



Thèse de Doctorat

Présentée par **GAMA Amor**
Magister en Electricité Solaire de l'Ecole Nationale Polytechnique

Thème

Optimisation des Dispositifs de Poursuite Solaire dans les Systèmes à Concentration

Membre du Jury :

Pr. HADDADI Mourad, Professeur (ENP, Alger)	Président
Pr. LARBES Chérif, Professeur (ENP, Alger)	Rapporteur
Dr. MALEK Ali, Directeur de Recherche (CDER, Alger)	Rapporteur
Pr. AZOUI Boubeker, Professeur (Université de BATNA)	Examineur
Pr. AIT CHEIKH Mohamed Salah, Professeur (ENP, Alger)	Examineur
Dr. AKSAS Mounir, MCA (Université de BATNA)	Examineur
Dr. TOUAFEK Khaled, MRA (URAER, Ghardaïa)	Examineur
M. OUADAH Abderrahim, DG MIE	Invité

2013

REMERCIEMENTS

De nos jours, toutes les études pour la réalisation de travaux de recherche se concrétisent grâce à une parfaite collaboration, un travail coopératif assure une bonne circulation de l'information et aussi un suivi sérieux et permanent de l'étude en question,

Dans ce contexte, je tiens à remercier vivement et à exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance à tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce modeste travail entre autres mes encadreurs: le Pr. Chérif LARBES, professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique (ENP, Alger) et le Dr. Ali MALEK, Directeur de Recherche au Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER, Bouzaréah), pour avoir proposé et diriger ce travail et pour leurs supports, conseils, et motivation qui m'ont apportés durant tous ce projet et tant d'autres.

Ce travail a été réalisé à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa, affiliée au Centre de Développement des Energies Renouvelables d'Alger. A cet effet, je tiens à remercier le Pr. YASSAA Noureddine, Directeur de Recherche et Directeur du Centre de Développement des Energies Renouvelables, Dr. DJAFER Djelloul, Directeur de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa, ainsi que Pr. Hocine BEN MOUSSA, Dr. Lazhar SERIR et Dr. CHADER KERDJOU Samira, pour tout leurs aide, disponibilité et le matériel qu'ils ont mis à ma disposition pour la réalisation de mon projet, qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude. Je remercie également tout le personnel chercheur et de soutien de l'URAER pour leur aide à l'aboutissement de ce travail.

Je remercie, Pr. Mourad HADDADI, responsable du Laboratoire Electricité Solaire à l'Ecole Nationale Polytechnique (ENP, Alger), qui m'a beaucoup aidé durant toutes ces années et qui m'a fait l'honneur de présider le jury.

Mes remerciements vont également au : Pr. AZOUI Boubaker, Professeur à l'Université de Batna, Pr. AIT CHEIKH Mohamed Salah, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Dr. AKSAS Mounir, Maître de Conférence A à l'Université de Batna et Dr. TOUAFEK Khaled, Maître de Recherche A à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa, pour avoir accepté d'examiner ce travail. Mes remerciements aussi à M^r. OUADAH Abderrahim, Directeur Général de MIE, qui m'a fait l'honneur de sa présence lors de ma soutenance.

Je tiens à remercier également : Dr. Chaabane HAMOUDA, Directeur de l'Unité de Recherche de l'Université de Batna, Dr. Ali MALEK, Directeur de Recherche au Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER, Bouzaréah) et Pr. Mourad HADDADI, Chef du Laboratoire Electricité Solaire à l'Ecole Nationale Polytechnique (ENP, Alger) qui m'ont beaucoup aidé depuis mes premiers pas dans le solaire et qui m'ont offert la possibilité de continuer dans ce domaine et qui resteront toujours mes références, qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Je remercie aussi Pr. Maïouf BELHAMEL, Dr. Messaoud HAMOUDA, Pr. Chemseddine CHITOUR, Pr. Abla CHAKER et Dr. Belkacem ADOUANE pour tout leur aide, soutiens et encouragements durant toutes les années passés.

Je tiens à remercier vivement ma femme M^{me}. GAMA née YETTOU Fatiha, qui a été toujours à mes côtés m'encourager et surtout pour sa patience, je l'a remercie également pour son aide à l'aboutissement de ce projet.

Un grand merci à toute ma famille et à tous ceux qui me sont chers.

ملخص:

في هذا العمل قمنا باقتراح حل جديد متمثل في التقليل من الضياعات الضوئية في المركبات الشمسية الناجمة عن التأثير الجيبي بهدف التحسين في المردود الضوئي و الحراري للنظام. يتكون نظام تتبع الشمس المقترح من نظام تتبع الشمس بمحور واحد من اجل التتبع اليومي للشمس وانتقال اللاقط من اجل التتبع الفصلي. من اجل اثبات هذه الفكرة قمنا بإنجاز نموذج لمركز شمسي مزود بنظام تتبع الشمس المقترح, كذلك قمنا بإنجاز بطاقة إلكترونية للتحكم في نظام تتبع الشمس. تسيير نظام تتبع الشمس يضمه جهاز كمبيوتر باستخدام منفذيه المتوازي والمتسلسل, لذلك قمنا باستخدام Delphi 7.0 من اجل برمجة استراتيجية تتبع الشمس, من اجل مراقبة اشتغال النموذج ومعرفة نجاعة نظام تتبع الشمس المقترح قمنا بتركيب سلسلة ادوات قياس متصلة بالجهاز Agilent 34972A. النتائج المتحصل عليها كانت جد مرضية لذا نستطيع ان نقول اننا قمنا باقتراح نظام جديد لتتبع الشمس بمردود محصور بين نظام تتبع محور واحد وبمحورين.

كلمات مفاتيحية: مركز قطع مكافئ اسطواني, انتقال اللاقط, تتبع الشمس, التأثير الجيبي, الضياعات الضوئية, الضياعات الحرارية.

RESUME

Dans ce travail on présente une nouvelle solution pour la minimisation des pertes optiques dans les installations à concentrateurs cylindro-paraboliques dues à l'effet Cosinus afin d'améliorer leurs rendements optiques et thermiques. Le nouveau système de poursuite proposé est composé d'un système de poursuite solaire à un seul axe de rotation pour assurer la poursuite journalière et un système de déplacement de l'absorbeur dédié pour la poursuite saisonnière. Afin de concrétiser cette idée expérimentalement, nous avons réalisé un prototype d'un concentrateur cylindro-parabolique équipé du nouveau système de poursuite solaire proposé. Une carte électronique a été également réalisée pour la commande du système. La gestion du système de poursuite solaire est assurée à travers le port série et parallèle du micro-ordinateur par le biais d'un programme informatique conçu sous Delphi 7.0. Pour le contrôle du prototype une chaîne d'acquisition a été installée autour d'une centrale d'acquisition de données Agilent 34972A. Les résultats collectés sont très satisfaisants, nous avons pu montrer que nous avons proposé un nouveau système de poursuite solaire avec un rendement qui peut être situé entre la poursuite à un seul axe et deux axes de rotation.

Mots clés : Concentrateur cylindro-parabolique, Déplacement de l'absorbeur, Poursuite solaire, Effet Cosinus, Pertes optiques, Pertes thermiques.

ABSTRACT

In this work we propose a new solution for minimizing the optical and thermal losses in parabolic trough concentrators due to the cosine effect, in order to improve their thermal efficiencies. The new and proposed solar tracking system consists of a single axis sun tracking system for the daily tracking with an absorber displacement for seasonal tracking. To prove this idea experimentally, we made a prototype of a parabolic trough concentrator equipped with the proposed new solar tracking system. An electronic card has been designed to control the system. The management of the solar tracking system is ensured by a microcomputer through serial and parallel ports. The sun tracking strategy was programmed using Delphi 7.0. A chain of acquisition was installed for monitoring the prototype using an Agilent 34972A data acquisition unit. The obtained simulation and experimental results were very satisfactory. The efficiency of the proposed new solar tracking system is situated between those of single axis and two axis sun tracking systems.

Key words: PCT, Absorber displacement, sun tracking, cosine Effect, optical losses, thermal losses.

SOMMAIRE

RESUME

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

NOMENCLATURES

INTRODUCTION GENERALE 01

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LE SOLAIRE THERMIQUE

1.1	Introduction	04
1.2	Energie solaire	05
1.2.1	Le soleil	05
1.2.2	Rayonnement solaire	05
1.2.3	Potentiel solaire dans le monde	06
1.2.4	Ressources solaires de l'Algérie	07
1.3	Concentrateur cylindro-parabolique	07
1.3.1	Réflecteur	07
1.3.2	Absorbeur	09
1.3.3	Fluide caloporteur	11
1.4	Différents types de concentrateurs	12
1.4.1	Concentrateurs cylindro-parabolique	12
1.4.2	Concentrateurs paraboliques	12
1.4.3	Centrales à tours	13
1.4.4	Linéaire de Fresnel	13
1.4.5	Comparaison entre les systèmes à concentration	14
1.5	Historique de la concentration	16
1.5.1	En XVème-XVIème siècle	17

1.5.2	En XVIIème siècle	17
1.5.3	En XVIIIème siècle	18
1.5.4	En XIXème siècle	19
1.5.5	En XXème siècle	21
1.6	Centrales thermodynamiques solaires	24
1.6.1	Configurations hybrides et le stockage d'énergie	24
1.6.2	Cycles thermodynamiques utilisés dans les centrales thermiques	25
1.6.2.1	Cycle à vapeur	25
1.6.2.2	Cycle BRAYTON	26
1.6.2.3	Cycle RANKINE	26
1.6.2.4	Cycle combiné	27
1.6.2.5	Cycle Stirling	28
1.7	Conclusion	29

CHAPITRE 2 : ETAT DE L'ART SUR LES SYSTEMES DE POURSUITE SOLAIRES

2.1	Introduction	30
2.2	Principe de la concentration	31
2.2.1	Taux de concentration	31
2.2.2	Rayonnement absorbé	33
2.3	Théorie des systèmes de poursuite solaire	33
2.3.1	Sphère céleste	33
2.3.2	Les coordonnées célestes	34
2.3.2.1	Coordonnées géographiques	34
2.3.2.2	Coordonnées horaires	35
2.3.2.3	Coordonnées horizontales	36
2.3.3	Angle d'incidence	36
2.3.4	Suivi continu du soleil	37
2.3.5	Energie solaire reçue par un concentrateur avec poursuite solaire	39
2.4	Poursuite solaire dans les concentrateurs	40
2.5	Etat de l'art des systèmes de poursuite solaire	42
2.5.1	Poursuite solaire passif	42
2.5.2	Poursuite solaire active	44

2.5.2.1	Système de poursuite solaire à base de microprocesseur et capteur électro-optique (systèmes de poursuites sensibles)	42
2.5.2.2	Système de poursuite solaire à base de cellules solaires bifaciales (systèmes de poursuite sensibles)	50
2.5.2.3	Système de poursuite solaire basé sur la date et l'heure (systèmes de poursuite aveugles)	52
2.5.2.4	Système de poursuite solaire combiné basé sur capteur sensible et sur date / heures	56
2.6	Effet cosinus dans les concentrateurs cylindro-paraboliques	60
2.6.1	Effet cosinus	60
2.6.2	Valeur annuelle de l'effet cosinus au sud de l'Algérie	61
2.6.3	Simulation optique de l'effet cosinus	63
2.6.3.1	Poursuite solaire à axe de rotation horizontal orienté Nord-Sud	64
2.6.3.2	Poursuite solaire à axe de rotation orienté Est-Ouest	68
2.7	Conclusion et objectif de la thèse	70

CHAPITRE 3 : ETUDE ET REALISATION D'UN NOUVEAU SYSTEME DE POURSUITE SOLAIRE

3.1	Introduction	71
3.2	Conception d'un prototype d'un concentrateur cylindro-parabolique avec un nouveau système de poursuite solaire	72
3.2.1	Conception mécanique du concentrateur cylindro-parabolique	72
3.2.2	Solution mécanique du système de poursuite solaire	75
3.2.3	Simulation du système proposé	76
3.2.3.1	Simulation optique	76
3.2.3.2	Simulation thermique	79
3.3	Réalisation de la partie mécanique	81
3.3.1	Structure porteuse du prototype de concentrateur cylindro-parabolique	81
3.3.2	Réflecteur du prototype de concentrateur cylindro-parabolique	81
3.3.3	Absorbeur du concentrateur cylindro-parabolique	86
3.3.4	Circuit du fluide caloporteur	87
3.3.5	Dispositif mécanique de poursuite solaire	87
3.4	Réalisation de la partie électronique	89
3.4.1	Cartes électroniques	89

3.4.2	Organigramme de Communication PIC/PC	92
3.4.3	Détecteur de position du soleil	93
3.4.3.1	Conception d'un détecteur de position du soleil	93
3.4.3.2	Simulation optique du détecteur de position du soleil	94
3.5	Partie Informatique	98
3.5.1	Organigramme Générale de Gestion de la Poursuite	101
3.5.2	Chaîne d'Acquisition de Données	103
3.6	Installation du Système	103
3.7	Conclusion	104

CHAPITRE 4 : ETUDE EXPERIMENTALE DU NOUVEAU SYSTEME DE POURSUITE SOLAIRE

4.1	Introduction	106
4.2	Evaluation du Prototype Réalisé Selon les Normes ASHRAE	106
4.2.1	Rendement optique	106
4.2.2	Performances thermiques	109
4.2.2.1	Constante de temps	110
4.2.2.2	Rendement thermique	111
4.2.2.3	Angle d'incidence modifiée	111
4.3	Résultats Collectés	112
4.3.1	Tests durant la période d'hiver (jours clairs)	113
4.3.2	Tests durant la période d'hiver (jours moyens)	119
4.3.3	Tests durant la période du printemps	124
4.3.4	Tests durant la période d'automne	127
4.3.5	Tests durant la période d'été	129
4.3.6	Tests annuels du système réalisé	135
4.4	Conclusion	138

CONCLUSION GENERALE	140
----------------------------------	------------

BIBLIOGRAPHIE

NOMENCLATURES

<i>Symbole</i>	<i>Désignation</i>	<i>Unité</i>
C	Taux de concentration	-
A_o	Surface d'ouverture	m^2
A_r	Surface d'absorbeur	m^2
A_s	Surface de la source	m^2
T_c	Température du récepteur	$^{\circ}C$
$Q_{s \rightarrow r}$	Puissance émise par la source et capté par l'absorbeur	W
$Q_{r \rightarrow s}$	Puissance émise par l'absorbeur et capté par la source	W
$C_{idéal\ 2d}$	Concentration maximale d'un système à deux dimensions	-
$C_{idéal\ 3d}$	Concentration maximale d'un système à trois dimensions	-
θ_s	Demi-angle du cône de distribution du rayonnement solaire	$^{\circ}$
E_b	Rayonnement incident sur le plan d'ouverture	W/m^2
γ	Facteur optique du collecteur	-
τ	Facteur de transmission	-
α	Facteur d'absorption	-
δ	Déclinaison solaire	$^{\circ}$
n	Numéro du jour dans l'année	-
a_z	Azimut	$^{\circ}$
φ	Latitude du lieu	$^{\circ}$
ω	Angle horaire	$^{\circ}$
h_s	Hauteur du soleil	$^{\circ}$
δ_i	Angle d'incidence	$^{\circ}$
β	Inclinaison du plan	$^{\circ}$
γ_n	Hauteur de la normale du plan	$^{\circ}$
E	Rayonnement absorbé par unité de surface d'ouverture	W/m^2
E_d	Rayonnement incident sur le plan d'ouverture	W/m^2

E_c	Rayonnement au niveau de l'absorbeur	W/m^2
θ	Angle entre les rayons solaires et la normale de la surface d'ouverture du concentrateur	°
F	Distance focale	mm
L	Distance du foyer non couverte par les rayons concentrés	mm
τ	Coefficient de transmission du verre du récepteur	
ρ	Coefficient de réflexion de la surface du miroir	
A_f	Facteur géométrique	
θ_i	Angle d'incidence	°
φ_a	Angle entre l'axe de la parabole et un point sur la surface du miroir	°
φ_r	Angle d'ouverture.	°
d_r	Erreur de position de l'absorbeur	Mm
d^*	Erreur universelle non aléatoire en raison de l'erreur de position de l'absorbeur et du diamètre du tube de l'absorbeur (D). $d^* = d_r/D$	Mm
D	Diamètre du tube de l'absorbeur	mm
β^*	Paramètre d'erreur universel non aléatoire due à des erreurs angulaires et de l'angle d'erreur de poursuite (β). $\beta^* = \beta C$	-
β	Angle d'erreur de poursuite ()	
σ^*	Paramètre d'erreur universel aléatoire, $\sigma^* = \sigma C$.	-
σ	Erreur optique aléatoire, elle est donnée par la somme quadratique des erreurs individuelles	-
σ_{sun}	Largeur angulaire efficace du soleil	-
$\sigma_{specular}$	Erreur due au manque de spéularité parfaite.	-
$\sigma_{contour}$	Erreur de contour	-
δ_x, δ_y	Différence entre les valeurs d'analyse et les données mesurées dans le plan (x, y)	-
T_i	Température d'entrée	°C
$T_{0,t}$	Température de sortie au moment 't'	°C
$T_{0,int}$	Température à la sortie	°C
T_a	Température ambiante	°C
$Fr[\eta_o]_n$	Présente le rendement optique crête à un angle d'incidence normale	-
η_o	Rendement Optique	-
η_t	Rendement Thermique	-

LISTE DES FIGURES

Fig. 1.1	Répartition spectrale du rayonnement solaire	06
Fig. 1.2	Les ressources énergétiques solaires mondiales	06
Fig. 1.3	Le potentiel de l'Algérie en énergie solaire	07
Fig. 1.4	Les couches d'un miroir utilisé dans les systèmes à concentration	08
Fig. 1.5	Réflectivité de l'Aluminium et de l'Argent en fonction du spectre solaire	08
Fig. 1.6	Deux modèles d'une structure porteuse utilisée dans les concentrateurs cylindro-parabolique	09
Fig. 1.7	Courbe parabolique du concentrateur	09
Fig. 1.8	Tube collecteur d'un capteur cylindro-parabolique	11
Fig. 1.9	Concentrateur cylindro-parabolique	12
Fig. 1.10	Concentrateur parabolique	13
Fig. 1.11	Les centrales à tour	13
Fig. 1.12	Concentrateur à lentille de Fresnel	14
Fig. 1.13	Archimède et un de ses miroirs ardents	16
Fig. 1.14	La controverse des miroirs ardents	16
Fig. 1.15	Parabole proposée par <i>Léonard de Vinci</i> du type <i>CLFR</i> (Compact Linear Fresnel Reflector).	17
Fig. 1.16	Pompe solaire de <i>Salomon de Gauss</i>	18
Fig. 1.17	Miroir composé de Buffon	18
Fig. 1.18	Four à concentration de <i>Lavoisier</i>	19
Fig. 1.19	Pompe solaire de Mouchot, Alger 1879	20
Fig. 1.20	Imprimerie de Adel Pifre utilisant le concentrateur parabolique d'Augustin Mouchot	20
Fig. 1.21	Concentrateur parabolique de <i>JOHN ERICSSON</i>	21
Fig. 1.22	Pompe solaire d' <i>AUDREY ENEAS</i>	21
Fig. 1.23	Concentrateur de <i>MARIO ANTONIO GOMEZ</i>	22
Fig. 1.24	Centrale thermo-solaire à taille industrielle en Egypte	22
Fig. 1.25	Le four solaire de Bouzareah, Alger	23
Fig. 1.26	Concentrateur cylindro-parabolique	24
Fig. 1.27	Schéma d'une station thermodynamique hybride	25
Fig. 1.28	Diagramme <i>T-S</i> d'un cycle <i>BRAYTON</i> idéal	26

Fig 1.29	Cycle <i>RANKINE</i> idéal	27
Fig 1.30	Cycle combiné (cycle à gaz avec cycle à vapeur)	28
Fig 1.31	Diagramme <i>P-V</i> d'un cycle <i>STIRLING</i>	28
Fig 2.1	Relation entre le taux de concentration et la température du récepteur	31
Fig 2.2	Schéma du soleil à la distance (<i>R</i>) du concentrateur avec une surface d'ouverture (<i>A_a</i>) et un récepteur de surface (<i>A_r</i>)	33
Fig 2.3	La sphère céleste	34
Fig 2.4	Les coordonnées géographiques	35
Fig 2.5	Les coordonnées horaires	35
Fig 2.6	Les coordonnées horizontales	36
Fig 2.7	Variation de l'angle d'incidence en fonction de l'angle horaire	37
Fig 2.8	Variations de l'éclairement direct normal en fonction du facteur de trouble de Linke et du temps pour le jour le plus court (21 Décembre) de l'année	38
Fig 2.9	Variations de l'éclairement direct normal en fonction du facteur de trouble de Linke et du temps pour le jour le plus long (21 Jun) de l'année	38
Fig 2.10	Variation de l'énergie reçue (en Wh/m ²) par un concentrateur solaire horizontal en fonction du jour	39
Fig 2.11	Variation de l'énergie reçue (en Wh/m ²) par un concentrateur solaire incliné à la latitude en fonction du jour	39
Fig 2.12	Monture altazimutale des systèmes à 3 dimensions	40
Fig 2.13	Monture équatoriale des systèmes à 2 dimensions	41
Fig 2.14	Monture des systèmes à 2 dimensions (Est-Ouest)	41
Fig 2.15	Monture des systèmes à 2 dimensions (Parallèle à l'axe du monde)	42
Fig 2.16	Poursuite solaire passive au moyen de deux tubes cylindriques identiques remplis d'un fluide sous pression partielle	43
Fig 2.17	Principe de Balance d'ombre : capteur de position de soleil	45
Fig 2.18	Principe de Balance d'ombre : montage incliné des photos capteurs	45
Fig 2.19	Détecteur de position du soleil précis à base de collimateur	45
Fig 2.20	Schéma de poursuite solaire à cellules bifaciales auxiliaires	50
Fig 2.21	Position des modules photovoltaïques le matin et le soir.....	51
Fig 2.22	Système de poursuite solaire horizontal	52
Fig 2.23	Illustration de l'effet Cosinus dans les miroirs cylindro-paraboliques	60
Fig 2.24	Effet cosinus en fonction des jours de l'année pour plusieurs distances focales dans la région de Ghardaïa au Sud de l'Algérie	62

Fig 2.25	Illustration de l'effet Cosinus dans un concentrateur cylindro-parabolique de la centrale hybride de Hassi R'mel situé au Sud de l'Algérie	63
Fig 2.26	Le concentrateur cylindro-parabolique conçu sur pour la simulation optique	63
Fig 2.27	Simulation du concentrateur cylindro-parabolique avec axe de rotation horizontal orienté Nord-Sud pour une journée d'hiver	64
Fig 2.28	Distribution du rayonnement concentré au niveau du foyer du concentrateur cylindro-parabolique avec axe de rotation horizontal orienté Nord-Sud pour une journée d'hiver	64
Fig 2.29	Simulation du concentrateur cylindro-parabolique avec axe de rotation incliné à 32° orienté Nord-Sud pour une journée d'hiver	65
Fig 2.30	Distribution du rayonnement concentré au niveau du foyer du concentrateur cylindro-parabolique avec axe de rotation incliné à 32° orienté Nord-Sud pour une journée d'hiver ...	65
Fig 2.31	Simulation du concentrateur cylindro-parabolique axe de rotation horizontal orienté Nord-Sud pour une journée d'été	66
Fig 2.32	Distribution du rayonnement concentré au niveau du foyer du concentrateur cylindro-parabolique avec axe de rotation horizontal orienté Nord-Sud pour une journée d'été	66
Fig 2.33	Simulation du concentrateur cylindro-parabolique avec axe de rotation incliné à 32° orienté Nord-Sud pour une journée d'été	67
Fig 2.34	Distribution du rayonnement concentré au niveau du foyer du concentrateur cylindro-parabolique avec axe de rotation incliné à 32° orienté Nord-Sud pour une journée d'été	67
Fig 2.35	Simulation du concentrateur cylindro-parabolique avec axe de rotation orienté Est-Ouest pour une journée quelconque à 10h du matin	68
Fig 2.36	Distribution du rayonnement concentré au niveau du foyer du concentrateur cylindro-parabolique avec axe de rotation orienté Est-Ouest pour une journée quelconque à 10h du matin	69
Fig 2.37	Simulation du concentrateur cylindro-parabolique avec axe de rotation orienté Est-Ouest pour une journée à midi	69
Fig 2.38	Résultats de la concentration au niveau du foyer du concentrateur cylindro-parabolique avec axe de rotation orienté Est-Ouest pour une journée quelconque à midi	70
Fig 3.1	Plan détaillé du prototype proposé	72
Fig 3.2	Schéma détaillé du prototype proposé	73
Fig 3.3	Orientation automatique du réflecteur de l'Est à l'Ouest	74
Fig 3.4	Inclinaison manuelle du réflecteur	74
Fig 3.5	Déplacement manuel de l'absorbeur	74
Fig 3.6	Positions du concentrateur en fonction de l'état du vérin	75
Fig 3.7	Mouvement de la bielle et du vérin	76
Fig 3.8	Schéma détaillé du vérin électrique	76

Fig 3.9	Illustration des rayons solaires concentrés au niveau de l'absorbeur pour la première position de l'absorbeur	77
Fig 3.10	Illustration des rayons solaires concentrés au niveau de l'absorbeur pour la deuxième position de l'absorbeur	77
Fig 3.11	Distribution des rayons solaire concentrée au niveau du foyer (sans déplacement de l'absorbeur) pour la journée la plus courte de l'année	78
Fig 3.12	Distribution des rayons solaire concentrée au niveau du foyer (avec déplacement de l'absorbeur) pour la journée la plus courte de l'année	78
Fig 3.13	Modèle de simulation Trnsys pour le système proposé	79
Fig 3.14	Températures d'entrée et de sortie des trois types de poursuite solaire	80
Fig 3.15	Rendement des trois types de poursuite solaire	80
Fig 3.16	Manivelle de variation d'inclinaison du réflecteur	81
Fig 3.17	Capteur cylindro-parabolique à réflecteur ordinaire	82
Fig 3.18	Capteur cylindro-parabolique à réflecteur composé des lames de miroirs	82
Fig 3.19	Illustration de la forme des rayons concentrés dans les deux types de concentrateurs	83
Fig 3.20	Distribution des rayons solaire concentrée au niveau du foyer du concentrateur cylindro-parabolique avec réflecteur ordinaire	83
Fig 3.21	Distribution des rayons solaire concentrée au niveau du foyer du concentrateur cylindro-parabolique avec réflecteur composé des lames de miroirs	84
Fig 3.22	Modèle Trnsys de simulation thermique utilisé pour les deux types de concentrateurs cylindro-paraboliques	84
Fig 3.23	Résultats de simulation thermique utilisant Trnsys des deux types de concentrateurs cylindro-paraboliques	85
Fig 3.24	L'absorbeur du prototype du concentrateur cylindro-parabolique réalisé	86
Fig 3.25	Vue du circuit du fluide caloporteur	87
Fig 3.26	Vue du système mécanique de poursuite solaire	88
Fig 3.27	Vue du nouveau prototype réalisé	88
Fig 3.28	Vue des deux cartes électroniques réalisées	89
Fig 3.29	Schéma électronique de la carte à base de microcontrôleur PIC	91
Fig 3.30	Organigramme général du programme implémenté dans microcontrôleur PIC	92
Fig 3.31	Nouveau détecteur de la position du soleil réalisé	93
Fig 3.32	Schéma électronique du détecteur du soleil réalisé	94
Fig 3.33	Différentes position du soleil par rapport au détecteur réalisé	94
Fig 3.34	Vue de l'LDR utilisée pour la détection	95
Fig 3.35	Le détecteur en position verticale et en position orienté vers le soleil à 10h00 le 21 Décembre	95

Fig 3.36	Distribution des rayons solaires sur la face de la LDR pour une inclinaison de 20°	96
Fig 3.37	Distribution des rayons solaires sur la face de la LDR pour une inclinaison de 30°	96
Fig 3.38	Distribution des rayons solaires sur la face de la LDR pour une inclinaison de 40°	96
Fig 3.39	Distribution des rayons solaires sur la face de la LDR dans la position verticale	97
Fig 3.40	Distribution des rayons solaires sur la face de la LDR pour une inclinaison de 10°	97
Fig 3.41	Distribution des rayons solaires sur la face de la LDR pour une inclinaison de 20°	99
Fig 3.42	Fenêtre principale du logiciel de contrôle et de gestion du prototype	100
Fig 3.43	Organigramme général du programme de contrôle	102
Fig 3.44	Schéma synoptique de l'ensemble de l'installation réalisée	104
Fig 4.1	Le profil de la courbe parabolique mesurée et tracée	108
Fig 4.2	Constante de temps du collecteur	110
Fig 4.3	Courbe du rendement optique en fonction de l'angle d'incidence	112
Fig 4.4	Rayonnement solaire direct normal du 04 janvier 2012 (période hivernal, jour clair)	115
Fig 4.5	Signal délivré par le détecteur de position de soleil du 04 janvier 2012	115
Fig 4.6	Profil des températures du test du 04 janvier 2012	116
Fig 4.7	Rendement thermique du concentrateur le 04 janvier 2012	116
Fig 4.8	Rayonnement solaire direct normal du 09 Février 2013 (période hivernal, jour clair)	117
Fig 4.9	Profile des températures du test du 09 Février 2013	118
Fig 4.10	Rendement thermique du concentrateur le 09 Février 2013	118
Fig 4.11	Signal délivré par le détecteur de position de soleil du 09 février 2013	119
Fig 4.12	Rayonnement solaire direct normal du 06 Février 2013 (période hivernal, jour perturbé)	120
Fig 4.13	Profile des températures du test du 06 Février 2013	120
Fig 4.14	Signal délivré par le détecteur de position de soleil du 06 février 2013	121
Fig 4.15	Rendement thermique du concentrateur le 06 Février 2013	121
Fig 4.16	Rayonnement solaire direct normal du 11 Février 2013 (période hivernale, jour perturbé) ...	122
Fig 4.17	Profil des températures du test du 11 Février 2013	123
Fig 4.18	Rendement thermique du concentrateur le 11 Février 2013	123
Fig 4.19	Signal délivré par le détecteur de position de soleil du 11 février 2013	124
Fig 4.20	Rayonnement solaire direct normal du 12 Octobre 2011 (période d'automne, jour clair)	125
Fig 4.21	Profil des températures du test du 12 Octobre 2011	125
Fig 4.22	Rendement thermique du concentrateur le 12 Octobre 2011	126
Fig 4.23	Signal délivré par le détecteur de position de soleil du 12 Octobre 2011	126
Fig 4.24	Rayonnement solaire direct normal du 17 Août 2012 (période estivale, jour clair)	127
Fig 4.25	Profil des températures du test du 17 Août 2012	128
Fig 4.26	Rendement thermique du concentrateur le 17 Août 2012	128

Fig 4.27	Signal délivré par le détecteur de position de soleil du 17 Août 2012	129
Fig 4.28	Rayonnement solaire direct normal du 17 Août 2012 (période estivale, jour mi-clair)	130
Fig 4.29	Profil des températures du test du 17 Août 2012	131
Fig 4.30	Rendement thermique du concentrateur le 17 Août 2012	131
Fig 4.31	Signal délivré par le détecteur de position de soleil du 17 Août 2012	132
Fig 4.32	Rayonnement solaire direct normal du 21 Août 2012 (période estivale, jour mi-clair)	133
Fig 4.33	Profil des températures du test du 21 Août 2012	133
Fig 4.34	Rendement thermique du concentrateur le 21 Août 2012	134
Fig 4.35	Signal délivré par le détecteur de position de soleil du 21 Août 2012	134
Fig 4.36	Profil des températures de sorties annuelles du prototype réalisé, 2011	135
Fig 4.37	Rendement annuel du prototype réalisé, 2011	136
Fig 4.38	Profil des températures de sorties annuelles du prototype réalisé, 2012	136
Fig 4.39	Rendement annuel du prototype réalisé, 2012	137
Fig 4.40	Profil des températures de sorties annuelles du prototype réalisé, 2013	137
Fig 4.41	Rendement annuel du prototype réalisé, en 2013	138

LISTE DES TABLEAUX

Tab 1.1	Propriétés de quelques surfaces sélectives	10
Tab 1.2	Comparaison des quatre principaux types de concentrateurs	15
Tab 2.1	Effet Cosinus dans les systèmes de poursuite solaire	61
Tab 3.1	Etats possible de la carte ELN Durant le fonctionnement du prototype	90
Tab 3.2	Description de la fenêtre principale du logiciel de contrôle du prototype	99
Tab 4.1	Comparaison des paramètres d'erreur optique	109
Tab 4.2	Rendement optique et facteur d'interception pour $\theta_i=0$	109
Tab 4.3	Performances thermiques du concentrateur cylindro-parabolique	111
Tab 4.4	Jours choisis pour réaliser les tests du concentrateur cylindro-parabolique	113

INTRODUCTION GENERALE

Le confort énergétique est un indice principal de développement d'un pays. Malheureusement, durant les dernières décennies, l'exploitation abusive des énergies fossiles a provoqué de sérieux problèmes mondiaux tels que les changements climatiques et l'épuisement des ressources naturelles. Il est donc temps de penser objectivement et de revoir cette notion de confort énergétique. Actuellement, il existe une volonté mondiale pour remédier à ces problèmes. Parmi les solutions préconisées, il y a le recours aux énergies renouvelables à grande échelle.

Dans ce contexte, l'Algérie a donné une grande importance à ce domaine. Par ailleurs, et vu le potentiel énergétique considérable dont elle dispose, ce recours aux énergies renouvelables ouvre de nouvelles perspectives. Il permet de préserver les réserves actuelles et d'apporter une alternative au pétrole et au gaz, du point de vue revenu national du pays et sources d'énergie.

La centrale hybride solaire-gaz de *Hassi Rmel* de *150MW* (70% gaz et 30% solaire) est un bon exemple d'investissement dans ce domaine. Le projet est le premier de son genre à être réalisé en Algérie et il sera suivi certainement par d'autres projets dans l'avenir. Dans l'objectif de permettre une avancée progressive du développement de la filière, l'efficacité de ces installations en Algérie reste au préalable à démontrer car ces dernières devront être adaptées au climat Algérien, notamment celui du Sud du pays.

La problématique principale abordée dans cette thèse est la minimisation des pertes optiques et thermiques dues à l'effet cosinus dans les concentrateurs cylindro-paraboliques. Dans les installations solaires thermiques de petite et moyenne taille les pertes optiques dues à l'effet Cosinus sont importantes même avec la présence d'un système de poursuite solaire à un seul axe. Par contre dans les centrales solaires thermiques, la grande taille du champ solaire limite les solutions proposées pour le système de poursuite solaire et généralement les pertes optiques dues à l'effet Cosinus sont négligées malgré leur influence sur le rendement global. Il a été constaté que les systèmes de poursuite solaire utilisés actuellement dans les concentrateurs thermiques en général ne résolvent pas le problème de l'effet Cosinus. D'où l'idée de chercher un système de poursuite solaire qui constituera une solution optimale pour ce genre de problème. Notre proposition consiste à faire déplacer l'absorbeur pour le coïncider avec la ligne de concentration

décalée et minimiser ainsi les pertes optiques afin d'améliorer le rendement de ces installations. L'objectif de ce travail est donc de prouver la faisabilité et la rentabilité d'un tel système de poursuite avec déplacement de l'absorbeur. Pour cela nous avons réalisé un prototype d'un concentrateur cylindro-parabolique avec un système de poursuite solaire à un axe et muni aussi d'un actionneur pour le déplacement de son absorbeur.

La réalisation pratique du prototype s'est faite en plusieurs étapes. Nous avons d'abord commencé par la conception mécanique du concentrateur en utilisant le logiciel SolidWorks. Ensuite, nous avons procédé à la simulation optique du prototype en utilisant le logiciel TracePro et pour l'évaluation des performances thermiques du système nous avons utilisé le logiciel Trnsys. Après une validation théorique du prototype proposé, nous avons procédé à la réalisation pratique. Pour le système de poursuite solaire nous avons choisi d'utiliser un micro-ordinateur et une carte de commande électronique, à base d'un microcontrôleur *PIC16F877A*, liée au port parallèle du micro-ordinateur, pour la commande des différents dispositifs du prototype.

Un programme informatique a été réalisé sous langage *Delphi7.0* pour la collecte et le traitement des données ainsi que pour la gestion de la stratégie de poursuite solaire et la commande des différents dispositifs du prototype (vérin, pompe de circulation, ventilateur du radiateur). Une Chaîne d'acquisition de données a été installée pour le suivi du comportement du prototype et de son système de poursuite solaire. Pour cela, plusieurs instruments de mesures ont été utilisés (thermocouples *Type K*, station météorologique, etc...) et qui sont liés à une centrale d'acquisition de données de type *Agilent 34972A*.

Suite à l'assemblage et l'installation des différents instruments de mesures, l'étalonnage du système de poursuite solaire s'est avéré indispensable. Après la mise en marche du prototype, nous avons procédé aux tests. Les mesures ont été enregistrées quotidiennement sur trois ans. Les résultats obtenus ont montré que le nouveau système de poursuite solaire est très efficace dans les grands concentrateurs cylindro-paraboliques et il est indispensable pour les petits concentrateurs cylindro-paraboliques vu le taux important des pertes optiques existant dans ces derniers.

Cette thèse est organisée en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré aux notions générales sur l'énergie solaire et ces applications. Il présente aussi des généralités sur les systèmes à concentrateurs et leurs différents types. Une étude et un historique sur la concentration seront ensuite présentés. Les centrales solaires thermodynamiques et les cycles de production d'électricité sont également abordés à la fin de ce chapitre

Dans le second chapitre, nous nous intéressons à la théorie des systèmes de poursuite solaire et leurs applications dans les concentrateurs cylindro-paraboliques. Afin d'avoir une idée sur les travaux réalisés dans ce domaine, un grand intérêt est donné à l'état de l'art sur les systèmes de poursuite solaire. Ensuite, nous avons étudié l'effet cosinus dans ces derniers et avons posé la problématique et l'objectif de cette thèse.

Le troisième chapitre est consacré, dans sa première partie, à la réalisation du prototype du concentrateur cylindro-parabolique avec son système de poursuite solaire. Nous avons commencé par une conception mécanique du prototype en utilisant le logiciel SolidWorks puis, une simulation optique en utilisant le logiciel TracePro et enfin, une évaluation des performances thermiques en utilisant le logiciel Trnsys. Dans la seconde étape, nous passerons à la partie pratique du travail où nous décrirons la réalisation du concentrateur avec sa structure porteuse et le circuit du fluide caloporteur ainsi que le nouveau système de poursuite solaire. Le schéma synoptique et le principe de fonctionnement de l'ensemble y seront expliqués. Les deux aspects électronique et informatique du système de poursuite réalisé seront discutés. Les deux cartes réalisées pour assister la poursuite solaire sont présentées. Le logiciel élaboré pour la commande, la gestion et l'acquisition de données sera aussi détaillé.

Dans le quatrième chapitre, nous évaluons le prototype réalisé muni du nouveau système de poursuite solaire selon les normes ASHRAE. Des tests sont réalisés sur le système pour vérifier aussi bien le bon fonctionnement que le calcul du rendement. Nous avons, pour cela, mesuré les températures d'entrée et de sortie du fluide caloporteur au niveau du foyer et nous avons, à cet effet, constaté le bon fonctionnement du concentrateur et la précision du système de poursuite solaire sur toute la période des tests.

Enfin, une conclusion générale contenant les interprétations finales des résultats et les perspectives envisagées à ces travaux de recherche terminera cette thèse.

Chapitre 1

Généralités sur les systèmes à concentration

1.1 Introduction

Actuellement les changements climatiques et l'effet de serre étouffent la planète, en cause des quantités énormes de CO_2 dissipées à chaque moment dans l'environnement dues principalement à l'utilisation des énergies fossiles. C'est le moment de penser aux générations futures, l'alternative à cette énergie polluante est bien là, c'est les énergies renouvelables, mais est ce que nous sommes prêts à changer nos habitudes et renoncer un peu au niveau du confort énergétique actuel ? Ça devient une exigence, mais avant tous, il faut une valorisation de toutes les ressources énergétiques renouvelables existantes pour le développement de ce domaine.

Le domaine des énergies renouvelables varie selon les ressources naturelles de chaque pays. L'Algérie connue par sa grande superficie est caractérisée par un climat saharien qui favorise l'utilisation de l'éolien dans quelques zones, par exemple Adrar, et l'énergie solaire photovoltaïque dans le nord car le climat hostile du désert influe négativement sur ce genre d'installation, et l'énergie solaire thermique (à concentration) qui convient au sud Algérien. La centrale hybride de *Hassi Rmel* (150 MW, 70% gaz, 30% Solaire) est un exemple de réussite de ce genre de centrales en Algérie.

Dans ce chapitre nous allons donner un aperçu général sur l'énergie et le rayonnement solaire montrant le potentiel solaire mondial et l'importance du potentiel solaire de l'Algérie surtout au sud du pays. Nous donnons quelques généralités sur les systèmes à concentration en essayant de préciser une définition détaillée pour chaque système.

Un historique détaillé sur les différents systèmes à concentration sera également donné en détail, ainsi qu'un aperçu sur les centrales solaires thermiques et centrales hybrides expliquant le principe de chaque cycle thermodynamique pour la conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique et par la suite en énergie électrique.

1.2 Energie solaire

L'énergie solaire présente plusieurs avantages non négligeables sur les autres sources énergétiques. Elle est locale, gratuite, propre, silencieuse et durable [1]. L'énergie solaire peut être utilisée sur toute la surface de la terre ou presque, il suffit donc de capter celle-ci et de l'utiliser.

1.2.1 Le soleil

Le soleil exerce sur notre planète une action vitale, étant une véritable source de vie. Bien qu'il soit le centre du système qui porte son nom, le soleil n'est qu'une étoile parmi tant d'autres dans notre galaxie ; sa lumière met 8 minutes et 18 secondes pour parvenir sur terre. C'est une énorme sphère incandescente de plasma à la température voisine de $5800^{\circ}K$ dont le diamètre atteint 1391000 km [2]. La puissance émise par ce dernier est estimée à $1.7 \times 10^{23}\text{ kW}$ dont une partie, de l'ordre de $8.5 \times 10^{13}\text{ kW}$, atteint le globe terrestre, seuls 70% (environ $6 \times 10^{13}\text{ kW}$) de cette puissance pénètrent l'atmosphère. [2]

1.2.2 Rayonnement solaire

Le soleil nous envoie de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde varie de $0.22\mu\text{m}$ à $10\mu\text{m}$. La *figure.1.1* représente la variation de la répartition spectrale de ce rayonnement. Sur ce graphe on constate que pour $\lambda \leq 0.3\mu\text{m}$ et $\lambda \leq 1.5\mu\text{m}$ le rayonnement est négligeable alors que pour la partie visible du rayonnement, pour des valeurs entre 0.3 et $0.7\mu\text{m}$ l'absorption par l'atmosphère est faible. [3]

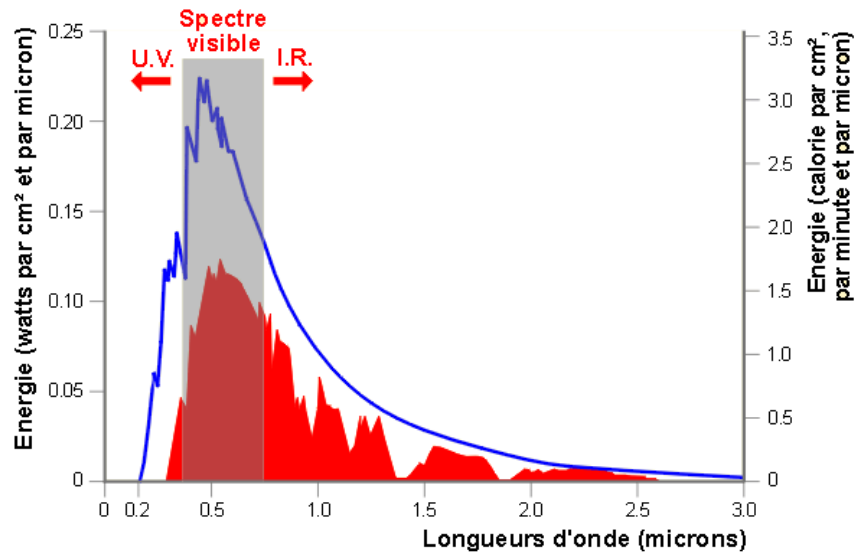


Fig.1.1. Répartition spectrale du rayonnement solaire.

1.2.3 Potentiel solaire dans le monde

Les technologies solaires utilisant les systèmes à concentration pour la production électrique exigent l'ensoleillement normal direct. En conséquence, les endroits d'exploitation appropriés (*figure.1.2*) sont situés dans les régions arides ou semi-arides de notre planète [4]. Les sources d'énergie renouvelables dans les pays au bord de la méditerranée à elles seules peuvent faire face à la demande énergétique mondiale croissante. [5]

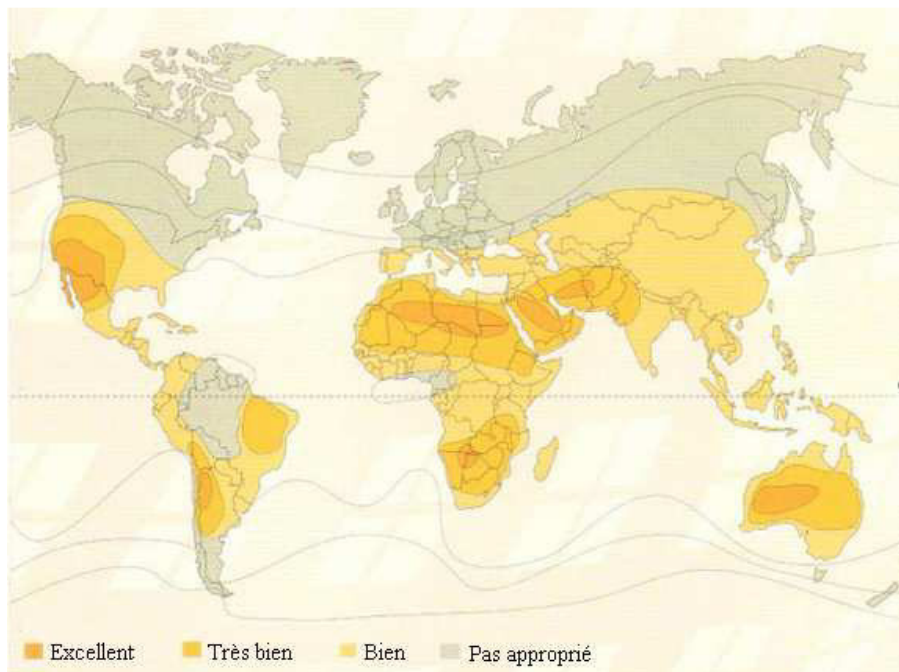


Fig.1.2. Les ressources énergétiques solaires mondiales.

1.2.4 Ressources solaires de l'Algérie

Avec $2\,381\,741\text{ km}^2$ de surface, l'Algérie est le pays le plus vaste de la zone méditerranéenne. Selon une étude de l'agence aérospatiale allemande *DLR* [5], l'Algérie offre les possibilités les plus intéressantes à long terme, pour investir dans les centrales thermiques solaires. En effet, l'Algérie est l'un des pays de la méditerranée qui dispose d'un potentiel solaire énorme (*figure.1.3*) et selon les données d'ensoleillement [6] l'Algérie est comptée parmi les meilleurs pays ensoleillés dans le monde. Le potentiel des ressources solaires de notre pays est donc optimal pour l'exécution des projets des concentrateurs solaires.

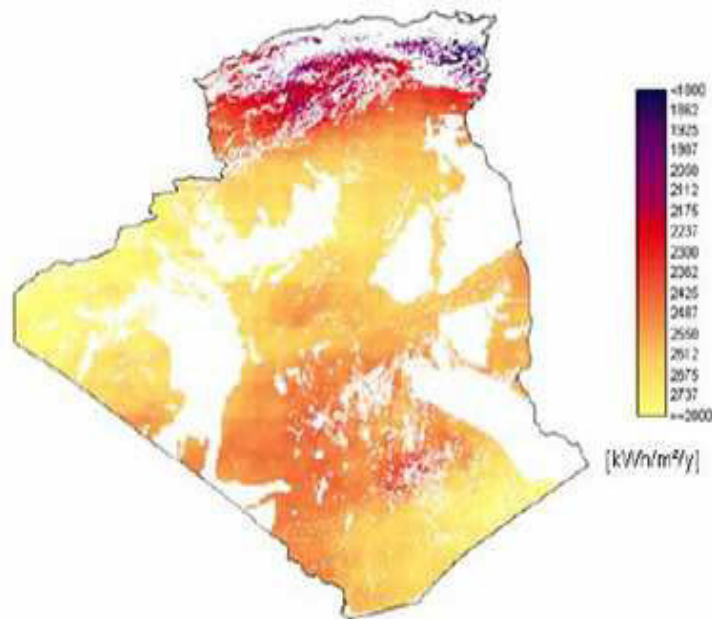


Fig.1.3. Le potentiel de l'Algérie en énergie solaire. [5]

1.3 Concentrateur cylindro-parabolique

1.3.1 Réflecteur

Le réflecteur dans les systèmes à concentration est composé de miroirs paraboliques et structure porteuse.

Les miroirs sont composés de verre pauvre en fer, dont la transmissivité atteint 98%. Ce verre est recouvert d'une pellicule d'argent en sa partie inférieure, et d'un enduit spécial de protection (*figure.1.4*). Un réflecteur de bonne qualité peut réfléchir 97% du rayonnement incident. [7]

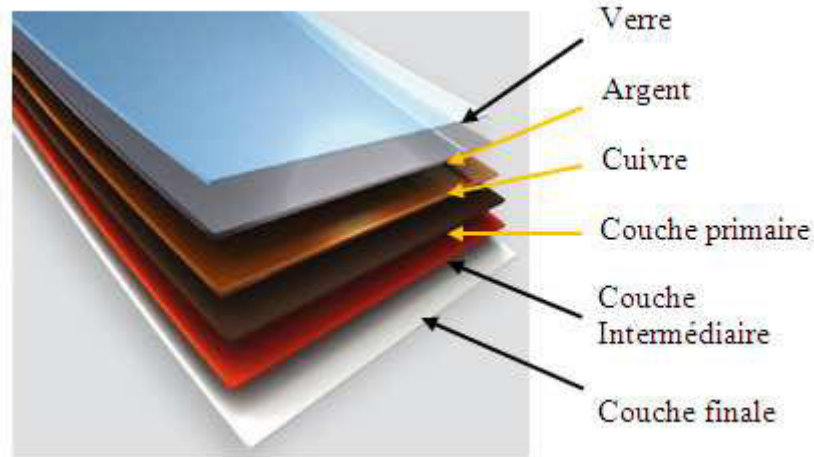


Fig.1.4. Les couches d'un miroir utilisé dans les systèmes à concentration.

En général l'argent et l'aluminium sont les matériaux les plus courants pour les miroirs ordinaires, l'argent a une réflectivité supérieure dans le spectre solaire, il est principalement utilisé dans les applications des concentrateurs solaires (*figure.1.5*). [7]

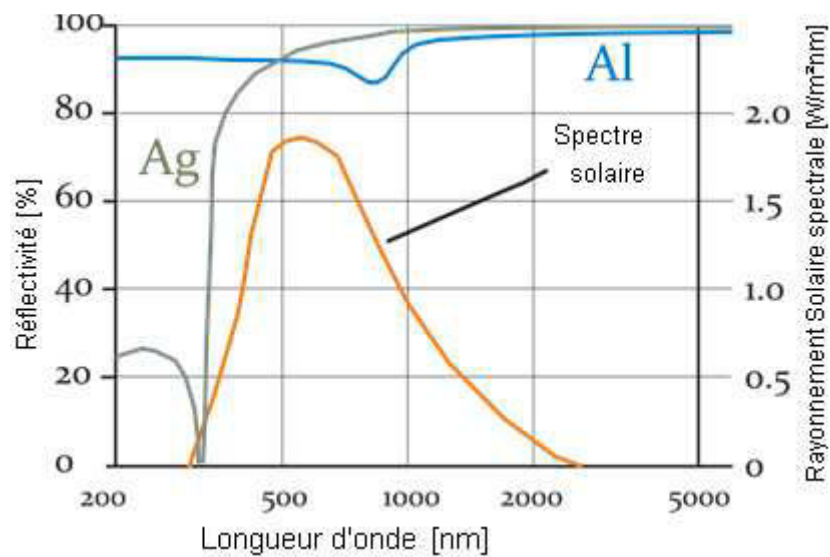


Fig.1.5. Réflectivité de l'Aluminium et de l'Argent en fonction du spectre solaire.

La structure métallique doit être suffisamment solide pour résister aux importantes contraintes mécaniques liées au vent (*figure.1.6*). Elle doit de plus être munie d'extrémités assurant la compatibilité entre les dilatations thermiques inégales de l'acier et du verre. [7]

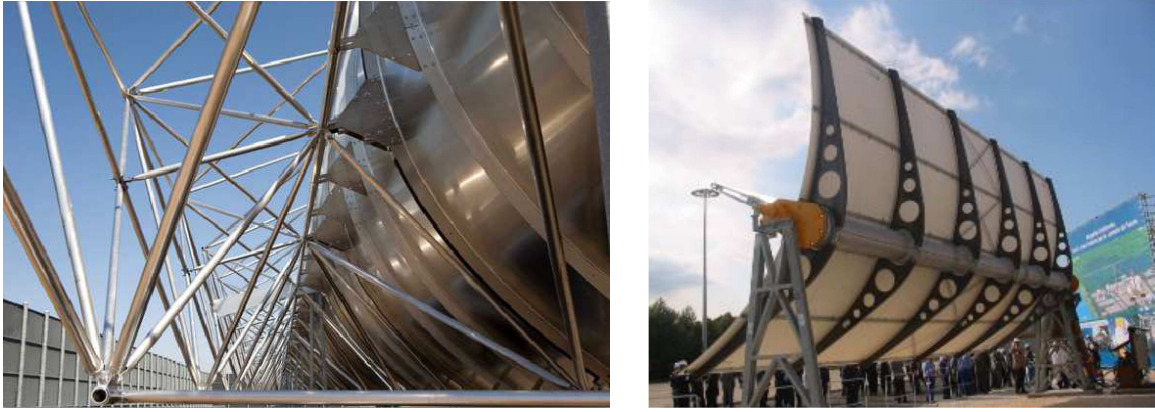


Fig.1.6. Deux modèles d'une structure porteuse utilisée dans les concentrateurs cylindro-parabolique.

Pour la forme parabolique, considérons un rayon qui se présente comme une ligne parallèle à l'axe (oy) et qui croise la forme parabolique (miroir) en un point (M) de coordonnées (x, y) . La réflexion est présentée sous forme d'une ligne qui coupe l'axe (oy) en (F_0) [8] (*figure.1.7*)

On a:

$$y = a \cdot x^2 \quad \text{avec} : \quad a = \frac{1}{4 \cdot F} \quad \Rightarrow \quad y = \frac{1}{4 \cdot F} \cdot x^2 \quad (1.1)$$

L'équation de rayon du miroir est:

$$r = \frac{2 \cdot F}{1 + \cos(\varphi)} \quad (1.2)$$

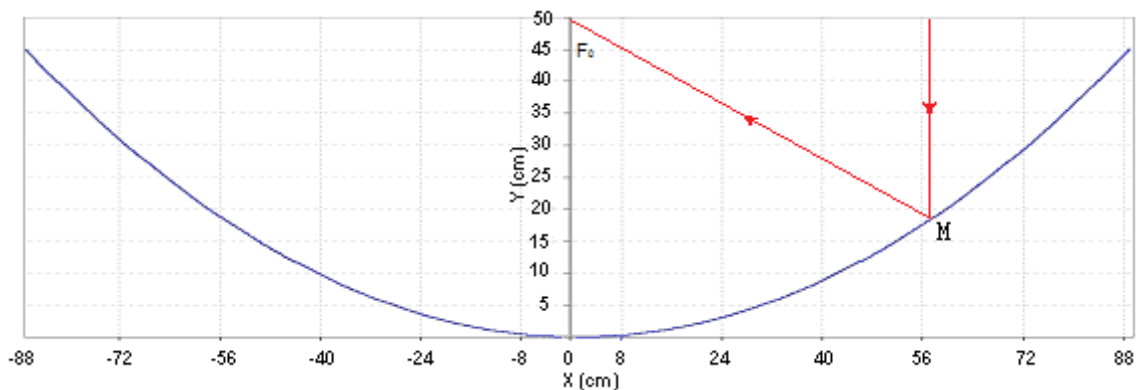


Fig.1.7. Courbe parabolique du concentrateur.

1.3.2 Absorbeur

L'absorbeur d'un capteur a pour rôle de transformer en chaleur le rayonnement solaire concentré qu'il reçoit et de transmettre cette chaleur au fluide caloporteur. Ses principales qualités seront donc :

- Un facteur d'absorption aussi voisin que possible de l'unité.
- Un pouvoir émissif dans l'infra-rouge aussi faible que possible.
- Une bonne conductibilité et diffusivité thermique.
- Une faible inertie thermique.
- Une bonne résistance chimique vis-à-vis du fluide caloporteur.

La première génération des absorbeurs, recouvèrent extérieurement d'une mince couche de peinture noire mate; utilisaient l'un des trois métaux suivant:

- Le cuivre : Le meilleur mais aussi le plus coûteux.
- L'acier : Déjà très employé par les chauffagistes. En effet de nombreux capteurs utilisent comme absorbeur des radiateurs extra-plats de chauffage central.
- L'aluminium, dont la conductibilité et la légèreté sont appréciables mais qui, de ces trois métaux, semble le plus vulnérable à la corrosion. Il faut en particulier éviter d'associer plusieurs métaux différents à une même circulation d'eau, ce qui produit alors un effet de pile rapidement destructeur.

Pour améliorer la captation du rayonnement on peut déposer sur l'absorbeur une couche mince. Les propriétés de quelques surfaces sélectives sont indiquées ci-après :

Table 1.1 : Propriétés de quelques surfaces sélectives. [3]

Nature	Pouvoir absorbant pour le rayonnement solaire	Pouvoir émissif pour l'infra-rouge lointain
Chrome noir	0.95 – 0.97	0.09 – 0.13
Cuivre oxydé	0.85	0.10
Fer oxydé	0.85	0.12
Surface de nickel et de Zinc	0.95	0.07
Maxorb	0.97	0.09

Le tube collecteur d'un concentrateur cylindro-parabolique (*figure.1.8*) a les caractéristiques suivantes :

- Bonne absorption du rayonnement : son coefficient d'absorption doit être aussi élevé que possible afin d'éviter toute réflexion du rayonnement incident.
- Pertes thermiques limitées : la température du tube dépassant généralement 400°C , les pertes par échanges convectifs et radiatifs sont très importantes. Afin de les limiter, le tube est entouré d'une enveloppe de verre sous vide.

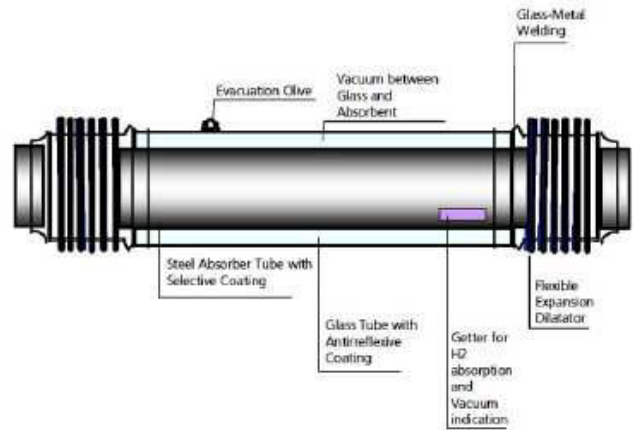


Fig.1.8. Tube collecteur d'un capteur cylindro-parabolique.

1.3.3 Fluide caloporteur

Ces fluides ont pour rôle de véhiculer la chaleur entre l'absorbeur et l'utilisation ou le stockage. On utilise principalement :

- L'air : Dont les avantages évidents sont l'abondance et la gratuité, a pour principal handicap sa faible capacité calorifique il faut environ 3000 litres d'air pour véhiculer autant d'énergie qu'un litre d'eau. Pour disposer d'une puissance de chauffe raisonnable il faudra donc brasser des volumes d'air très importants, ce qui implique des tuyaux et des échangeurs de grande dimension. Un avantage sur l'eau, c'est l'absence des problèmes de gel et de corrosion mais une puissante ventilation forcée peut être nettement plus bruyante qu'un petit circulateur à eau. [3]
- L'eau : N'est pas seulement bon marché, elle possède des propriétés physiques qui en font un excellent fluide caloporteur : sa chaleur massique inégalée, sa densité et sa faible viscosité. Toutefois, elle peut poser des problèmes de fonctionnement aux températures extrêmes : le risque de gel par exemple. [3]
- Les huiles sont des fluides monophasiques qui présentent un bon coefficient d'échange. Leur gamme de température est limitée à environ 400°C. C'est le fluide le plus couramment employé dans les centrales à collecteurs cylindro-paraboliques.
- Les sels fondus à base de nitrates de sodium et de potassium offrent un bon coefficient d'échange et possèdent une densité élevée. Ils sont donc également de très bons fluides de stockage. Leur température de sortie peut atteindre 650°C. Leur association avec un concentrateur à tour et un cycle de *Rankine* constitue une combinaison déjà éprouvée.

- Les gaz tels l'hydrogène ou l'hélium peuvent être utilisés comme fluides thermodynamiques et entraîner les moteurs Stirling qui sont associés aux collecteurs paraboliques.
- Les fluides organiques (butane, propane, etc.) possèdent une température d'évaporation relativement basse et sont utilisés comme fluide thermodynamique dans un cycle de *Rankine*.

1.4 Différents types de concentrateurs

1.4.1 Concentrateurs cylindro-parabolique

Comme son nom l'indique, ce système utilise une série de longs réflecteurs cylindriques en forme de parabole (*figure.1.9*). La parabole concentre la lumière sur un tube récepteur situé le long de la ligne focale du réflecteur. Les températures du récepteur peuvent atteindre (400°C) et peuvent produire de la vapeur afin de fournir de l'électricité. [9]



Fig.1.9. Concentrateur cylindro-parabolique.

1.4.2 Concentrateurs paraboliques

Un système à réflecteur parabolique (*figure.1.10*), utilise des miroirs paraboliques pour concentrer le rayonnement solaire sur un récepteur situé au foyer. Le récepteur contient un fluide qui, lorsque les rayons du soleil le frappent, atteint une température de 750 à 1000°C . Ce fluide très chaud est ensuite utilisé pour produire de l'électricité dans un moteur *Stirling* fixé au foyer de la parabole. [10]



Fig.1.10. Concentrateur parabolique.

1.4.3 Centrales à tours

Une centrale à tour (*figure.1.11*), utilise un certain nombre de grands miroirs plats qui suivent le mouvement du soleil et qui concentrent la lumière sur un grand absorbeur situé au sommet d'une tour. Le système pompe un fluide, soit une huile synthétique à haute température ou du sel fondu, dans l'absorbeur où il est chauffé jusqu'à (550°C) et ensuite utilisé pour produire de l'électricité. [10]



Fig.1.11. Les centrales à tour.

1.4.4 Linéaire de Fresnel

Le concentrateur à Réflecteur Linéaire de Fresnel (Concentrateur *LFR*) est généralement composé de plusieurs bandes de miroirs réfléchissants et concentrent le rayonnement sur le récepteur positionné au-dessus du miroir de Fresnel (*figure.1.12*), il intercepte le rayonnement concentré. La conception du récepteur peut varier. Il est souvent composé d'un réflecteur secondaire, qui concentre encore d'un facteur 1 à 3 le rayonnement. Il permet de réduire la surface de l'absorbeur, ce qui limite les pertes, par rapport aux performances de concentration du miroir de Fresnel. [11]



Fig.1.12. Concentrateur à lentille de Fresnel.

1.4.5 Comparaison entre les systèmes à concentration

Chaque système à concentration a ces avantages et inconvénients, la différence entre eux réside dans le coût et la température de fonctionnement, ainsi que le coût de la maintenance. Dans le tableau suivant (*Table.1.2*) on donne une comparaison détaillée entre les systèmes à concentration linéaire (Concentrateur cylindro-parabolique, linéaire de Fresnel) et les systèmes à concentration ponctuelle (Centrale à tour, Parabole) en donnant le coût par m^2 de chaque installation, l'état de l'art de chaque type, température de fonctionnement, le type de fluide caloporteur, le type de cycle thermodynamique utilisé, taille de l'installation et besoin pour la construction, ainsi que l'expérience et la fiabilité de chaque type. Il est clair que les concentrateurs paraboliques sont les plus chers suivis par la centrale à tour. Il est à noter que les meilleures installations les plus rentables utilisées mondialement sont les systèmes à concentrateurs cylindro-paraboliques.

Table 1.2 : Comparaison des quatre principaux types de concentrateurs. [11]

Concentration	Système à concentration linéaire		Système à concentration ponctuelle	
	Cylindro-parabolique	Linéaire de Fresnel	Central à tour	Parabole
Type de champ solaire				
État de l'art	Commercial	Pré-commercial	Pré-commercial	Prototypes opérationnels
Coût du champ solaire (€/m ² en 2007)	200-250	150-200	250-300	>350
Taille type d'une unité(MW)	5-200	1-200	10-100	0,010
Besoins pour la construction	Importants	Simple	Importants	Modérés
Température de Fonctionnement (°C)	390-550	270-550	550-1000	800-900
Fluide caloporteur courants	Huile thermique, eau/vapeur	Huile thermique, eau/vapeur	air, sels fondus, eau/vapeur	air
Cycle thermodynamique	Rankine	Rankine	Brayton, Rankine	Stirling, Brayton
Machine thermodynamique	Turbine à vapeur	Turbine à vapeur	Turbine à gaz, turbine à vapeur	Moteur Stirling
Expérience	Elevée	Faible	Moyenne	Moyenne
Fiabilité	Elevée	Inconnue	Moyenne	Moyenne
Stockage thermique	Sels fondus, béton, PCM	Sels fondus, béton, PCM	Sels fondus, céramique, PCM	Sels fondus, céramique, PCM
Combinaison Avec dessalement	Facile	Facile	Facile	Facile
Intégration à l'environnement	Difficile	Facile	Moyen	Moyen
Besoins pour le fonctionnement	Importants	Simple	Importants	Simple
Emprise au sol	Elevée	Faible	Elevée	Modérée

1.5 Historique de la concentration

Les grecs seraient la première civilisation à utiliser le soleil comme énergie solaire active. En effet, lors de la cérémonie d'ouverture des premiers jeux Olympiques de 776 av. J.-C. à Olympie sur l'initiative d'*IPHITOS*, roi d'Élide. La flamme olympique était obtenue par les rayons du soleil captés au centre d'un récipient appelé *SKAPHIA*, l'ancêtre du miroir parabolique. Cette invention du miroir ardent serait réutilisée cinq siècles plus tard par *ARCHIMEDE* lors du siège de Syracuse (Sicile) (*figure .1.13*). [12]

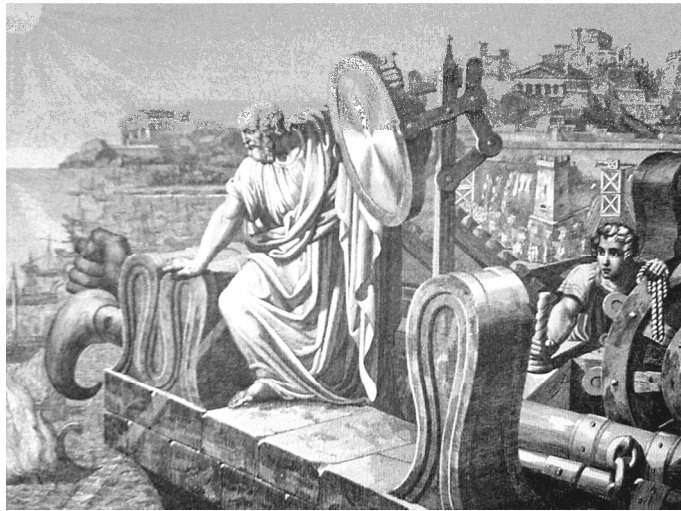


Fig.1.13. Archimède et un de ses miroirs ardents.

Cette colonie grecque fût attaquée par la flotte romaine, la légende veut qu'*ARCHIMEDE* ait mis au point des miroirs géants en bronze polis pour réfléchir et concentrer les rayons du soleil dans les voiles des navires romains et ainsi les enflammer (*figure .1.14*). Il est à noter qu'il est techniquement et scientifiquement impossible qu'*ARCHIMEDE* ait été en mesure de réaliser l'exploit de brûler à distance les navires ennemis à l'aide de miroirs ardents. [12]



Fig 1.14. La controverse des miroirs ardents.

1.5.1 Au XV^{ème}-XVI^{ème} siècle

Le concentrateur solaire de *LEONARD DE VINCI (1515)* : Leonard de Vinci proposa de construire dans le sol une parabole géante de 6 kilomètres de diamètre recouverte de miroirs (*figure .1.15*). Il avait prévu de chauffer toute sorte de liquides et de métaux au centre de cette parabole et prévoyait d'améliorer son rendement grâce à du verni, mais qui semble ne jamais avoir existé que sur le papier. [13]

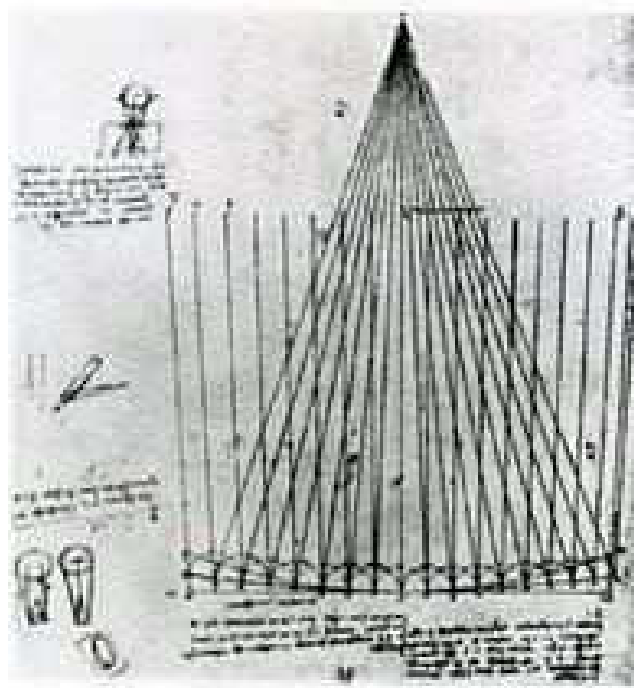


Fig.1.15. Parabole proposée par *Léonard de Vinci* du type *CLFR* (Compact Linear Fresnel Reflector).

1.5.2 Au XVII^{ème} siècle

En 1615, *SALOMON DE GAUSS* construisit une pompe solaire. La force motrice était fournie par de l'air chauffé avec le rayonnement solaire (*figure .1.16*). [14]

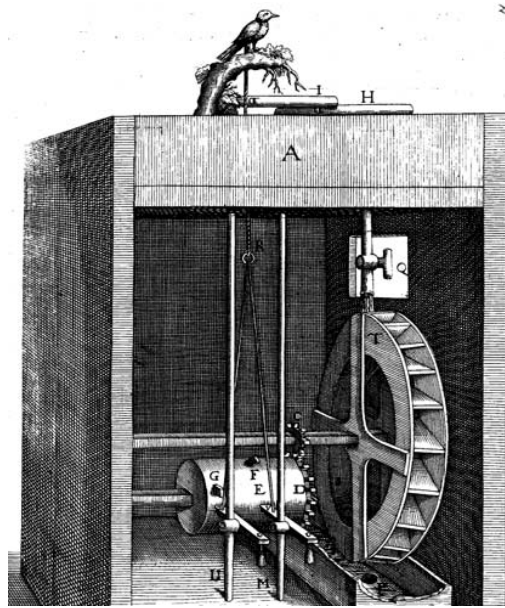


Fig.1.16. Pompe solaire de *SALOMON DE GAUSS*.

1.5.3 Au XVIIIème siècle

Durant le printemps et l'été 1747, *BUFFON* expérimenta un miroir composé de 168 glaces étamées, d'environ 20 cm de côté. Chacune de ces glaces était mobile en tous sens et pouvait ainsi renvoyer la lumière du Soleil vers le même point (*figure .1.17*). Les expériences furent faites à Paris, dans le jardin du roi (actuellement, le Jardin des plantes).

Une branche de hêtre goudronnée brûla avec 40 glaces seulement (le quart du miroir) et on fit fondre un gros flacon d'étain, pesant environ 2.7 kg, avec 45 glaces (l'étain fond à 228°C); un morceau d'argent fondit avec 117 glaces sachant que l'argent fond à 1044°C. [15]

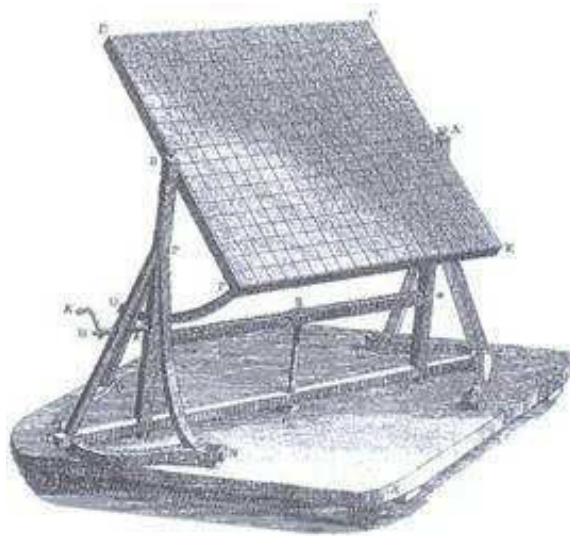


Fig.1.17. Miroir composé de *Buffon*.

En 1767, le suisse *HORACE BENEDICT* de Saussure construisit diverses machines solaires. Son premier collecteur de rayons était couvert par deux vitres planes sur la face orientée vers le soleil afin d'augmenter l'effet de serre. Il est considéré comme le précurseur du capteur solaire plan.

A la fin du *XVIIIème* siècle, *LAVOISIER* réalisa le premier four en concentrant les rayons solaires à l'aide d'une lentille à liquide (*figure .1.18*). Il atteint la température de la fusion du platine, soit près de *1800°C*. [15]

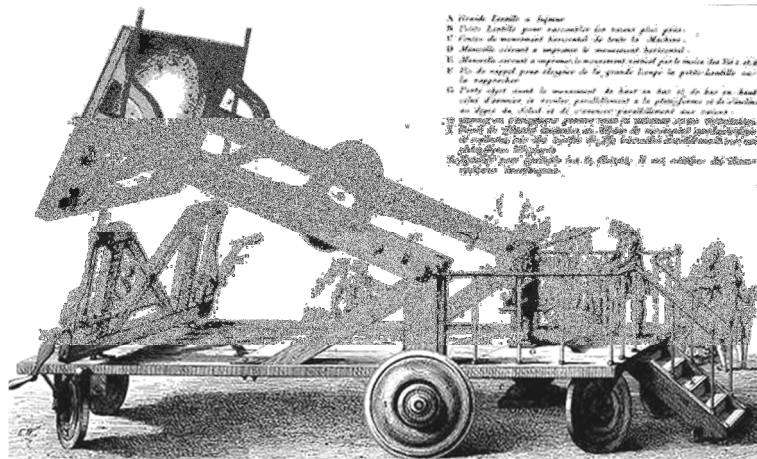


Fig.1.18. Four à concentration de *Lavoisier*.

1.5.4 Au *XIXème* siècle

Le Pasteur écossais *Robert Stirling* a déposé un brevet pour un "moteur à air chaud" en 1816. L'air enfermé dans un cylindre étant soumis à 4 cycles : chauffage, détente, refroidissement et compression au moyen d'une source de chaleur externe, afin de produire un mouvement rotatif. Malgré de nombreuses applications le moteur "*STIRLING*" ne résistait pas à la compétitivité économique d'abord des moteurs à vapeur et ensuite des moteurs à combustion interne. [25]

En 1860 *Augustin MOUCHOT*, professeur de lycée à Tours écrit: "Dans le futur on ne trouvera plus de charbon en Europe...que fera l'industrie ?". Il fût un extraordinaire pionnier du solaire à concentration et il a inventé les premières machines thermiques solaires à l'origine de celles qui sont utilisées aujourd'hui :

1860: Il invente le premier concentrateur cylindro-parabolique.

1866: *Augustin MOUCHOT* montre son moteur solaire à *Napoléon III* à Paris.

1876: Premier pasteurisateur solaire

1877: Le gouvernement français envoie *Augustin MOUCHOT* en Algérie pour réaliser des expériences sur le solaire. *Augustin MOUCHOT* et son assistant *ABEL PIFRE*, réalisèrent de

nombreuses expérimentations en Algérie : pompage solaire de l'eau, distillation solaire de l'eau, cuisson solaire.

1879 : *Augustin MOUCHOT* utilisait à Alger une machine pour pomper de l'eau jusqu'à une hauteur de 1m avec un débit de $1m^3$ /heure comme on peut le voir sur la photo (figure .1.19). [16]

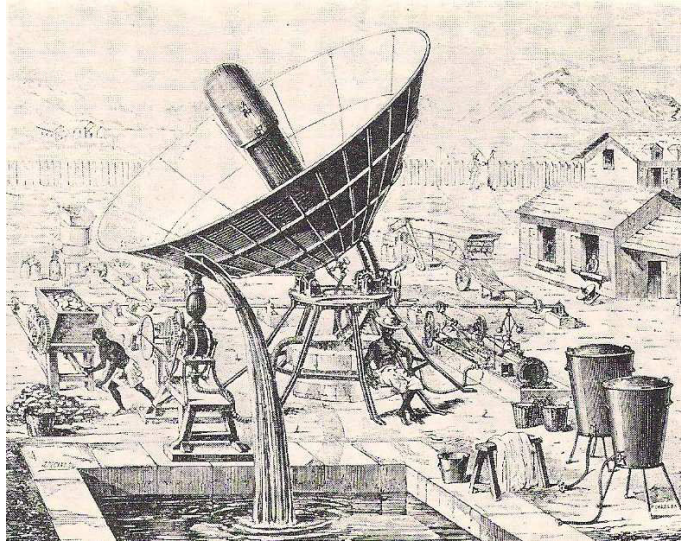


Fig.1.19. Pompe solaire de *MOUCHOT*, Alger 1879.

ABEL PIFRE utilisa le concentrateur parabolique d'*AUGUSTIN MOUCHOT* pour faire fonctionner une presse d'imprimerie et d'imprimer le journal intitulé "*Le soleil*" à 500 exemplaires/heure (figure .1.20). Mais a été jugé trop cher par le gouvernement français à être fabriqués à grande échelle. [17]

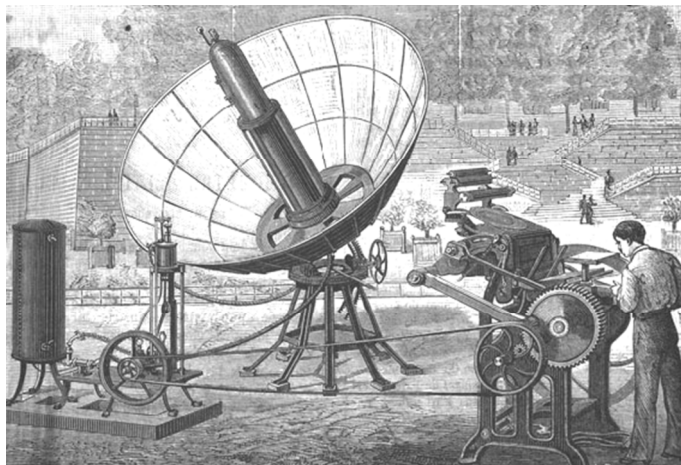


Fig.1.20. Imprimerie d'*ADEL PIFRE* utilisant le concentrateur parabolique d'*AUGUSTIN MOUCHOT*.

Le développement de nouveaux systèmes a été poursuivi aux Etats-Unis, où un ingénieur, le capitaine *John Ericsson* a construit le premier moteur à vapeur déplacé directement à l'énergie

solaire. Le capitaine construit au total, huit chauffages directs de l'eau ou de l'air comme fluides de travail dans le cylindro-parabolique (*figure .1.21*). [17]

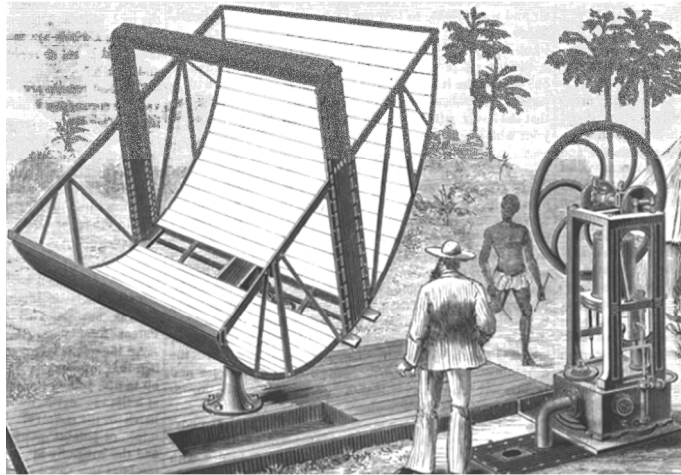


Fig.1.21. Concentrateur parabolique de *JOHN ERICSSON*.

1.5.5 Au XXème siècle

1901 : *AUBREY ENEAS* a réalisé une pompe solaire installée à la ferme de *PASADENA OSTRICH* Californie, avec un débit de 5300 litres d'eau par minute (équivalent de 5kW). (*Figure .1.22*). [18]

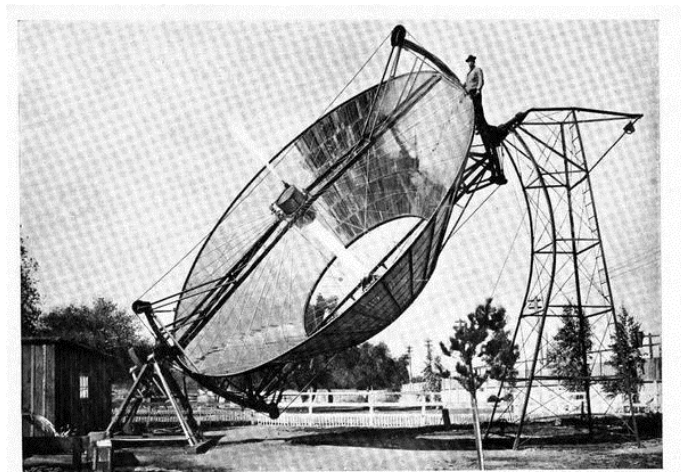


Fig.1.22. Pompe solaire d'*AUDREY ENEAS*.

1904 : *MARIO ANTONIO GOMEZ*, connu sous le nom de *PADRE HIMALAYA*. Ce prêtre portugais, qui était également un scientifique et inventeur, a été l'un des pionniers dans l'enquête de l'énergie solaire. Sa plus grande réalisation est un dispositif dans lequel des milliers de miroirs sur une superficie de 80 m² carrés (*figure .1.23*), l'énergie solaire concentrée jusqu'à une température de 3500°C suffisante pour faire fondre la plupart des métaux et des pierres. [18]

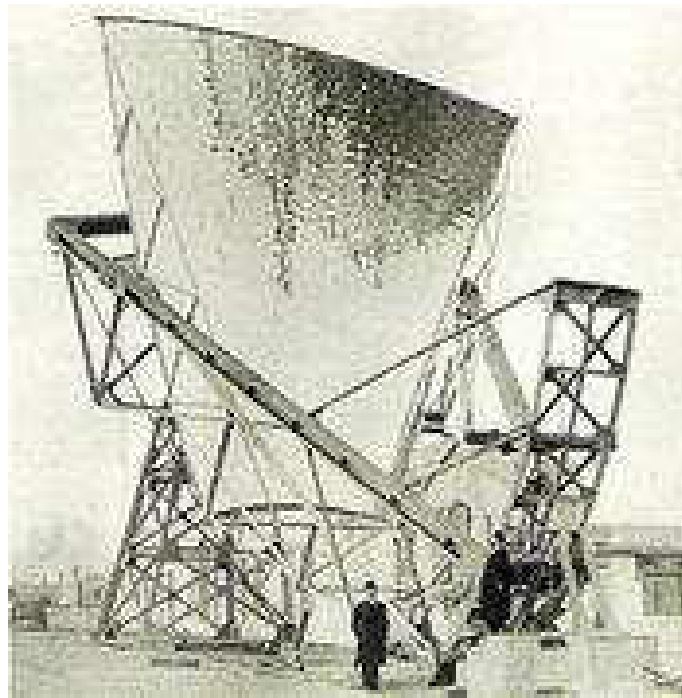


Fig.1.23. Concentrateur de *MARIO ANTONIO GOMEZ*.

1910 : L'américain *FRANCK SHUMAN* construit une centrale thermo solaire à taille industrielle en Egypte. Il construisit une chaudière solaire de *100Ch.* qui servit à pomper l'eau du Nil (*figure 1.24*). Vu le prix du charbon en Egypte à l'époque, le retour sur investissement fût de 4 ans. *SHUMAN* envisagea une autre réalisation plus grandiose dans le Sahara. Hélas, la Première Guerre Mondiale porta un coup fatal à ces projets ambitieux. [17]

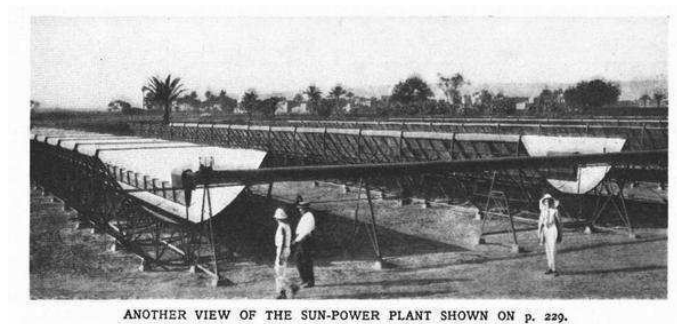


Fig.1.24. Centrale thermo-solaire à taille industrielle en Egypte.

A partir de 1949, *Félix Trombe* construit dans la citadelle militaire de *Mont Louis* un immense miroir parabolique qui va concentrer les rayons solaires vers un point unique qui s'élèvera à près de *3000°C*, température jamais atteinte autrement, en longue durée et gratuitement.

Étudiée et construite par la Société des Anciens Etablissements *SAUTTER-HARLE* (1952-1954) pour répondre à des caractéristiques remarquables qui lui ont valu le titre du plus puissant four solaire au monde (*figure .1.25*). [19]

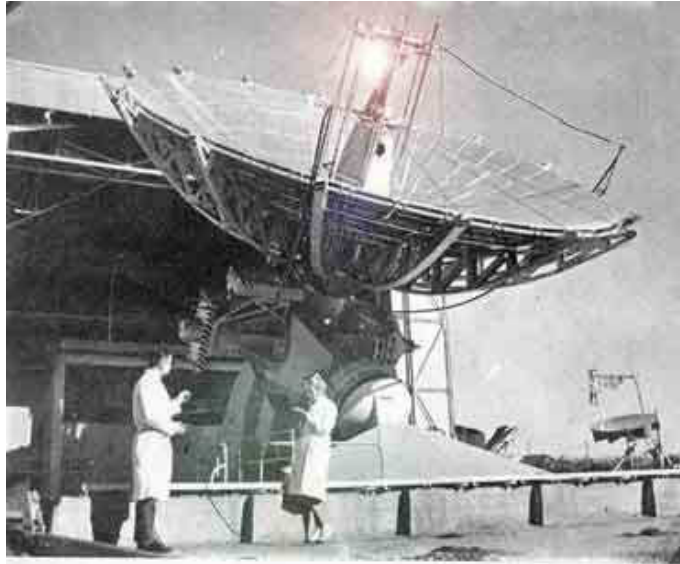


Fig.1.25. Le four solaire de Bouzareah, Alger.

Les années 1950 & 1960 furent celles des grands choix énergétiques : Nucléaire ou Solaire. En 1961, du 20 au 30 août, eu lieu le premier congrès international organisé par les Nations unies sur les sources d'énergie : solaire, éolienne et géothermie.

1963 : le premier système *CLFR* (Compact Linear Fresnel Reflector) au monde a été construit par l'italien *GIOVANNI FRANCIA* et installé en collaboration avec *Marcel PIERROT* à Marseille.

Suite aux travaux du programme *THEM*, *EDF* et le *CNRS* décident en Septembre 1977 de réaliser une centrale électro-solaire, le premier projet est réorienté au printemps 1979 pour des raisons budgétaires. En Juin de la même année, le président *Giscard D'ESTAING* décide de soutenir la filière solaire et accepte la construction de *Thémis*, première centrale électro-solaire française à tour d'une puissance de *2500kW*. [18]

Entre 1980 et 1999 plusieurs centrales solaires ont été réalisées entre l'Espagne et les Etats Unis ainsi que la France (*Solar One* USA, Centrale solaire de *THEMIS* France, *Solar Two* USA, *PS10* et *PS20* Espagne). [18]

Entre 2007 et 2008 C'est le grand retour du solaire à concentration aux USA, en Espagne, en Australie, au Maroc, en Egypte, en Algérie, dans les pays du Golfe persique etc., ceci dans un contexte de crise climatique et de renchérissement des énergies fossiles. [18]

1.6 Centrales thermodynamiques solaires

Les centrales solaires thermodynamiques recouvrent l'ensemble des techniques qui visent à transformer l'énergie rayonnée par le soleil en chaleur à température élevée, puis à convertir cette chaleur en énergie mécanique et électrique au moyen d'un cycle thermodynamique moteur couplé à une génératrice électrique (*figure.1.26*). La première étape, la captation du rayonnement solaire, fait appel à un champ de concentrateurs solaires, pour la conversion d'énergie solaire en énergie thermique. La deuxième étape, l'utilisation d'un cycle thermodynamique pour la conversion d'énergie thermique en énergie mécanique, la dernière étape c'est l'utilisation d'une génératrice pour la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. [20]

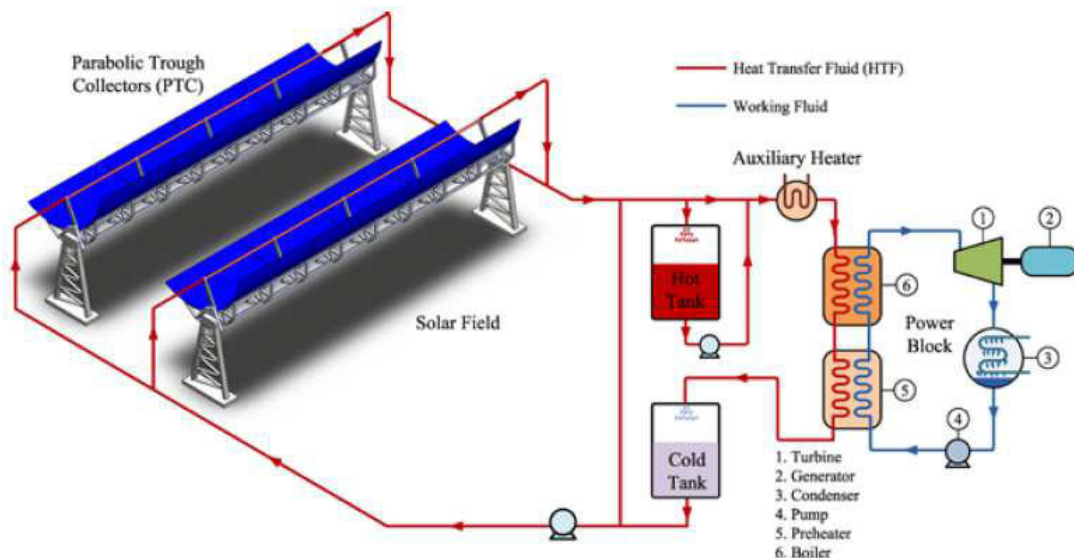


Fig.1.26. Concentrateur cylindro-parabolique.

1.6.1. Configurations hybrides et le stockage d'énergie

Afin d'augmenter le facteur de capacité, certaines centrales fonctionnent en mode hybride (solaire/hydrocarbure) (*figure.1.27*). L'hydrocarbure fournit la chaleur d'appoint pour atteindre la puissance nominale, lorsque des besoins existent alors que l'ensoleillement est faible ou nul.

Un facteur de capacité de 100% pourra ainsi être obtenu, même avec une fraction solaire annuelle faible.

Le stockage de la chaleur d'origine solaire est un avantage significatif par rapport au stockage d'électricité, le rendement étant supérieur à 95% et le coût est faible. Par ailleurs les dispositifs de stockage de chaleur permettent de garantir une production continue avec un rendement de conversion optimum, en évitant la construction d'une centrale à ressource fossile en parallèle avec une centrale 100% solaire. [21]

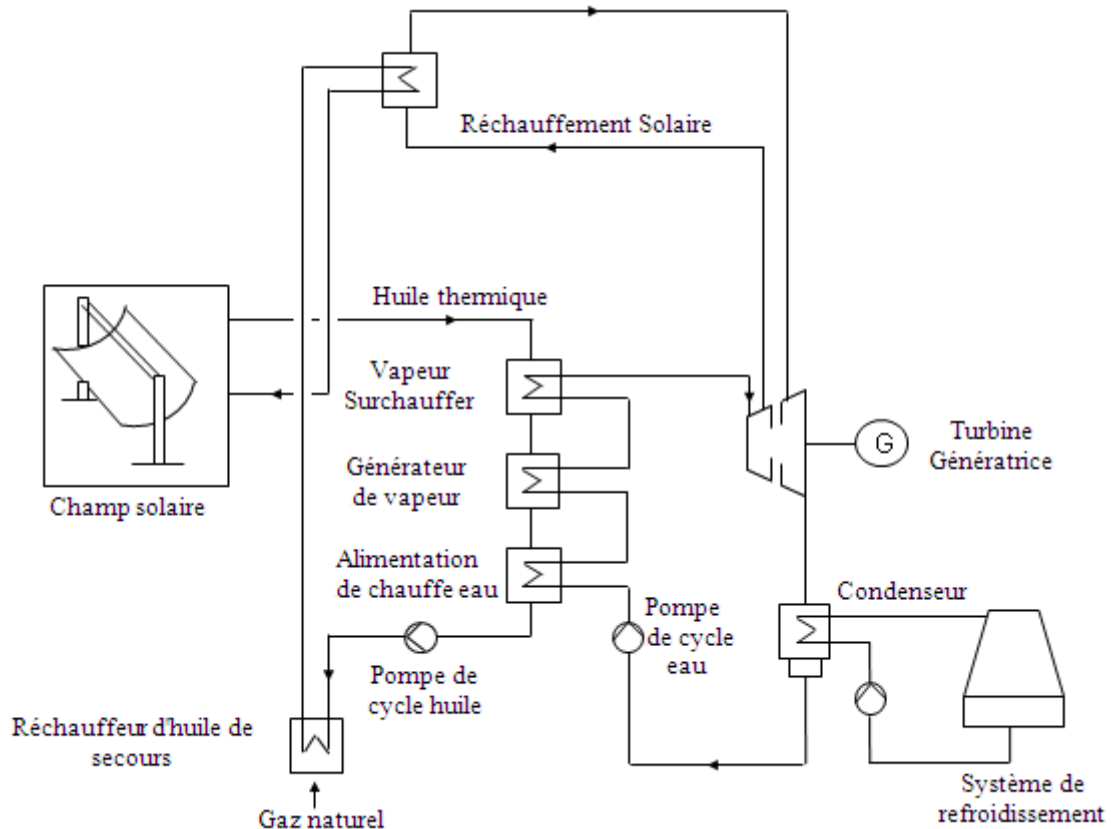


Fig.1.27. Schéma d'une station thermodynamique hybride. [22]

1.6.2 Cycles thermodynamiques utilisés dans les centrales thermiques

1.6.2.1. Cycle à vapeur

Ce cycle, utilise généralement de l'eau qui est limitée en haute température à (565°C), est néanmoins capable d'offrir des excellents rendements. C'est certainement le transformateur thermomécanique le mieux connu car il est le plus anciennement mis en œuvre par l'industrie moderne mais les performances atteintes ne sont pas du même niveau. En effet, elle dépend de beaucoup des conditions de la vapeur mises en œuvre (pression, température) et de la sophistication du cycle (resurchauffe de la vapeur ou non) et encore, de la taille du groupe. [23]

1.6.2.2. Cycle BRAYTON

Le cycle de *BRAYTON* est défini comme un cycle de turbine à gaz idéale et sert de cycle de référence. Les pertes de dissipation et frottement, et les chutes de pression dans les échangeurs de chaleur ou de la chambre de combustion sont négligées. [7]

Le cycle de *BRAYTON* fermé consiste au processus suivant (*figure .1.28*) :

Processus 1 → 2 : Compression Isentropique dans le compresseur.

Processus 2 → 3 : Addition de chaleur isobarique provenant de processus de combustion.

Processus 3 → 4 : Détente Isentropique dans la turbine.

Processus 4 → 1 : Refroidissement isobarique.

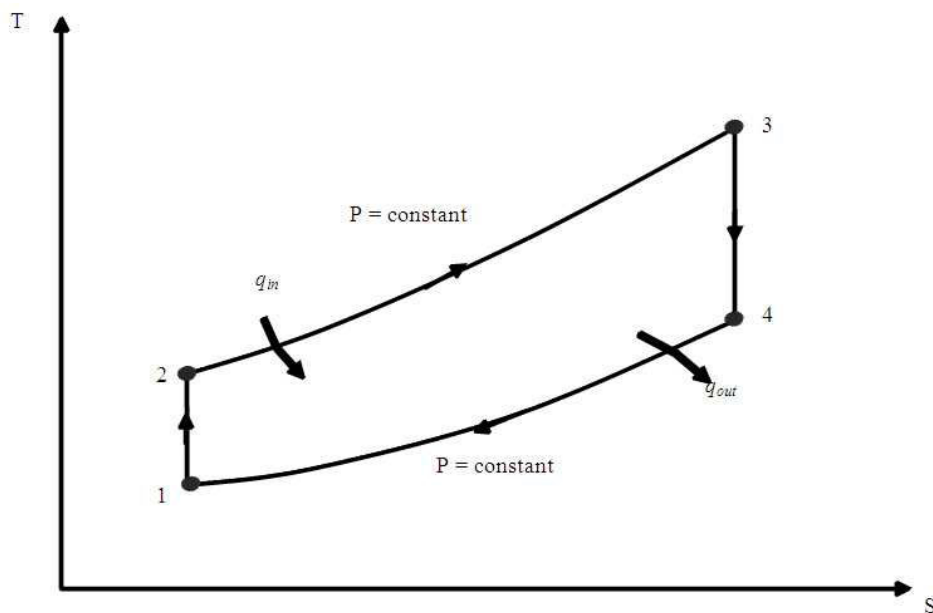


Fig.1.28. Diagramme *T-S* d'un cycle *BRAYTON* idéal.

1.6.2.3. Cycle RANKINE

Les cycles thermiques à vapeur sont basés sur le soi-disant cycle *RANKINE* idéal comme le montre la *figure1.29* dans sa forme la plus simple (1-2-3-4-1). Les quatre processus réversibles interne sont : [24]

Le point *1* est sur la courbe de saturation. Le cycle s'effectue entre deux isobares HP et BP

1 – 2	Détente adiabatique (réversible ou non), de HP à BP, dans la turbine, $W^D = \Delta h_{12}$
2 – 3	Condensation isobare et isotherme du mélange jusqu'à eau liquide
3 – 3'	Compression de l'eau dans la pompe, passage de BP à HP $W_{pompe}^{is} = \int_3^{3'} V dP$
3' - 1	Chauffage isobare et évaporation isobare et isotherme dans le générateur de vapeur. $q_{3/1} = h_1 - h_{3'}$

Hypothèses usuelles : les points 3 et 3' sont confondus (mais à des pressions différentes).

Le travail de la pompe est négligeable devant le travail de détente et l'apport de chaleur.

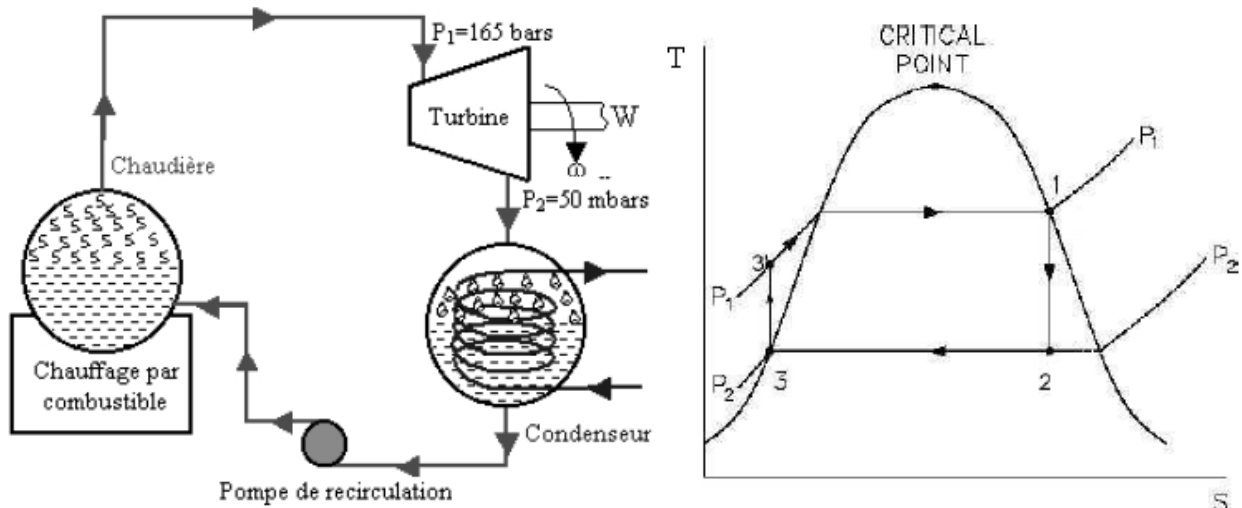


Fig.1.29.Cycle RANKINE idéal.

1.6.2.4. Cycle combiné

Le cycle combiné est constitué par une cascade des deux cycles à gaz et à vapeur. La valorisation des gaz chauds émis en sortie du cycle à gaz pour alimenter un cycle à vapeur [24] Permet la production combinée d'électricité par le cycle à gaz et par le cycle à vapeur (figure 1.30).

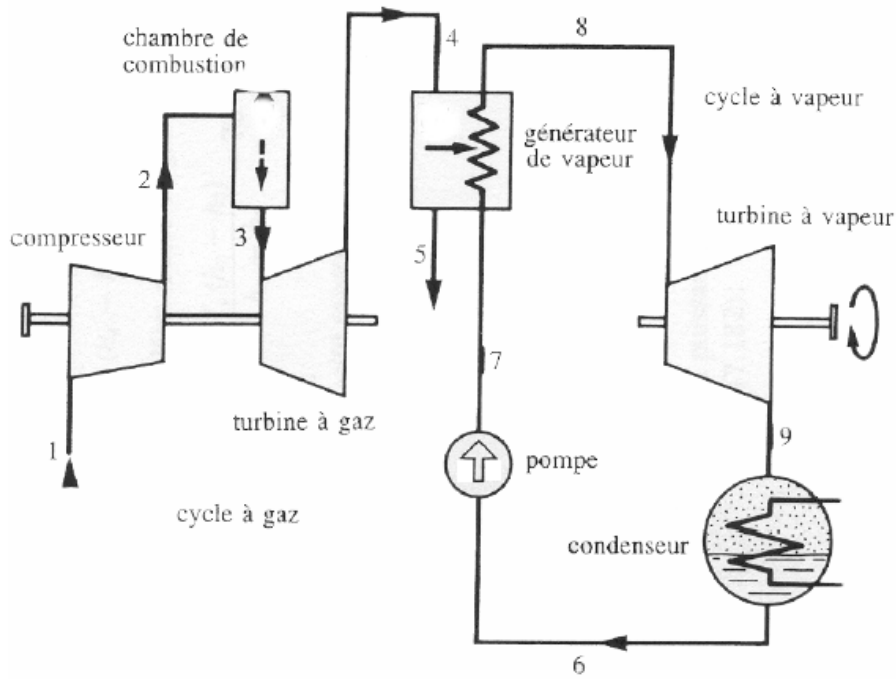


Fig.1.30.Cycle combiné (cycle à gaz avec cycle à vapeur).

1.6.2.5. Cycle STIRLING

Le transformateur thermomécanique est considéré depuis plus d'un siècle comme le meilleur des moteurs thermiques puisque son rendement théorique est élevé. Il s'agit d'un moteur à piston à chauffage externe basé sur le cycle *Stirling* (figure .1.31), utilisant couramment l'hélium ou l'hydrogène comme fluide thermodynamique. Dans la pratique, ce générateur a l'avantage de pouvoir être réalisé en petite taille sans trop perdre en rendement. C'est ce qui le rend idéal pour l'exploitation des calories récoltées avec une excellente efficacité. [25]

On le trouve souvent utilisé dans les concentrateurs paraboliques vu sa simplicité d'installation.

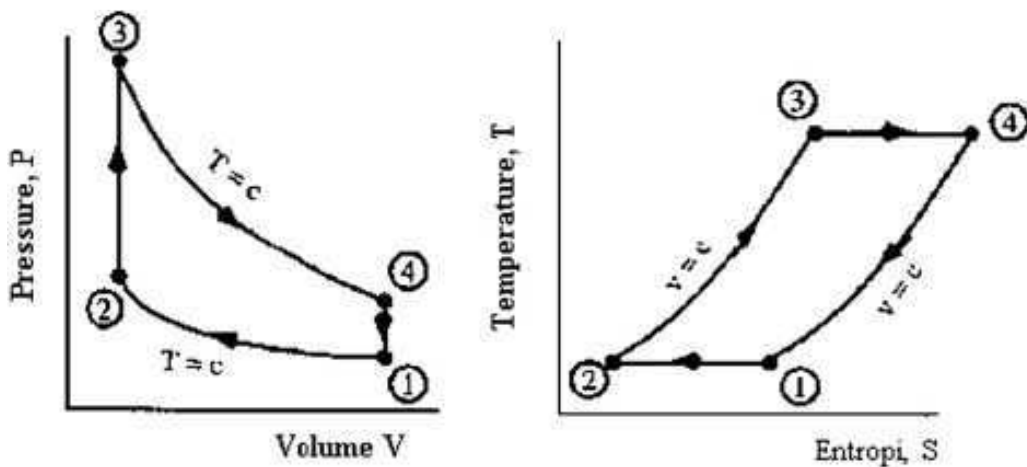


Fig.1.31. Diagramme P - V d'un cycle *STIRLING*.

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons essayé de donner des définitions détaillées des différents types de systèmes à concentration. Nous avons commencé par analyser le potentiel mondiale en énergie solaire suivi par le potentiel de l'Algérie qui est considéré comme très important, en suite nous avons entamé les généralités sur les différentes parties d'un système à concentration commençant par le réflecteur et sont matériaux de fabrication, passant par la présentation détaillée de l'absorbeur et son circuit de fluide caloporteur et terminant par la structure porteuse et la forme des miroirs paraboliques. Par ailleurs, nous avons donné des définitions des différents systèmes à concentration avec une comparaison entre eux pour pouvoir avoir une idée sur le choix du type de concentrateur qui convient aux exigences d'exploitation. Nous avons dédié une partie aux centrales solaires thermiques, où nous avons donné des définitions des différents cycles thermodynamiques utilisés dans ces centrales.

Les systèmes à concentrateurs solaires sont souvent munis d'un dispositif de poursuite solaire. Dans ce contexte, le prochain chapitre sera dédié aux systèmes de poursuite solaire, qui seront analysés en détail, où nous allons présenter leurs bases théoriques et leurs états de l'art.

Chapitre 2

Etat de l'art sur les systèmes de poursuite solaire

2.1 Introduction

La concentration solaire est la solution la plus rentable dans le domaine des énergies renouvelables, actuellement plusieurs pays ont lancé divers projets d'investissement dans ce domaine. L'Algérie avec son potentiel solaire important fait partie de ces pays avec la réalisation d'une centrale de *150 MW* à *Hassi Rmel* et d'autres centrales programmées dans un futur proche.

On peut décomposer une centrale solaire thermique en trois parties : la partie du champ, constituée de plusieurs concentrateurs placés sur une grande surface, la partie du cycle thermodynamique pour la conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique et par la suite en électricité, et la partie de commande et de contrôle constituée d'un système de télémessure lié à un logiciel sophistiqué qui gère la centrale. Le système de poursuite solaire fait partie de ce système de contrôle et de gestion.

Dans les systèmes à concentration le dispositif de poursuite solaire assure le bon fonctionnement et une bonne exploitation du système de conversion d'énergie solaire. Dans notre cas les concentrateurs cylindro-parabolique, on utilise généralement un système de poursuite à un seul axe de rotation à base des vérins pneumatiques assurant en même temps la rotation des concentrateurs et leur freinage. Le choix de ce type de système de poursuite solaire est basé sur la taille des concentrateurs qui sont très importante.

Dans ce deuxième chapitre, nous nous intéressons essentiellement à l'état de l'art des systèmes de poursuite solaire, les pertes optiques dans les systèmes à concentration et la simulation optique afin de présenter les effets de ce phénomène sur le rendement de ces systèmes, cette étude nous permettra d'aborder la problématique de notre thèse.

2.2 Principe de la concentration

2.2.1. Taux de concentration

La définition la plus commune du taux de concentration est basée sur la notion de surface. Elle est donnée comme étant le rapport de la surface de l'ouverture sur la surface du récepteur [26] [8]. De ce fait le taux de concentration du flux est défini comme le rapport du flux moyen d'énergie de la surface du récepteur sur le flux d'énergie moyen de la surface de l'ouverture.

$$C = \frac{A_o}{A_r} \quad (2.1)$$

C : Taux de concentration.

A_o : Surface d'ouverture;

A_r : Surface d'absorbeur.

Le paramètre concentration détermine de façon directe la température d'utilisation (*figure.2.1*), on peut distinguer: [26]

- Les faibles concentrations ($1 < C < 10 \Rightarrow T_c \sim 150^\circ\text{C}$);
- Les moyennes concentrations ($10 < C < 100 \Rightarrow T_c \sim 300^\circ\text{C}$);
- Les fortes concentrations ($C \geq 100 \Rightarrow T_c \geq 500^\circ\text{C}$).

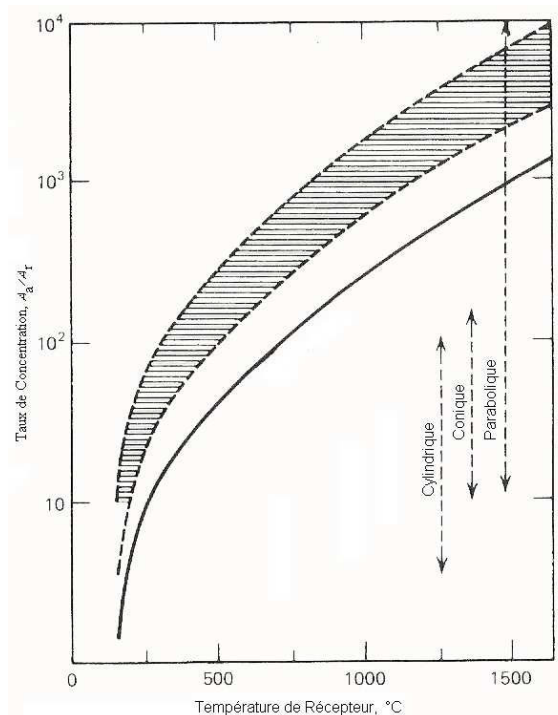


Fig.2.1. Relation entre le taux de concentration et la température du récepteur. [26]

— : La limite minimale: lorsque les pertes thermiques sont égale à l'énergie absorbée.

▨ : La zone hachurée: correspond à l'intervalle de fonctionnement du concentrateur.

On considère un concentrateur d'ouverture (A_o) et de surface de réception (A_r) orienté vers le soleil. L'énergie émise par la source est captée par l'absorbeur. Après des réflexions ou des réfractions, elle est égale à l'énergie émise par l'absorbeur et reçue par la source. [8]

Nous nous proposons de chercher la plus forte concentration géométrique qu'il est possible d'atteindre.

La puissance émise par la source et capté par l'absorbeur peut s'écrire :

$$Q_{s \rightarrow r} = F_{sr} A_s \sigma_s T_s^4 \quad (2.2)$$

Où le coefficient F_{sc} (≤ 1) est la fraction de la puissance émise par la source qui est reçue directement par l'absorbeur, après des réflexions ou des réfractions. De même, l'énergie émise par l'absorbeur et reçue par la source peut se mettre sous forme :

$$Q_{r \rightarrow s} = F_{rs} A_r \sigma_s T_r^4 \quad (2.3)$$

En se référant à la seconde loi de la thermodynamique, il ne peut y avoir d'échange net de chaleur entre deux corps portés à la même température. Donc si

$$T_s = T_r \quad (2.4)$$

Nous devons avoir :

$$Q_{s \rightarrow r} = Q_{r \rightarrow s} \quad (2.5)$$

D'où

$$F_{sr} A_s = F_{rs} A_r \quad (2.6)$$

La concentration maximale d'un système à deux dimensions est donc :

$$C_{idéal\ 2d} = \frac{1}{\sin \theta_s} \quad (2.7)$$

La concentration maximale d'un système à trois dimensions est donc :

$$C_{idéal\ 3d} = \frac{1}{\sin^2 \theta_s} \quad (2.8)$$

$Q_{r \rightarrow s}$: Energie émise par l'absorbeur et reçue par la source en Wh/m^2 ;

$Q_{s \rightarrow r}$: Energie émise par la source et reçue par l'absorbeur en Wh/m^2 ;

θ_s : Demi angle du cône de distribution du rayonnement solaire. (figure.2.2)

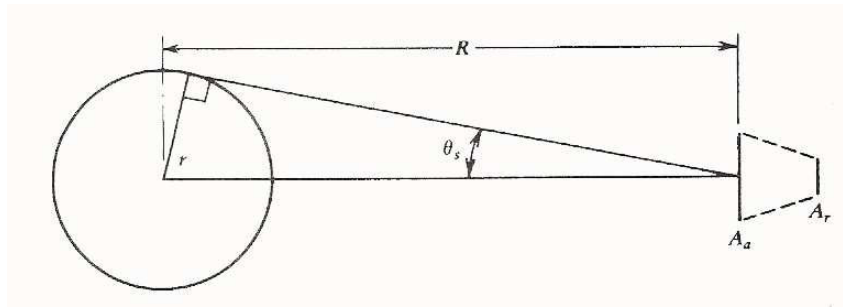


Fig.2.2. Schéma du soleil à la distance (R) du concentrateur avec une surface d'ouverture (A_a) et un récepteur de surface (A_r).

2.2.2. Rayonnement absorbé

Les collecteurs de concentration ont des propriétés optiques qui changent sensiblement avec la géométrie du dispositif. Les concepts généraux suivants peuvent être appliqués à tous les concentrateurs, bien que les manières dont ils sont appliqués changent selon la configuration. Une équation pour (E), le rayonnement absorbé par unité de surface du récepteur, peut être écrite comme suit: [8]

$$E = E_b \cdot \rho \cdot (\gamma \cdot \tau)_n C \quad (2.9)$$

E_b : Rayonnement incident sur le plan d'ouverture;

γ : Facteur optique du collecteur;

τ : Facteur de transmission;

α : Facteur d'absorption.

2.3 Théorie des systèmes de poursuite solaire

2.3.1. Sphère céleste

La sphère céleste est une sphère imaginaire d'un diamètre immense, avec la terre au centre. On considère que tous les objets visibles dans le ciel se trouvent sur la surface de la sphère céleste. On peut résumer les différentes caractéristiques sur la sphère elle-même comme est représenté sur la *figure.2.3*.

La direction des objets peut être quantifiée de façon précise à l'aide d'un système de coordonnées célestes.

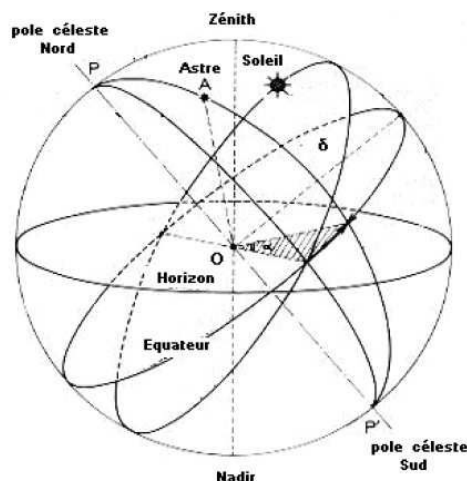


Fig.2.3. La sphère céleste.

2.3.2. Les coordonnées célestes

2.3.2.1. Coordonnées géographiques

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre. (figure.2.4)

- Latitude

La latitude d'un lieu (φ) correspond à l'angle avec le plan équatorial, que fait le rayon joignant le centre de la terre à ce lieu. L'équateur terrestre est donc caractérisé par une latitude égale à 0° , le pôle nord par la latitude $+90^\circ$ et le pôle sud par la latitude -90° . Cette convention de signe affecte le signe (+) à tous les lieux de l'hémisphère nord et le signe (-) à tous les lieux de l'hémisphère sud. [3] [8]

- Longitude

La longitude d'un lieu correspond à l'angle que fait le plan méridien passant par ce lieu avec un plan méridien retenu comme origine. On a choisi pour méridien (origine 0°) le plan passant par l'observatoire de *Greenwich*. Par convention on affecte du signe (+) les méridiens situés à l'Est de ce méridien, et du signe (-) les méridiens situés à l'Ouest. [3] [28]

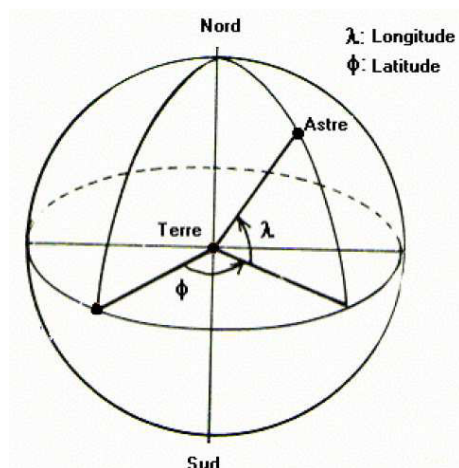


Fig.2.4. Les coordonnées géographiques.

2.3.2.2. Coordonnées horaires

- La déclinaison solaire (δ)

C'est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre (*figure.2.5*). Elle varie tout au long de l'année, entre deux valeurs extrêmes :(-23°27'et +23°27' environ) et elle s'annule aux équinoxes de printemps et d'automne, sa valeur peut être calculée par la formule. [3]

$$\delta = 23.45 \sin\left(\frac{360 (284 + n)}{365}\right) \quad (2.10)$$

n : Numéro du jour dans l'année.

- Angle horaire (ω)

L'angle horaire du soleil est l'angle formé par le plan méridien du lieu et celui qui passe par la direction du soleil si l'on prend comme origine le méridien de *Greenwich*, l'angle horaire est compris entre 0° et 360° . La valeur de l'angle horaire est nulle à midi solaire, négative le matin, positive dans l'après-midi et augmente de 15° par heure. [3] [8]

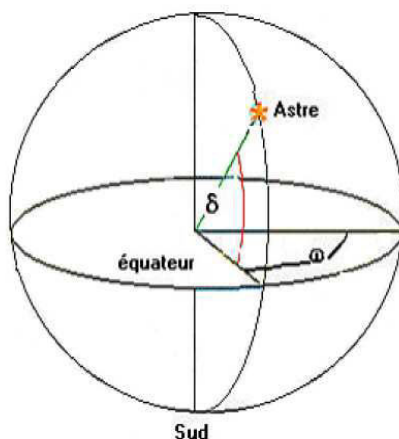


Fig.2.5. Les coordonnées horaires.

2.3.2.3. Coordonnées horizontales

Le repérage du soleil se fait par l'intermédiaire de deux angles (*figure.2.6*):

- **Hauteur angulaire du soleil (h_s)**

C'est l'angle formé par le plan horizontal au lieu d'observation et la direction du soleil. Cette hauteur durant le jour peut varier de 0° (soleil à l'horizon) à 90° (soleil au zénith). [3][8]

- **Azimut (a_z)**

L'azimut du soleil est l'angle que fait, sur le plan horizontal, la projection de la direction du soleil avec la direction du sud. L'azimut du soleil (a_z) est représenté en fonction de la latitude du lieu (φ), de la déclinaison solaire (δ), de l'angle horaire (ω) et de la hauteur du soleil (h_s) de la manière suivante :

$$\cos(a_z) = \frac{\cos(\delta) \cos(\omega) \sin(\varphi) - \sin(\delta) \cos(\varphi)}{\cos(h_s)} \quad (2.11)$$

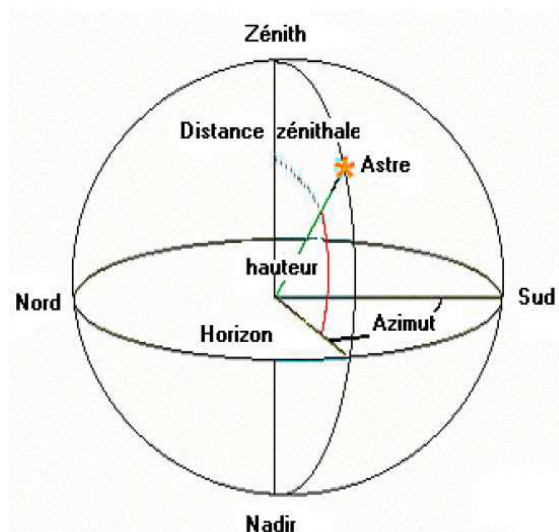


Fig.2.6. Les coordonnées horizontales.

2.3.3. Angle d'incidence

L'angle d'incidence (δ_i) est l'angle que font les rayons du soleil avec la normale du plan considéré. Il est défini par l'inclinaison du plan (β_i) et l'azimut de la normale du plan (α) (orientation du plan). *Capderou* [27] utilise la hauteur de la normale du plan (γ_n) pour calculer le cosinus de l'angle d'incidence $\cos(\delta_i)$, et ce sont les angles (α) et (γ_n) qui déterminent la position du plan, avec $\gamma_n = 90 - \beta_i$. L'angle d'incidence sur un plan quelconque est donnée par *Capderou*; en fonction de l'angle horaire (ω), par l'expression suivante: [27]

$$\cos(\delta_i) = a' \sin(\omega) + b' \cos(\omega) + c' \quad (2.12)$$

Avec :

$$\begin{aligned} a' &= \cos(\delta)[\sin(\alpha) \cos(\gamma)] \\ b' &= \cos(\delta)[\cos(\alpha) \cos(\gamma) \sin(\varphi) + \sin(\gamma) \cos(\varphi)] \\ c' &= \sin(\delta)[- \cos(\alpha) \cos(\gamma) \cos(\varphi) + \sin(\gamma) \sin(\varphi)] \end{aligned}$$

Sur la *figure.2.7* on trace $\cos(\delta_i)$ en fonction de l'angle horaire pour divers plans orientés Sud, d'inclinaison (β_i) variable, pour une déclinaison de 20° à Ghardaïa, comme suit :

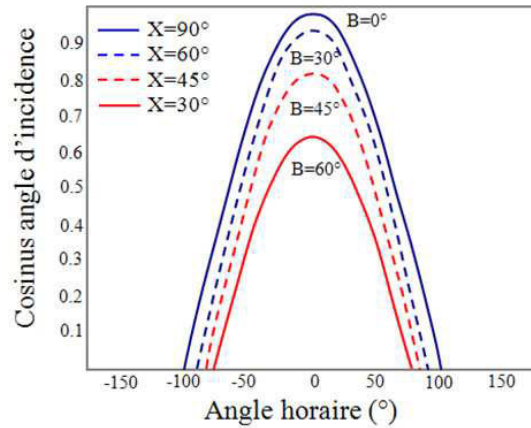


Fig. 2.7. Variation de l'angle d'incidence en fonction de l'angle horaire.

2.3.4. Suivi continu du soleil

Des systèmes permettent de suivre la course du soleil au cours de la journée, afin de minimiser l'angle d'incidence. Il s'agit de l'angle d'incidence des rayons du soleil sur un plan lié au système, ce plan étant le récepteur lui-même ou le support du récepteur (systèmes à concentration). Ces systèmes sont classés selon le nombre d'axes (un ou deux) et le mode de suivi (continu ou quotidien) [9]. Le principe du suivi par mouvement autour d'un axe, est d'orienter à chaque instant le plan récepteur par rotation autour de l'axe de telle sorte que la normale du plan soit constamment dans le plan formé par l'axe et la direction du soleil. Avec un système à deux degrés de liberté, on peut suivre la direction du soleil pour obtenir une incidence constamment normale.

Dans les applications utilisant des systèmes à concentration qu'ils soient de type parabolique ou cylindro-parabolique, on s'intéresse généralement à un suivi du soleil continu à un seul ou deux axes en considérant les cas suivants:

Suivi continu à axe horizontal, orienté Est-Ouest (poursuite N-S) :

$$\cos(\delta_i) = \left[1 - (\cos(\delta) \sin(\omega))^2 \right]^{0.5} \quad (2.13)$$

Suivi continu à axe horizontal, orienté Nord-Sud (poursuite E-O) :

$$\cos(\delta_i) = [1 - [\cos(\delta) \sin(\varphi) \cos(\omega) - \sin(\delta) \cos(\varphi)]^2]^{0.5} \quad (2.14)$$

Suivi continu à deux axes (poursuite intégrale) :

$$\cos(\delta_i) = 1 \quad (2.15)$$

Les variations de l'éclairement direct incident sur la surface d'ouverture d'un concentrateur solaire avec poursuite à deux axes sont représentées sur la *figure. 2.8 et 2.9* en fonction du temps pour le site de Ghardaïa. On peut remarquer que l'énergie solaire collectée par un système à concentration augmente avec la durée du jour et elle est inversement proportionnelle aux facteurs de troubles.

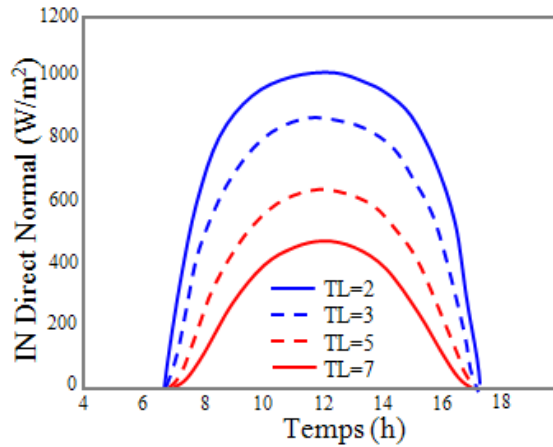


Fig. 2.8. Variations de l'éclairement direct normal en fonction du facteur de trouble de Linke et du temps pour le jour le plus court (*21 Décembre*) de l'année.

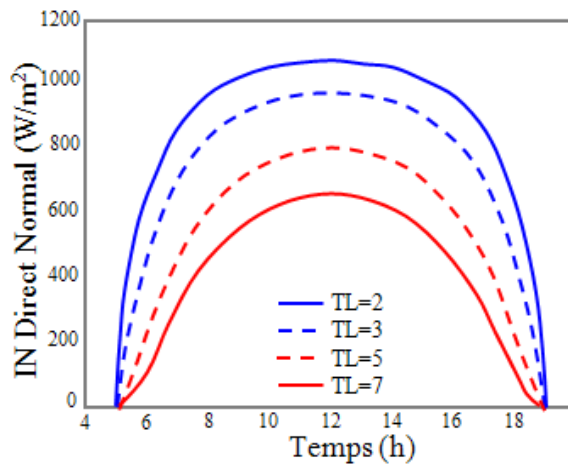


Fig. 2.9. Variations de l'éclairement direct normal en fonction du facteur de trouble de Linke et du temps pour le jour le plus long (*21 Juin*) de l'année.

2.3.5. Energie solaire reçue par un concentrateur avec poursuite solaire

Par intégration numérique des puissances, entre le lever et le coucher effectif du soleil, on peut calculer pour un plan quelconque, les valeurs des énergies reçues: [27]

$$EB^h(\omega_{sr}, \omega_{ss}) = \int_{\omega_{sr}}^{\omega_{ss}} IB^h d\omega \quad (2.16)$$

La *figure 2.10* représente l'énergie directe journalière reçue par la surface d'ouverture horizontale d'un concentrateur solaire $EB^h(\omega_{sr}, \omega_{ss})$ pour le site de Ghardaïa et la *figure 2.11* représente l'énergie journalière directe reçue par le concentrateur incliné à la latitude $EB^i(\omega_{sr}, \omega_{ss})$ en fonction du jour. $EN(\omega_{sr}, \omega_{ss})$ est l'énergie directe normale journalière.

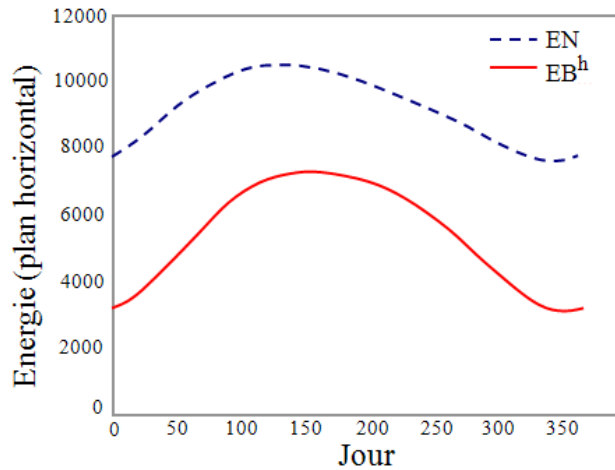


Fig. 2.10. Variation de l'énergie reçue (en Wh/m^2) par un concentrateur solaire horizontal en fonction du jour. [27]

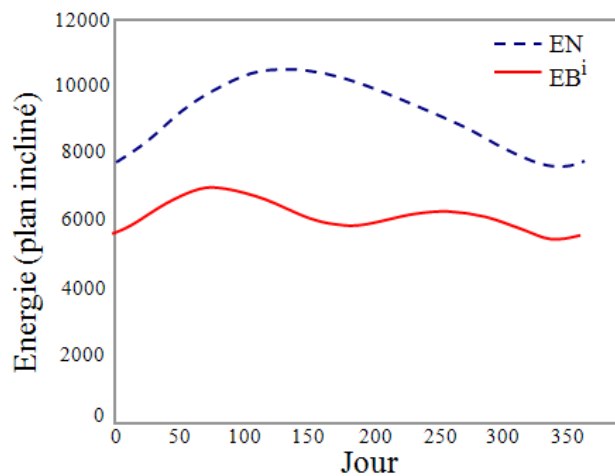


Fig. 2.11. Variation de l'énergie reçue (en Wh/m^2) par un concentrateur solaire incliné à la latitude en fonction du jour. [27]

2.4 Poursuite solaire dans les concentrateurs

Dans les applications à la concentration du rayonnement solaire, le champ minimum est le diamètre apparent du soleil : $\theta_s = 16'$. La concentration maximale qu'il est théoriquement possible d'atteindre est donc :

- Pour un système à deux dimensions :

$$C_{idéal\ 2d} = \frac{1}{\sin \theta_s} = 215 \quad (2.17)$$

- Pour un système à trois dimensions :

$$C_{idéal\ 3d} = \frac{1}{\sin^2 \theta_s} = 46165 \quad (2.18)$$

Le Concentrateur doit alors toujours être pointé vers le soleil. En pratique, des concentrations de rayonnement aussi élevées ne peuvent être atteintes, même par des systèmes conçus pour avoir la concentration idéale, en raison des erreurs de pointage et des imperfections des éléments optiques.

Il existe de nombreux dispositifs de poursuite solaire. Pour les systèmes à trois dimensions, on utilise généralement :

- Soit la monture altazimutale mobile autour de deux axes perpendiculaires, l'un vertical, l'autre horizontal (*figure.2.12*). Cette solution est simple à mettre en œuvre mais les mouvements de suivi du soleil sont compliqués. [8]

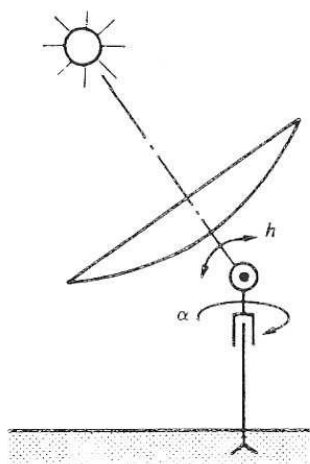


Fig.2.12. Monture altazimutale des systèmes à 3 dimensions.

- Soit la monture équatoriale dont l'un des axes de rotation est parallèle à l'axe du monde et l'autre lui est perpendiculaire (*figure.2.13*). Cette solution est peut-être plus délicate

sur le plan mécanique mais le mouvement autour de l'axe du monde est pratiquement uniforme au cours de la journée. [8]

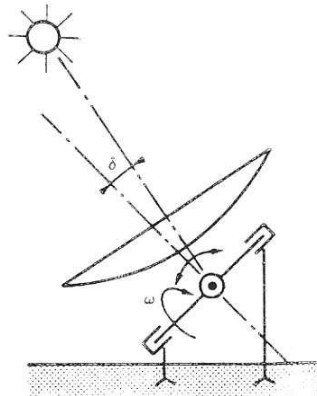


Fig.2.13. Monture équatoriale des systèmes à 2 dimensions.

Pour les systèmes à deux dimensions, on se contente de montures plus simples. La ligne ou la bande autour de laquelle se trouve concentré le rayonnement solaire peut être orienté :

- Est-Ouest : La monture permet une orientation autour d'un axe horizontal afin de suivre les variations de la déclinaison du soleil au cours de l'année (*figure.2.14*). [8]

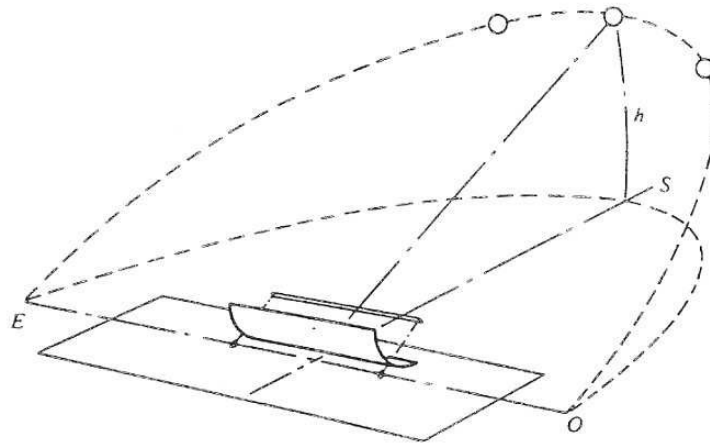


Fig.2.14. Monture des systèmes à 2 dimensions (Est-Ouest).

- Parallèle à l'axe du monde ; la monture permet de suivre le mouvement diurne du soleil (*figure.2.15*). [8]
- Nord-Sud dans un plan horizontal avec suivi du mouvement diurne comme dans le cas précédent. [8]

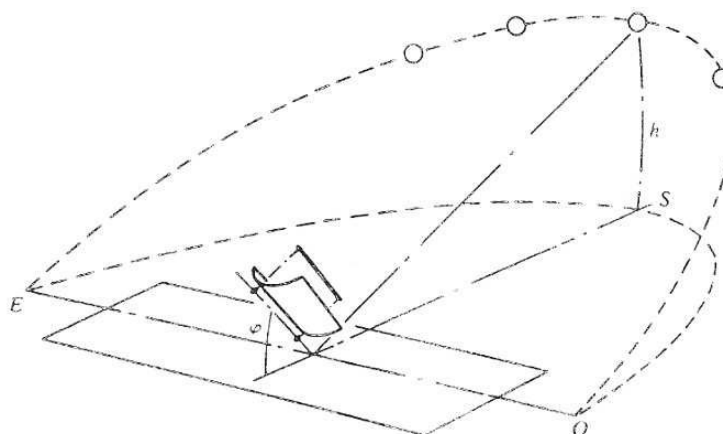


Fig.2.15. Monture des systèmes à 2 dimensions (Parallèle à l'axe du monde).

2.5 Etat de l'art des systèmes de poursuite solaire

2.5.1 Poursuite solaire passif

La poursuite solaire passive est basée sur la dilatation thermique d'une matière (généralement Fréon) ou sur les alliages à mémoire de forme. Habituellement, cette sorte de poursuite solaire est composée de deux vérins qui travaillent l'un contre l'autre, qui sont équilibrés, par l'illumination différentielle des actionneurs, les forces déséquilibrées sont utilisées pour l'orientation de l'appareil dans une direction, où elle est égale à l'illumination d'actionneurs et l'équilibre des forces est établi. Les suiveurs passifs du soleil; par rapport aux suiveurs actifs, sont moins complexes, mais fonctionnent à faible rendement et ils s'arrêtent à basses températures, des tests ont montré que les systèmes de poursuite solaire passifs sont comparables aux systèmes de poursuite électriques en termes de performances. Bien que les systèmes de poursuite solaire passifs sont souvent moins chers, ils n'ont pas encore été largement acceptés par les consommateurs.

En 2004, Clifford et al. [29] ont présenté une modélisation par ordinateur d'un nouveau système solaire passif. Ils ont mentionné que, bien que l'élargissement et la déformation du métal est de petite taille, les forces correspondantes sont grandes. Leur conception de poursuite solaire passive intègre deux lames bimétalliques en Aluminium et en acier, positionnées symétriquement sur un cadre en bois. Les lames bimétalliques sont ombrées de telle sorte que la bande supplémentaire absorbe le rayonnement solaire, tandis que l'autre bande reste ombrée d'une manière semblable à la conception illustrée à la *figure. 2.16*. Pour empêcher l'oscillation ou la réponse trop lente, un système d'amortissement est lié au système de poursuite solaire.

Ils ont aussi comparé le modèle mathématique et les résultats expérimentaux des déviations de la lame bimétallique en raison des effets du rayonnement thermique (en mm) et le temps pris par le système de poursuite solaire à se réorienter d'Ouest en Est (en s). Les résultats du modèle mathématique et les données expérimentales sont très semblables. Le système de poursuite solaire conçu avait le pouvoir d'accroître l'efficacité des panneaux solaires jusqu'à 23%. Enfin, ils ont recommandé un mécanisme de retour pour la nuit.

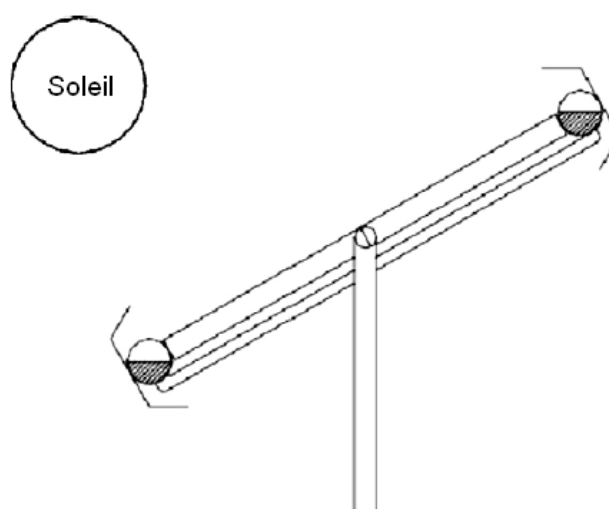


Fig. 2.16. Poursuite solaire passive au moyen de deux tubes cylindriques identiques remplis d'un fluide sous pression partielle. [29]

En 2006, Mwithiga et al. [30] ont conçu et construit un séchoir solaire avec une poursuite solaire limitée actionné manuellement. Le séchoir est constitué d'un absorbeur plat d'acier doux placé dans un boîtier topless. L'unité de séchage est montée sur un arbre qui à son tour est monté sur un support de manière à faire face à la direction $E-O$. Un disque sur le support permet la sélection de l'angle d'inclinaison que fait l'unité de séchage avec l'horizon, pour être facilement ajusté par pas d'au moins 15° . De cette façon, la plaque collectrice pourrait s'ajuster d'une façon instantanée pour suivre le soleil pendant la journée. Quatre positions de séchoir ont été créées pour suivre le soleil. Le séchoir a été fixé à un angle de 60° par rapport à l'horizon orienté à l'Est depuis $08h00$. Ils ont ajusté l'angle du séchoir que fait avec l'horizon avec 1, 3, 5 ou 9 fois par jour lorsque l'un est chargé de grains de café et un autre sous aucune charge.

Les résultats ont montré que le séchoir solaire peut être utilisé pour sécher les grains. Le séchage des grains de café pourrait être réduit de 2 à 3 jours contre le séchage au soleil sans système de poursuite solaire, qui prend de 5 à 7 jours et la température à l'intérieur de la chambre pourrait atteindre un maximum de $70.4^\circ C$.

Poulek [31] avait conçu et testé un système de poursuite solaire passive à un seul axe de rotation basée sur des actionneurs en alliage à mémoire de forme. L'actionneur peut être facilement déformé, même sous une température de 70°C et fonctionne comme un moteur thermique. Il retourne à sa forme d'origine lorsqu'il est chauffé au-dessus de la température de transformation. Il avait conclu que l'efficacité de ces actionneurs est de 2% et d'environ deux ordres de grandeur plus élevé que celui d'actionneurs bimétalliques.

2.5.2 Poursuite solaire active

Les principaux systèmes de poursuite solaire active peuvent être classés comme suit :

- à base d'un microprocesseur et capteur électro-optique.
- à base de la date et le temps contrôlé par microordinateur.
- à base de cellules solaires bifaciales auxiliaires.
- à base d'une combinaison de ces trois systèmes.

Les systèmes de poursuite solaire électro-optiques sont généralement composés de cellules solaires photovoltaïques ou d'au moins une paire de photo-résistances connectées en antiparallèle, qui reçoivent, la même intensité de rayonnement solaire de manière à être électriquement équilibrées, de sorte que le signal de sortie provenant de deux éléments est presque négligeable, pour assurer la commande du moteur d'entraînement.

Dans les systèmes à base de la cellule auxiliaire biface solaire, la cellule biface solaire détecte le sens de la position du soleil et entraîne le système à la position désirée.

Dans les systèmes à base de la date et l'heure contrôlée par microordinateur, ce dernier calcule les positions du soleil par rapport à la date et l'heure à l'aide des algorithmes, afin de créer des signaux pour le contrôle du système.

2.5.2.1 Système de poursuite solaire à base de microprocesseur et capteur électro-optique (systèmes de poursuites sensibles)

Dans ce type, par illumination de capteur électro-optique, un signal de commande différentiel se produit (*figure 2.17*), qui est utilisé pour entraîner le moteur et pour orienter le capteur solaire dans une direction jusqu'à ce que l'illumination de capteurs électro-optiques deviennent égale et le système sera à l'équilibre. En outre, des photodiodes peuvent être montées

sur des plans inclinés afin d'augmenter la sensibilité du courant photoélectrique (*figure 2.18*), ce principe est très utilisé dans les applications photovoltaïques à concentration. Le dispositif d'ombrage est présenté comme un tube de pointage qui empêche l'irradiation diffuse d'entrer au niveau du capteur et donner une mesure précise de la position du soleil (*figure 2.19*). [32]

Ces systèmes de poursuite solaire, avec une grande précision, sont principalement destinés aux concentrateurs solaires. Ils sont complexes et par conséquent coûteux et aussi fiables.

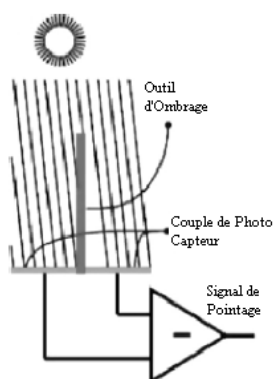


Fig. 2.17. Principe de Balance d'ombre : capteur de position de soleil.

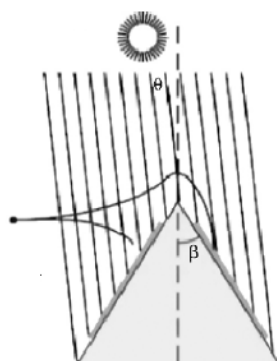


Fig. 2.18. Principe de Balance d'ombre : montage incliné des photos capteurs.

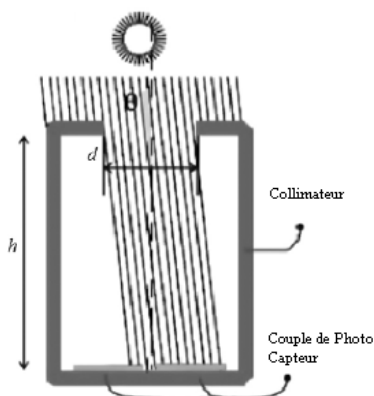


Fig. 2.19. Détecteur de position du soleil précis à base de collimateur.

Abdallah et al. ont conçu et construit un système de poursuite solaire contrôlé par automate programmable logique (*PLC*) à deux axes, en boucle ouverte. Son principe de fonctionnement

est basé sur la définition mathématique de la position du système à capteur solaire, qui est définie par deux angles: l'inclinaison du capteur solaire, et l'angle d'azimut. L'inclinaison est considérée comme égale à l'angle zénithal du soleil. Ils utilisent deux moteurs de suivis, l'un pour l'articulation tournant autour de l'axe N-S horizontal et l'autre pour l'articulation tournant autour de l'axe vertical.

La journée est divisée en quatre intervalles, et pendant chacune d'entre eux le rayonnement et la vitesse des moteurs ont été défini et programmés par *PLC*. Ils ont prédit que la consommation d'énergie des moteurs d'entraînement et les systèmes de contrôle ne dépassent difficilement pas les 3% de la puissance gagnée par le système de poursuite solaire. Ils ont conclu que l'utilisation de deux axes de poursuite solaire engendre une augmentation de l'énergie collectée totale journalière d'environ 41.34% par rapport à celle d'un système fixe (sans système de poursuite solaire). [33] [34]

Roumiantsev et al. [35] ont conçu et construit un système de poursuite solaire en boucle fermée pour une installation photovoltaïque de '*1 kWc*'. Leur conception du système de poursuite solaire est basée sur la construction d'une structure moins cher, telle que les cornières perforées et laminées, fabriquées en acier protégé par le Zinc. Le mécanisme de poursuite solaire est entièrement automatique géré par un capteur solaire analogique. Le système de poursuite composé de deux parties mobiles principales: une plate-forme de base tourne autour de l'axe vertical et une plate-forme suspendue avec des modules photovoltaïques tourne autour de l'axe horizontal. La plate-forme de base est équipée de trois roues dont l'un a été relié à un lecteur d'azimut. La plate-forme suspendue est un cadre où les modules ont été installés dans trois marches d'un escalier. La position du cadre de la plate-forme suspendue peut varier dans un intervalle de ' $\pm 45^\circ$ ' symétriquement par rapport à un plan horizontal assurant l'alignement des modules en hauteur. La plate-forme de base est traînée par une roue en déplaçant le long d'un cercle de grand rayon. Si les moteurs (*DC 12 V*) sont activés en usage continu, la vitesse de rotation des plates-formes est proche de '*1 tour/heure*', soit beaucoup plus rapidement qu'elle est nécessaire pour un système de poursuite solaire normal. Le système est équipé d'un dispositif de rotation continue des moteurs pour assurer le retour de système de coucher au lever du soleil ainsi que pour faire la recherche du soleil d'une façon rapide, périodes nuageuses incluses. Pendant la poursuite ordinaire, les moteurs ont été mis en marche périodiquement, après chaque 8-10 s.

Konar et al. [36] ont conçu un dispositif de poursuite solaire à un seul axe de rotation basée sur microprocesseur destiné aux modules photovoltaïques ou aux concentrateurs à réflecteurs paraboliques. L'axe de rotation du système de poursuite solaire est incliné de façon optimale et le contrôle de l'angle d'azimut est installé sur un autre axe. Ils ont mentionné que ce dispositif de poursuite solaire permet d'économiser considérablement la puissance collectée. Il est également indépendant des conditions de sites tels que la zone géographique et les variations temporelles.

Al-Mohamad [37] a conçu un système de poursuite solaire à un seul axe sur la base d'un automate programmable logique (*PLC*) pour étudier l'amélioration de gain en puissance de sortie journalière d'un module photovoltaïque.

Un capteur de position de soleil composé de deux photo-résistances séparées par une barrière pour produire l'ombre sur l'une d'entre elle. Comme l'intensité du rayonnement solaire augmente, la résistance du capteur diminue. Deux signaux de sortie du capteur de position de soleil; connectés directement aux entrées analogiques de l'automate, sont comparés afin de produire un signal de sortie approprié pour activer le système électromécanique de poursuite solaire. Ce système de poursuite solaire balaie un angle d'environ 120° E-O. Pour l'automate *PLC*, un programme approprié est développé pour contrôler, surveiller et recueillir des données en utilisant un logiciel spécial.

Un programme informatique spécial est développé pour la communication de *PLC* avec le microordinateur utilisant le port série *RS232* à l'aide du langage Visual Basic 5. Les performances du système de poursuite solaires ont évaluées et contrôlées. La puissance de sortie augmente considérablement pendant les heures de début et de fin de journée. En fait, l'amélioration globale, dans le mode de poursuite, dépasse les '40%' pour la période allant de 6h00 à 10h00 et pour la période 15h00 à 17h00. Toutefois, l'amélioration était d'environ '2 à 4%' au cours de la mi-journée. L'amélioration globale moyenne au cours de la journée est supérieure à '20%' en comparaison avec celle d'un module fixe.

Abu-Khader et al. [38] ont conçu et construit un système de poursuite solaire contrôlé par un automate programmable logique (*PLC*). Le système électromécanique composé de deux moteurs: le premier pour l'articulation tournant autour de l'axe vertical et le second pour la poursuite N-S ou E-O. Deux ponts redresseurs du courant alternatif '220V' sont utilisés : le premier en courant continu '24V' pour alimenter le *PLC* et le second en '24V' alternatif pour fournir la puissance à l'un des moteurs électriques. La tension du second moteur est de '36V à courant continu' avec un engrenage à vis sans fin, tandis que l'autre moteur est équipé d'une roue à denture droite. La puissance estimée consommée par les moteurs électriques et le système de

commande est inférieure à '3%' de l'énergie captée par le système de poursuite solaire. La programmation de l'automate *PLC* est basée sur l'analyse des angles de position du soleil divisés en quatre intervalles avec des vitesses correspondantes aux moteurs. Les mesures effectuées sur le système photovoltaïque avec et sans poursuite solaire ont montré qu'il y avait une augmentation globale d'environ '30 à 45%' de la puissance de sortie du système de poursuite solaire *N-S* par rapport à celle du système fixe. Le système de poursuite solaire optimal est celui de l'axe *N-S*, qui correspond à la puissance maximale possible.

Bingol et al. [39] ont proposé d'implémenter et de tester deux systèmes de poursuite solaire à base d'un microcontrôleur. Ils ont utilisé des *LDRs* comme capteurs, des moteurs pas à pas comme actionneurs et un microcontrôleur. En outre, le système est relié à un micro-ordinateur via *RS232* pour le contrôle de la position du soleil. Un quartz avec une fréquence de '4 MHz' est utilisé en tant que générateur de signal d'horloge pour le microcontrôleur.

L'inclinaison du panneau par rapport à l'axe vertical est fixée à 50° . Deux panneaux de capteurs solaires ont été utilisés dans l'étude expérimentale, l'un fixe et l'autre avec poursuite solaire. La température des panneaux en fonction du temps est mesurée pendant un intervalle d'une minute. L'angle d'intervalle est de 5.2° . Une différence de 9°C est observée entre le panneau avec poursuite solaire et le panneau fixe. Les résultats prouvent que le panneau contenant le système de poursuite solaire reçoit une quantité d'énergie solaire plus grande que le panneau fixe.

Koyuncu et al. [40] ont évalué un système de poursuite solaire à deux axes à base d'un microprocesseur. Ils ont utilisé deux interrupteurs liés à un microprocesseur pour définir les positions angulaires limites du mouvement du panneau de l'Est et de l'Ouest. Leurs résultats ont montré que tant que le plan du panneau est maintenu normal aux rayons du soleil, la puissance collectée est maximale.

Peterson et al. [41] ont conçu et construit un système de poursuite solaire à base d'un microcontrôleur équipé de deux moteurs pas à pas bipolaire pour maintenir le couple nécessaire et fournir *200 pas/tour* afin de faire tourner deux panneaux photovoltaïques autour de l'axe d'altitude et d'azimut. Ils ont évalué trois algorithmes de poursuite solaire. Le premier algorithme entraîne le panneau photovoltaïque dans un mouvement de cercle en coordonnées sphériques avec un rayon arbitraire choisi par l'utilisateur, afin de chercher un point sur le cercle correspondant à une tension optimale. Le second algorithme entraîne le panneau photovoltaïque dans un quadrillage pour trouver le gradient de tension, qui est utilisé pour décider où il faut se déplacer. Le troisième algorithme utilise le deuxième algorithme pour trouver cinq points d'une

heure d'intervalle, puis ils utilisent la méthode des moindres carrés, pour estimer le prochain mouvement du soleil.

La compagnie *Girasolar* [42] a conçu et construit un système de poursuite solaire programmable à deux axes: azimutal et zénithal. Sa superficie est de $58 m^2$ avec $2100 kg$ de poids, capable de tourner avec une vitesse azimutale de ' $0.5 \text{ tours /minute}$ ' et le mouvement zénithal d'une vitesse de ' $0.06 \text{ tours/minute}$ '. L'angle maximal de déviation est de 2° à partir de la position soleil. La structure a été conçue pour résister à des vitesses de vent jusqu'à $105 km/h$. Il est rapporté que la croissance de sa production est d'un maximum de ' 35% ' par rapport à des installations fixes.

Contreras et al. [43] ont construit à l'Université de Texas un système de poursuite solaire portable en utilisant trois bras robotiques liés entre eux et contrôlés par trois microcontrôleurs. Les principaux composants du système sont: microcontrôleur *PIC*, ponts en *H*, moteurs à courant continu, capteur infrarouge, photo-résistances et une sortie *CC*. Le premier moteur à courant continu est de ' $10A$ ', ' $12V$ ' lié à un engrenage avec rapport de transmission de $500:1$, le second moteur est de ' $75mA$ ', ' $24V$ ' lié à un engrenage de rapport de transmission de $3000:1$ et le troisième moteur avec ' $220mA$ ' (en charge), ' $12V$ ' lié à un engrenage de rapport de transmission de $1000:1$. Ils ont programmé trois microcontrôleurs utilisant le langage de programmation *PIC ProBasic* et ils ont conclu que l'efficacité du système a augmenté de 30% .

Abdellah et al. [44] ont conçu et construit quatre systèmes de poursuite solaire électro mécaniques à boucle ouverte qui sont: à deux axe de rotation, à un axe vertical, à un axe *E-O* et un axe *N-S*, afin d'estimer la caractéristique courant tension et la comparer à celle d'un système fixe orienté vers le Sud et incliné à 32° . La position requise est calculée auparavant et programmée dans un automate programmable. L'automate programmable commande l'actionneur pour régler le panneau afin de maintenir une position perpendiculaire au soleil. Ils ont affirmé que la puissance consommée par le système de contrôle était inférieure à 2% de l'énergie captée par le système avec poursuite solaire. Après avoir comparé la caractéristique tension courant et de puissance pour les différents systèmes de poursuite solaire, ils ont conclu qu'il y avait une augmentation de gain de puissance électrique de 43.87 , 37.53 , 34.43 et 15.69% , respectivement, par rapport au système fixe.

2.5.2.2 Système de poursuite solaire à base de cellules solaires bifaciales (systèmes de poursuite sensibles)

Des cellules solaires auxiliaires (panneaux) connectées directement à un moteur à courant continu à aimant permanent, fixées sur l'axe de rotation du système de poursuite solaire, assurant la rotation dans les deux sens et peuvent fournir de l'énergie pour le suivi.

Poulek et al. [45] ont décrit un système de poursuite solaire très simple et fiable destiné aux applications spatiales et terrestres. Où les composants coûteux, comme les batteries et les drivers électroniques ont été complètement éliminées (*figure 2.20*). Il fonctionne également dans les milieux à basses températures allant jusqu'à '-40°C'. La surface des cellules solaires auxiliaires du système de poursuite solaire est d'environ '1%' de la superficie totale du générateur solaire. Leur cellules solaires bifaciales auxiliaires avec des panneaux solaires bifaciales permettent de faire marche arrière de n'importe quelle position (360° d'angle de suivi), tandis qu'un système de poursuite solaire basé sur une technologie similaire avec des cellules solaires mono-faciales standard ont un suivi / marche arrière d'un angle de '120°'.

Ils ont conclu que le système de poursuite solaire suit le soleil avec un écart de '±5°' sans aucune réduction de l'énergie captée. Le système collecte plus de '95%' de l'énergie captée par le système de poursuite solaire idéal.

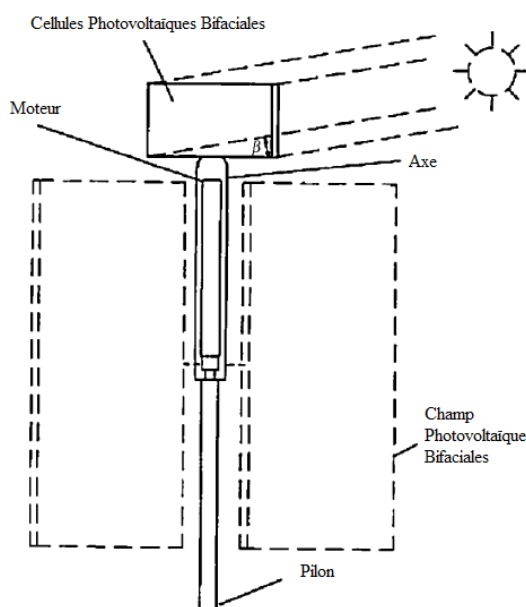


Fig. 2.20. Schéma de poursuite solaire à cellules bifaciales auxiliaires.

Dans un autre travail, ils ont conçu et construit un système de poursuite solaire basé sur une cellule solaire bifaciale auxiliaire capable de faire marche arrière dans un intervalle de '5 minutes' et de précision de poursuite solaire moyenne de '±5°', le système est conçu pour être

installé sur un concentrateur en forme 'V' avec un panneau solaire bifacial. Deux configurations antiparallèles de cellules solaires avec '1%' de la surface du générateur solaire connectée directement à un moteur à courant continu réversible avec une transmission autobloquante. Dans des conditions climatiques nuageuses, une fois le soleil se lève, le concentrateur commence à bouger. Leur résultats expérimentaux montrent que les modules photovoltaïques bifaciaux avec une sensibilité réduite de température peuvent augmenter le gain d'énergie de '15%' à '25%' en comparaison avec le même système de poursuite solaire avec des modules monofaciaux. Le système de poursuite solaire à axe polaire avec des modules photovoltaïques bifaciaux 'C-Si' peuvent fournir environ '50%' d'énergie de plus que celle d'un système photovoltaïque 'C-Si' fixe avec la même puissance de sortie nominale. La poursuite solaire bifaciale à concentrateurs peut doubler le gain d'énergie contre un générateur photovoltaïque monofaciale fixe. [46]

Karimov et al. [47] ont construit un système de poursuite solaire à un seul axe de rotation composé de quatre modules photovoltaïques installées sur un rotor, l'autre axe est réglable manuellement de manière à fixer l'angle d'inclinaison des modules à '23°', '34°' et '45°'. Les modules photovoltaïques ont été divisés en deux paires, l'angle entre les modules d'une paire est de '170°'. Les principaux modules ont été utilisés à la fois pour la détection et la conversion d'énergie (*figure 2.21*). Les modules ont été raccordés au circuit de pont très similaire au pont de Wheatstone. Si la tension de sortie à partir de modules n'est pas égale, la tension appliquée au moteur à courant continu n'est pas nulle et en conséquence, le moteur commence à tourner. Leur recherche montre que pour le système de poursuite solaire, contrairement aux modules fixes, la tension de sortie du soir et du matin n'est pas très différente et le mode de suivi recueille 30% d'énergie.

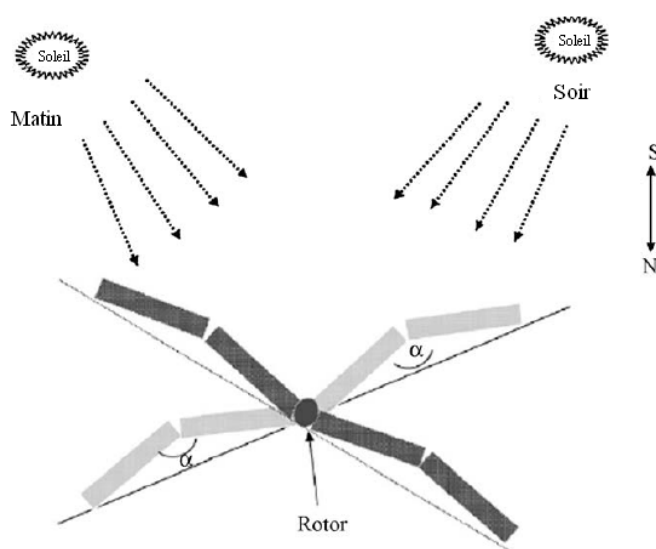


Fig. 2.21. Position des modules photovoltaïques le matin et le soir.

Poulek et al. [48] ont conçu un système de poursuite solaire basé sur un nouvel arrangement de cellules solaires connectées directement à un moteur à courant continu réversible. Comme leurs travaux antérieurs, les cellules solaires, fournissent de l'énergie pour la poursuite dans deux sens. La *figure 2.22* représente le principe du système de poursuite solaire. Pour la détection et la commande, les cellules solaires sont équilibrées les unes aux autres. La différence du signal est utilisée pour surmonter les frottements et la traînée aérodynamique. L'axe de rotation du moteur de poursuite solaire est orienté vers la direction *N-S*, avec une précision de l'ordre de $\pm 10\%$. La surface des cellules solaires auxiliaires du système de poursuite solaire est d'environ 2% de la superficie de générateur *PV*, tandis que le surplus d'énergie collecté est de l'ordre de 40%.

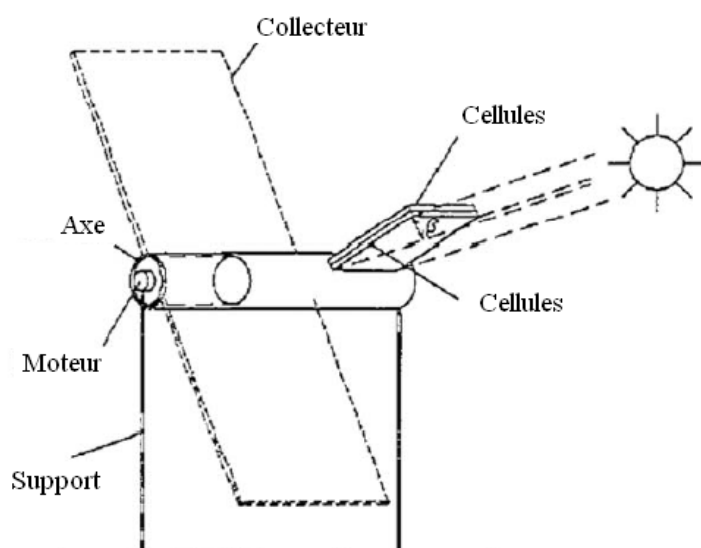


Fig. 2.22. Système de poursuite solaire horizontal.

2.5.2.3 Système de poursuite solaire basé sur la date et l'heure (systèmes de poursuite aveugles)

Dans le mode de poursuite solaire basé sur date / heure, un microordinateur ou un processeur calcule la position du soleil à partir des formules ou des algorithmes utilisant la date, l'heure et la position géographique afin d'envoyer des signaux au moteur électrique. Cependant dans certains cas, de nombreux capteurs sont utilisés pour identifier des positions spécifiques.

Canada et al. [49] ont conçu et construit un système de poursuite solaire avec une erreur de position maximale de 2° , le système est réalisé pour la mesure du rayonnement spectrale solaire global et direct dans la gamme $330-1100 \text{ nm}$. Ils ont conçu un système de poursuite solaire en fonction de leurs besoins spécifiques et avec un coût relativement faible, permettant jusqu'à une

semaine de fonctionnement continu sans avoir recourt à aucun contrôle de l'opérateur. Le système de poursuite solaire est capable de retourner chaque soir à sa position de repos, en évitant de se retourner sur lui-même. Le mouvement de l'ensemble du système est commandé par un moteur pas à pas avec engrenages pour la réduction de vitesse afin d'ajuster l'orientation du système. Le système a deux degrés de liberté, une rotation dans le plan d'azimut sur une base fixe, et l'autre rotation dans le plan solaire principale. La commande du moteur est réalisée par une carte électronique de commande qui a été spécialement conçu à ce type de moteur, comprenant une interface compatible, qui est connecté au port parallèle de l'ordinateur par des optocoupleurs. Cette configuration est faite de sorte à donner au système un point de référence à partir duquel se positionner correctement. Deux capteurs marche / arrêt ont été utilisés indiquant la position initiale pour chacun des degrés de liberté. Ce sont des détecteurs optiques constitués d'une *LED* et d'un photo-détecteur travaillant dans la zone infrarouge. Au coupe-circuit des capteurs à la position désirée, des points de référence en Aluminium sont utilisés pour identifier le Nord géographique et le zéro de l'altitude solaire.

Tous les codes ont été écrits en C++ Builder sous l'environnement Windows pour:

- assurer un mouvement par rapport au Soleil ;
- commander le moteur ;
- régler et revenir à la position de repos ;
- alarmer et activer / désactiver les capteurs.

A partir de ces données, en utilisant un procédé soustractif, le rayonnement solaire diffus sur un plan horizontal est calculé. Enfin, grâce à la loi de *Bouguer-Lambert-Beer*, l'algorithme calcule l'épaisseur atmosphérique totale et la profondeur optique des aérosols dans la gamme '330-1100 nm'.

Edwards [50] a examiné le fonctionnement d'un système de poursuite solaire à base d'un microordinateur destiné aux concentrateurs cylindro-paraboliques. Le calculateur du système change la vitesse de chacun des actionneurs pour des intervalles réguliers au cours de la journée. Il est démontré que pour un système de poursuite solaire précis, le système nécessite une sortie de données à partir du contrôleur central de seulement '500 bits/s' pour 10000 concentrateurs.

Alata et al. [51] ont conçu et simulé un système de contrôleur de temps d'un pas d'un système de poursuite solaire comprennent: un axe de système de poursuite solaire avec une surface d'ouverture inclinée à l'angle de latitude, un système de poursuite solaire équatorial à

deux axes azimut / hauteur du soleil. Une étude comparative a été faite en utilisant la méthode de la logique floue concernant ces trois systèmes de poursuite solaires.

Le système de poursuite solaire à un seul axe est incliné par rapport à l'horizontale correspondant à l'angle de latitude orienté vers le Sud. La variation horaire de l'angle de déclinaison est considérée comme très lente, d'où le suivi à cet axe peut être ajusté une fois ou plusieurs fois pendant la journée pour le système de poursuite solaire équatorial à deux axes avec inclinaison égale à l'angle de latitude. La conception de l'azimut / hauteur poursuite comprend un axe tournant autour de l'axe de zénith (axe perpendiculaire) tandis que l'autre axe est parallèle à la surface de la terre.

Aliman et al. [52] ont développé un nouveau système de poursuite solaire pour gagner de l'énergie solaire dans les systèmes à haute concentration. Leur système est constitué d'un miroir principal entouré de plusieurs miroirs. Le miroir principal reflète les rayons solaires sur une cible fixe. L'image du soleil sur la cible agit comme une référence pour tous les autres miroirs. Le système de poursuite solaire a deux axes de rotation perpendiculaires les uns aux autres. L'un est l'axe de rotation dirigé vers la cible, l'autre est l'axe d'élévation parallèlement au réflecteur. Comme le soleil se déplace dans le ciel du matin à midi solaire, le plan de symétrie va tourner à partir de l'horizontale jusqu'à la verticale.

Nuwayhid et al. [53] ont présenté un prototype simple à concevoir, construit et tester un système de poursuite solaire à deux axes pour un concentrateur, connecté à un microordinateur. Ils ont prédit la position du soleil à l'aide de l'angle de la hauteur du soleil et d'azimut solaire variés en forme sinusoïdale et les deux varient en fonction du temps. Chaque axe a été relié à un moteur à courant continu et chaque moteur à un relais pour compter le nombre de rotation (compteur). La relation angle par rapport valeur de compteur a été établie à partir de données expérimentales. Lorsque la vitesse du moteur d'angle horaire est réduite à '*0.23 tours/minute*', une boîte de vitesses installée augmente la vitesse à '*23 tours/minute*'. Les moteurs et les capteurs de position sont connectés à un microordinateur. Le microordinateur calcule le temps solaire et l'angle solaire sur un site donné. Le système utilise un capteur de température et également 9 LDRs installées dans un tube pour définir l'image du soleil. Ils ont conclu que le système de poursuite solaire augmente la température du fluide caloporteur qui fonctionne entre '*200-600°C*' par rapport à un prototype sans système de poursuite solaire qui fonctionne entre '*80-200°C*'.

AL-Jumaily et al. [54] ont étudié les performances d'une lentille de Fresnel linéaire qui concentre le rayonnement solaire sur deux absorbeurs montés en série. Le système est conçu de

manière à suivre le soleil en deux dimensions (selon les angles de l'altitude et d'azimut). Plus de 200 tests ont été effectués pour évaluer les rendements thermiques et optiques en fonction de l'angle horaire et la température d'entrée et de sortie du fluide caloporteur. Ils ont constaté que grâce à l'utilisation de système de poursuite solaire à deux dimensions, le rayonnement incident gardé toujours perpendiculaire au collecteur, l'efficacité optique maintenue constante le long de la journée (environ 64%).

Abdallah et al. [55] ont développé un système de poursuite solaire à un seul axe pour un distillateur solaire de '1 m²' de surface contrôlé par un automate programmable PLC. Dans cette conception, un moteur tourne la structure autour de l'axe vertical (poursuit azimutal). La consommation d'énergie par le moteur et le système électrique est estimée à 3% de l'énergie captée. La journée est divisée en quatre intervalles et la vitesse du moteur est programmée dans l'automate pour chaque intervalle. Les résultats graphiques montrent une augmentation du rendement jusqu'à 40% le matin et jusqu'à 22% le soir.

Davies [56] a conçu un mécanisme de poursuite solaire en utilisant les axes équatoriales et écliptiques qui se croisent les uns les autres en 23.5°. Dans cette conception, le soleil est considéré comme un point fixe par rapport au mouvement de la Terre, par conséquent, le capteur solaire doit tourner autour de l'orbite de la Terre à la même vitesse angulaire de cette dernière, mais dans la direction opposée. Un module triangulaire est articulé par une rotule permettant une rotation libre. L'erreur de poursuite solaire est prévue d'environ '±2°'. Le principal avantage de ce système est l'utilisation d'un moteur à vitesse constante avec précision sans commande électronique compliqué.

Khlaichom et al. [57] ont appliqué une commande en boucle fermée en utilisant la méthode d'algorithme génétique pour un système de poursuite solaire à deux axes (azimut / hauteur de soleil). Un capteur à base d'une cellule solaire poly-cristalline convertit le rayonnement solaire à une tension. Dans leur algorithme, le décodeur et le compteur reçoivent les signaux à partir d'un codeur optique et le converti en courant correspondant à la mesure de la position de l'axe de rotation. Les données sont ensuite transférées vers un micro-ordinateur via une carte d'interface. Le système suit le soleil avec '±10°' dans les deux axes. Les tests et les analyses ont montré que le système de poursuite solaire utilisant les algorithmes génétiques augmente la tension de sortie d'une valeur de '7.084%' par rapport à un système sans algorithmes génétiques.

Blanco et al. [58] ont comparé les différents algorithmes proposés pour la détermination de la position du soleil. Ils ont même mentionné la précision, des quatre algorithmes (celui proposé par *Michalsky* semble le plus précis), l'efficacité informatique et la facilité d'utilisation peuvent encore être améliorées. En conséquence, un nouvel algorithme appelé algorithme *PSA* a été développé. Ils ont évalué une boucle ouverte à base d'un microprocesseur et il s'est avéré plus précis, peu coûteux et simple comme algorithme de contrôle, qui calcule la direction du vecteur solaire en fonction de l'emplacement géographique et l'heure. Comparant aux algorithmes de *Michalsky*, l'algorithme *PSA* a montré une faible erreur de déviation de 22%, 14% et 28% d'angle zénithal exacte, l'azimut et le vecteur de direction du soleil, respectivement. De même, l'intervalle des erreurs dans le calcul de la distance zénithale exacte, vecteur d'azimut et la direction du soleil est de 24%, 8% et 35% inférieur à celui de l'algorithme *Michalsky*.

2.5.2.4 Système de poursuite solaire combiné basé sur capteur sensible et sur date / heures

Roth et al. [59] [60] ont conçu et construit un dispositif de poursuite solaire à deux axes (un axe pour le mouvement de l'Est à l'Ouest et l'autre pour la hauteur du soleil). Ils ont utilisé un pyréliomètre comme un instrument de mesure pour la poursuite solaire, des potentiomètres et des fins de course couplé aux axes de mouvement (une pour chaque axe) pour envoyer le signal au microcontrôleur proportionnel au mouvement des axes. Le microcontrôleur de la série *16F877* considéré comme une partie principale connecté à un microordinateur et à deux capteurs, un pour l'information de la position du soleil et l'autre pour indiquer l'intensité du rayonnement solaire, signalant le début et la fin de la journée.

Pendant le mode d'horloge, le système de poursuite calcule la position du soleil basé sur la date / heure de son horloge. Les erreurs de position de la lumière sont mesurées au cours de la journée et stockées pour une analyse ultérieure. Les données recueillies au cours de la journée sont ensuite analysées, et à nouveau améliorées pour définir les paramètres et calculer les erreurs d'installation. Ces données sont utilisées dans les prochains jours pour calculer la position du soleil d'une façon plus précise.

En mode soleil, le système de poursuite utilise les données de la position du soleil pour contrôler activement le pointage du système vers le soleil. Si l'intensité chute temporairement au-dessous d'un certain niveau, le système revient temporairement au mode horloge. En cas du rayonnement solaire au-dessous de ' $140 W/m^2$ ', la donnée enregistrée chute brusquement à zéro, mais au-dessus de cette valeur, le système fonctionne d'une façon stable. Pour les tests, un pyréliomètre de type *Eppley* a été monté sur le support du système de poursuite solaire. Pour

faire des mesures plus précises et comparer le rayonnement mesuré avec le pyréliomètre, trois pyréliomètres supplémentaires ont été utilisés, deux d'entre eux étaient des pyréliomètres de type *Eppley* dans un système de poursuite solaire Suisse de type *INTRA* et l'autre est un pyréliomètre de type *Kipp&Zonen*. Les expériences ont données des bons résultats comparables à celle du système Suisse *INTRA* mais à un prix très inférieur (75 fois moins cher).

Ajay et al. [61] ont conçu un système de poursuite solaire à un seul axe de rotation, à base d'un microcontrôleur utilisant la technique de contrôle du temps afin de l'installer sur la ligne focale d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique. Un capteur de vitesse du vent, un capteur de rayonnement et un capteur de température ont été connectées au port du convertisseur analogique numérique du microcontrôleur communiquant avec une horloge en temps réel (*RTC*). Le processeur manipule les données reçues des capteurs et de le *RTC* pour calculer la position du soleil et envoie des signaux à un moteur. La hauteur de l'ombre au-dessus des capteurs de lumière est de *86mm* résultant en une résolution de l'ordre de 1° . La résolution dépend également de l'intensité du rayonnement solaire. Pour une faible intensité, le système fonction seulement en mode contrôle de temps. Lorsque le signal provenant de l'une des résistances dépendant de la lumière (*LDR*) dépasse la tension de référence, la sortie du comparateur est basse. Ceci est la cause du signal d'erreur de mouvement du collecteur. Les impulsions provenant du capteur de rotation du moteur sont reliées au dispositif de commande. Un algorithme est développé de telle façon que, plusieurs fonctionnalités dans le logiciel rendront le système fiable. Les performances du contrôleur sous différentes conditions environnementales telles que les journées ensoleillées, journées nuageuses, ...etc, montrent que l'ensemble du système de poursuite solaire est très sensible pour la détection des petits changements dans la position du soleil.

Rubio et al. [62] ont discutés la conception et la mise en œuvre d'un système de poursuite solaire à deux axes destiné à un système photovoltaïque en utilisant une combinaison d'une stratégie de poursuite solaire en boucle ouverte avec un microprocesseur dans lequel le régulateur est basé sur un modèle du mouvement de soleil et une stratégie en boucle fermée qui correspond au dispositif de commande électro-optique. La puissance instantanée générée par le champ photovoltaïque est mesurée par un capteur qui émet un signal proportionnel à cette puissance. Enfin, ils ont mis en œuvre une stratégie de contrôle proportionnel et intégral (*PI*) pour chaque coordonnée, de manière indépendante. Leur stratégie de suivi a produit une très proche approximation de l'évolution de la hauteur du soleil et de l'azimut même si les équations des coordonnées du soleil produisent assez d'erreurs. Ils ont conclu que l'énergie électrique

produite en utilisant la stratégie hybride est, en valeurs moyennes, 55% plus élevée que celle de la boucle ouverte.

Bakosa [63] conçu et construit un système de poursuite solaire à deux axes basé sur la combinaison de photo résistances conventionnelles et la méthode programmable de contrôle. Le dispositif électromécanique est constitué de quatre relais, deux circuits électroniques, deux photos résistances connectées en série et deux moteurs à courant alternatif. Pour un fonctionnement manuel, dessinant une représentation graphique et déterminant le lever et le coucher du soleil, le système est connecté à un ordinateur géré par un programme écrit en langage de programmation Visual C ++. Le système peut suivre le soleil en direction $E-O$ et $N-S$. Ils ont conclu que le système de poursuite à deux axes est efficace à plus de 46.46% par rapport à un système de surface fixe incliné à 40° orienté vers le sud.

Hession et al. [64] ont évalué un système électromécanique pour poursuite solaire à un seul axe ($E-O$), utilisant plusieurs photos transistors pour contrôler les positions d'un concentrateur parabolique. Les signaux de différence avec les photo-résistances sont convertis en tension et amplifiés pour entraîner un moteur à courant continu '2.2 W'. A partir du capteur à neuf photos-transistors, un est utilisé pour faire la différence entre la nuit et le jour, six autres pour la détection des angles avec grande sensibilité et deux pour la détection des angles avec sensibilité étroite. La résolution souhaitée était de 0.1° . Pour obtenir des mesures précises de l'énergie, le système utilise un mécanisme d'horloge d'entraînement pendant les conditions climatiques nuageuses.

Luque-Heredia et al. [65] ont évalué un nouvel algorithme de contrôle d'ajustement de la 'PI' (intégrale proportionnel) classique basée sur l'algorithme hybride de la vitesse constante de poursuite du soleil destiné à la concentration photovoltaïque. Ils souhaitaient combiner à la fois un système éphéméride informatique en boucle ouverte et un système contrôleur de poursuite solaire à base de capteurs en boucle fermée. Pour l'entrée prédictive (*Feedforward*) de l'estimation en boucle ouverte de la position du soleil, un modèle mathématique est utilisé en tant que fonction du temps avec les coordonnées géographiques, et la génération d'un bruit. Dans le but d'augmenter la précision de la poursuite, une boucle de rétroaction provenant du bruit dans le modèle de la procédure a été introduite. Ils tracent la courbe de la position réelle du soleil, la courbe de l'équation du soleil et l'équation corrigée du soleil en fonction du temps. Les résultats ont montré que les positions réelles du soleil et la courbe de l'équation corrigée du soleil se correspondent après $1h$.

Georgiev et al. [66] ont construit un système de poursuite solaire en mode 'hauteur du soleil sur azimut' dans lesquels l'axe de poursuite est monté en verticale pour suivre le soleil avec une erreur de 0.05° . Ils ont utilisé un moteur sans balayage pour chacun des deux axes, et un engrenage d'entraînement à vis sans fin pour la transmission. Le système est équipé d'une connexion à un microordinateur avec sélection du port série *RS232-C*, *RS422* ou *RS485*. Le système de poursuite fonctionne en trois modes: le mode d'horloge par date / heure, le mode de soleil en utilisant le signal du détecteur de la position du soleil, le mode à distance où les positions primaires et secondaires sont définis par les commandes. En outre, un mode appelé mode moniteur, permet de configurer les cas non opérationnels. Les mesures ont été effectuées automatiquement avec trois pyréliomètres et manuellement avec un pyréliomètre. Ensuite, l'acquisition des données provenant des pyréliomètres est assurée par une carte *ADC*, et par la suite stockés dans un ordinateur. Avec la tension de sortie du pyréliomètre, et une formule expérimentale, ils peuvent calculer l'éclairement. Dans de bonnes conditions, une différence de $60W/m^2$ entre rayonnement mesuré avec différents pyréliomètres est enregistrée.

Durisch et al. [67] ont développé et testé des cellules et des modules avec un système de poursuite solaire à base d'un microordinateur, afin de fournir des données de l'extérieures dans des conditions de fonctionnement réelles pour une utilisation optimale de l'énergie photovoltaïque. Dans leur conception, la déclinaison du soleil durant toute l'année a été prise en compte par un mécanisme à manivelle spécialement développé. Un contrôle en boucle ouverte simple fournit un suivi précis à la fois des axes polaires et déclinaison, via des moteurs pas à pas et des engrenages à vis sans fin. Pour mesurer le rayonnement incident sur les cellules et les modules, six pyranomètres ont été reliés en série et une cellule de référence a été montée sur le système de poursuite solaire. Plusieurs mesures tels que la température ambiante et la température de surface du module, rayonnement direct normal, la vitesse du vent, capteurs de tension et de courant ont été pris en compte. Les données recueillies sont envoyées à un microordinateur et les courbes courant-tension et puissance-tension ont été tracées. Leurs tests ont révélés que la différence dans la puissance la plus élevée obtenue par les deux méthodes: une pour rechercher la puissance maximale pendant les analyses tension-courant et la deuxième trouvé par les méthodes mathématiques, était inférieure à 0.02% .

Saxena et al. [68] ont conçu et fabriqué un contrôleur basé sur un microprocesseur pour un système de poursuite solaire à deux axes qui suit le soleil en azimut et en direction d'altitude par deux moteurs pas à pas. Le système agit dans les deux modes à boucle fermée et en boucle ouverte. Leur système consiste en une installation pour l'acquisition de données et de stockage, une installation de contrôle des batteries, un système de surveillance et de contrôle, une carte de

convertisseur, une carte à microprocesseur, carte de capteur de vitesse du vent. Dans le mode en boucle fermée, le système de poursuite solaire commence à environ *05h00* du matin, il se déplace sous le mode *CLOUD* jusqu'au lever du soleil. Dans la soirée, l'arrêt du mouvement est obtenu en avant. Le système de poursuite solaire retourne à la position *HOME* à la fin de la journée. Les données pour les paramètres du système photovoltaïque et les paramètres météorologiques sont acquises toutes les *10 min*.

2.6 Effet cosinus dans les concentrateurs cylindro-paraboliques

2.6.1 Effet cosinus

Lorsque la direction du soleil n'est pas normale à la surface d'ouverture d'un concentrateur cylindro-parabolique, l'image se trouve déplacée et élargie (*figure.2.23.*).

Les systèmes de poursuite simplifiés adoptés dans les concentrateurs ne permettent pas pour une même surface d'ouverture, de recueillir autant d'énergie que les systèmes de poursuite intégrale et ceci est dû principalement à deux raisons:

- La réduction de la surface efficace de captation (effet Cosinus);
- La réduction de la concentration en raison du déplacement de l'image.

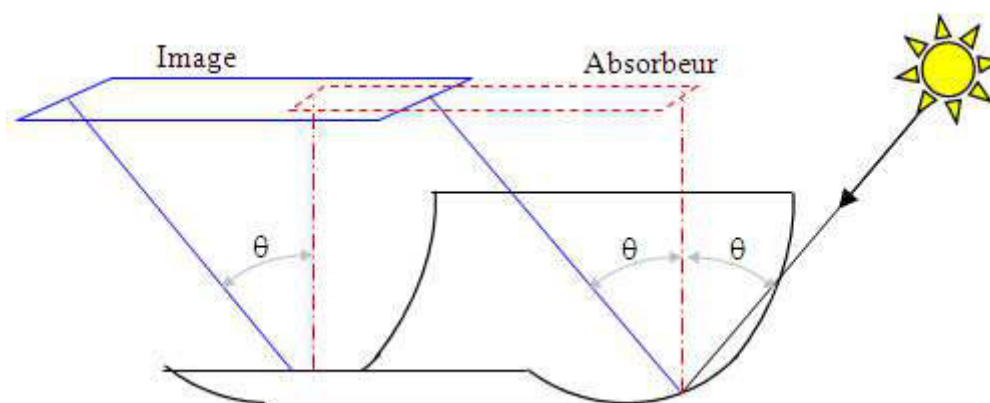


Fig.2.23. Illustration de l'effet Cosinus dans les miroirs cylindro-paraboliques. [8]

Si le rayonnement direct incident (E_d) fait un angle (θ) avec la normale du plan d'ouverture, le rayonnement au niveau de l'absorbeur sera : [8]

$$E_c = E_d \cdot \cos(\theta) \cdot C \quad (2.19)$$

E_c : Rayonnement au niveau de l'absorbeur;

C : Taux de concentration;

θ : Angle entre les rayons solaires et la normale de la surface d'ouverture du concentrateur.

Le tableau ci-après résume le paramètre ' $\text{Cos}(\theta)$ ' pour différent cas d'orientations :

Table.2.1. Effet Cosinus dans les systèmes de poursuite solaires. [8]

Système de poursuite	$\text{Cos}(\theta)$
1 Poursuite intégrale	1
2 Axe de rotation parallèle à l'axe du monde	$\text{Cos}(\delta)$
3 Axe de rotation horizontal et orienté Est - Ouest	$(1-\text{Cos}^2(\delta).\text{Cos}^2(\omega))^{1/2}$
4 Axe de rotation horizontal et orienté Nord - Sud	$[(\text{Sin}(\varphi).\text{Sin}(\delta)+\text{Cos}(\varphi).\text{Cos}(\delta).\text{Cos}(\omega))^2+\text{Cos}^2(\delta).\text{Sin}^2(\omega)]^{1/2}$

Selon les relations du *tableau.2.1*, on voit que le type de poursuite dépend directement du $\text{Cos}(\theta)$ et c'est ce paramètre qui détermine le taux de concentration ainsi que l'axe de rotation du concentrateur et la rentabilité et l'efficacité du système.

2.6.2. Valeur annuelle de l'effet cosinus au sud de l'Algérie

Pour avoir une meilleure efficacité d'un concentrateur cylindro-parabolique, il faut que les rayons solaires soient perpendiculaires sur la surface d'ouverture. Cependant, les concentrateurs cylindro-paraboliques s'installent en position horizontale habituellement, ce qui veut dire que l'angle d'incidence est variable durant l'année et ce qui implique la variation de l'effet cosinus. L'effet cosinus est défini comme étant la distance non couverte du foyer (L) par les rayons concentrés, qui sont en relation avec la distance focale (F).

$$L = F \cdot \text{Cos}(\theta) \quad (2.20)$$

Pour différentes distances focales, nous avons calculé la distance (L) de l'effet cosinus pour la région de Ghardaïa Sud de l'Algérie (voir *figure 2.24*).

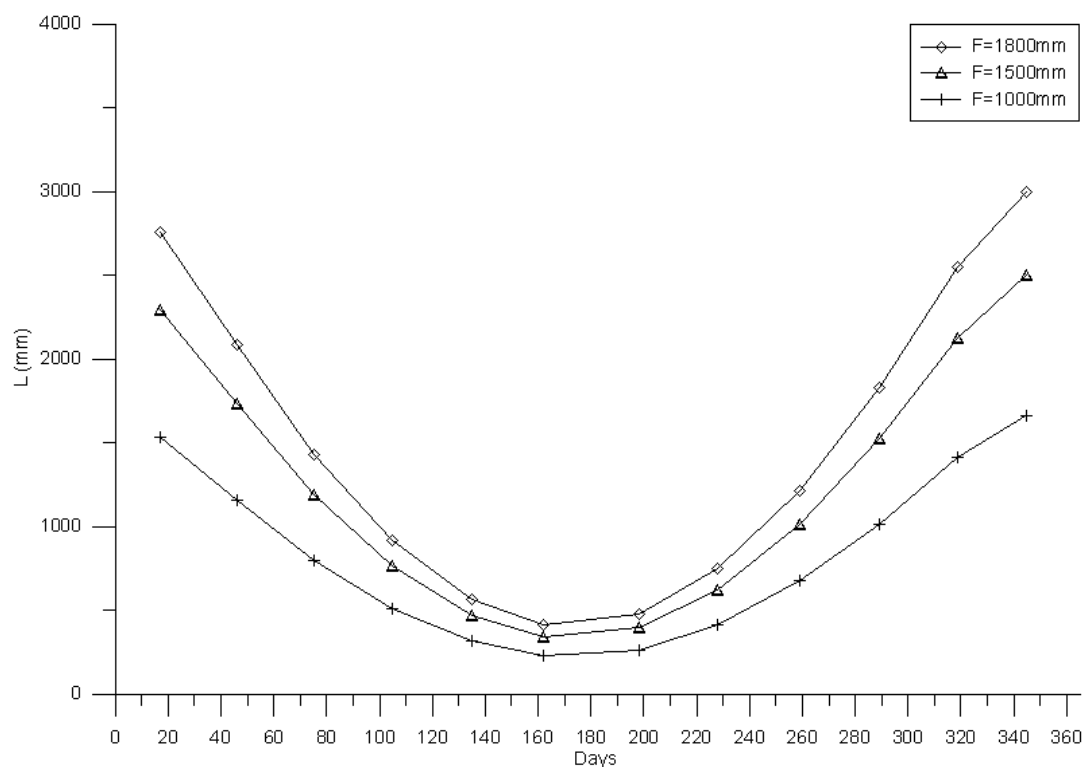


Fig. 2.24. Effet cosinus en fonction des jours de l'année pour plusieurs distances focales dans la région de Ghardaïa au Sud de l'Algérie.

Techniquement, l'utilisation des systèmes de poursuite solaire à deux axes dans les centrales solaires thermodynamiques à base de concentrateurs cylindro-paraboliques est impossible, vu la taille importante de ces derniers. Pratiquement on utilise des systèmes de poursuite solaire à un seul axe de rotation avec un collecteur placé en horizontal orienté vers le Sud. L'utilisation de tels systèmes augmente les pertes optiques dues à l'effet cosinus (voir *figure 2.25*) et diminue l'efficacité de l'installation. Dans ces grandes installations, ces pertes optiques influent peu sur le rendement du système, pour cela elles sont souvent négligeables [69]. Par contre dans le cas d'un système à concentrateurs cylindro-paraboliques de petite taille, ces pertes optiques doivent impérativement être prises en considération. D'où notre idée de chercher une solution optimale au système de poursuite solaire déjà adopté dans le but d'optimiser le fonctionnement du concentrateur, tout en minimisant les pertes optiques.

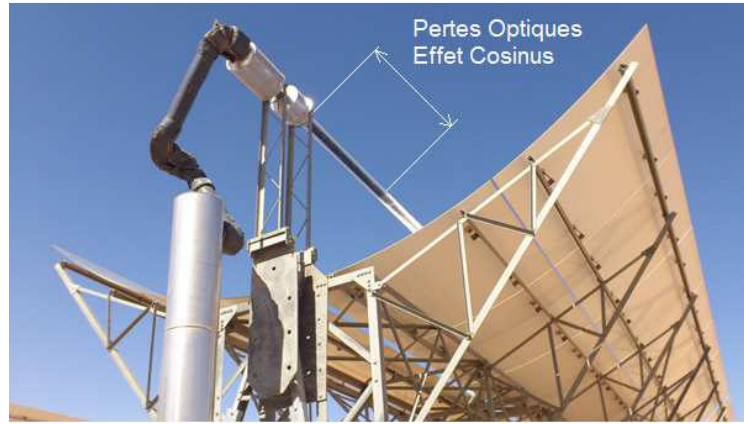


Fig.2.25. Illustration de l'effet cosinus dans un concentrateur cylindro-parabolique de la centrale hybride de Hassi R'mel situé au Sud de l'Algérie.

2.6.3 Simulation optique de l'effet cosinus

Soit un concentrateur cylindro-parabolique de ' $1m^2$ ' de surface d'ouverture et une longueur focale de ' $0.5m$ ' (figure.2.26). Pour la simulation optique de l'effet cosinus, nous avons utilisé le logiciel de simulation optique *TRACEPRO* [70], c'est un logiciel de simulation optique puissant basé sur la méthode '*RayTrace*', qui fait la simulation de presque tous les phénomènes optiques. En premier lieu nous avons commencé par le calcul des coordonnées du soleil (hauteur du soleil, azimut) pour le site de Ghardaïa en utilisant le modèle de Capderou [27]. Avec de la trigonométrie nous avons converti les coordonnées du soleil (Azimut, Hauteur de soleil) en coordonnées de source de la lumière utilisé par le logiciel en supposant que la valeur du rayonnement solaire est de $1000 W/m^2$ et la température ambiante est de $25^\circ C$. Utilisant le logiciel *SOLIDWORKS* [71] nous avons conçu le concentrateur proposé, et nous l'avons exporté vers le logiciel '*TRACEPRO*' pour simulation.

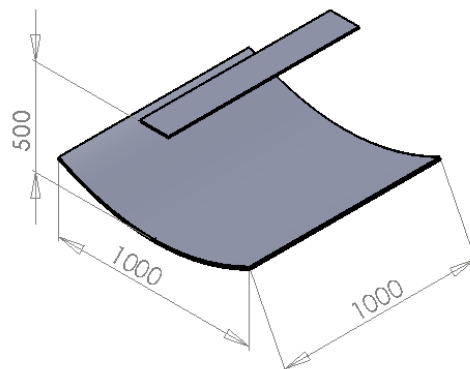


Fig.2.26. Le concentrateur cylindro-parabolique conçu sur pour la simulation optique.

Pour avoir une idée sur l'effet cosinus dans le concentrateur cylindro-parabolique, nous avons suivi les étapes de simulation suivantes : nous avons simulé le concentrateur proposé avec

poursuite solaire à un seul axe de rotation pour deux orientations (axe de rotation orienté Nord-Sud et orienté Est-Ouest) pour les deux cas horizontale et inclinée du collecteur et ceci pendant deux jours de l'année le plus long et le plus court.

Les résultats de la simulation sont présentés sous forme de distribution des rayons concentrés au niveau du foyer. [72]

2.6.3.1 Poursuite solaire à axe de rotation horizontal orienté Nord-Sud

a) En Hiver :

Dans ce cas nous allons supposer que le concentrateur est en position horizontale pour une journée d'hiver la plus courte de l'année (355^{ème} jour à partir du 1^{ier} janvier) voir *figure. 2.27*.

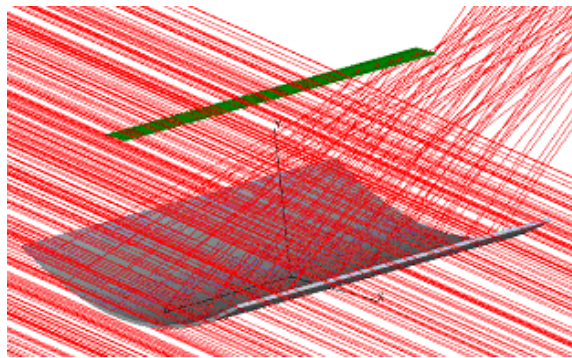


Fig. 2.27. Simulation du concentrateur cylindro-parabolique avec axe de rotation horizontal orienté Nord-Sud pour une journée d'hiver.

Après simulation optique, on voit clairement que le facteur de concentration est faible, les rayons solaires touchent une petite partie du foyer uniquement.

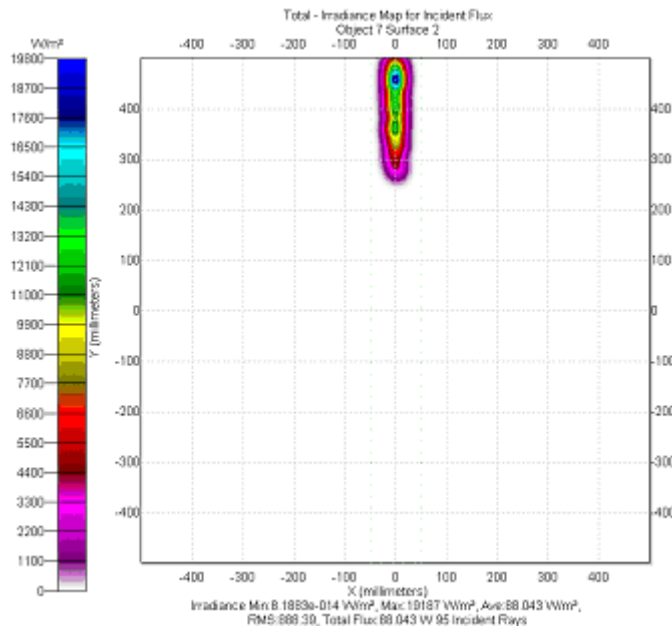


Fig. 2.28. Distribution du rayonnement concentré au niveau du foyer du concentrateur cylindro-parabolique avec axe de rotation horizontal orienté Nord-Sud pour une journée d'hiver.

D'après les résultats on constate qu'en position horizontale le capteur ne concentre rien. A part un faible rayonnement concentré à l'extrémité du foyer, il est de l'ordre de ' 19.8 kW/m^2 ' et le reste du foyer est très loin de la ligne de concentration *figure. 2.28*. Il faut donc; en hiver, incliner le capteur pour avoir une meilleure concentration (on incline le capteur à un angle égale à la latitude du lieu 32°) *figure. 2.29*.

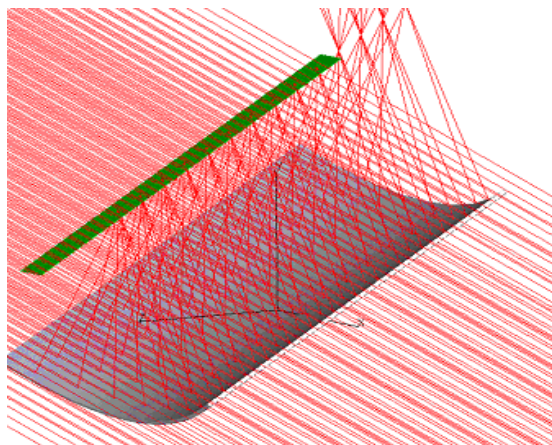


Fig. 2.29. Simulation du concentrateur cylindro-parabolique avec axe de rotation incliné à 32° orienté Nord-Sud pour une journée d'hiver.

Sur la *figure. 2.30*, on constate que le foyer est presque totalement couvert, le rayonnement concentré est acceptable, il est de l'ordre de ' 30 kW/m^2 '.

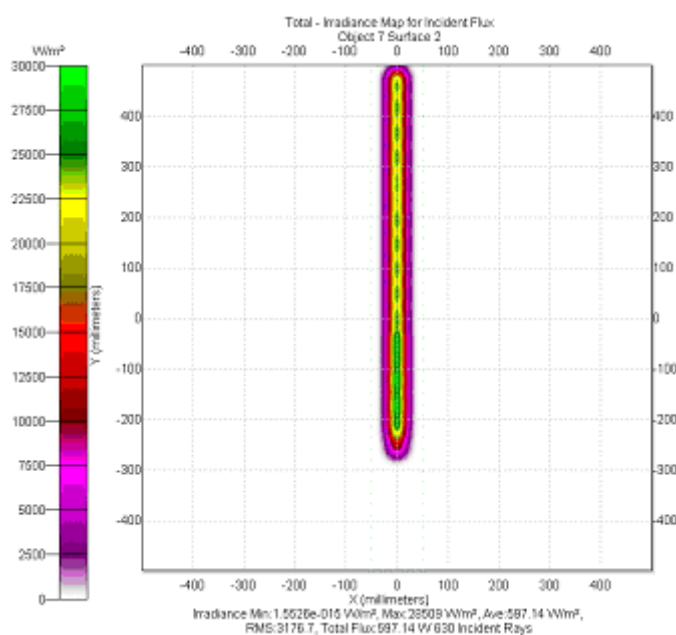


Fig. 2.30. Distribution du rayonnement concentré au niveau du foyer du concentrateur cylindro-parabolique avec axe de rotation incliné à 32° orienté Nord-Sud pour une journée d'hiver.

Pour le type de poursuite (poursuite solaire axe de rotation horizontal orienté Nord-Sud) l'effet cosinus est très important, la concentration est très faible en hiver, ce qui rend ce type de poursuite non efficace pour les petits concentrateurs, l'inclinaison de l'axe de rotation a pour longtemps été l'unique solution adoptée pour minimiser l'effet cosinus. Cependant, dans ce travail; une nouvelle idée est proposé, qui consiste à déplacer le foyer pour la récupération des pertes optique due à l'effet cosinus afin d'augmenter le rendement du système.

b) En Été:

En été la hauteur du soleil est importante, pour ce cas nous allons simuler le concentrateur en position horizontale orienté Nord-Sud (*figure. 2.31*), pendant une journée d'été (la journée la plus longue de l'année), nous avons choisi le 172^{ème} jour à partir du 1^{ier} janvier.

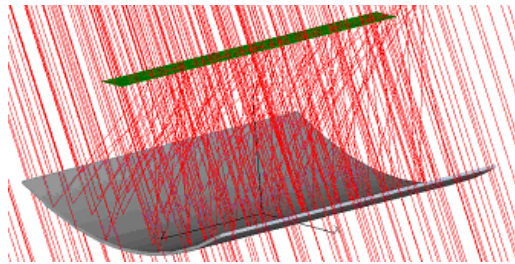


Fig. 2.31. Simulation du concentrateur cylindro-parabolique axe de rotation horizontal orienté Nord-Sud pour une journée d'été.

Dans ce cas la concentration est acceptable, le foyer est presque couvert, l'effet cosinus est très faible et le rayonnement concentré est vraiment important, il est de l'ordre de '32.5 kW/m²' *figure. 2.32*.

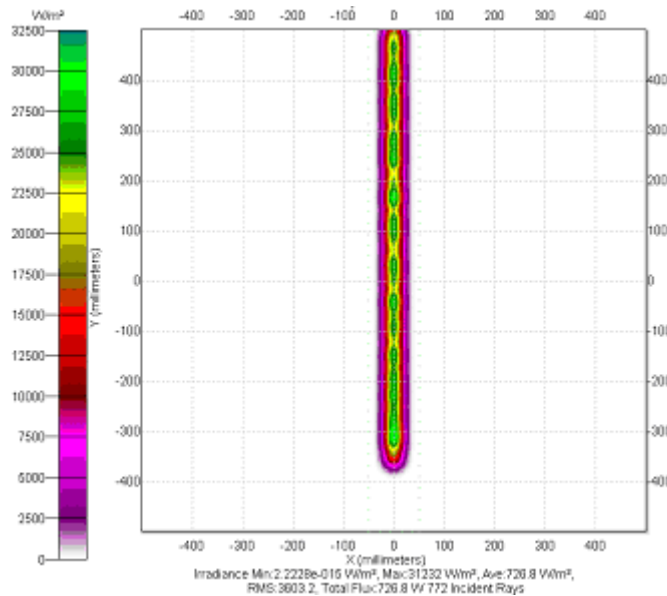


Fig. 2.32. Distribution du rayonnement concentré au niveau du foyer du concentrateur cylindro-parabolique avec axe de rotation horizontal orienté Nord-Sud pour une journée d'été.

On peut dire que ce type de poursuite (axe de rotation horizontal orienté Nord-sud) est acceptable en été. Cela n'empêche pas d'incliner le collecteur en été et de faire sa simulation en raison de comparaison avec le cas d'hiver. On se demande bien que se passe-t-il si on incline le capteur à 32° en été (*figure. 2.33*), le taux de concentration diminuera-t-il ? Et l'effet cosinus augmentera-t-il ?

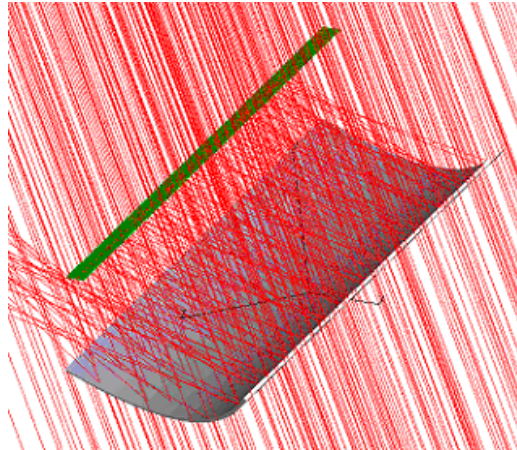


Fig. 2.33. Simulation du concentrateur cylindro-parabolique avec axe de rotation incliné à 32° orienté Nord-Sud pour une journée d'été.

Pour la même inclinaison du système en hiver, l'effet cosinus reste toujours faible, il est seulement en sens inverse au niveau du foyer par rapport à l'horizontal, le rayonnement reste toujours important, il est de l'ordre de ' 32.5 kW/m^2 ' *figure .2.34*.

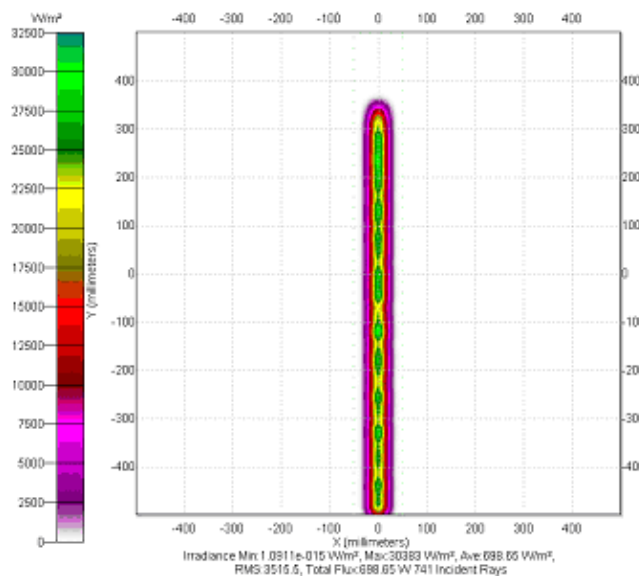


Fig. 2.34. Distribution du rayonnement concentré au niveau du foyer du concentrateur cylindro-parabolique avec axe de rotation incliné à 32° orienté Nord-Sud pour une journée d'été.

En conclusion, on peut dire que la poursuite solaire à axe de rotation orienté Nord-Sud, incliné à la latitude du lieu est une meilleure configuration par rapport à la poursuite solaire à axe de rotation horizontal orienté Nord-Sud, notamment pour la saison d'hiver, reste donc à prouver, dans ce travail; l'efficacité du nouveau système de poursuite solaire avec déplacement du foyer proposé.

Durant l'hiver, la hauteur du soleil est petite, ce que rend l'effet cosinus important, l'utilisation d'un système de poursuite solaire à un seul axe reste une solution adoptée dans les grands concentrateurs, malgré les pertes optiques que nous avons démontré par simulation, l'inclinaison du capteur ou le déplacement du foyer peut récupérer une parties de ces pertes.

Maintenant, on se pose la question concernant la poursuite solaire d'Est en Ouest, les pertes optiques dues à l'effet cosinus persistent elles dans cette configuration ou pas ?

2.6.3.2 Poursuite solaire à axe de rotation orienté Est-Ouest

Dans cette partie de simulation, nous allons procéder aux mêmes étapes suivies dans la partie précédente, mais cette fois-ci pour un système de poursuite solaire orienté Est-Ouest avec axe de rotation horizontal et un réflecteur incliné à 32° . Nous allons simuler le même concentrateur pendant deux heures différentes d'une même journée, en raison du changement journalier de l'effet cosinus.

Pour le premier cas nous avons choisi de simuler le comportement optique du concentrateur pendant une journée quelconque de l'année à $10h$ du matin voir *figure.2.35*.

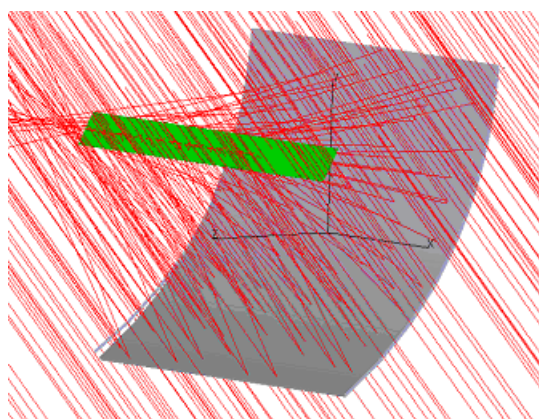


Fig. 2.35. Simulation du concentrateur cylindro-parabolique avec axe de rotation orienté Est-Ouest pour une journée quelconque à $10h$ du matin.

On constate qu'à 10h, l'effet cosinus est élevé, le foyer est presque partiellement couvert par les rayons solaires, le rayonnement concentré dans la zone couverte est de l'ordre de '30 kW/m²' mais l'énergie collectée par le système est faible *figure .2.36*.

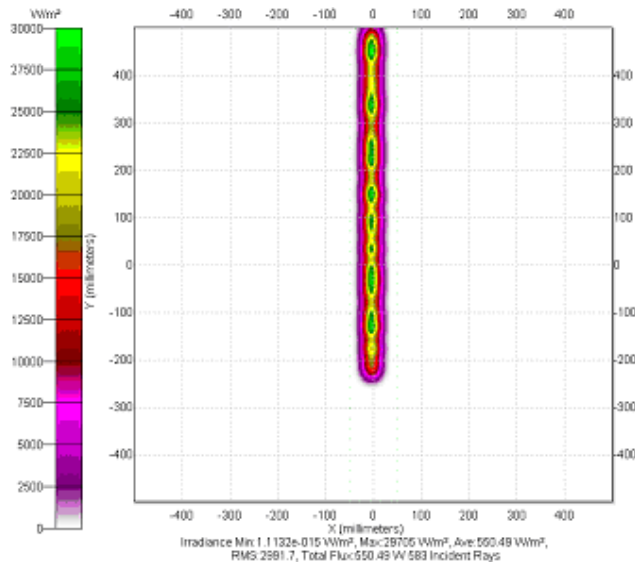


Fig. 2.36. Distribution du rayonnement concentré au niveau du foyer du concentrateur cylindro-parabolique avec axe de rotation orienté Est-Ouest pour une journée quelconque à 10h du matin.

Théoriquement, l'effet cosinus est très élevé au début de la journée (après le lever du soleil), cet effet diminue progressivement avec le temps, à midi il devient nul, *figure .2.37*.

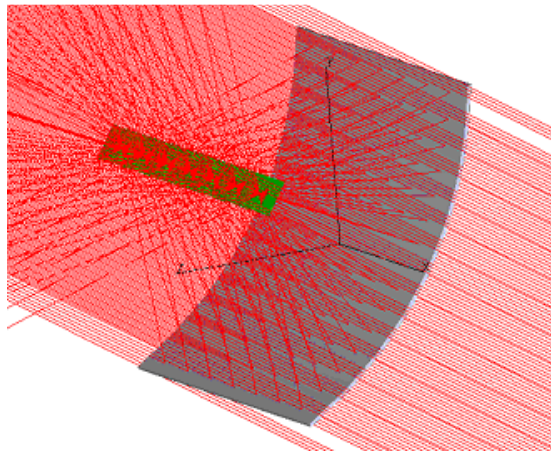


Fig. 2.37. Simulation du concentrateur cylindro-parabolique avec axe de rotation orienté Est-Ouest pour une journée à midi.

Dans ce cas, la concentration est parfaite, le foyer est couvert à 100%, le rayonnement au niveau du foyer est de '35 kW/m²' (*figure .2.38*). On remarque généralement que la poursuite solaire à un seul axe de rotation horizontale orienté Est-ouest est d'un rendement faible par rapport au premier type de poursuite.

Nous avons prouvé que la poursuite solaire à un seul axe de rotation orienté Nord-Sud est meilleure en terme de rendement, pratiquement ce type de poursuite est largement utilisé malgré les pertes optiques engendrées.

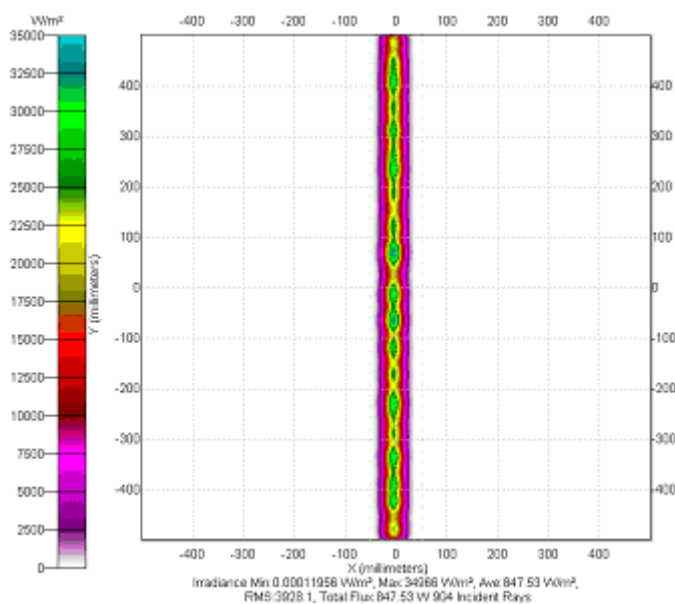


Fig. 2.38. Résultats de la concentration au niveau du foyer du concentrateur cylindro-parabolique avec axe de rotation orienté Est-Ouest pour une journée quelconque à midi.

2.7 Conclusion et Objectif de la Thèse

Dans ce chapitre nous avons donné la théorie du principe de concentration solaire où nous avons présenté le taux de concentration et le rayonnement concentré, après nous avons abordé la théorie des systèmes de poursuite solaire et nous avons donné des détails sur les différentes coordonnées du soleil et la base de calcul de sa position, suivi par un état de l'art des systèmes de poursuite solaire, nous avons aussi décrit une définition détaillée de l'effet cosinus suivi par une simulation optique du concentrateur cylindro-parabolique afin d'arriver à notre problématique.

Après avoir bien analysé l'influence de l'effet cosinus pour les différents cas de poursuite solaire dans les systèmes à concentration notamment les concentrateurs cylindro-paraboliques, l'effort de ce travail va se diriger vers la proposition d'un nouveau système de poursuite solaire optimal dans le but de minimiser les pertes optiques. Le système proposé incluant sa partie mécanique et commande sera réalisé et testé expérimentalement dans la Sud d'Algérie à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa.

Chapitre 3

Etude et réalisation d'un nouveau système de poursuite solaire

3.1 Introduction

En se basant sur l'étude théorique et la problématique détaillée dans le chapitre précédent, nous avons procédé à la phase de réalisation du système, commençant par les différentes parties et pièces du prototype du concentrateur cylindro-parabolique, suivi par la procédure d'assemblage et l'installation du dispositif.

La commande du système de poursuite solaire était notre grand soucis où nous avons fixé comme objectif d'avoir un système rentable et efficace, nous avons commencé par la carte électronique à base de microcontrôleur *PIC16F877*, ensuite nous nous sommes intéressés par le développement de la stratégie de communication entre le micro-ordinateur et la carte réalisée dans le but d'avoir une interface de commande souple entre le moteur du vérin électrique et le micro-ordinateur.

Une fois le prototype est réalisé avec le système de poursuite solaire et sa commande, nous avons procédé à l'installation de la chaîne d'acquisition de données, où nous avons utilisé les instruments de mesure suivants :

- 1- Thermocouple *Type K* pour mesurer la température à différents points du prototype (température d'entrée et de sortie).
- 2- Pyranomètre pour mesurer le rayonnement direct normal.
- 3- Station météorologique (mesure de la température ambiante etc..).
- 4- Unité d'acquisition de données de type *Agilent 34972A*.

Finalement nous avons réalisé un programme de gestion du prototype contenant la stratégie de la poursuite solaire, le système de collecte et de traitement de données ainsi que le contrôle du fonctionnement de tout l'ensemble.

3.2 Conception d'un prototype d'un concentrateur cylindro-parabolique avec un nouveau système de poursuite solaire

3.2.1 Conception mécanique du concentrateur cylindro-parabolique

En analysant la problématique de l'effet Cosinus dans les concentrateurs cylindro-paraboliques, nous avons trouvé que la solution la plus optimale consiste à déplacer l'absorbeur d'une distance bien déterminée à fin de coïncider exactement avec la ligne de concentration.

SolidWorks est un logiciel de conception assistée par microordinateur fonctionnant sous Windows, regroupant en un seul et même produit des outils de conception 3D, d'analyse, de simulation et de mise en plan. En utilisant le logiciel *SolidWorks* [71], nous avons fait la conception d'un prototype de '2 m²' de surface d'ouverture avec une longueur focale de '670 mm', le réflecteur est posé sur une structure porteuse d'une base de '1830 x 700 mm' de surface et d'une hauteur de '715.5 mm' (figure. 3.1), le support du réflecteur dispose de deux articulation une articulation fixe et une autre mobile afin d'assurer la variation de l'inclinaison du concentrateur, l'angle maximale d'inclinaison est de '32°', la variation d'inclinaison est assuré à l'aide d'une manivelle qui tourne une tige filetée, qui déplace à son tour un écrou fixé avec l'articulation mobile du concentrateur, le déplacement de cette dernière engendre le changement d'inclinaison du concentrateur. La nouveauté dans ce système de poursuite solaire, que nous avons proposée ; est le déplacement de l'absorbeur où nous avons utilisé une glissière pour la translation du foyer d'une façon manuel, le déplacement du foyer est compris dans un intervalle de '1 à 900 mm'.

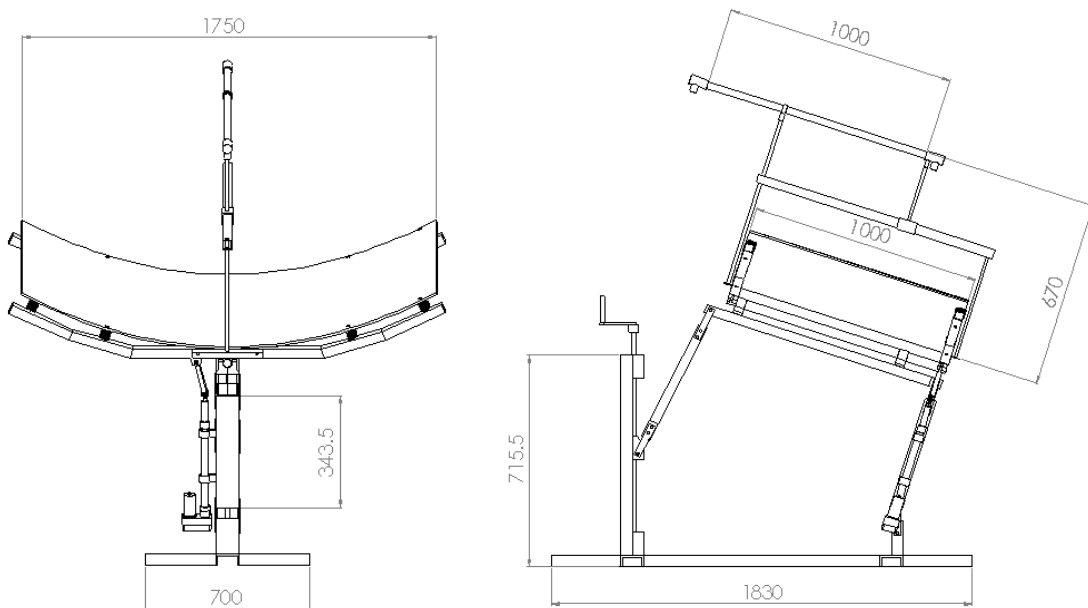


Fig.3.1. Plan détaillé du prototype proposé.

Le prototype du concentrateur cylindro-parabolique proposé muni d'un système de poursuite solaire automatique à un seul axe de rotation avec déplacement manuelle de l'absorbeur est illustré sur la *figure. 3.2*.

Pour assurer la poursuite solaire à un seul axe de rotation orienté Nord-Sud, nous avons utilisé un vérin électrique (5) qui assure l'orientation du réflecteur (4) de l'Est à l'Ouest d'une façon automatique comme le montre la *figure. 3.3*.

Une manivelle (1) est utilisée pour changer l'inclinaison du concentrateur d'une façon manuelle (*figure. 3.4*).

Pour le déplacement de l'absorbeur (2), nous avons utilisé un support d'absorbeur fixe et un autre support mobile posé sur une glissière (3), le déplacement est assuré manuellement (*figure. 3.5*). Nous avons fait le choix de ne pas automatiser le déplacement de l'absorbeur pour des raisons d'optimisation, car la variation de l'effet Cosinus par jour est minime de l'ordre de quelques millimètres, ce choix est spécifique à notre prototype ou au concentrateur d'une petite taille, donc si notre solution est adoptée dans une grande centrale, l'automatisation du déplacement de l'absorbeur est indispensable vue la taille et le nombre important de concentrateurs cylindro-paraboliques.

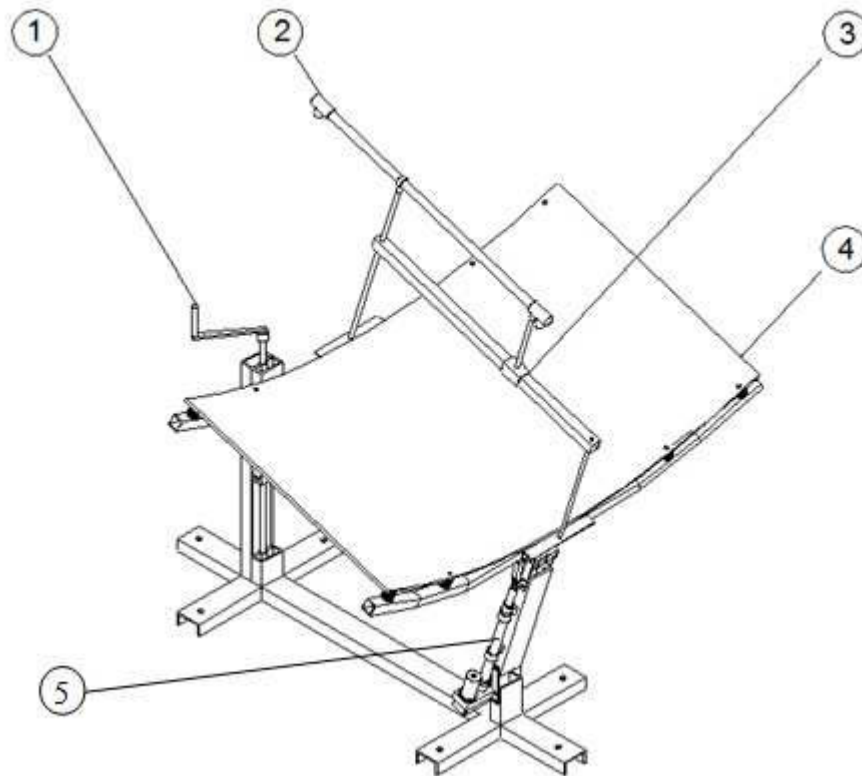


Fig.3.2. Schéma détaillé du prototype proposé.

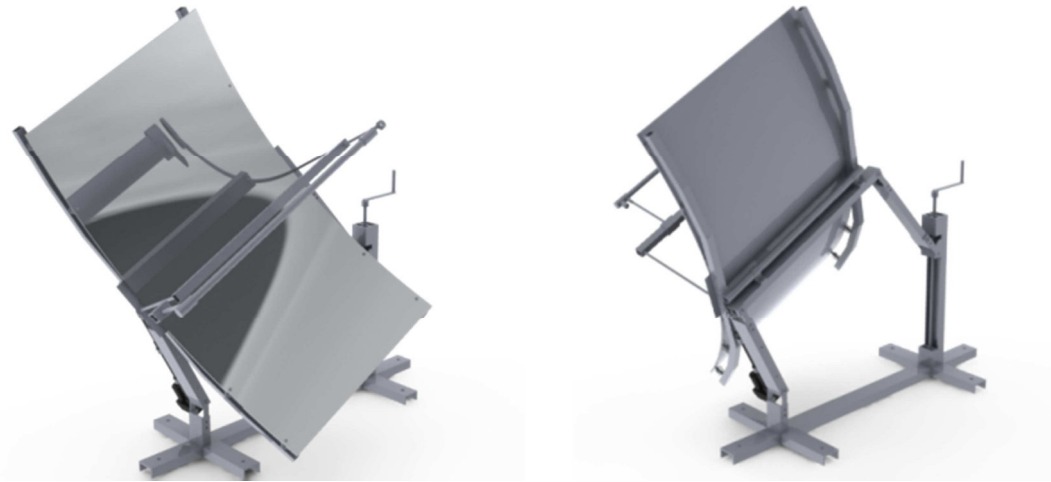


Fig.3.3. Orientation automatique du réflecteur de l'Est à l'Ouest.



Fig.3.4. Inclinaison manuelle du réflecteur.



Fig.3.5. Déplacement manuel de l'absorbeur.

3.2.2 Solution mécanique du système de poursuite solaire

Généralement la meilleure solution pour une poursuite solaire est l'utilisation des moteurs pas à pas, qui assurent une très grande précision et un freinage du système très rapide [60]. Dans notre prototype nous avons choisi un vérin électrique destiné aux antennes paraboliques, ce choix étant basé sur les critères suivants: la puissance, le fonctionnement en milieu hostile, moteur à courant continu, les butées de fin de course...etc.

Sur la *figure. 3.6* on donne les positions du concentrateur en fonction de l'état du vérin, nous avons deux solutions pour la fixation du vérin: la première solution consiste à avoir deux articulations pour la fixation du vérin, l'une au niveau du réflecteur et l'autre au niveau de la structure porteuse. Selon la position du vérin, nous avons les différentes orientations du collecteur qui sont illustrées sur le schéma de la *figure. 3.6*.

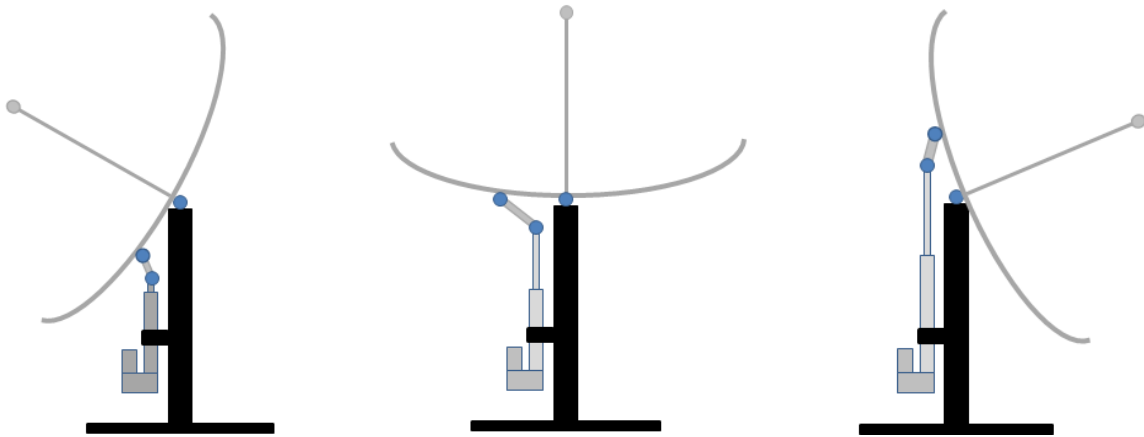


Fig.3.6. Positions du concentrateur en fonction de l'état du vérin.

La deuxième solution que nous avons adoptée est de fixer complètement la partie fixe de vérin et ajouter une bielle entre la partie mobile de vérin et le concentrateur afin de suivre l'angle de rotation du réflecteur. La *figure. 3.7* montre le parcours suivi par la bielle en fonction du déplacement de la partie mobile du vérin, cette solution a des avantages et des inconvénients, parmi ces avantages la réduction de vitesse et l'augmentation du couple motrice du système de poursuite solaire, et parmi ces inconvénients les jeux importants qui peuvent apparaître dans le système, dans ce cas il faut trouver des solutions pour les récupérer, les jeux influent sur la précision du système qui est un paramètre important pour le bon fonctionnement de l'ensemble.

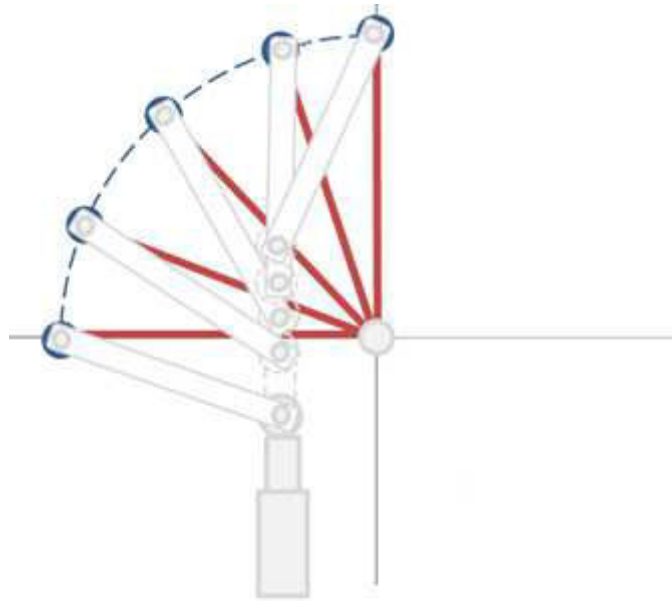


Fig.3.7. Mouvement de la bielle en fonction du vérin.

Le principe de fonctionnement du vérin (*figure.3.8*) est simple, le mouvement de rotation du moteur (1) est transmis à l'aide des engrenages (2) aux tiges filetées (3) qui transforment le mouvement de rotation en un mouvement de translation à l'aide de l'écrou (4) solidaire du tube (5). Pour inverser le sens des translations il suffit d'inverser le courant et cela en appliquant une tension inverse aux bornes du moteur.

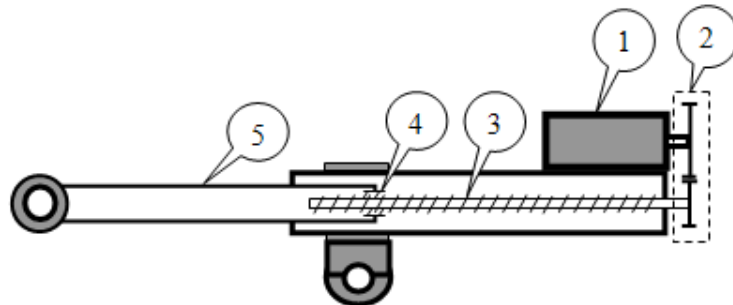


Fig.3.8. Schéma détaillé du vérin électrique.

3.2.3 Simulation du système proposé

3.2.3.1 Simulation optique

Avant d'entamer la phase de réalisation, nous avons simulé le prototype proposé pour s'assurer du bon fonctionnement de ce dernier, ainsi que la validation de la forme de la ligne de concentration obtenue avec le nouveau système de poursuite.

Pour la simulation optique nous avons utilisé le logiciel *TracePro7.0* [70]. Après avoir importé le fichier du prototype réalisé sous *SolidWorks* dans le logiciel *TracePro*, nous avons introduit les paramètres de position du soleil pour la région de Ghardaïa, en supposant que la

valeur du rayonnement solaire est de 1000 W/m^2 et la température ambiante est de 25°C . Nous avons introduit aussi les paramètres du réflecteur (nature du matériau et le taux de réflexion du réflecteur) ainsi que les paramètres de surface de l'absorbeur.

Nous avons montré précédemment que l'effet Cosinus atteint sa valeur maximale pendant la journée la plus courte de l'année. Donc nous avons simulé le prototype pour cette journée pour deux positions de l'absorbeur (*figure.3.9 et 3.10*). [13]

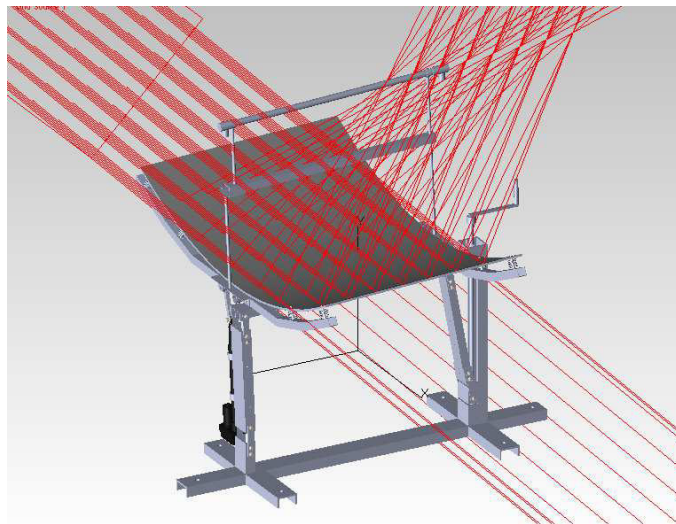


Fig.3.9. Illustration des rayons solaires concentrés au niveau de l'absorbeur pour la première position de l'absorbeur.

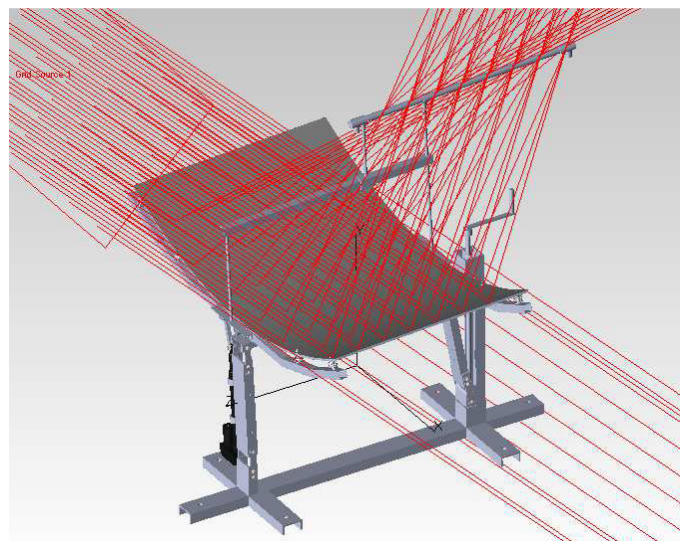


Fig.3.10. Illustration des rayons solaires concentrés au niveau de l'absorbeur pour la deuxième position de l'absorbeur.

Les résultats de la simulation montrent que la distribution des rayons solaires concentrés touche une petite partie de l'absorbeur, car l'effet cosinus est très élevé en cette période de

l'année (*figure .3.11*), ce qui augmente les pertes optiques considérablement. On peut très bien constater la différence quand-on déplace l'absorbeur. En effet, les rayons solaires concentrés touchent la totalité de l'absorbeur (*figure .3.12*).

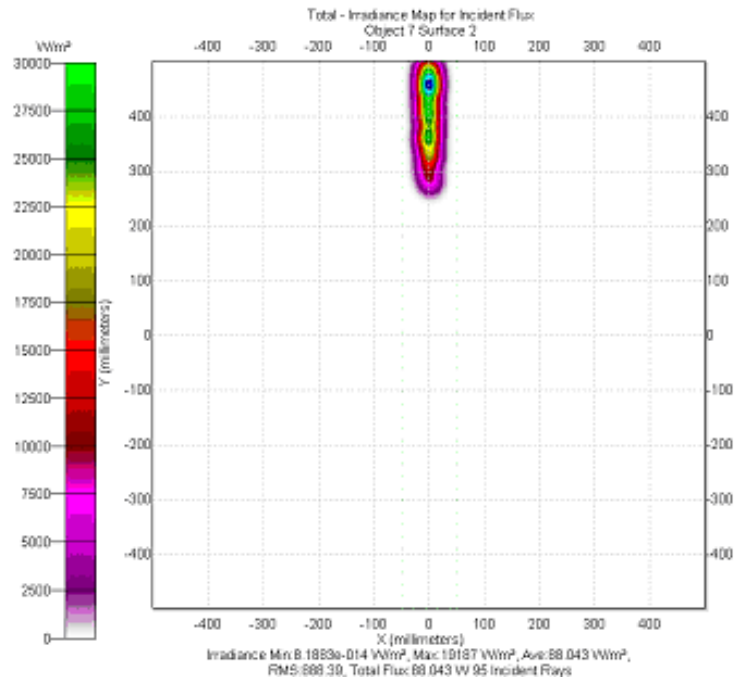


Fig.3.11. Distribution des rayons solaire concentrée au niveau du foyer (sans déplacement de l'absorbeur) pour la journée la plus courte de l'année.

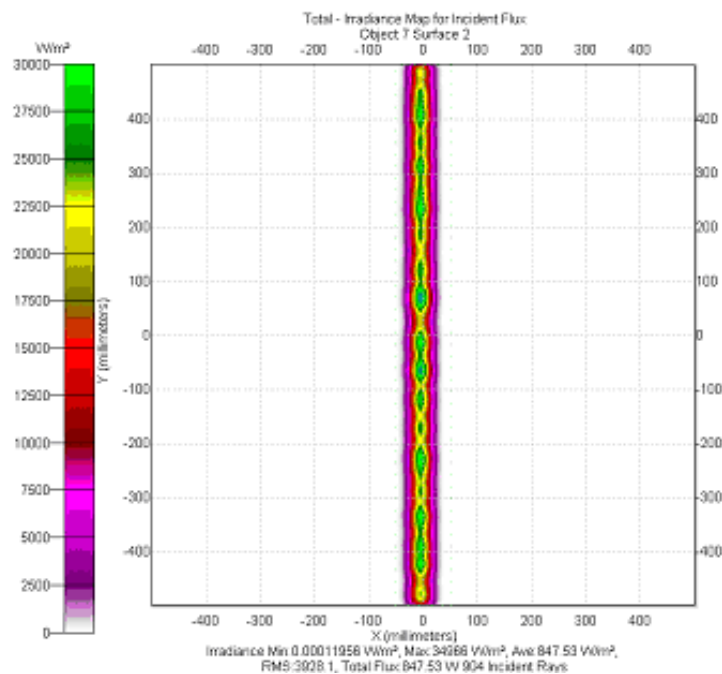


Fig.3.12. Distribution des rayons solaire concentrée au niveau du foyer (avec déplacement de l'absorbeur) pour la journée la plus courte de l'année.

3.2.3.2 Simulation thermique

Pour la simulation des performances thermiques, nous avons fait une comparaison entre un concentrateur cylindro-parabolique avec poursuite solaire à un seul axe et un deuxième avec poursuite à deux axes et un troisième avec déplacement du réflecteur (le nôtre). A cet effet nous avons utilisé le logiciel *Trnsys 16.1* [73]. Le système objet de la simulation est constitué d'un concentrateur cylindro-parabolique lié à une pompe à faible débit de l'ordre de 50 Kg/hr et une cuve de stockage de 300 Litres qui contient un échangeur de chaleur voir (*figure .3.13*). La simulation est réalisée pour le site de Ghardaïa le Sud de l'Algérie, pendant la journée la plus courte de l'année (*21 Décembre*). Pour les trois cas de simulation, la puissance utile et le rendement du concentrateur sont calculés. [74]

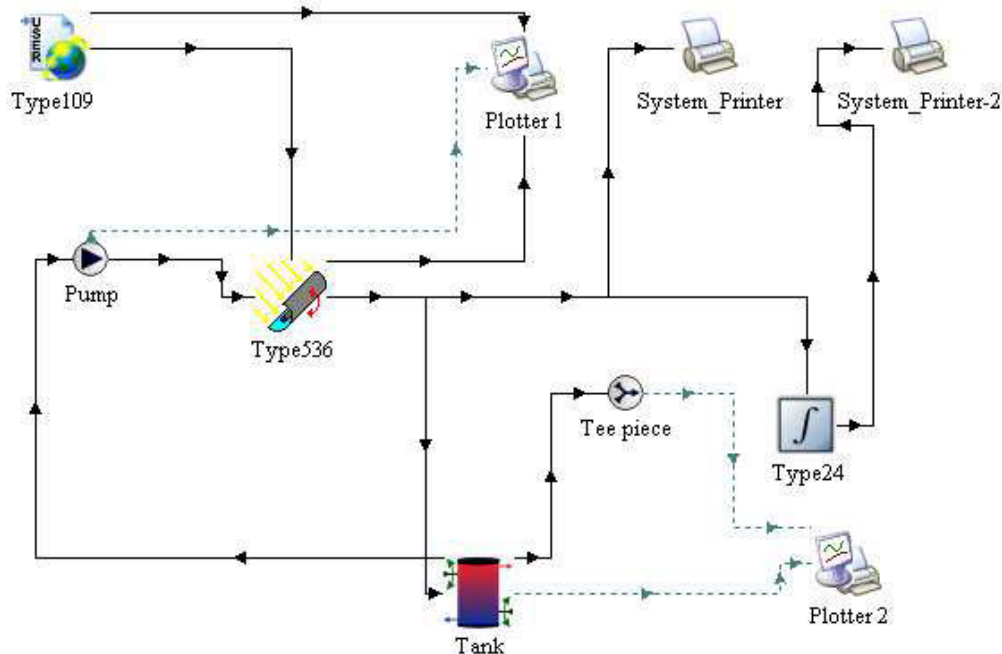


Fig.3.13. Modèle de simulation *Trnsys* pour le système proposé.

Les résultats de la simulation montrent que le rendement du nouveau système de poursuite solaire (avec déplacement de l'absorbeur) est considéré comme intermédiaire entre les deux types de poursuite solaire à un seul et deux axes (*figure .3.14*). Notre nouveau système de poursuite est meilleur que le système de poursuite à un seul axe de rotation et il se rapproche de la poursuite intégrale (à deux axes) pendant la période hivernal (*figure .3.15*), sachant que dans le cas de la poursuite intégrale il ne faut pas omettre la complexité de construction du système mécanique et la consommation des deux moteurs.

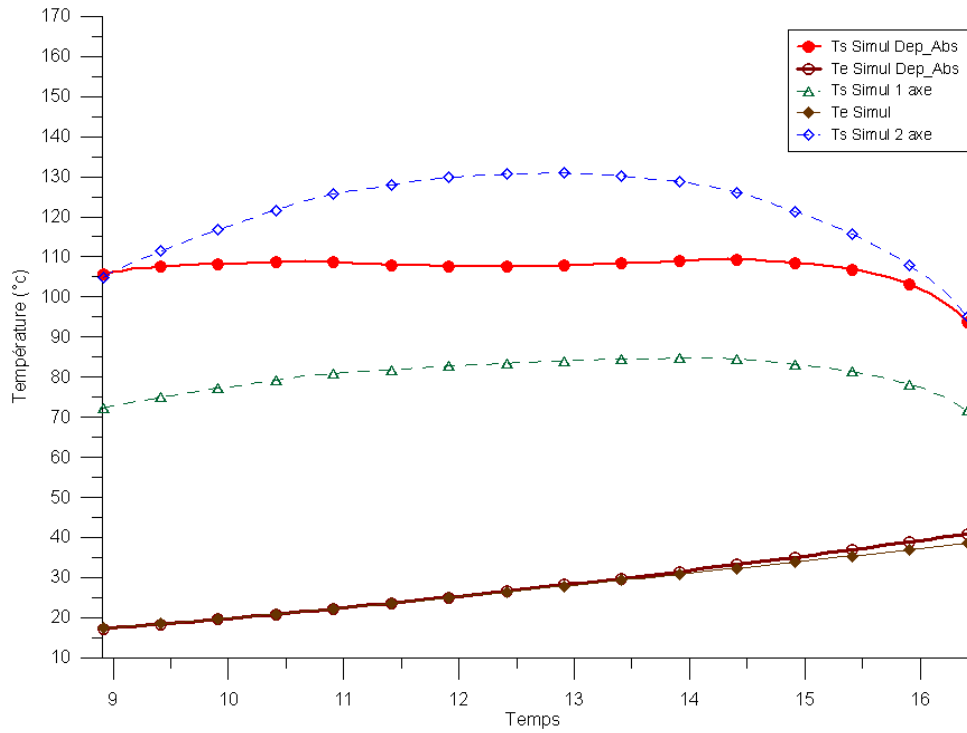


Fig.3.14. Températures d'entrée et de sortie des trois types de poursuite solaire.

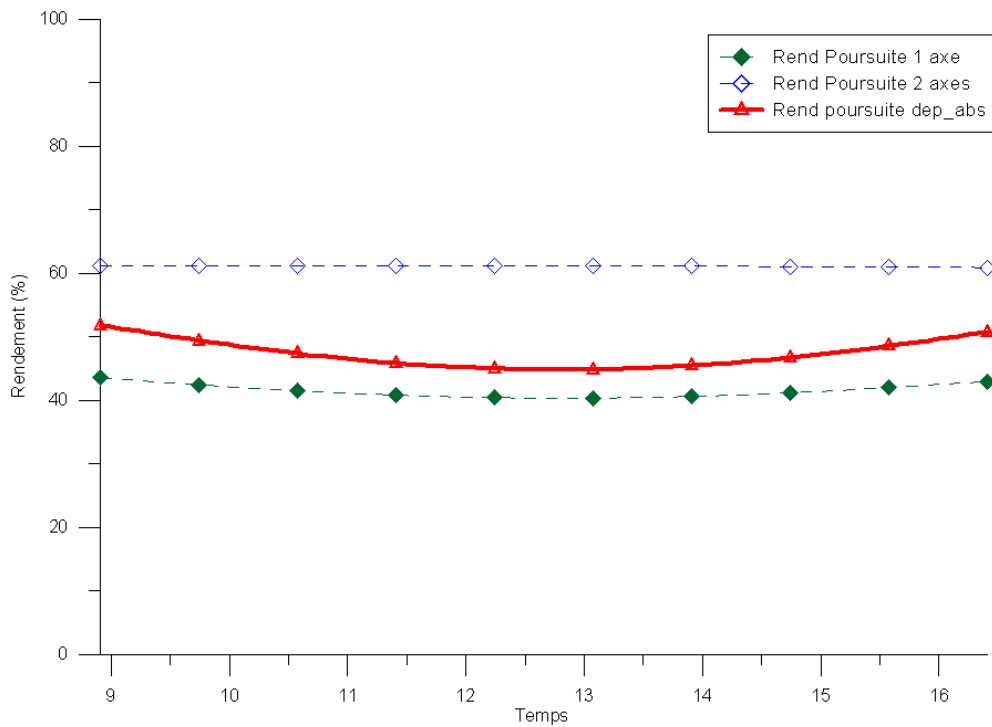


Fig.3.15. Rendement des trois types de poursuite solaire.

3.3 Réalisation de la partie mécanique

3.3.1 Structure porteuse du prototype de concentrateur cylindro-parabolique

D'après l'étude théorique, nous allons réaliser un prototype d'un concentrateur cylindro-parabolique d'une surface d'ouverture de '2 m²' avec deux degrés de liberté. Nous avons choisi d'utiliser un tube comme axe de rotation du réflecteur, et une manivelle pour changer l'inclinaison du réflecteur. La manivelle est associée à une tige filetée qui fait déplacer un chariot qui porte le support du réflecteur, une fois la manivelle tourne, le chariot se déplace et traîne le support pour changer l'inclinaison du réflecteur (*figure .3.16*).



Fig.3.16. Manivelle de variation d'inclinaison du réflecteur.

3.3.2 Réflecteur du prototype de concentrateur cylindro-parabolique

Dans les concentrateurs cylindro-paraboliques, le réflecteur est constitué d'un grand miroir parabolique. Habituellement, la fabrication de ces réflecteurs est réalisée dans des usines contenant des technologies très avancées. Pour notre prototype, nous avons utilisé, en premier lieu; une tôle réfléchissante en Aluminium, et nous avons remarqué, qu'après une année de fonctionnement; la tôle utilisée était complètement dégradée et son facteur de réflexion a chuté de plus de 60%.

La meilleure solution pour remédier à ce problème consiste à l'utilisation de plusieurs lames de miroirs placés les unes à côté des autres sur un support de forme parabolique. Nous avons essayé de comprendre la différence entre les lames de miroir concentrateur et le réflecteur d'un concentrateur parabolique ordinaire. [74]

Pour cette raison nous avons élaboré une simulation optique et thermique des deux types de concentrateurs. Pour la simulation optique, nous avons utilisé le logiciels *TracePro* [70], où nous avons supposé que les concentrateurs sont orientés directement vers le soleil et la valeur de rayonnement est de 1000 W/m^2 . Pour la simulation thermique, nous avons utilisé le logiciel *Trnsys* [73], et nous avons simulé les deux concentrateurs tout au long de l'année dans la région de Ghardaïa en Algérie. Les résultats ont montré qu'il existe une différence entre les deux types de concentrateurs en raison de la déformation de la ligne de concentration, qui provoque une diminution du facteur de concentration et par la suite une diminution de l'énergie utile capturée.

Tout d'abord, on conçoit deux concentrateurs identiques à ' 2 m^2 ' de surface d'ouverture et de ' 0.8 m ' de longueur focale, en utilisant le logiciel *SolidWorks* [71], le premier concentrateur est composé uniquement de miroir parabolique et le seconde est constitué de plusieurs miroirs disposés d'une manière à donner la forme parabolique voir '*figure .3.17*' et '*figure .3.18*'. Nous supposons que l'absorbeur a une forme plate, afin de faciliter la présentation de la distribution des rayons solaires concentrés.

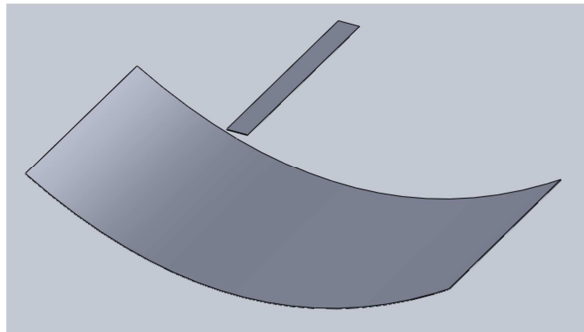


Fig.3.17. Capteur cylindro-parabolique à réflecteur ordinaire.

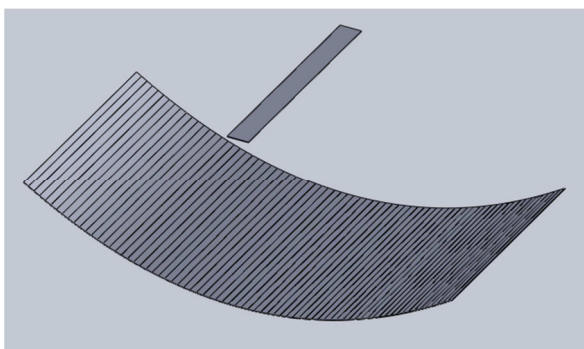


Fig.3.18. Capteur cylindro-parabolique à réflecteur composé des lames de miroirs.

Après avoir introduit les différents paramètres dans le logiciel de simulation optique, nous avons lancé la simulation et nous avons constaté une différence entre les deux concentrateurs au

niveau de la ligne de concentration dans l'absorbeur voir 'figure .3.19'. La simulation permet bien de déduire le coefficient de concentration et la valeur de rayonnement concentré.

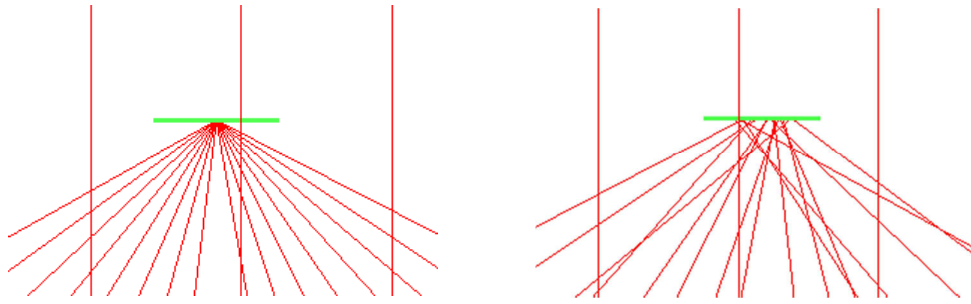


Fig.3.19. Illustration de la forme des rayons concentrés dans les deux types de concentrateurs.

Nous notons que les rayons concentrés dans le concentrateur ordinaires se présente d'une manière parfaite et uniforme, mais pour le deuxième concentrateur nous voyons une distribution non uniforme de rayons concentrés en raison de la limite entre les lames de miroirs adjacentes, cette non-uniformité des rayons concentrés affecte et réduit le facteur de concentration. Pour le concentrateur ordinaire, nous avons ' $C = 50$ ' voir 'figure .3.20', et dans le second concentrateur le facteur de concentration a diminué ' $C = 36$ ' voir 'figure .3.21'. Il est clair que les performances optiques du second concentrateur ont baissé, en raison de la non-uniformité de la ligne de concentration. Il faut surtout noter que tous les rayons solaires reçus par le réflecteur ont été concentrés sur l'absorbeur, mais avec une ligne de concentration large, ce qui provoque la diminution du facteur de concentration.

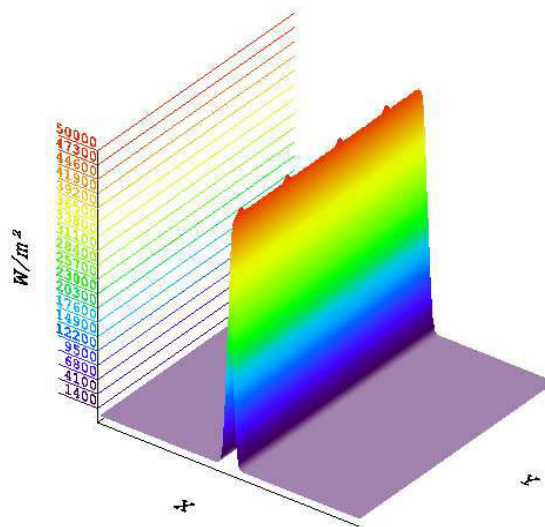


Fig.3.20. Distribution des rayons solaires concentrés au niveau du foyer du concentrateur cylindro- parabolique avec réflecteur ordinaire.

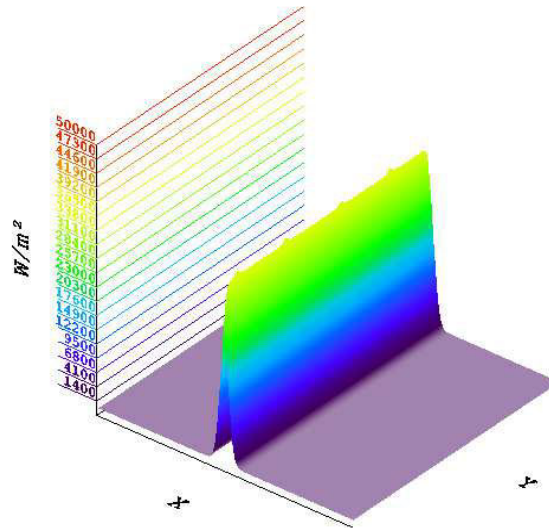


Fig.3.21. Distribution des rayons solaires concentrés au niveau du foyer du concentrateur cylindro- parabolique avec réflecteur composé des lames de miroirs.

Pour déduire l'efficacité thermique des deux types de concentrateurs, nous utilisons le logiciel *Trnsys* [73]. Le modèle *Trnsys* est composé de : 'type 109-utilisateur' pour introduire les données météorologiques expérimentales de Ghardaïa, connecté à un concentrateur cylindro-parabolique basé sur le modèle d'équations de *Duffie et Beckman* [26], le concentrateur cylindro-parabolique est configuré avec un système de poursuite solaire, relié à un réservoir d'eau de '300 Litres' équipée d'un échangeur de chaleur relié à une pompe, les résultats sont affichés et enregistrés par 'System_Printer-2' Voir 'figure .3.22'. Nous faisons la simulation du premier concentrateur (ordinaire) durant toute l'année et nous obtenons l'énergie utile par mois, ensuite nous répétons la même chose pour le deuxième concentrateur (lames de miroir). En fin nous comparons les résultats et on calcule l'efficacité de chaque concentrateur à part.

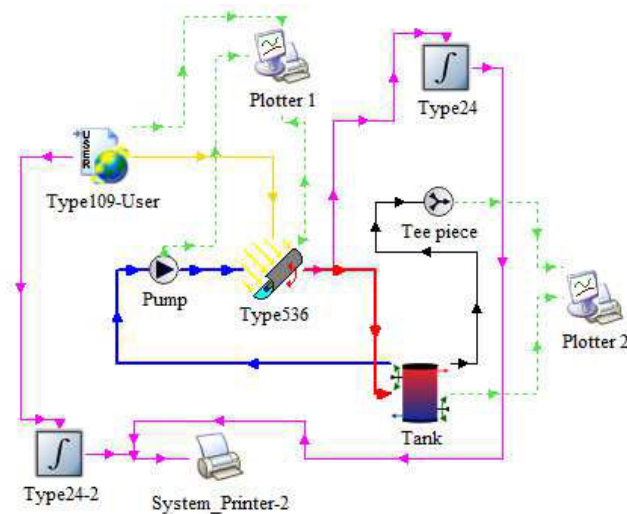


Fig.3.22. Modèle *Trnsys* de simulation thermique utilisé pour les deux types de concentrateurs cylindro-paraboliques.

La simulation thermique montre une grande différence entre concentrateur aux lames de miroirs et le concentrateur ordinaire voir ' *figure .3.23*'. Nous pouvons dire que la différence entre les deux concentrateurs est presque régulière durant l'année, avec une exception en été, puisque, dans cette saison ; le rayonnement et la hauteur du soleil sont importants. Nous concluons que l'utilisation des concentrateurs cylindro-paraboliques avec réflecteur composé des lames de miroirs réduit l'efficacité thermique du système.

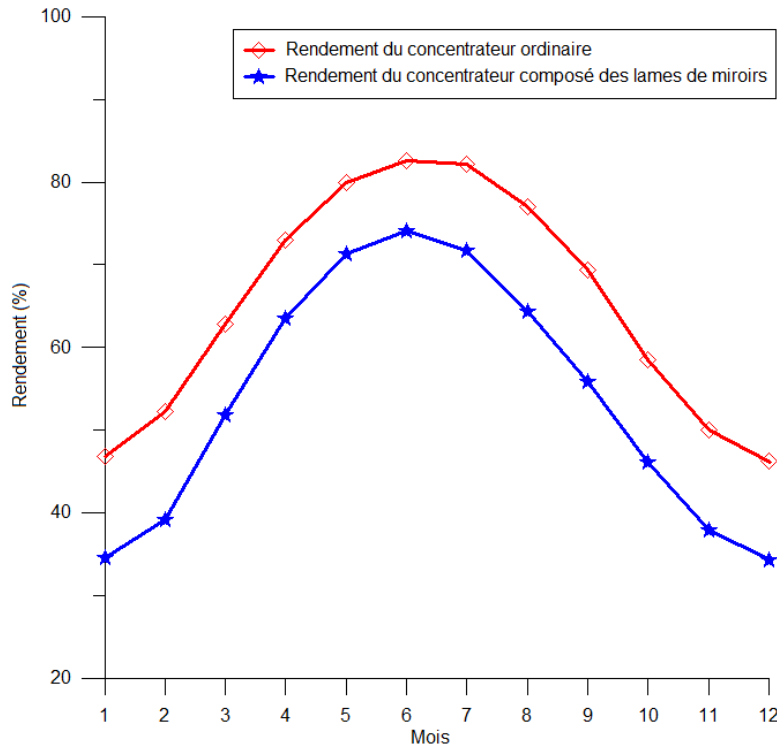


Fig.3.23. Résultats de simulation thermique utilisant *Trnsys* des deux types de concentrateurs cylindro-paraboliques.

L'utilisation des lames de miroirs pour la réalisation d'un concentrateur cylindro-parabolique semble très facile et flexible, la major attention doit être portée à la minimisation des erreurs de forme durant la réalisation de la forme parabolique du réflecteur. L'utilisation des lames de miroirs facilite l'étalonnage de la forme parabolique et aide à récupérer toutes les erreurs de fabrication du réflecteur. Malgré les résultats de l'étude comparative qui conduit à une grande différence entre un concentrateur ordinaire et un concentrateur à base de lames de miroirs, les lames de miroirs restent la meilleure solution pour la réalisation des prototypes de concentrateurs cylindro-paraboliques. Pour notre prototype, nous avons adopté cette solution (lames de miroirs) et pour minimiser les pertes optiques causées par la forme du réflecteur parabolique, nous suggérons d'augmenter le diamètre de l'absorbeur afin de capter un maximum de rayons concentrés.

3.3.3 Absorbeur du concentrateur cylindro-parabolique

L'absorbeur est l'organe le plus important dans un concentrateur cylindro-parabolique car c'est lui qui assure la collecte et la conversion des rayons solaires en chaleur. Généralement dans un concentrateur cylindro-parabolique réel, l'absorbeur est constitué d'un tube fabriqué avec un matériau caractérisé par une meilleure conductivité thermique, ce premier tube est mis dans un autre tube sous vide en verre afin d'éliminer les pertes thermiques par convection et augmenter le rendement thermique par l'effet de serre. Pour notre prototype, nous avons utilisé un tube en cuivre ordinaire d'un diamètre de '20 mm', épaisseur de '2 mm' et d'une longueur de '1 m'. On aurait aimé utiliser un couvert en verre pour le tube en cuivre mais la disponibilité de ce matériau dans le marché local causé un grand problème, c'est pourquoi on s'est contenté de l'utilisation d'un tube en cuivre sans couvert. Il faudra noter, que dans notre cas ; l'influence de l'absence du couvert sur le rendement thermique de système est minime vu la taille petite de l'absorbeur.

L'absorbeur doit être lié au circuit par deux tubes flexibles et doit comporter deux sondes de thermocouples pour la mesure des températures d'entrée et de sortie, pour cela nous avons utilisé deux T droits. La nouveauté que nous avons apporté dans ce système mécanique de poursuite solaire est le déplacement de l'absorbeur suivant une glissière utilisée à cette effet voir (*figure. 3.24*).

Le circuit du fluide caloporteur est installé sur la structure porteuse du prototype (partie fixe), l'absorbeur fait partie du circuit du fluide caloporteur mais il est mobile. Pour relier les deux parties du circuit, on utilise généralement deux solutions: la première consiste à l'utilisation d'une articulation (c'est la solution soutenu dans les centrales thermiques à concentrateurs), cette solution exige de très bonne étanchéité au niveau de l'articulation. Pour notre prototype, nous avons adopté la deuxième solution qui est l'utilisation des tuyaux flexibles quand utilisent souvent dans les chaudières, cette manière de raccordement semble meilleur du point de vu disponibilité, économie et rentabilité.



Fig.3.24. L'absorbeur du prototype du concentrateur cylindro-parabolique réalisé.

3.3.4 Circuit du fluide caloporteur

Le rendement de n'importe quel système de conversion est égal à la fraction de l'énergie reçue sur l'énergie convertie. Pour calculer l'énergie convertie dans un concentrateur cylindro-parabolique, il faut connaître la température d'entrée et de sortie du fluide caloporteur, à condition d'évacuer l'énergie collectée d'une façon permanente. A cet effet, nous avons utilisé un radiateur qui comporte '15 m' de tube en cuivre formé en serpentin et équipé des ailettes pour augmenter la surface d'échange, le radiateur est placé devant un ventilateur électrique (*figure. 3.25*). Le radiateur est lié à une pompe de circulation à faible débit, l'entrée et la sortie de la pompe sont liées à un robinet qui assure le contrôle du débit fourni. Un débitmètre est utilisé pour la lecture directe du débit de circulation du fluide caloporteur dans le circuit.



Fig.3.25. Vue du circuit du fluide caloporteur.

L'entrée du radiateur et la sortie de la pompe sont liés aux extrémités de l'absorbeur à l'aide des tubes flexibles. Contrairement aux chauffe-eau solaires, les concentrateurs cylindro-paraboliques ne comportent pas de système de régulation de la température, la pompe fonction d'une manière permanente. Généralement, on utilise des huiles de synthèses comme fluide caloporteur dans les concentrateurs solaires cylindro-paraboliques, pour notre cas, toujours à cause du problème de disponibilité ; nous avons utilisé de l'eau comme fluide caloporteur. Pour les températures au-dessus de 100°C l'évaporation du fluide est atteinte provoquant des détentes et de ce fait des chutes brusques des températures et de pression, pour cela ; nous avons bien renforcé l'étanchéité de l'absorbeur. Ce phénomène dure quelques secondes, et l'état normal de fonctionnement est repris, le rendement moyen du système n'est pas vraiment touché.

3.3.5 Dispositif mécanique de poursuite solaire

Le système mécanique de poursuite solaire de notre prototype est composé d'un vérin électrique ($12V\ CC$), qui fait tourner la partie mobile du prototype par rapport à sa partie fixe. La forme mécanique de la structure porteuse exige la fixation de la partie fixe du vérin la dessus,

pour cela nous avons utilisé une bielle qui assure la transmission du mouvement du vérin au réflecteur, ce dernier réalise la poursuite solaire autour d'un axe de rotation fixé sur la structure porteuse, voir (*figure. 3.26*).

La solution adoptée comporte un inconvénient gênant, qui est les jeux entre articulations, ce qui influe sur la précision du système mécanique de poursuite solaire. C'est pourquoi, nous avons utilisé pour chaque articulation plusieurs rondelles dans le but de récupérer les jeux et augmenter la précision du système.



Fig.3.26. Vue du système mécanique de poursuite solaire.

Après la réalisation, l'installation, l'étalonnage et mise en service, nous avons obtenu un nouveau prototype d'un concentrateur cylindro-parabolique avec un système de poursuite solaire, voir *figure. 3.27*.



Fig.3.27. Vue du nouveau prototype réalisé.

3.4 Réalisation de la partie électronique

3.4.1 Cartes électroniques

Pour un suivi du soleil permanent, précis et efficace, nous avons choisi d'utiliser un micro-ordinateur puisqu'il offre plusieurs fonctionnalités, qui nous permettent de créer un système de contrôle efficace avec une interface graphique. Les interfaces de communication utilisées sont : le port série pour l'acquisition des données et le port parallèle pour la commande du système. Pour cela, nous avons conçu deux cartes électroniques connectées entre elles (*figure.3.28*). La première pour la commande basée sur un microcontrôleur *PIC 16F877A* dont le Schéma électronique est illustré sur la *figure.3.29*, et la seconde de puissance contient des relais qui contrôlent chacun des éléments suivants: Vérin, pompe et ventilation du radiateur. Pour assurer un contrôle automatique du système de suivi du soleil, nous avons programmé une stratégie de poursuite solaire sur la base de la valeur de tension du détecteur de la position du soleil. Tous les problèmes et les erreurs intervenants lors du fonctionnement tels que les obstacles, nuages, dysfonctionnements etc..., sont gérés par le programme réalisé.

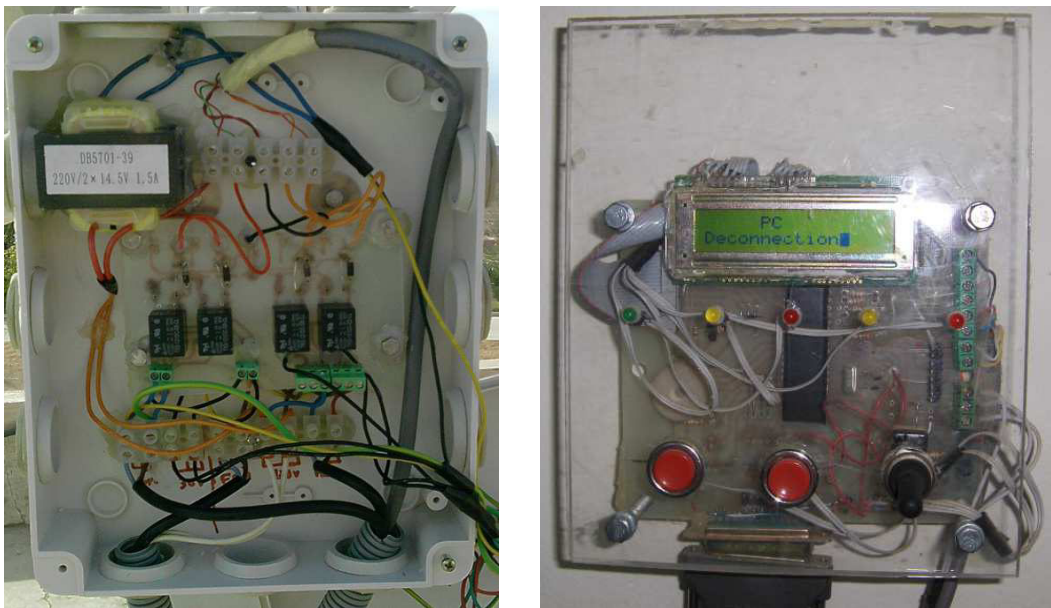
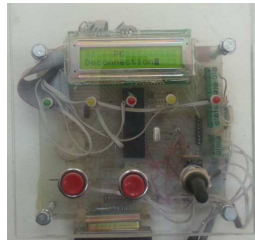

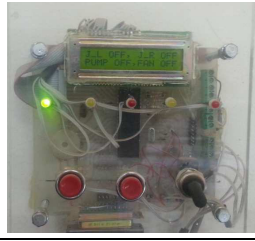
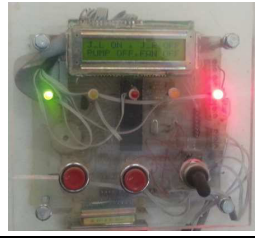

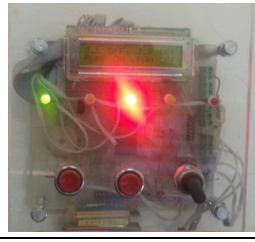
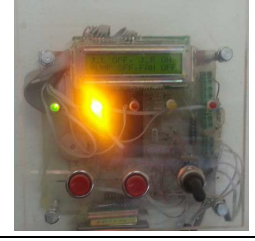


Fig.3.28. Vue des deux cartes électroniques réalisées.

Afin de faciliter et de superviser le contrôle du fonctionnement de la carte électronique réalisée, deux genres de moyen de contrôle sont utilisés, le premier c'est des *LEDs* lumineuses et le deuxième c'est un afficheur *LCD*. Les deux systèmes signalent le statut (l'état) instantané global du prototype avec son système de poursuite solaire. Sur le tableau suivant on donne les différents états possibles de la carte électronique réalisée pendant son fonctionnement.

Table.3.1. États possible de la carte électronique durant le fonctionnement du prototype.

<p>Message 'PC Déconnexion' en cas de : soit déconnection du câble du port parallèle ou l'arrêt du micro-ordinateur.</p>	
<p>Affichage du message 'PC Connexion' pendant quelques secondes, en affirmant la connexion avec le micro-ordinateur.</p>	
<p>Affichage des statuts des différents dispositifs du système en mode Off.</p>	
<p>En cas d'actionnement du vérin vers la gauche, on aura l'affichage du message 'J_L ON'.</p>	
<p>En cas d'actionnement du ventilateur du radiateur, nous avons l'affichage du message 'FAN_ON'</p>	
<p>En cas d'actionnement de la pompe de circulation, le message suivant 'PUMP_ON' apparaît.</p>	
<p>En cas d'actionnement du vérin vers la droite, le message 'J_R ON' est affichée.</p>	

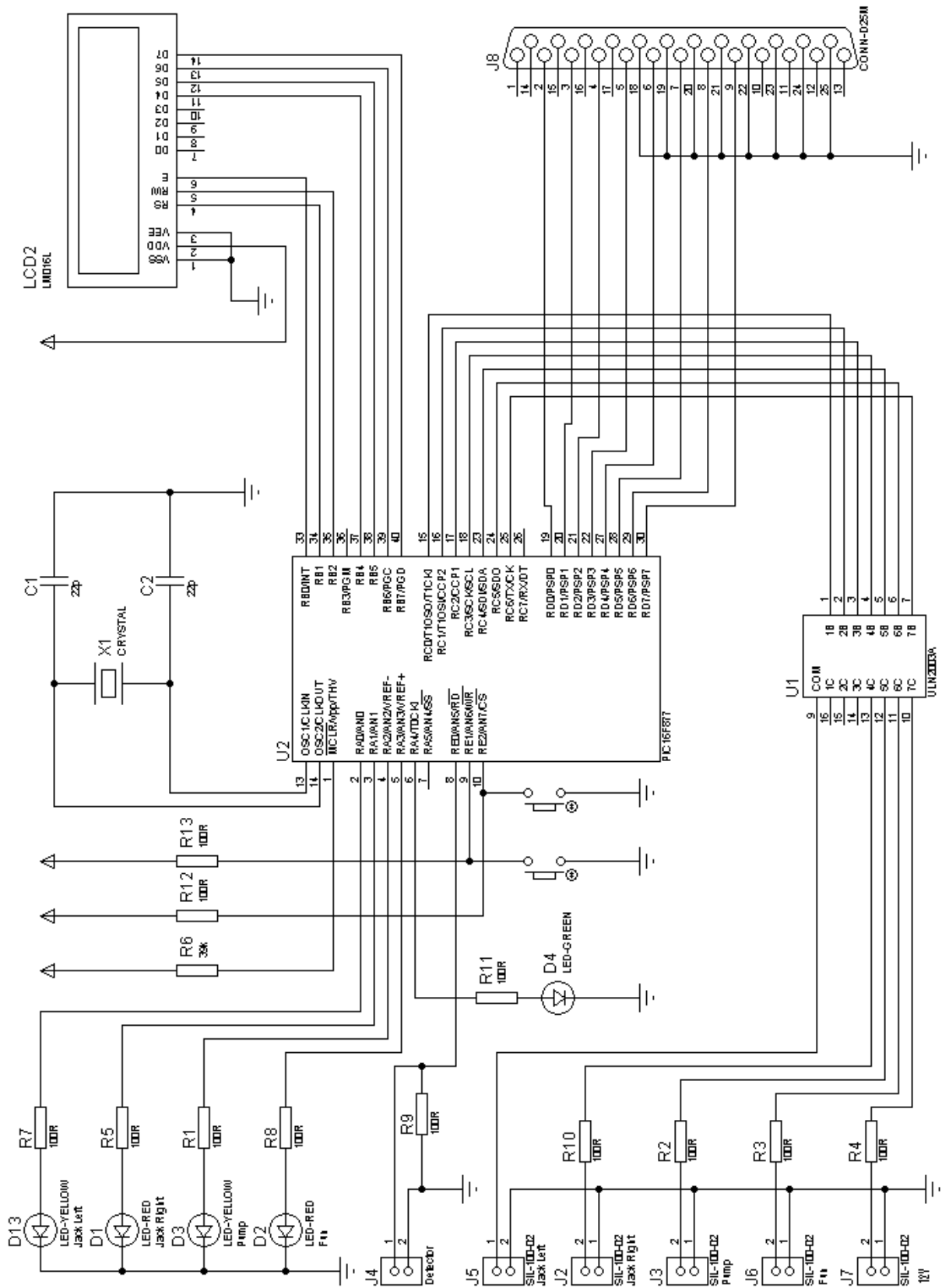


Fig.3.29. Schéma électronique de la carte à base de microcontrôleur PIC.

3.4.2 Organigramme de communication PIC/PC

Le programme de gestion du prototype implémenté dans le *PIC 16F877A* est basé sur l'organigramme suivant *figure.3.30*:

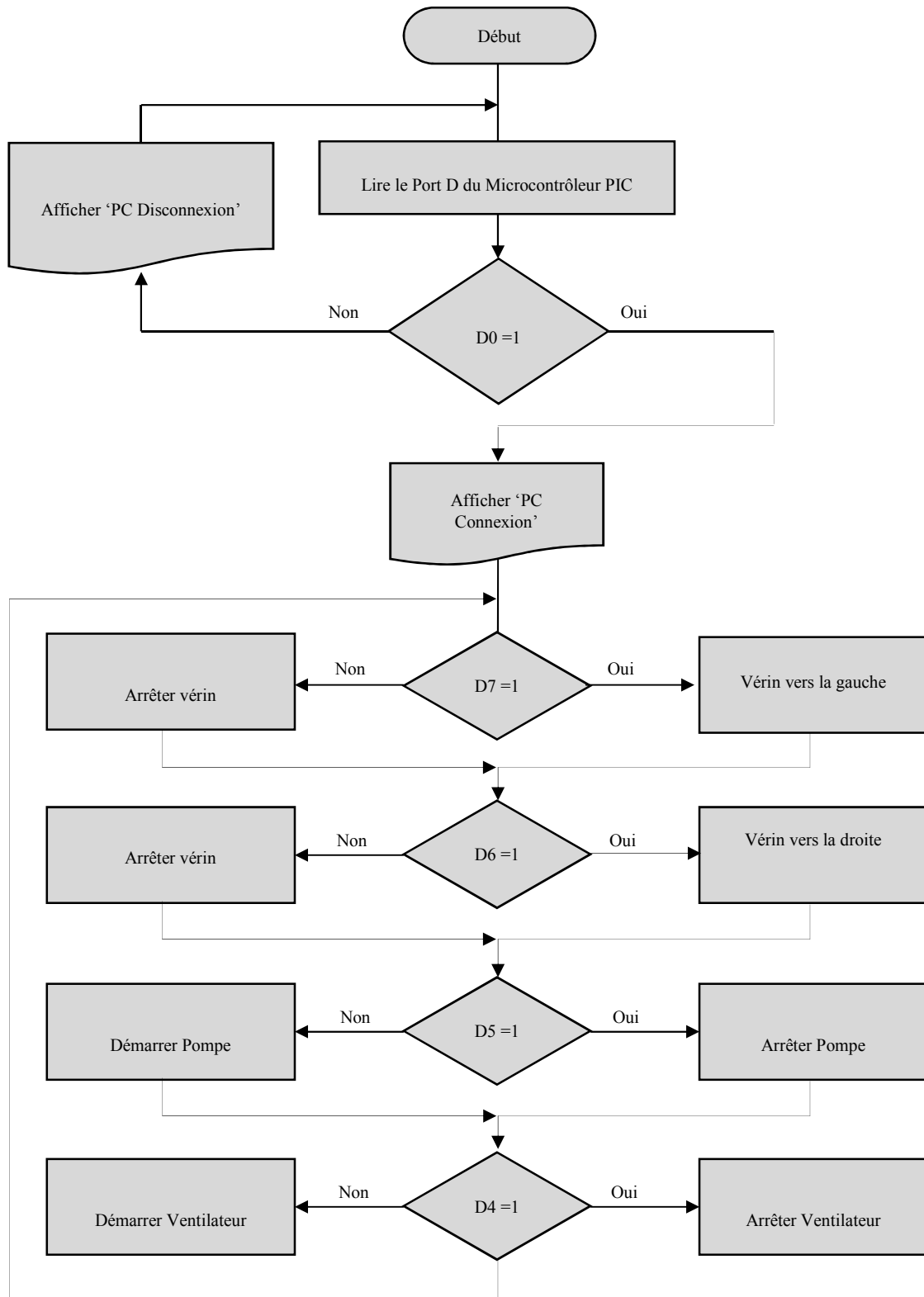


Fig.3.30. Organigramme général du programme implémenté dans le microcontrôleur PIC.

3.4.3 Détecteur de position du soleil

3.4.3.1 Conception d'un détecteur de position du soleil

Dans les systèmes de poursuite solaire sensibles, on trouve généralement de nombreux types de détecteur de la position du soleil. Pour notre système de poursuite, nous avons proposé un nouveau dispositif optimal qui détecte la position du soleil avec précision et efficacité quelque soit la position initiale du collecteur et les conditions climatiques de la journée considérée. [75]

Le détecteur de position du soleil proposé (*figure .3.31*) est constitué d'une plaque principale verticale (1), sur chaque côté de la plaque nous avons fixé une *LDR* (4) avec deux plaques latérales inclinées (2) utilisées afin d'éliminer le rayonnement solaire diffus qui perturbe le fonctionnement du détecteur. Une autre plaque horizontale (3) est fixée à la partie supérieure de la plaque principale pour fournir de l'ombre sur les deux *LDR* lorsque le détecteur est orienté vers le soleil [75].

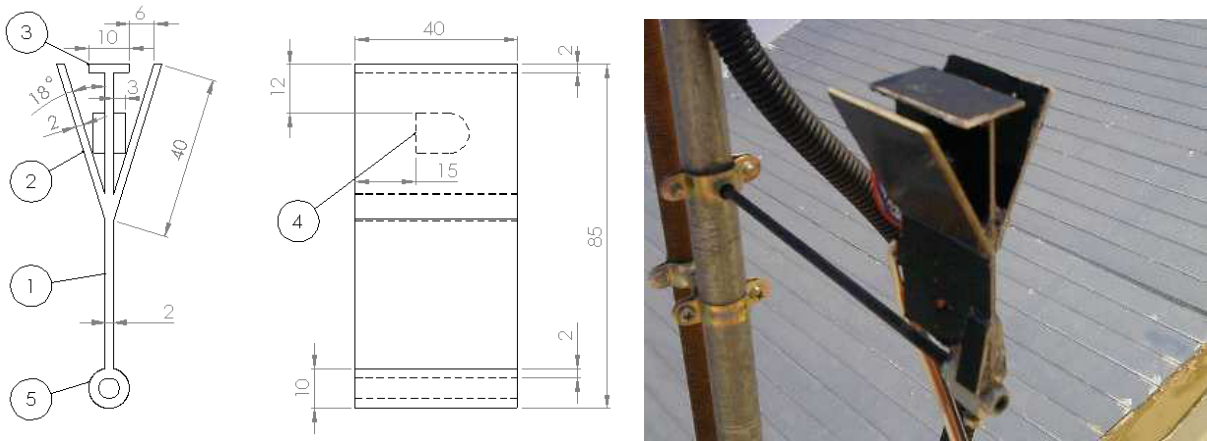


Fig.3.31. Nouveau détecteur de la position du soleil réalisé.

Pour que le micro-ordinateur reconnaisse la position exacte du soleil à partir des deux *LDRs*, nous avons utilisé un diviseur de tension (*figure .3.32*); chaque partie du circuit comporte une *LDR* et une résistance de protection. Lorsque le détecteur du soleil est bien orienté vers le soleil, les deux *LDRs* seront tous les deux à l'ombre, et elles reçoivent la même quantité de lumière, la valeur de leurs résistances seront donc identiques, ainsi la tension aux bornes des deux branches sera divisée par deux. En cas où le détecteur n'est pas orienté vers le soleil, c'est-à-dire une des *LDR* est à l'ombre et l'autre est exposée à la lumière (*figure .3.33*), la valeur des résistances sera différente entre les deux branches du diviseur et la tension (V_0) entre les *LDRs* doit être inférieure ou supérieure à la moitié de la tension totale (V). En exploitant cette différence le système peut facilement reconnaître sa position par rapport à la position du soleil.

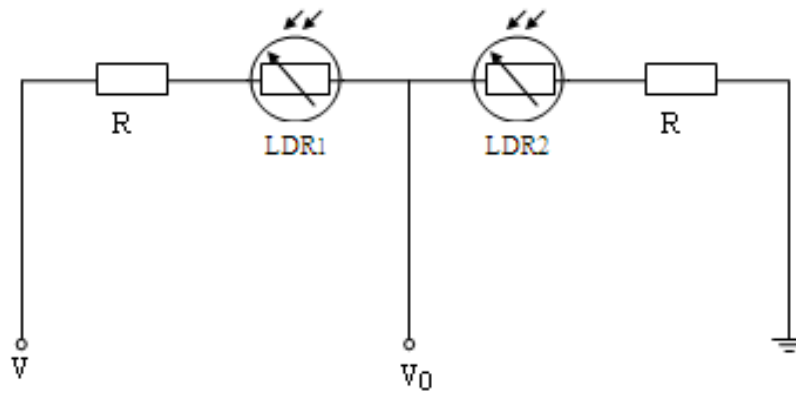


Fig.3.32. Schéma électronique du détecteur du soleil réalisé.

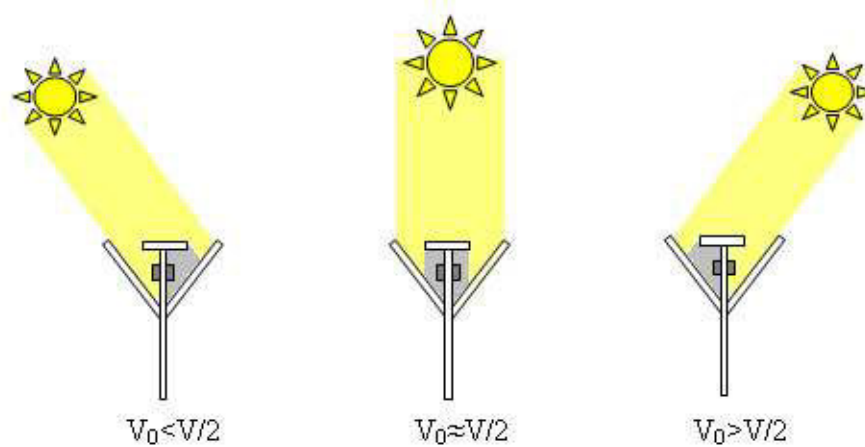


Fig.3.33. Différentes position du soleil par rapport au détecteur réalisé.

3.4.3.2 Simulation optique du détecteur de position du soleil

Après la conception mécanique, nous avons utilisé un logiciel de simulation optique pour avoir une idée sur le comportement du détecteur de soleil proposé (voir *figure .3.34*), où nous avons simulé le dispositif dans plusieurs positions pour le plus court et le plus long jour de l'année. La simulation comporte deux aspects différents, l'aspect distribution des rayons solaires en tenant compte des obstacles (ombre) et l'aspect valeur du rayonnement solaire reçue par la face de *LDR*.

Pour contrôler le comportement du détecteur, nous supposons que le détecteur de position du soleil est monté sur un concentrateur cylindro-parabolique avec un système de poursuite solaire à un seul axe de rotation installé dans la région de Ghardaïa. Nous allons incliner le détecteur à 10° , 20° , 30° respectivement jusqu'à ce que le détecteur soit bien orienté vers le soleil.

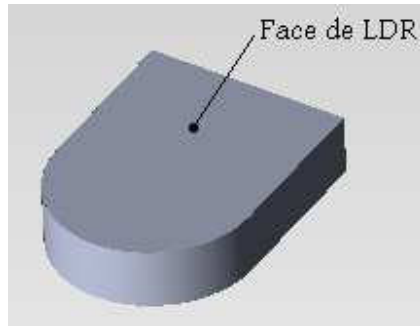


Fig.3.34. Vue de la LDR utilisée pour la détection.

Au début de la simulation, sur logiciel *TracePro* ; nous supposons que le détecteur est en position verticale, et on introduit la position du soleil pour le *21 Décembre* et le *21 Juin* respectivement à *10h00* du matin (voir *figure .3.35*).

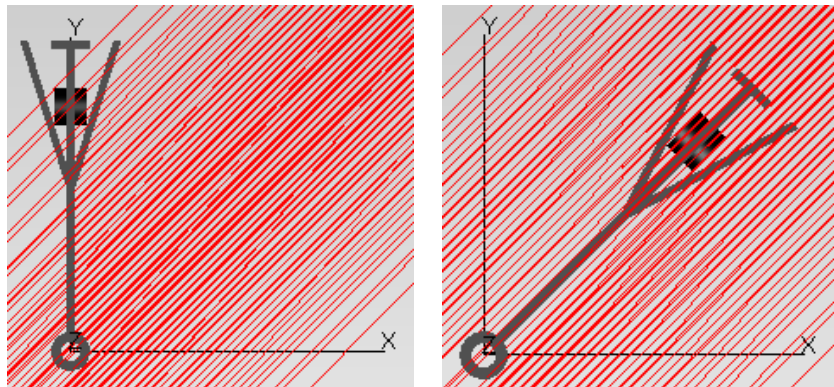


Fig.3.35. Le détecteur en position verticale et en position orienté vers le soleil à 10h00 le 21 Décembre.

Pour le 21 Décembre à 10h00 en position verticale, la *LDR* n'a pas été touchée par les rayons du soleil, alors nous avons incliné le détecteur à 10° , la *LDR* reste toujours loin des rayons du soleil. A 20° , nous avons pu avoir la distribution présentée sur la *figure .3.36*, la *LDR* à peine touchée par le soleil et sa surface est presque perpendiculaire aux rayons du soleil, et nous obtenons un rayonnement uniforme de 300 W/m^2 . Cette valeur est suffisante pour que le système de poursuite reconnaisse qu'il est sur la bonne voie en recherchant la position du soleil. En continuant l'inclinaison du détecteur à 30° , la face de *LDR* sera complètement exposée aux rayons solaires (voir *figure .3.37*) mais avec un angle d'incidence important, ce qui influe sur la valeur du rayonnement (180 W/m^2), cette diminutions du rayonnement n'influe pas sur l'estimation de la position de soleil. Arrivant à 40° , l'angle d'incidence sur la face de *LDR* augmente et le rayonnement continu à diminuer (90 W/m^2) voir *figure .3.38*, ce qui indique que le détecteur est très proche de la position du soleil.

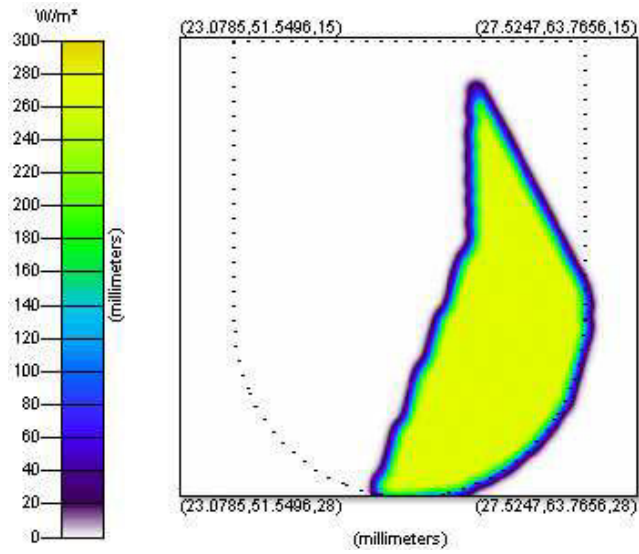


Fig.3.36. Distribution des rayons solaires sur la face de la *LDR* pour une inclinaison de 20°

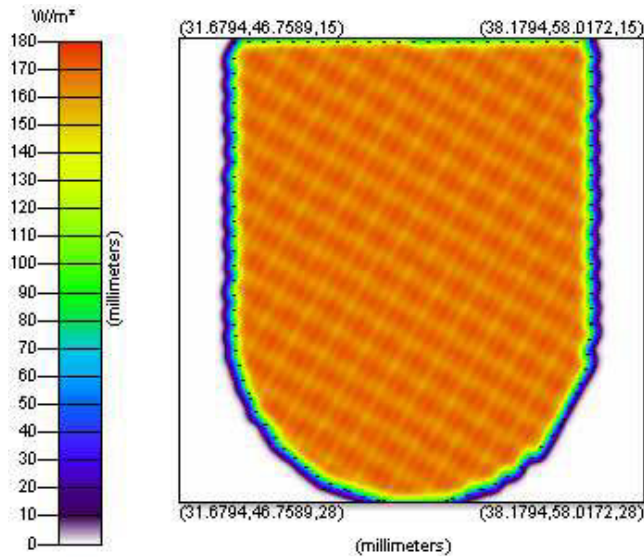


Fig.3.37. Distribution des rayons solaires sur la face de la *LDR* pour une inclinaison de 30°

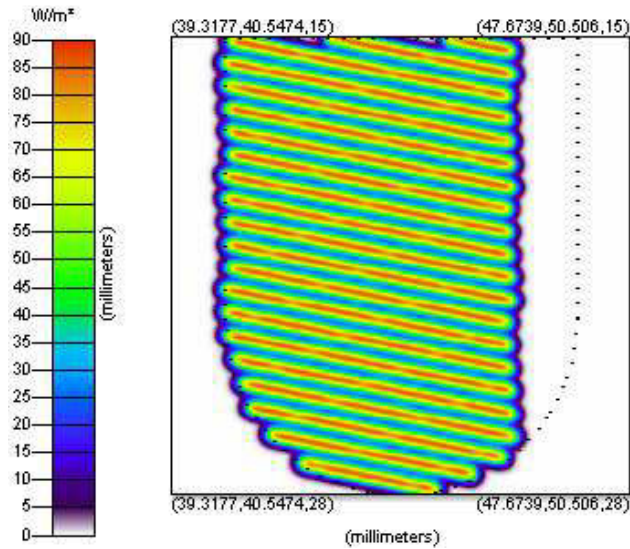


Fig.3.38. Distribution des rayons solaires sur la face de la *LDR* pour une inclinaison de 40°

En été, le 21 Juin à 10h00, contrairement au premier cas, à la position verticale ; la *LDR* reçoit des rayons solaires avec un rayonnement très important 500 W/m^2 (voir figure .3.39), ce qui facilite au système de poursuite au démarrage de détecter dans quel sens chercher la position du soleil. A 10° d'inclinaison du détecteur, l'angle d'incidence sur la face de la *LDR* commence à augmenter, le rayonnement diminue à 320 W/m^2 (voir figure .3.40), la distribution des rayons solaires sur la face de la *LDR* est uniforme, les rayons couvrent toute la *LDR*, et le système continu à chercher le soleil tant que les rayons touches la *LDR*. A 20° d'inclinaison la *LDR* reste toujours exposée aux rayons solaires avec une diminution du rayonnement solaire 140 W/m^2 due à l'augmentation de l'angle d'incidence (voir figure .3.41). En fin à 27° la *LDR* est à l'ombre c'est-à-dire que le détecteur de position du soleil est très bien orienté vers le soleil.

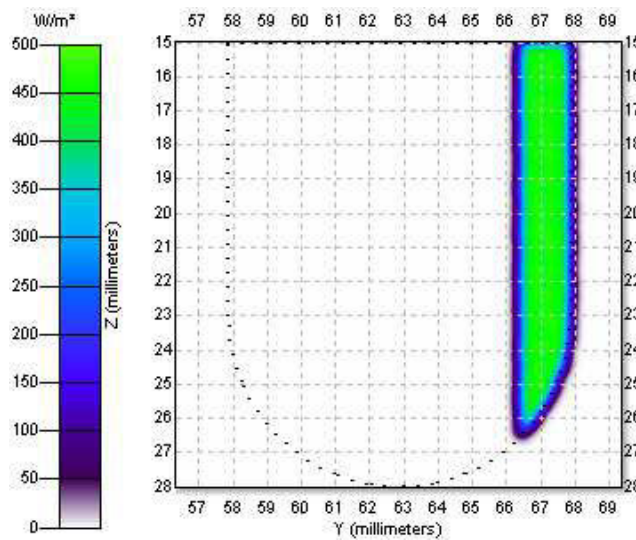


Fig.3.39. Distribution des rayons solaires sur la face de la *LDR* dans la position verticale.

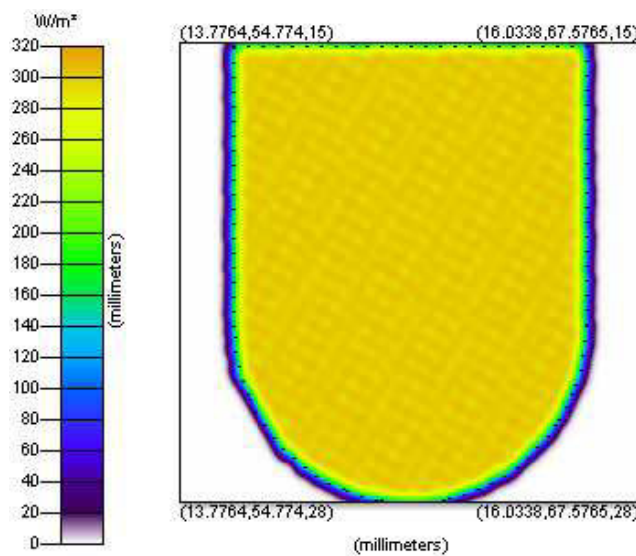


Fig.3.40. Distribution des rayons solaires sur la face de la *LDR* pour une inclinaison de 10° .

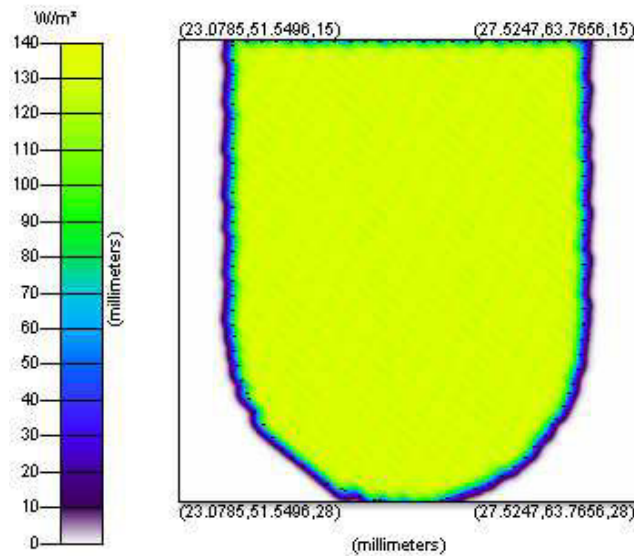









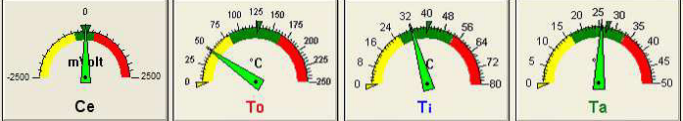
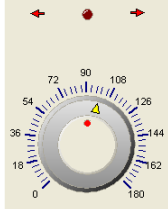
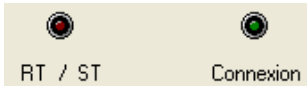
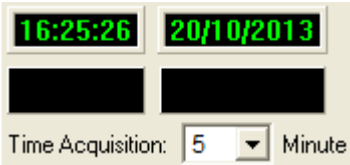
Fig.3.41. Distribution des rayons solaires sur la face de la *LDR* pour une inclinaison de 20° .

3.5 Partie informatique

Nous avons utilisé le langage *Delphi 7.0* pour la programmation du logiciel de gestion du prototype et de la stratégie de poursuite solaire. *Delphi 7.0* est un langage de programmation orienté objet puissant du point de vue gestion des ports de communication par interface graphique. A cet effet, nous avons réalisé un logiciel avec une interface graphique efficace et simple à utiliser pour permettre le contrôle du fonctionnement du prototype ainsi que la collecte des données depuis ce dernier [76]. Le programme est divisé en deux parties: la première partie est affectée à la commande manuelle où des boutons sont insérés au logiciel dans le but d'actionner chaque dispositif d'une façon manuelle. La seconde partie est dédiée à la commande automatique, où nous avons utilisé différents objets pour assurer le fonctionnement automatique du système. Les données collectées à partir des différents instruments de mesure (éclairage, température ambiante, température d'entrée et de sortie de l'eau) seront ensuite enregistrées automatiquement dans une base de données créée dynamiquement.

Le programme de contrôle fonctionne comme suit : Au démarrage, le logiciel enregistre la date et crée une base de données dynamique comporte les champs suivants : le temps, température d'entrée, température de sortie, température ambiante, rayonnement et tension de détecteur de position du soleil. Une fois terminer, le logiciel affiche la fenêtre principale (*figure .3.42*) qui comporte les outils de commande et de gestion suivants :

Table.3.2. Description de la fenêtre principale du logiciel de contrôle du prototype.

Bouton de démarrage du système.	
Bouton de démarrage de la poursuite solaire.	
Bouton pour ouvrir les données déjà stockées.	
Bouton pour le chargement de la configuration des ports de l'unité d'acquisition de données.	
Bouton pour la configuration du port série RS232.	
Bouton pour actionner manuellement le ventilateur	
Bouton pour actionner la pompe manuellement	
Quatre jauges pour l'affichage des principaux paramètres du système	
Zone pour la commande manuelle des différents dispositifs du prototype	
Deux témoins pour l'affichage de l'état du port série.	
Zone d'affichage du temps actuel, temps de démarrage, temps d'arrêt et la progression du fonctionnement du système	

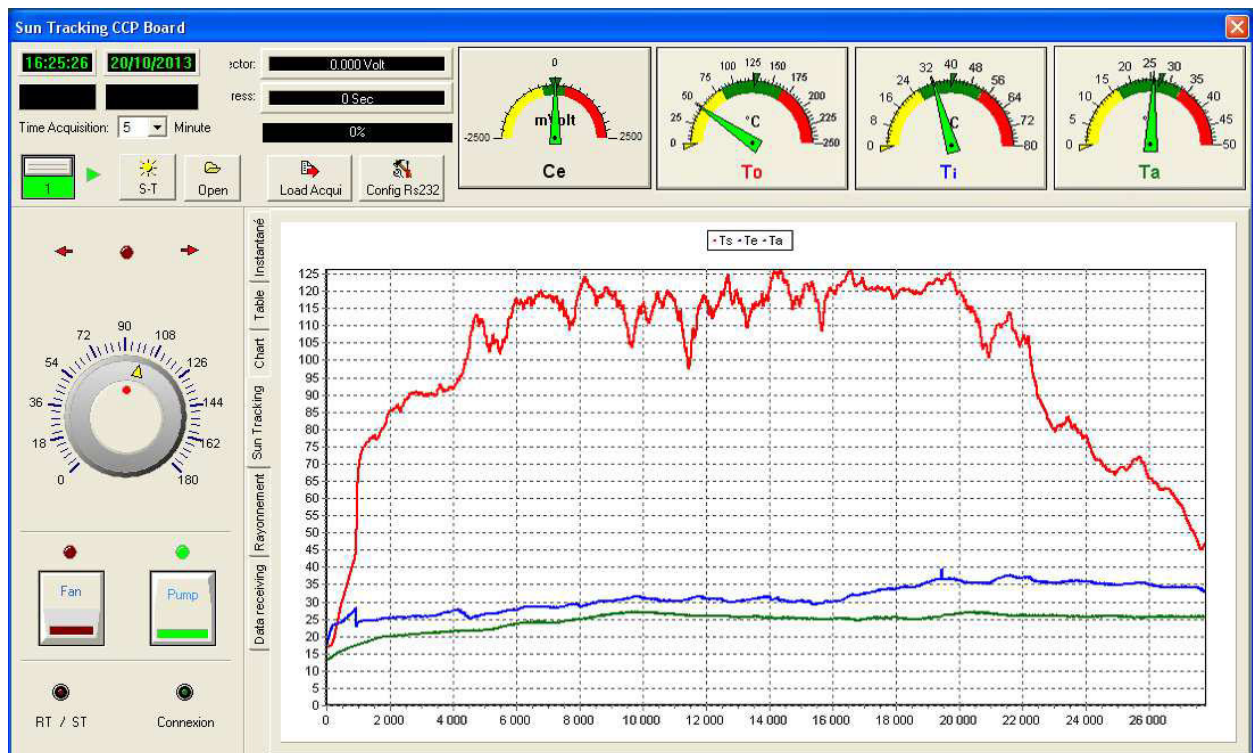
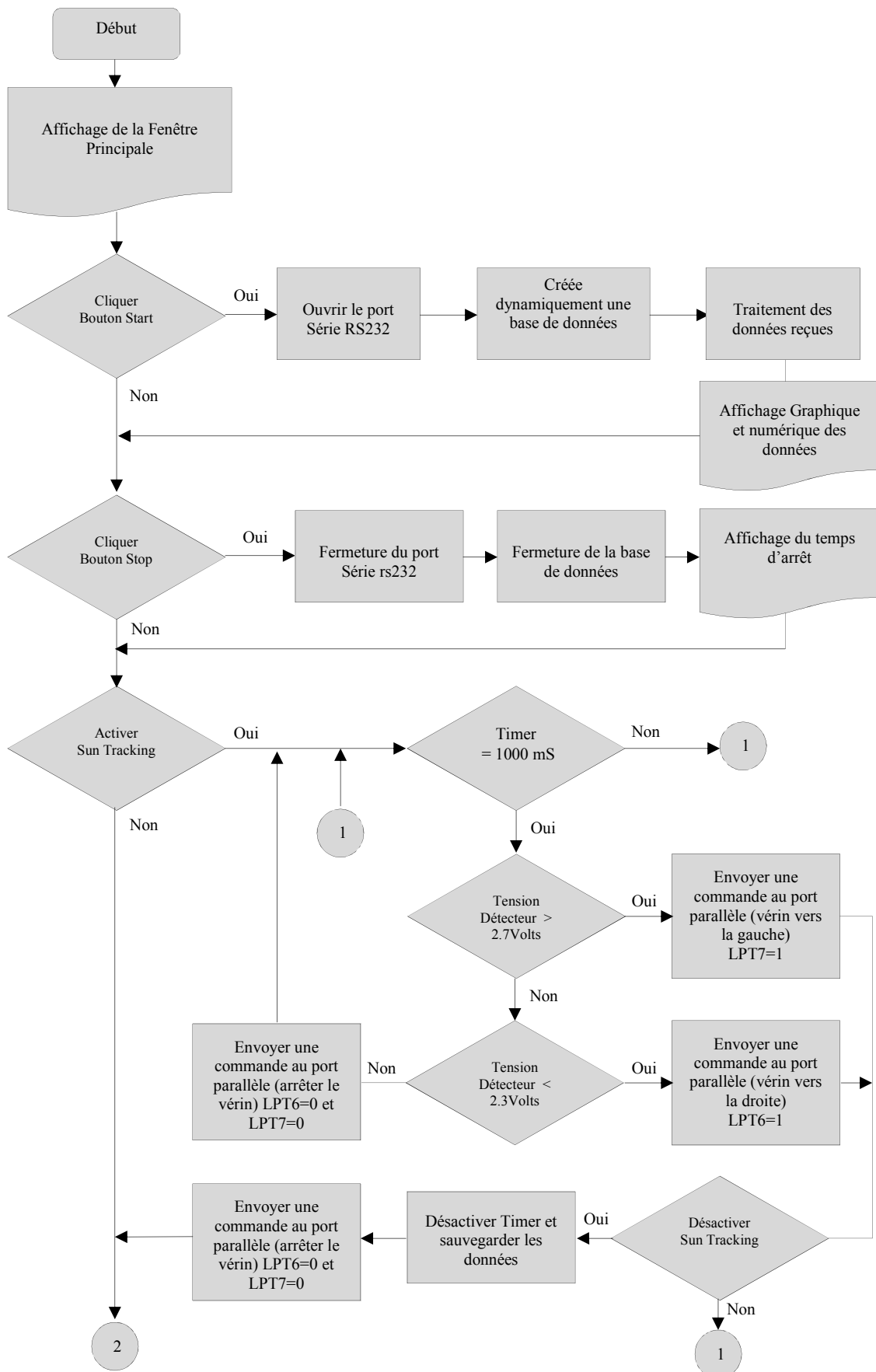


Fig. 3.42. Fenêtre principale du logiciel de contrôle et de gestion du prototype.

La stratégie de poursuite solaire se déroule comme suit : la lecture de la tension délivrée par le détecteur est effectuée initialement. Selon cette valeur, le programme estimera la position par rapport au soleil. Le programme communique alors avec le microcontrôleur de la carte électronique en utilisant le port parallèle (*LPT*) pour contrôler le fonctionnement des différents instruments du prototype tel que le vérin électrique, le ventilateur et la pompe. Le logiciel utilise, par contre; le port série (*RS232*) pour l'acquisition de données à partir de l'unité d'acquisition (*Agilent 34972A*). Plusieurs fonctionnalités ont été ajoutées au programme afin de mieux éclaircir son fonctionnement, tel que l'affichage graphique des différents paramètres et l'enregistrement instantané des données [76]. Toutes ces étapes et d'autres sont bien illustrées sur l'organigramme du programme de contrôle de la *figure .3.43*.

3.5.1 Organigramme générale de gestion de la poursuite



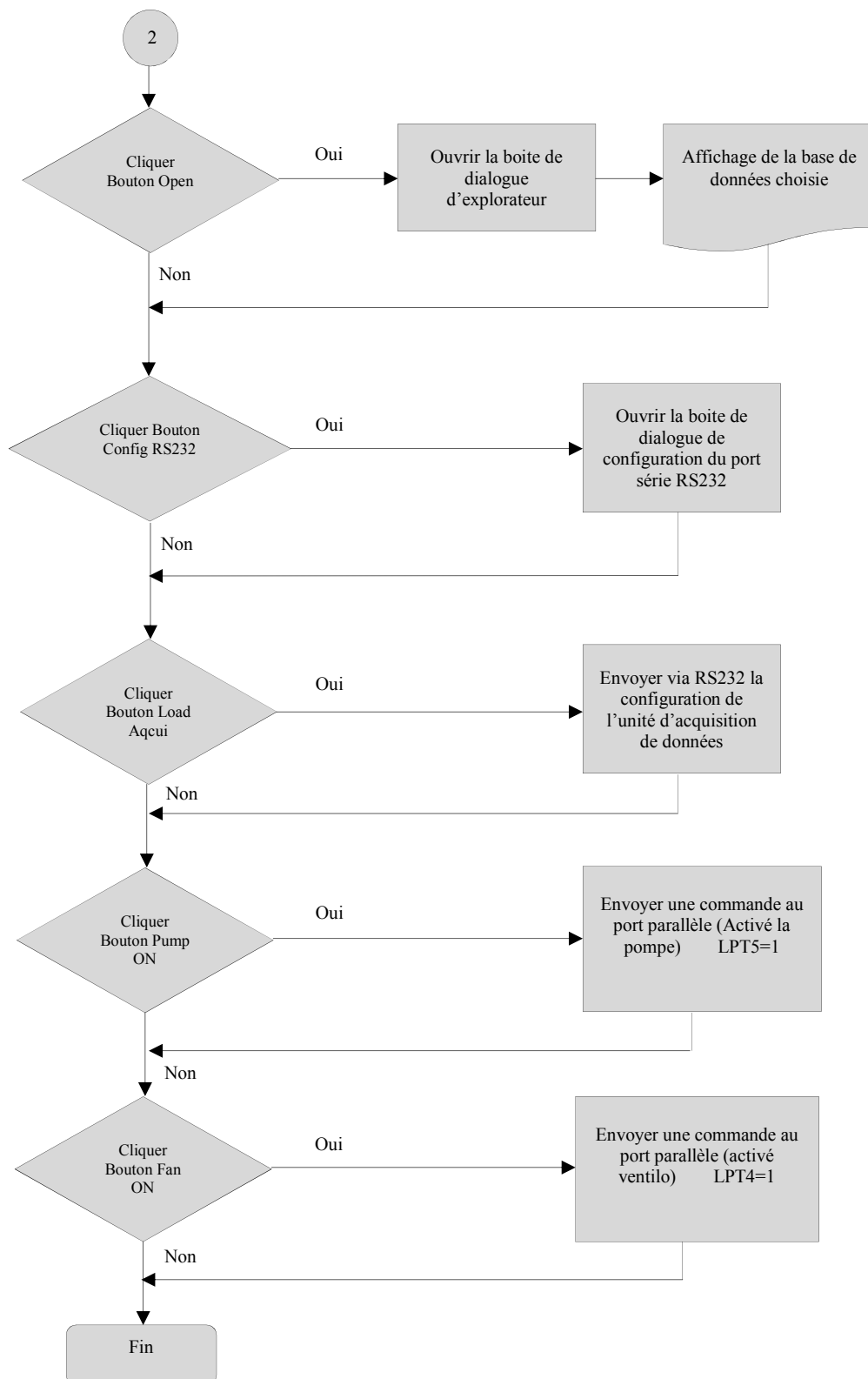


Fig. 3.43. Organigramme général du programme de contrôle.

3.5.2 Chaîne d'acquisition de données

La chaîne d'acquisition de données comporte deux thermocouples du *Type K* pour mesurer la température d'entrée et de sortie du fluide de transfert. D'autres capteurs permettant la mesure des paramètres climatiques (température ambiante et rayonnement solaire) sont utilisés. La tension du détecteur de la position du soleil est aussi mesurée. Pour la collecte et l'acquisition de données, nous utilisons une unité acquisition professionnelle (*Agilent 34972A*), qui communique avec le micro-ordinateur via le port série. Un logiciel programmé sur Delphi assure la collecte et le traitement des données, les données traitées seront enregistrées dans une base de données créée dynamiquement lors du démarrage du logiciel, on note ici que la base de donnée créée est du type PARADOX (.DB), on peut l'importer sur Excel.

3.6 Installation du système

Le prototype du concentrateur cylindro-parabolique réalisé est installé au sein de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa, placé sur une plateforme en béton armé, orienté plein Sud. Une grande attention et précision, dans la limite de nos équipements; a été donnée à la réalisation de l'installation et notamment à son orientation vers le Sud. Il faut surtout garder en esprit que l'erreur en orientation a une grande influence sur la ligne de concentration et sur le rendement du système en général, et quelque soit la précision des instruments utilisés pour la détermination de l'orientation du prototype, les erreurs sont inévitables, il faut donc faire en sorte de les minimiser. Une étude que nous avons réalisée, pour savoir l'influence de l'erreur en orientation sur le rendement global du dispositif [77] ; montre que pour seulement 1° d'erreur en orientation, nous aurons une petite déformation au niveau de la ligne de concentration, la meilleure solution que nous proposons, reste dans ce cas aussi; l'augmentation du diamètre de l'absorbeur afin de récupérer la déformation causée par l'erreur.

Dans l'absorbeur circulaire de l'eau comme étant fluide de transfert poussé par une pompe de circulation à faible débit pour échanger sa chaleur à travers un radiateur équipé d'un ventilateur. Une chaîne d'acquisition de données a été installée pour contrôler et gérer tous les entrées-sorties du prototype (*figure .3.44*).

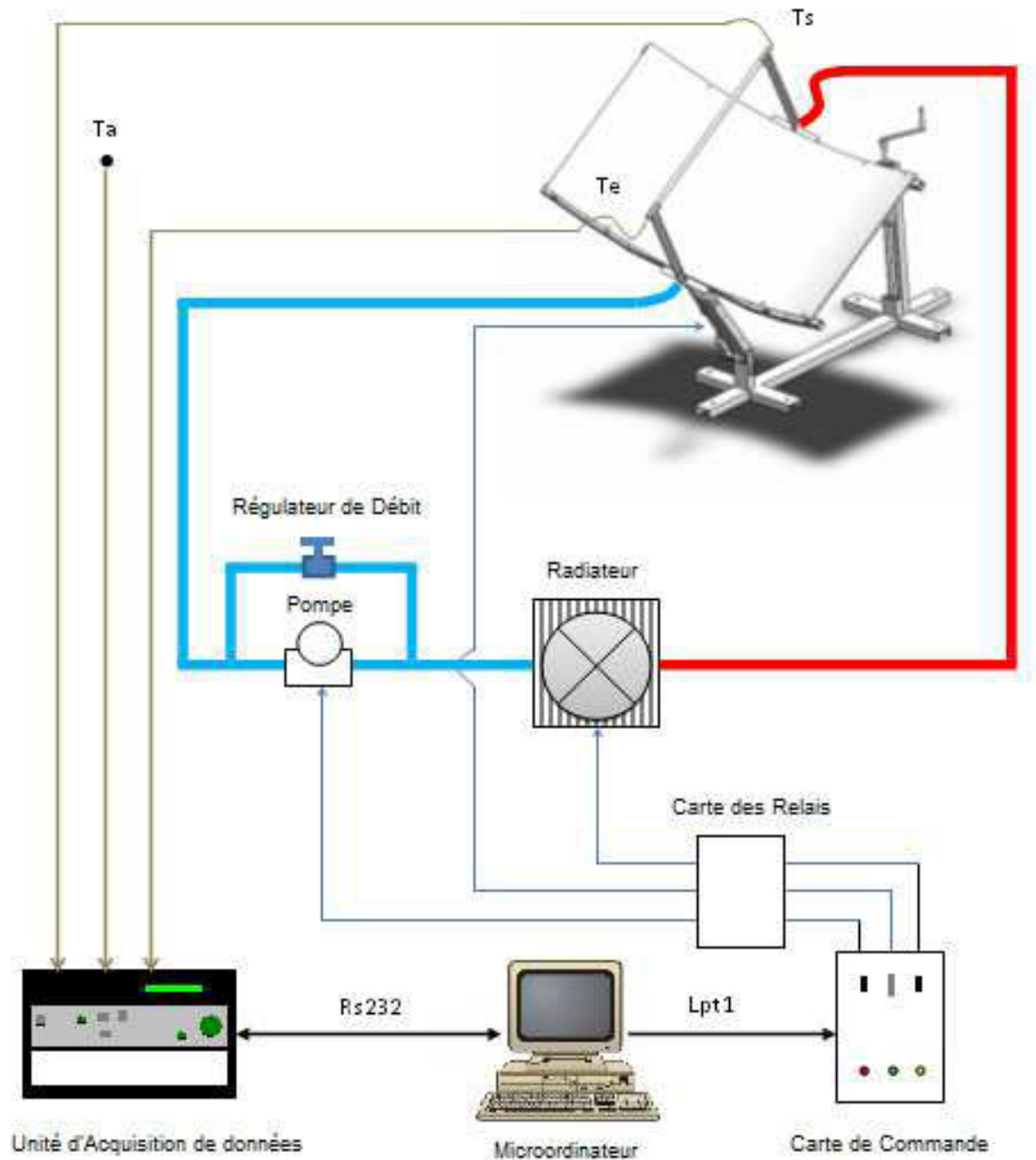


Fig. 3.44. Schéma synoptique de l'ensemble de l'installation réalisée.

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons commencé par l'étude et la présentation de la problématique de l'effet cosinus dans les concentrateurs cylindro-parabolique, où nous avons proposé une solution optimale d'un nouveau système de poursuite solaire basé sur le déplacement de l'absorbeur, dans le but de minimiser les pertes optiques due à l'effet cosinus. En premier lieu nous avons fait la conception mécanique du prototype du concentrateur cylindro-parabolique muni du nouveau système de poursuite solaire. Après la conception, nous avons entamé la phase

de simulation afin d'avoir une idée sur le comportement optique et thermique du système, suite aux résultats de simulation, nous avons procédé à la phase de réalisation de différentes parties du prototype avec le système de poursuite solaire proposé. Diverses modifications ont été apportées au système, soit pour des raisons techniques, économiques ou de disponibilité. Deux cartes électroniques ont été réalisées pour la gestion du prototype et un logiciel graphique a été élaboré pour le contrôle, la gestion et le stockage des données. Nous avons obtenu à la fin un prototype d'un concentrateur cylindro-parabolique avec un nouveau système de poursuite solaire.

Dans le prochaine chapitre nous allons procéder à la caractérisation du prototype réalisé et nous allons entamer la phase des testes expérimentaux et le relevé des résultats.

Chapitre 4

Etude expérimentale du nouveau système de poursuite solaire

4.1 Introduction

Après la réalisation, le montage et l'installation du prototype, plusieurs opérations d'étalonnage sont effectuées afin de s'assurer du bon fonctionnement de l'ensemble du système et finalement nous avons eu un prototype d'un concentrateur cylindro-parabolique avec son système de poursuite solaire qui semble fonctionner d'une manière correcte.

Le but de la réalisation c'est de prouver expérimentalement l'efficacité du nouveau système de poursuite solaire. A supposer que l'efficacité de l'ensemble est médiocre, ceci peut être causé par des erreurs de fabrication et pourra avoir comme cause le fait que le nouveau système de poursuite solaire n'est pas vraiment efficace. Pour cela il faudra impérativement caractériser le prototype avec son système de poursuite solaire afin de déterminer les caractéristiques réelles du concentrateur cylindro-parabolique (rendement optique, rendement thermique). A cet effet, nous avons appliqué les normes ASHRAE 93-1986 (RA91) [78] pour la caractérisation de notre système.

4.2 Evaluation du prototype réalisé selon les normes ASHRAE

Afin de s'assurer que le système de poursuite solaire possède une haute efficacité et précision, il est nécessaire de démontrer avec une description complète l'évaluation du concentrateur cylindro-parabolique à l'aide des standards et norme de ASHRAE 93-1986 (RA91). [78]

4.2.1 Rendement optique

Le rendement optique d'un concentrateur cylindro-parabolique est le rapport de l'énergie solaire reçue sur la surface du tube de l'absorbeur sur celle incidente sur le réflecteur. Il est

donné comme suit : [79]

$$\eta_0 = \left[\tau \alpha \rho \gamma \left(1 - A_f \tan(\theta_i) \cos(\theta_i) \right) \right]_n \quad (4.1)$$

τ : Le coefficient de transmission du verre du récepteur.

α : Le coefficient d'absorption du récepteur.

ρ : Le coefficient de réflexion de la surface du miroir.

A_f : Facteur géométrique.

θ_i : L'angle d'incidence.

γ : Le facteur d'interception qui décrit l'interaction de toutes les erreurs optiques dans un concentrateur cylindro-parabolique. Elle est donnée par Guven et Bannerot [79] [80] [81] par l'équation suivante :

$$\gamma = \frac{1 + \cos(\varphi_r)}{2 \sin(\varphi_r)} \int_0^{\varphi_r} \frac{\text{erf}(M) - \text{erf}(N)}{1 + \cos(\varphi_a)} d\varphi_a \quad (4.2)$$

$$M = \frac{\sin(\varphi_r)(1 + \cos(\varphi_a))(1 - 2 d^* \sin(\varphi_a)) - \pi \beta^*(1 + \cos(\varphi_r))}{\sqrt{2} \pi \sigma^*(1 + \cos(\varphi_r))} \quad (4.3)$$

$$N = - \frac{\sin(\varphi_r)(1 + \cos(\varphi_a))(1 + 2 d^* \sin(\varphi_a)) + \pi \beta^*(1 + \cos(\varphi_r))}{\sqrt{2} \pi \sigma^*(1 + \cos(\varphi_r))} \quad (4.4)$$

φ_a : L'angle entre l'axe de la parabole et un point sur la surface du miroir.

φ_r : Angle d'ouverture.

d_r : Erreur de position de l'absorbeur.

d^* : Erreur universelle non aléatoire en raison de l'erreur de position de l'absorbeur et du diamètre du tube de l'absorbeur (D). $d^* = d_r/D$.

β^* : Le paramètre d'erreur universel non aléatoire due à des erreurs angulaires et de l'angle d'erreur de poursuite (β). $\beta^* = \beta C$.

σ^* : Le paramètre d'erreur universel aléatoire, $\sigma^* = \sigma C$.

C : Le taux géométrique de la concentration.

σ : L'erreur optique aléatoire, elle est donnée par la somme quadratique des erreurs individuelles. [79] [82]

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{sun}^2 + 4 \sigma_{contour}^2 + \sigma_{specular}^2} \quad (4.5)$$

σ_{sun} : Largeur angulaire efficace du soleil.

$\sigma_{specular}$: Erreur due au manque de spécularité parfaite.

$\sigma_{contour}$: Erreur de contour.

$$\sigma_{contour} = \sqrt{\frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n \left(|\Delta\theta_{t,i}| - \frac{\sum |\Delta\theta_{t,i}|}{n} \right)^2 \right]} \quad (4.6)$$

$$|\Delta\theta_{t,i}| = \left| \arctan\left(2\frac{y_i}{x_i}\right) - \arctan\left(2\frac{y_i + \delta y_i}{x_i + \delta x_i}_{med}\right) \right| \quad (4.7)$$

$|\Delta\theta_{t,i}|$ [rad] : Valeur absolue de l'écart mesuré.

δ_x et δ_y sont la différence entre les valeurs d'analyse et les données mesurées dans le plan (x, y) .

Afin d'évaluer les erreurs de la surface parabolique du concentrateur cylindro-parabolique réalisé, nous avons pris en photo de haute qualité la courbe parabolique du réflecteur, et en utilisant un programme de traitement d'image qu'on a réalisé à cet effet, on peut obtenir les coordonnées (x, y) de la forme parabolique du réflecteur. Nous avons mesuré les coordonnées de 87 points du surface de réflecteur, on les compare avec les données de la courbe parabolique tracé, voir *figure.4.1*

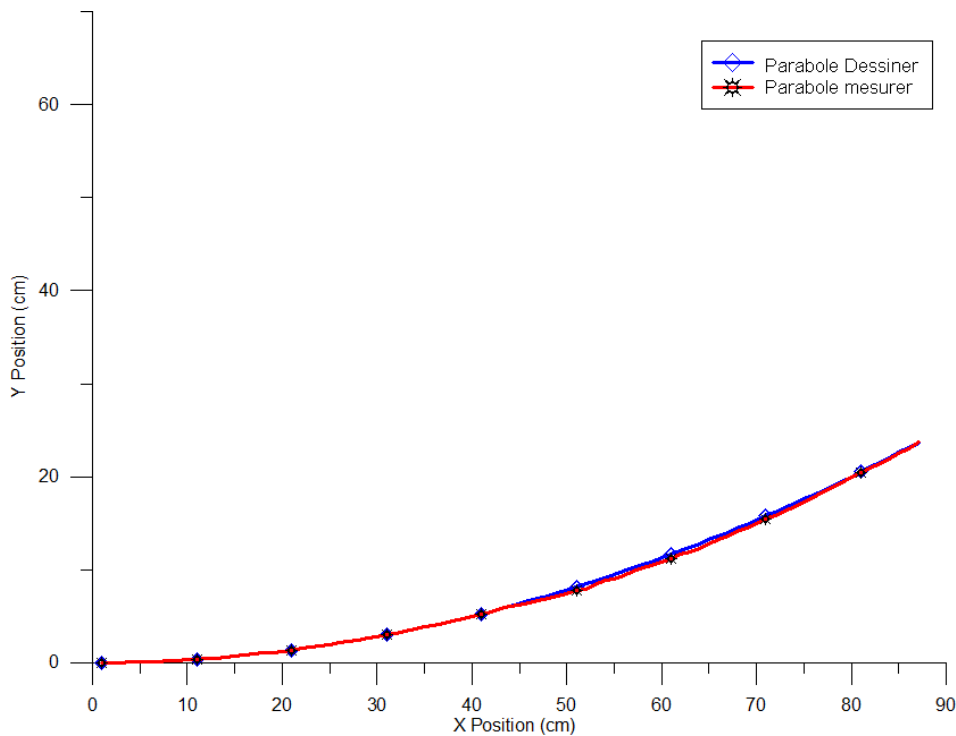


Fig. 4.1. Le profil de la courbe parabolique mesurée et tracée.

Le *Tableau 4.1* représente l'estimation de la valeur des erreurs optiques du concentrateur cylindro-parabolique réalisé par rapport aux valeurs des concentrateurs cylindro-parabolique dans la littérature.

Tableau 4.1. Comparaison des paramètres d'erreur optique.

Paramètres	U. S. High-tech PTCs	Paramètres donnés dans [78]		Données dans [83]	Données dans [79]	Notre prototype
		Pays en développement		PTC 82°	PTC 45°	PTC 65.6°
σ [rad]	0.0064	0.0087	0.0113	0.0113	0.0098	0.0148
β [°]	0.25	0.50	1.00	0.375	0.50	1.00
d_r [mm]	3.10	6.20	6.20	7.75	7.50	8.70
D_o [mm]	24.8	24.8	24.8	30.00	25.4	22.0
C [-]	28.00	21.00	16.00	15.92	14.87	23.5
σ^* [rad]	0.1792	0.1827	0.1808	0.1798	0.1457	0.3478
β^* [rad]	0.1222	0.1833	0.2793	0.1111	0.1298	0.4099
d^* [-]	0.125	0.250	0.250	0.2583	0.2953	0.3954

Le *Tableau 4.2* ci-dessous donne le rendement optique ' η_o ' et le facteur d'interception ' γ ', pour un angle d'incidence ' $\theta_i = 0$ ', lorsque le rayonnement solaire incident est normal à la surface d'ouverture du concentrateur cylindro-parabolique. [79]

 Tableau 4.2. Rendement optique et facteur d'interception pour $\theta_i=0$

Paramètres	[79]	Notre prototype
η_o [-]	0.6	0.5
ρ [-]	0.95	0.96
τ [-]	—	—
α [-]	0.95	0.90
γ [-]	0.665	0.577

4.2.2 Performances thermiques

L'évaluation des performances thermiques du concentrateur cylindro-parabolique selon la norme ASHRAE 93-1986 (RA 91) [78] consiste à la détermination de la constante du temps, le rendement thermique, et le facteur d'angle d'incidence. Pendant le processus d'évaluation du concentrateur cylindro-parabolique, on note que, le système de poursuite solaire est utilisé pour suivre le soleil afin de minimiser l'angle d'incidence.

4.2.2.1 Constante de temps

La constante de temps d'un concentrateur cylindro-parabolique est le temps nécessaire pour que le fluide quitte le concentrateur cylindro-parabolique pour atteindre 0.632 de sa valeur d'état stable final après un changement progressif du rayonnement incident, autrement dit : la constante de temps du capteur est le temps nécessaire écoulé pour que la quantité $((T_{O,t} - T_i)/(T_{O,int} - T_i))$ passer de '1.0' à '0.368'. [78] [84]. La constante de temps est obtenue par:

$$\frac{T_{O,t} - T_i}{T_{O,int} - T_i} = \frac{1}{e} = 0.368 \quad (4.8)$$

T_i : Température d'entrée.

$T_{O,t}$: Température de sortie au moment 't'.

$T_{O,int}$: Température à la sortie lorsque le rayonnement est obstrué, pour la constante de temps de refroidissement ou est dégagée pour la constante de temps de chauffage.

Pour calculer la constante de temps expérimentalement, il faut que le collecteur soit initialement à une position défocalisée. Le concentrateur cylindro-parabolique est soudainement orienté vers le soleil et on lance les mesures jusqu'à ce que on atteint l'état de l'équilibre *figure. 4.2*. Pendant les essais, la température d'entrée de l'eau du concentrateur cylindro-parabolique est maintenue à la température ambiante [84]. La constante de temps du concentrateur cylindro-parabolique est évaluée à la valeur de 98s.

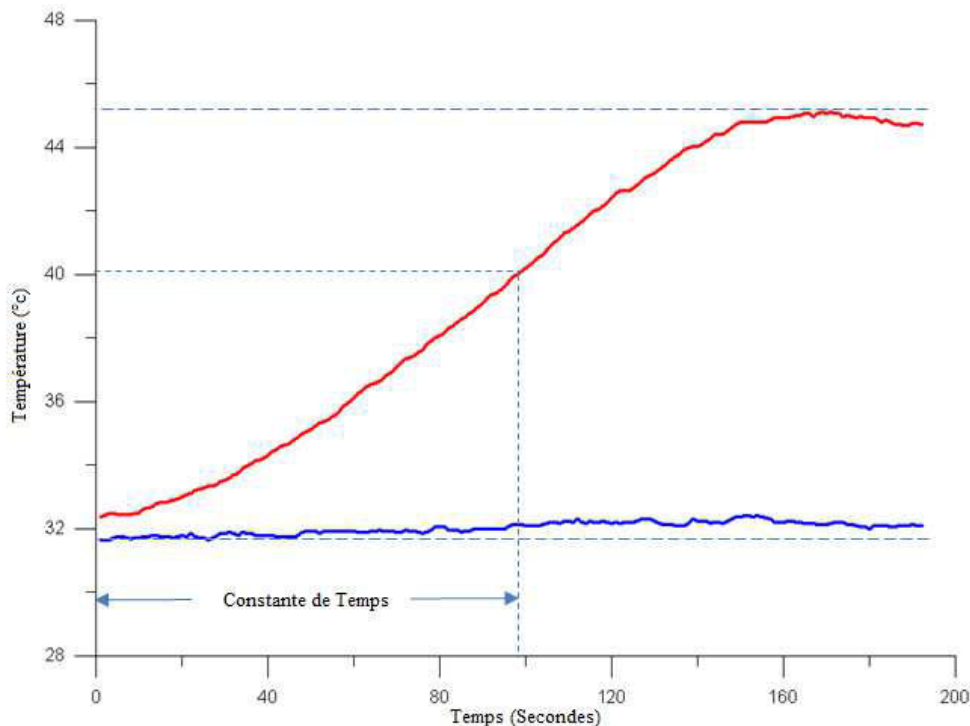


Fig. 4.2. Constante de temps du collecteur.

4.2.2.2 Rendement thermique

Les tests concernant le rendement dans les standards ASHRAE 93-1986 (RA91) nécessitent d'être exécutés pendant une période égale à la constante de temps (98s). [78]

Le rendement thermique est évalué en tenant compte de l'augmentation de température à travers l'absorbeur.

$$\Delta T = T_i - T_a \quad (4.9)$$

T_a : Température ambiante.

T_i : Température d'entrée.

Le rendement thermique est donc donné par:

$$\eta_t = Fr \left(\eta_o - \frac{U_L}{C} \left(\frac{\Delta T}{G_b} \right) \right) \quad (4.10)$$

Tableau 4.3: Performances thermiques du concentrateur cylindro-parabolique.

Paramètres	Mesures expérimentales [79]	Mesures expérimentales Notre travail
η_o [-]	0.60	0.49
η_t [-]	$0.5608 - 2.0468(\Delta T / G_b)$	$0.4 - 1.275(\Delta T / G_b)$
C [-]	14.87	23.5
F_R [-]	0.935	1.02
U_L [W/m^2K]	32.56	29.3

4.2.2.3 Angle d'incidence modifiée

Dans les normes ASHRAE 93-1986 (RA91), l'angle d'incidence modifiée est calculé en utilisant l'équation suivante [78]:

$$K_\theta = \frac{\eta_t(T_i = T_a)}{Fr(\eta_o)_n} \quad (4.11)$$

$Fr[\eta_o]_n$: Représente le rendement optique crête à un angle d'incidence normale.

$\eta_t(T_i = T_a)$: Présente le rendement mesuré quand la température du fluide d'entrée est maintenue égale à la température ambiante.

La *figure. 4.3* présente la courbe de l'efficacité optique en fonction de l'angle d'incidence à $\theta_i=0$, le rendement optique est égal 49%. On note que le rendement optique diminue pour les grandes valeurs de l'angle d'incidence.

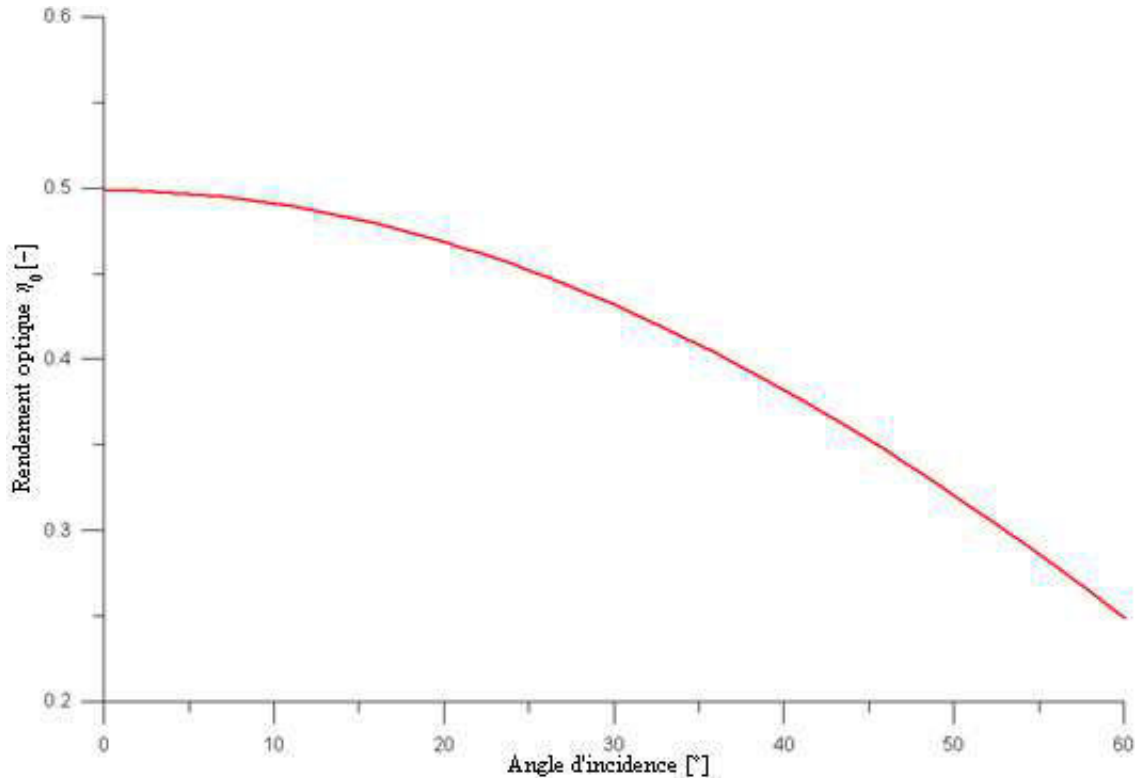


Fig.4.3. Courbe du rendement optique en fonction de l'angle d'incidence.

4.3 Résultats collectés

Après avoir déterminé les caractéristiques réelles de notre prototype, nous avons procédé aux tests expérimentaux du concentrateur cylindro-parabolique avec le nouveau système de poursuite solaire, et ceci durant trois années successives de l'année 2011 jusqu'à l'année 2013, ce qui nous a permis de recueillir une grande quantité d'informations concernant le système.

Dans ce chapitre, nous nous contenterons de présenter uniquement des jours de tests relatifs à chaque saison pour des journées claires et des journées moyennes. Le tableau ci-après récapitule les journées choisîtes pour réaliser les tests. A noter que pour la saison du printemps, nous avons les données d'une seule journée car le climat à Ghardaïa est caractérisé par des vents de sable est des journées vraiment très défavorables pour les tests.

Tableau 4.4. Jours choisis pour réaliser les tests du concentrateur cylindro-parabolique.

Saisons	Jours clairs	Jours moyens
Hiver	04 janvier 2012	06 Février 2013
	09 Février 2013	11 Février 2013
Printemps	21 Mars 2013	-
Automne	12 Octobre 2011	23 Octobre 2011
Eté	17 Août 2012	21 Août 2012

4.3.1 Tests durant la période d'hiver (jours clairs)

Nous avons procédé au teste du système proposé dans les conditions climatiques de la région du Sud de l'Algérie (région de Ghardaïa) en mettant en marche le système de poursuite solaire réalisé afin de déterminer le comportement de toute l'installation. Nous notons que tous les tests sont présentés en heure locale ($GMT + 1$), et sont réalisés du début de la matinée à la fin de l'après-midi, généralement de $08h00$ à $16h00$. Le déplacement de l'absorbeur du concentrateur cylindro-parabolique est mesuré pour chaque saison des tests. Pour chaque test, nous mesurons le rayonnement direct normal incident sur le concentrateur et nous collectons les paramètres suivants : températures ambiante (T_a), températures d'entrée (T_e) et de sortie de l'eau (T_s), et nous enregistrons le signal délivré par le détecteur du soleil. Les données sont relevées chaque 5 minute d'intervalle. Des graphes du rendement thermique du système et de profil de température sont illustrés pour chaque test.

Le premier test est effectué le *04 Janvier 2012*, commençant de $9h00$ à $16h30$, c'est un jour clair sans aucun passage nuageux, ce qui donne une belle courbe de rayonnement solaire (*figure. 4.4*). Une valeur maximale du rayonnement direct normal est de l'ordre de $930 W/m^2$.

D'après les premiers résultats, le système de suivi détectera la position du soleil automatiquement uniquement après une minute du démarrage du test en partons de la position initiale du prototype (position horizontale), voir *figure. 4.5*. Nous pouvons donc dire que pour cette journée, le concentrateur cylindro-parabolique et son système de suivi du soleil fonctionne avec une efficacité remarquable. Nous pouvons remarquer aussi, que pour la température du fluide de transfert, elle a commencé à augmenter juste après 13 minutes du démarrage, passant de 24 à $75^\circ C$ pour une température ambiante aux alentours de $20^\circ C$.

Le système maintient la température de sortie du fluide caloporteur à peu près constante toute au long de la journée (*figure. 4.6*), à l'exception de certaines fluctuations dues à une expansion de la vapeur d'eau formée dans le circuit du fluide caloporteur. En effet, nous

remarquons que les valeurs des températures mesurées varient de temps à autre et cela est dû à l'évaporation du fluide caloporteur quand la température de ce dernier atteint les 100°C, cet évaporation provoque une augmentation de pression à l'intérieur du circuit comportant le fluide caloporteur et puisque les fuites sont inévitables, la détente du fluide provoque des chutes brusques des températures et de la pression et comme le foyer reste toujours exposé au rayonnement concentré, les températures augmenteront une fois de plus encore et le phénomène ce répète.

La remarque majeure est que le système a maintenu la température entre 100° et 125°C pendant plus de 5 heures de fonctionnement, cela veut dire que notre nouveau système de poursuite solaire a vraiment fonctionné avec une grande précision et le système de déplacement du foyer a bien prouvé son efficacité. Le système a bien pu récupérer les pertes importantes, qui sont un problème majeur des concentrateurs cylindro-paraboliques durant la période hivernale. Les températures de sorties mesurées montrent qu'elles sont très proches des données du système avec poursuite solaire à deux axes de rotation (Poursuite solaire intégrale).

A 16h30 nous avons arrêté le test, le rendement journalier moyen du système est d'environ 49.35% comme le montre la *figure. 4.7*. Nous concluons pour ce test, que le système a bien prouvé son efficacité, avec une très bonne précision et sans erreurs dans une journée où l'environnement est caractérisé par des conditions météorologiques difficiles à Ghardaïa (l'hiver).

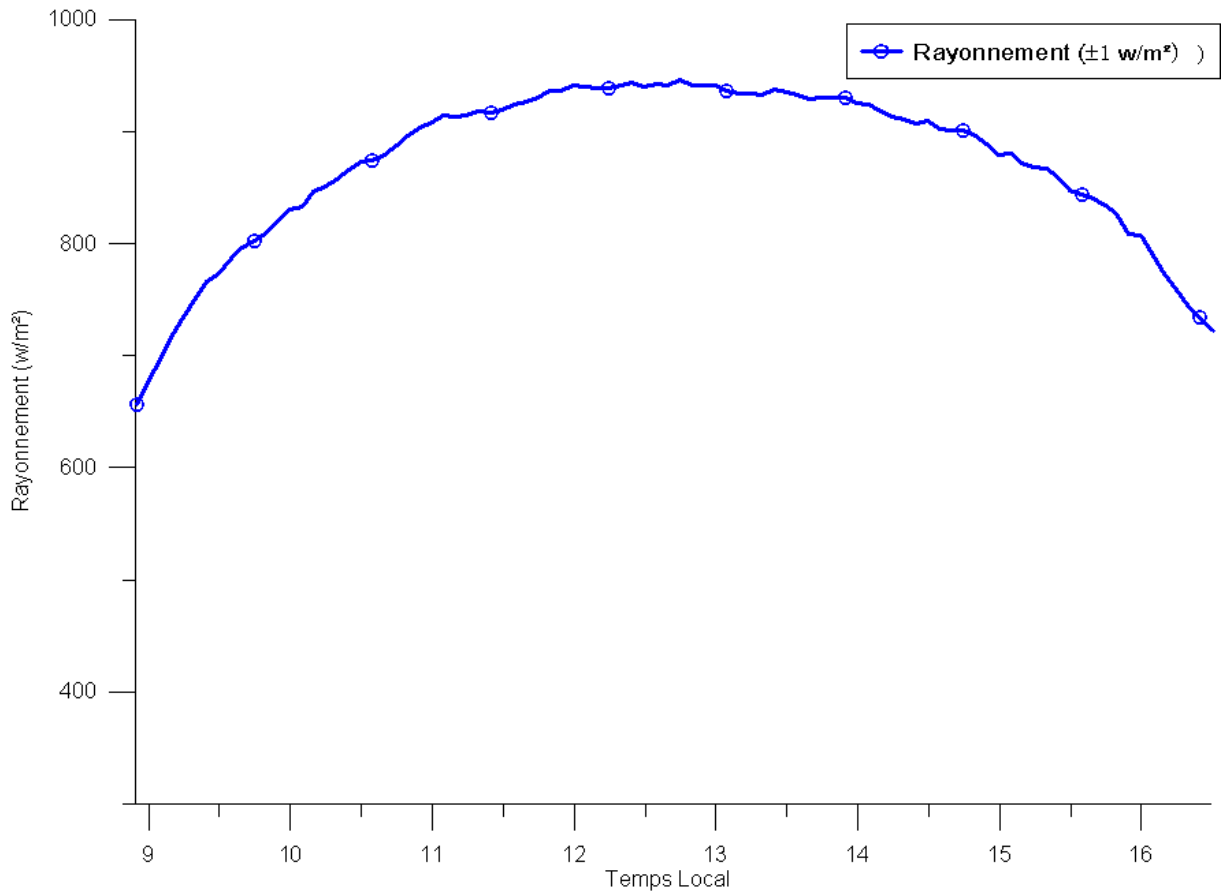


Fig.4.4. Rayonnement solaire direct normal du 04 janvier 2012 (période hivernal, jour clair).

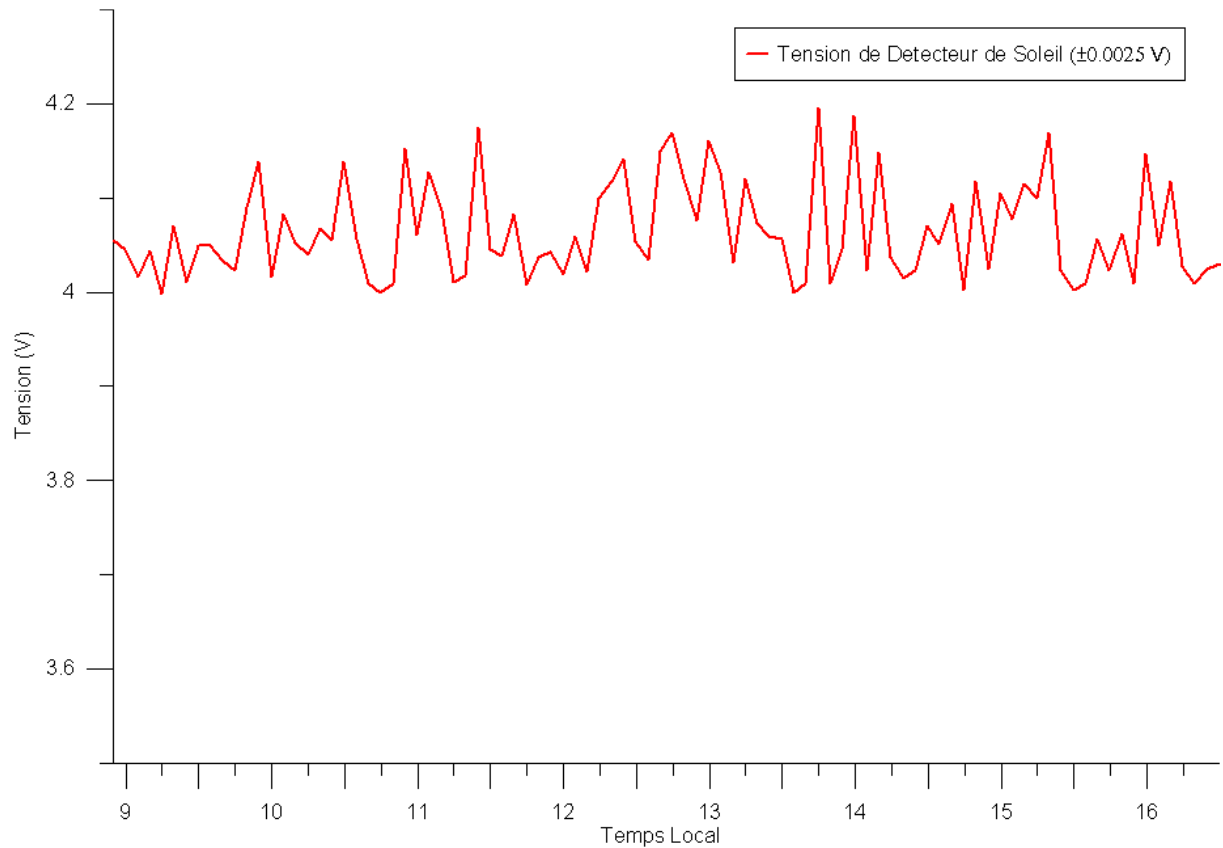


Fig.4.5. Signal délivré par le détecteur de position de soleil du 04 janvier 2012.

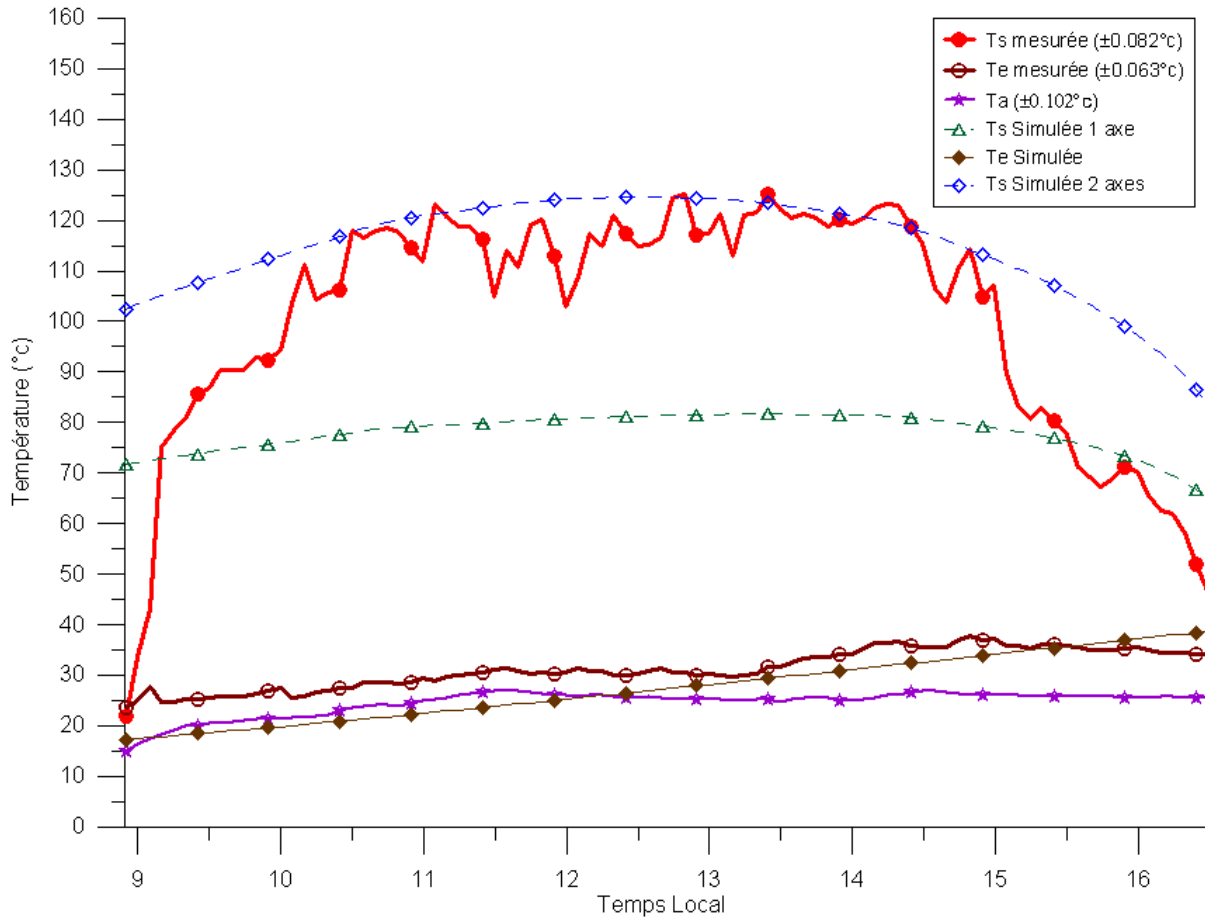


Fig.4.6. Profile des températures du test du 04 janvier 2012.

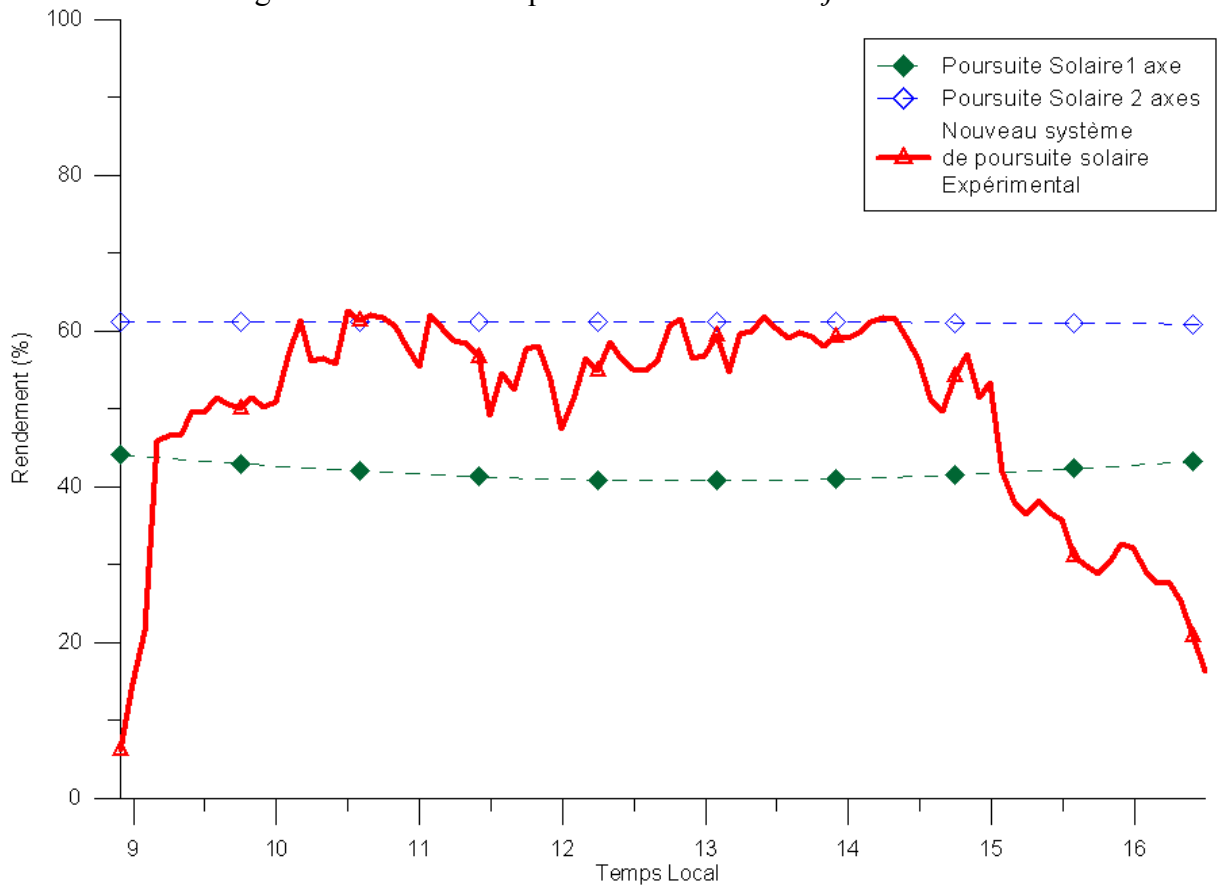


Fig.4.7. Rendement thermique du concentrateur le 04 janvier 2012.

Le deuxième test est effectué le 09 février 2013, les conditions de fonctionnement sont presque identiques à ceux de la journée précédente, un rayonnement important, une journée claire (figure. 4.8). A 9h46 nous avons commencé les tests. Nous avons remarqué qu'en 14 minutes seulement, la température de sortie a augmenté de 58 à 105°C, c'est qui est beaucoup, ceci est du au faite que le concentrateur à rester un bon temps orienté vers le soleil sans avoir démarré l'acquisition à cause d'un problème au niveau du câble du port série, ce dernier est résolu à 9h46, et le test à repris son parcours normalement.

Nous avons remarquer également que la température de sortie est très élevée au démarrage et ceci pendant toute les premières 6 heures de fonctionnement (figure. 4.9), cela est due au stockage d'une grande quantité de chaleur au niveau du fluide caloporteur provoqué par le problème de connexion de l'unité d'acquisition discuté auparavant, la stabilité du système n'a repris qu'après 3 heures écoulées de temps, pendant ce temps là la courbe du rendement du système affiche des valeurs supérieures à celles de la poursuite intégrale (entre 60 et 70%), ce qui n'est pas juste (figure. 4.10). Pour le reste du test, une fois le régime de stabilité atteint; le détecteur de position fonctionne correctement (figure. 4.11) et le système a pu maintenir la température de sortie dans un intervalle de 83 à 100°C.

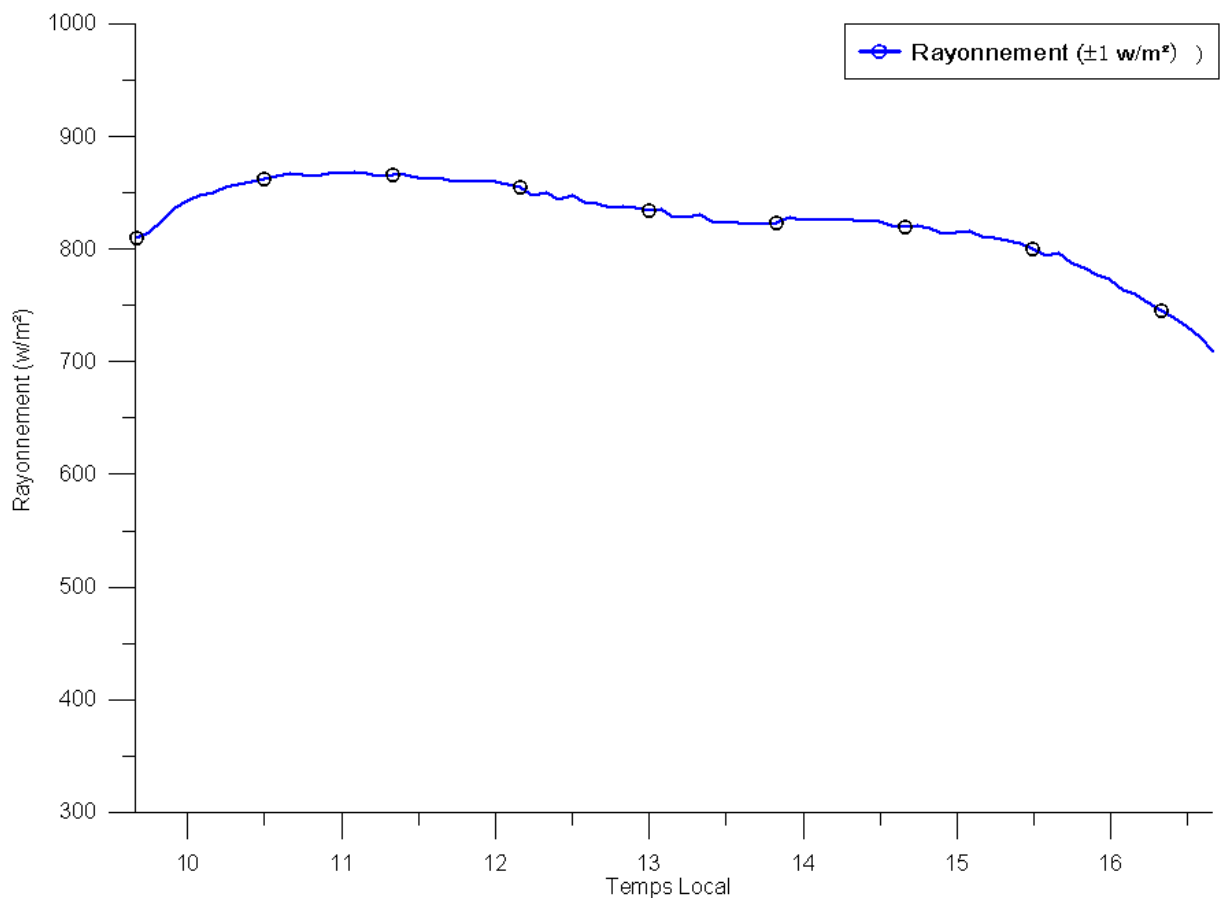


Fig.4.8. Rayonnement solaire direct normal du 09 Février 2013 (période hivernal, jour clair).

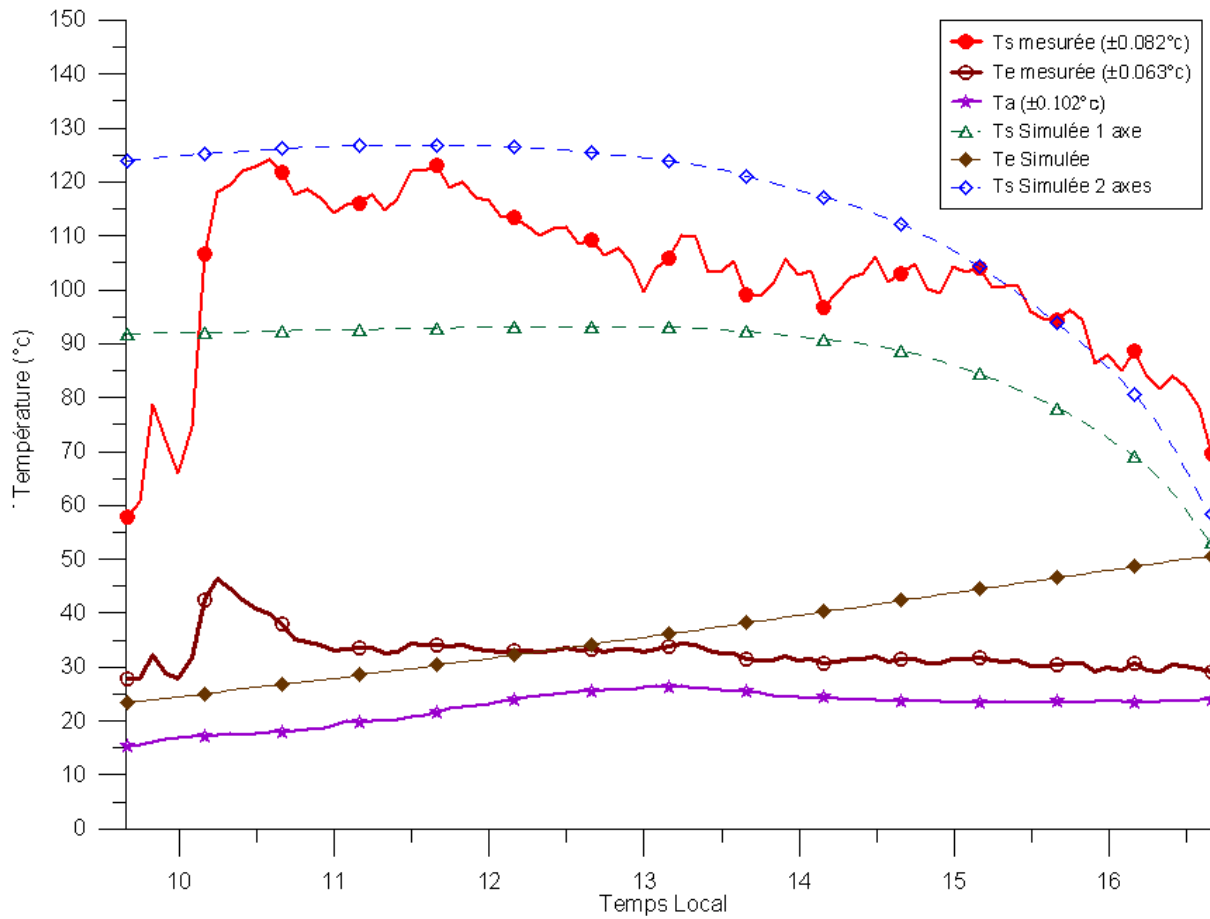


Fig.4.9. Profil des températures du test du 09 Février 2013.

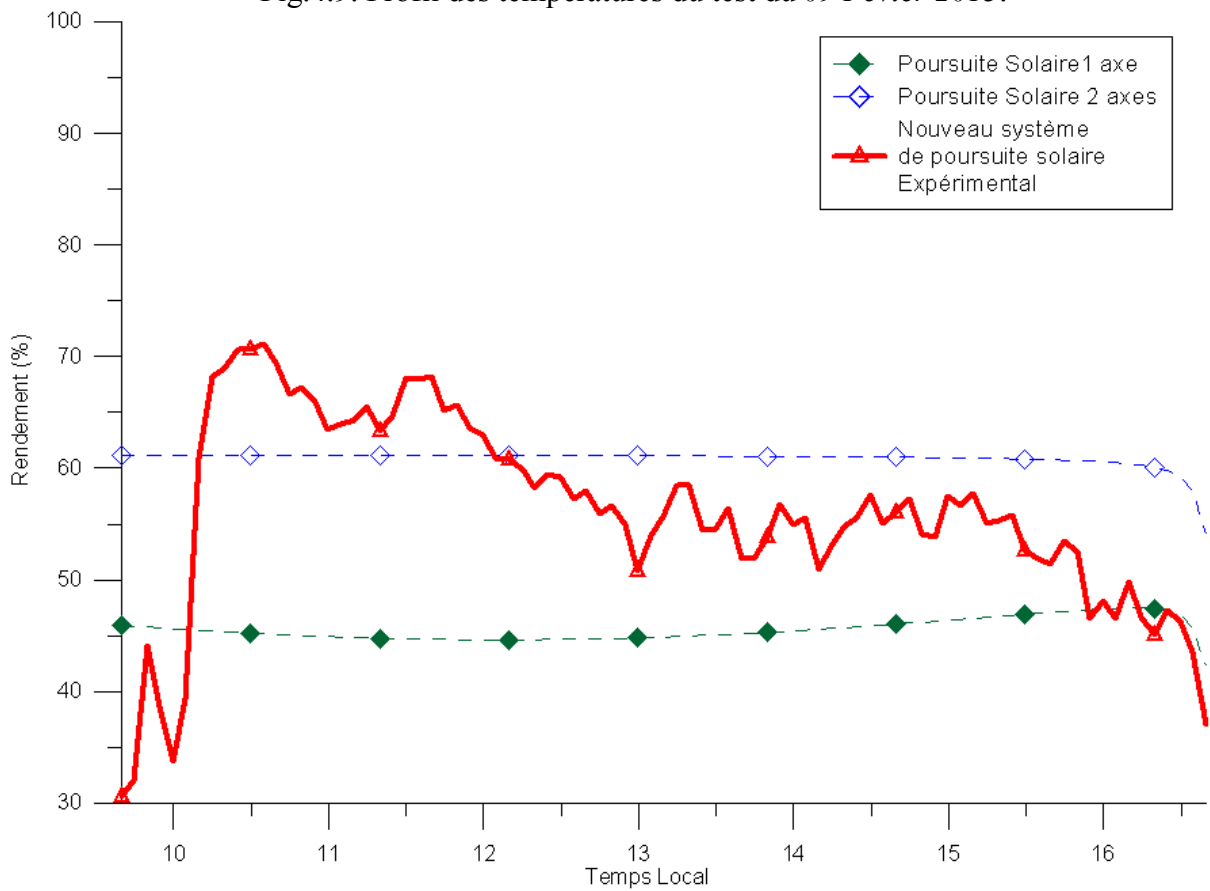


Fig.4.10. Rendement thermique du concentrateur le 09 Février 2013.

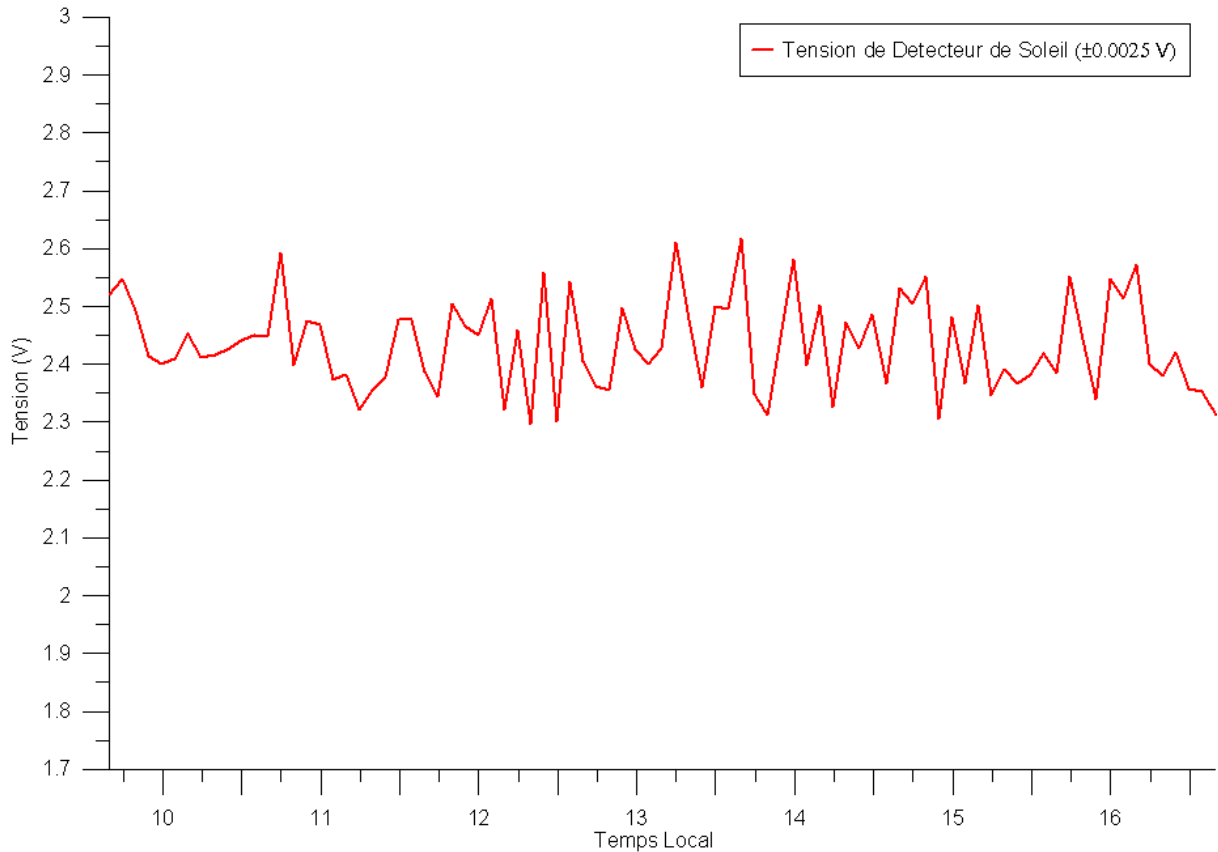


Fig.4.11. Signal délivré par le détecteur de position de soleil du 09 février 2013.

4.3.2 Tests durant la période d'hiver (jours moyens)

Pour la saison d'hiver et pour les jours clairs, notre nouveau système de poursuite solaire a prouvé son efficacité, reste à savoir le comportement du système pendant des jours moyens. Le test suivant est réalisé le 06 février 2013, qui est un jour moyen avec deux passages nuageux durant la période du test, le premier de 09h30 à 10h15 et le second de 12h10 à 13h15 (figure. 4.12). Une valeur maximale du rayonnement direct normal est de l'ordre de 830 W/m^2 est enregistrée à 10h10. A 09h00 début du test, en seulement 13 minutes, la température de sortie a augmenté de 30 à 65°C et resté maintenu pendant toute la journée entre 70 et 90°C .

On voit clairement qu'il y'a plus de perturbations des températures par rapport au deux premiers cas. En effet, l'influence du passage nuageux est visible sur le graphe des températures de la figure. 4.13. Une température de sortie maximale d'une valeur de 90°C est enregistrée à 12h00. Le passage nuageux n'a pas d'influence sur le signal du détecteur du soleil, comme on peut le constater sur la figure. 4.14, car la tension du détecteur reste toujours équilibrée quelque soit la valeur du rayonnement solaire, la tension du détecteur varie entre 2.3 et 2.6 V . Le rendement est maintenu pendant la journée alentour de 40% (figure. 4.15), au moment du passage nuageux, le rendement a augmenté à cause de l'inertie thermique du fluide caloporteur.

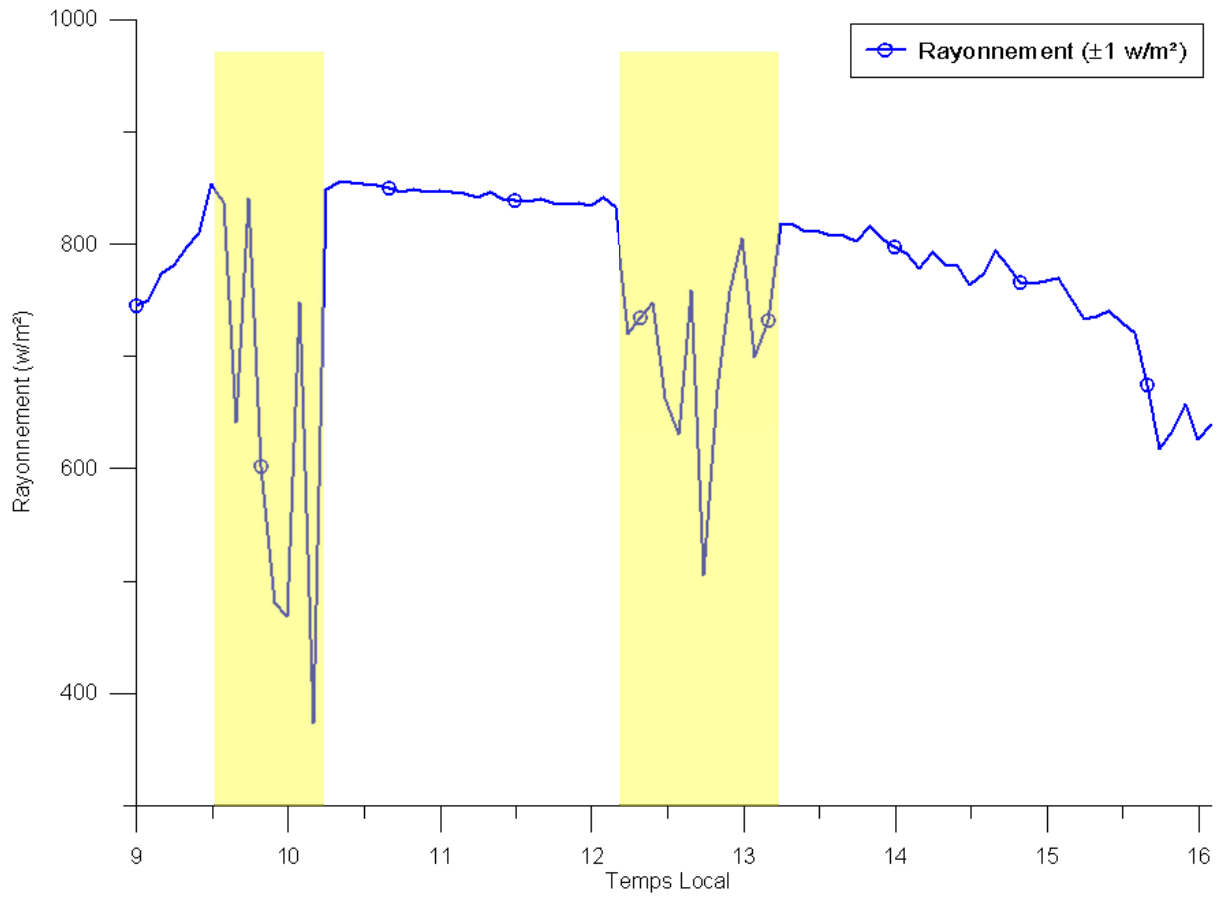


Fig.4.12. Rayonnement solaire direct normal du 06 Février 2013 (période hivernal, jour perturbé).

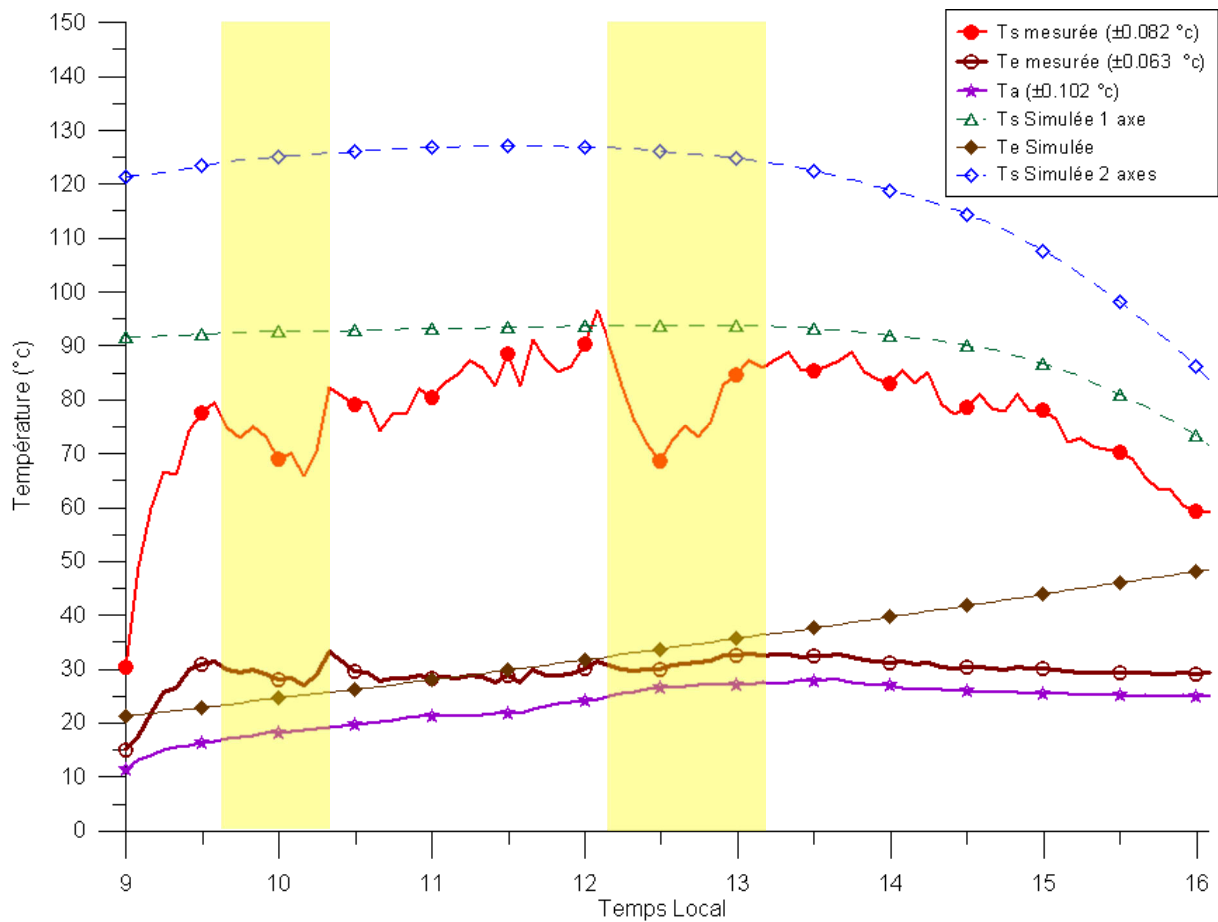


Fig.4.13. Profil des températures du test du 06 Février 2013.

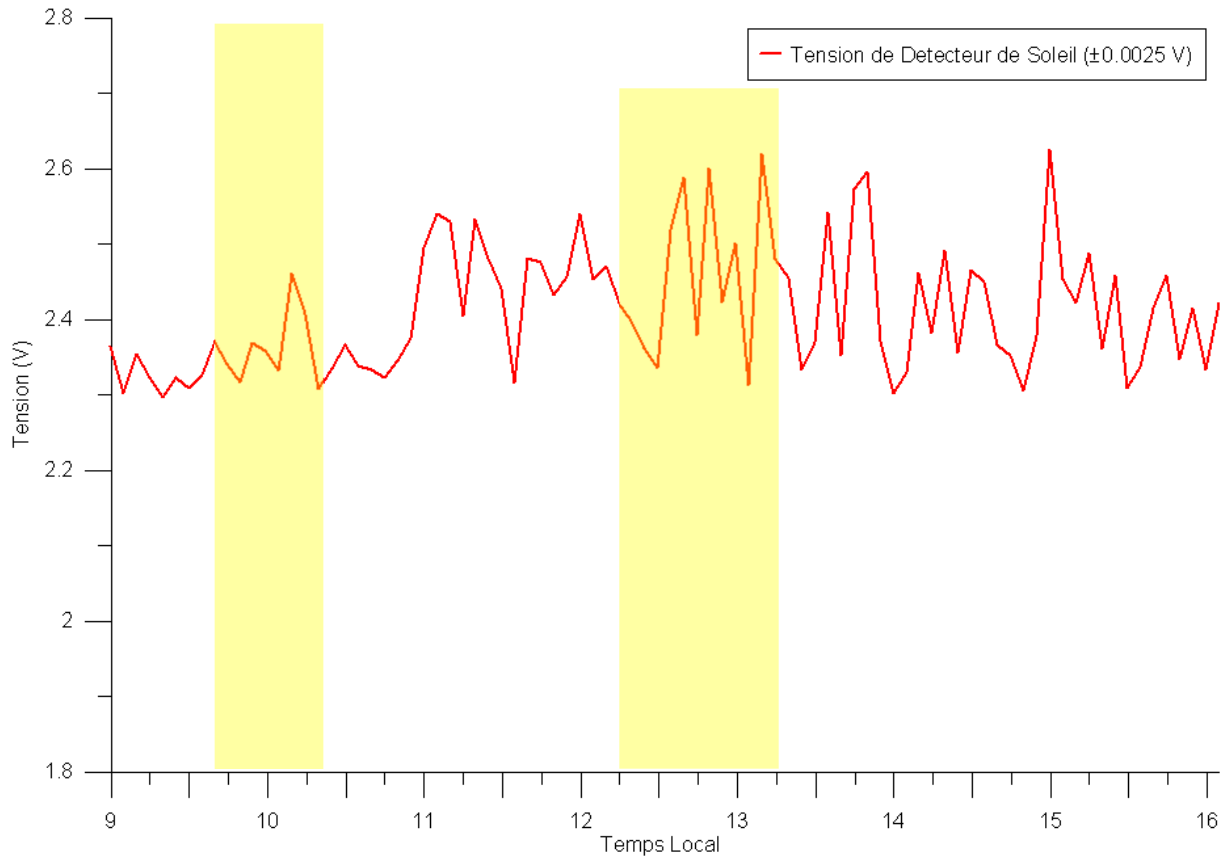


Fig.4.14. Signal délivré par le détecteur de position de soleil du 06 février 2013.

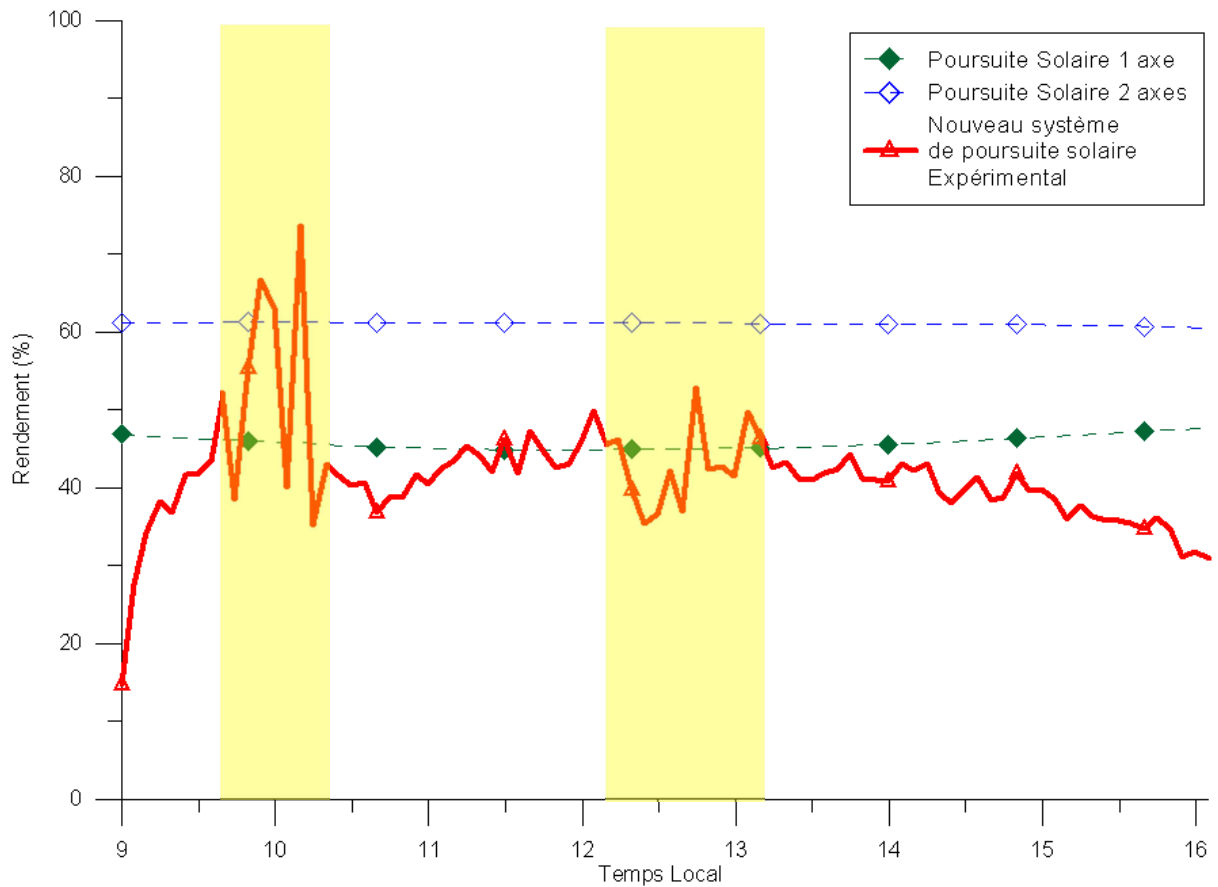


Fig.4.15. Rendement thermique du concentrateur le 06 Février 2013.

Le test effectué le 11/02/2013 (figure. 4.16), un jour d'éclairement moyen avec deux passages nuageux, le premier est grand d'intervalle, depuis 10h25 à 13h00, le deuxième de 15h25 à 16h30. Démarrage du teste à 9h10, arrêter à 17h00. Après le démarrage et en 20 min seulement, la température de sortie du fluide caloporteur a augmenté de 17 à 55°C. L'influence du passage nuageux est très visible sur le graphe des températures (figure. 4.17) et une grande perturbation est aussi observée sur le graphe du rendement (figure. 4.18), ces perturbations n'influx pas sur la qualité du signal du détecteur de la position (figure. 4.19). Cependant, nous avons remarqué que ; pendant les jours moyens et spécialement au moment des passages nuageux, la marge de fluctuations du signal du détecteur de position augmente considérablement (2.3 à 2.6 V). La seule explication à ce phénomène est l'augmentation de la valeur du rayonnement diffus, malgré le détecteur fonctionne correctement, et les deux LDRs reçoivent la même valeur de rayonnement si elles sont à l'ombre.

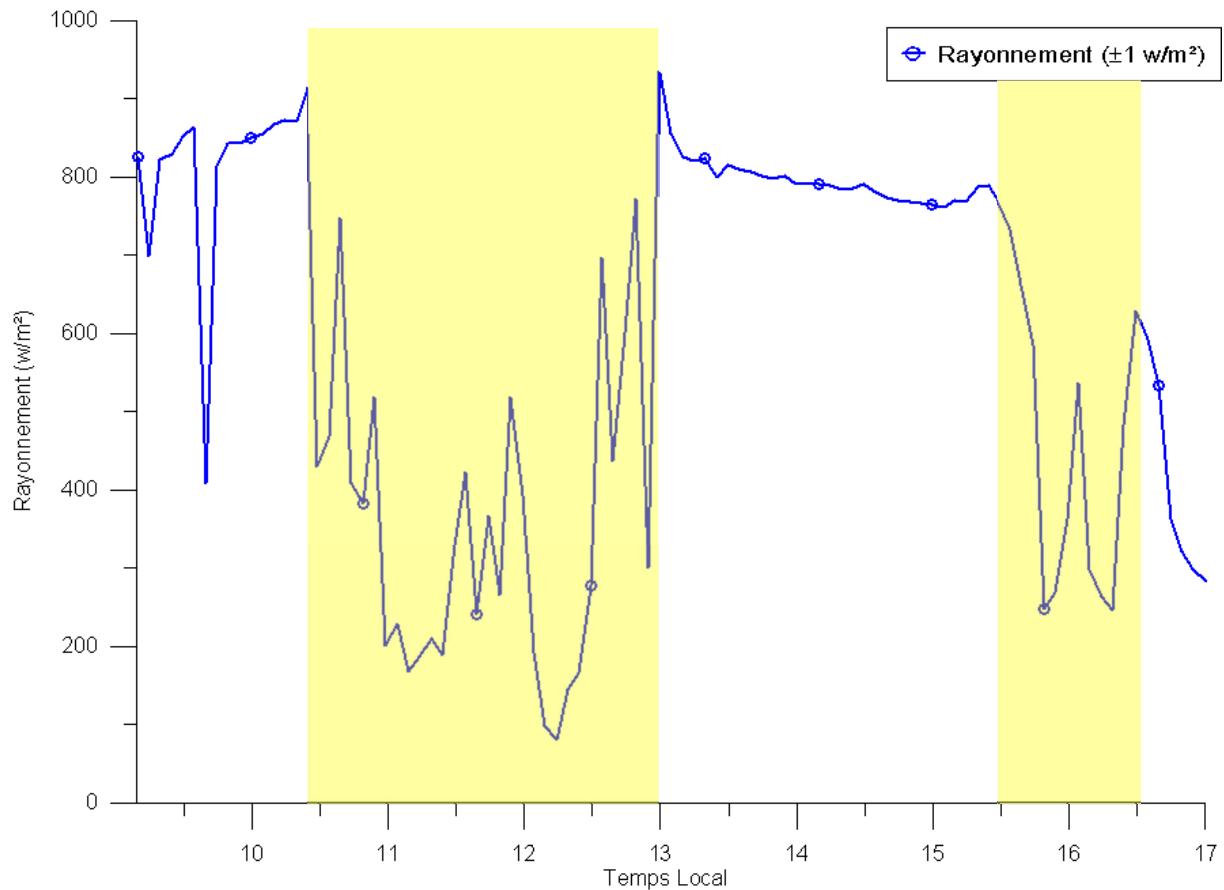


Fig.4.16. Rayonnement solaire direct normal du 11 Février 2013 (période hivernale, jour perturbé).

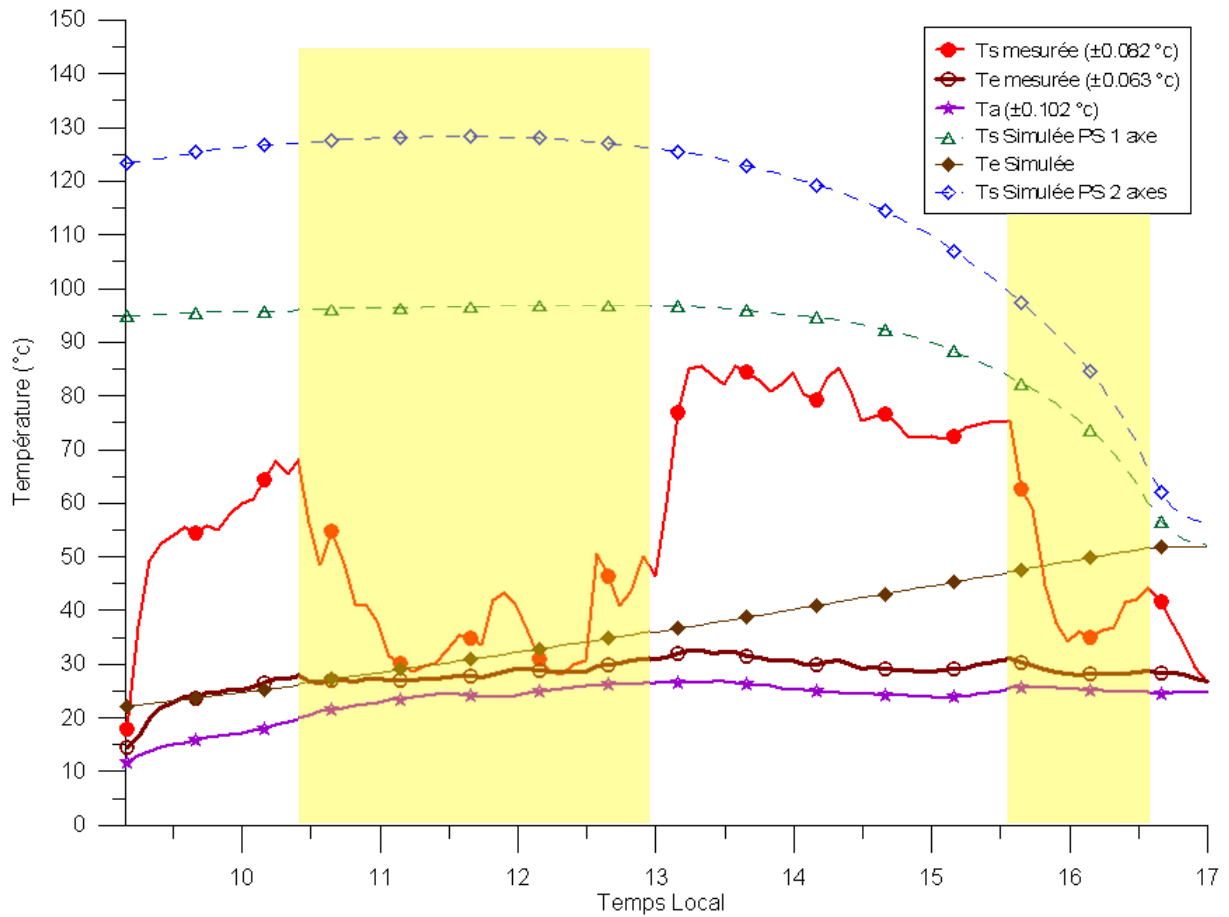


Fig.4.17. Profil des températures du test du 11 Février 2013.

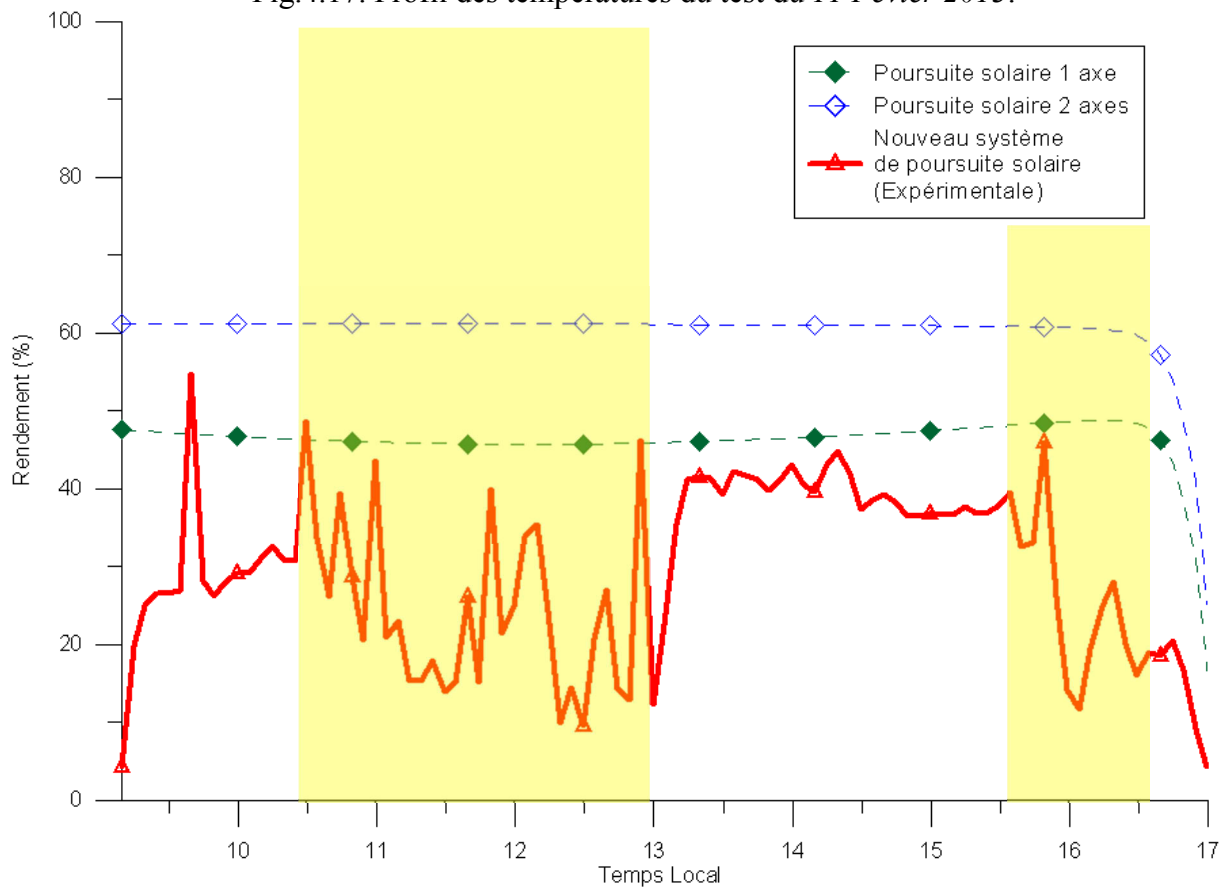


Fig.4.18. Rendement thermique du concentrateur le 11 Février 2013.

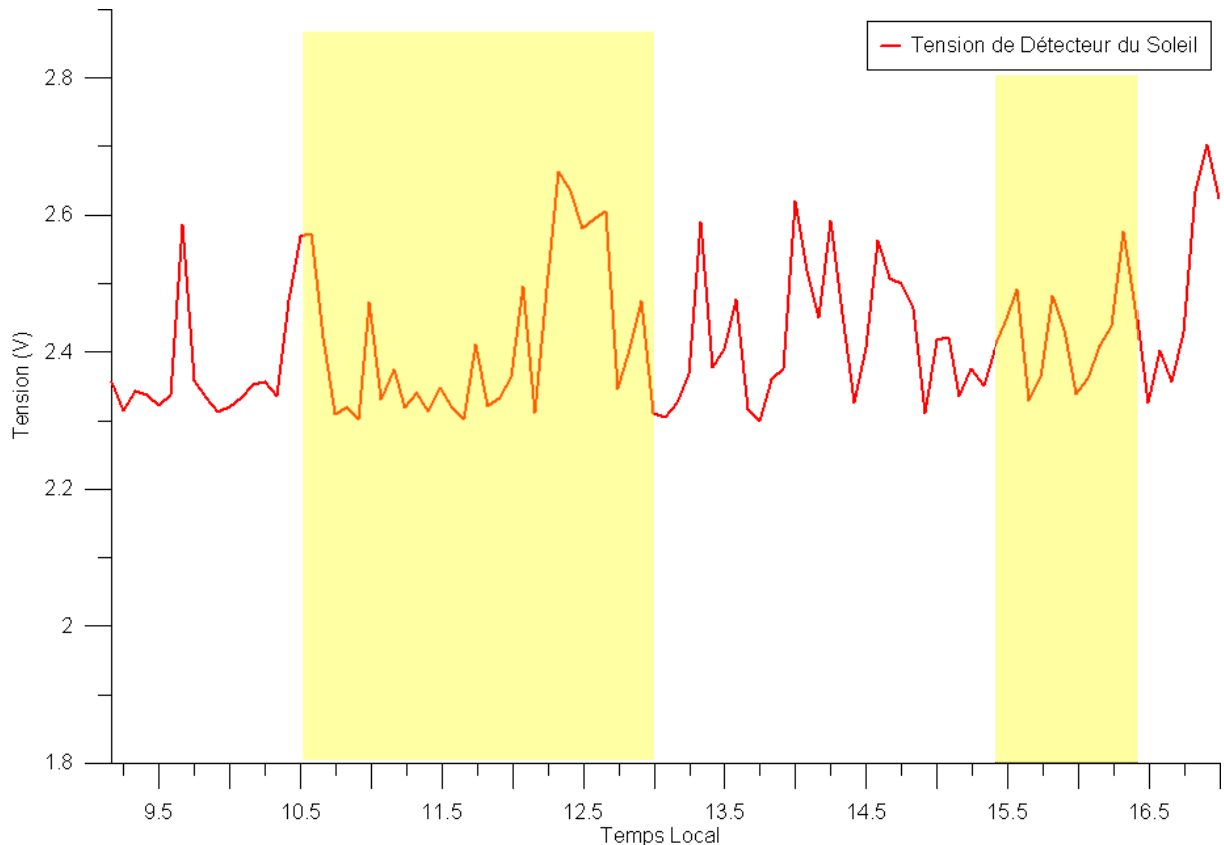


Fig.4.19. Signal délivré par le détecteur de position de soleil du 11 février 2013.

4.3.3 Tests durant la période du printemps

Le test effectué le 21/03/2013 (figure. 4.20), c'est un jour très clair et relativement venté au début de la journée. Le test avait commencé à 9h00 jusqu'à 16h30, pendant cette période le système de poursuite a fonctionné d'une façon parfaite (figure. 4.21). Sur la figure. 4.22, l'influence du vent sur les valeurs des températures de sortie est nettement visible au début de la journée vu que l'absorbeur n'est pas couvert. En effet, les valeurs de la température fluctue entre 70 et 110°C la matinée de 9h00 à 14h00 et elle est comprise entre 110 et 130°C l'après midi, ce qui acceptable car la vitesse du vent a diminué pendant cette période.

Nous pouvons aussi remarqué que le rendement du système est très faible au début de la journée, à cause effectivement du vent (figure. 4.23). A partir de 14h00, le rendement se rapproche de celui de la simulation, qui ; par ailleurs ne prend pas en compte l'effet de la vitesse du vent.

Durant cette saison à Ghardaïa, nous avons rencontré une grande difficulté à réaliser nos tests, c'est pour cela nous n'avons pas beaucoup de données. La saison du printemps à Ghardaïa est caractérisée par un rayonnement très important et un ciel la plus part du temps dégagé, le seul inconvénient est la vitesse du vent, qui est très élevée à cette période de l'année, suivi, pour certains jours; par des forts vents de sables.

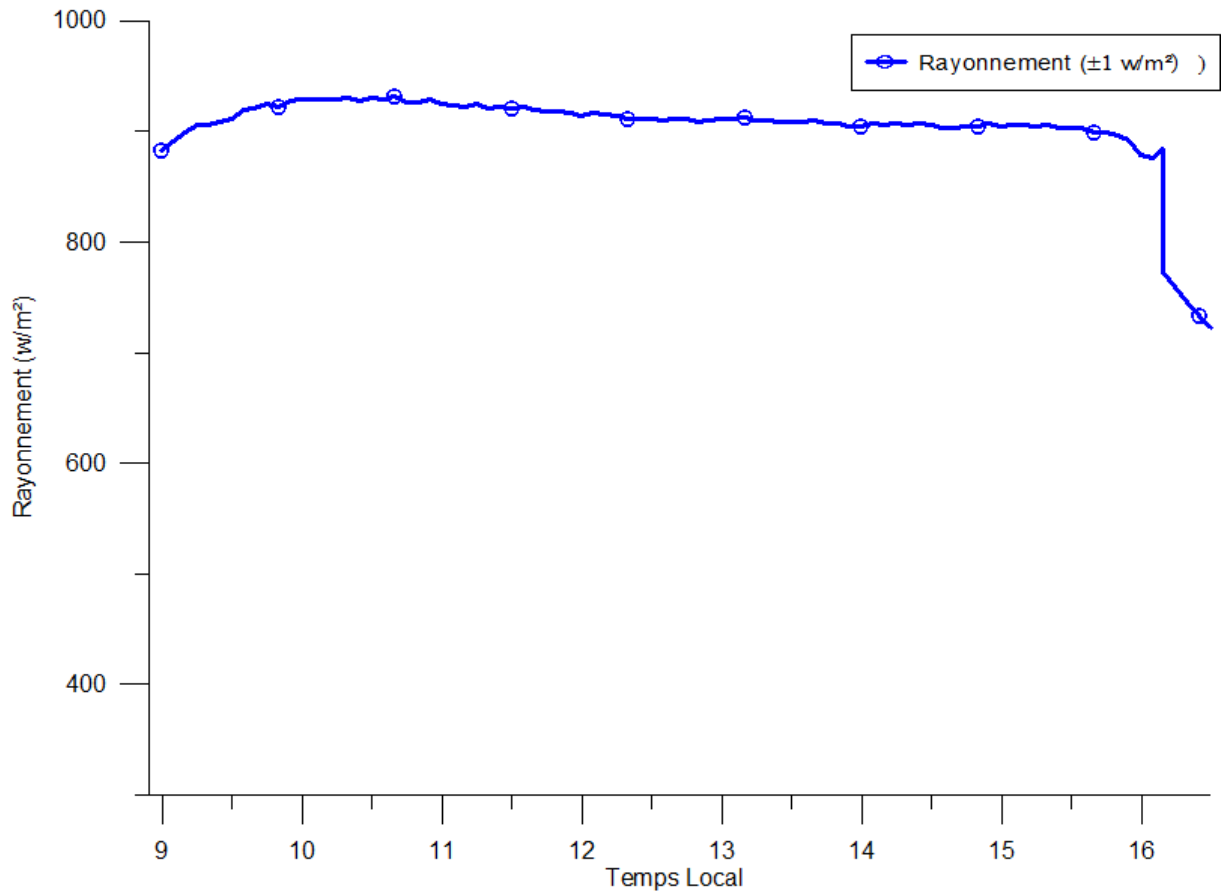


Fig.4.20. Rayonnement solaire direct normal du 21 Mars 2013 (jour peu perturbé).

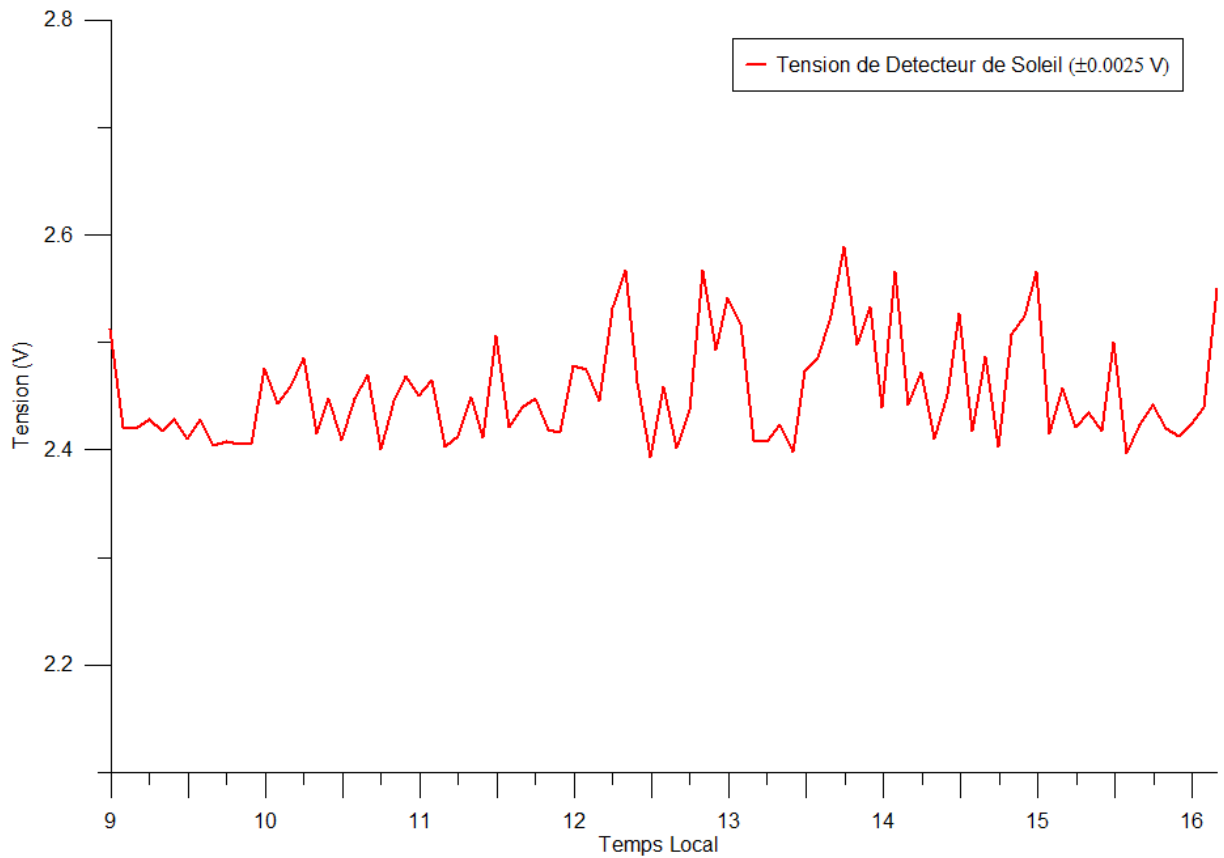


Fig.4.21. Signal délivré par le détecteur de position de soleil du 21 Mars 2013.

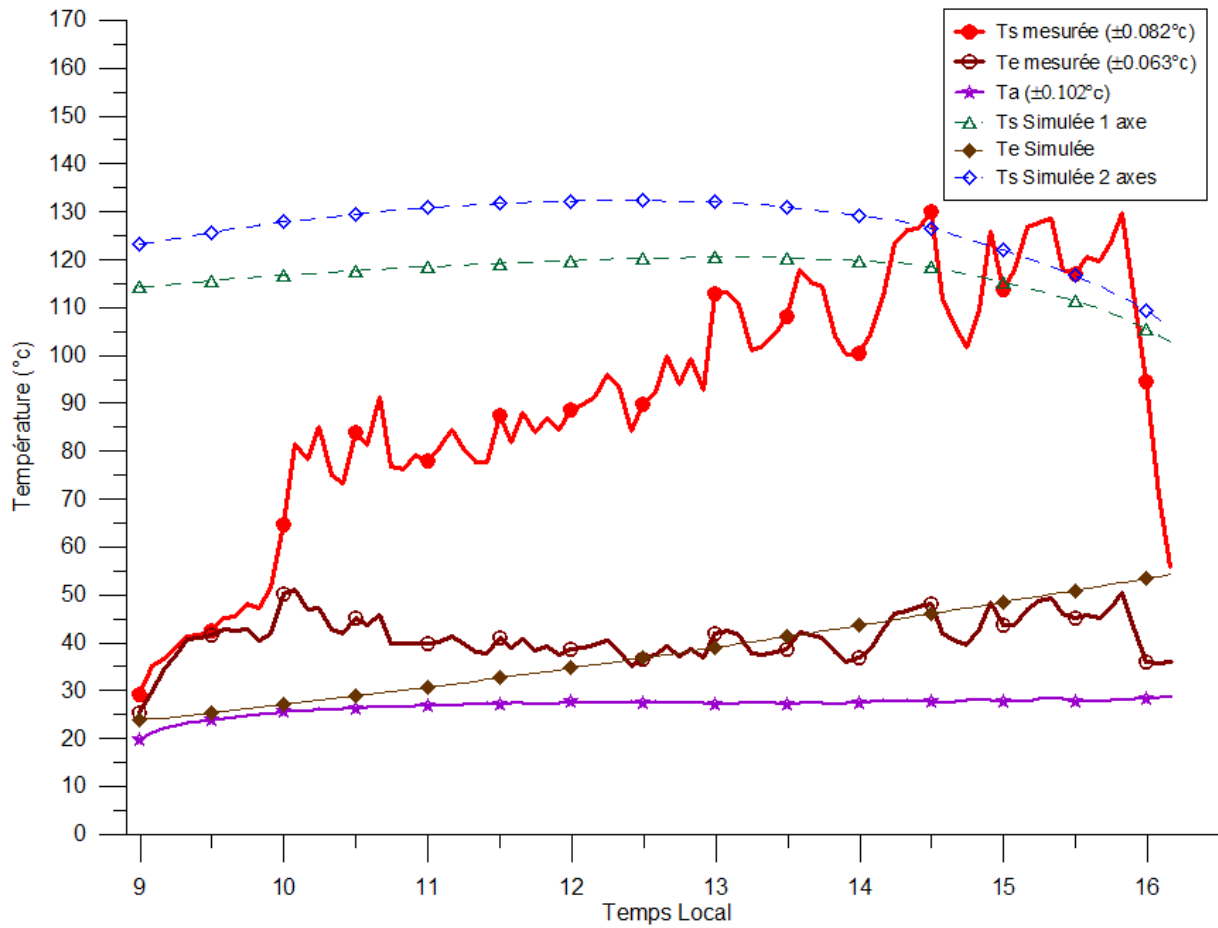


Fig.4.22. Profil des températures du test du 21 Mars 2013.

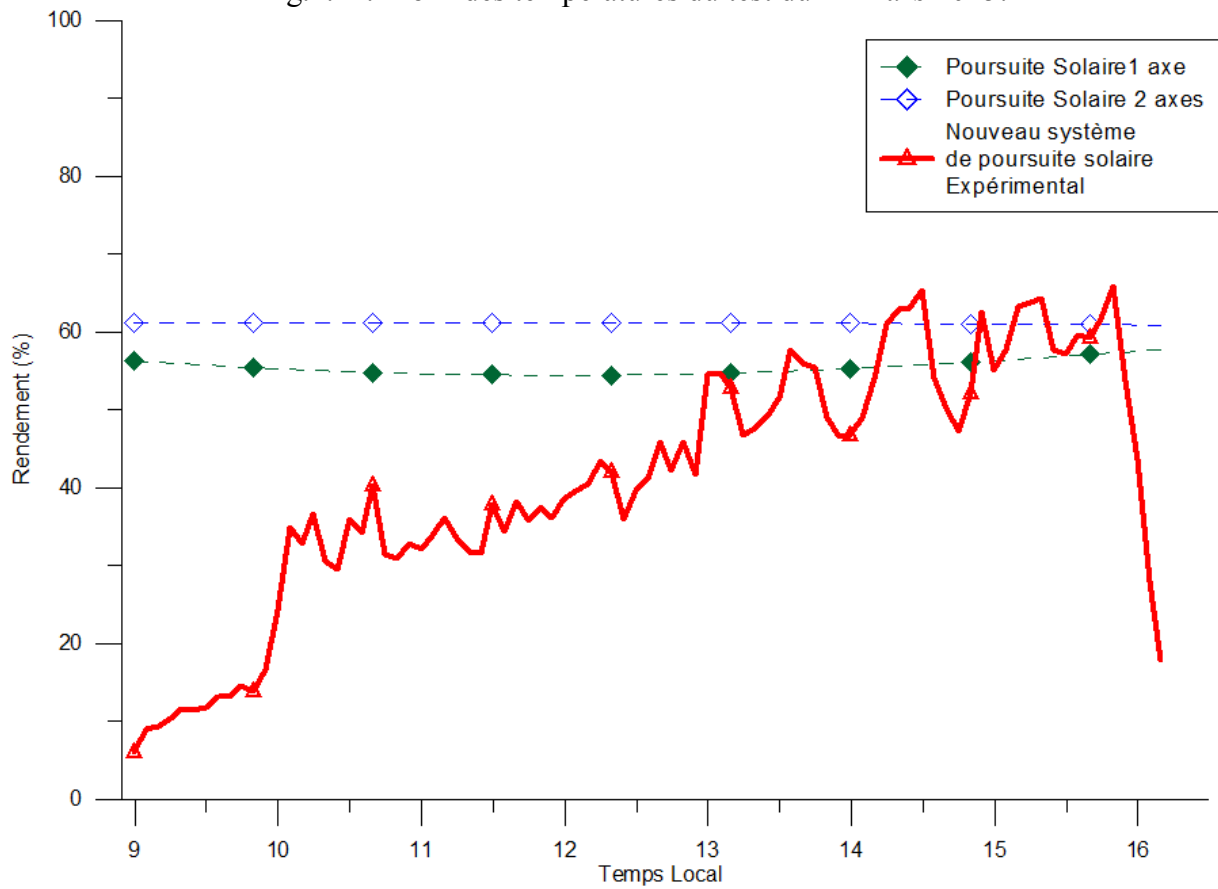


Fig.4.23. Rendement thermique du concentrateur le 21 Mars 2013.

4.3.4 Tests durant la période d'automne

Après avoir testé le prototype avec le nouveau système de poursuite solaire en hiver et le printemps, nous allons maintenant le tester durant la saison d'automne. Le premier test est effectué le *12 Octobre 2011*, c'était un jour clair (*figure. 4.24*) avec un rayonnement direct normal maximal de 950 W/m^2 et à *8h20* nous avons commencé le test. La température de sortie du fluide caloporteur est de 34°C au début du test et en *15* minutes seulement, la température a augmenté jusqu'à 120°C . Le système de poursuite solaire a maintenu la température de sortie entre 120 et 140°C toutes la journée (*figure. 4.25*). Dans ce cas aussi, il y'a effectivement des détente de vapeur mais peut influençables. Sur ce diagramme, il est aussi possible de lire la température ambiante durant la journée du test. Le nouveau système de poursuite solaire a prouvé une efficacité remarquable et un rendement du système autour de 60% (*figure. 4.26*), cette valeur est comprise entre la valeur de simulation par *Trnsys* pour le système de poursuite à un seul axe et deux axes. La marge des fluctuations dans le signal du détecteur de position de soleil sont très petites (4 et 4.2 V) et ceci est du au faite que la valeur du rayonnement diffus est faible durant cette saison (*figure. 4.27*). On peut dire que pour ce test notre prototype muni du nouveau système de poursuite solaire fonction avec une grande efficacité pendant la saison d'automne.

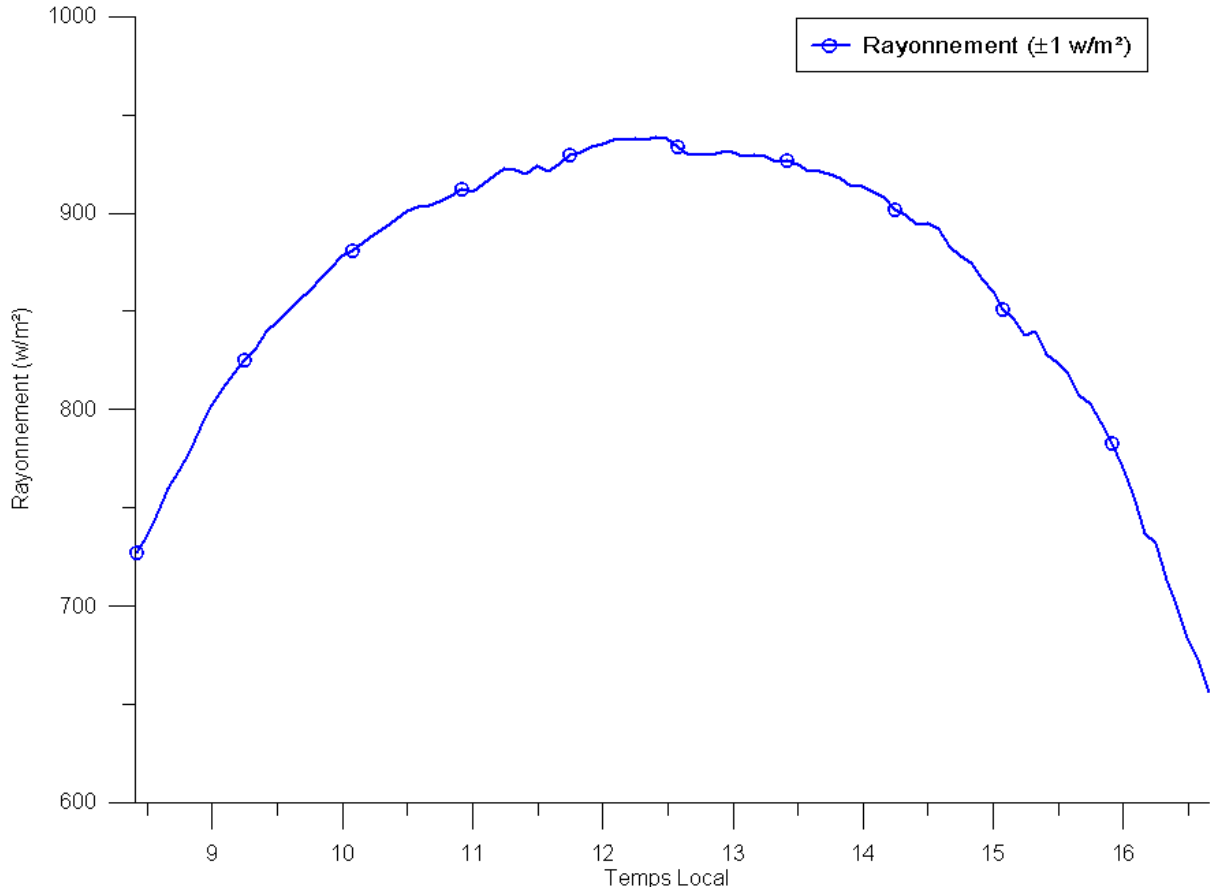


Fig.4.24. Rayonnement solaire direct normal du *12 Octobre 2011* (période d'automne, jour clair).

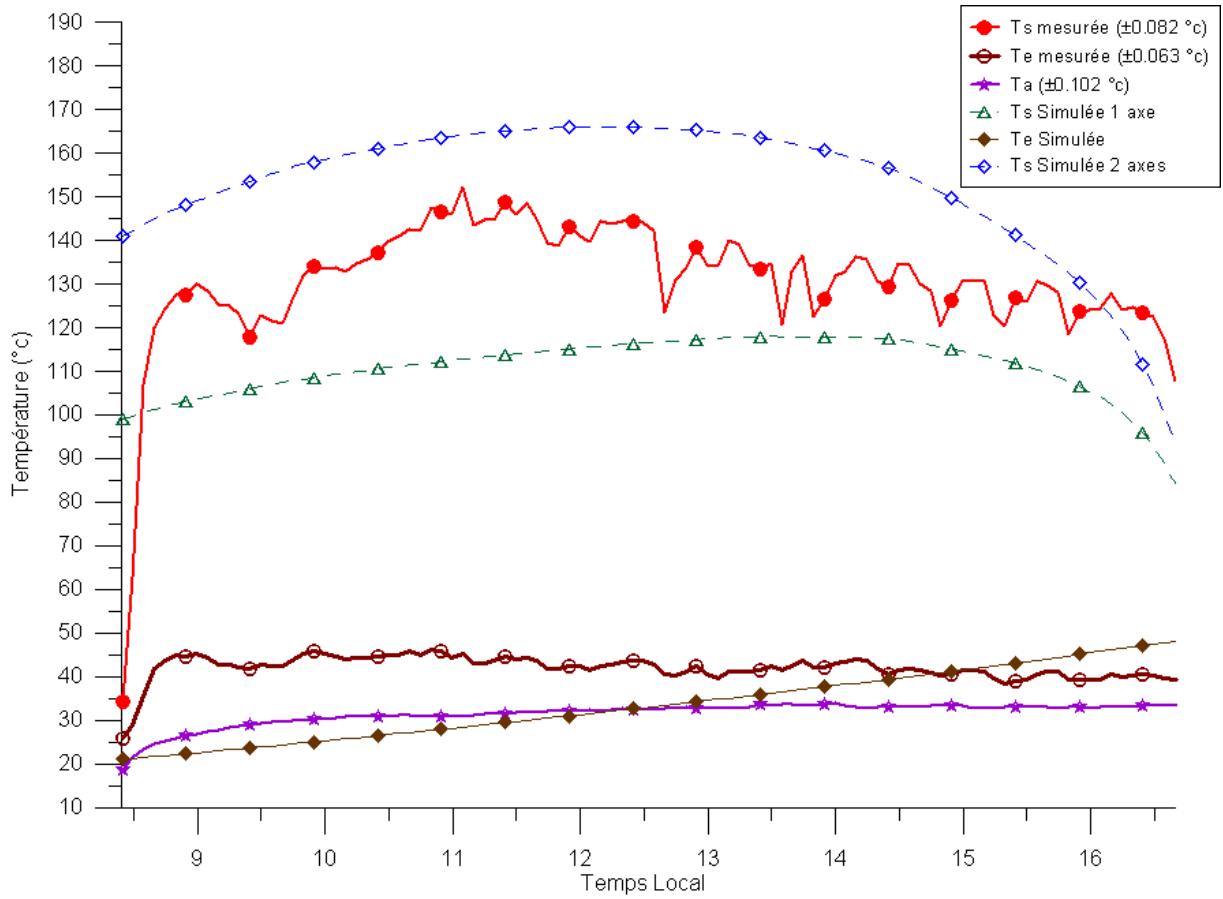


Fig.4.25. Profil des températures du test du 12 Octobre 2011.

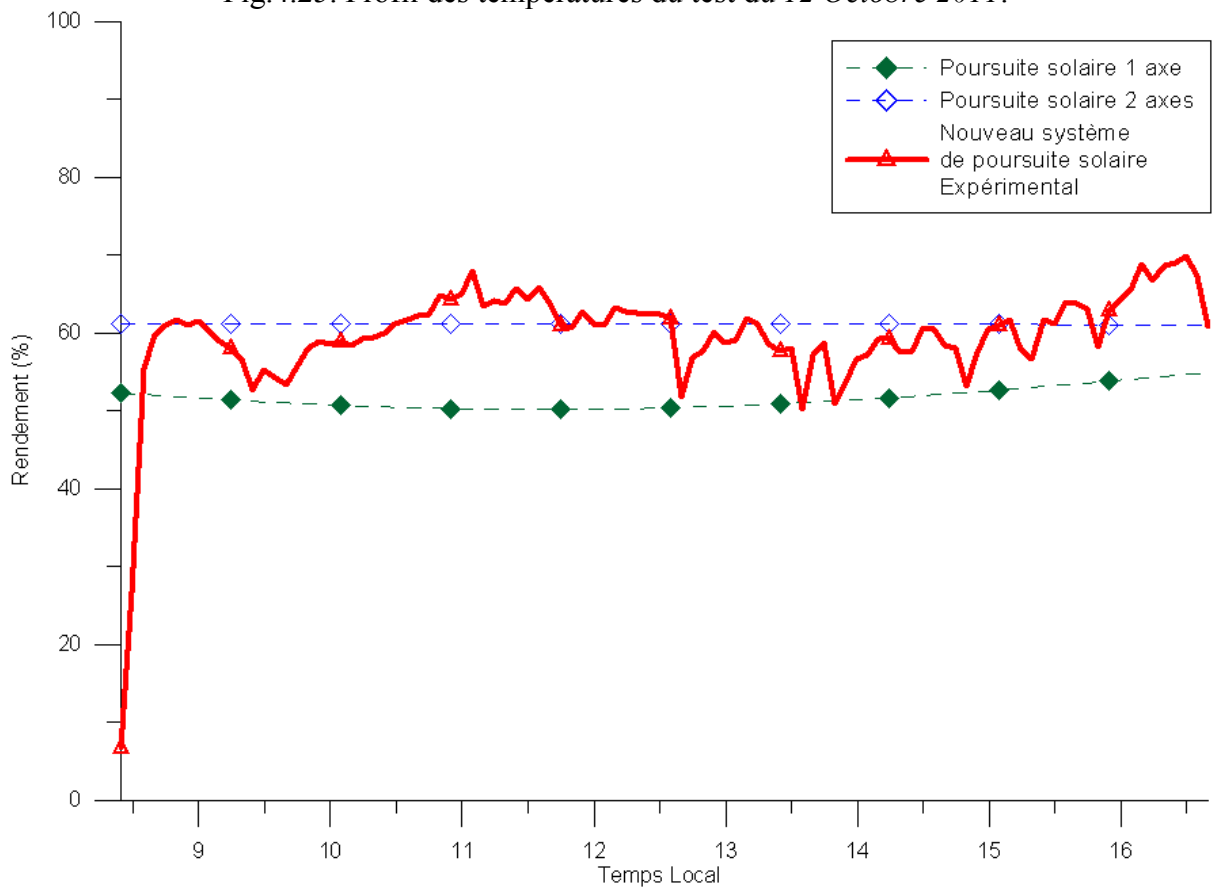


Fig.4.26. Rendement thermique du concentrateur le 12 Octobre 2011.

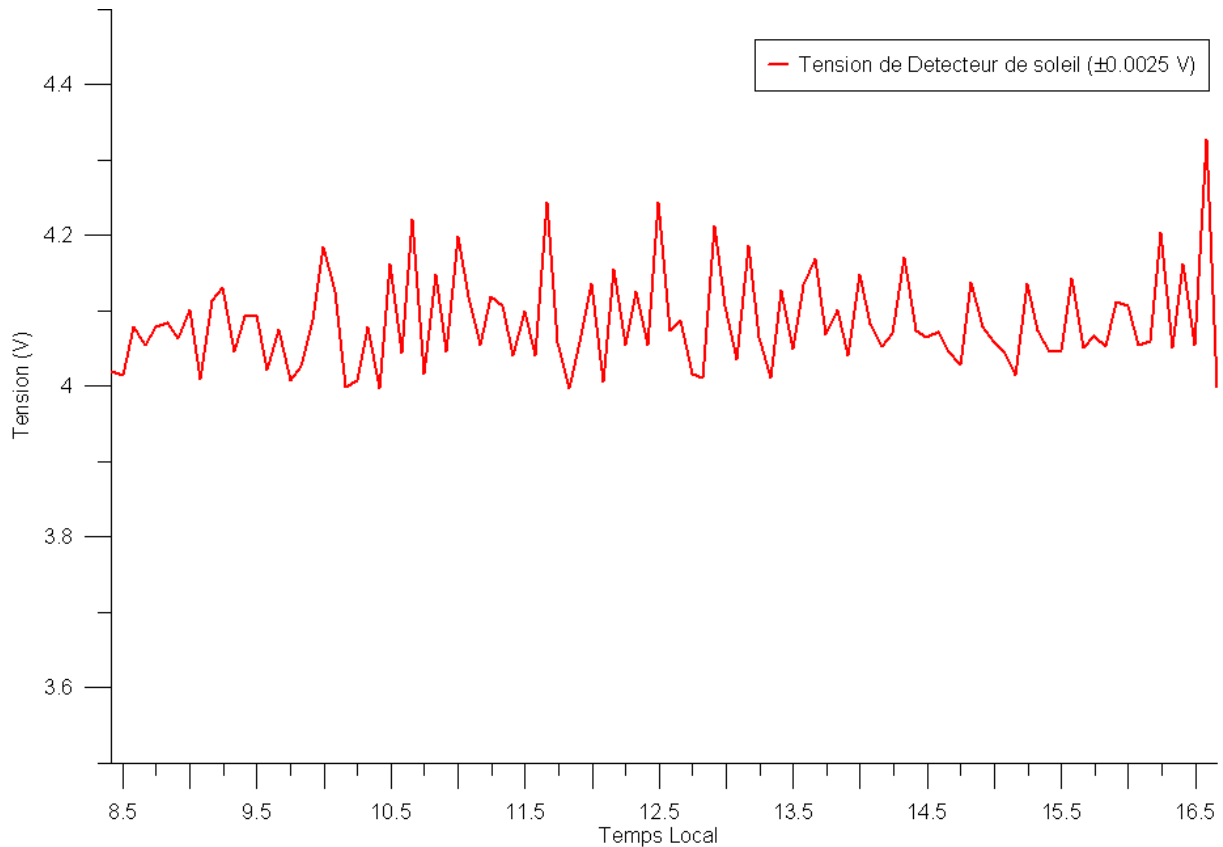


Fig.4.27. Signal délivré par le détecteur de position de soleil du 12 Octobre 2011.

4.3.5 Tests durant la période d'été

Une fois le prototype testé durant les trois saisons hiver, printemps et automne, on doit maintenant le tester durant le période d'été. La première journée du test estivale sera effectuée le 17 Août 2011 *figure. 4.28*, c'est une journée claire caractérisée par des hautes valeurs de températures ambiantes (température journalière moyenne de 40°C) et un rayonnement diffus très élevé due aux aérosols (facteur de Linke élevé, il est égal à 4.5 [85]). La valeur du rayonnement direct normal maximale enregistrée est de 800 W/m^2 . Commencement du test à 9h30, arrêt à 17h00.

Le concentrateur cylindro-parabolique suit le même comportement que pour les tests précédents, la température est maintenue entre 85 et 105°C durant la journée, un maximum est enregistré l'après-midi à 15h30 (voir *figure. 4.29*). La valeur du rendement expérimental journalier est de l'ordre de 49.21% (*figure. 4.30*), cette valeur est très proche de la valeur de simulation, qui est de grandeur ; estimée élevée et égale entre les deux types de poursuite et ceci est due à la élevée de la hauteur du soleil en cette saison. Le signale du détecteur de position du soleil illustré sur le graphe de la *figure. 4.31* enregistre des fluctuations considérables dues au phénomène de détente expliqué précédemment.

Contrairement aux tests effectués en hiver, la valeur de la température d'entrée du fluide caloporteur augmente linéairement pendant la journée, ceci est pour cause la température ambiante élevée durant cette journée, ce qui ne laisse pas suffisamment de temps au radiateur pour évacuer toutes la chaleur collectée en raison de l'équilibre thermique avec l'environnement. Une fois de plus, le système de poursuite solaire a également prouvé une efficacité remarquable durant la saison d'été.

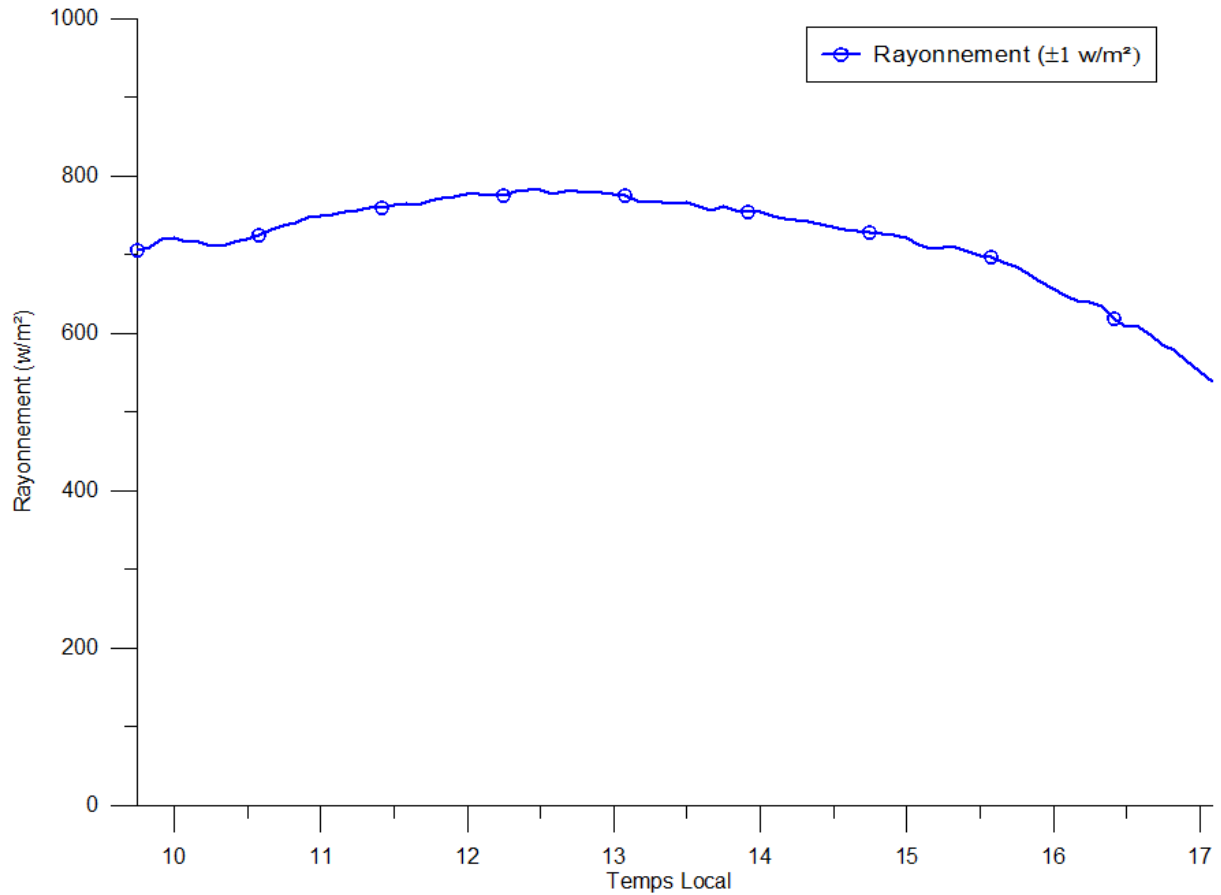


Fig.4.28. Rayonnement solaire direct normal du 17 Août 2012 (période estivale, jour clair).

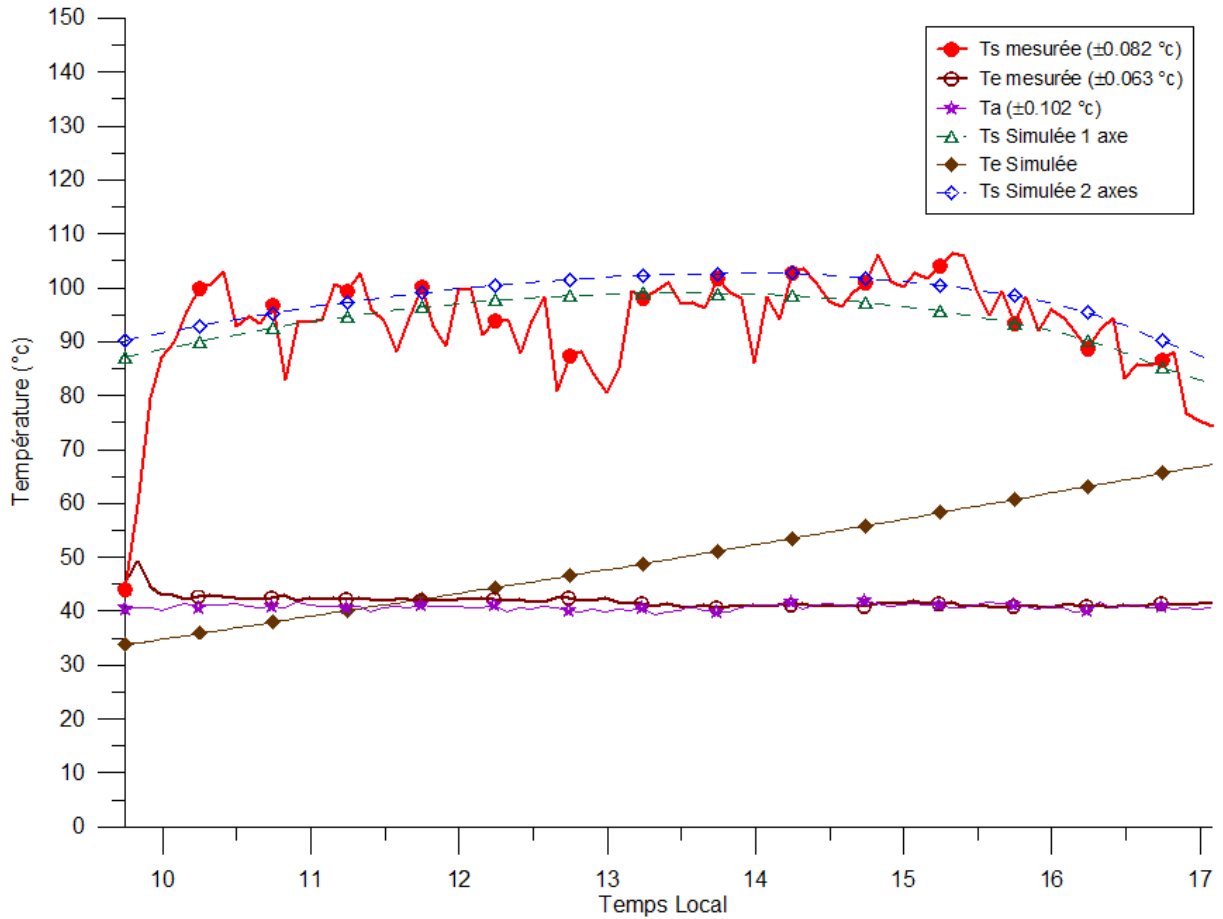


Fig.4.29. Profil des températures du test du 17 Août 2012.

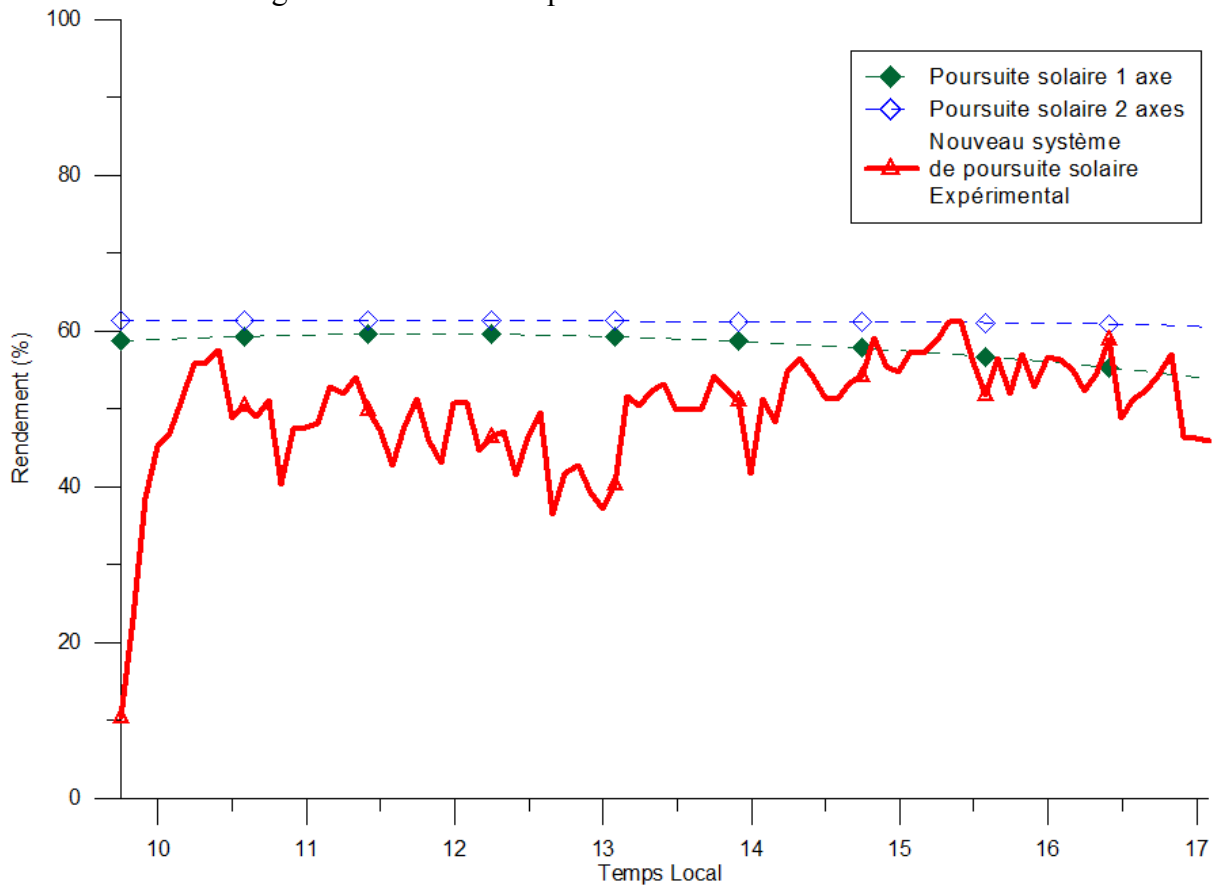


Fig.4.30. Rendement thermique du concentrateur le 17 Août 2012.

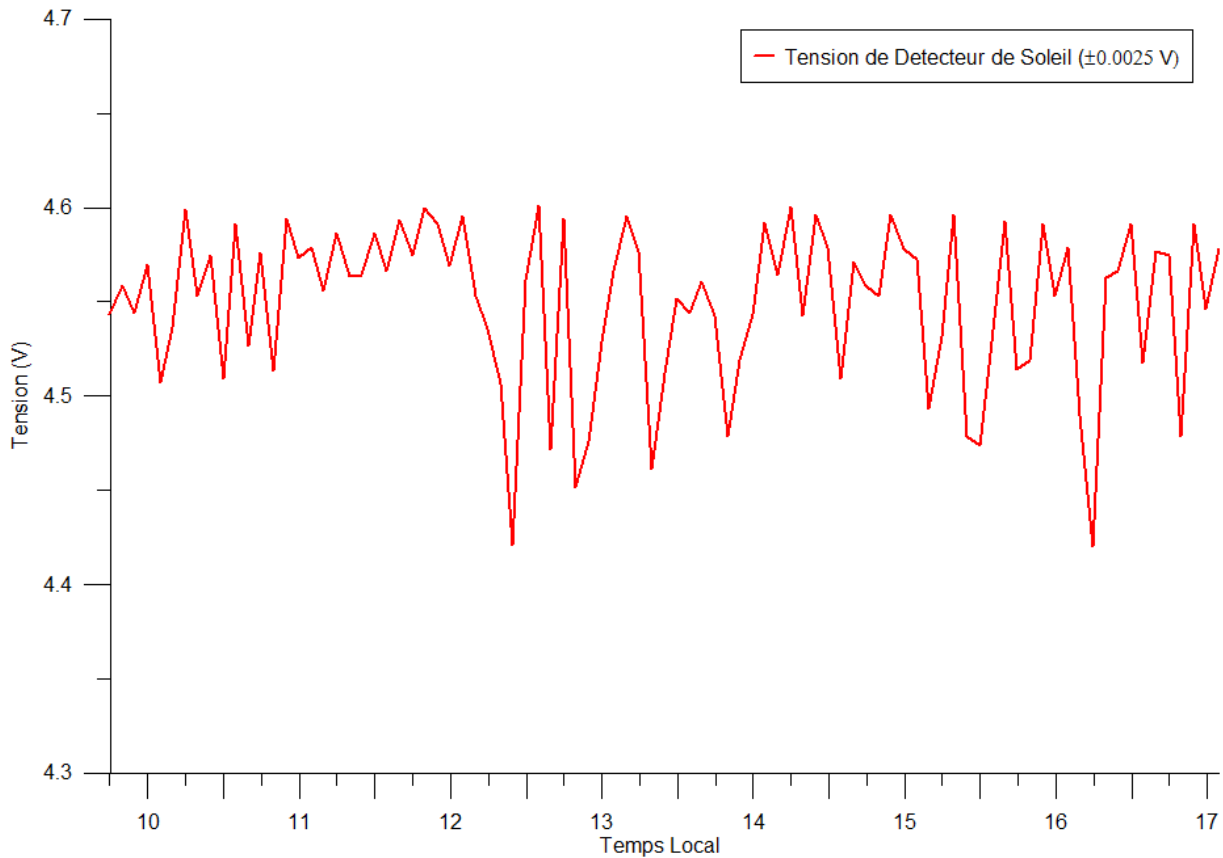


Fig.4.31. Signal délivré par le détecteur de position de soleil du 17 Août 2012.

Le second test d'été est effectué le 21 Août 2012 (figure. 4.32), qui est un jour clair, avec un après midi caractérisé par un petit passage nuageux. L'influence de ce dernier sur la température de sortie du fluide caloporteur est visible sur le graphe de la (figure. 4.33), ainsi que sur le graphe du rendement thermique du système de la (figure. 4.34). Un maximum de température de sortie est enregistré de 105°C à 13h00. Concernant, le signal du détecteur de position du soleil, le phénomène de fluctuation des valeurs du détecteur se répète à partir de 13h00 l'après-midi (figure. 4.35), le rendement est autour de 50%. En été aussi, le système de poursuite solaire proposé et réalisé a également prouvé son efficacité et précision, que ce soit pour un jour clair ou moyen.

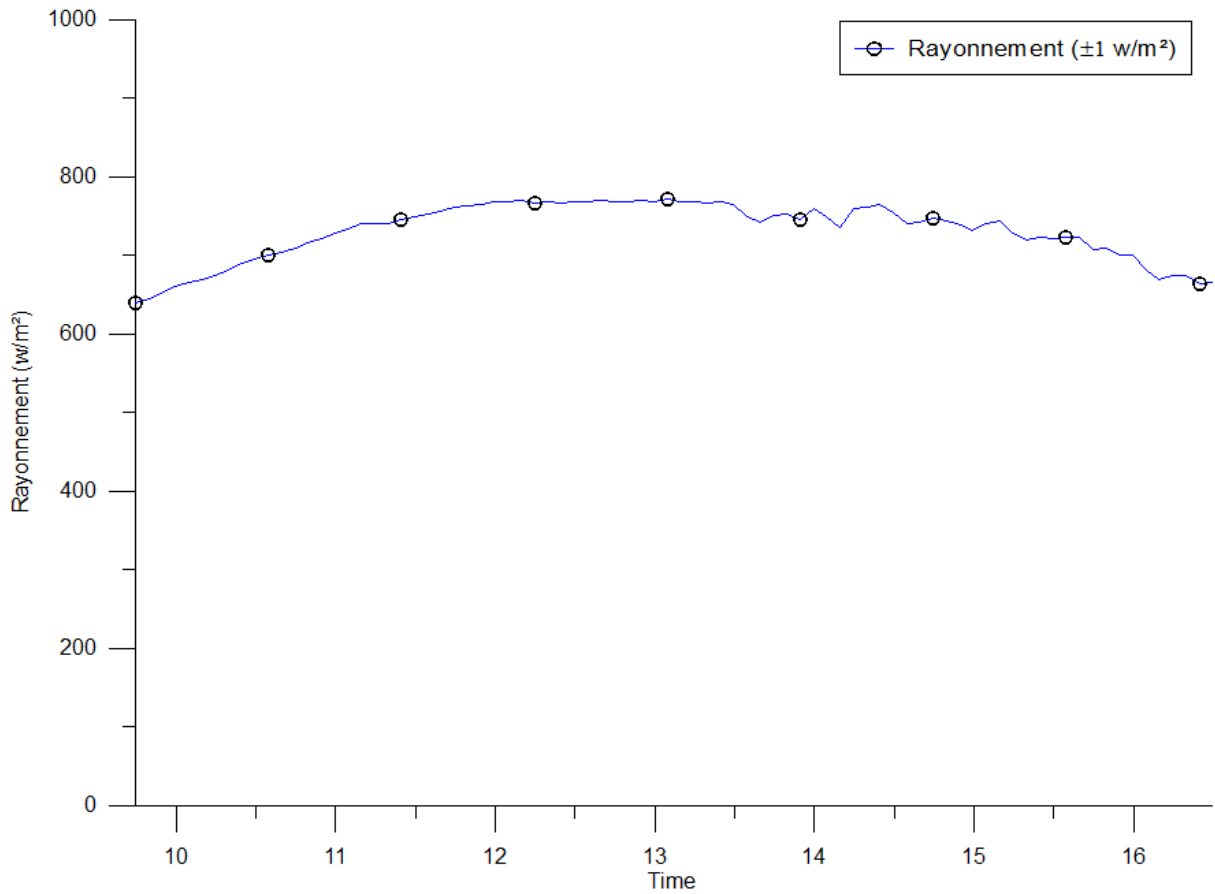


Fig.4.32. Rayonnement solaire direct normal du 21 Août 2012 (période estivale, jour mi-clair).

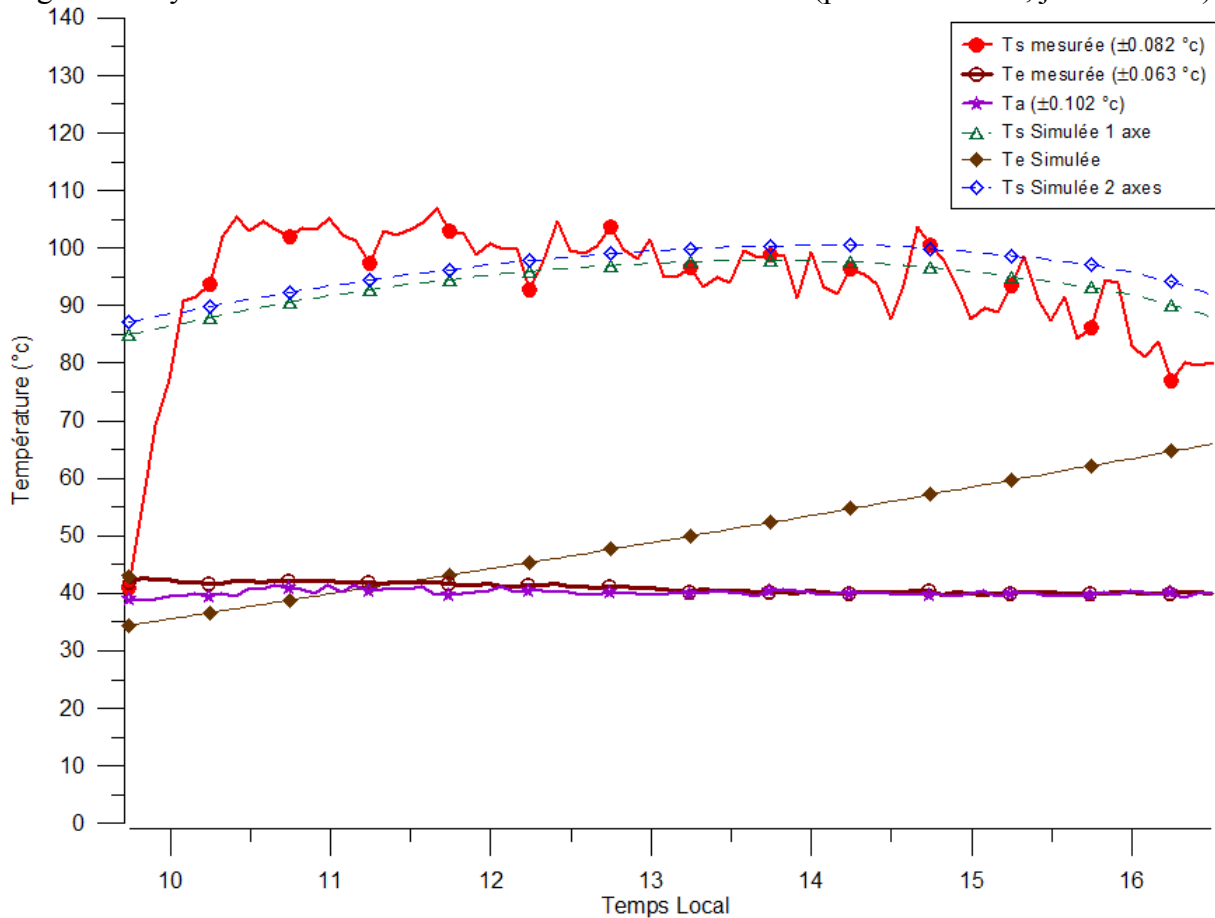


Fig.4.33. Profil des températures du test du 21 Août 2012.

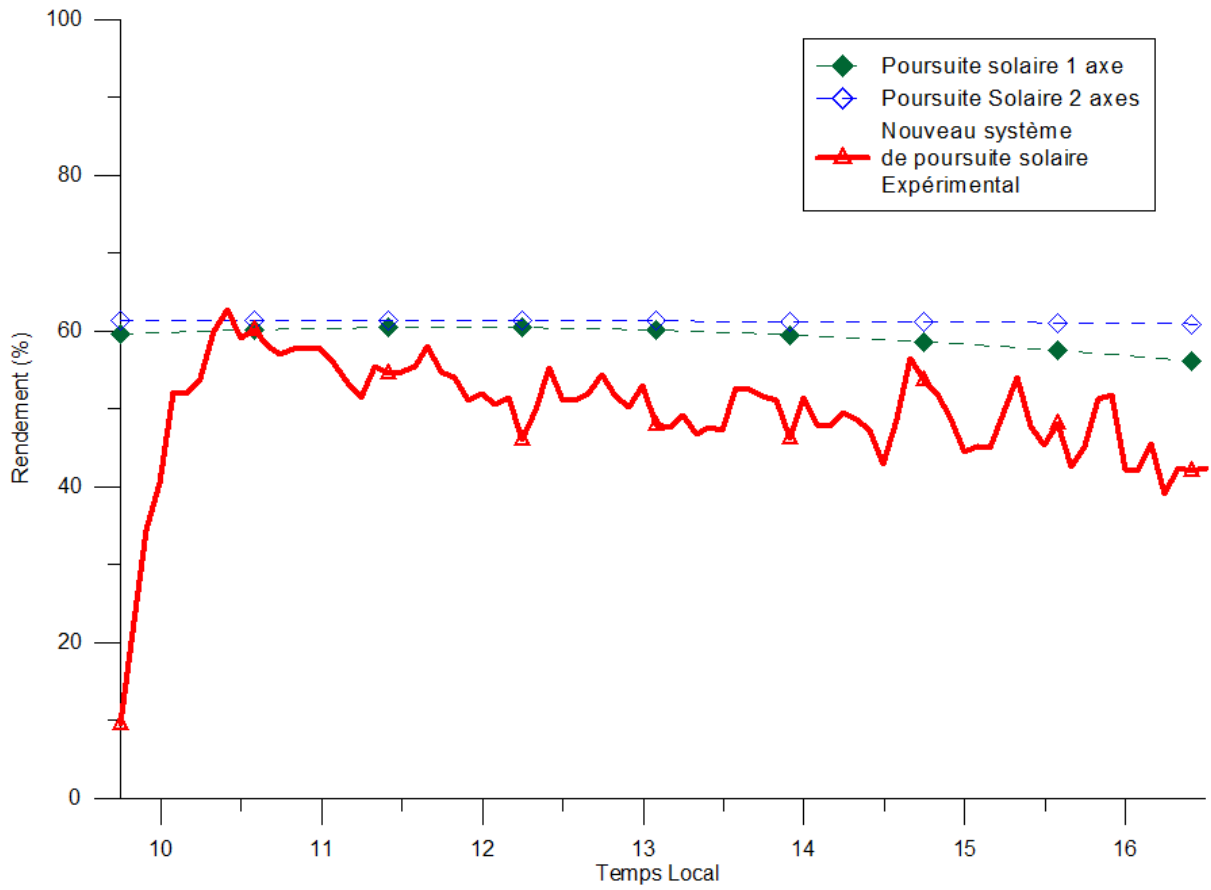


Fig.4.34. Rendement thermique du concentrateur le 21 Août 2012.

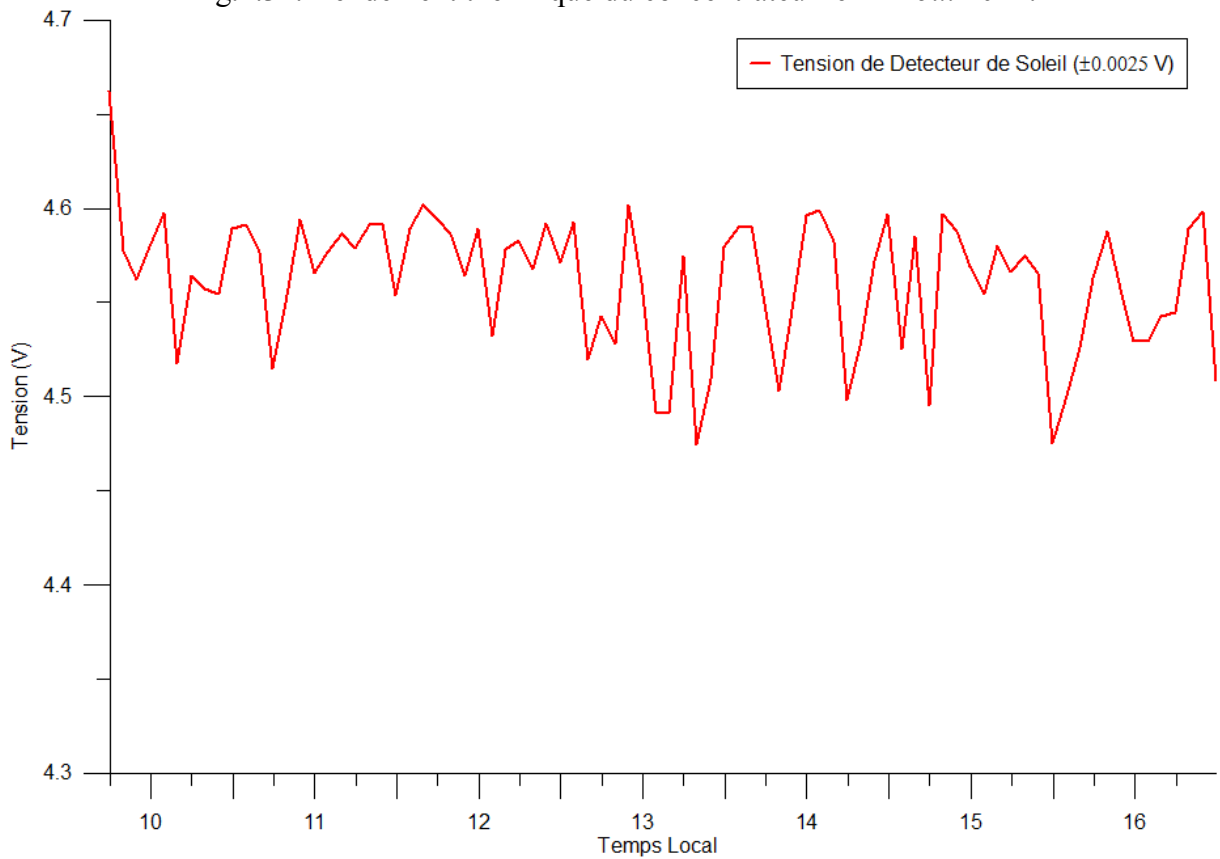


Fig.4.35. Signal délivré par le détecteur de position de soleil du 21 Août 2012.

4.3.6 Tests annuels du système réalisé

Pour récapituler et essayer d'avoir une présentation globale des données collectées, afin de comprendre le comportement du système réalisé pendant les trois années de tests (2011, 2012, 2013), nous avons tracé toute les données collectées de chaque année sur un même graphe, un graphe pour les températures de sortie et un autre pour le rendement thermique.

Nous avons obtenu des résultats pertinentes, la concentration du nuage des points représentant les températures de sortie est un peu près aux alentours de 90°C pour les trois années (figure. 4.36), (figure. 4.38) et (figure. 4.40). Nous avons aussi noté, qu'en automne, des températures aux alentours de 120°C sont obtenus, pour des raisons du facteur de trouble (à Ghardaïa facteur de Linke est faible en Automne). Pour le rendement, il est clair que notre prototype muni du nouveau système de poursuite solaire a un rendement de 50% pour les trois années (figure. 4.37) (figure. 4.39) (figure. 4.41), cette valeur coïncide avec le rendement lors de la caractérisation du prototype déjà calculé.

Pratiquement, la position du soleil pour les deux saisons d'automne et du printemps sont identiques, à une différence près; qui est la température ambiante et la vitesse du vent. Pour la saison du printemps, le prototype prend un temps considérable (presque une demi-journée) pour atteindre les 100°C , contrairement à l'automne où on dépasse les 110°C en une demi-heure.

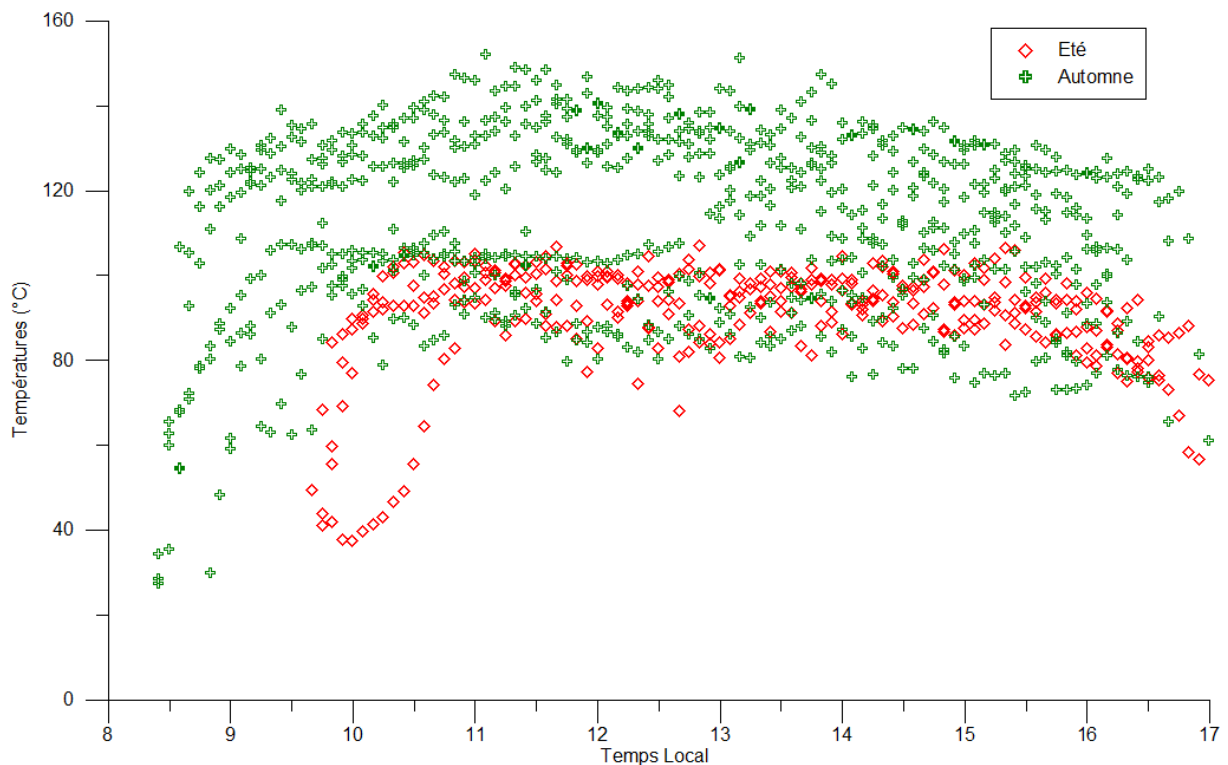


Fig. 4.36. Profil des températures de sorties annuelles du prototype réalisé, en 2011.

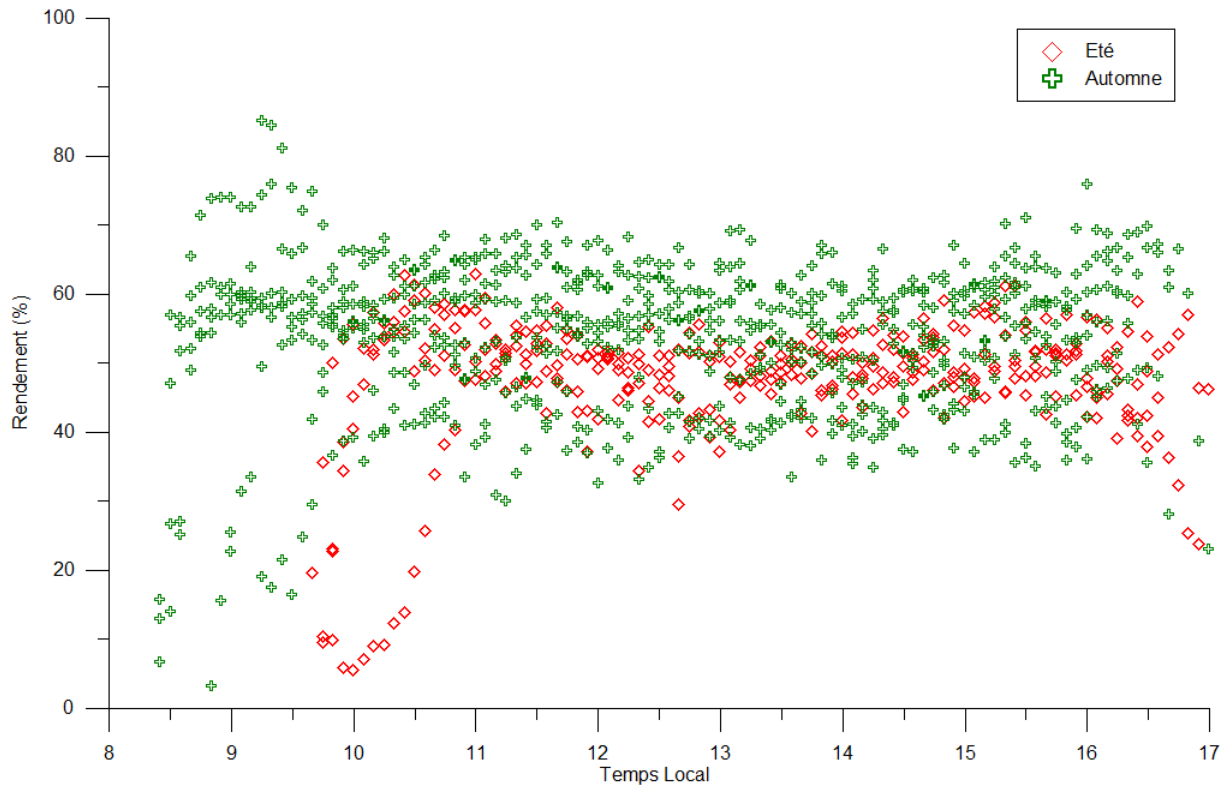


Fig. 4.37. Rendement annuel du prototype réalisé, en 2011.

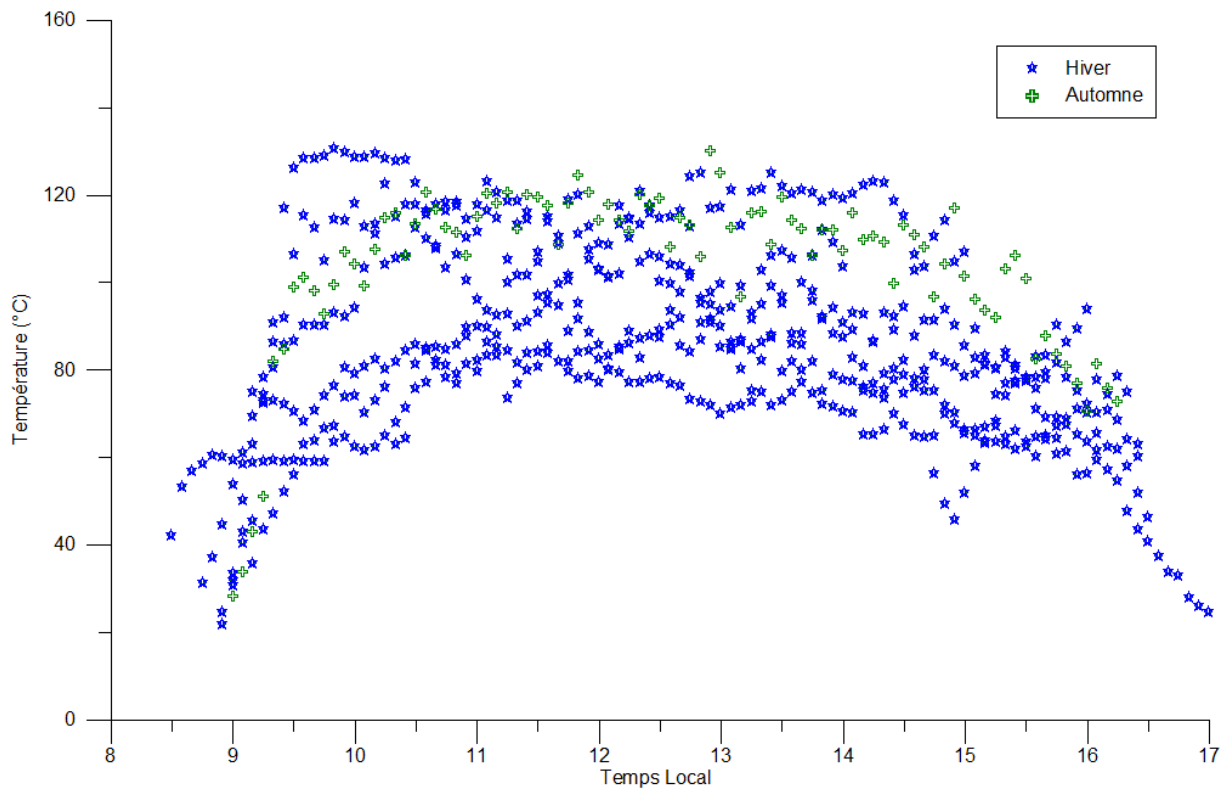


Fig. 4.38. Profil des températures de sorties annuelles du prototype réalisé, en 2012.

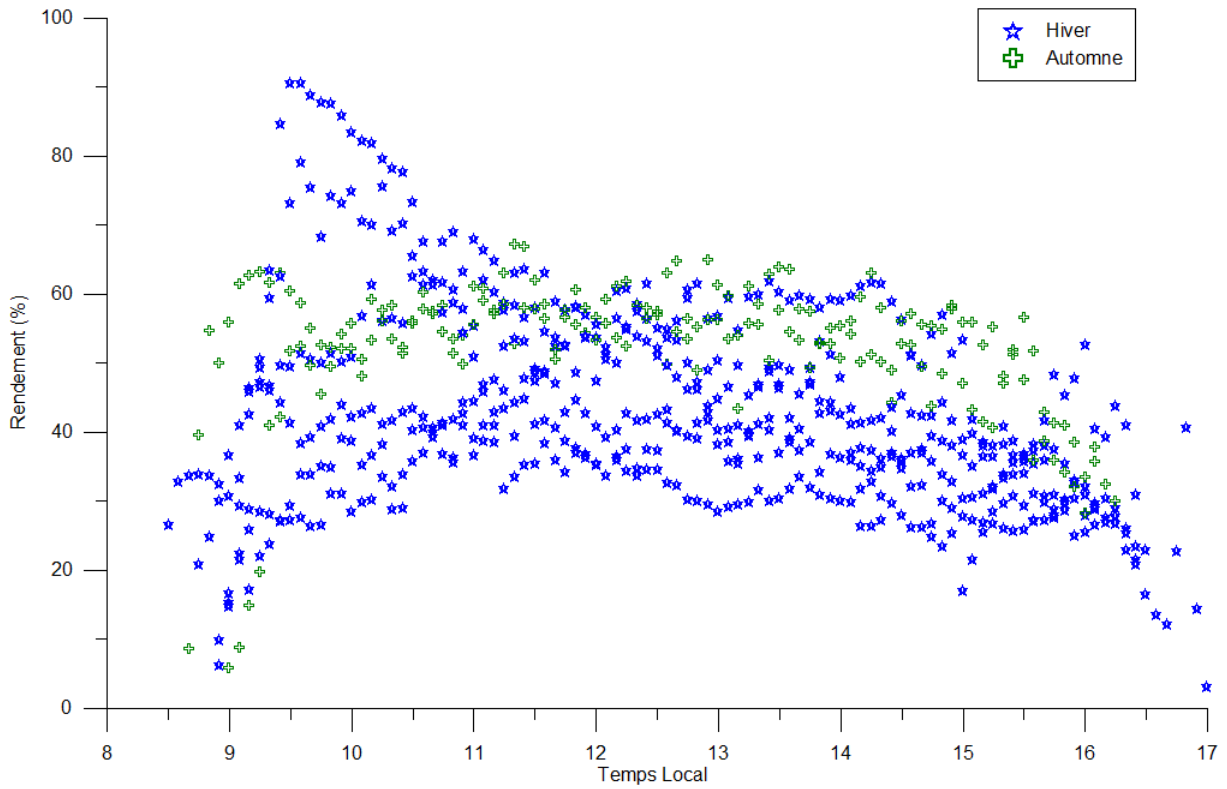


Fig. 4.39. Rendement annuel du prototype réalisé, en 2012.

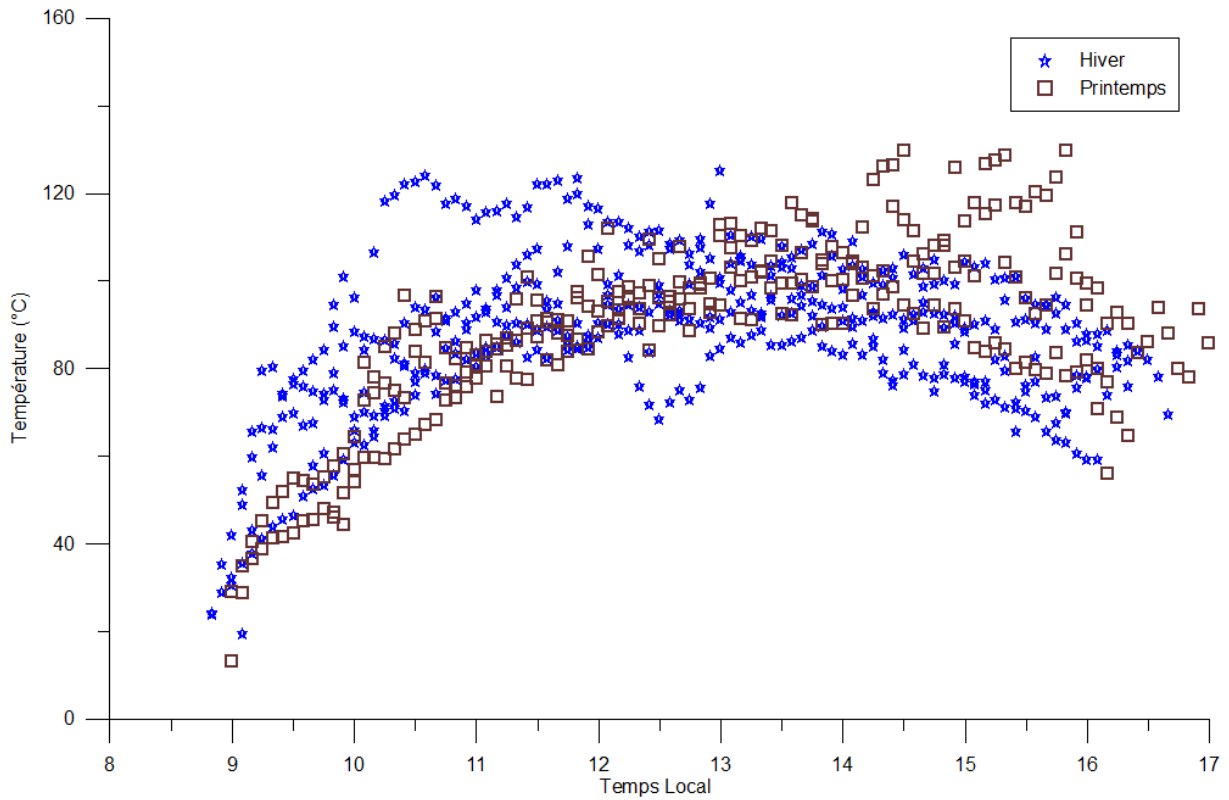


Fig. 4.40. Profil des températures de sorties annuelles du prototype réalisé, en 2013.

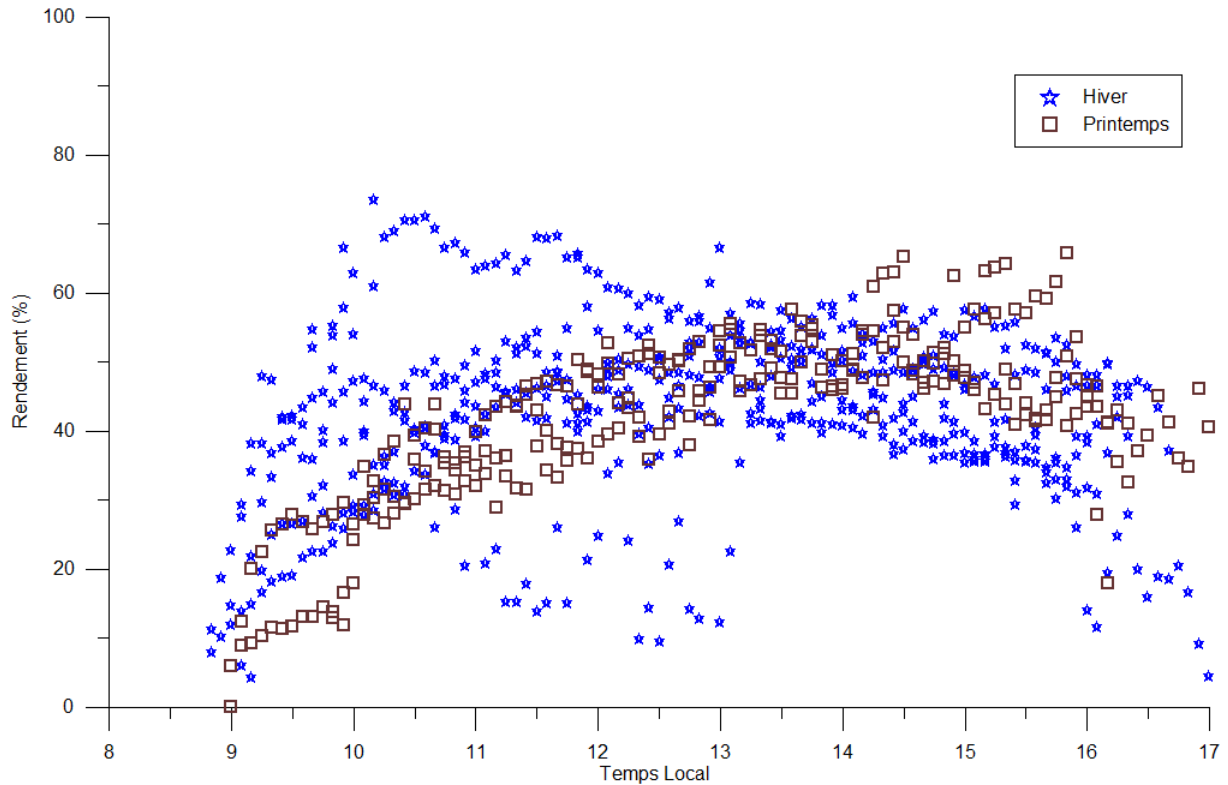


Fig. 4.41. Rendement annuel du prototype réalisé, en 2013.

4.4 Conclusion

Le Sud Algérien est caractérisé par un rayonnement très important [86] et un climat très dur, avec des températures élevées pendant la période estivale et des vents de sable durant la saison du printemps. Dans ce chapitre nous avons procédé, en premier lieu à la caractérisation du prototype réalisé, afin d'avoir une référence aux résultats des mesures et des tests réalisés, nous avons conclu que le système est de bonne caractéristique lorsqu'on le compare avec les systèmes existant dans la littérature. [83]

Après la caractérisation du prototype, nous avons procédé à la présentation des tests réalisés pendant plusieurs années durant diverses saisons. Nous avons trouvé, en comparant les graphes expérimentaux avec ceux délivrés par la simulation à l'aide du logiciel *TRNSYS*; que les résultats obtenus indiquent que notre détecteur du soleil fonctionne avec une bonne précision, notre système à concentrateur cylindro-parabolique muni de son système de suivi présente une efficacité remarquable. Le rendement de l'installation globale avec système de déplacement de

l'absorbeur est toujours compris entre le rendement d'un système de poursuite à un seul axe et système de poursuite à deux axes.

Les tests entrepris pour vérifier aussi bien le fonctionnement de l'ensemble des équipements que la fiabilité du système de poursuite solaire, montrent que notre nouvelle idée, défini initialement; est bien faisable, avec des résultats vraiment satisfaisants, ce qui nous offre la possibilité de l'application de ce nouveau système (avec déplacement de l'absorbeur) dans la région du Sud Algérien tout en évitant l'inclinaison des concentrateurs, qui a un effet négatif sur le rendement de ces derniers à cause du climat spécifique de la région, notamment les vents de sable.

CONCLUSION GENERALE

Le sud Algérien est caractérisé par un climat très hostile, avec des températures moyennes très élevées pendant la période estivale et des vents de sable très intenses durant le printemps et l'automne. La position de notre pays, située à l'hémisphère Nord, exactement à la latitude 32, engendre un effet Cosinus très important et influant négativement sur les concentrateurs cylindro-paraboliques.

Dans ce contexte et dans le cadre de ce travail, on s'est proposé de développer un nouveau système de poursuite solaire à un seul axe de rotation avec déplacement de l'absorbeur, dans le but de minimiser les pertes optiques et thermiques dues à l'effet cosinus.

Pour cela, après une étude bibliographique et un état de l'art sur les systèmes de poursuite solaire, nous avons commencé par l'étude détaillée de notre problématique. Une conception mécanique d'un prototype de concentrateur cylindro-parabolique muni de notre nouveau système de poursuite solaire utilisant le logiciel SolidWorks est ensuite présentée. Les simulations optique et thermique ont révélé le bon fonctionnement du prototype.

Dans la partie principale de ce travail, nous avons procédé à la réalisation du prototype, notamment la structure porteuse du concentrateur cylindro-parabolique équipé d'un vérin électrique afin de garantir une poursuite solaire à un seul axe de rotation. L'absorbeur, quant à lui, est équipé d'une glissière pour assurer son déplacement. Pour le contrôle de la poursuite du soleil, nous avons conçu un capteur optique relié au port parallèle d'un micro-ordinateur via une carte électronique à base d'un microcontrôleur *PIC 16F877A*.

Les tests entrepris concernant le système ont démontré un fonctionnement optimal du nouveau système de poursuite solaire avec une bonne précision tout au long des journées de tests, ainsi qu'une très bonne efficacité dans des conditions climatiques difficiles du Sud Algérien. En comparant les résultats expérimentaux obtenus avec ceux de la simulation, nous observons que l'efficacité de notre nouveau système de poursuite solaire avec déplacement de l'absorbeur est située entre l'efficacité d'un système de poursuite solaire à un seul axe de rotation et un système de poursuite à deux axes de rotation. Cette nouvelle idée, réalisée et concrétisée,

nous offre la possibilité de l'intégrer dans des installations à concentrateurs cylindro-paraboliques réelles afin d'améliorer leurs rendements.

Afin d'adapter notre nouveau système de poursuite solaire aux divers systèmes à concentration existants, nous comptons étudier son application dans les concentrateurs linéaires de Fresnel sachant l'excellente efficacité de ces derniers. Nous envisageons également de réaliser une étude technico-économique sur l'application du nouveau système de poursuite solaire dans les centrales thermiques afin d'examiner sa faisabilité. Une autre étude est aussi envisagée concernant l'automatisation du déplacement de l'absorbeur, en intégrant son fonctionnement à la stratégie de poursuite solaire et éventuellement en utilisant un bras manipulateur simple. Plusieurs améliorations, telles que le choix des matériaux, du fluide caloporteur, des dimensions etc..., doivent être aussi étudiées et apportées au prototype dans le but de l'améliorer et de proposer un système de poursuite solaire complet et efficace.

BIBLIOGRAPHIE :

- [1] Site Internet : <http://www.planete-energies.com/>, Janvier 2013.
- [2] Site Internet : <http://www.futura-sciences.com/>, Janvier 2013.
- [3] R. Bernard, G. Menguy, M. Schwartz, Le rayonnement solaire, Conversion thermique et applications, Technique & documentation LAVOISIER, France, 250 pages, 1983.
- [4] J. Benemann, Status Report on Solar Trough Power Plant, Pilkington Solar International GmbH, Germany, 1996.
- [5] Rapport, Concentrating Solar Power for the Mediterranean Region, Germany Aerospace Center (DLR), Germany, A-4, 2005.
- [6] M. Geyer, Report on the SolarPACES, START Mission to Algeria, IEA SolarPACES, USA, 2003.
- [7] Cours Enermena, DLR, Towards a Sustainable Implementation of Concentrating Solar Power Plant Technology in the MENA Region, 2013.
- [8] J-M. Chasseriau, Conversion thermique du rayonnement solaire, Dunod, France, 273 pages, 1984.
- [9] K. Ogilvie, L'abc des technologies de l'énergie renouvelable, Pollution Probe, Canada, septembre 2003.
- [10] M. Geyer, Report on the SolarPACES, START Mission to Algeria, IEA SolarPACES, USA, 2003.
- [11] Thèse de doctorat: François Veynandt, Cogénération hélio thermodynamique avec concentrateur linéaire de Fresnel modélisation de l'ensemble du procédé, université de Toulouse, 2011.
- [12] Thuillier Pierre, Une énigme : Archimède et les miroirs ardents, La Recherche, mai 1979, n° 100, p. 444-453.
- [13] Site Internet : http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=L%27histoire_des_%C3%A9nergies_solaires, Janvier 2013.
- [14] Site Internet : <http://lenergie-solaire.blogspot.com/p/historique.html>, Janvier 2013.
- [15] Site Internet : <http://tpe-nrj-solaire-france.e-monsite.com/pages/i-l-energie-d-hier-et-d-aujourd-hui.html>, Janvier 2013.

-
- [16] W. Palz, L'électricité solaire, DUNOD, pages 184-185, 1981.
- [17] M.Ragheb, Solar Thermal Power and Energy Storage Historical Perspective, 2011.
- [18] Site Internet : <http://www.saint-gobain-solar-power.com/saint-gobain-solar-power/thermosolar-such-story-4>, Janvier 2013.
- [19] Site Internet : <http://www.cder.dz/>, Janvier 2013.
- [20] Site Internet : <http://www.enr.fr/gene/main.php?base=362>, Janvier 2013.
- [21] A.Ferriere, G.Flamant, Captation, transformation et conversion de l'énergie solaire par les technologies à concentration, IMP-CNRS, France, 2004.
- [22] A. Khedim, L'énergie solaire utilisation thermique et photovoltaïque, ANEP, Algérie, 359 pages, 2005.
- [23] B. Rivoire, Le solaire thermodynamique, CNRS, France, Avril 2002.
- [24] Eric Goncalvès et Jean-Paul Thibault, cycles thermodynamiques des machines thermiques, Grenoble Institut Polytechnique, Octobre 2008.
- [25] Thèse de doctorat : S. Bonnet, Moteurs thermiques à apport de chaleur externe : étude d'un moteur STIRLING et d'un moteur ERICSSON, Université de Pau et des pays de l'Adour, 2005.
- [26] John A. Duffie & William A. Beckman, Solar Engineering of Thermal processes, 2nd Edition, John Wiley & sons inc, New York, 916 pages, 1991.
- [27] M. Capderou, Atlas solaire d'Algérie, Tome 1, Volume 1, EPAU, Algérie, 375 Pages, 1987.
- [28] Dominique, Michèle Frémy, Le monde et Astronomie, quid 2001, France Loisir, Paris 2001.
- [29] Clifford MJ, Eastwood D. Design of a novel passive solar tracker. Solar Energy 2004;77: 269–80.
- [30] Mwithiga G, Kigo SN. Performance of a solar dryer with limited sun tracking capability. Journal of Food Engineering 2006;74: 247–52.
- [31] Poulek V. Testing the new solar tracker with shape memory alloy actors. Conference Record of the Twenty Fourth; IEEE Photovoltaic Specialists Conference 1994;1: 1131–3.
- [32] Heredia IL, Moreno JM, Magalhaes PH, Cervantes R, Quéméré G, Laurent O. Inspira's CPV sun tracking (concentrator photovoltaics). Springer; 2007; 221–51.
- [33] Abdallah S, Nijmeh S. Two axes sun tracking system with PLC control. Energy Conversion and Management 2004;45: 1931–9.
- [34] Mamlook R, Nijmeh S, Abdallah SM. A programmable logic controller to control two axis sun tracking system. Information Technology Journal 2006;5(6): 1083–7.

-
- [35] Rumyantsev V, Chalov A, Ionova E, Larionov V, Andreev V. Concentrator PV modules with multi-junction cells and primary/secondary refractive optical elements. In: The 19th European photovoltaic solar energy conference; 2004.
- [36] Konar A, Mandal AK. Microprocessor based automatic sun-tracker. IEE Proceedings Part A Physical Science Measurement and Instrumentation Management and Education Reviews 1991;138(4): 237–41.
- [37] Al-Mohamad A. Efficiency improvements of photovoltaic panels using a suntracking system. Applied Energy 2004;79: 345–54.
- [38] Abu-Khader MM, Badran OO, Abdallah S. Evaluating multi-axes sun-tracking system at different modes of operation in Jordan. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2008;12: 864–73.
- [39] Bingol O, ALTINTAS, A, O'NER Y. Microcontroller based solar-tracking system and its implementation. Journal of Engineering Sciences 2006;12(2): 243–8.
- [40] Koyuncu B, Balasubramanian K. A microprocessor controlled automatic sun tracker. IEEE Transactions on Consumer Electronics 1991; 37(4): 913–7.
- [41] Peterson T, Rice J, Valane J. Solar tracker; 2005. <http://lrc.cit.cornell.edu/courses/ee476/FinalProjects/s2005/tp62/website/solartracker>.
- [42] Debasol, solar power. Solar tracker; 2007. www.girasolar.com.
- [43] Contreras A, Garcia J, Gonzalez C, Martinez E. Portable solar tracker; May 08, 2006. http://engineering.utsa.edu/ee/sd/projects/spring2006/13/Team_13_Final_Presentation.
- [44] Abdallah S. The effect of using sun tracking systems on the voltage–current characteristics and power generation of flat plate PV. Energy Conversion and Management 2004;45: 1671–9.
- [45] Poulek V, Libra M. A very simple solar tracker for space and terrestrial applications. Solar Energy Materials & Solar Cells 2000;60: 99–103.
- [46] Poulek V, Libra M. New bifacial solar trackers and tracking concentrators; 2007. <http://www.solar-trackers.com>.
- [47] Karimov KhS, Saqib MA, Akhter P, Ahmed MM, Chatthad JA, Yousafzai SA. A simple photo-voltaic tracking system. Solar Energy Materials & Solar Cells 2005;87: 49–59.
- [48] Poulek V, Libra M. New solar tracker. Solar Energy Materials and Solar Cells 1998;51: 113–20.
- [49] Canada J, Utrillas MP, Lozano JAM, Pedros R, Amo JLG, Maj A. Design of a sun tracker for the automatic measurement of spectral irradiance and construction of an irradiance database in the 330–1100 nm range. Renewable Energy 2007;32: 2053–68.

-
- [50] Edwards BP. Computer based sun following system. *Solar Energy* 1978;21: 491–6.
- [51] Alata M, Al-Nimr MA, Qaroush Y. Developing a multipurpose sun tracking system using fuzzy control. *Energy Conversion and Management* 2005;46: 1229–45.
- [52] Aliman O, Daut I, Isa M, Adzman MR. Simplification of sun tracking mode to gain high concentration solar energy. *American Journal of Applied Sciences* 2007;4(3): 171–175.
- [53] Nuwayhid RY, Mrad F, Abu-Said R. The realization of a simple solar tracking concentrator for university research applications. *Renewable Energy* 2001;24: 207–22.
- [54] AL-Jumaily KEJ, AL-Kaysi MKA. The study of the performance and efficiency of flat linear Fresnel lens collector with sun tracking system in Iraq. *Renewable Energy* 1998;14(14): 41–8.
- [55] Abdallah S, Badran OO. Sun tracking system for productivity enhancement of solar still. *Desalination* 2008;76: 220:669.
- [56] Davies PA. Sun tracking mechanism using equatorial and ecliptic axes. *Solar Energy* 1993;50(6):487–9.
- [57] Khlaichom P, Sonthipermpon K. Optimization of solar tracking system based on genetic algorithms; 2006. <http://www.thaiscience.info/>.
- [58] Blanco-Muriel M, Alarcon-Padilla DC, Lopez- Moratalla T, Lara-Coira M. Computing the solar vector. *Solar Energy* 2001;70(5):431–41.
- [59] Roth P, Georgiev A, Boudinov H. Cheap two-axis sun following device. *Energy Conversion and Management* 2005;46:1179–92.
- [60] Roth P, Georgiev A, Boudinov H. Design and construction of a system for sun tracking. *Renewable Energy* 2004;29:393–402.
- [61] Ajay K, Nagaraju J. Micro-controller based sun tracker for line focus concentrating collectors. *Journal of the Solar Energy Society of India* 2003;13 (1&2):1–8.
- [62] Rubio FR, Ortega MG, Gordillo F, Lopez-Martinez M. Application of new control strategy for sun tracking. *Energy Conversion and Management* 2007;48:2174–84.
- [63] Bakos GC. Design and construction of a two-axis sun tracking system for parabolic trough collector (PTC) efficiency improvement. *Renewable Energy* 2006;31:2411–21.
- [64] Hession PJ, Bonwick WJ. Experience with a sun tracker. *Solar Energy* 1984;32(1):3–11.
- [65] Luque-Heredia I, Gordillo F, Rodriguez F. A PI based hybrid sun tracking algorithm for photovoltaic concentration. In: *Proceedings of the 19th European PV solar energy conference and exhibition*; 2004.
- [66] Georgiev A, Roth P, Olivares A. Sun following system adjustment at the UTFSM. *Energy Conversion and Management* 2004;45:1795–806.

-
- [67] Durisch W, Urban J, Smestad G. Characterization of solar cells and modules under actual operating conditions, WREC. In: Proceedings of the WREC-IV world renewable energy congress; 1996. p. 359–66.
- [68] Saxena AK, Dutta V. A versatile microprocessor based controller for solar tracking. New Delhi, India: Photovoltaic Laboratory, Centre for Energy Studies, Indian Institute of Technology; 1990. p. 1105–9.
- [69] A. Fernandez-Garcia, E. Zarza, L. Valenzuela, M. Perez, Parabolic-trough solar collectors and their applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14 (2010) 1695–1721.
- [70] Logiciel de simulation optique TracePro Lambda Research Corporation, USA. TracePro software for opto-mechanical modeling user manual release 6 revision 03; 2010. p. 2.7-2.13.
- [71] Logiciel de conception mécanique SolidWorks, SolidWorks Corporation, 300 Baker Avenue, Concord, MA 01742. Available from: <http://www.solidworks.com/>.
- [72] Gama Amor, Larbes Chérif, Malek Ali, ‘Etude de l’Effet Cosinus dans les Différents Systèmes de Poursuite Solaire Appliquée à un Concentrateur Cylindro-Parabolique’, 1er Séminaire International sur les énergies nouvelle et renouvelables (SIENR10), 11 - 12 Octobre 2010, Ghardaïa - Algérie.
- [73] Logiciel de simulation thermique Trnsys, S.A. Klein et al, TRNSYS Version. 16, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison. (2004), Website: <<http://sel.me.wisc.edu/trnsys>>.
- [74] Amor Gama, Chérif Larbes, Ali Malek, ‘Optical and Thermal Comparison Between Ordinary and Mirror Blades Reflector for Solar Parabolic Trough Collector’, 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 13-17 May 2013, Istanbul-Turkey.
- [75] A. Gama, C. Larbes, A. Malek, F. Yettou, and B. Adouane, ‘Design and realization of a novel sun tracking system with absorber displacement for parabolic trough collectors’, *J. Renewable Sustainable Energy* 5, 033108 (2013); doi: 0.1063/1.4807476.
- [76] Amor Gama, Chérif Larbes, Ali Malek, Fatiha Yettou, Badreddine Bezza, ‘Design of optimal computer tracking system of parabolic trough concentrator with one rotation axis’, Global Conference on Global Warming’ (GCGW2012), 08-12 Juillet 2012, Istanbul - Turquie.
- [77] Amor Gama, Chérif Larbes, Ali Malek, Fatiha Yettou, Badreddine Bezza, ‘Etude de l’influence d’erreur en orientation dans les concentrateurs cylindro paraboliques avec

-
- poursuite solaire’, 2nd International Conference on Renewable Energy (ICRE2012), 15-16 Avril 2012, Bejaia - Algérie.
- [78] ANSI/ASHRAE Standard 93, “Methods of testing to determine the thermal performance of solar collectors,” 2003.
- [79] E. Venegas-Reyes, O. A. Jaramillo, R. Castrejón-García, J. O. Aguilar, and F. Sosa-Montemayor, ‘Design, construction, and testing of a parabolic trough solar concentrator for hot water and low enthalpy steam generation’, *J. Renewable Sustainable Energy* 4, 053103 (2012); doi: 10.1063/1.4751461.
- [80] H. M. Güven and R. B. Bannerot, “Determination of error tolerances for the optical design of parabolic troughs for developing countries,” *Sol. Energy* 36(6), 535–550 (1986).
- [81] H. M. Güven, F. Mistree, and R. B. Bannerot, “A conceptual basis for the design of parabolic troughs for different design environments,” *J. Sol. Energy Eng.* 108, 60–66 (1986).
- [82] H. M. Güven and R. B. Bannerot, “Derivation of universal error parameters for comprehensive optical analysis of parabolic troughs,” *J. Sol. Energy Eng.* 108, 275–281 (1986).
- [83] M. J. Brooks, I. Mills, and T. M. Harms, “Design, construction and testing of a parabolic trough solar collector for a developing-country application,” in *Proceedings of the ISES Solar World Congress, Orlando, Florida, 6-12 August, 2005*.
- [84] A. Valan Arasu and T. Sornakumar, “Performance Characteristics of Parabolic Trough Solar Collector System for Hot Water Generation,” *International Energy Journal: Vol. 7, No. 2*, 137-145 (2006).
- [85] Gama Amor, Yettou Fatiha, Malek Ali, Larbes Chérif, Azoui Boubaker, ‘Determination of atmospheric turbidity using solar radiation measurements for two Algerian sites’, 2nd International Conference on Nuclear and Renewable Energy Resources (NURER10), 04 - 07 Juillet 2010, Ankara - Turquie.
- [86] Boudghene Stambouli, ‘Algerian renewable energy assessment: The challenge of sustainability’, *Energy Policy* (2010), Volume 39, Issue 8, August 2011, Pages 4507-4519.