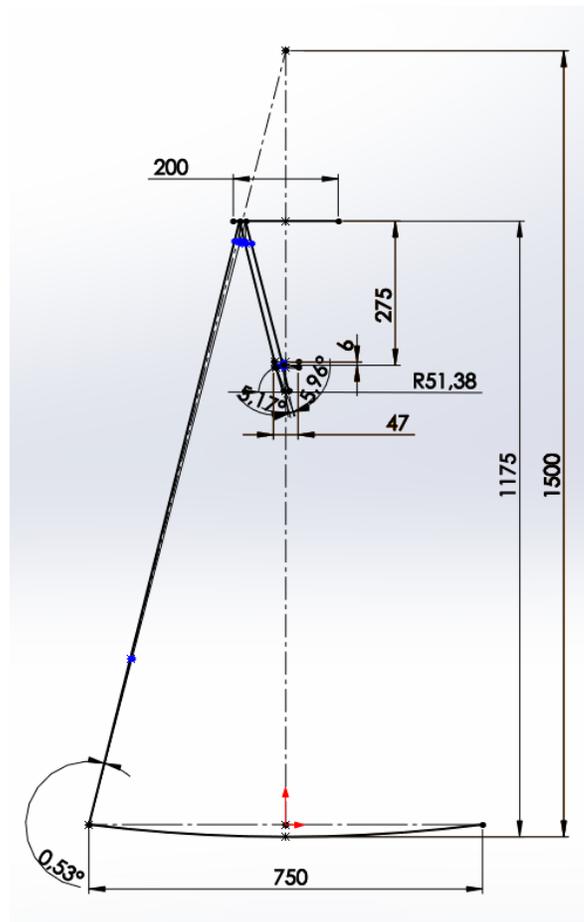


Figure 11: Esquisse *SolidWorks* utilisée comme référence pour la conception d'*ECOsends*

Afin de s'assurer de bien répondre à toutes les problématiques de la conception mécanique, une division fonctionnelle est d'abord réalisée. Cette approche permet de séparer les objectifs et de réaliser le projet par section sans s'écarter de la ligne directrice. L'assemblage de toutes ces parties permet d'obtenir un prototype du système *ECOsends*. Les parties considérées sont :

1. Les concentrateurs solaires constitués des éléments suivants :
  - (a) Le support du miroir primaire
  - (b) Le support du miroir secondaire
  - (c) Le support du guide d'ondes

- (d) L'assemblage du télescope
- 2. La plateforme de support des concentrateurs solaires
- 3. Le système de poursuite solaire
- 4. Le quadripied pour l'installation semi-permanente du système

La suite de ce chapitre traite de la conception de chacune des sections individuellement.

### 2.2.1 Conception des concentrateurs solaires

Un des buts de la conception d'*ECOsends* est d'avoir un système suffisamment flexible pour faire de l'expérimentation en parallèle. Bien qu'il aurait été possible de concevoir un système avec un seul concentrateur, un tel design aurait été peu pratique lors des périodes expérimentales. De plus, il est prévu à moyen terme de développer différentes applications utilisant l'énergie sortant du câble solaire. Les périodes d'ensoleillement étant courtes dans le nord-est du Canada, il sera pratique d'avoir plusieurs expériences simultanées. Il est donc entendu qu'*ECOsends* portera trois concentrateurs solaires identiques, mais indépendants. Les concentrateurs solaires ont une configuration se situant entre un télescope de type Cassegrain et celui de type Newton, comme définis préalablement. Les principales composantes mécaniques de ce système sont les supports du miroir primaire, du miroir secondaire et du guide d'ondes (câbles solaire) en plus de l'assemblage du télescope.

#### Support du miroir primaire

Le support du miroir primaire est la composante la plus complexe du système pour différentes raisons. Dans un premier temps, le miroir utilisé est de qualité astronomique. Afin de réduire les coûts et ayant des besoins moins élevés qu'un télescope d'observation, le miroir a été fabriqué dans une plaque de verre relativement mince pour son diamètre. Ce type de composante optique doit être supporté de façon à éviter l'astigmatisme et autres

déformations possibles. De plus, le support doit permettre deux degrés d'ajustement, soit le tangage et le roulis. Lors de l'ajustement, les contraintes sur le miroir ne doivent pas changer. Ces ajustements permettent d'obtenir la collimation du flux lumineux si la structure présente des défauts de fabrication. Une mauvaise collimation donne un point focal ovale et localisé en dehors de la zone prévue. Finalement, le support du miroir primaire doit inclure des points d'attache pour se fixer sur la structure des télescopes.

La technique la plus fréquente pour supporter la masse d'un miroir d'astronomie est d'utiliser une cellule passive. Ce type de cellule utilise une multitude de points d'appui qui sont équilibrés via des bras de levier. L'effet recherché est une répartition uniforme des efforts à chacun des points de contact. En respectant des groupes de deux ou de trois points d'appui par pivot, il est possible d'avoir des combinaisons de 3, 6, 9, 18 ou 27 points d'appui équilibrés. Théoriquement, il n'y a pas de limite au nombre de points d'appui, mais le gain entre chaque palier diminue de manière exponentielle. Déterminer analytiquement la configuration optimale et le nombre de points d'appui nécessaires est une tâche complexe. Heureusement, il existe certains logiciels spécialisés pour résoudre ces calculs. *GuiPlop* est un logiciel gratuit utilisé énormément dans le monde de l'astronomie amateur et réputé pour donner des solutions satisfaisantes. Ce programme évalue les déformations de la surface réfléchissante d'un miroir via la méthode des éléments finis. Il suffit d'y entrer les paramètres du miroir et le nombre de points de supports désirés. Le programme itère sur la position des points jusqu'à l'obtention d'une déformation minimale du miroir. Une fois l'extremum atteint, la dimension des supports est générée. Selon le *LRIO*, le maximum acceptable en déformation P-V (*Peak-Valley*) pour le projet solaire est de  $10\lambda$ . Les essais dans *GuiPlop* donnent une cellule de 9 points d'appui comme étant une solution satisfaisant les critères. Toutefois, et comme mentionné précédemment, le collecteur solaire à développer doit être très performant pour ne pas limiter les expériences menées sur la fibre. Il a donc été choisi d'utiliser une cellule un peu plus rigide de 18 points. La figure 12 montre le résultat de simulation (à gauche) et le positionnement des pivots et des points d'appui (à droite). Les dimensions précises de ces points sont données dans le logiciel.

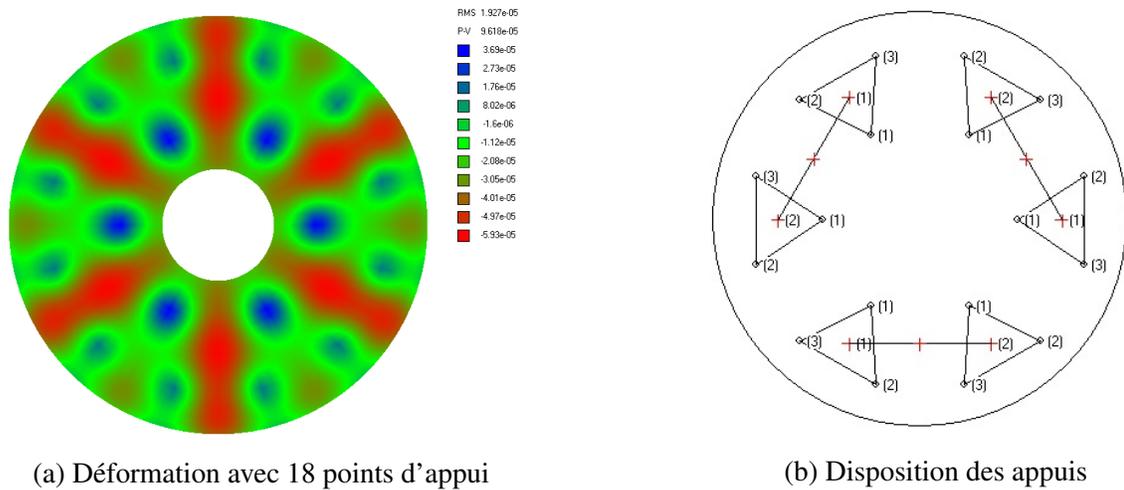


Figure 12: Simulation avec *GuiPlop* de la déformation du miroir sous l'effet de la gravité, en position horizontale et supporté par 18 points d'appui

Les résultats montrés dans la figure 12 sont la référence de base pour les cellules de support du miroir primaire. Les 18 points d'appui sont localisés aux coins de six triangles. Des coussins de feutre sont ajoutés pour réduire le risque de bris des miroirs. Suite au projet, il a été conseillé d'utiliser des rondelles de Delrin, puisque celles-ci ne se compresseront pas sous la masse du miroir, tout en étant sans risque pour le verre. Ces triangles sont installés sur des rotules qui sont fixées aux extrémités de bascules. Afin de diminuer l'effort de fabrication et pour rendre le support plus compact, les bascules sont encastrées à l'intérieur du cadre. L'image 13 permet de voir une coupe de la bascule pour bien illustrer l'encastrement.

Dans l'ensemble du système mécanique, le miroir primaire est la référence initiale pour l'alignement. Toutefois, il reste des incertitudes sur la précision du support une fois soudé et sur l'installation du miroir dans son support. La cellule de support, qui tient le miroir de manière statique, est donc attachée sur la structure du télescope à l'aide d'une série de rondelles Belleville entre chaque point d'appui. Ceci permet d'avoir l'ajustement décrit précédemment.

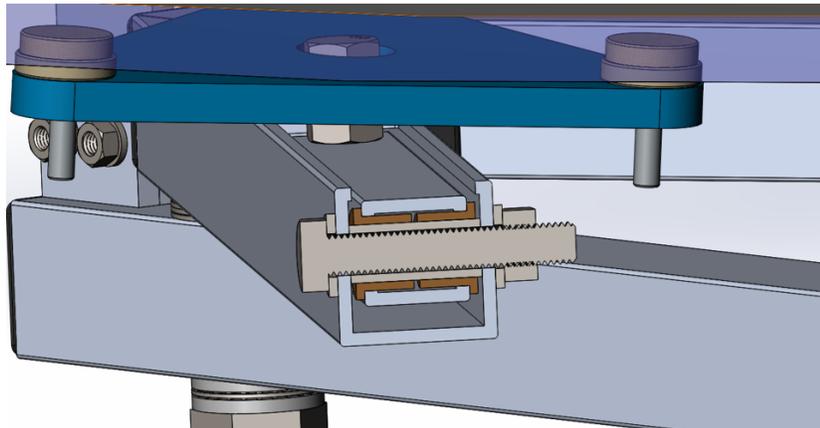


Figure 13: Encastrement des bascules pour la cellule de 18 points d'appui

Afin de respecter les dimensions du design optique, les rondelles sont initialement complètement écrasées. Il est possible de relâcher la pression dans un des trois coins du support pour permettre à la cellule de changer d'angle afin d'être bien centrée sur le miroir secondaire. La figure 14 montre un rendu d'un des points de pivot. À noter que l'ajustement influence légèrement la distance primaire-secondaire.

Finalement, le miroir primaire est soutenu latéralement par trois bascules également espacées. Le point de pivot des deux du bas est fixe, permettant au miroir d'être centré dans la structure. Celui du haut est installé dans un trou oblong pour faciliter l'installation et l'entretien du miroir. Au final, l'assemblage est réalisé en quasi-totalité par découpe laser de tubes et de plaques, à l'exception de l'usinage des rotules et de la soudure des tubes. La figure 15 montre un rendu du derrière du support, incluant le miroir.

### Support du miroir secondaire

Le miroir secondaire est plus simple à supporter que le miroir primaire, principalement car le ratio entre sa masse et son épaisseur est plus faible. Le rôle de ce miroir est simplement de rediriger la projection de lumière du miroir primaire vers la lentille du câble solaire, il n'ajoute pas de concentration supplémentaire. Lors du design initial, il a été amené par le

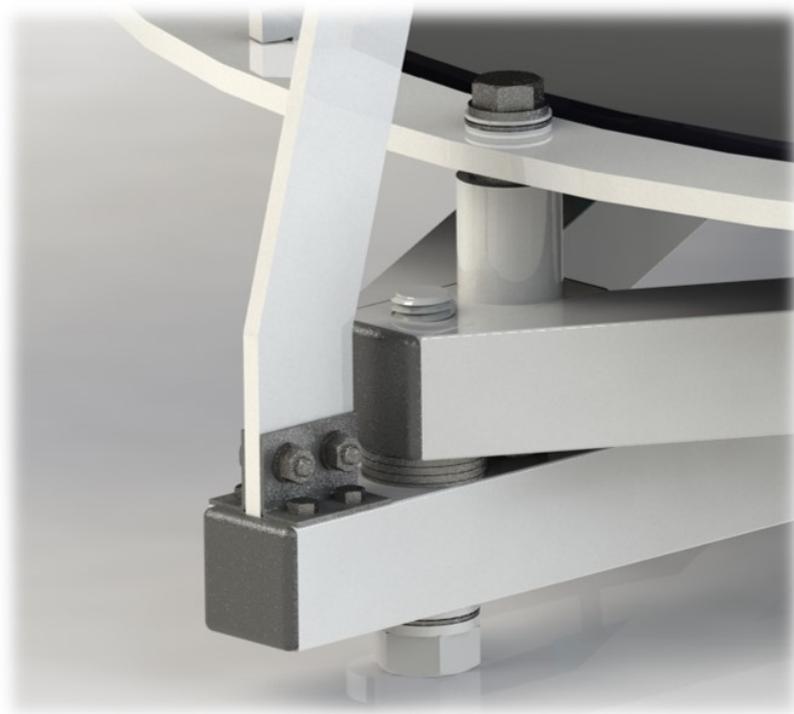


Figure 14: Zone de jonction et d'ajustement de la cellule du primaire sur le télescope

fournisseur de miroir que la focale du miroir primaire pourrait varier de  $\pm 2\text{cm}$  entre chacun des miroirs, le processus de fabrication étant encore partiellement artisanal. Le support du miroir secondaire a donc un ajustement en piston de  $5\text{cm}$  pour palier à cette problématique. En plus de cet ajustement, quatre vis ont été ajoutées pour permettre l'ajustement angulaire, semblable au primaire. Le miroir lui-même repose sur des bandes de latex qui pallient aux imperfections de surface de la plaque d'aluminium et est soutenu par quatre cornières. Une rotule permet de joindre la plaque de rétention du miroir et la plaque qui se fixe au télescope. La figure 16 montre une vue isométrique de la version finale du support.

Bien que le support du secondaire soit fonctionnel sur le prototype développé, il y a quelques modifications qui sont de mise et qui ont été ajoutées sur une version ultérieure du projet. Premièrement, quatre vis d'ajustement est problématique et un modèle à trois vis est largement supérieur en terme de facilité d'utilisation. La seconde modification est au niveau

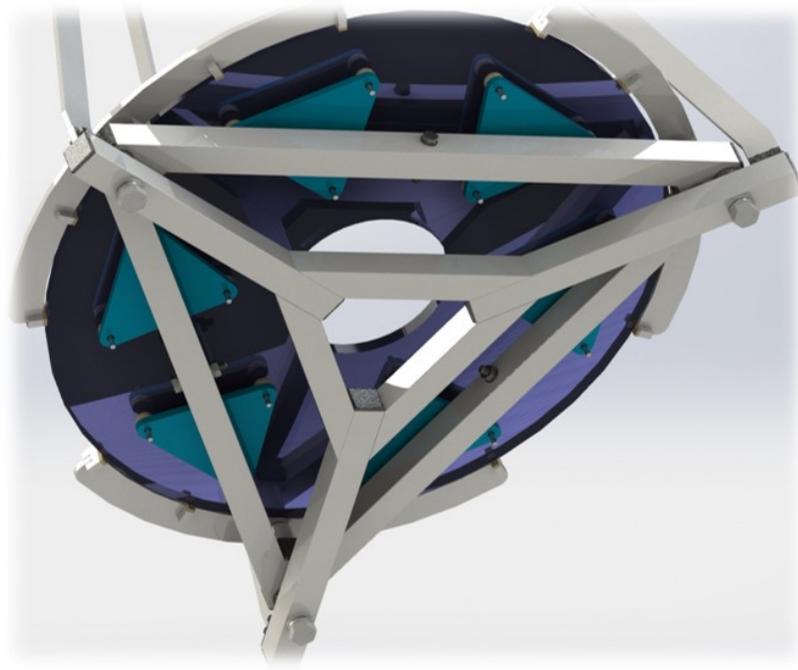


Figure 15: Vue arrière de la cellule du miroir primaire

de l'ajustement longitudinal. Actuellement, les deux types d'ajustement présents sur le secondaire ne sont pas indépendants. L'ajustement en piston devient donc une tâche complexe. L'équipe a fini par retirer l'ajustement longitudinal du secondaire et ajouter des rondelles Belleville au tube de support du câble solaire, présenté dans la prochaine section. Le support du miroir secondaire du télescope version 2.0 comporte donc deux ajustements, soit ceux de l'angle. La variation de la longueur focale du primaire est palliée par une compression plus ou moins importante des rondelles Belleville soutenant le câble solaire.

### **Tube de support du câble optique**

Le câble optique est essentiellement un tube de verre avec les fibres optiques fusionnées et collées à l'intérieur. Cet assemblage fragile doit être supporté d'une certaine manière, permettant un certain ajustement et une solidité. Le support a été réalisé par l'équipe de la *CERCP* afin de s'assurer que leurs besoins sont bien couverts. Le tube de verre est inséré dans

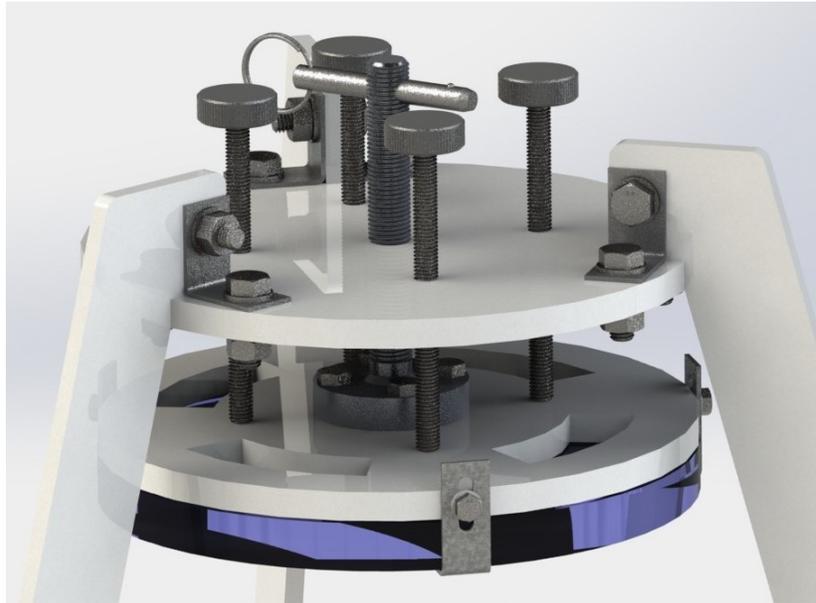


Figure 16: Vue isométrique du support du miroir secondaire

un tube d'aluminium, ouvert sur toute sa longueur. Une couche de caoutchouc est installée pour éviter un contact trop dur entre le métal et le verre. Ce tube d'aluminium est attaché sur le télescope de manière indépendante du miroir primaire et du miroir secondaire. Initialement, le tube devait être statique, mais comme mentionné dans la section précédente, des rondelles Belleville ont remplacés les entretoises pour faciliter son ajustement.

### **Assemblage du télescope**

Le télescope, aussi appelé concentrateur solaire dans notre cas, est un assemblage des trois sous-composantes décrites précédemment, soit le primaire, le secondaire et le câble optique. Outre de respecter les dimensions établies, cet assemblage doit être rigide et ne doit pas subir de déformations significatives lors de son utilisation. De plus, le télescope au complet doit être ajustable par rapport à la plateforme solaire afin d'avoir le pointage optimal. La figure 17 montre l'assemblage final du télescope.

Une des problématiques observées est au niveau des vibrations. De manière statique, le

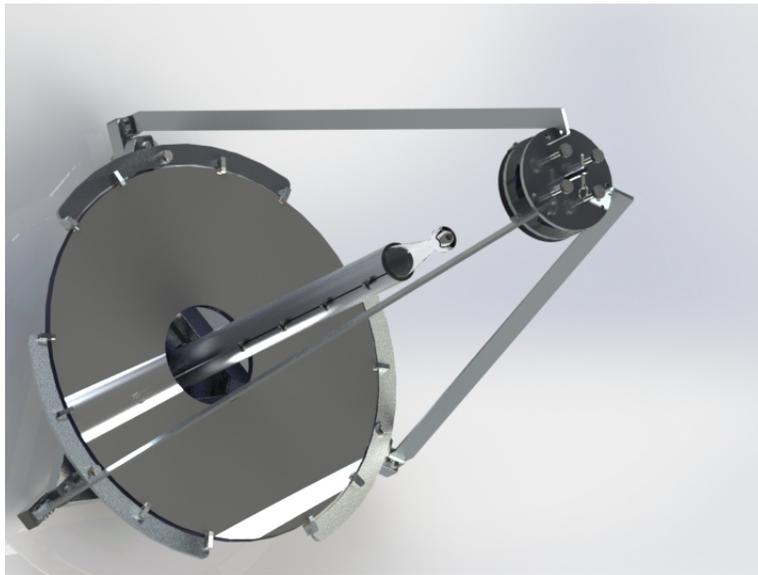


Figure 17: Vue isométrique d'un télescope

système respecte les tolérances de déflexion acceptable. Toutefois, les trois supports reliant la base et le miroir secondaire sont fabriqués à partir de plaques d'aluminium de  $6,35\text{mm}$  d'épaisseur. Lors d'un passage de vent ou d'une accélération, comme lors du mouvement du système pour la poursuite solaire, le secondaire vibre par rapport au primaire et ce, de manière problématique. Ce sont ces trois supports qui présentent un problème face à la vibration. Afin de remédier temporairement à cette situation, des câbles ont été tendus entre le secondaire et le primaire afin de rigidifier l'ensemble et d'éloigner la fréquence naturelle du système de celle du vent. Dans la seconde version du projet, la combinaison de plaques et de câbles a été remplacée par des tubes carrés offrant une bien meilleure rigidité et un fini plus professionnel.

### 2.2.2 Conception du système de poursuite solaire

La poursuite solaire est l'action de pointer, en temps réel, tout les concentrateurs dans la direction du vecteur solaire. Comme présenté dans la revue de littérature dans le premier chapitre, il existe différentes méthodes pour y arriver, tant au niveau de l'algorithme que de la configuration mécanique et de la méthode de mouvement. L'algorithme utilisé est couvert

en détail dans le troisième chapitre du mémoire. Pour cette section, le focus est mis sur les composantes et la configuration mécanique permettant d'atteindre le résultat désiré. Le but est d'utiliser un système le plus près possible d'une solution clés en main afin de réduire le temps de développement et de se rapprocher d'une implantation industrielle.

Il est donc décidé d'utiliser une monture de type Altitude-Azimut, où les deux axes se déplacent simultanément pour suivre la trajectoire du soleil. Ce type de système a l'avantage de ne pas limiter la taille de la charge utile et d'être léger, compact et disponible en différentes configurations sur le marché. La solution retenue est celle qui offre le maximum de simplicité, soit le *dual axis slew drive*. Cette technologie est la plus simple et comme discuté en revue de littérature, elle diminue le risque d'avoir des axes de zénith et d'azimut non perpendiculaires, puisque la technologie est moulée et usinée dans un bloc d'acier par le fournisseur. Des différentes compagnies approchées, il y avait deux candidats proposant un produit répondant aux critères de sélection. Toutefois, le délai exigé entre la première rencontre de projet et la mise en service initiale d'*ECOsends* était de six mois. Il y avait donc seulement un fournisseur, *H-Fang*, permettant de maintenir les délais. Le *dual axis slew ring* pose, toutefois, deux problèmes qui doivent être pris en considération lors de la conception.

Le premier est au niveau du parcours de la plateforme lors du mouvement en zénith. Lorsque le système pointe vers le zénith, aucun problème n'est perceptible. Par contre, lorsqu'*ECOsends* pointe l'horizon, il y a deux scénarios possibles : soit la plateforme entre en collision avec le *dual axis slew drive*, soit la plateforme est installée en porte à faux et le moteur en élévation doit fournir un effort considérable pour soulever la masse. Généralement, la seconde option est utilisée. Par contre, la charge des systèmes solaires communs est un assemblage de panneaux photovoltaïques. Ceux-ci sont légers et la masse totale en porte-à-faux est faible. Dans le cas d'un système de concentration optique, le portrait change considérablement. La masse des miroirs et la longueur des télescopes apportent une contrainte élevée et un surdimensionnement mécanique et électrique serait de mise. Heureusement, il existe une variante de la première configuration communément appelée *Tilt and Swing*. En effet, il est

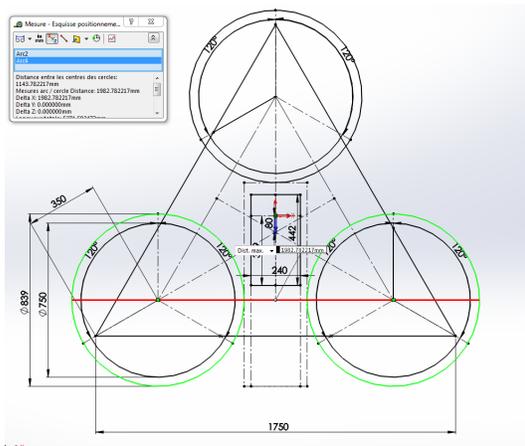
possible de mettre le centre de gravité de la charge utile et de la plateforme vis-à-vis du centre de rotation de l'axe du zénith. Dans le cas d'*ECOsends*, le résultat est une localisation des miroirs primaires à environ 30cm en dessous de l'axe de rotation lorsque le système pointe au zénith. Toutefois, cette configuration vient avec un prix : il n'est pas possible d'avoir de charge utile dans la trajectoire en zénith, au risque d'avoir une collision entre la plateforme de support et le *dual-axis slew drive*. Pour un projet où l'espace au sol doit être optimisé au maximum, une autre solution devra être envisagée.

Le second problème vient du jeu mécanique présent dans la transmission. Puisqu'en azimut le mouvement est unidirectionnel et constant, ce jeu ne pose pas ou peu de problème. Seul des conditions de vent violent peuvent déplacer le système sur son axe et induire une erreur. Par contre, l'axe d'élévation bouge dans deux directions et déplace, au cours de la journée, le centre de gravité. Si, comme décrit dans le paragraphe précédent, le centre de gravité est localisé directement sur l'axe de rotation en élévation, alors le système est en équilibre et le moindre coup de vent peut le faire bouger d'un extrémité à l'autre au niveau du jeu mécanique de la transmission. Pour régler ce problème, un décalage volontaire du centre de gravité par rapport à l'axe de rotation est implanté. La figure 18 de la section suivante montre le décalage, vu de dessus, des trois miroirs par rapport au *dual-axis slew drive*. Durant les périodes expérimentales, un des trois miroirs primaires n'a pas été installé. Cette variation dans la masse apporte un déséquilibre lors du mouvement et de temps à autre, pose problème lors de la poursuite solaire. Cette considération sera d'avant plan lors de la conception de la prochaine génération d'*ECOsends*.

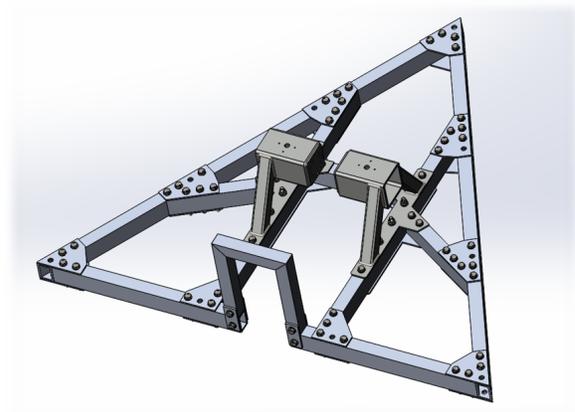
### 2.2.3 Conception du cadre de support et de la base

Afin de supporter les télescopes et de les joindre à la plateforme de poursuite solaire, un cadre démontable doit être conçu. Cette composante, outre sa rigidité, n'a pas de fonction supplémentaire. Un processus itératif a permis de diminuer la surface au minimum. La figure 18 présente l'esquisse réalisée dans le logiciel *SolidWorks*. Cette dernière permet d'évaluer

toutes les mesures nécessaires d'un coup. Bien que le cadre semble surdimensionné avec ses tubes d'aluminium rectangulaire, il ne l'est pas en réalité. Comme couvert dans la section suivante, le dimensionnement des composantes est effectué à l'aide de la déformation et non avec le coefficient de Von Mises. Le facteur de sécurité est généralement très élevé afin d'atteindre la précision requise. Puisque le système doit être démontable et compact, un assemblage boulonné est choisi pour faire tenir les composantes ensemble.



(a) Esquisse de positionnement des miroirs



(b) Cadre de soutien des concentrateurs

Figure 18: Cadre de soutien des concentrateurs solaires

Les sections ultérieures ont permis de décrire ce qu'est la charge utile et son support, en plus du système de *dual-axis slew drive* utilisé pour suivre le soleil. Toutefois, la localisation et la composition du site d'installation d'*ECOsends* est incertain et ce dernier peut être modifié au fil du temps. De plus, il n'y a pas nécessairement de base de béton au sol, comme dans la plupart des projets de parc solaire. Il est donc primordial que le système soit supporté pas une structure permettant la mise au niveau sur différents terrains. Cet assemblage doit aussi être suffisamment stable pour prévenir le chavirement lors de vent violent. Comme les autres composantes, le support (base) est démontable pour faciliter le transport. La transmission choisie demeure un risque dans le projet et il est important de pouvoir la changer sans avoir à refaire une partie importante du système. Un connecteur interchangeable est donc ajouté

entre la base et le *dual-axis slew ring*. Le système final est montré dans la figure 21 à la fin de ce chapitre.

### 2.3 Dimensionnement du système *ECOsends*

Les sections précédentes ont permis de mettre en place les grandes lignes de la conception d'*ECOsends*, que ce soit par la définition des géométries ou par l'interaction des composantes entre elles. Afin de rendre ce concept une réalité, il est important de dimensionner chacune des composantes comme il se doit. Il est aussi primordial de garder en tête que cette version du système est un prototype de première génération, il n'est donc pas nécessaire de faire une optimisation des pièces. Cette section de chapitre couvre la méthode de dimensionnement des composantes critiques et met de l'avant les besoins réels.

En ce qui a trait au système électrique de poursuite solaire, seul la puissance des moteurs est à déterminer puisque le panneau de contrôle, incluant l'électronique de puissance, est réalisé par une compagnie externe. Pour le projet actuel, les transmissions utilisées de type *dual axis slew drive* sont vendues avec un moteur préalablement installé. La fiche technique du produit sélectionné est disponible dans l'[annexe I](#). Le moteur est choisi par la compagnie selon le besoin du client. Il faut donc connaître les efforts s'appliquant sur la transmission.

La première étape du dimensionnement est l'évaluation des forces mécaniques mises en jeu. Celles qui s'appliquent à la transmission sont dues à la charge utile et à la plateforme de soutien des télescopes. Les composantes localisées sous la transmission n'ont pas d'influence pour le dimensionnement. La masse totale supportée par le *dual axis slew drive*, la position du centre de gravité de cette masse et la prise au vent sont les trois facteurs observés. L'inertie de la structure peut causer des problèmes dans certains systèmes, mais le mouvement du soleil est extrêmement lent et les efforts engendrés sont négligeables sur la structure. Ils ont toutefois un impact sur la poursuite solaire discutée dans le chapitre 3. Le tableau 2 présente les données nécessaires à l'évaluation des forces du vent sur la charge utile. À noter

Tableau 2: Données nécessaires au calcul des efforts mécaniques

<b>Paramètres</b>	<b>Valeur</b>	<b>Unité</b>
Surface normale au vent ( $A$ )	1,85	$m^2$
Vent en opération ( $V_{opération}$ )	50 (13,9)	$Km/h (m/s)$
Vent critique ( $V_{critique}$ )	100 (27,8)	$Km/h (m/s)$
Dist. CG-Pivot Y ( $D_{CG-Y}$ ) Pointe au zénith	-58	$mm$
Dist. CG-Pivot Z ( $D_{CG-Z}$ ) Pointe au zénith	-41	$mm$
Dist. CG-Base transmission ( $D_{CG-BT}$ ) Pointe à l'horizon	142	$mm$
Épaisseur de la plateforme ( $L_{plateforme}$ )	235	$mm$
Hauteur du support ( $H_{support}$ )	1,41	$m$
Vitesse max. solaire ( $V_{sol/max}$ )	0,25	$^{\circ}/min$
Vitesse min. solaire ( $V_{sol/min}$ )	0	$^{\circ}/min$
Masse de la charge suspendue ( $M_{suspendue}$ )	213	$Kg$
Masse totale ( $M_{totale}$ )	439	$Kg$
Coefficient de traînée d'une parabole ( $C_D$ )	1,4	-
Densité de l'air ( $\rho$ )	1,225	$Kg/m^2$
Viscosité dynamique de l'air ( $\mu$ )	$1,789e^{-5}$	$Kg/(m * s)$

que certaines données sont seulement utilisées pour le dimensionnement ultérieur des autres composantes.

La première grandeur à calculer est l'effort dû au vent. Pour un prototype, il n'est pas nécessaire de faire une simulation complète de type *CFD* (*Computational fluid dynamics*) pour obtenir une réponse exacte. L'approche utilisée permet d'avoir une estimation et est suffisante pour la première génération d'*ECOsends*. La surface face au vent, lorsque les concentrateurs pointent vers l'horizon, est approximée en utilisant une seule parabole équivalente de

1,85m<sup>2</sup>. Cette surface est obtenue en prenant en compte les dimensions hors-tout de la plateforme, incluant les miroirs primaires. Le paramètre recherché est la trainée créée par cette parabole. Elle peut être calculée selon l'équation (2.1) (White 2011), où les paramètres sont définis dans le tableau 2.

$$D = \frac{1}{2}C_D\rho V^2A \quad (2.1)$$

Toutefois, cette équation est seulement valide lorsque le nombre de Reynolds est supérieur à 10<sup>4</sup>. L'équation (2.2) permet l'évaluation de ce facteur avec les données présentées au tableau 2.

$$Re = \frac{\rho V_{opération}L_{plateforme}}{\mu} \approx 2,86 \times 10^5 > 10^4 \quad (2.2)$$

Il est donc correct d'utiliser la formule (2.1) pour calculer l'effort engendré par le vent. Comme présenté dans le tableau 2, deux forces de vent sont présentes, soit celle du vent en opération et celle du vent critique. Cette dernière force est utilisée pour s'assurer qu'aucun bris ni chavirement de la structure ne peut arriver lors d'une tempête. La première force, quant à elle, permet de s'assurer que le système ne subira pas de déflexion significative lors du fonctionnement. Ces deux forces sont évaluées selon les équations (2.3) et (2.4) suivantes :

$$D_{opération} = \frac{1}{2}C_D\rho V_{opération}^2A = 306,5N \quad (2.3)$$

$$D_{critique} = \frac{1}{2}C_D\rho V_{critique}^2A = 1226,1N \quad (2.4)$$

Considérant le vent comme étant horizontal, cet effort est ressenti lorsque la plateforme pointe vers l'horizon. Le centre de gravité correspond au centre de la plateforme et est décalé

vers le bas de 58mm par rapport au point de pivot en zénith. Le couple transmis au point de pivot du zénith et ce par la force du vent est donc :

$$T_{opération-zen} = D_{opération}D_{CG-Y} = 17,7Nm \quad (2.5)$$

$$T_{critique-zen} = D_{critique}D_{CG-Y} = 71,1Nm \quad (2.6)$$

Ces données sont pratiques pour s'assurer que le pivot en zénith a suffisamment de couple pour faire tourner la plateforme. Lors du scénario dans lequel le système pointe vers l'horizon, il faut ajouter au couple issu du vent celui engendré par la masse de la charge suspendue. Il se calcule à l'aide de l'équation (2.7).

$$T_{masse-horizon} = M_{suspendue}gD_{CG-Z} = 85,7Nm \quad (2.7)$$

En additionnant les résultats des équations (2.6) et (2.7), il est possible de vérifier que le couple total de 156,8Nm est inférieur au couple maximal en sortie de la transmission, soit 600Nm. Le facteur de sécurité est donc de 3,8. Si le système pointe vers le zénith, alors seulement la masse est mise en jeu et l'équation (2.7) devient l'équation (2.8), qui donne toujours une solution inférieure à la limite maximale donnée par la fiche technique de la transmission.

$$T_{masse-zénith} = M_{suspendue}gD_{CG-Y} = 121,2Nm \quad (2.8)$$

D'un autre côté, il est important de vérifier qu'une autre donnée n'est pas dépassée, soit le moment de chavirement vis-à-vis de la base du *dual axis slew drive*, appelé *tilting moment* dans la fiche technique. Le calcul est identique, toutefois la distance doit être ajustée. De

plus, le calcul du couple avec la vitesse de vent en opération n'est pas nécessaire, puisque cette donnée est utilisée pour assurer une résistance maximale et non pour avoir une déflexion acceptable dans le système. Donc, le couple critique est calculé comme suit :

$$T_{critique-az} = D_{critique}D_{CG-BT} = 174,1Nm \quad (2.9)$$

Le résultat obtenu dans l'équation (2.9) est inférieur à  $2000Nm$ , ce qui correspond à la valeur de la plus petite transmission disponible, la *WDE3* de la compagnie *H-Fang*. Finalement, il faut vérifier la charge axiale et radiale que subira le *dual axis slew drive*. La charge verticale est imposée par la force du vent et est inférieure aux  $15KN$  radiale et  $30KN$  axiale de la fiche technique, selon le type de roulement considéré. La charge horizontale est donnée par la masse de la charge suspendue multipliée par la gravité. Cette donnée est aussi inférieure aux limites de la transmission. Au final, le plus petit modèle de *dual axis slew drive* de la compagnie *H-Fang* est suffisant pour l'application d'*ECOsends*.

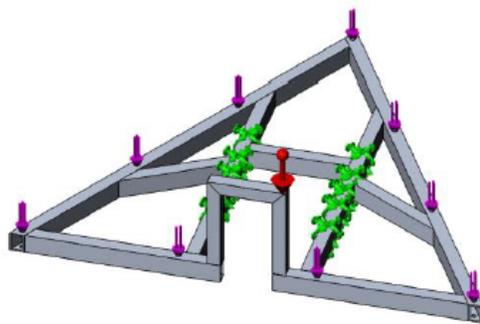
De la même manière que le moment de chavirement a été calculé en (2.9), il est important de s'assurer que la structure en entier ne bascule pas. En effet, *ECOsends* n'est pas boulonné au sol, il repose sur un quadripied. La largeur au sol du quadripied peut donc être calculée selon la formule (2.10). La base du support final est de  $0,75m$  de largeur. Cette valeur est plus élevée que le minimum requis pour obtenir un facteur de sécurité de presque 2. De plus, il est possible que la charge utile change avec l'expérimentation, la plateforme de support est donc conçue de manière plus robuste.

$$L_{q pied} = \frac{D_{critique}H_{support}}{M_{totale}g} = 0,4m \quad (2.10)$$

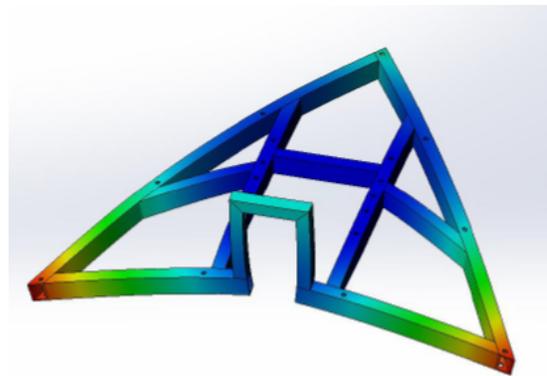
Où  $H_{support}$  est la hauteur du support.

La dernière section du dimensionnement du système concerne les efforts mécaniques engendrant des déflexions sur la partie mobile. Comme mentionné préalablement, le mouve-

ment de la structure est extrêmement lent et les efforts liés aux accélérations sont négligés. La force principale est donc la gravité. Comme couvert dans le troisième chapitre, les besoins de précision en poursuite solaire sont très élevés, soit de l'ordre d'un dixième de degré. Il est donc de mise que la déformation mécanique soit significativement inférieure à cette dimension. Le système doit pointer entre l'horizon et le zénith, le vecteur de gravité est donc variable durant la journée. Dans le cas d'*ECOsends*, les trois télescopes doivent rester dans le même axe malgré cette variation. La méthode des éléments finis (*MEF*) est utilisée pour vérifier le comportement des composantes critiques. Au final, la déformation des composantes est observée et transformée en erreur de pointage relative entre les trois télescopes. L'erreur angulaire due au champ gravitationnel est d'au maximum  $0,001^\circ$ . Cet erreur est la différence entre un télescope qui pointe au zénith et un qui pointe à l'horizon. La *MEF* a été utilisée pour vérifier le facteur de *Von Mises* sur les autres composantes afin de s'assurer de la solidité du prototype. La figure 19 présente une des composantes simulées, où une déflexion de  $0,3mm$  est observée.



(a) Chargement du cadre de support



(b) Déflexion du cadre de support

Figure 19: Déflexion du cadre de support calculée par la *MEF*

## 2.4 Fabrication, assemblage et mise en marche du système *ECOsend*s

La fabrication d'*ECOsend*s a été réalisée en majeure partie à l'*UQAR*. Les équipements disponibles à l'atelier mécanique permettent de faire l'usinage et la soudure des pièces d'acier et d'aluminium. Seul le quadripied a été réalisé à l'extérieur, principalement car aucune chambre de peinture n'est disponible sur place. Les composantes d'aluminium ont été découpées au laser à l'extérieur et assemblées sur place. La figure 20 montre la première étape de l'assemblage, incluant la réception des tubes, l'installation de la structure d'un télescope et une cellule de support d'un miroir primaire.

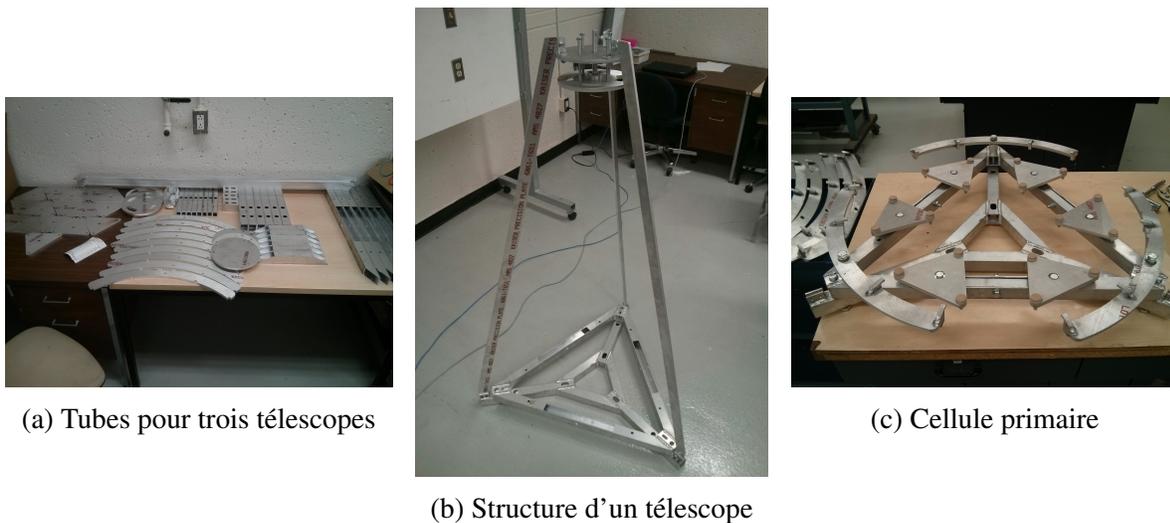


Figure 20: Début de l'assemblage des concentrateurs solaires

L'assemblage de l'aluminium a été fait avec une faible quantité de problèmes. Deux obstacles ont été présents : le manque de précision dans l'alignement des perçages sur la découpe au laser des tubes et les soudures prenant plus d'espace que prévu sur les plans. Le processus de découpe au laser est rapide, précis et peu coûteux pour obtenir des pièces variées. Cependant, le processus de découpe laser des tubes est un peu plus récent. La pièce est installée sur un mandrin rotatif et le laser effectue les coupes sur chacune des faces à tour de rôle. Dans le projet actuel, le centrage du laser n'a pas été effectué correctement, résultant

en un décalage de la position des perçages d'un trou face à l'autre. Les trous ont dû être refaits par usinage avec une dimension plus grande et la boulonnerie a été ajustée du même coup. En ce qui a trait aux soudures, certains cordons étaient significativement plus larges que demandé, ce qui a nui à l'insertion de quelques composants. Ces deux problématiques n'étaient pas inquiétantes et sont généralement attendues lors de la fabrication d'un prototype à usage unique.



(a) Quadripied d'*ECOsends*



(b) Assemblage pré-transport d'*ECOsends*

Figure 21: Assemblage final d'*ECOsends* avant le transport vers le *COPL* pour son installation

La base d'acier peinte a été livrée clés en main. La figure 21 montre la base incluant la transmission, ainsi que l'assemblage final des télescopes. Le site de l'installation semi permanente choisi est sur une terrasse localisée sur le toit du deuxième étage du *COPL*, à l'université Laval. Elle a été construite initialement pour l'expérimentation et est recouverte d'un épais tapis de caoutchouc réduisant les vibrations. Son orientation est au sud-ouest et

outre un bref moment au lever du soleil, il n'y a aucune obstruction durant la journée. Une vidéo de l'assemblage d'*ECOsend*s et de la première période d'essai est accessible en ligne <sup>1</sup>. La figure 22 montre le système terminé et en action.



Figure 22: *ECOsend*s en fonction lors de l'automne 2017

Avant même la mise en marche initiale, un problème de rigidité a été décelé sur les télescopes. En effet, le support du miroir secondaire vibrait énormément, engendrant un faible désalignement des composantes. L'ajout de câbles d'acier pour rigidifier la structure a permis de régler ce problème, éloignant du même coup la fréquence naturelle du système de celle du vent. Un système de collimation à trois lasers a été usiné et calibré au COPL. Ce dernier a été utilisé, entre autres, pour vérifier que la structure mécanique maintient l'alignement des composantes dans différentes inclinaisons. L'assemblage final répond aux besoins du projet.

---

1. <https://www.youtube.com/watch?v=uHfmYDNrudo>

## 2.5 Conclusion

Ce chapitre du mémoire a permis de couvrir plusieurs points importants. Tout d'abord, la collection et l'injection de la lumière solaire dans le câble de fibres optiques se fait avec un niveau de concentration très élevé, soit de 5800x. Il faut un miroir parabolique F/2 de 750mm de diamètre, couplé à une lentille sphérique afin d'obtenir ce résultat. La technique d'injection développée par la *CERCP* permet de conduire la lumière avec une bonne efficacité en utilisant un nombre de fibres réduit. Afin d'accommoder ce système optique unique, une analyse fonctionnelle a été réalisée. *ECOsends* se divise en quatre parties principales, soit les télescopes, le support principal, le système de poursuite solaire et le quadripied. La méthode d'analyse par éléments finis a permis d'estimer que les erreurs dues aux déformations mécaniques sont d'environ 0,001 degré. La fabrication, quant à elle, a permis de déceler et de régler une problématique importante, omise dans l'analyse du modèle : les vibrations mécaniques. Au final, la structure mécanique a été mise à l'épreuve avec une plaque d'ajustement laser. La suite du mémoire couvre l'enjeu de la poursuite solaire, expliquant la nécessité d'un suivi de précision en tout temps et la méthode utilisée pour y arriver.



## CHAPITRE 3

### ALGORITHME DE POURSUITE SOLAIRE

#### 3.1 Introduction

Le chapitre précédent a permis de bien comprendre les facteurs d'influence de la conception mécanique d'un système de concentration et de poursuite solaire. Toutefois, un bon système mécanique peut donner des résultats décevants s'il est joint à une méthode de suivi solaire de faibles performances. À l'inverse, un système mécanique d'entrée de gamme peut donner des résultats de poursuite solaire surprenants en étant combiné avec un algorithme performant. Bien que le système *ECOsends* soit mécaniquement très rigide, les tolérances de fabrication et la qualité du groupe moteur-transmission se rangent plutôt du côté de l'entrée de gamme. En effet, la découpe laser permet une fabrication rapide et relativement précise, mais le résultat demeure loin de l'usinage réalisé par une machine-outils à commande numérique moderne. En ce qui a trait à la transmission, elle est probablement une des plus abordables sur le marché, mais vient avec un jeu mécanique d'environ  $0.1^\circ$ .

Le but de ce chapitre du projet est de développer un algorithme de poursuite solaire simple et précis permettant d'atteindre l'objectif initial de précision, soit  $\pm 0,1^\circ$  d'erreur. La justification du besoin de haute précision, l'algorithme développé, l'implantation pratique de cet algorithme et les résultats obtenus sont présentés dans les sections suivantes.

#### 3.2 Importance du suivi solaire de haute précision

Avant d'analyser en profondeur les méthodes de poursuite solaire, il est bon de prendre le temps d'expliquer d'où vient la nécessité d'un système de poursuite solaire précis. Après tout, un système pour panneaux photovoltaïques avec  $\pm 1^\circ$  d'erreur est régulièrement utilisé

dans le monde industriel. Même un panneau photovoltaïque concentré n'a pas d'avantage à utiliser un suivi de très haute précision, puisque qu'en dessous de  $\pm 0,8^\circ$  d'erreur, il n'y a pas de différence significative sur le rendement (Oh et al. 2015).

Dans le cas de l'injection de lumière dans un câble de fibres optiques, la situation est différente. En laboratoire, l'injection est réalisée avec des outils de connexion pour assurer un alignement des fibres et des faisceaux lumineux. Dans le cas de la concentration solaire, un mauvais alignement de la plateforme avec le vecteur solaire peut résulter en une problématique majeure : l'image du soleil n'est pas projetée sur l'ouverture numérique du câble optique, comme présenté à la figure 23.

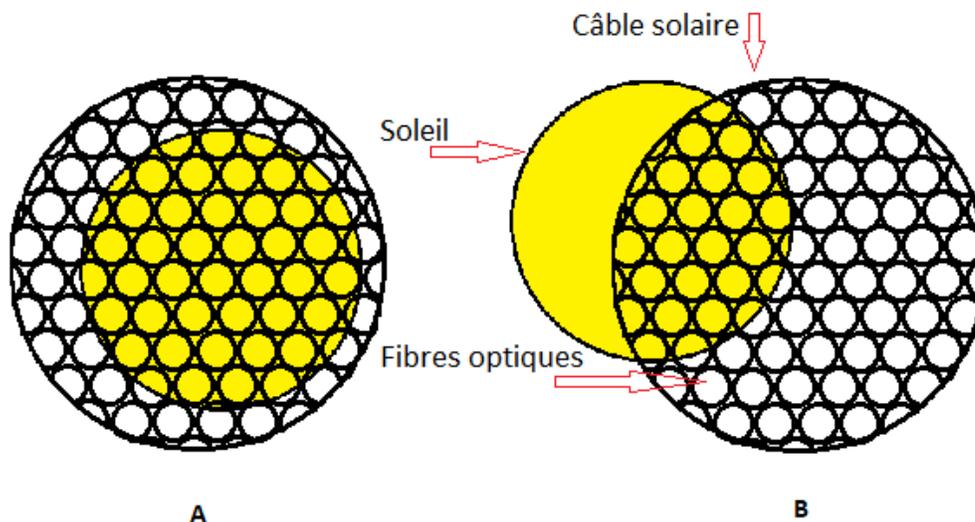


Figure 23: Image du soleil sur l'entrée du câble solaire : bon positionnement en A et mauvais positionnement en B

Toute la partie de l'image localisée à l'extérieur du câble solaire en B est de la puissance directement perdue. Contrairement aux autres pertes du système comme celles des réflexions et de la transmission dans le guide d'ondes, cette puissance peut être évitée complètement. La distance entre le centre du câble solaire et le centre de l'image du soleil donne l'erreur de poursuite en unité de longueur. Ici, par exemple, l'image du soleil est de 10mm de diamètre.

Si le câble solaire est de  $10mm$  de diamètre exactement, il n'y aura aucun jeu possible sur l'erreur de poursuite solaire. Une telle configuration résulterait en des pertes considérables, car un suivi parfait n'est pas possible. Il faut donc surdimensionner le câble solaire pour couvrir, entre autres, l'erreur de positionnement par rapport au vecteur solaire. Pourquoi alors ne pas utiliser un système commercial avec une précision de  $\pm 1^\circ$  ?

En considérant  $r$  comme le rayon de l'image du soleil,  $R$  comme le rayon du câble solaire et  $\Delta_{max}$  comme l'erreur de poursuite maximale tolérée, alors le rayon du câble solaire devient défini par l'équation (3.1).

$$R = r + \Delta_{max} \quad (3.1)$$

et sa surface  $S$  par l'équation (3.2) suivante :

$$S = \pi \times (r + \Delta_{max})^2 \quad (3.2)$$

Généralement, la précision d'une plateforme de poursuite solaire est angulaire et non longitudinale. La longueur focale des concentrateurs d'*ECOsends* est de  $1500mm$ . L'équation (3.3) permet de transférer l'erreur de suivi angulaire maximale  $\theta_{max}$ , vers la variable  $\Delta_{max}$ .

$$\Delta_{max} = 1500mm \tan(\theta_{max}) \quad (3.3)$$

La surface du câble nécessaire pour que l'image du soleil soit toujours localisée dans l'ouverture numérique du câble optique est obtenue en combinant l'équation (3.2) et (3.3).

$$S = \pi \times (r + 1500mm \tan(\theta_{max}))^2 \quad (3.4)$$

En considérant que le câble actuel de 13,5 mm de diamètre contient 475 fibres optiques de 600  $\mu\text{m}$  de diamètre, il est possible de tracer une courbe représentant le nombre de fibres optiques par câble en fonction de l'erreur angulaire de poursuite solaire. La figure 24 montre ces résultats jusqu'à 1° d'erreur.

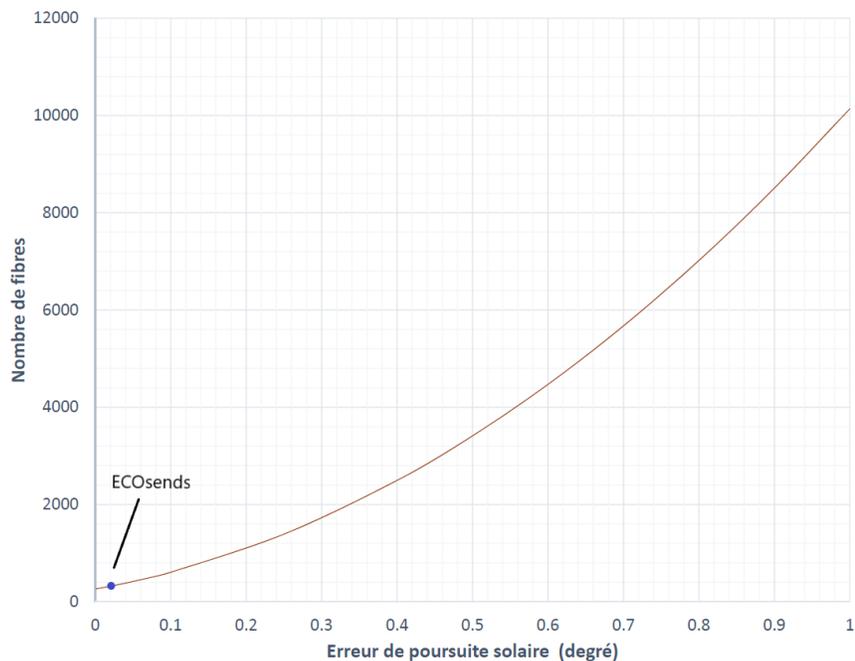


Figure 24: Nombre de fibres optiques en fonction de l'erreur angulaire de poursuite solaire

Il est à noter qu'actuellement, le coût de la fibre de silice de haute qualité utilisée est d'environ 1\$/m. Pour un câble de dix mètres comme celui utilisé, le coût est donc de 4750 dollars. En utilisant une poursuite solaire de  $\pm 1^\circ$  d'erreur, le coût serait de 101 370 dollars, ce qui est totalement inacceptable pour un déploiement commercial. Comme présenté dans la section des résultats de ce chapitre, l'erreur de  $\pm 0,1^\circ$  a été surpassée. Il serait possible de faire un câble avec seulement 250 fibres, réduisant ainsi le coût à 2500 dollars par câble de dix mètres. À noter que d'autres avenues sont étudiées pour le moyen et long terme dans le but de réduire le coût des câbles optiques. Considérant l'importance d'une poursuite solaire de précision, les sections suivantes présentent la méthode utilisée, l'implantation et les résultats obtenus.

### 3.3 Sélection de l'algorithme de poursuite solaire

Comme mentionné dans la revue de littérature, il existe deux grandes familles de suivi solaire : la méthode continue et celle par échelon. La méthode continue est une technique où les moteurs de suivi solaire sont toujours actifs pour minimiser l'erreur. Cette technique est généralement utilisée dans le milieu industriel avec un algorithme d'asservissement de type *PID* ou avec une variante de ce dernier. Toutefois, la position du soleil change extrêmement lentement et un *PID* semble superflu pour atteindre l'objectif fixé de  $\pm 0.1^\circ$  d'erreur. Il a donc été décidé d'explorer l'autre alternative, soit la méthode de poursuite par échelon.

Cette méthode consiste à utiliser l'erreur acceptable fixée du système comme élément déclencheur des moteurs. Par exemple, l'erreur acceptable en azimut peut être de  $\pm 0.1^\circ$ . Lorsque le soleil devance le système de pointage au niveau de l'erreur acceptable, le système de poursuite démarre et devance à son tour le soleil et ce, par la même marge d'erreur acceptable. Le système mécanique revient en état statique et le cycle recommence. En fait, cette technique est utilisée dans la majorité des systèmes disponibles commercialement ([Prinsloo 2015](#)). La figure 25 démontre la position du soleil en rose et celle du système mécanique en bleu.

Cette technique a toutefois certaines limitations, principalement liées à la méthode dont l'erreur acceptable est mesurée. Dans le mémoire de G. Prinsloo ([Prinsloo et al. 2014](#)), un automate *Siemens* est utilisé afin de réaliser la poursuite solaire. Avant 2015, *Siemens* offrait une solution clés en main avec une revendication de précision de  $\pm 0.05^\circ$  d'erreur en utilisant un automate de la série S7-1200. Cet automate utilise une poursuite solaire par échelon en boucle ouverte basée sur l'algorithme *NRELSPA*, discuté préalablement dans la revue de littérature. Cet algorithme permet de calculer la position du soleil avec une précision de  $\pm 0.0003^\circ$  d'incertitude ([National Renewable Energy Laboratory 2004](#)). Toutefois, plusieurs facteurs entrent en compte et influencent la précision de cette méthode de calcul.

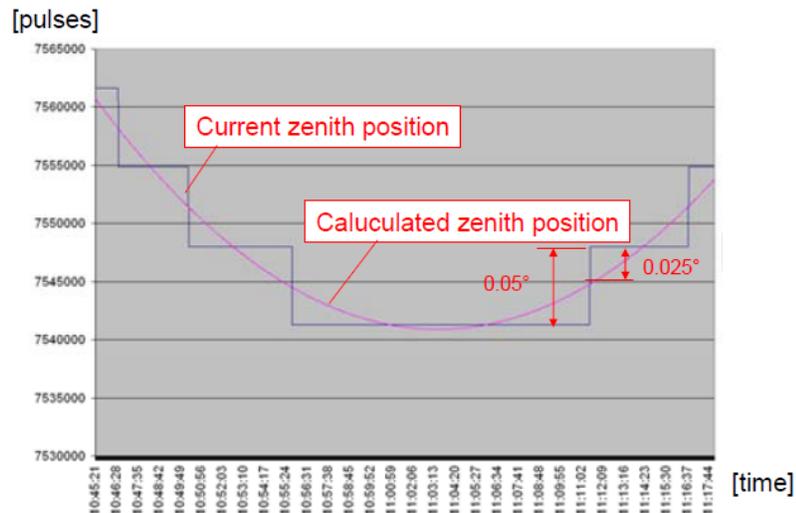


Figure 25: Poursuite solaire par échelon, guide d'utilisateur *CEX10* de *Siemens*

Premièrement, il est important de considérer l'erreur d'un calcul numérique comparativement à un calcul analytique. Y. Tang de la compagnie *Siemens* a publié les résultats réels calculés par l'automate et obtient une différence de calcul de  $0.00125^\circ$  en azimut et de  $0.00103^\circ$  en zénith, comparativement aux résultats du *NRELSPA* analytique (Tang 2012). Le même auteur évalue aussi l'impact des erreurs dans les paramètres des équations. Certaines erreurs ont un impact négligeable, comme celle de l'élévation par exemple. Par contre, une erreur dans d'autres paramètres amène des résultats négatifs d'envergure présentés dans l'énumération suivante (Tang 2012) :

- L'algorithme fonctionne avec le temps universel coordonné (*UTC*). Une déviation d'une seconde apporte une erreur en azimut de  $0.01^\circ$  et de  $0.00375^\circ$  en zénith. Une synchronisation fréquente sur un serveur *NTP* (*Network Time Protocol*), une connexion Ethernet ou un signal *GPS* (*Global Positioning System*) sont primordiaux.
- Une erreur de  $0.1^\circ$  en longitude et latitude engendre une erreur de positionnement de  $0.135^\circ$  en zénith et de  $0.28^\circ$  en azimut. Par contre, une erreur de  $0.01^\circ$  en longitude et latitude engendre une erreur de  $0.0135^\circ$  en zénith et de  $0.028^\circ$  en azimut. Un positionnement très précis est alors nécessaire.

- Une erreur sur la pression locale de 100 *mbar* engendre une erreur de positionnement en zénith supérieure à  $0.1^\circ$ , principalement au lever et au coucher du soleil. Un système de capteurs ou encore un accès à une base de données des prévisions moyennes annuelles est recommandé.
- La position du soleil à  $0^\circ C$  et  $20^\circ C$  est différente de  $0.05^\circ$  en zénith. Il est recommandé d'avoir accès à une base de données moyennes annuelles ou à un système de capteurs.

Il est important de noter que ces erreurs ne sont pas mutuellement exclusives et que de petites variations sur chacune d'elles peuvent entraîner une erreur de positionnement significative.

Il existe aussi un autre type d'erreurs propre à tous les systèmes de poursuite solaire en boucle ouverte : le positionnement mécanique réel par rapport à celui demandé. Ces erreurs se divisent en deux catégories. Premièrement, un système en boucle ouverte est aveugle, il ne sait pas réellement où est le soleil. C'est pourquoi lors de la mise en route d'un système de suivi, il faut préalablement faire un alignement avec le soleil et enseigner à l'automate que la position actuelle du système correspond à celle calculée. Un système en boucle ouverte ne sera donc jamais plus précis que la méthode utilisée pour l'alignement initial. Deuxièmement, un système mécanique n'est jamais parfait car les supports fléchissent, la mise à niveau avec le vecteur de gravité n'est pas parfaite, les composantes dynamiques ont des jeux fonctionnels, etc. Un système mécanique de haute précision est généralement onéreux. Dans une lutte constante pour diminuer les coûts des systèmes solaires, il n'est pas acceptable d'utiliser cette solution. Le résultat est donc généralement un système mécanique de faible coût, assemblé relativement rapidement et avec une calibration initiale plus ou moins robuste. Dans le mémoire de G. Prinsloo ([Prinsloo et al. 2014](#)), les essais en boucle ouverte ont donné des résultats avec une précision de  $0.375^\circ$  et une erreur périodique observable sur une journée complète. La sommation des problèmes mécaniques, de la calibration initiale, des erreurs de calcul et de paramétrisation donne un système loin du  $0.05^\circ$  estimé par le fournisseur de l'automate.

Dans le même ouvrage (Prinsloo et al. 2014), G. Prinsloo essaie la poursuite en boucle fermée avec un capteur de position solaire. Les résultats sont nettement meilleure, avec des résultats de  $\pm 0.1^\circ$  d'erreur et sans erreur périodique. Toutefois, la précision d'une poursuite en boucle fermée demeure liée à la qualité des conditions météorologiques : plus le ciel est bleu, plus les résultats sont bons. À l'inverse, lors du passage d'un nuage, le système devient non fonctionnel. Au final, la recommandation de Prinsloo est d'essayer un système de poursuite solaire hybride. C'est précisément la direction prise dans notre projet.

Le système hybride choisi repose principalement sur la méthode en boucle ouverte. Celle-ci est toujours d'avant plan, mais à chaque cycle, elle compare la position calculée avec la position observée par le capteur solaire. Lorsque les deux ne concordent pas, le système en boucle ouverte s'ajuste pour correspondre au retour d'informations du capteur. Si le ciel est nuageux, le capteur solaire n'est pas pris en considération. Le résultat espéré est une méthode permettant d'être efficace en toute condition, incluant la présence de défauts mécaniques dans le système. La section suivante montre en détail l'implantation de l'algorithme choisi.

### **3.4 Implantation de l'algorithme de poursuite solaire**

L'algorithme de poursuite solaire hybride est implémenté à l'aide du logiciel *TIA Portal* du groupe *Siemens*. Bien que la compagnie n'œuvre plus dans les systèmes solaires, il a été possible d'avoir accès au programme initialement utilisé. Ce dernier est le *CEX10* et se contrôle à l'aide d'un panneau *HMI (human machine interface)*. Ce dernier outil étant superflu pour nos besoins, une télécommande simple de quatre boutons à double action a été utilisé à la place. Le programme comporte aussi quatre modes de fonctionnement distincts décrits dans ce chapitre, soit :

1. Le mode manuel
2. Le mode d'apprentissage
3. Le mode de nuit

#### 4. Le mode automatique

Le mode manuel est relativement simple. Le système de poursuite solaire peut être contrôlé avec la télécommande qui possède deux boutons pour faire tourner l'axe d'azimut dans le sens des aiguilles d'une montre ou l'inverse. Idem pour l'axe en zénith, où les directions sont haut et bas. Ce mode est pratique pour faire des ajustements ou pour mettre les concentrateurs solaires dans une position sécuritaire. Il est aussi nécessaire pour enclencher le mode d'apprentissage.

Le mode d'apprentissage est utilisé pour créer une référence au système de concentration solaire. L'outil le plus précis installé sur ce dernier demeure le capteur solaire *ISSDX* de la compagnie *SolarMems*, dont la fiche technique est disponible à l'[annexe II](#). Ce dernier est utilisé dans le système de boucle fermée, mais envoie des données en tout temps vers l'automate. Lors d'une première installation, le système ne connaît pas du tout son orientation. Il suffit simplement de pointer manuellement la plateforme en direction du soleil  $\pm 5^\circ$  et d'activer le mode d'apprentissage. Ce dernier compare le calcul *NRELSPA* actuel avec l'erreur mesurée du capteur et se met à jour pour faire concorder les deux. Par la suite, le système se déplace automatiquement vers les butées de fin de course *CCW* (*Counter ClockWise*) et *DOWN*. À noter que la course de l'axe zénith s'arrête à environ  $10^\circ$  avant sa butée, laisse l'axe d'azimut terminer, puis termine à son tour. De cette façon, la référence est toujours la même. Le système enregistre donc la position des butées. Celles-ci sont utilisées dans le mode de nuit.

Le mode de nuit est déclenché par le mode automatique lorsque la hauteur du soleil en zénith devient plus faible que la limite fixée. À ce moment, le système retourne automatiquement pour mettre à jour son positionnement sur les butées *CCW* et *DOWN*, puis attend le lever du soleil pour redémarrer en mode automatique régulier.

Le mode automatique est celui d'importance dans cet ouvrage. Il ne peut être activé que lorsque le mode d'apprentissage s'est exécuté complètement. L'organigramme simplifié du

fonctionnement pour l'axe en zénith est présenté à la figure 26. À noter que l'organigramme pour l'axe en azimut est identique. Les différentes variables d'importance sont les suivantes :

- $\theta_{sol}$  : angle du vecteur solaire projeté en élévation
- $\theta_{plat}$  : angle du vecteur de la plateforme de poursuite solaire projeté dans l'axe d'élévation
- $\Delta_{\theta}$  : différence calculée entre l'angle du vecteur solaire et celui de la plateforme de poursuite solaire
- $\exists$  : erreur acceptable dans la stratégie de poursuite par échelon
- $\Delta_{ISSDX}$  : différence mesurée par le capteur solaire entre l'angle du vecteur solaire et du système de la plateforme de suivi. À noter que cette donnée est généralement légèrement différente de  $\Delta_{\theta}$ , puisque cette dernière est calculée par le système en boucle ouverte.

Le code s'active lorsque le mode automatique est enclenché et que l'apprentissage est complété. En premier lieu, le programme vérifie la différence entre la position du soleil calculée par l'algorithme *NRELSPA* et la position actuelle de pointage du système de poursuite solaire. Si cette différence est supérieure à la limite acceptable définie par l'utilisateur, disons  $0,2^{\circ}$ , alors l'automate envoie la commande de déplacer la plateforme solaire d'une distance équivalente à l'erreur actuelle en plus de l'erreur acceptable. De cette manière, le système prend de l'avance sur la position solaire, tout en demeurant dans les limites de l'erreur acceptable.

Par la suite, l'automate vérifie si la qualité d'ensoleillement est supérieure à la limite fixée par l'utilisateur. L'expérience démontre qu'en dessous d'un *DNI* de  $600W/m^2$ , la précision du capteur solaire n'est pas très bonne, généralement due à un faible couvert nuageux. Si le *DNI* est inférieur à la limite, la section initiale de code recommence et le système fonctionne exclusivement en boucle ouverte. Par contre, si le *DNI* est suffisant, alors le programme refait l'apprentissage de la position de la plateforme en utilisant le capteur solaire, puis la boucle recommence. Cette mise à jour fonctionne de la même méthode que le mode d'apprentissage : l'erreur d'alignement est ajoutée à la position du soleil calculée par l'algorithme *NRELSPA*. La valeur obtenue remplace le positionnement en mémoire du système de

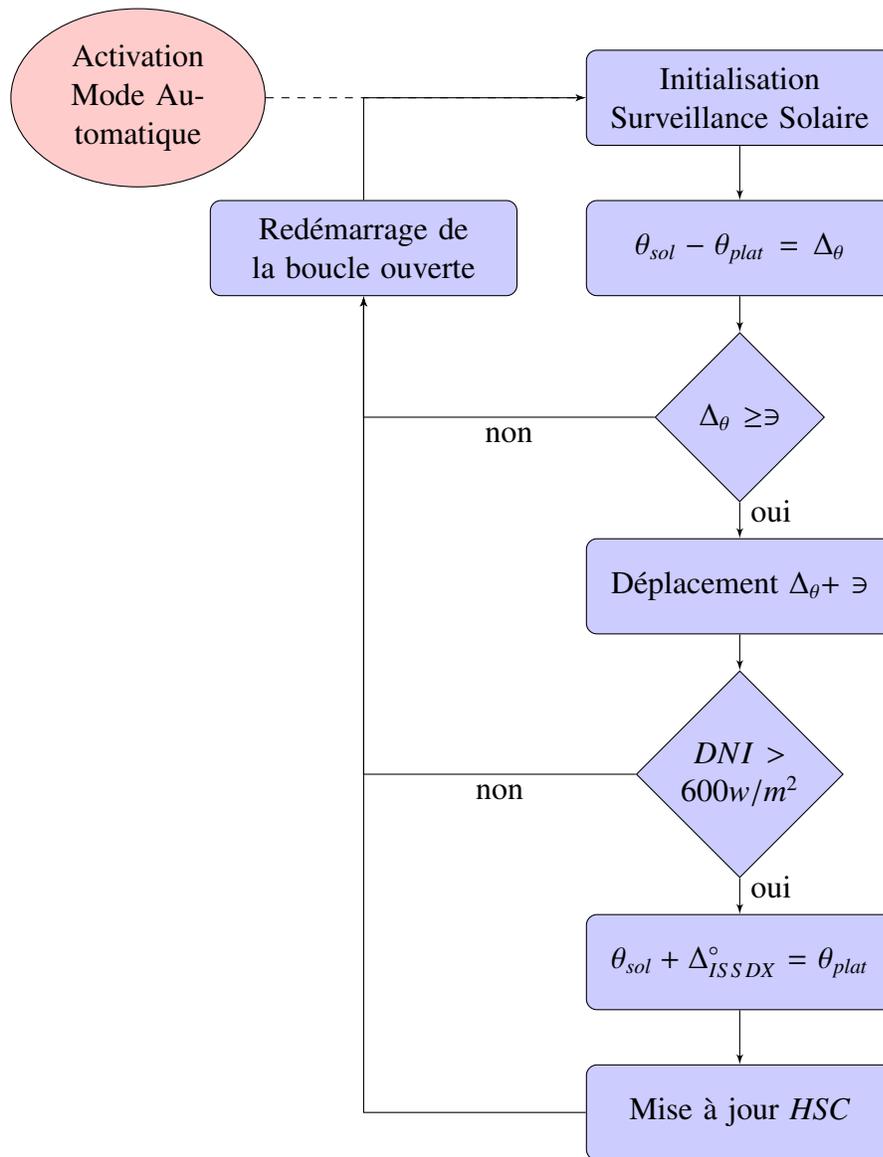


Figure 26: Organigramme simplifié de l'algorithme de poursuite solaire hybride en élévation

poursuite solaire  $\theta_{plat}$ . Le *Count Value* du *HSC* (*High Speed Counter*) de l'automate est mis à jour pour en tenir compte. Cette légère correction périodique est suffisante pour éliminer les erreurs périodiques et mécaniques et permet d'avoir un système de poursuite performant.

Finalement, certains détails sont à considérer lors de l'implantation de cet algorithme. Tout d'abord, le sens de déplacement du soleil, différent entre l'hémisphère nord et sud et va-

riant avec les saisons entre les tropiques, doit être pris en considération. De plus, il arrive que le système de positionnement devance légèrement l'erreur acceptable lors de son déplacement. Dans ce cas, il faut ajouter une zone tampon qui permet de ne pas réactiver la poursuite automatique. Sans cette zone tampon, le système oscille sans arrêt et la précision est perdue. En dernier lieu, les composantes mécaniques comme la transmission ont généralement un contrecoup. Il n'y a pas de correction actuellement pour régler ce problème. Il est observable dans les résultats de la section suivante et se traduit généralement par un déphasage de l'erreur observée par rapport à zéro, autrement dit, la moyenne des erreurs n'est pas nulle. La section suivante présente les résultats obtenus.

### 3.5 Résultats expérimentaux et analyse

La majorité des expériences a été réalisée à l'automne 2017. Une des difficultés principales de l'acquisition de données dans le domaine de l'énergie solaire est la fréquence très basse de journées ensoleillées au Québec, particulièrement à l'automne. La majorité des graphiques présentés ci-bas a été pris dans une fenêtre de deux jours où il y avait un ciel bleu. En fait, il n'était pas possible de distinguer les nuages à l'oeil, mais un brouillard uniforme en altitude était observé en utilisant des lunettes avec un filtre. Ce type de conditions n'était pas optimal pour de l'acquisition de données, mais c'est de loin la meilleure fenêtre obtenue sur une période de plus de deux mois d'attente.

L'[annexe III](#) présente les résultats de la majorité des essais réalisés avec différents niveaux d'erreur acceptable programmée. Toutefois, la section actuelle présente le résultat le plus précis et stable atteint lors des essais, soit avec un échelon de  $0,025^\circ$  d'erreur. De plus, une méthode pour évaluer l'erreur de suivi réelle est présentée.

En premier lieu et comme présenté dans l'étude de Prinsloo ([Prinsloo et al. 2014](#)), un essai d'environ trois heures en boucle ouverte a été réalisé. Deux phénomènes distincts se sont présentés en zénith et en azimut. Comme observé sur la [figure 27](#), l'erreur en azimut

diverge de manière linéaire sur la période complète des essais. Une première hypothèse est le fait que la plateforme de suivi pourrait ne pas être parfaitement au niveau, malgré l'utilisation d'un capteur de niveau numérique de précision lors de l'installation. On remarque aussi qu'en zénith, l'erreur augmente de façon semblable puis diminue après son apogée. Tel que mentionné précédemment, le collecteur solaire *ECOsends* est installé sur la terrasse d'expérimentation du *COPL*, à l'université Laval. Cette plateforme est recouverte de tapis de caoutchouc afin de réduire les vibrations transmises aux équipements qui y sont installés. Il a été observé que deux des pieds de support du collecteur solaire ont glissé légèrement lors de la séparation de deux tapis, induisant une erreur de niveau. Pour ce qui concerne l'axe en zénith, on observe aussi une erreur périodique. La cause probable est le changement de direction dans la trajectoire du soleil et le jeu mécanique dans les composantes de la transmission. Le changement de direction fait en sorte que la transmission s'appuie d'un côté des engrenages lors de la montée, puis de l'autre côté lors de la descente. Le fait d'observer cette erreur en boucle ouverte est une bonne chose pour cette étude, car elle permet de démontrer l'efficacité de correction du système hybride.

Suite à l'expérience en boucle ouverte, la partie du code définissant le système hybride a été ajoutée. Une série d'expériences a été réalisée sur des périodes d'observation de trente minutes avec un échantillonnage de  $0,3\text{Hz}$ . Pour les résultats suivants, seule une période d'environ 15 minutes est présentée, le reste des essais sont sous le couvert nuageux. Il est aussi important de noter les variations en *DNI*, car cette mesure est un indicatif des passages nuageux. Lorsque cette valeur diminue significativement, le système fonctionne en boucle ouverte et les données fournies par le capteur solaire sont de faible qualité. En dessous de  $300\text{W}/\text{m}^2$ , le capteur ne donne aucune information. La figure 28 présente les résultats obtenus sans aucun traitement de données pour une erreur programmée de  $\pm 0,02^\circ$ .

Sur la figure 28 apparaît les moyennes en azimut et en zénith. Dans un système de poursuite de précision, il est attendu que l'erreur oscille autour du zéro en ordonnée. Toutefois, le programme actuel ne comporte pas de correction pour les jeux mécaniques de la transmission.

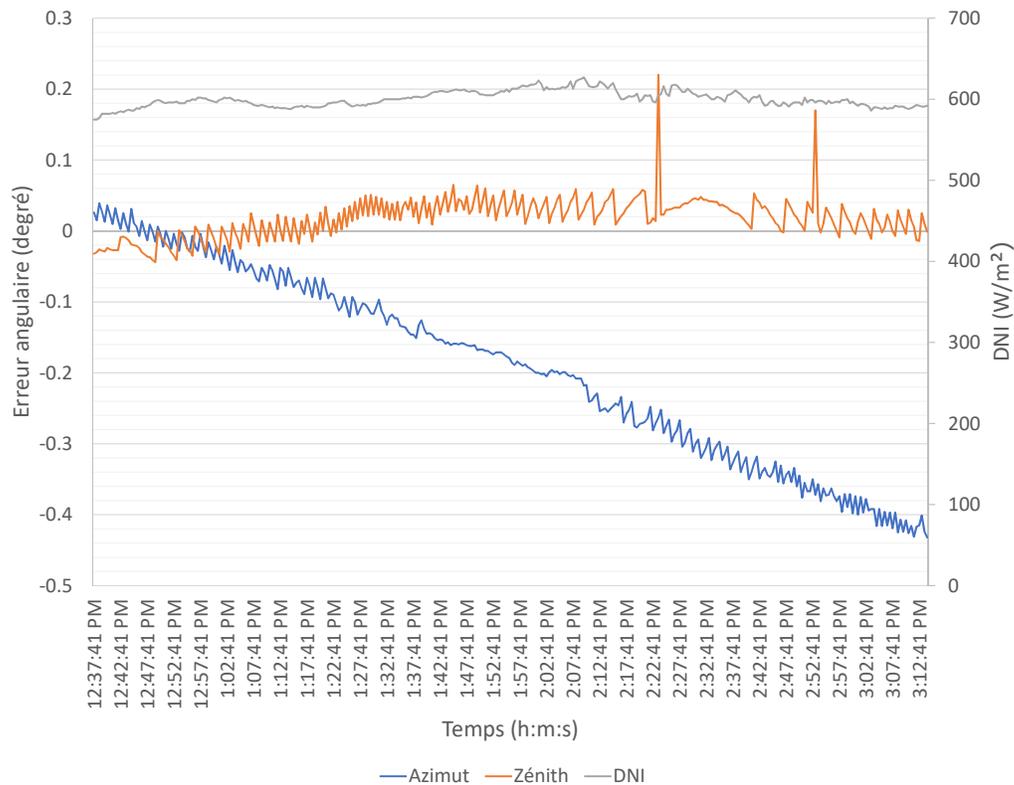


Figure 27: Erreur de poursuite solaire obtenue en azimut et en zénith avec l’algorithme en boucle ouverte programmé avec une erreur acceptable de  $\pm 0,02^\circ$

Le phénomène observé est un dépassement de la position estimée dû à l’inertie de la structure en rotation. Une modification du code est suggéré pour régler ce problème, mais elle n’est pas implantée dans l’étude actuelle. Puisque les outils d’optique sont alignés avec le soleil une fois le collecteur solaire en fonction, ce déphasage n’est pas problématique. Le tableau 3 présente la déviation des moyennes en fonction de l’erreur acceptable programmée. On y remarque que plus l’erreur programmée est grande, plus le déphasage de la moyenne est élevé. Ceci s’explique par le fait qu’un long mouvement permet au collecteur solaire d’atteindre une vitesse plus importante et l’impact de l’inertie se fait ressentir davantage.

Afin d’observer plus intuitivement l’erreur de poursuite, les moyennes sont soustraites des valeurs mesurées et les résultats sont présentés dans les figures 29 et 30. À noter que

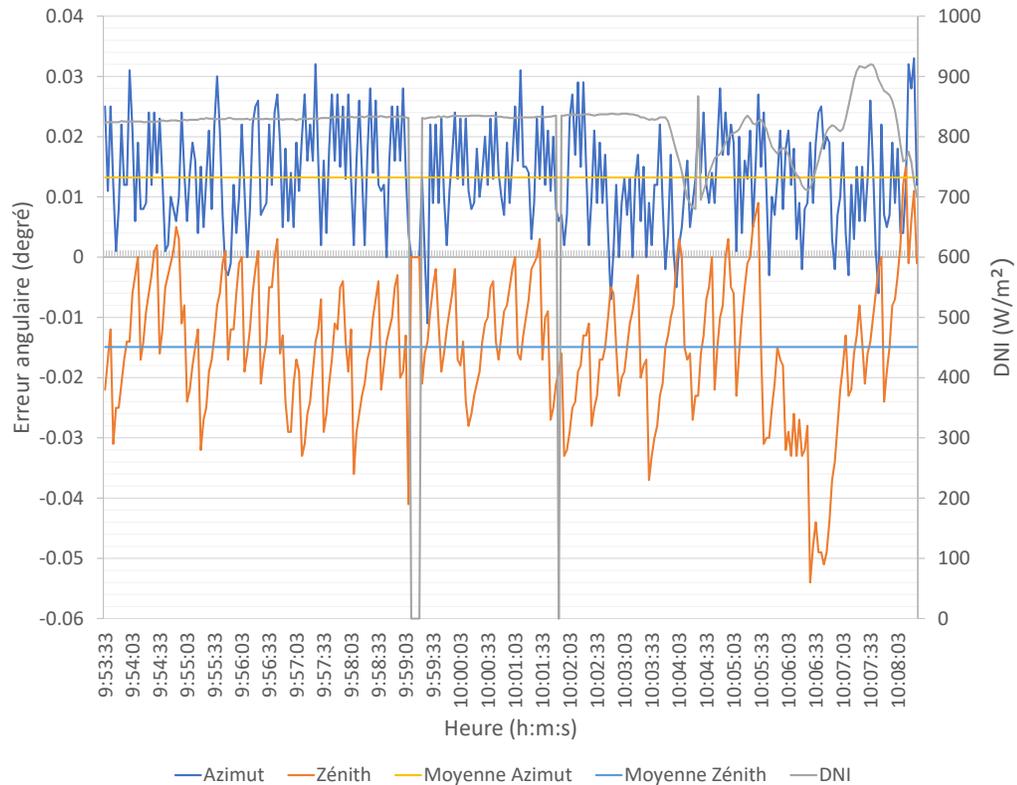


Figure 28: Erreur de poursuite solaire obtenue en azimut et en zénith avec l’algorithme hybride programmé avec une erreur acceptable de  $\pm 0,02^\circ$  (sans traitement des données)

l’azimut et le zénith sont séparés afin de permettre une lecture plus facile des résultats.

Malgré que l’erreur est contenue entre les bornes fixées dans les figures 29 et 30, est-il correct d’assumer que l’erreur de poursuite est réellement de  $\pm 0,02^\circ$  ? En fait, pour répondre à cette question, il faut prendre en considération les erreurs des deux axes pour estimer la distance réelle avec le centre du câble optique. L’équation (3.5) présente le traitement de données final permettant d’observer la déviation réelle du point focal du soleil par rapport au centre du câble optique. Le résultat de cette équation est présenté dans la figure 31.

$$\vartheta_{Reel} = \sqrt{\vartheta_{Zen}^2 + \vartheta_{Az}^2} \quad (3.5)$$

Tableau 3: Déviation de la moyenne des erreurs

<b>Erreur</b>	<b>Déphasage azimut</b>	<b>Déphasage zénith</b>
$\pm 0,5^\circ$	$0,111^\circ$	$0,041^\circ$
$\pm 0,25^\circ$	$0,062^\circ$	$-0,038^\circ$
$\pm 0,125^\circ$	$0,068^\circ$	$-0,025^\circ$
$\pm 0,025^\circ$	$0,022^\circ$	$-0,009^\circ$
$\pm 0,02^\circ$	$0,013^\circ$	$-0,015^\circ$
$\pm 0,01^\circ$	$0,010^\circ$	$-0,018^\circ$

Il est observable que malgré une programmation demandant une erreur de moins de  $\pm 0.02^\circ$ , l'erreur réelle se situe plus autour de  $\pm 0.025^\circ$ . Toutefois, il faut souligner que l'objectif initial est d'obtenir une poursuite stable en dessous de  $\pm 0.1^\circ$ . L'objectif est donc considéré atteint. Pour la suite du projet, il est primordiale d'avoir une correction pour les jeux mécaniques dans la transmission. Il n'est pas souhaitable de mettre une correction fixe, comme un simple déphasage. Il est préférable de faire une correction dynamique où le jeu est évalué lors de la première itération, puis appliqué pour la prochaine activation des moteurs. Cette même variable est conservée, mais corrigée à chaque fois que les moteurs s'arrêtent pour assurer un ajustement fidèle à toute heure du jour.

Finalement, certains essais ont été faits avec une plus grande précision. Malheureusement, le moteur en zénith a eu certains problèmes et seul le résultat en azimut est bon. Néanmoins, il est possible d'observer dans la figure 32 une précision d'environ  $\pm 0.01^\circ$ , soit dix fois plus précis que l'objectif initial. Il est conseillé toutefois d'avoir un niveau de réduction entre le moteur et le collecteur solaire encore plus grand. Chaque correction de la position du collecteur solaire est de l'ordre d'environ dix pas de moteur, ceci engendre des erreurs d'arrondissement significatives dans le logiciel.

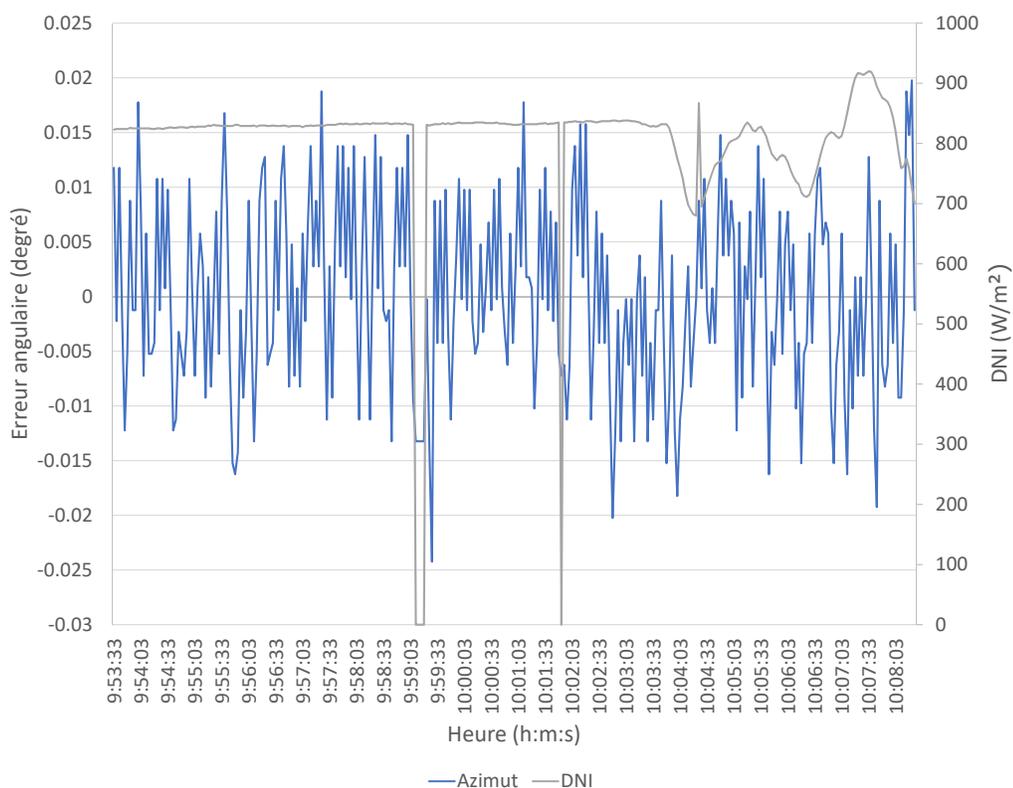


Figure 29: Erreur de poursuite solaire obtenue en azimut avec l'algorithme hybride et programmé avec une erreur acceptable de  $\pm 0,02^\circ$  (avec données centrées en ordonnée)

### 3.6 Conclusion

Ce troisième chapitre du mémoire a permis de couvrir la partie causant le risque principal du projet de maîtrise : la précision du suivi solaire. Un système à très haute concentration solaire comme *ECOsends* se doit, pour des raisons économiques, d'avoir une précision plus élevée que les solutions présentes sur le marché. Pour ce faire, une nouvelle solution de poursuite solaire a été développée, combinant à la fois un algorithme de calcul astronomique lié à une rétroaction via des encodeurs sur les moteurs et un système en boucle fermée avec un capteur de position solaire. La méthode de calcul du *NRELSPA* a été utilisée pour sa précision et son implantation simple dans les automates de Siemens. Le programme *CEXIO* de la même compagnie a été utilisé comme squelette, puis a subi des modifications importantes

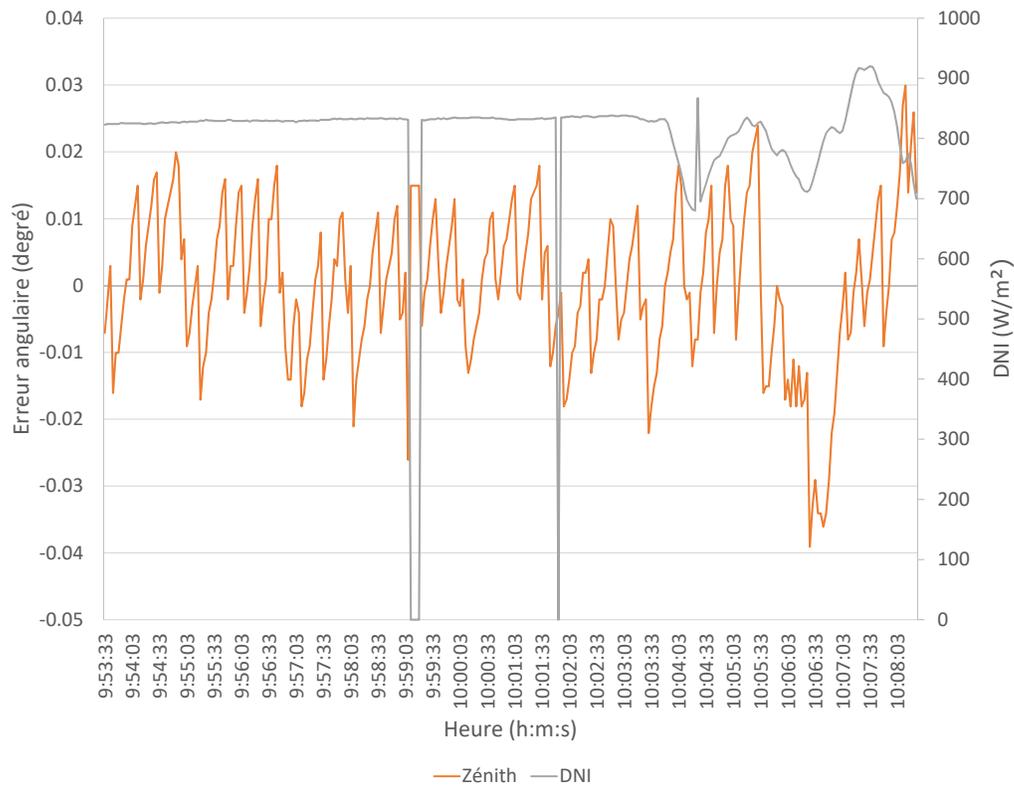


Figure 30: Erreur de poursuite solaire obtenue en zénith avec l'algorithme hybride programmé avec une erreur acceptable de  $\pm 0,02^\circ$  (avec données centrées en ordonnée)

pour l'adapter aux besoins d'*ECOsends*. Au final, une précision absolue de  $0,025$  degré a été observée, mais l'erreur maximale programmée était de  $0,02$  degré. Différents facteurs peuvent nuire à ceci, incluant l'inertie du collecteur solaire, un système électrique sans *PWM (Pulse Width Modulation)* pour ajouter une courbe d'accélération aux moteurs, le jeu mécanique de la transmission ou encore des délais dans l'exécution du programme. Différentes méthodes sont envisagées dans le futur pour corriger ces problèmes.

Le prochain chapitre présente les essais réalisés sur les câbles optiques, l'efficacité du système ainsi que la mise à l'épreuve d'une première application alimentée par le câble solaire : un déshydrateur par convection avec stockage thermique.

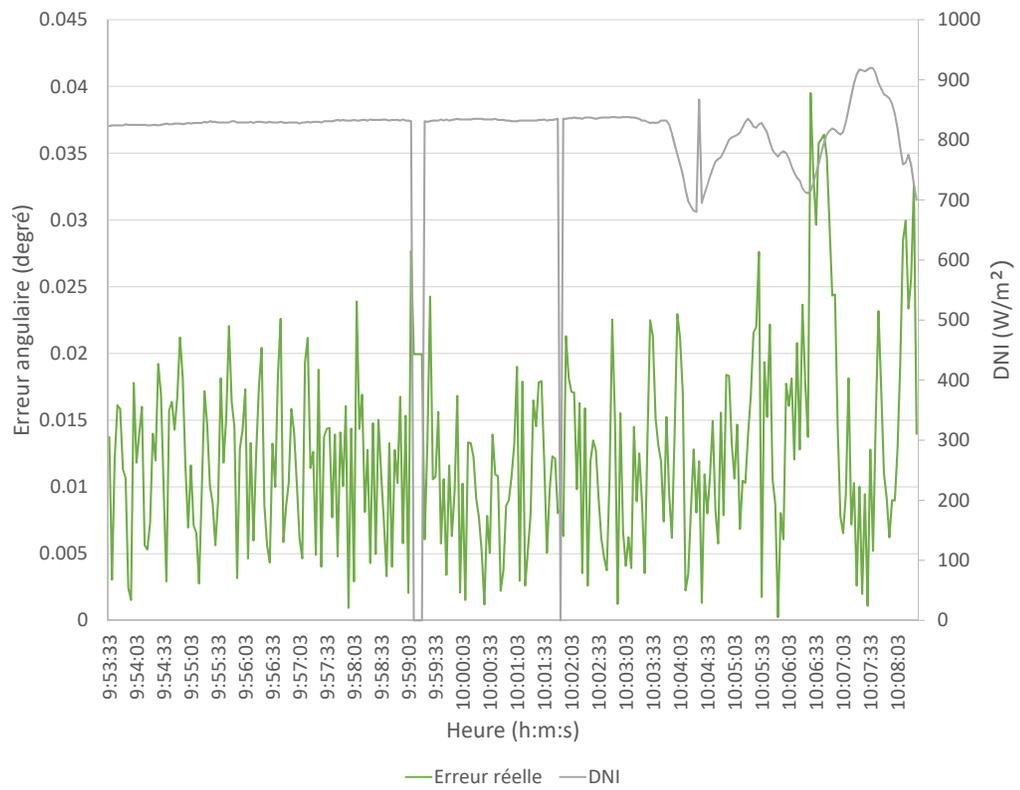


Figure 31: Erreur de poursuite solaire réelle obtenue avec l'algorithme hybride programmé à  $\pm 0,02^\circ$

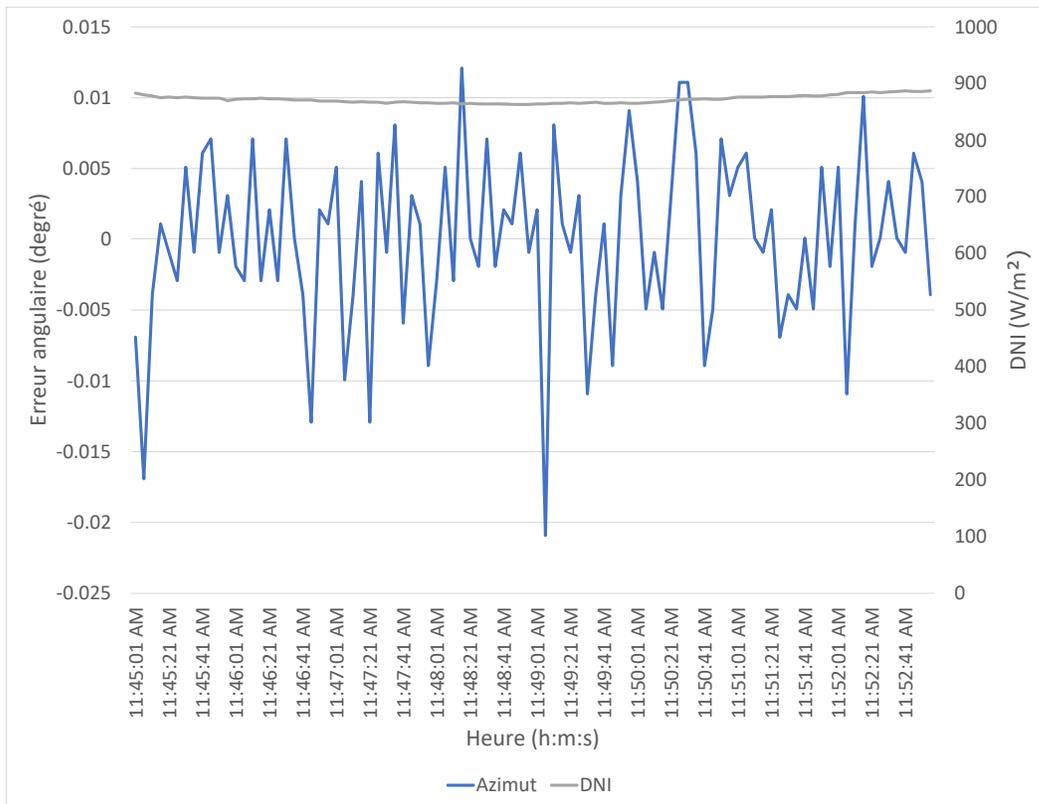


Figure 32: Erreur de poursuite solaire obtenue en azimut avec l'algorithme hybride programmé avec une erreur acceptable de  $\pm 0,01^\circ$  (avec données centrées en ordonnée)

## CHAPITRE 4

### PERFORMANCES DU CÂBLE SOLAIRE ET APPLICATION DE FOUR SOLAIRE

#### 4.1 Introduction

Le projet *ECOsend*s regroupe plusieurs équipes œuvrant dans différentes disciplines. Comme présenté dans le second et le troisième chapitre, les objectifs confiés à l'*UQAR* ont donné des résultats positifs selon les attentes fixées. Toutefois, la participation au projet s'est étendue et une collaboration étroite avec la *CERCP* pour les essais sur le câble solaire a été établie. Ce chapitre est une présentation sommaire des résultats obtenus lors de l'été et de l'automne 2017. Plusieurs essais ont été réalisés avant cette période, mais la robustesse des différents câbles solaire a limité l'acquisition de données. L'impression 3D de matériaux de construction, décrite en introduction comme étant la suite à long terme du projet, n'est pas discutée dans les résultats finaux. En effet, il n'y a pas eu d'avancement significatif dans cette direction. Toutefois, il a été possible de faire fondre une feuille mince d'aluminium peinte en noir. Bien que cette expérience ne soit pas rigoureuse, elle donne une idée de la température possible à atteindre. Ce chapitre présente les résultats du dernier câble solaire développé et fabriqué par la *CERCP* en plus des essais sur un four solaire déshydrateur réalisé lors d'un stage d'été à l'*UQAR* avant le début du projet de maîtrise.

#### 4.2 Performances du câble solaire

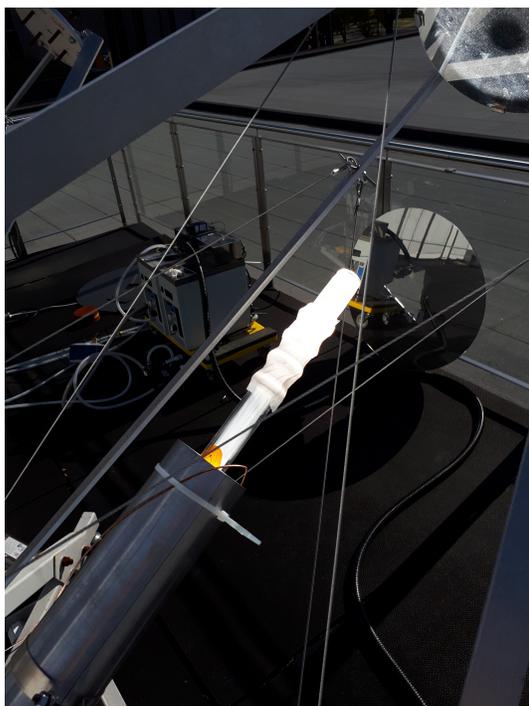
Le câble solaire est une fusion de quelques centaines de fibres optiques regroupées ensemble puis fusionnées à nouveau sur une lentille sphérique au niveau de l'entrée du câble. Ce procédé est techniquement difficile à réaliser et nécessite un savoir-faire ainsi que plusieurs essais avant d'obtenir une méthode qui donne un résultat satisfaisant. Il est important de noter que l'injection du soleil se fait à 5800X optique et que le potentiel de température dépasse

aisément 1000°C. Ainsi, avant d'avoir une solution finale, le design du câble optique a eu différentes modifications et ajouts.

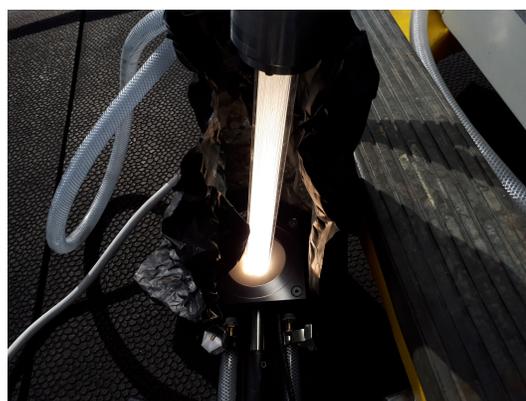
Le principal problème rencontré, en ce qui concerne la robustesse du câble, est la gestion de la lumière qui n'est pas injectée dans les fibres (pertes). Malgré un procédé de fabrication de qualité, le facteur d'interception des photons n'est pas de 100% et une quantité significative de lumière se retrouve à circuler à l'extérieur des fibres. Les extrémités de celles-ci sont dénudées pour permettre de faire la fusion initiale, donc les photons ne sont pas absorbés dans cette section. Toutefois, l'acrylique utilisée comme gaine perd ses propriétés à environ 80°C. Lorsque le flux de puissance arrive de l'extérieur de la fibre, une partie de cette puissance est absorbée et transformée en chaleur. Plusieurs itérations ont été réalisées jusqu'à l'obtention d'une solution robuste en modifiant différents facteurs, comme l'angle auquel les fibres arrivent au point de fusion, la longueur sur laquelle elles sont dégainées et l'ajout de courbe dans le tube de verre de soutien pour éjecter l'excédent de lumière. Le dernier prototype de câble réalisé a plusieurs heures de fonctionnement en continu sans diminution de la puissance transmise.

Pour mesurer l'efficacité du câble, un capteur de puissance *UP55N-300F* de *GenTec* refroidi à l'air a été utilisé. Ce type de capteur est calibré pour être effectif sur une plage de 0,19 $\mu\text{m}$  jusqu'à 2 $\mu\text{m}$ , ce qui couvre la majorité des longueurs d'ondes transmises au niveau de la lumière. Le capteur est mis à zéro avec la lumière ambiante juste avant de prendre une lecture. Une mesure est réalisée à l'entrée du câble optique, suivie d'une autre à la sortie. Le ratio est calculé pour obtenir l'efficacité de transmission du câble. À noter que l'efficacité totale du système *ECOsends* n'est pas évaluée pour le moment, principalement à cause d'une détérioration de la surface des miroirs primaire et secondaire lors du premier hiver. Ce facteur sera évalué lorsque la surface des miroirs sera refaite. Par contre, l'efficacité de transmission du câble est de 47%. L'équipe a même surpassée les 50% avec une autre version du câble, mais celui-ci n'était pas assez robuste et n'a pas survécu aux essais de pleine puissance. La température dans la zone où la gaine d'acrylique commence sur les fibres a été mesurée à

40°C lors d'une journée d'automne de 15°C. La *CERCP* regarde d'autres avenues pour avoir une gaine permettant une meilleure résistance thermique et une ouverture numérique plus grande. Finalement, la puissance absolue mesurée à la sortie du câble solaire se situe entre 70W et 80W selon les conditions atmosphériques. Avec des miroirs à l'état neuf, une puissance d'au minimum 100W par câble est réalisable. La figure 33 présente l'entrée et la sortie du câble de dernière génération en fonction.



(a) Entrée du câble



(b) Sortie du câble

Figure 33: Câble solaire de dernière génération en fonction lors de l'automne 2017

### 4.3 Application de four solaire

Avant le début de ce projet de maîtrise, des travaux préliminaires sur le câble solaire avaient été réalisés par la *CERCP*. La solution de poursuite solaire et de plateforme optique n'était initialement pas une problématique et un projet d'application thermique avait

été confié à l'*UQAR* dans le cadre d'un stage d'été. Deux étudiants, Alexandre Nault et Gabriel Dugas, l'auteur de ce mémoire, ont réalisé ce projet, sous la direction du professeur Ahmed Chebak.



Figure 34: Déshydrateur solaire en fonction lors des essais de l'automne 2017

Le mandat était de concevoir et de fabriquer un système de séchage, à l'échelle laboratoire, permettant d'atteindre une température d'air de  $130^{\circ}\text{C}$ . Il s'agit en fait d'un déshydrateur solaire par convection. Le prototype final est constitué d'un circuit d'air ouvert dans le but d'évacuer l'humidité accumulée. Un échangeur de chaleur entre l'air d'entrée et celui de sortie permet de récupérer une partie significative de l'énergie thermique présente dans le fluide. Le déshydrateur solaire fabriqué est présenté dans la figure 34. Ce déshydrateur se différencie de ceux présent sur le marché par le fait qu'il est alimenté par un flux de photons sortant du câble optique. Ce dernier est branché directement dans un puits métallique noir avec un procédé d'oxydation, augmentant le facteur d'absorption. Le puits baigne dans un bassin de sel solaire utilisé pour le stockage de l'énergie thermique. Le sel utilisé possède une capacité thermique massique très élevée en plus d'une température d'utilisation dépassant

sant les 400°C. Un radiateur est installé en surface de ce bassin pour chauffer l'air et un ventilateur permet d'y faire circuler l'air.

Plusieurs thermocouples et un système de contrôle permettent de contrôler la température en ajustant le flux d'air. Le four avait été conçu initialement pour une puissance de 200W, ce qui n'est pas atteint avec le prototype actuel. Le démarrage est donc très long puisqu'il faut réchauffer le bassin de sel complètement. Au final, le four fonctionne et l'échange thermique est observé entre le câble solaire et le bassin de sel, puis entre le bassin et l'air en circulation. Le stockage thermique a atteint une température de 100°C et celle de l'air en circulation est montée jusqu'à 60°C avant d'arrêter les essais pour une raison de conditions météorologiques. Toutefois la température était toujours croissante et ce, avec un rythme continu comme présenté dans la figure 35.

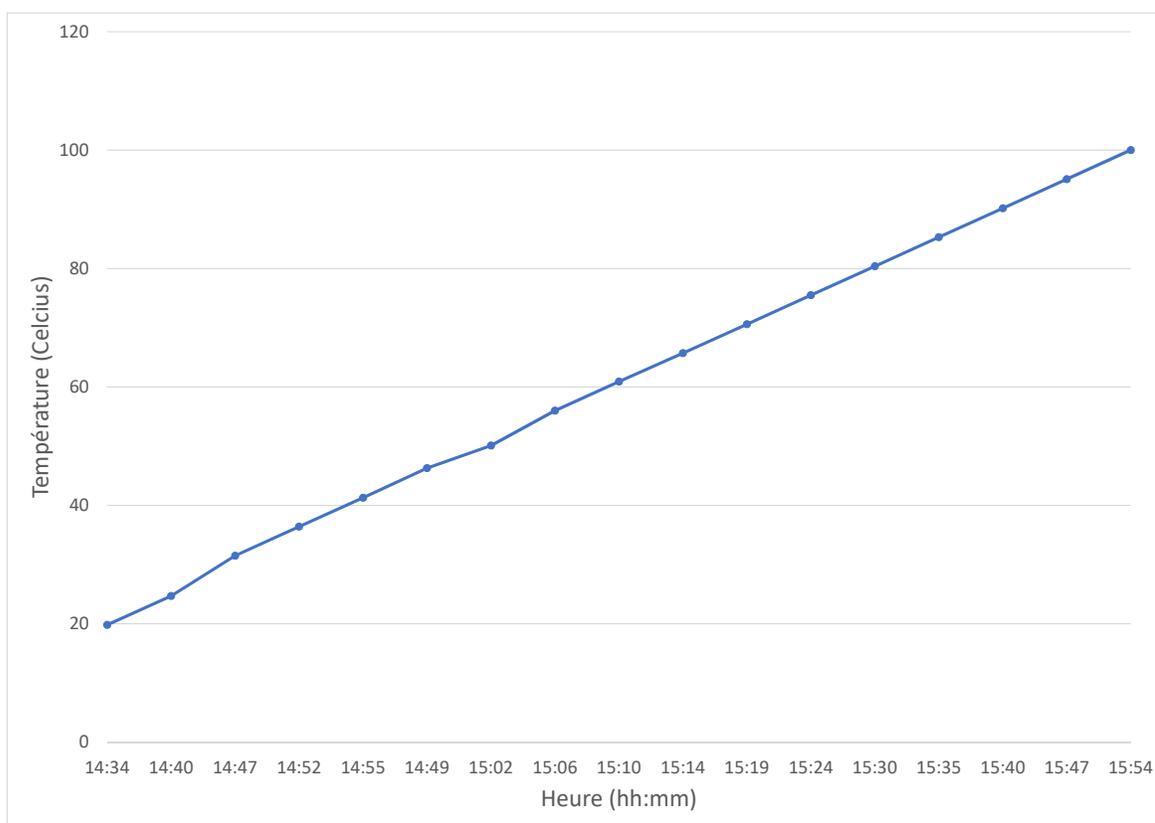


Figure 35: Température du bassin de sel en fonction du temps avec une alimentation de 70W

#### 4.4 Conclusion

Lors de l'année 2017, une série de câbles solaires ont été mis à l'épreuve et modifiés jusqu'à l'obtention d'une solution robuste. Ces périodes d'expérimentation ont permis de confirmer que le collecteur solaire réalisé dans le cadre de ce mémoire remplit ses fonctions et ne limite en aucun point les performances de la partie optique du système. Au niveau des résultats finaux du câble solaire, une puissance totale de 80W a été mesurée à la sortie avec une efficacité de 47% pour le câble. La dégradation des miroirs durant l'hiver porte à croire que des pertes importantes sont localisées en amont du système. Il est estimé que refaire la couche fine d'aluminium des miroirs primaire et secondaire permettrait d'obtenir une puissance de sortie du câble solaire de 100W par télescope, donc une puissance combinée de 300W avec un système pleinement opérationnel. Finalement, un déshydrateur solaire réalisé avant le projet de maîtrise lors d'un stage d'été a été essayé. Une température de 100°C a été obtenue dans un bassin de stockage thermique après une durée d'une heure. Ceci valide le fonctionnement du système tout entier incluant le collecteur solaire, le système de poursuite solaire, le câble optique et l'application.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Le projet exposé dans ce mémoire avait pour but de réaliser une plateforme expérimentale accommodant un système de captation et de transmission d'énergie solaire concentrée par fibres optiques. Le premier chapitre a présenté une revue de quelques principes fondamentaux concernant l'énergie solaire et le déplacement du soleil dans le ciel. De plus, les différentes configurations mécaniques, ainsi que les méthodes actuelles de poursuite solaire ont été couvertes. Finalement, les principaux systèmes de captations et de transport d'énergie solaire par fibres optiques existants ont été présentés, permettant d'avoir un portrait de l'état de l'art dans le domaine. Le projet en soit fut divisé en deux parties distinctes : la réalisation mécanique de la structure de support des systèmes optiques (collecteur solaire) et la réalisation logiciel pour la poursuite solaire de précision. Chacun de ces sujets a été traité respectivement dans le deuxième et le troisième chapitre.

La structure mécanique a été construite autour du système optique (miroirs) dimensionné par le *LRIO*. La captation solaire est réalisée avec un miroir primaire parabolique de  $750\text{mm}$  de diamètre, suivant une configuration qui se situe entre celle d'un télescope de type Newton et celle d'un télescope Cassegrain. Le miroir secondaire ne possède aucune courbe et est placé parallèlement au primaire, contrairement à l'angle de  $45^\circ$  commun aux télescopes Newton. Le point focal est donc localisé dans l'axe du tube optique, mais devant le miroir primaire. Le câble solaire, installé à mi-chemin entre le primaire et le secondaire, est composé de 475 fibres optiques de  $600\mu\text{m}$  fusionnées sur une lentille sphérique. Le facteur de concentration optique final est évalué à 5800X, ce qui est largement supérieur aux autres systèmes solaires concentrés qui existent dans la littérature.

L'analyse fonctionnelle du système mécanique final du collecteur solaire est composée de quatre sections principales : les télescopes, la plateforme de support des télescopes, les composantes électromécaniques de poursuite solaire et le quadripied de support. Une conception assistée par ordinateur jointe à l'analyse par éléments finis a permis de conce-

voir un premier collecteur solaire sans problème majeur en évitant la fabrication de plusieurs itérations. Le logiciel *GuiPlop* a été utilisé pour dimensionner correctement les cellules de support du miroir primaire, contenant 18 points d'appui. Une transmission de type *dual axis slew drive* équipée de moteurs *brushless* DC a été utilisée pour aligner la plateforme avec le soleil. Au total, trois télescopes ont été installés sur le prototype pour une surface de captation totale de  $1,33m^2$ . La structure comporte suffisamment d'ajustements pour permettre une collimation précise tout en utilisant des techniques de fabrication bon marché, comme la découpe laser par exemple. Un outil comportant trois lasers a été développé et calibré au *COPL* afin d'aligner les différents outils optiques entre eux. Ce même outil a été utilisé pour vérifier que la collimation est constante peu importe l'angle dans lequel le capteur solaire est installé.

Sur la durée complète des essais, très peu de problèmes ont dû être réglés concernant la partie mécanique du système. Toutefois, deux modifications ont été réalisées avant que le système ne soit complètement opérationnel. Premièrement, les supports entre le miroir primaire et secondaire n'étaient pas assez rigide, ce qui a causé un problème non négligeable de vibration dans la structure. Une solution temporaire, celle de tendre des câbles d'acier entre le support du primaire et du secondaire pour rigidifier l'assemblage, a été implantée avec succès. Cette solution demeure toutefois très peu élégante. Un second prototype a été réalisé pour un projet connexe lors de la rédaction de ce mémoire où l'ajout de tubes carrés d'aluminium rigide a permis de régler ce problème. Le second problème majeur est plutôt lié à l'utilisation du prototype. La quantité d'ajustements disponibles sur la première génération d'*ECOsends* rend l'alignement des composantes optiques difficiles. L'ajustement en piston du miroir secondaire a été retiré complètement. Il est beaucoup plus simple de placer le câble solaire directement au bon endroit plutôt que de devoir ajuster la profondeur du point focal avec la position du miroir. Ceci raccourci énormément la durée de mise au point. Un dernier problème mineur a été réglé sur la seconde génération du prototype. Le miroir primaire était supporté par des coussinets de feutre. Bien que diminuant les risques d'égratignure, ceux-ci n'offrent pas un support suffisamment rigide. Ils ont été remplacés par des supports en plastique fabriqués à l'aide d'une imprimante 3D.

La seconde partie du projet concernait la mise en place et l'implantation d'une nouvelle méthode de poursuite solaire. Comme expliqué dans le troisième chapitre, le coût et la complexité actuelle de fabrication du câble exige une solution de suivi extrêmement précise. L'objectif visé était de  $\pm 0,1^\circ$  d'erreur absolue, ce qui permettait de réduire le nombre de fibres optiques à 475. Un algorithme hybride proposé initialement par Prinsloo ([Prinsloo et al. 2014](#)) a été développé afin d'atteindre l'objectif fixé. Le programme, implanté dans un automate S7-1214 de *Siemens*, fonctionne en se basant sur l'algorithme astronomique *NRELSPA* et utilise un capteur de position solaire *ISSDX5* de la compagnie *SolarMems* pour ajouter une rétroaction. La poursuite solaire se fait par échelons : l'automate calcul la position du soleil, la compare avec la position du prototype, puis lorsqu'une erreur maximale programmée est atteinte, il déplace la plateforme de support des télescopes pour devancer le mouvement du soleil de la même erreur. À chaque cycle, le capteur de position solaire corrige la position estimée de la plateforme pour s'assurer d'une précision maximale. Les résultats obtenus montrent que l'objectif initial a été surpassé, avec une précision absolue de  $0,025^\circ$ . Il serait toutefois possible d'aller chercher une meilleure performance en instaurant une routine de correction pour les jeux mécaniques de la transmission. En effet, l'erreur absolue est très faible, mais légèrement décalée en avant du soleil.

Au final, le projet est une preuve de concept complétée et considérée comme un succès. Le collecteur solaire développé a permis de mettre à l'épreuve différents prototypes de câbles optiques jusqu'à l'obtention d'une solution fonctionnelle. Dans le cas d'une continuité du projet, de nouvelles fibres optiques et des alternatives aux méthodes de concentration et d'injection de l'énergie solaire sont à considérer pour améliorer le système et le rendre plus accessible financièrement. De plus, il serait intéressant de mettre davantage de temps sur la simplification de l'utilisation du prototype. En effet, l'alignement des composants optiques, par exemple, requiert du temps et du savoir-faire. L'option de réduire le nombre d'ajustements via le retrait du miroir secondaire, en modifiant la configuration optique, permettrait de faciliter l'ajustement et de rendre accessible le système à du personnel avec peu d'expérience. Dans le même ordre d'idée, étant donnée que la mise en route du système de poursuite

solaire nécessite l'entrée manuelle des coordonnées *GPS* et des données météorologiques en plus d'un temps significatif pour exécuter le mode d'apprentissage, une nouvelle méthode de démarrage, incluant l'ajout d'un système *GPS* et d'une rétroaction d'angle sur la plateforme de support des collecteurs solaires permettrait de retirer complètement la période de démarrage lors de l'installation.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ASTM (2013), 'G 173-03, Standard tables for reference solar spectral irradiances: direct normal and hemispherical on 37° tilted surface', *Society for Testing Materials*, pp. 1–21.
- Cariou, J. M., Dugas, J. & Martin, L. (1982), 'Transport of solar energy with optical fibres', *Solar Energy*, **29**(5), 397–406.
- Cariou, J. M., Dugas, J. & Martin, L. (1985), 'Theoretical limits of optical fibre solar furnaces', *Solar Energy*, **34**(45), 329–339.
- Feuermann, D. & Gordon, J. M. (1999), 'Solar fiber-optic mini-dishes: a new approach to the efficient collection of sunlight', *Solar Energy*, **65**(3), 159–170.
- Feuermann, D., Gordon, J. M. & Huleihil, M. (2001), 'Light leakage in optical fibers: experimental results, modeling and the consequences for solar concentrators', *Solar Energy*, **72**(3), 195–204.
- Feuermann, D., Gordon, J. M. & Huleihil, M. (2002), 'Solar fiber-optic mini-dish concentrators: first experimental results and field experience', *Solar Energy*, **72**(6), 459–472.
- IPCC (2013), 'The physical science basis, contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change', *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pp. 1–29.
- IPCC (2014), 'Impacts, adaptation and vulnerability - contributions of the working group II to the fifth assessment report', *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability - Contributions of the Working Group II to the Fifth Assessment Report*, pp. 1–32.
- Kandilli, C. & Ulgen, K. (2007), 'Review and modelling the systems of transmission concentrated solar energy via optical fibres', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**(1), 67–84.
- Kandilli, C., Ulgen, K. & Hepbasli, A. (2008), 'Exergetic assessment of transmission concentrated solar energy systems via optical fibres for building applications', *Energy and Buildings*, **40**(8), 1505–1512.
- Kayser, M. (2011), 'Solar sinter', *Accessed 2018-07-15* .  
**URL:** [www.kayserworks.com](http://www.kayserworks.com)
- Liang, D., Fraser Monteiro, L., Ribau Teixeira, M., Fraser Monteiro, M. & Collares-Pereira, M. (1998), 'Fiber-optic solar energy transmission and concentration', *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **54**(1-4), 323–331.

- Masson, G. & Brunisholz, M. (2018), '2018 snapshot of global photovoltaic markets', *International Energy Agency*, **T1**(33), 1–19.
- Millennium Ecosystem Assessment (2005), 'Ecosystems and Human Well-Being: desertification synthesis', *Ecosystems and human well-being*, pp. 1–26.
- Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles (2014), 'MERN - Consommation d'électricité', *Accessed 2018-02-06* .  
**URL:** <http://mern.gouv.qc.ca/energie/statistiques/statistiques-consommation-electricite.jsp>
- Nakamura, T. (2009), 'Optical waveguide system for solar power applications in space', *Proc. SPIE7423 C*, (1), 74230C–74230C–10.
- Nakamura, T., Comaskey, B. & Bell, M. (2002), 'Development of optical components for space-based solar power system for ISRU and regenerative life support', *40th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, .
- Nakamura, T. & Smith, B. K. (2010), 'Solar power system for lunar ISRU applications', *American Institute of Aeronautics and Astronautics* (January), 94588.
- Nakamura, T. & Smith, B. K. (2011), 'Solar thermal system for lunar ISRU applications: development and field operation at Mauna Kea', *Proceedings of SPIE - Nonimaging Optics: Efficient Design for Illumination and Solar Concentration*, **8124**(VIII), 0B.
- National Renewable Energy Laboratory (2004), 'Solar Position Algorithm (SPA) Calculator'.  
**URL:** <http://rredc.nrel.gov/solar/codesandalgorithms/spa/>  
<https://www.nrel.gov/midc/solpos/spa.html>
- National Renewable Energy Laboratory (2018), 'High-Efficiency Crystalline Photovoltaics | Photovoltaic Research | NREL', *Accessed 2018-04-29* .  
**URL:** <https://www.nrel.gov/pv/high-efficiency-crystalline-photovoltaics.html>
- Oh, S. J., Burhan, M., Ng, K. C., Kim, Y. & Chun, W. (2015), 'Development and performance analysis of a two-axis solar tracker for concentrated photovoltaics', *International Journal of Energy Research*, **39**, 965–976.
- Prinsloo, G. (2015), 'Hardware sun tracking systems and digital sun position hardware solar tracker controllers', *HW chapter*, pp. 1–35.
- Prinsloo, G. J., Dobson, R. & Schreve, K. (2014), 'Automatic positioner and control system for a motorized parabolic solar reflector', *PhD Thesis, University of Stellenbosch*, pp. 1–136.
- Reda, I., Andreas, A. & Nrel, A. A. (2008), 'Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications', *Nrel/Tp-560-34302* (January), 1–56.

Tang, Y.-W. (2012), 'Effects of parameters on NREL solar position algorithm (SPA) and simatic S7-1200 Spa-Calc\_Sunvector library accuracy', *Journal of applied engineering technology*, **2**(1), 133–150.

White, F. M. (2011), *Fluid Mechanics*, seventh edn, McGraw-Hill.



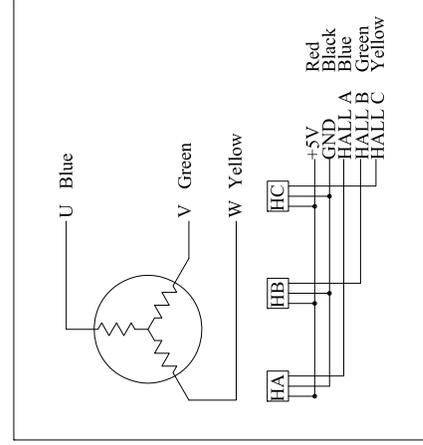
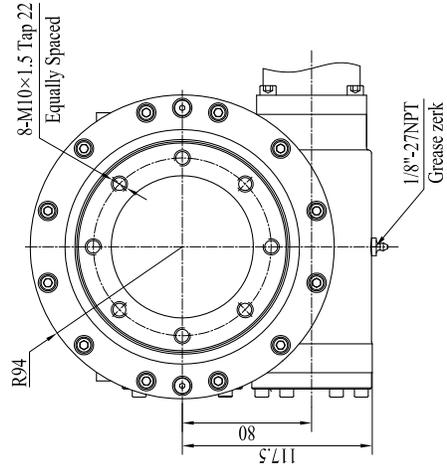
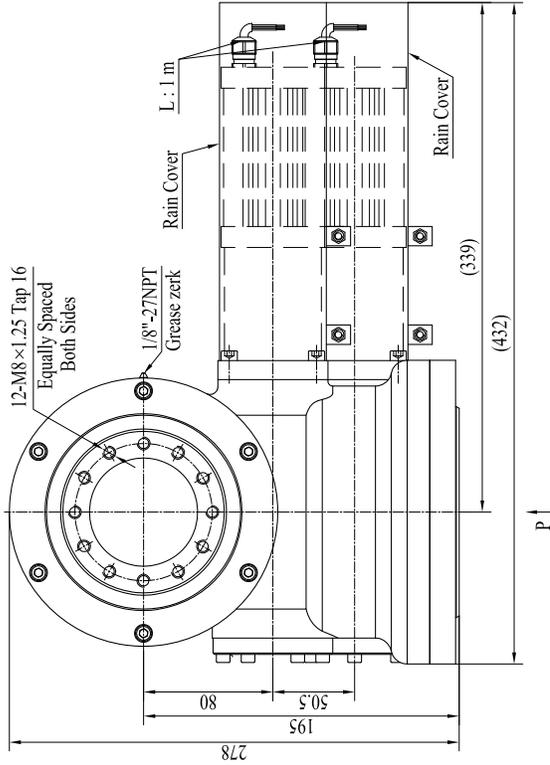
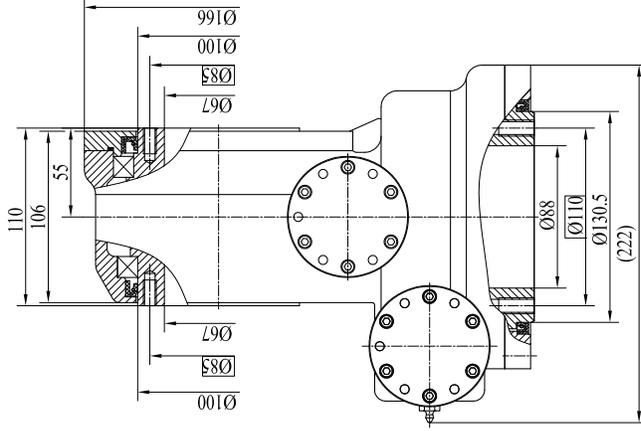
**ANNEXE I**

**FICHE TECHNIQUE DE *DUAL-AXIS SLEW DRIVE WDE3* DE LA COMPAGNIE**

***H-FANG***

**Slewing Drive Performance Data**

Rated Output Speed	0.048 rpm
Rated Output Torque	600 N.m 422.8 lbf.ft
Tilting Moment Torque (Max.)	2000 N.m 1475 lbf.ft
Holding Torque	2000 N.m 1475 lbf.ft
Axial Load (Max.) -Azimuth	30 kN 6744 lbf
Radial Load (Max.) -Azimuth	15 kN 3372 lbf
Ratio of Worm Gear	62:1
Tracking Precision	≤0.1°
<b>24VDC Planetary Reducer Motor Performance Data (24HL/30/35)</b>	
Rated Voltage	24 VDC
Rated Current	<1.5 A
Rated Power	22 W
Gear Ratio	576 : 1
IP Class	IP55
Temperature	-40 ~ +60° C
Model of Hall	SS41(Honeywell)
Number of Hall	3
Hall Signal	open collector



**Electrical sensor phasings of 120°**

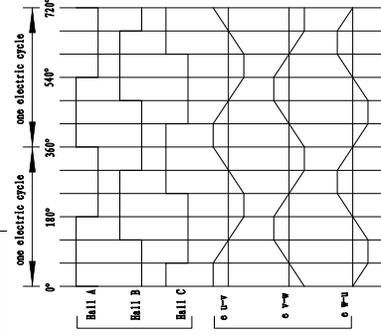
SEQUENCE FOR COUNTERVIEW FROM MOTOR OUTPUT SHAFT

order	Hall Input			Phasing current		
	A	B	C	U	V	W
I	1	0	1	DC+	DC-	-
II	1	0	0	DC+	-	DC-
III	1	1	0	-	DC+	DC-
IV	0	1	0	DC-	DC+	-
V	0	1	1	DC-	-	DC+
VI	0	0	1	-	DC-	DC+

**Electrical sensor phasings of 120°**

SEQUENCE FOR COUNTERVIEW FROM MOTOR OUTPUT SHAFT

order	Hall Input			Phasing current		
	A	B	C	U	V	W
I	0	0	1	-	DC+	DC-
II	0	1	1	DC+	-	DC-
III	0	1	0	DC+	DC-	-
IV	1	1	0	-	DC-	DC+
V	1	0	0	DC-	-	DC+
VI	1	0	1	DC-	DC+	-



REV	DATE	REVISOR	DESCRIPTION								
DESIGNED BY	Garen	05/16/2016	Jiangyin Huafang New Energy Hi-Tech Equipment CO., LTD  www.h-fang.com.cn A-CORE DRIVE Company								
CHECKED BY	Rodrick	05/16/2016									
APPROVED BY	Sum	05/16/2016									
ALL PROPRIETARY RIGHTS IN THE SUBJECT MATTER HERE OF ARE RESERVED, AND NO PERMISSION IS GRANTED OR TO DISCLOSE REPRODUCE THIS PRINT IN WHOLE OR IN PART. ANY OF THE INFORMATION TO OTHERS.											
SYMBOLS ISO			<table border="1"> <tr> <td>SCALE</td> <td>WEIGHT</td> </tr> <tr> <td>1:3</td> <td>34 kg</td> </tr> <tr> <td>SIZE</td> <td>SHEET</td> </tr> <tr> <td>A3</td> <td>1 / 1</td> </tr> </table>	SCALE	WEIGHT	1:3	34 kg	SIZE	SHEET	A3	1 / 1
SCALE	WEIGHT										
1:3	34 kg										
SIZE	SHEET										
A3	1 / 1										
			<table border="1"> <tr> <td>Title</td> <td>Model No.</td> </tr> <tr> <td>SLEWING DRIVE</td> <td>WDE3</td> </tr> <tr> <td>Part No.</td> <td>62-R-24HL-30-35</td> </tr> <tr> <td>Rev</td> <td>A</td> </tr> </table>	Title	Model No.	SLEWING DRIVE	WDE3	Part No.	62-R-24HL-30-35	Rev	A
Title	Model No.										
SLEWING DRIVE	WDE3										
Part No.	62-R-24HL-30-35										
Rev	A										

## **ANNEXE II**

### **FICHE TECHNIQUE DU CAPTEUR SOLAIRE ISSTX**

## 6. Characteristics of the ISS-TX

Parameter	T60	T25	T15	T5	Unit	Comments
Sensor type	2 axes	2 axes	2 axes	2 axes	-	Orthogonal
Field of view (FOV)	120	50	30	10	°	Aperture of the cone of view
Accuracy	< 10	< 10	< 10	< 10	%	3σ
Precision	< 0,06	< 0,04	< 0,02	< 0.005	°	Sensitivity
Angle resolution	0.01	0.001	0.001	0.001	°	
Radiation accuracy	< 10	< 10	< 10	< 10	%	As accurate as close to normal vector
Radiation resolution	1	1	1	1	W/m <sup>2</sup>	
Max. radiation	1200	1200	1200	1200	W/m <sup>2</sup>	
Temperature accuracy	2	2	2	2	°C	
Temperature resolution	1	1	1	1	°C	
Sampling frequency	50	50	50	50	Hz	
Bandwidth	0,4	0,4	0,4	0,4	Hz	
T <sup>a</sup> 25°C, V <sub>DD</sub> 5V, Radiation 900 W/m <sup>2</sup>						
Expected life time: 10 years +						

*Table 5. Characteristics of the sensor*

Sun sensor ISS-TX is specifically designed and made for Tracking Systems, as CPV trackers, Weather Stations, PV trackers, Dish-stirling trackers, etc, any system using a tracking controller, for Sun or other light sources.

Different models of the ISS-TX are offered, differing in the field of view (FOV) of the sensor. The accuracy of the sensor is inversely proportional to the field of view. All these models have been tested on solar trackers with Solar MEMS Helios Controller in our facilities.

Depending on the application of the Sun Sensor ISS-TX, we recommend the use of the following models:

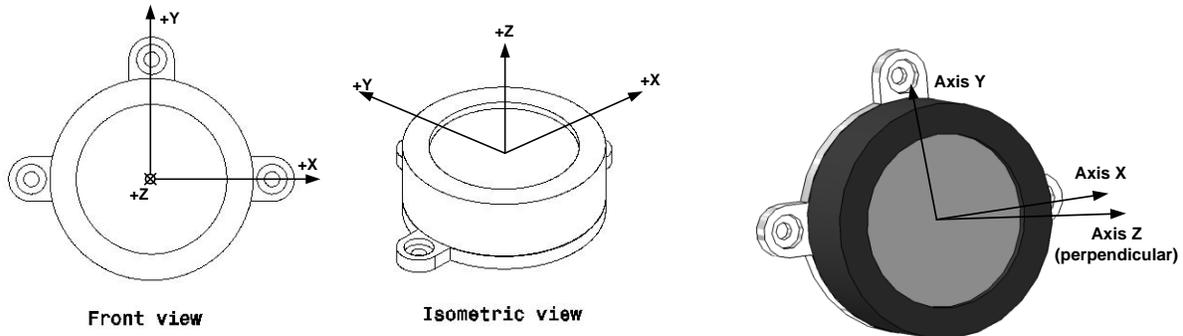
- Solar Tracker with Photovoltaic:  
The accuracy requirements are not demanding, so it's recommended to **use the ISS-T25 model, to get a wide field of view.**
- Solar Tracker with CPV or similar:  
The accuracy requirements are very demanding, so it's recommended to **use the ISS-T5 model, to get high accuracy and narrow field of view**, because a wide field of view increases the effects of the **environmental conditions** on the accuracy of the sun sensor: clouds effect and seeing of the ground.
- Other applications:  
It depends on the demanding of the field of view and the accuracy.

## 7. Main operations

ISS-TX sensor measures the incidence angles of a solar radiation respect to its perpendicular. This information is provided through a RS485 UART channel (master-slave configuration).

### 7.1. ISS-TX parameters

#### 7.1.1. Reference Axes

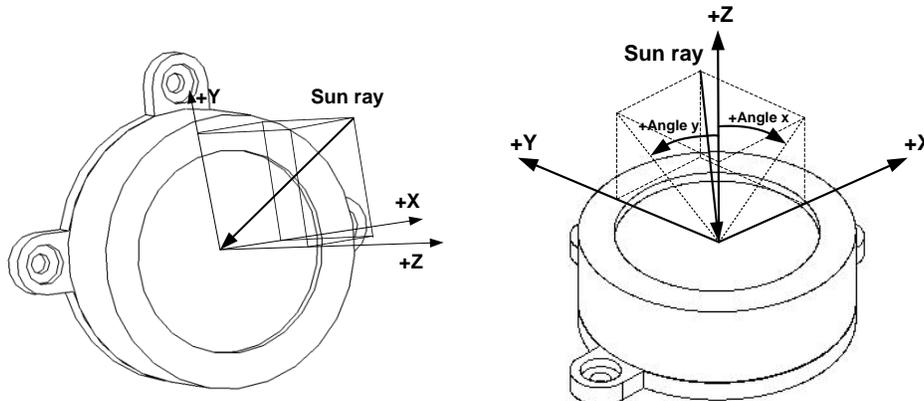


*Fig 3. ISS-TX reference system*

Z axis is perpendicular to the sensor base plane.

#### 7.1.2. Angles

The *angle x* and *angle y* specify the angular position of the incident sun ray inside the field of view of the ISS-TX sensor. The accuracy of the sensor increases close to zero degrees (perpendicular). Both angles are provided in degrees.



*Fig 4. Reference for measured angles*

The ISS-TX does an internal filtering processing to the angle measurements with the following features: third-order Butterworth filter with sampling frequency of 50 Hz and cut-off frequency of 0.4 Hz.



### ANNEXE III

#### RÉSULTATS BRUTS ET TRAITÉS DES ESSAIS DE POURSUITE SOLAIRE

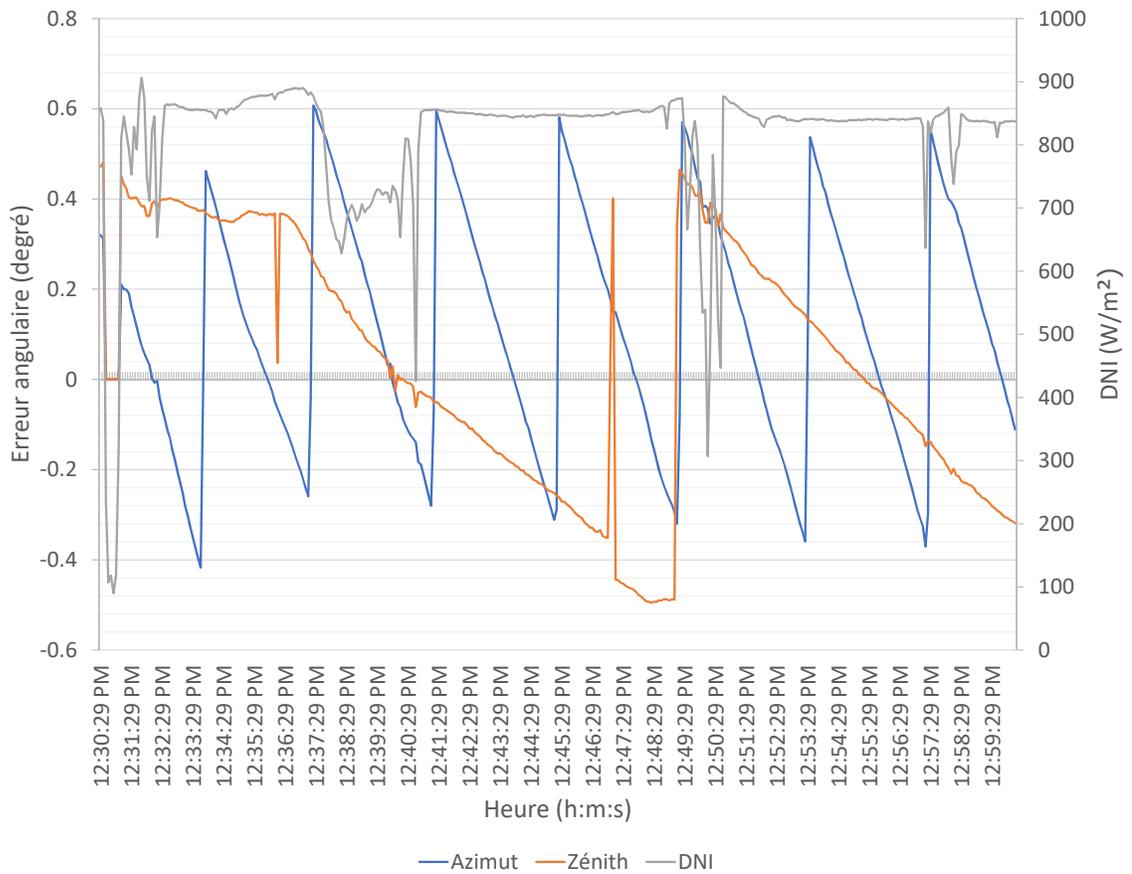


Figure 36: Erreur de poursuite solaire obtenue en azimut et en zénith avec l'algorithme hybride programmé avec une erreur acceptable de  $\pm 0,5^\circ$  (sans traitement des données)

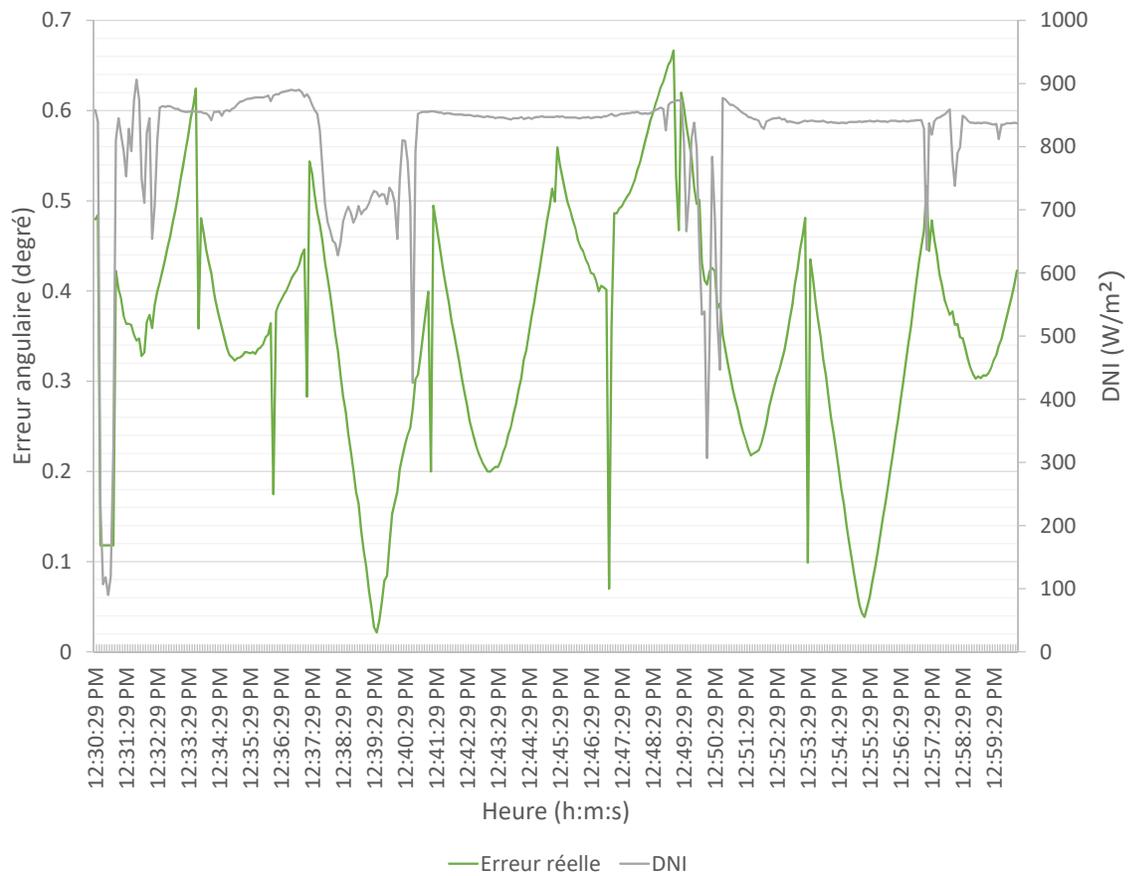


Figure 37: Erreur de poursuite solaire réelle obtenue avec l'algorithme hybride programmé à  $\pm 0,5^\circ$

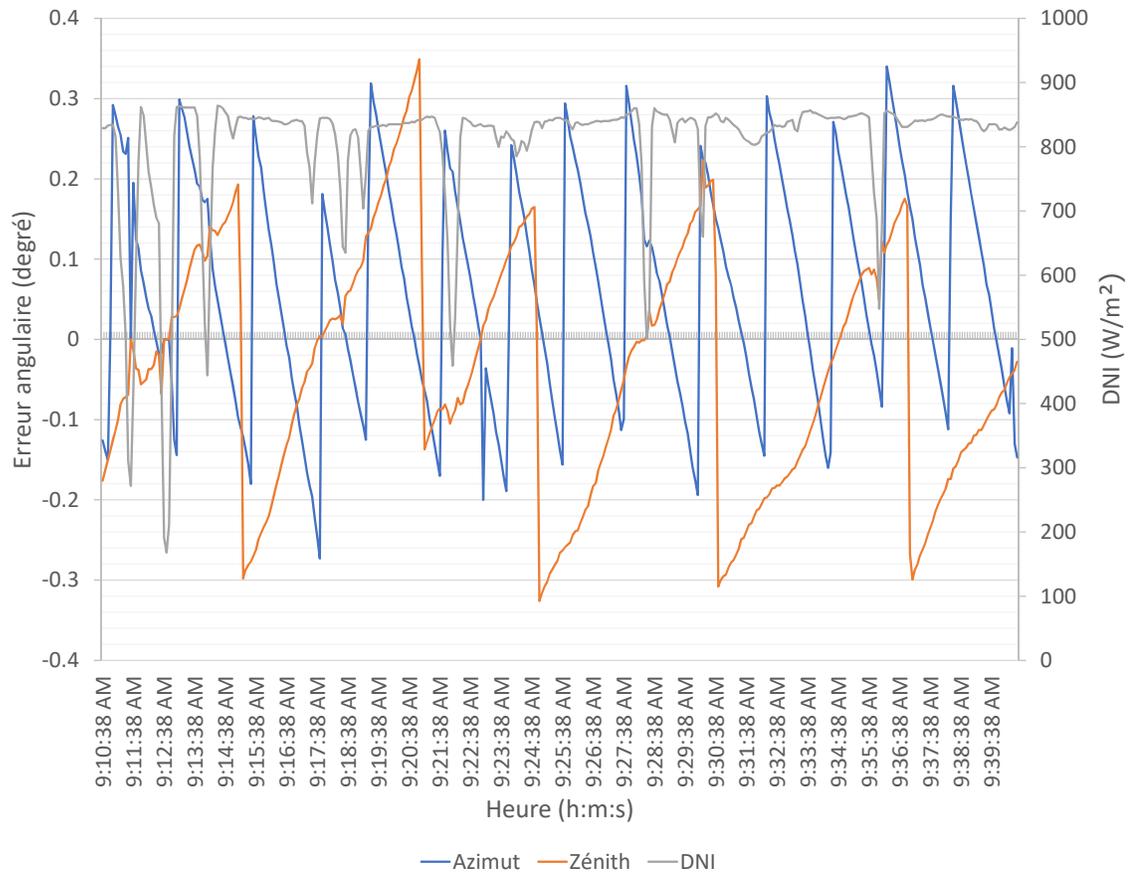


Figure 38: Erreur de poursuite solaire obtenue en azimut et en zénith avec l'algorithme hybride programmé avec une erreur acceptable de  $\pm 0,25^\circ$  (sans traitement des données)

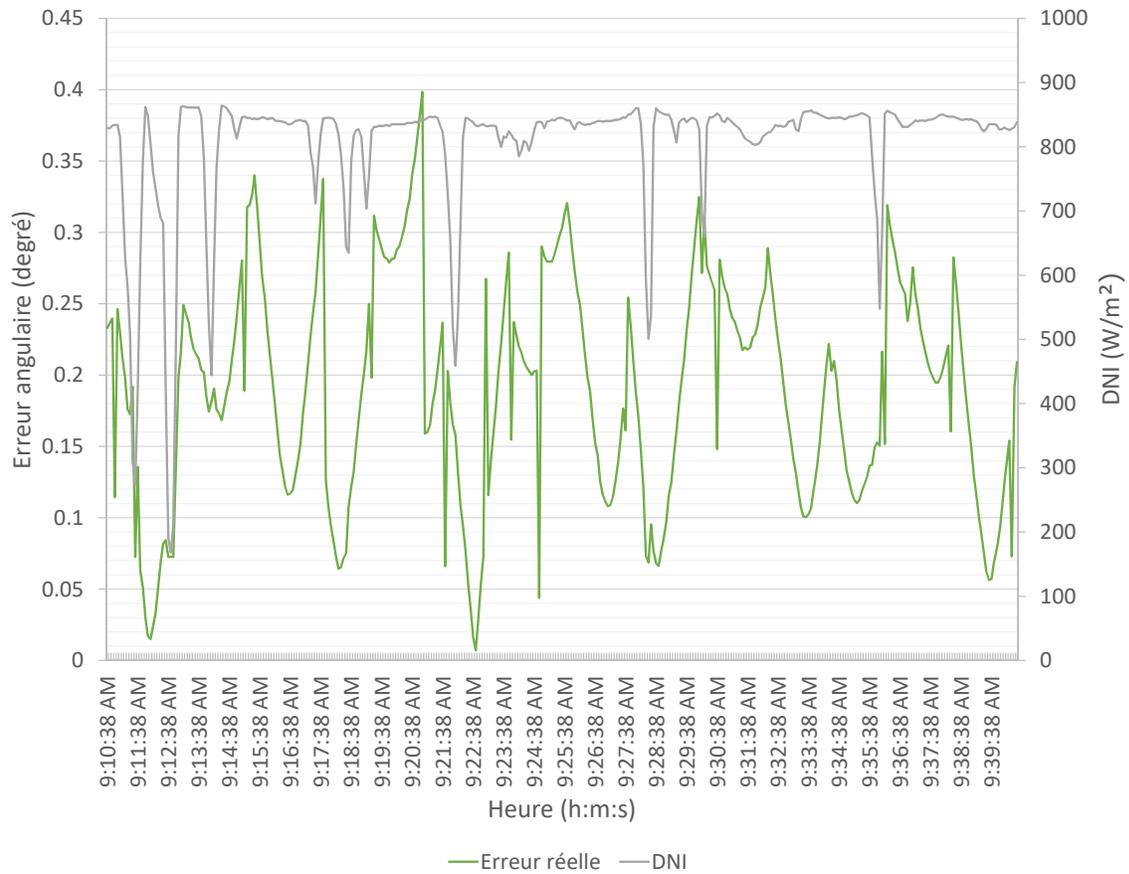


Figure 39: Erreur de poursuite solaire réelle obtenue avec l'algorithme hybride programmé à  $\pm 0,25^\circ$

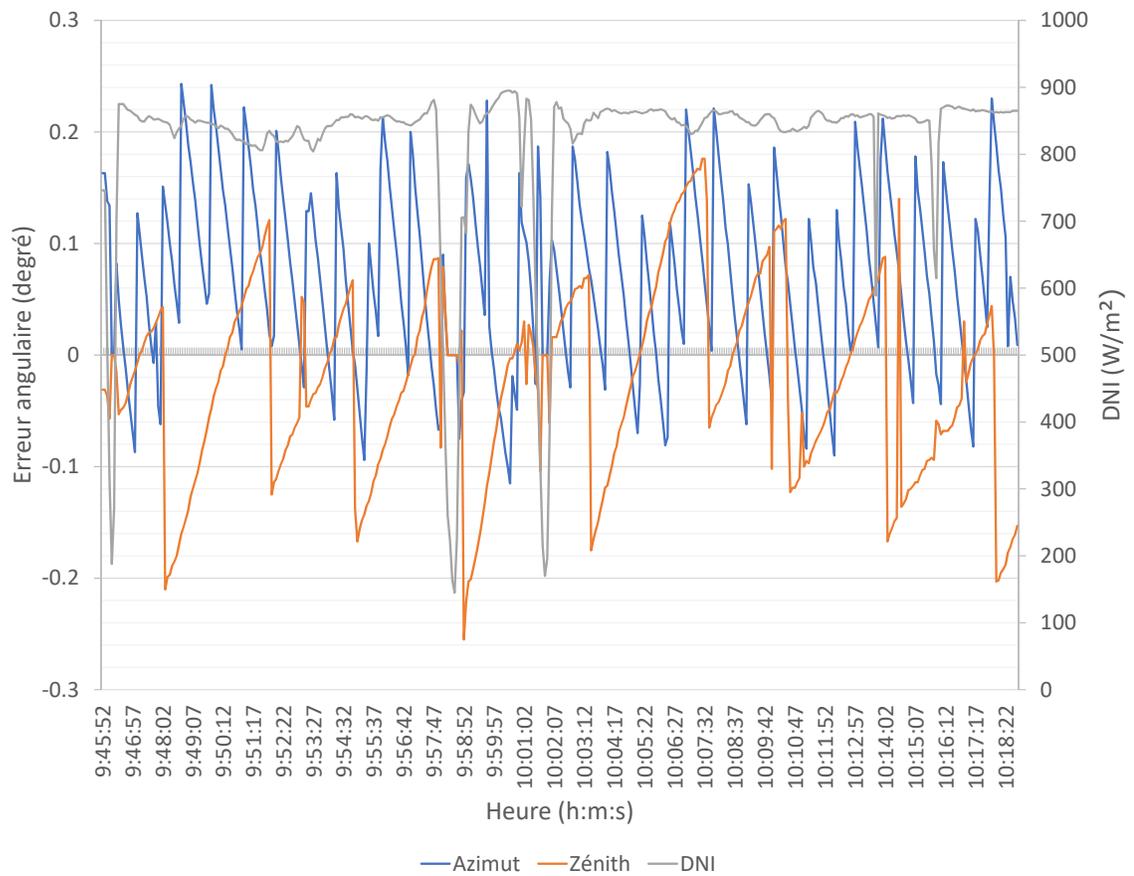


Figure 40: Erreur de poursuite solaire obtenue en azimuth et en zénith avec l'algorithme hybride programmé avec une erreur acceptable de  $\pm 0,125^\circ$  (sans traitement des données)

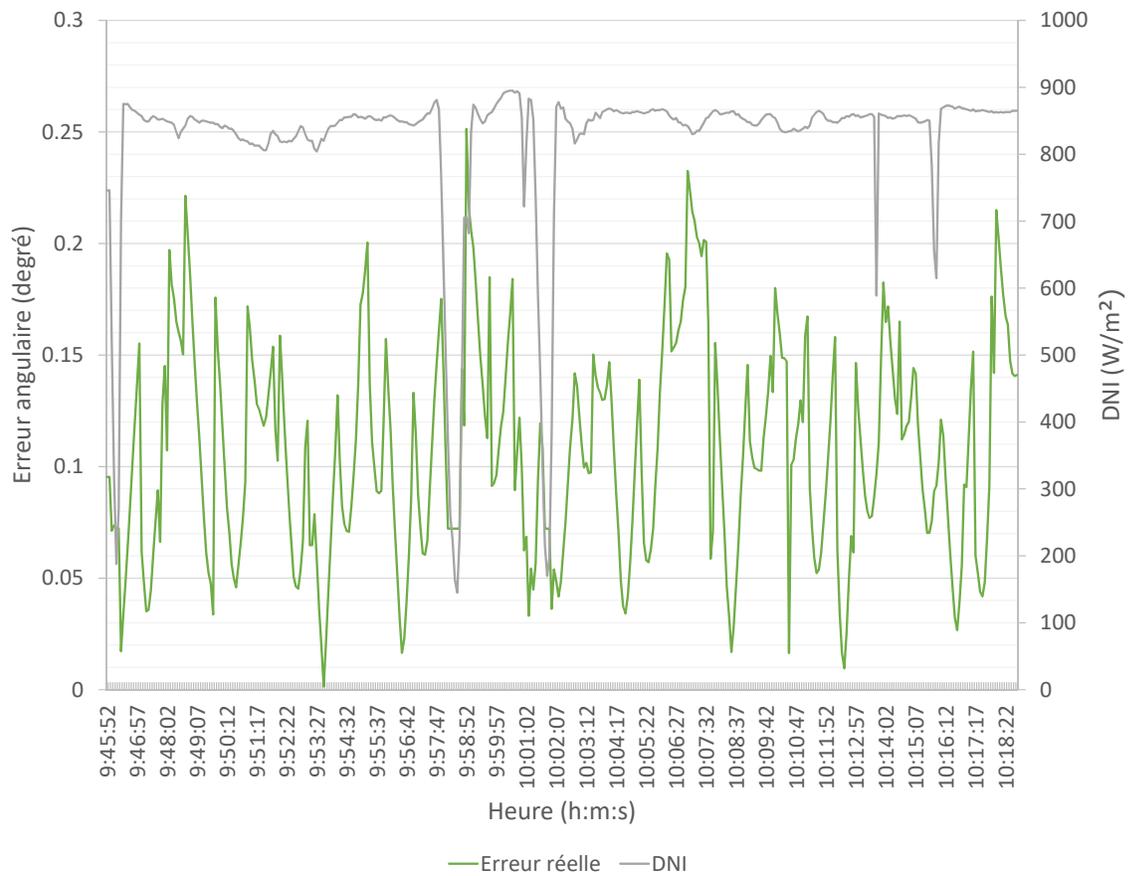


Figure 41: Erreur de poursuite solaire réelle obtenue avec l'algorithme hybride programmé à  $\pm 0, 125^\circ$

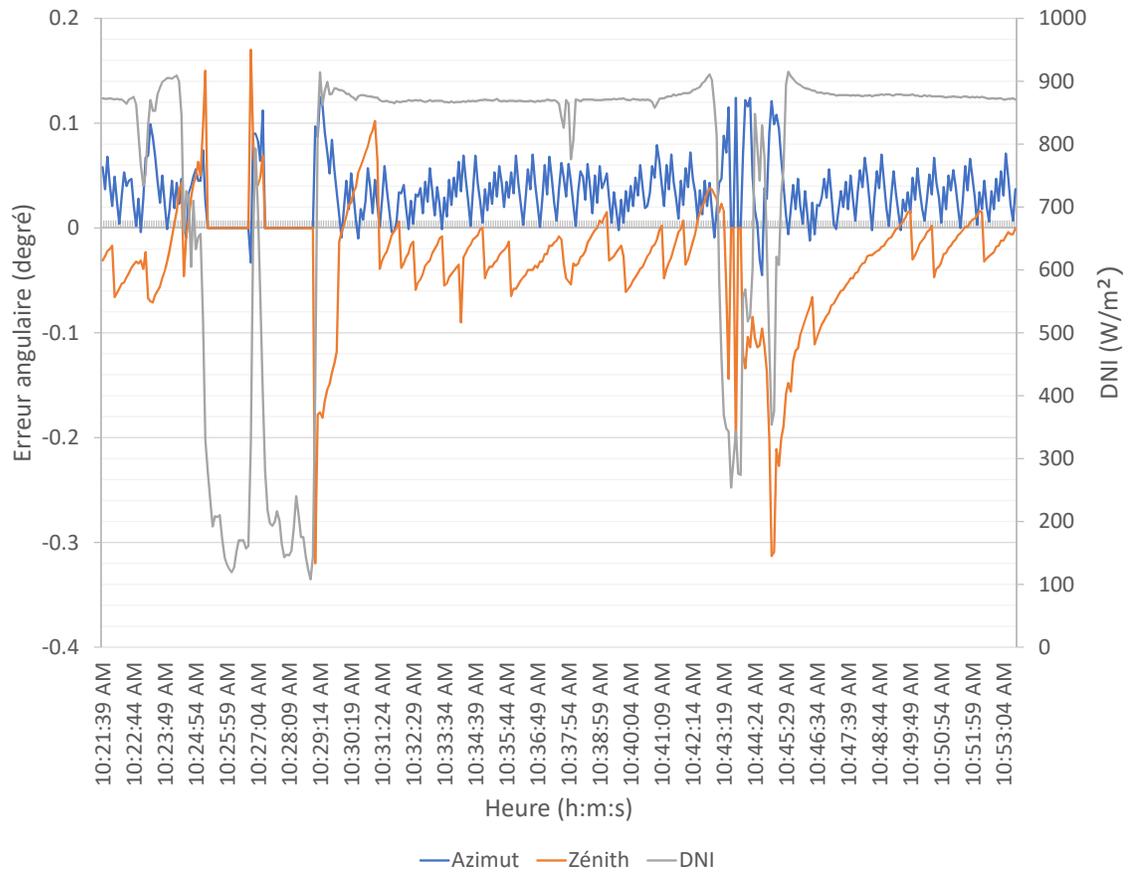


Figure 42: Erreur de poursuite solaire obtenue en azimut et en zénith avec l'algorithme hybride programmé avec une erreur acceptable de  $\pm 0,025^\circ$  (sans traitement des données)

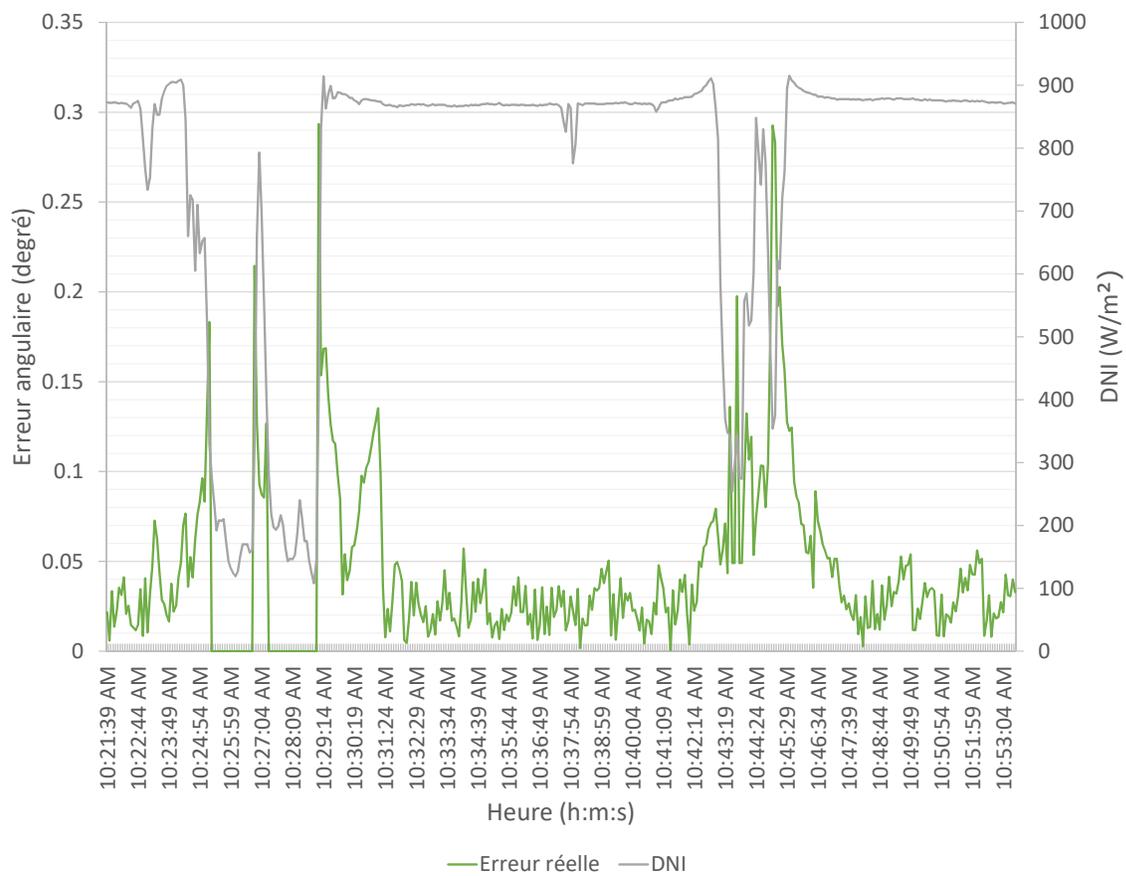


Figure 43: Erreur de poursuite solaire réelle obtenue avec l'algorithme hybride programmé à  $\pm 0,025^\circ$

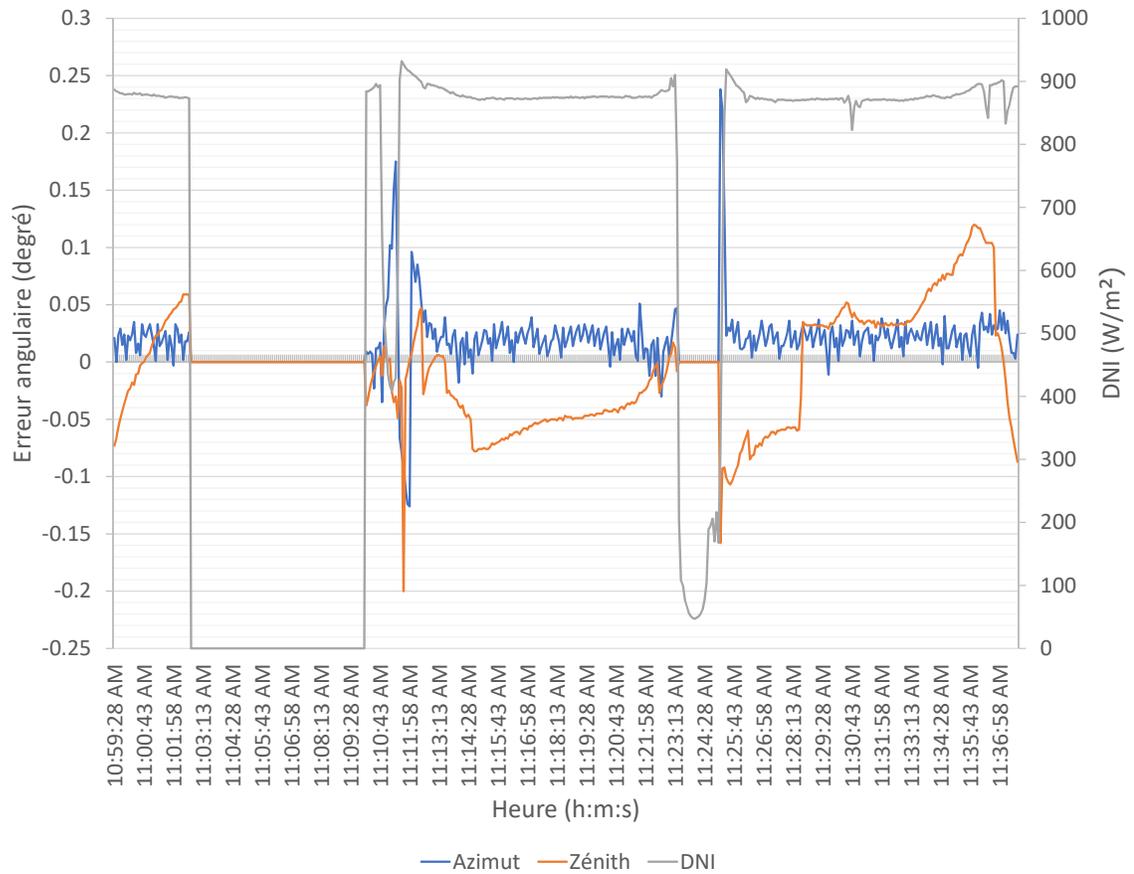


Figure 44: Erreur de poursuite solaire obtenue en azimut et en zénith avec l'algorithme hybride programmé avec une erreur acceptable de  $\pm 0,0125^\circ$  (sans traitement des données)

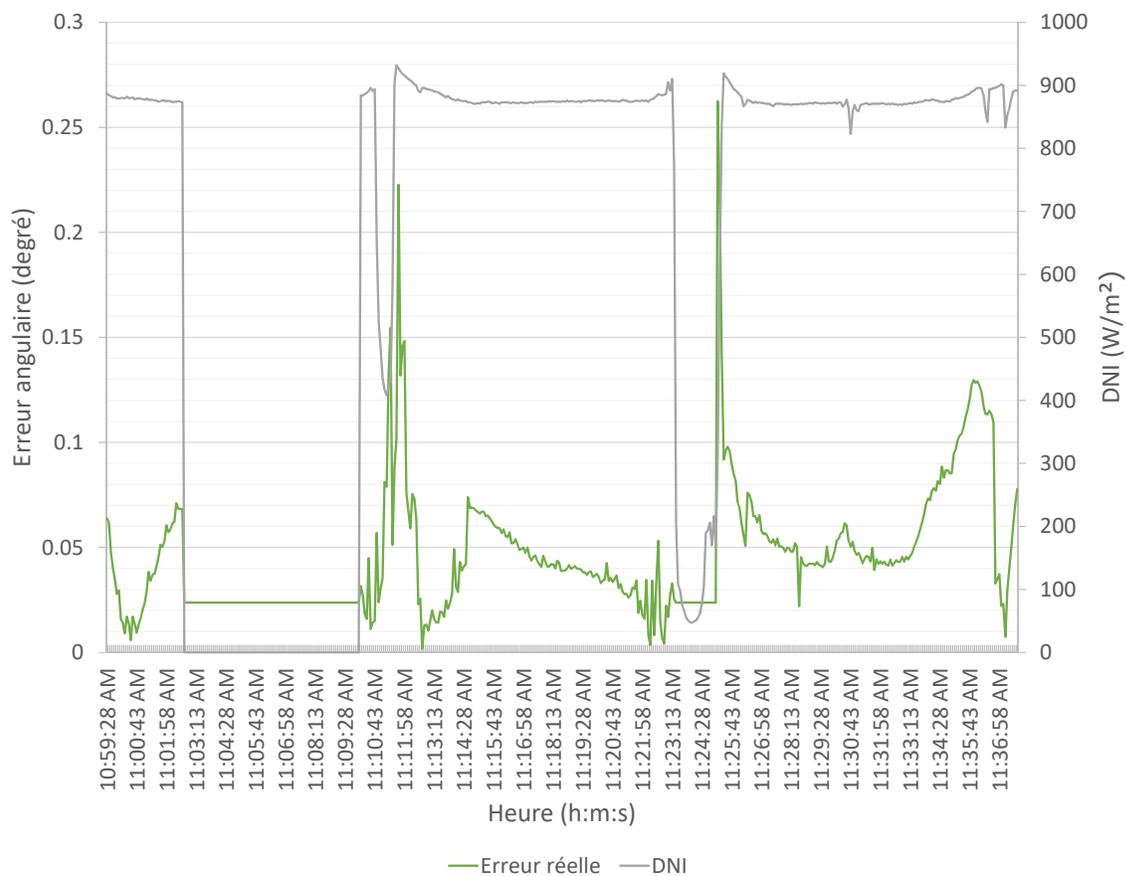


Figure 45: Erreur de poursuite solaire réelle obtenue avec l'algorithme hybride programmé à  $\pm 0,0125^\circ$

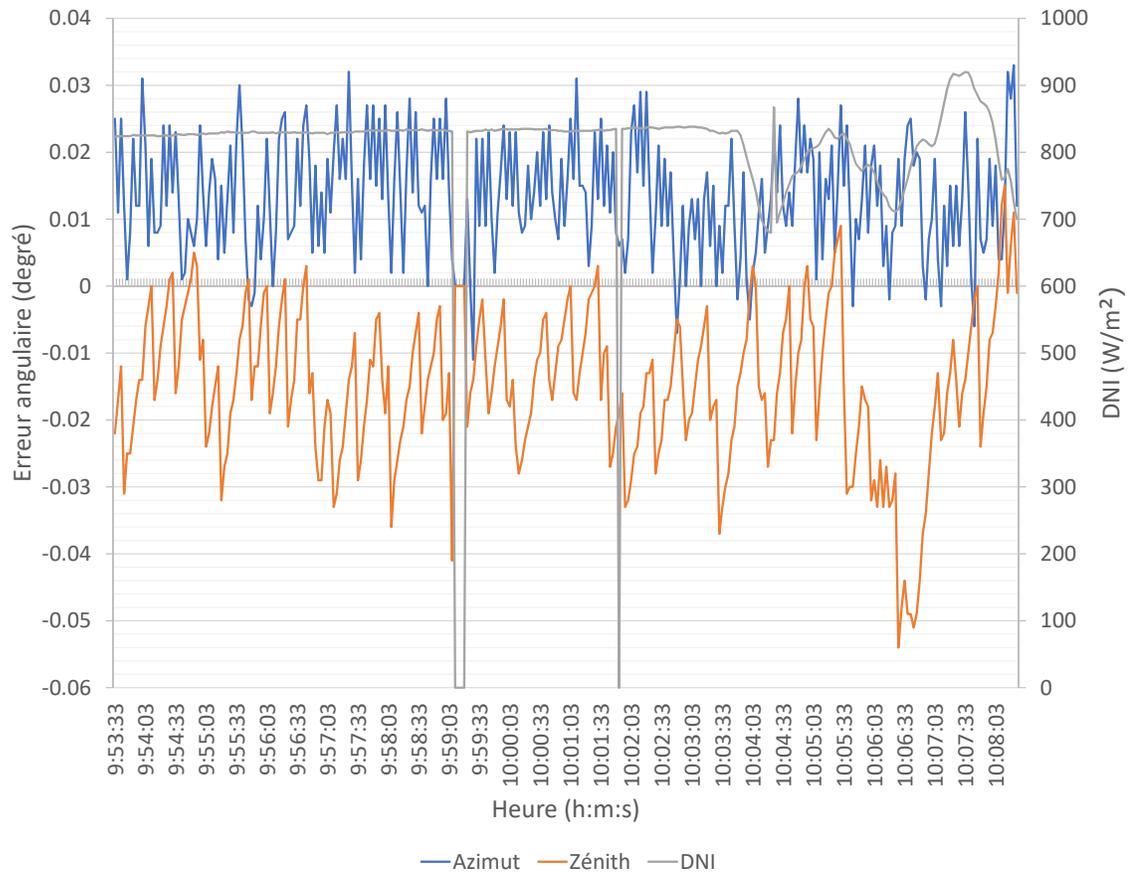


Figure 46: Erreur de poursuite solaire obtenue en azimut et en zénith avec l'algorithme hybride programmé avec une erreur acceptable de  $\pm 0,01^\circ$  (sans traitement des données)

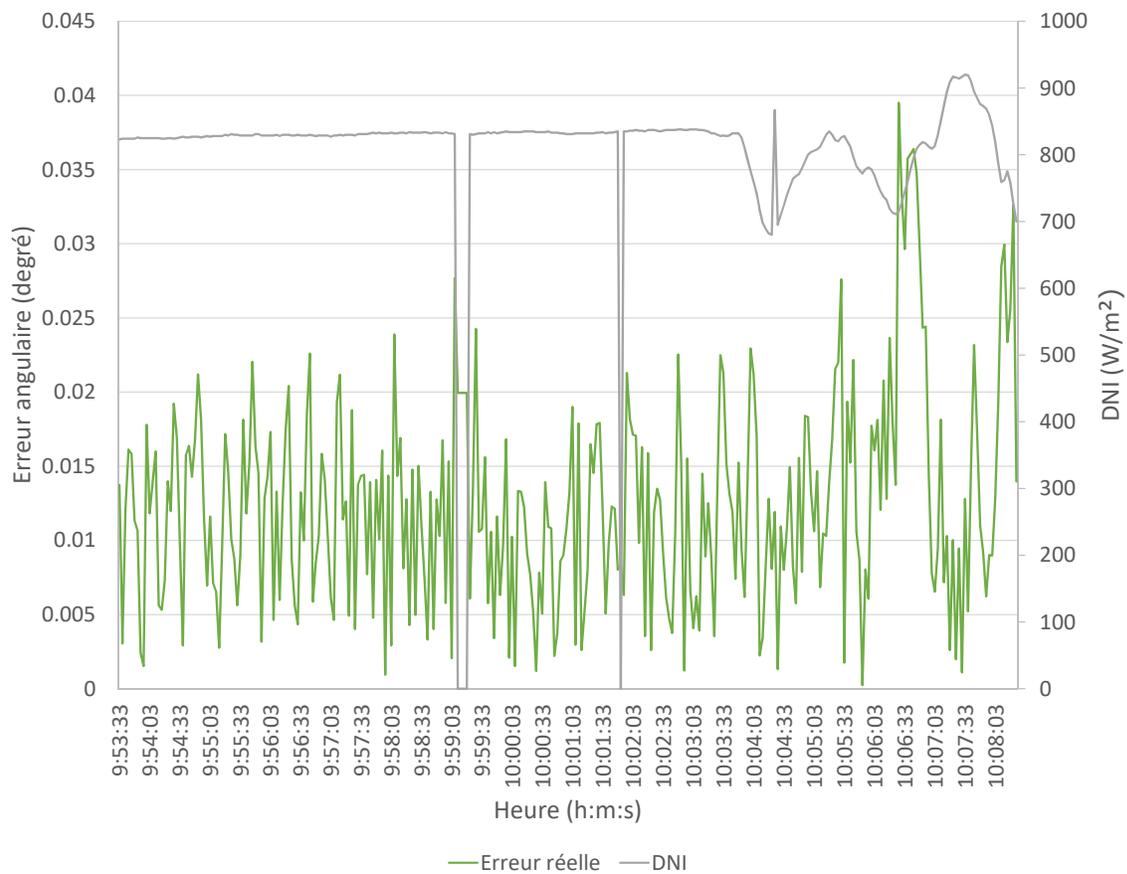


Figure 47: Erreur de poursuite solaire réelle obtenue avec l'algorithme hybride programmé à  $\pm 0,01^\circ$

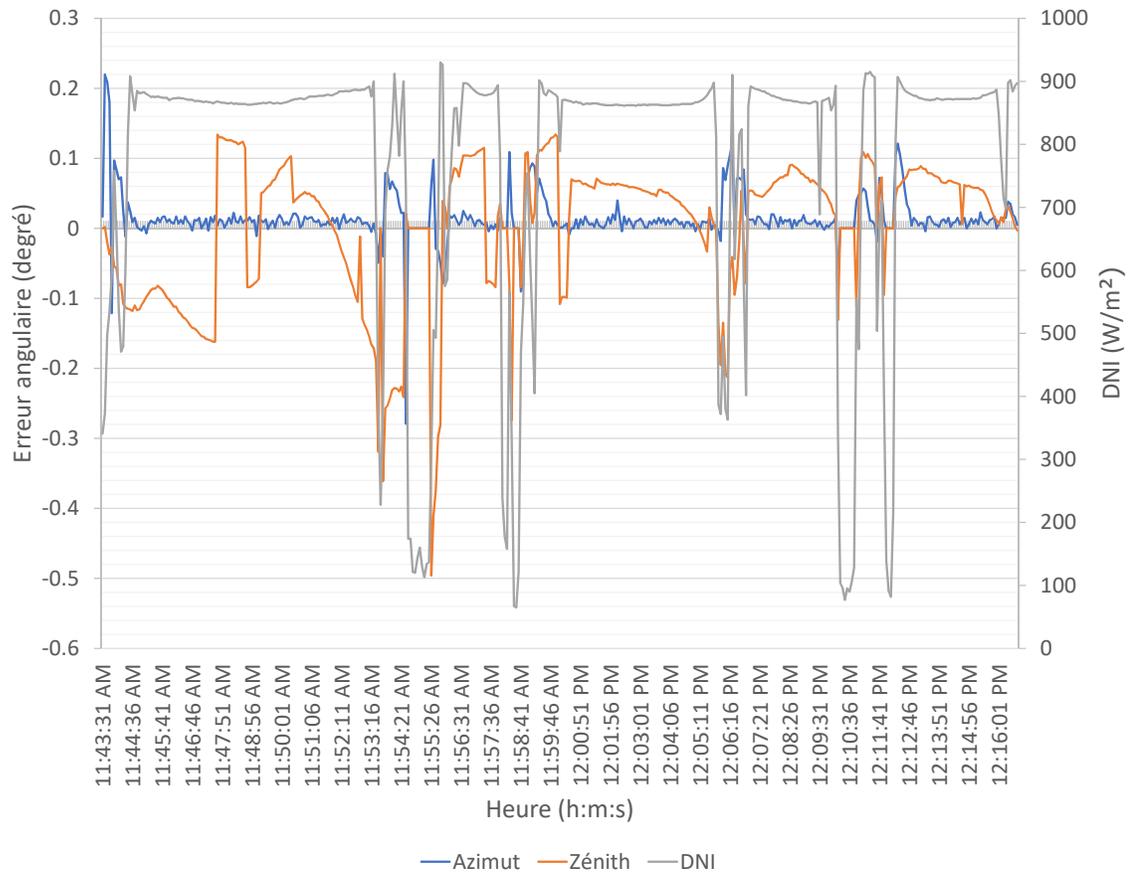


Figure 48: Erreur de poursuite solaire obtenue en azimut et en zénith avec l'algorithme hybride programmé avec une erreur acceptable de  $\pm 0,005^\circ$  (sans traitement des données)

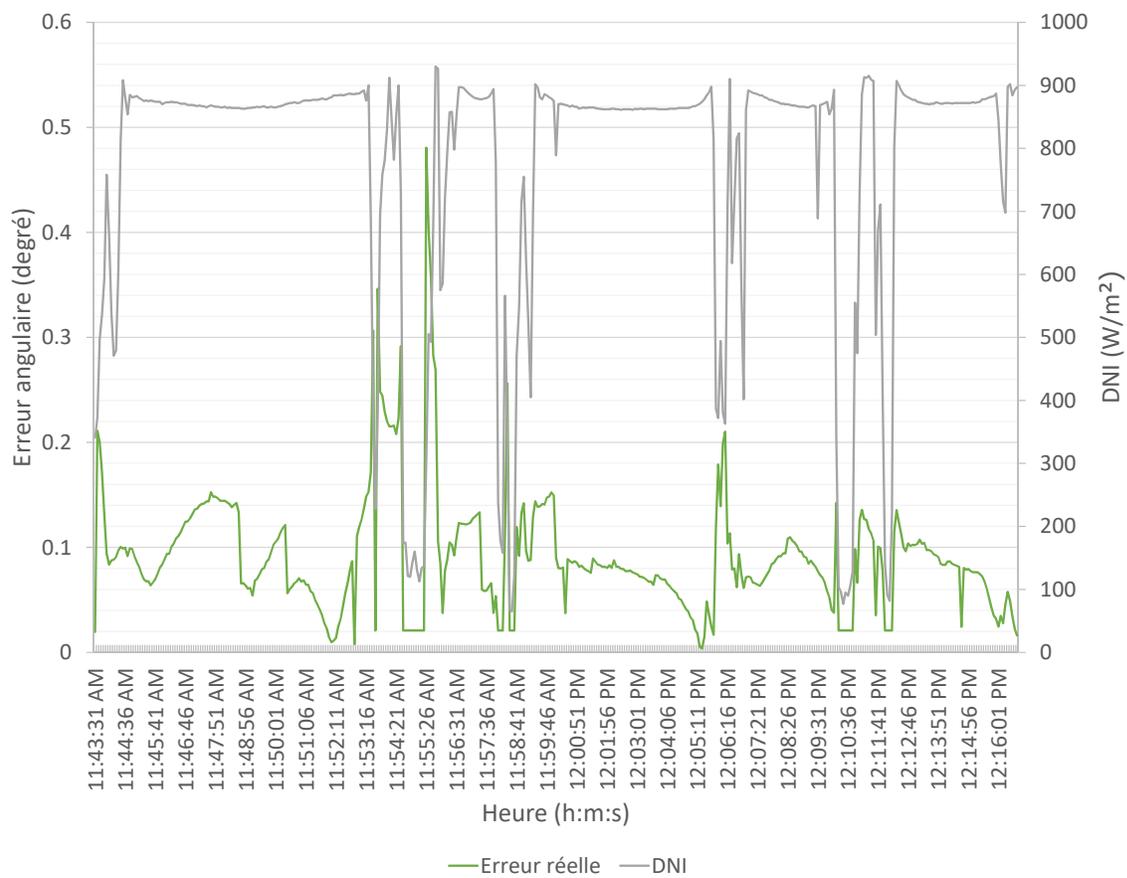


Figure 49: Erreur de poursuite solaire réelle obtenue avec l'algorithme hybride programmé à  $\pm 0,005^\circ$