



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ FRÈRES MENTOURI-CONSTANTINE1
FACULTÉ DES SCIENCES DE LA TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

N° d'ordre :100/D3C/2019

:Série 03/GM/2019

THÈSE

Présentée pour obtenir le Diplôme de Doctorat LMD

en Génie Mécanique

OPTION : Génie Thermique et Energétique

**Étude et réalisation d'un Capteur Cylindro-Parabolique
à poursuite, installé dans une serre**

Par : **Mr. TAHTAH Reda**

Soutenue le : 24 /12/ 2019

Devant le jury composé de :

Président	Mr. S. BENISSAÂD	Université Frères Mentouri-Constantine1	Professeur
Rapporteur	Mr. A. BOUCHOUCHA	Université Frères Mentouri-Constantine1	Professeur
Examineurs	Mr. N. BELLEL	Université Frères Mentouri-Constantine1	Professeur
	Mr. S. SAAD	Université Badji Mokhtar-Annaba	Professeur
	Mr. R. LAKEL	Université Badji Mokhtar-Annaba	Professeur
Invitée	Mme. C. ABID	Université Aix Marseille-France	Professeur

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

Au nom d'Allah, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux

In the name of Allah, the Most Gracious, and the Most Merciful

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu « le tout Puissant » de nous avoir accordé la force et le courage, afin de réaliser ce modeste travail.

Nous exprimons notre plus vive reconnaissance à Monsieur BOUCHOUCHA Ali Professeur au Département de Génie Mécanique, et chef d'équipe Mécanique et Energétique des Surfaces au Laboratoire de Mécanique, Faculté des Sciences de la Technologie de l'Université Frère Mentouri-Constantine 1, qui a bien voulu accepter de nous prendre en charge pour réaliser ce travail dont le mérite lui revient, grâce à son aide, sa pédagogie, son ouverture d'esprit, ses conseils précieux et sa vision de la recherche scientifique.

Nous exprimons notre profonde reconnaissance à Monsieur BENISAËD Smail, Professeur au Département de Génie Mécanique, Faculté des Sciences de la Technologie de l'Université Frère Mentouri-Constantine1, qui nous fait l'honneur de présider ce jury.

Nous présentons nos remerciements les plus sincères à Monsieur BELLEL Nadir, Professeur au Département de Physique Énergétique, Faculté des Sciences de la Technologie de l'Université Frère Mentouri-Constantine1, à Monsieur SAAD Salah, Professeur à l'Université Badji Mokhtar-Annaba et à Monsieur LAKEL Rabah, Professeur à l'Université Badji Mokhtar-Annaba, d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Un grand merci est adressé au Professeur ABID Cherifa, de nous avoir donné accès aux laboratoires IUSTI, à l'Université Aix Marseille, France.

Nous ne pourrions pas conclure sans remercier, chaleureusement, toute personne qui nous a soutenue de près ou de loin, au cours de la réalisation de ce modeste travail, nos familles et nos amis(es), particulièrement Professeur TAHTAH Yahia, Dr. BOUKELIA Taqy Eddine, M. TICHOUCHAI Mounir, M. KEZRIT Daoud et à tous ce qui ont contribué à l'évolution de cette étude.

Merci

Dédicaces

C'est avec un très grand honneur que je dédie ce travail à

*A mes chers parents, mon père et ma mère qui n'ont jamais cessé de
me soutenir et de m'encourager, non seulement dans la réalisation
de ce travail*

Mais durant toute ma vie

*À toute ma famille, et surtout ma belle «Noura» et mon fils
«Rafik»*

À mes amis,

À tous ceux qui adorent la Science et participent à son évolution.

Reda TAHTAH

SOMMAIRE

Remerciements	i
Dédicaces	ii
Sommaire	iii
Liste des tableaux	vii
Liste des figures	viii
Nomenclature	xiii
Résumé	xvi
Introduction Générale	02

CHAPITRE I : VALORISATION DU GISEMENT SOLAIRE DE GHARDAIA-ALGERIE

I.1 Introduction	06
I.2. Système Terre-Soleil	06
I.3. Calcul de la position du soleil	07
I.3.1. Coordonnées géographiques terrestres	07
I.3.1.1. Longitude (λ)	07
I.3.1.2. Latitude (φ)	07
I.3.2. Coordonnées horaires	08
I.3.2.1. Déclinaison solaire (δ)	08
I.3.2.2. Angle horaire (h)	08
I.3.3. Coordonnées horizontales	09
I.3.3.1. Hauteur angulaire du soleil (α)	09
I.3.3.2. Azimut (γ_s)	09
I.3.3.3. Angle zénithal (θ_z)	09
I.4. Rayonnement solaire	10
I.4.1. Rayonnement extraterrestre	10
I.4.2. Rayonnement terrestre	10
I.4.2.1. Rayonnement direct IBN	11
I.4.2.2. Rayonnement diffus ID	11
I.4.2.3. Rayonnement global IG	11
I.5. Estimation du rayonnement solaire global sur un plan horizontal au site de Ghardaïa-Algérie	12
I.5.1. Données et méthodologie	13
I.5.1.1. Données utilisées	13
I.5.1.2. Description des modèles	14
I.5.2. Résultats et discussion	14
I.6. Conclusion	21
Références bibliographiques	22

CHAPITRE II : ÉTUDE ET REALISATION D'UN CONCENTRATEUR CYLINDRO-PARABOLIQUE HORIZONTAL

II.1. Introduction	25
II.2. Etude théorique du concentrateur cylindro-parabolique	26
II.2.1. Performances optiques d'un concentrateur cylindro-parabolique	26
II.2.1.1. Taux de concentration	26
II.2.1.2. Rayonnement absorbé	28
II.2.1.3. Angle d'ouverture du concentrateur	28
II.2.1.4. Rayon local du miroir	28
II.2.1.5. Diamètre du récepteur	29
II.2.2. Performances thermiques d'un concentrateur cylindro-parabolique	30
II.2.2.1. Coefficient des pertes thermiques U_L (tube non couvert)	30
II.2.2.2. Coefficient des pertes thermiques U_L (tube couvert)	31
II.2.2.3. Facteur d'efficacité (F')	31
II.2.2.4. Facteur de flux du collecteur (F'')	31
II.2.2.5. Puissance utile (Q_u)	32
II.2.2.6. Température de sortie du fluide caloporteur (T_s)	32
II.2.2.7. Rendement du concentrateur solaire (η)	32
II.3. Etude théorique de la poursuite solaire	32
II.3.1. Trajet du soleil	32
II.3.2. Poursuite solaire et effet cosinus	34
II.3.2.1. Effet cosinus et taux de concentration	34
II.3.2.2. Effet cosinus et axe de rotation	35
II.4. Description du concentrateur réalisé	36
II.4.1. Description du prototype	36
II.4.2. Principe de fonctionnement	36
II.4.3. Schéma synoptique du système réalisé	37
II.5. Réalisation du concentrateur cylindro-parabolique	37
II.5.1. Dimensionnement de la courbe	37
II.5.2. Réalisation de la structure porteuse	38
II.5.3. Dispositif de poursuite solaire	39
II.5.4. Circuit du fluide caloporteur	41
II.5.5. Cuve de stockage	43
II.5.6. Moyens de mesures (Thermocouples)	44
II.6. Etude numérique de la convection mixte pour différentes concentrations au niveau de l'absorbeur d'un CCP	45
II.6.1. Modèle mathématique	46
II.6.1.1. Géométrie de l'absorbeur	46
II.6.1.2. Modélisation et maillage de l'absorbeur	46
II.6.1.3. Equations gouvernantes	47

II.6.1.4. Conditions aux limites	48
II.6.2. Résultats et discussion	49
II.7. Etude numérique du transfert thermique en convection mixte pour un tube absorbeur d'un CCP à deux différents fluides caloporteurs	54
II.7.1. Modèle mathématique	54
II.7.2. Résultats et discussion	54
II.8. Etude expérimentale du prototype CCP pour deux différents fluides caloporteurs	58
II.8.1. Description du prototype	58
II.8.2. Principe de fonctionnement	58
II.8.3. Résultats et discussion	59
II.9. Étude expérimentale du prototype CCP pour deux différentes concentrations	64
II.9.1. Principe de fonctionnement	64
II.9.2. Résultats et discussion	65
II.10. Conclusion	67
Références bibliographiques	68

CHAPITRE III : RÉALISATION D'UNE STATION DE MESURES, EN UTILISANT LA CARTE RASPBERRY PI3, POUR DEUX POSITIONS : INCLINÉE ET HORIZONTALE DE L'ABSORBEUR

III.1. Introduction	72
III.2. Carte Raspberry Pi	73
III.2.1. Présentation de la carte Raspberry Pi	73
III.2.2. Caractéristiques de la carte Raspberry Pi3	73
III.2.3. Préparation de la carte SD	74
III.2.4. Préparation de la carte sous Windows	74
III.2.5. Installation de Linux sur la carte SD à partir d'un micro-ordinateur	75
III.2.6. Démarrage de Raspberry Pi	77
III.2.7. Découverte des caractéristiques principales	78
III.2.8. Environnement graphique	80
III.2.9. Système des fichiers	81
III.2.10. Connexion de Raspberry Pi avec le réseau	83
III.2.11. Connexion à la Raspberry Pi sur un poste distant	85
III.2.12. Putty	86
III.2.13. FileZilla	88
III.3. Réalisation d'une station de mesures, en utilisant la carte Raspberry Pi3, pour deux positions, inclinée et horizontale, de l'absorbeur	89
III.3.1. Caractéristiques du concentrateur réalisé	89
III.3.2. Principe de fonctionnement	89
III.3.3. Simulation par TRNSYS	91
III.3.4. Résultats et discussion	92

III.4. Conclusion	97
Références bibliographiques	97

CHAPITRE IV : ÉTUDE ET RÉALISATION D'UN CAPTEUR CYLINDRO-PARABOLIQUE ENVELOPPÉ PAR UNE SERRE, AVEC UNE POURSUITE SOLAIRE AUTOMATIQUE

IV.1. Introduction	101
IV.2. Composants du prototype cylindro-parabolique	101
IV.2.1. Dimensionnement de la courbe	102
IV.2.2. Structure porteuse	103
IV.3. Dispositif de poursuite solaire	103
IV.3.1. Poursuite solaire entre l'été et l'hiver	103
IV.3.2. Poursuite journalière	104
IV.3.3. Fonctionnement de la poursuite solaire journalière	105
IV.3.4. Organigramme du programme de poursuite solaire	106
IV.3.5. Fonctionnement du programme d'enregistrement des données	107
IV.3.6. Organigramme du programme d'enregistrement des données	107
IV.4. Résultats expérimentaux	107
IV.4.1. Résultats obtenus le mois de Mars	107
IV.4.2. Résultats obtenus le mois d'Avril	112
IV.5. Simulation numérique du prototype et le comportement thermique résulte	117
IV.5.1. Modèle mathématique	117
IV.5.1.1. Géométrie de l'absorbeur	117
IV.5.1.2. Modélisation et maillage de l'absorbeur	118
IV.5.1.3. Équations gouvernantes	119
IV.5.1.4. Conditions aux limites	119
IV.5.2. Résultats et discussion	120
IV.5.2.1. Résultats du tube absorbeur	120
IV.5.2.2. Résultats obtenus à l'intérieur de la serre	124
IV.6. Coût du prototype	126
IV.7. Conclusion	127
Références bibliographiques	128
Conclusion Générale et Perspectives	130
Annexes	
Annexe I. Caractéristiques de l'huile thermique SERIOLA 320	134
Annexe II. Programme de poursuite solaire	135
Annexe III. Programme d'enregistrement des mesures des températures	136
Annexe IV. Publication et communication effectuées	139

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1.	Résultats de calcul des erreurs relatives du rayonnement solaire horizontal pour les journées types, dans le site de Ghardaïa.	21
Tableau II.1.	Effet Cosinus sur les systèmes de poursuite solaire.	35
Tableau III.1.	Instruction des commandes.	81
Tableau III.2.	Exemples de séquences commentées.	82
Tableau III.3.	Caractéristiques du prototype.	89
Tableau IV.1.	Coût du prototype sujet de l'étude.	126

LISTE DES FIGURES

Figure I.1.	Mouvement du globe Terrestre autour du Soleil.	07
Figure I.2.	Equation de temps.	08
Figure I.3.	Coordonnées célestes.	09
Figure I.4.	Spectre du rayonnement solaire.	10
Figure I.5.	Atténuation du rayonnement solaire à travers l'atmosphère.	11
Figure I.6.	Localisation de la station radiométrique sur la carte de l'Algérie.	13
Figure I.7.	Validation de la variation du rayonnement solaire pour le mois de Janvier.	14
Figure I.8.	Validation de la variation du rayonnement solaire pour le mois de Février.	15
Figure I.9.	Validation de la variation du rayonnement solaire pour le mois de Mars.	15
Figure I.10.	Validation de la variation du rayonnement solaire pour le mois d'Avril.	16
Figure I.11.	Validation de la variation du rayonnement solaire pour le mois de Mai.	16
Figure I.12.	Validation de la variation du rayonnement solaire pour le mois de Juin.	17
Figure I.13.	Validation de la variation du rayonnement solaire pour le mois de Juillet.	17
Figure I.14.	Validation de la variation du rayonnement solaire pour le mois d'Aout.	18
Figure I.15.	Validation de la variation du rayonnement solaire pour le mois de Septembre.	18
Figure I.16.	Validation de la variation du rayonnement solaire pour le mois d'Octobre.	19
Figure I.17.	Validation de la variation du rayonnement solaire pour le mois de Novembre.	19
Figure I.18.	Validation de la variation du rayonnement solaire pour le mois de Décembre.	20
Figure II.1.	Paramètres géométriques d'un concentrateur cylindro-parabolique.	27
Figure II.2.	Concentration des rayons solaires au niveau de l'absorbeur.	27
Figure II.3.	Dimensionnement du concentrateur et angle d'ouverture.	29
Figure II.4.	Schéma de l'absorbeur avec couvert d'un concentrateur cylindro-parabolique.	29
Figure II.5.	Schéma de tube absorbeur.	30
Figure II.6.	Positions du soleil dans le ciel durant l'année.	33

Figure II.7.	Trajectoire du soleil dans le ciel pendant une année.	34
Figure II.8.	Illustration de l'effet Cosinus sur les miroirs cylindro-paraboliques.	34
Figure II.9.	Orientation de l'axe de rotation selon les différents cas de poursuite.	35
Figure II.10.	Schéma synoptique du système réalisé.	37
Figure II.11.	Courbe parabolique du concentrateur.	38
Figure II.12.	Photo du réflecteur cylindro-parabolique réalisé.	38
Figure II.13.	Schéma du concentrateur réalisé et de la structure porteuse.	39
Figure II.14.	Photos du réflecteur et de la structure porteuse.	39
Figure II.15.	Boîte de commande de vérin électrique.	40
Figure II.16.	Positions du concentrateur en fonction de l'état du vérin.	40
Figure II.17.	Schéma du vérin électrique.	41
Figure II.18.	Photo du vérin électrique utilisé.	41
Figure II.19.	Tube absorbeur en cuivre et les flexibles.	41
Figure II.20.	Pièces pour la fixation des thermocouples et les flexibles.	42
Figure II.21.	Pompe de circulation.	42
Figure II.22.	Circuit fermé du fluide caloporteur.	42
Figure II.23.	Cuve de stockage de la chaleur.	43
Figure II.24.	Isolant thermique fixé à l'extérieur de la cuve.	43
Figure II.25.	Thermocouple de type K utilisé.	45
Figure II.26.	Principe des thermocouples.	45
Figure II.27.	Représentation schématique du dispositif solaire.	46
Figure II.28.	Maillage axisymétrique du tube absorbeur.	47
Figure II.29.	Différentes concentrations au niveau du tube absorbeur.	47
Figure II.30.	Validation des résultats simulés de code de calcul Fluent avec les résultats expérimentaux d'Abid et al.	49
Figure II.31.	Développement de la température du bas du tube pour différentes concentrations.	50
Figure II.32.	Développement de la température du haut du tube pour différentes concentrations.	50
Figure II.33.	Température moyenne du tube pour différents flux et concentrations.	51
Figure II.34.	Température moyenne du tube pour un même flux, à différentes concentrations.	51
Figure II.35.	Nusselt moyen pour différentes concentrations.	52
Figure II.36.	Nusselt local pour différentes concentrations au plan de sortie.	53
Figure II.37.	Distribution de la température au plan de sortie pour différentes concentrations.	53
Figure II.38.	Température moyenne de l'eau et l'huile suivant l'axe d'écoulement z.	54
Figure II.39.	Température près de la paroi intérieure suivant θ à $z = 0,05$.	55
Figure II.40.	Température près de la paroi intérieure suivant θ à $z = 0,5$.	55
Figure II.41.	Température près de la paroi intérieure suivant θ à $z = 1$.	56

Figure II.42.	Comparaison de Nusselt local de l'eau, entre l'entrée et la sortie.	56
Figure II.43.	Comparaison de Nusselt local de l'huile, entre l'entrée et la sortie.	57
Figure II.44.	Évolution de la température de l'eau mesurée le 13/08/2016.	59
Figure II.45.	Évolution de la température de l'eau mesurée le 14/08/2016.	60
Figure II.46.	Évolution de la température de l'eau mesurée le 16/08/2016.	60
Figure II.47.	Évolution de la température de l'huile mesurée le 22/08/2016.	61
Figure II.48.	Évolution de la température de l'huile mesurée le 23/08/2016.	62
Figure II.49.	Évolution de la température de l'huile mesurée le 27/08/2016.	62
Figure II.50.	Comparaison des températures de l'eau et de l'huile pour les journées 13, 14, 16, 22, 23 et 27/08/2016.	63
Figure II.51.1.	Concentration sur la moitié de l'absorbeur.	64
Figure II.51.2.	Concentration sur l'entourage de l'absorbeur.	64
Figure II.52.	Évolution des températures pour le cas des rayonnements concentrés sur la moitié de l'absorbeur le 03/02/2017.	65
Figure II.53.	Évolution des températures pour le cas des rayonnements concentrés sur la totalité de l'absorbeur le 13/02/2017.	66
Figure II.54.	Comparaison de l'évolution des températures de l'eau pour les deux cas.	67
Figure III.1.	Carte Raspberry Pi.	73
Figure III.2.	Différents types de connectivité.	74
Figure III.3.	Présentation du site internet pour le système Linux de Raspberry Pi3.	75
Figure III.4.	Fichier d'installation.	75
Figure III.5.	Formatage de la carte SD.	75
Figure III.6.	Logiciel d'installation de l'image Rasbian.	76
Figure III.7.	Installation de l'image Rasbian est effectué.	76
Figure III.8.	Placement de la carte SD sur le Raspberry Pi.	77
Figure III.9.	Démarrage du système Linux sur la carte Raspberry Pi.	77
Figure III.10.	Configuration du système.	78
Figure III.11.	Configuration du système.	78
Figure III.12.	Fréquence du processeur Broadcom BCM2835.	79
Figure III.13.	Capacité de la mémoire vive.	79
Figure III.14.	Capacité de la mémoire vive et GPU.	79
Figure III.15.	Affichage des partitions de la carte SD.	80
Figure III.16.	Environnement du bureau graphique.	80
Figure III.17.	Raccourci LXTerminal.	81
Figure III.18.	Programmation sur python.	82
Figure III.19.	Exécution du programme python.	82
Figure III.20.	Exécution du fichier HelloWorld.py.	83
Figure III.21.	Exécution sans invoquer de Python.	83
Figure III.22.	Branchement du câble réseau.	84

Figure III.23.	Raspberry Pi connecté au réseau.	84
Figure III.24.	Terminal indiquant la connectivité de Raspberry Pi au réseau.	85
Figure III.25.	Connexion à la Raspberry Pi sur un poste distant.	86
Figure III.26.	Connexion bien établie.	86
Figure III.27.	Logiciel de contrôle à distance.	87
Figure III.28.	Espace d'exécuter les commandes de Linux.	87
Figure III.29.	Étapes de connexion FileZilla entre le PC et le Raspberry Pi.	88
Figure III.30.	FileZilla connecté au Raspberry Pi.	88
Figure III.31.	Photo du concentrateur réalisé.	90
Figure III.32.	Principe de fonctionnement et d'enregistrement des données.	90
Figure III.33.	Raspberry Pi3 muni d'une armoire de protection.	91
Figure III.34.	Schéma d'installation simplifié par TRNSYS.	92
Figure III.35.	Variation des températures du CCP (relevées le 05/08/2017).	93
Figure III.36.	Variation des températures du CCP (relevées le 07/08/2017).	93
Figure III.37.	Comparaison des températures d'eau mesurées et simulées pour les deux journées.	94
Figure III.38.	Comparaison des performances thermiques expérimentales et simulées pour les deux journées 05 et 07/08/2017.	95
Figure III.39.	Températures T_{sur} et T_{amb} pour la journée 05/08/2017.	96
Figure III.40.	Températures T_{sur} et T_{amb} pour la journée 07/08/2017.	96
Figure IV.1.	Courbe cylindro-parabolique en 2D.	102
Figure IV.2.	Structure porteuse.	103
Figure IV.3.	Vérin manuel à l'état fermé et ouverte.	104
Figure IV.4.	Circuit électronique.	104
Figure IV.5.	Armoire métallique de protection du circuit électrique.	105
Figure IV.6.	Organigramme du programme de poursuite solaire.	106
Figure IV.7.	Schéma global de branchement électronique entre les LDR et Arduino.	106
Figure IV.8.	Organigramme du programme d'enregistrement des données.	107
Figure IV.9.	Résultats obtenus le 14/03/2018.	108
Figure IV.10.	Passage des nuages.	108
Figure IV.11.	Résultats obtenus le 20/03/2018.	109
Figure IV.12.	Résultats obtenus le 22/03/2018.	109
Figure IV.13.	Effet du vent de sable.	110
Figure IV.14.	Ciel sombre.	110
Figure IV.15.	Aspect des palmiers indique la vitesse du vent pendant la journée.	110
Figure IV.16.	Résultats obtenus le 31/03/2018.	111
Figure IV.17.	Ciel assombri avec brouillard de sable.	112
Figure IV.18.	Résultats obtenus le 16/04/2018.	112
Figure IV.19.	Résultats obtenus le 18/04/2018.	113

Figure IV.20.	Absence totale du soleil le 18/04/2018.	114
Figure IV.21.	Problème de la poussière.	114
Figure IV.22.	Problème de la pluie.	115
Figure IV.23.	Enveloppe en verre.	115
Figure IV.24.	Résultats obtenus le 24/04/2018.	116
Figure IV.25.	Résultats obtenus le 03/05/2018.	116
Figure IV.26.	Représentation du dispositif solaire.	118
Figure IV.27.	Zoom de maillage au niveau de tube absorbeur.	118
Figure IV.28.	Maillage axisymétrique du concentrateur.	119
Figure IV.29.	Profils de vitesse suivant l'axe d'écoulement z.	120
Figure IV.30.	Contour de vitesse à $z = 0$ m.	121
Figure IV.31.	Contour de vitesse à $z = 0,5$ m.	121
Figure IV.32.	Contour de vitesse à $z = 1$ m.	121
Figure IV.33.	Contour de vitesse à $z = 1,6$ m.	122
Figure IV.34.	Contour de température à $z = 0,6$ m.	122
Figure IV.35.	Contour de température à $z = 1$ m.	123
Figure IV.36.	Contour de température à $z = 1,4$ m.	123
Figure IV.37.	Contour de température à $z = 1,6$ m.	123
Figure IV.38.	Développement des températures suivant z.	124
Figure IV.39.	Contour de température à l'intérieur de la serre, $z=0,09$ m.	125
Figure IV.40.	Contour de empérature à l'intérieur de la serre, $z=0,5$ m.	125
Figure IV.41.	Contour de température à l'intérieur de la serre, $z=1$ m.	125

Nomenclature

Symboles

ρ'_a [-] :	Albédo du ciel clair.
ρ [-] :	Albédo terrestre.
A_{he} [-] :	Alternance hiver/été.
i [-] :	Angle d'incidence sur un plan quelconque.
ϕ_r [-] :	Angle d'ouverture du concentrateur.
H [-] :	Angle horaire.
τ_0 [-] :	Coefficient d'absorption par la couche d'ozone.
h_r [W/m ² K] :	Coefficient d'irradiation linéaire.
h_v [W/(m ² .K)] :	Coefficient de convection du vent.
σ [-] :	Coefficient de Stephan Boltzman = $5,667 \times 10^{-8}$ W/m ² K ⁴ .
h_{fi} [W/m ² K] :	Coefficient de transfert de la chaleur à l'intérieur de l'absorbeur.
β [-] :	Coefficient de trouble atmosphérique.
U_L [W/(m ² .K)] :	Coefficient des pertes thermiques.
K [W/mK] :	Conductivité thermique.
$c(N)$ [-] :	Correction distance-terre-soleil.
\dot{m} [Kg/s] :	Débit massique.
L_{st} [-] :	Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich.
$\delta(N)$ [-] :	Déclinaison solaire.
δ [-] :	Déclinaison.
θ_c [-] :	Demi-angle du cône de distribution du rayonnement solaire.
D [m] :	Diamètre d'un récepteur cylindrique.
D_r [m] :	Diamètre du tube (absorbeur ou couvert en verre).
D_e [m] :	Diamètre externe du tube de l'absorbeur.
D_i [m] :	Diamètre interne du tube de l'absorbeur.
$d(N)$ [-] :	Distance terre-soleil.
h [-] :	Durée d'utilisation quotidienne moyenne.
d [-] :	Durée du jour.
ε_r [-] :	Emissivité de la surface de l'absorbeur.
ε [-] :	Emissivité de surface de l'absorbeur.
ε_c [-] :	Emissivité de verre du couvert.
$Q_{r \rightarrow s}$ [Wh/m ²] :	Energie émise par l'absorbeur et reçue par la source.
$Q_{s \rightarrow r}$ [Wh/m ²] :	Energie émise par la source et reçue par l'absorbeur.
C_j [Wh/j] :	Energie moyenne journalière requise par la charge.
G^e [-] :	Énergie reçue au cours de la journée.

t [-] :	Equation du temps.
τ [-] :	Facteur de transmission.
α [-] :	Facteur d'absorption.
F' [-] :	Facteur d'efficacité.
$F_{rc=1}$ [-] :	Facteur de forme entre le récepteur et le couvert.
F_R [-] :	Facteur de la chaleur dissipée du collecteur.
ρ [-] :	Facteur de réflexion du miroir.
γ [-] :	Facteur optique du collecteur.
K [-] :	Facteur tenant compte des diverses considérations qui affectent le Rendement de l'installation.
H_c [-] :	Heure du coucher du soleil.
H_L [-] :	Heure du lever du soleil.
HR [%] :	Humidité relative.
W [m]	Largeur du concentrateur.
φ [-] :	Latitude du lieu.
L [-] :	Longitude.
λ [μm]	Longueur d'onde.
f [m] :	Longueur focale.
m_r [-] :	Masse d'air optique relative.
M_v [kg/m^3] :	Masse volumique.
N_j [-] :	Nombre de jours d'autonomie du système.
Nu [-] :	Nombre de Nusselt.
Re [-] :	Nombre de Reynolds.
J [-] :	Numéro du jour de l'année du calendrier.
U_c [$\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$]	Pertes par conduction au niveau du support.
C_p [$\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}$] :	Pouvoir calorifique.
P_{cm} [W] :	Puissance crête correspondant à un module.
P_c [W] :	Puissance crête nécessaire.
g_n^e [-] :	Puissance de rayonnement, par unité de surface pour un plan horizontal.
g^e [W/m^2] :	Puissance de rayonnement, par unité de surface.
P [W] :	Puissance électrique consommée par la charge.
Q_u [W] :	Puissance gagnée au niveau de collecteur.
r [m] :	Rayon maximum de la courbe parabolique.
E [W/m^2] :	Rayonnement absorbé par unité de surface d'ouverture.
$D(h, T')$ [W/m^2] :	Rayonnement diffus sur un plan horizontal.
S [W/m^2] :	Rayonnement direct sur un plan horizontal.
G [W/m^2] :	Rayonnement global sur un plan horizontal.
E_b [W/m^2] :	Rayonnement incident sur le plan d'ouverture.
η [-] :	Rendement du concentrateur solaire.

A_r [m ²] :	Surface d'absorbeur.
A_o [m ²] :	Surface d'ouverture.
C [-] :	Taux de concentration.
T_{amb} [°C] :	Température ambiante.
T_c [°C] :	Température au niveau du couvert.
T_e [°C] :	Température d'entrée du fluide.
$T_{air\ in}$ [°C] :	Température de l'air à l'intérieur de la serre.
T_{eau} [°C] :	Température de l'eau à l'intérieur de la cuve.
T_{sur} [°C] :	Température de la surface extérieure de l'absorbeur.
T_s [°C] :	Température de sortie du fluide.
T_{fc} [°C] :	Température du fluide caloporteur.
\bar{T} [K] :	Température moyenne d'irradiation.
L_{local} [h]	Temps local standard, donné par une montre.
TSM [-] :	Temps solaire moyen.
TSV [-] :	Temps solaire Vrai.
TU [-] :	Temps universel.
T_0 [-] :	Trouble dû à l'absorption gazeuse.
T_1 [-] :	Trouble dû à l'absorption par les gaz (O ₂ ,CO ₂ ,O ₃).
T_2 [-] :	Trouble relatif à la diffusion par les aérosols.
μ [-] :	Viscosité dynamique du fluide.
V [m/s]	Vitesse du vent.

Abréviation

CCP	Concentrateur Cylindro-Parabolique.
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
FTP	File Transfer Protocol
OS	Operating System

Résumé

Le sujet de notre thèse porte sur l'étude et la réalisation de deux concentrateurs cylindro-paraboliques, avec et sans serre. L'objectif est d'augmenter le flux de chaleur au niveau de l'absorbeur, ainsi que l'élimination de l'effet cosinus pour obtenir un bon stockage thermique au sein de la cuve. Avant d'installer les concentrateurs à Ghardaïa, nous avons étudié le gisement solaire de cette ville. Les résultats expérimentaux obtenus sont validés par trois modèles mathématiques avec la base des données de la station radiométrique du site de l'étude. Le premier concentrateur est caractérisé par un axe de foyer variable, ce qui nous a permis d'avoir une gamme de différentes concentrations imposées au niveau de l'absorbeur. En conséquence, nous avons déduit que le meilleur échange thermique est atteint, lorsque la totalité ou le quart du tube absorbeur est exposé aux radiations solaires. De plus, nous avons comparé deux types de fluides caloporteurs (l'eau et l'huile thermique Seriola 320) pour leurs efficacités de stockage thermique à l'intérieur de la cuve, pendant le soir où, nous avons montré que le stockage thermique avec l'eau est plus performant et efficace qu'avec l'utilisation de cette huile. En fonction de ce qui précède, nous avons réalisé un deuxième concentrateur orienté, perpendiculairement aux rayons du soleil, et ce, du matin jusqu'au soir, pendant toute l'année. Les mesures des températures sont exécutées à l'aide d'un circuit électronique de poursuite solaire automatique, en utilisant deux cartes Raspberry Pi3 et Arduino. En outre, nous avons couvert notre prototype par une serre en verre. Cette dernière protège l'ensemble du concentrateur contre les effets indésirables de la poussière et de la pluie. De même, elle permet d'augmenter le transfert thermique de l'absorbeur et de réduire les pertes thermiques convectives et radiatives vers le milieu ambiant.

Mots clés : Concentrateur Cylindro-parabolique; Soleil; Absorbeur; Poursuite solaire; Raspberry Pi3; Arduino; Serre; Simulation; Solaire thermique; Stockage thermique; Fluide caloporteur.

Abstract

The subject of our thesis presents a realization and study of two parabolic trough collectors with and without glass cover. The aim is to increase the heat flux at the absorber, as well as the elimination of the cosine effect to obtain a good thermal storage in the tank. The solar field of this city has been studied, before installing the concentrators in Ghardaïa city. The experimental results obtained are validated by three mathematical models with the data base of the radiometric station of Ghardaïa city. The first parabolic trough collector is characterized by a variable focus axis, which allowed to have a range of different concentrations imposed on the absorber. Consequently, it has found that the best heat exchange is achieved when all or a quarter of the absorber tube is exposed to solar radiation. In addition, two types of heat transfer fluids (water and thermal oil Seriola 320) was compared for their thermal storage efficiencies inside the tank during the evening, where it has shown that thermal storage with water is more efficient and effective than thermal oil. Based on the achieved above results, constructed a second parabolic trough collector oriented perpendicularly to the sun, from the morning till the evening, for a whole one year. Temperature measurements are obtained using an automatic solar tracking electronic circuit, using Raspberry Pi3 and Arduino boards for collecting data. In addition, our prototype has been protected by a glass cover; this envelop protects the entire concentrator against the undesirable effects of dust and rain. Also, it contributes to increase the heat transfer of the absorber and to reduce convective thermal losses and radiative to the environment.

Keywords: Parabolic trough collector; Solar; Absorber; Solar tracking; Raspberry Pi3; Arduino; Glass cover; Simulation; Solar Thermal; Thermal storage; heat transfer fluid.

الملخص

يتناول العمل المنجز في أطروحتنا دراسة نموذجين مختلفين من المكثفات المقعرة نو قطع مكافئ مع وبدون غطاء زجاجي. ويتمثل الهدف من هذا البحث في زيادة تدفق الحرارة عند أنبوب الامتصاص، كذا القضاء على تأثير جيب التمام للحصول على تخزين حراري جيد في الخزان. و قبل تجسيد هذين المكثفين، تمت دراسة المجال الشمسي للمنطقة المعنية "غرداية" كخطوة أولية، أين تحققنا من صحة النتائج التجريبية المتحصل عليها من خلال محاكاتها لثلاث نماذج رياضية، مع قاعدة البيانات الخاصة بالمحطة الراديومترية لوحدة أبحاث الطاقة المتجددة بموقع الدراسة. يتميز المكثف الأول بوجود محور تراكيز متغير و الذي يسمح لنا بالحصول على مجموعة من التراكيز المختلفة المفروضة على أنبوب الامتصاص. و وفقا لهذا، استنتجنا أن أفضل تبادل حراري يتحقق عند التعرض الكلي لأنبوب الامتصاص للإشعاع الشمسي أو ربعه. بالإضافة إلى ذلك، قمنا بمقارنة نوعين من سوائل نقل الحرارة (الماء والزيت الحراري Seriola 320) حول كفاءتها في التخزين الحراري داخل الخزان خلال فترة المساء أين توصلنا إلى أن التخزين الحراري بالماء أكثر كفاءة وفعالية من الزيت. إستنادا على ما سبق، قمنا بإنشاء مكثف ثان حيث وجهنا المقعر بشكل متعامد إلى الشمس، من الصباح إلى المساء، طوال العام. قياسات درجة الحرارة كانت باستخدام دارة أوتوماتيكية لتتبع الشمس خلال اليوم باستخدام لوحتي Raspberry Pi3 و Arduino. علاوة على ذلك، قمنا بتغليف نموذجنا الأولي بغطاء زجاجي، هذا الأخير سمح بحماية المكثف بأكمله ضد الآثار البيئية لكل من الغبار والمطر. وبالمقابل ، فإنه سمح أيضا بزيادة النقل الحراري لأنبوب الامتصاص والتقليل من الضياع الحراري الحلمي والإشعاعي نحو الوسط الخارجي.

الكلمات المفتاحية: مكثف؛ قطع مكافئ؛ الشمس؛ أنبوب الإمتصاص؛ الأشعة الشمسية؛ Raspberry Pi3؛ Arduino؛ الغطاء الزجاجي؛ محاكاة؛ الطاقة الشمسية الحرارية؛ التخزين الحراري؛ سائل نقل الحرارة.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'intégration des énergies renouvelables dans le mix énergétique national constitue un enjeu majeur dans la perspective de préservation des ressources fossiles, de diversification des filières de production de l'électricité et de contribution au développement durable [1].

A la faveur du programme de développement des énergies renouvelables 2011-2030, ces énergies se placent au cœur des politiques énergétiques et économiques menées par l'Algérie, notamment le développement du photovoltaïque et de l'éolien à grande échelle, l'introduction des filières de la biomasse (valorisation des déchets), de la cogénération, la géothermie, et le développement du solaire thermique [2,3].

Notre pays en particulier, et les pays du Maghreb en général, ont un potentiel solaire élevé. En effet, les taux d'irradiation solaire effectués par satellites de l'Agence Spatiale Allemande (DLR), montrent des niveaux d'ensoleillement exceptionnels de l'ordre de 1200 kWh/m²/an dans le Nord du Grand Sahara. Cette Agence déclare que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit : 169,0 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque et 35 TWh/an pour l'éolien [4].

Le Sahara Algérien représente 86% de la superficie totale, avec une durée moyenne d'ensoleillement de 3500 h/an et une moyenne d'énergie reçue égale à 2650 kWh/m²/an [5]. Ghardaïa, est l'une des régions désertiques, qui se caractérise par un taux d'insolation très important (en moyenne 75%), et une moyenne annuelle de l'irradiation journalière globale mesurées sur un plan horizontal dépassant 6000 Wh/m² [6].

La disponibilité des terrains ensoleillés pendant toute l'année dans la ville de Ghardaïa, conduit à la possibilité d'installer des centrales thermiques à concentration ; l'utilisation d'un dispositif de concentration du rayonnement, préalablement à une conversion héliothermique, a pour but principal d'augmenter le flux incident sur la surface absorbante d'un convertisseur, de telle manière que les déperditions thermiques de celle-ci, à sa température nominale de fonctionnement, soient faibles (négligables), par rapport au flux incident.

À ce propos, ce travail est basé sur l'étude d'un type de concentration linéique, sur un concentrateur cylindro-parabolique à poursuite, installé dans une serre. Le but visé est de réaliser un concentrateur cylindro-parabolique caractérisé par un stockage thermique durant la nuit, en utilisant de l'eau comme un fluide de stockage. En plus, une optimisation des conditions de transfert de la chaleur, en cherchant la meilleure concentration du rayonnement solaire imposé sur le tube absorbeur.

Ce travail de thèse est subdivisé en quatre chapitres, en plus d'une introduction générale, une conclusion générale avec des perspectives et des annexes.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté une simulation du gisement solaire pour le site de Ghardaïa-Algérie, à l'aide d'un programme installé sur un logiciel de calcul Excel, en utilisant trois modèles mathématiques d'estimation du rayonnement solaire global, sur un plan horizontal, par ciel clair. Une confrontation est effectuée avec les valeurs mesurées au centre de Recherche Appliquée en Énergie Renouvelable de Ghardaïa.

Le deuxième chapitre, est consacré à la réalisation d'un concentrateur cylindro-parabolique horizontal au plan de la terre, en donnant une définition de chaque partie de ce prototype, suivi d'une étude expérimentale, en révélant l'importance de quelques paramètres, tels que le choix du fluide caloporteur, l'emplacement exact de l'absorbeur, la surface d'échange thermique, la vitesse d'écoulement et le stockage thermique. Une étude numérique du comportement thermique de notre concentrateur est appliquée, les résultats obtenus sont représentés grâce à un logiciel de calcul Fluent puis, ils sont discutés.

Le troisième chapitre est réservé à la création d'une nouvelle station de mesure, en utilisant une carte électronique Raspberry Pi3, afin d'enregistrer, facilement et précisément les mesures de températures de notre prototype, pour deux positions choisies de l'absorbeur. Le principe de fonctionnement du programme de la carte est expliqué, les résultats obtenus sont discutés, et la fiabilité de Raspberry est remarquée.

Concernant le dernier chapitre, nous avons réalisé un autre concentrateur différent du premier. Il est Caractérisé par l'élimination de l'effet de cosinus pendant toute l'année, avec une poursuite solaire automatique, par deux cartes électroniques, Raspberry Pi3 et Arduino, afin d'assurer le suivi du soleil, le long de la journée. Ce concentrateur est enveloppé par une serre pour réduire les pertes thermiques, et de permettre une protection contre la poussière et la pluie. Cette étude est achevée par une simulation numérique de ce prototype, pour indiquer les performances thermiques et discuter les résultats obtenus.

Références bibliographiques

- [1] Bouchaib S. Programme National de Développement des Energies Renouvelables (2015-2030). Portail Algérien des Energies Renouvelables CDER; 2015.
- [2] Kaddour F. Systèmes des énergies renouvelables et leurs intégrations dans les réseaux électriques. Thèse de doctorat, 2017. Université des Sciences Technologiques, Oran-Algérie.

- [3] <http://www.andi.dz/index.php/fr/les-energies-renouvelables>
- [4] Bentouba S. Slimani A. Boucherit MS. Hamouda M. L'énergie renouvelable en Algérie et l'impact sur l'environnement. Séminaire International sur la Physique Energétique 2010, Béchar-Algérie.
- [5] Khelif A. Expérience, Potentiel et Marche Photovoltaïque Algérien. New Energy Algeria NEAL2011: 1–7 (<https://docplayer.fr/20047845-Experience-potentiel-et-marche-photovoltaique-algerien-amar-khelif.html>).
- [6] Gairaa K. Benkaciali S. Modélisation numérique des irradiances globales et diffuse au site de Ghardaïa. Revue des Energies Renouvelables 2008 ; 11(1) :129–136.

CHAPITRE I

VALORISATION DU GISEMENT SOLAIRE DE GHARDAÏA-ALGERIE

I.1. Introduction

La quantité d'énergie solaire ou de rayonnement solaire disponible sur la surface terrestre dépend de plusieurs facteurs. Soit : des facteurs géographiques, astronomiques, physiques ou météorologiques. Parmi eux, le rayonnement extraterrestre, la transmittance atmosphérique, la distance Terre-Soleil, la durée d'ensoleillement, la température ambiante et la nébulosité à l'endroit correspondant [1, 2].

Afin de réaliser un système à conversion solaire, et pour produire de l'énergie ou de l'électricité, ou bien pour faire chauffer ou refroidir, il faut connaître précisément les données du rayonnement solaire pour une conception optimale, et une prédiction des performances de ces systèmes [2].

Le gisement solaire décrit l'évolution du rayonnement solaire disponible le long d'une période bien déterminée, tout en basant sur un ensemble de données. Pour un endroit particulier, les meilleures données du rayonnement solaire sont mesurées d'une façon ininterrompue et précise, pour une longue durée [3].

Pour évaluer le gisement solaire, un réseau de stations a été créé à l'échelle mondiale. Malheureusement, pour la plupart des pays en voie de développement comme l'Algérie, le nombre de ces stations est très limité ; par conséquent, les mesures du rayonnement solaire sont apparues, vraiment difficiles. De ce fait, divers modèles mathématiques à haute performance ont été proposés afin d'estimer les données de radiations solaires.

Dans ce chapitre, notre étude a pour but de contribuer à l'évaluation du gisement solaire instantané concernant les journées types, pour une période d'un an (2008), à la ville de Ghardaïa, Algérie. Cette région est caractérisée par un ensoleillement très fort. En outre, elle présente un endroit idéal pour l'implantation des systèmes de conversion d'énergie solaire, pour subvenir aux besoins socio-économiques dans les régions sahariennes et subsahariennes.

I.2. Système Terre-Soleil

La variation de la disponibilité des radiations solaires saisonnières sur le sol, peut être prise à partir de la géométrie du mouvement relatif de la terre autour du soleil. La trajectoire de la terre autour du soleil est légèrement elliptique, quasi circulaire. Le plan de cette orbite est appelé plan de l'écliptique, et sa période est de 365,25 jours. La terre devient plus proche du soleil le 21 décembre (solstice d'hiver). Cependant, elle est plus éloignée le 21 juin (solstice d'été). La terre tourne sur elle-même avec une période approximativement égale à 24 h, autour d'un axe de rotation. Ce dernier est inclinée par un angle $\delta = 23^{\circ}45'$ avec la normale

au plan de l'écliptique (Fig. I.1). La variation de la distance terre-soleil en fonction de la date est donnée par la formule suivante [1] :

$$dr = 1 + 0,033 \cos (2 \pi 365 J) \quad (\text{I.1})$$

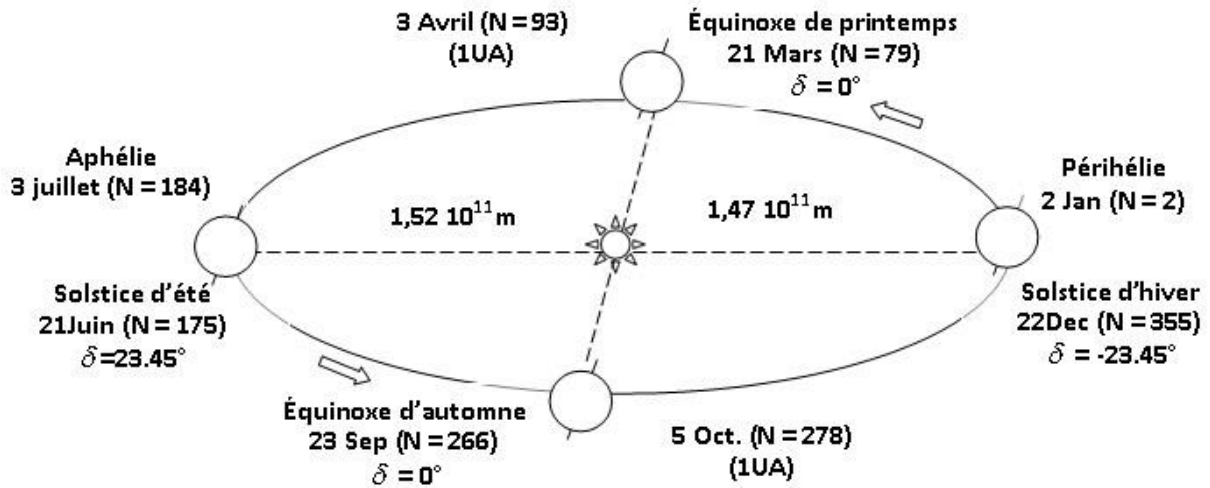


Figure I.1. Mouvement du globe Terrestre autour du Soleil [4].

I.3. Calcul de la position du soleil

I.3.1. Coordonnées géographiques terrestres

Ce sont les coordonnées représentées par une valeur angulaire, qui permettent le repérage d'un point sur la terre.

I.3.1.1. Longitude (λ)

La longitude d'un lieu, généralement notée λ , correspond à l'angle qui fait le plan méridien passant par ce lieu avec un plan méridien retenu comme origine. La longitude de référence sur Terre est le méridien Greenwich (origine 0°). Par convention, nous affectons du signe (+) les méridiens étendus vers l'est de ce méridien, et du signe (-) les méridiens étendus vers l'ouest.

I.3.1.2. Latitude (φ)

La latitude est généralement notée φ . Elle permet de repérer la distance angulaire d'un point quelconque par rapport à l'équateur, qui est le plan de référence. La latitude varie entre 0° à l'équateur et 90° aux pôles. Le pôle nord représente la latitude $+90^\circ$ et le pôle sud représente la latitude -90° . Par convention, le signe (+) est affecté à tous les lieux de l'hémisphère nord et le signe (-) à tous les lieux de l'hémisphère sud.

I.3.2. Coordonnées horaires

I.3.2.1. Déclinaison solaire(δ)

La déclinaison solaire δ est l'angle formé par la droite qui relie la terre au soleil et le plan équatorial terrestre. Cet angle varie au cours des saisons [4].

Aux équinoxes, la déclinaison est nulle $\delta = 0$ (l'équinoxe de printemps intervient vers le 21 Mars et l'équinoxe d'automne intervient vers le 21 Septembre). Alors que, la déclinaison est variée de $+ 23^\circ 45'$ à $- 23^\circ 45'$ au Solstice d'été qui intervient vers le 21 Juin, et Solstice d'hiver qui intervient vers le 21 Décembre, respectivement. Sa valeur peut être calculée par la formule de Cooper (1969) :

$$\delta = 23,45 \sin \left((360/365) (J + 284) \right) \quad (\text{I.2})$$

I.3.2.2. Angle horaire (h)

L'angle horaire du soleil est la portion d'arc d'équateur comprise entre le plan méridien du lieu et celui qui passe par la direction du soleil, si nous le prenons comme origine le méridien de Greenwich. Il est compris entre 0° et 360° . La valeur de l'angle horaire augmente de 15° par heure. Elle est nulle à midi solaire, négative le matin, positive en après-midi. L'angle horaire est calculé comme suite [4, 5] :

$$h = 15^\circ (ts - 12) \quad (\text{I.3})$$

Où, ts est donné par :

$$ts = t + EOT + (l_{st} - l_{local}) 4min/degree \quad (\text{I.4})$$

Et, EOT est l'équation du temps (Fig. I.2) donnée par Woolf [4] :

$$EOT = 0,258 \cos(x) - 7,416 \sin(x) - 3,648 \cos(2x) - 9,228 \sin(2x) \quad (\text{I.5})$$

$$x = 360 (J - 1) / (365,242) \quad (\text{I.6})$$

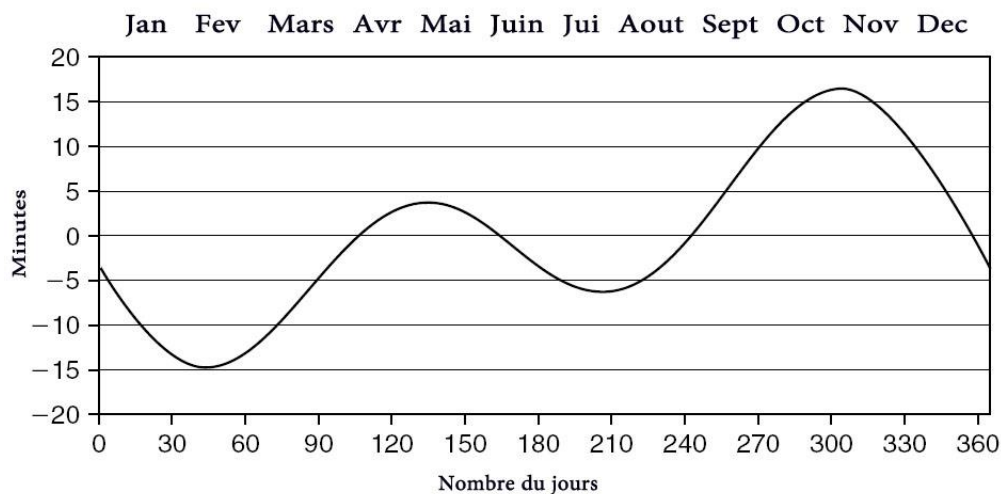


Figure I.2. Equation de temps [6].

I.3.3. Coordonnées horizontales

Le soleil décrit un cercle autour de l'axe de rotation de la terre. Et donc, le repérage du soleil se fait par l'intermédiaire de deux angles (Fig. I.3):

I.3.3.1. Hauteur angulaire du soleil (α)

C'est l'angle de visée du soleil avec sa projection sur un plan horizontal. Cette hauteur est variable pendant le jour, de 0° où le soleil est à l'horizon, à 90° où le soleil est au zénith. Il est donné par l'équation suivante [5]:

$$\sin \alpha = \sin \delta \times \sin \varphi + \cos \delta \times \cos \varphi \times \cos h \quad (\text{I.7})$$

I.3.3.2. Azimut (γ_s)

C'est l'angle dans le plan horizontal entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil. Afin de calculer l'angle d'incidence des rayons sur une surface non horizontale, il est nécessaire de connaître l'azimut du soleil. Cet angle est donné par l'équation suivante [5]:

$$\cos(\gamma_s) = \sin(\alpha) \times \sin(\varphi) - \sin(\delta) \cos(\alpha) \times \cos(\varphi) \quad (\text{I.8})$$

I.3.3.3. Angle zénithal (θ_z)

C'est l'angle entre la verticale d'une surface, et le rayon du soleil. Il est défini par l'équation ci-dessous [5]:

$$\cos \theta_z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \delta \cos \varphi \cos h \quad (\text{I.9})$$

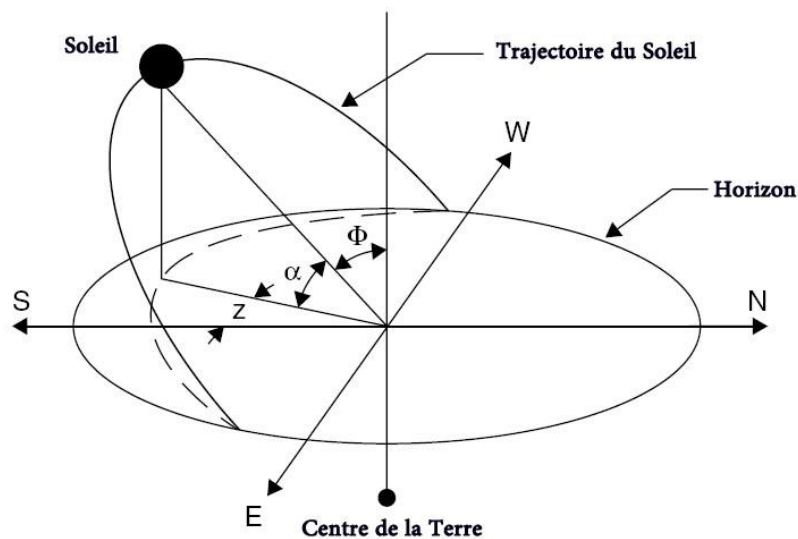


Figure I.3. Coordonnées célestes [7].

I.4. Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire se forme d'un ensemble des ondes électromagnétiques, émises par le Soleil. Il est composé de toute la gamme des radiations, à titre des rayonnements Ultraviolet, Visible et Infrarouge.

I.4.1. Rayonnement extraterrestre

La quantité moyenne de radiation solaire tombant sur une surface normale hors l'atmosphère de la terre (extraterrestre), à la distance moyenne entre la terre et le soleil est appelée la constante solaire I_{sc} . La variation de la distance terre-soleil correspond à une variation de l'éclairement énergétique de ($\pm 3,5\%$) aux solstices d'hiver et d'été par rapport à l'éclairement énergétique aux équinoxes. La Figure I.4 représente une illustration du spectre de rayonnement solaire extraterrestre.

Le rayonnement extraterrestre peut être calculé par la formule approximative [1] suivante :

$$H_0 = (24 \times 60 \pi) I_{sc} \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s) + \omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) \quad (I.10)$$

$I_{sc} = 0,082 \text{ MJ/m}^2/\text{min}$ (1367 W/m^2) [1].

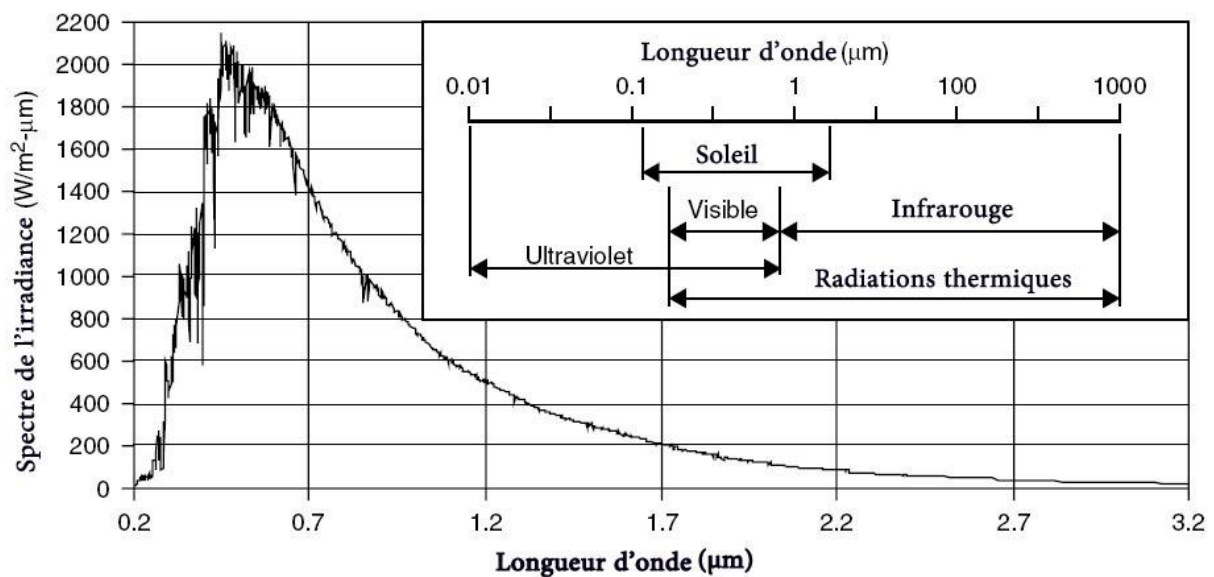


Figure I.4. Spectre du rayonnement solaire [8].

I.4.2. Rayonnement terrestre

La traversée de l'atmosphère modifie la composition spectrale du rayonnement solaire extraterrestre par des différents phénomènes tels que, l'absorption, la réflexion, la réfraction et la diffusion. Le rayonnement solaire qui arrive au niveau de sol se décompose en deux parties : directe et diffuse (Fig. I.5).

I.4.2.1. Rayonnement direct IBN

Il représente l'éclairement énergétique atteignant directement une surface terrestre réceptrice normale à l'axe de l'angle solide limité au disque solaire, pour les radiations provenant directement du soleil.

I.4.2.2. Rayonnement diffus ID

Le rayonnement solaire diffus au sol, reçu sur une surface horizontale provient de tout l'hémisphère supérieur, à l'exception de l'angle solide limité au disque solaire. Ce rayonnement prélevé sur le rayonnement solaire direct est souvent supposé isotrope, et résulte des phénomènes de diffusion multiples. Il dépend fortement de l'état de l'atmosphère.

I.4.2.3. Rayonnement global IG

Il correspond à la somme de l'énergie rayonnante totale du soleil, directe et diffuse reçue sur une surface horizontale à partir d'un angle solide de 2π stéradians.

$$IG = ID + IBN = IBH \sin h + ID \quad (I.11)$$

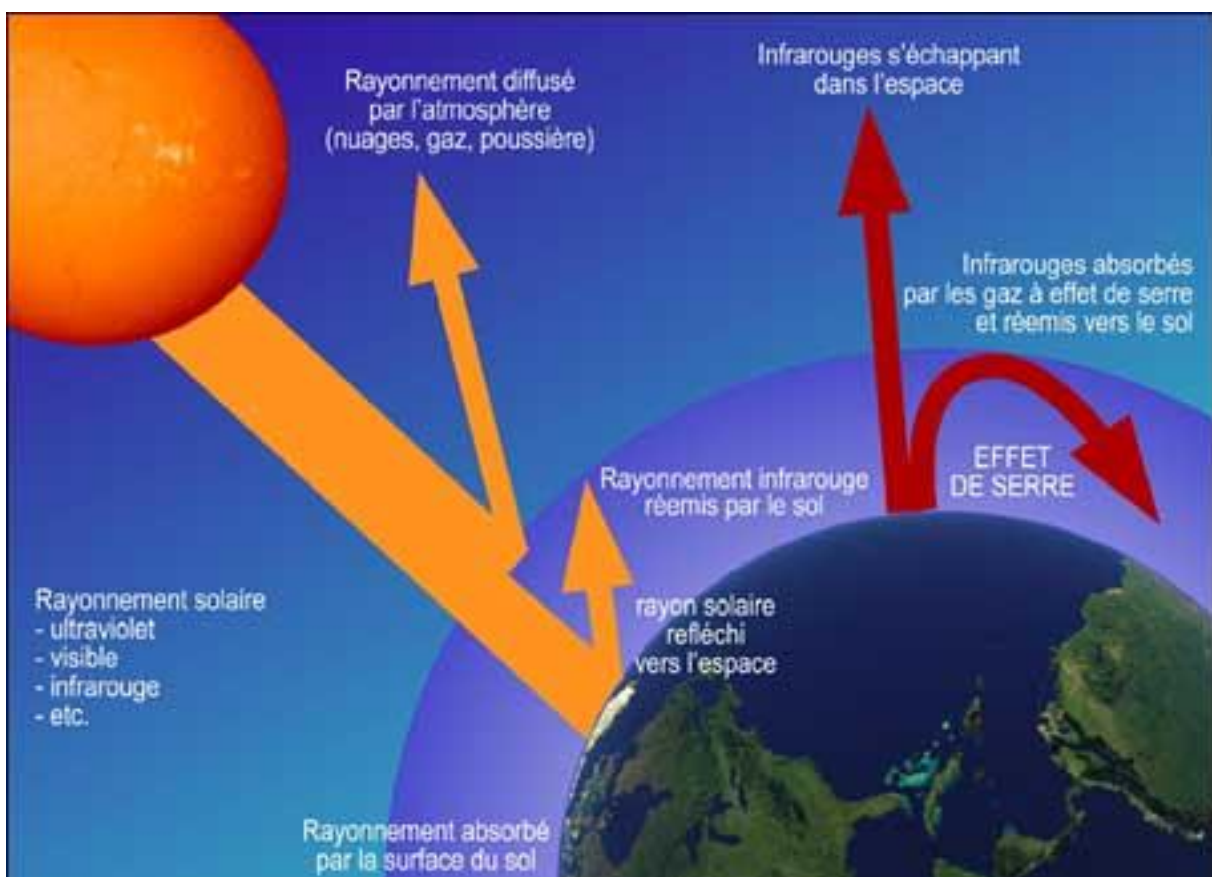


Figure I.5. Atténuation du rayonnement solaire à travers l'atmosphère [9].

I.5. Estimation du rayonnement solaire global sur un plan horizontal au site de Ghardaïa-Algérie

La prédiction des performances des systèmes à conversion solaire sur un endroit donné, tels que les systèmes photovoltaïques et thermiques, exige la prise en considération de l'intensité du rayonnement solaire global sur un plan horizontal. Malheureusement, en raison de différents obstacles techniques et financiers, les données de radiations solaires globales mesurées en Algérie ne sont disponibles que seulement dans quelques endroits à travers le pays où s'installent des stations radiométriques. Donc, il est nécessaire d'élaborer des données du rayonnement solaire global basées sur des modèles de haute performance, dont les modèles empiriques sont les plus populaires, en raison de leur faible coût avec des données d'entrées simples [10]. Par conséquent, il est de pratique courante, de mettre en corrélation le rayonnement solaire global avec des paramètres météorologiques de base. Ces paramètres comprennent la fraction d'insolation [11, 12], la nébulosité [13, 14], et la température ambiante [15, 16]. Pour estimer le rayonnement solaire global avec une grande précision, il est couramment utilisé, le paramètre de la durée d'ensoleillement ou fraction d'insolation [17].

Plusieurs études ont été réalisées sur l'estimation de la moyenne mensuelle du rayonnement solaire global quotidien sur un plan horizontal, pour les différentes régions du monde. Malgré le nombre de recherches effectuées, juste quelques corrélations empiriques ont été trouvées, concernant l'Algérie dans la littérature. Chegaar et Chibani [18] ont appliqué deux modèles, à quatre endroits en Algérie soit : Alger, Oran, Beni Abbas, et Tamanrasset, afin d'estimer la moyenne mensuelle de radiation solaire globale, quotidienne sur un plan horizontal. Alors que, Salmi et al. [19], ont développé trois modèles pour quatre endroits algériens différents, basés sur la durée d'ensoleillement pour une estimation de rayonnement solaire global sur un plan horizontal. En raison de l'absence des données du rayonnement solaire global pour la plupart des endroits en Algérie, des modèles généraux sont très nécessaires pour la prédiction du rayonnement solaire global. Face à ce constat, le but de cette section est de développer des modèles généralisés basés sur les données de la durée d'ensoleillement/température ambiante, qui sont utilisés pour une estimation du rayonnement solaire global quotidien sur un plan horizontal, sur le site de Ghardaïa-Algérie. Notre prototype CCP est installé au niveau de ce site, qui est caractérisé par la présence d'une station radiométrique, qui peut fournir des données pendant une année d'ensoleillement. En outre, les performances des modèles proposés sont validées et vérifiées quant à leur précision, en calculant l'erreur moyenne relative, et en les comparant avec les données mesurées de la

station radiométrique de l'unité de recherche appliquée en énergie renouvelable située à Ghardaïa.

I.5.1. Données et méthodologie

I.5.1.1. Données utilisées

Les données utilisées dans ce travail correspondent à des mesures de la radiation globale instantanée durant les journées type de chaque mois sur un plan horizontal [W/m^2]. En plus que, les valeurs moyennes d'insolation [h] et les températures ambiantes maximales et minimales [$^{\circ}\text{C}$] relatives pour le site Ghardaïa-Algérie (avec un minimum d'une année de données pour ce site). Ces données proviennent de la station radiométrique [20-24] de l'unité de recherche appliquée en énergies renouvelables à Ghardaïa (Fig. I.6).

Les coordonnées géographiques de ce site sont : Altitude = 450 m, longitude = $3,42^{\circ}$ et latitude = $32,23^{\circ}$.

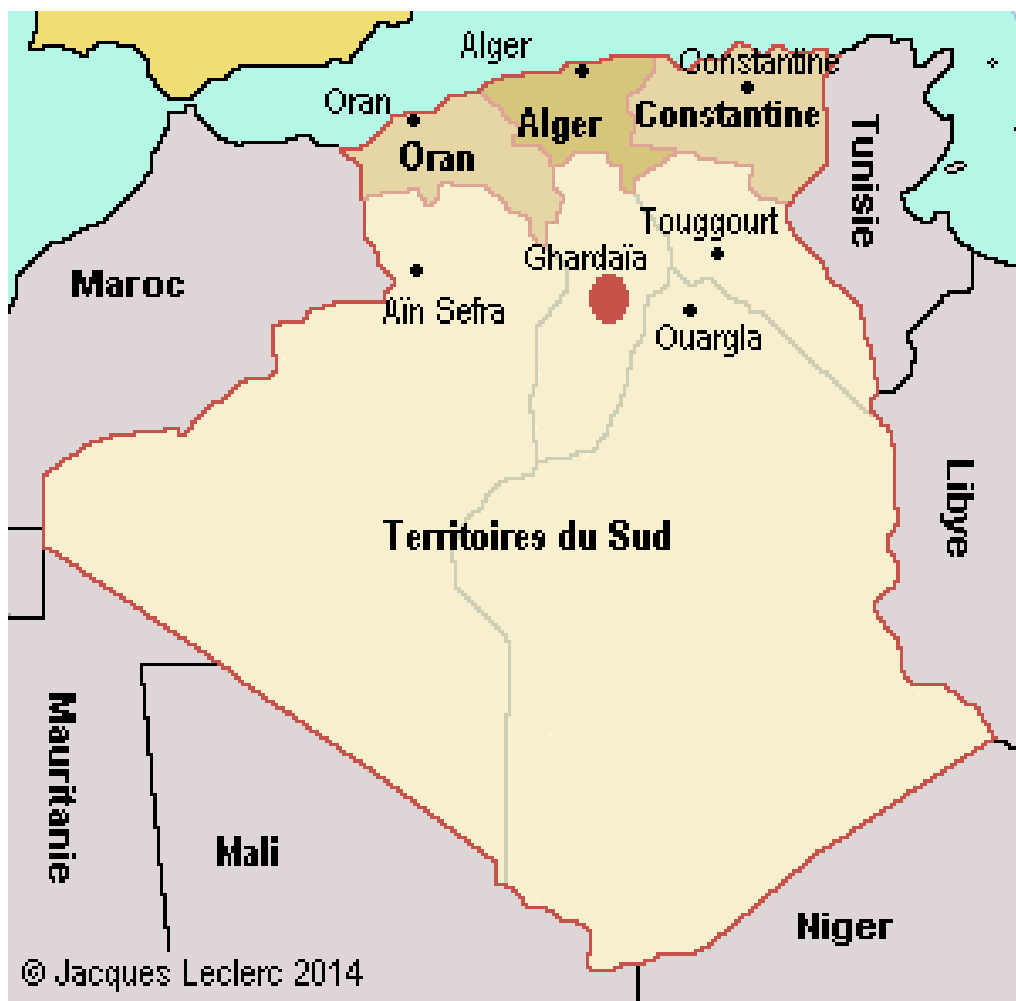


Figure I.6. Localisation de la station radiométrique sur la carte de l'Algérie [25].

I.5.1.2. Description des modèles

Pour la présente étude, nous proposons trois modèles mathématiques (Bird et Hulstrom 1991, Bras 1990 et Ryan, Stolzenbach 1972) [26-31], délivrés par un logiciel de calcul Excel (solrad.xls version 1.2), afin d'obtenir une validation du rayonnement solaire global, avec les valeurs de la station radiométrique de Ghardaïa.

I.5.2. Résultats et discussion

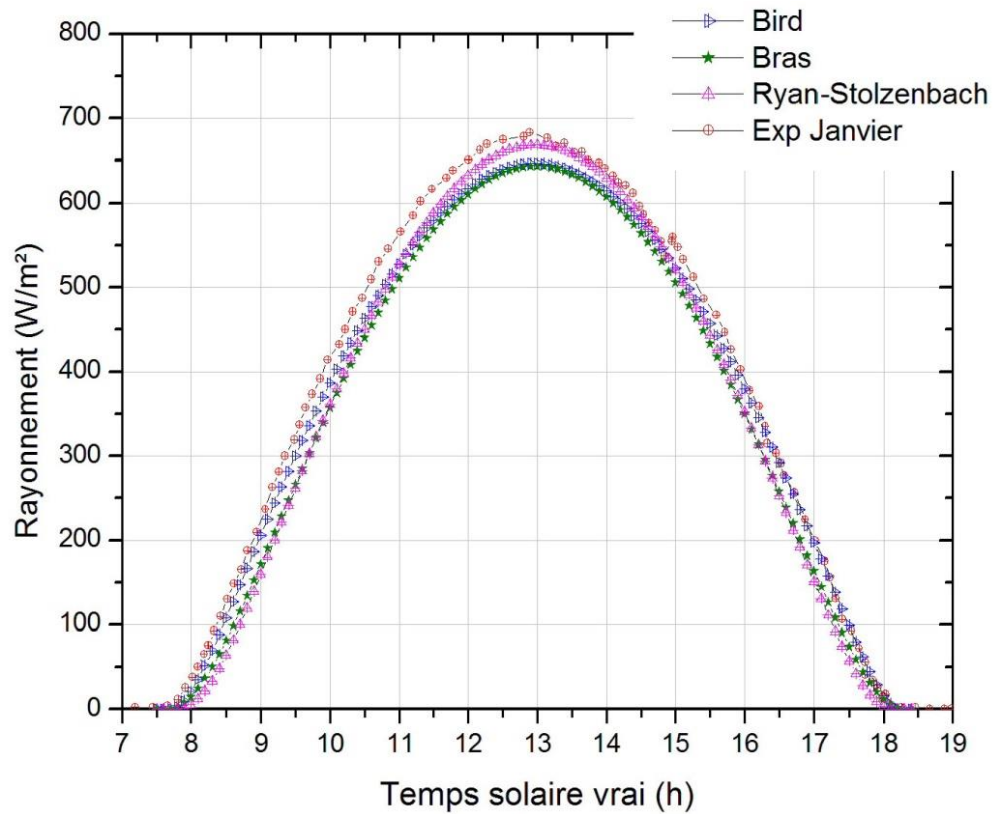


Figure I.7. Validation de la variation du rayonnement solaire pour le mois de Janvier.

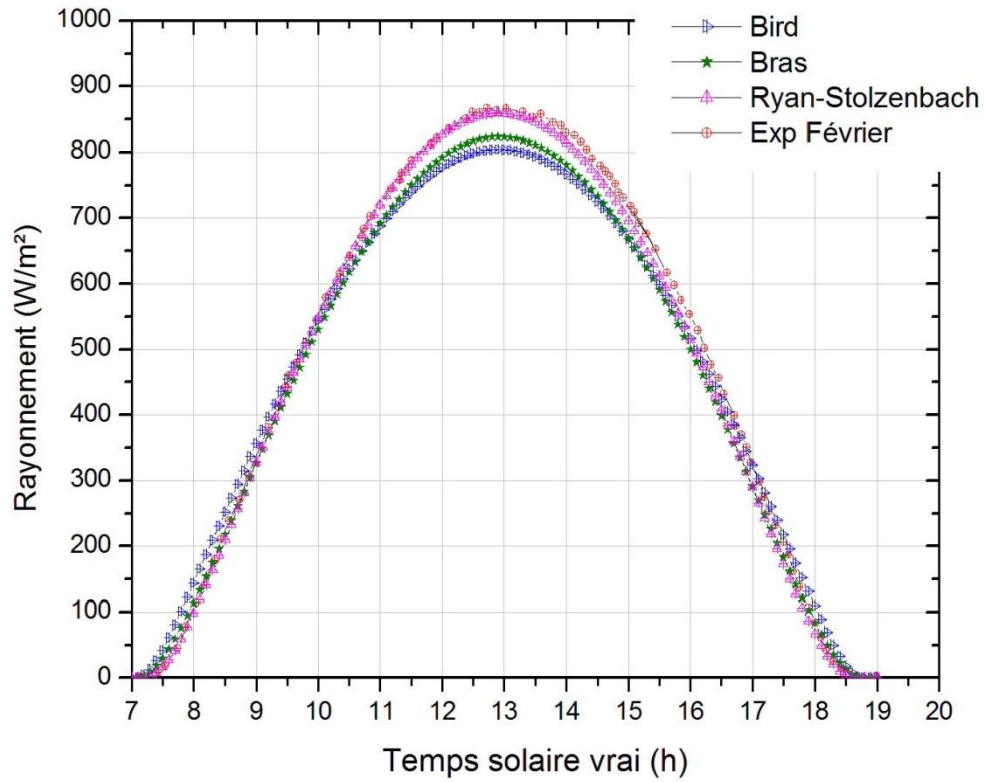


Figure I.8. Validation de la variation du rayonnement solaire pour le mois de Février.

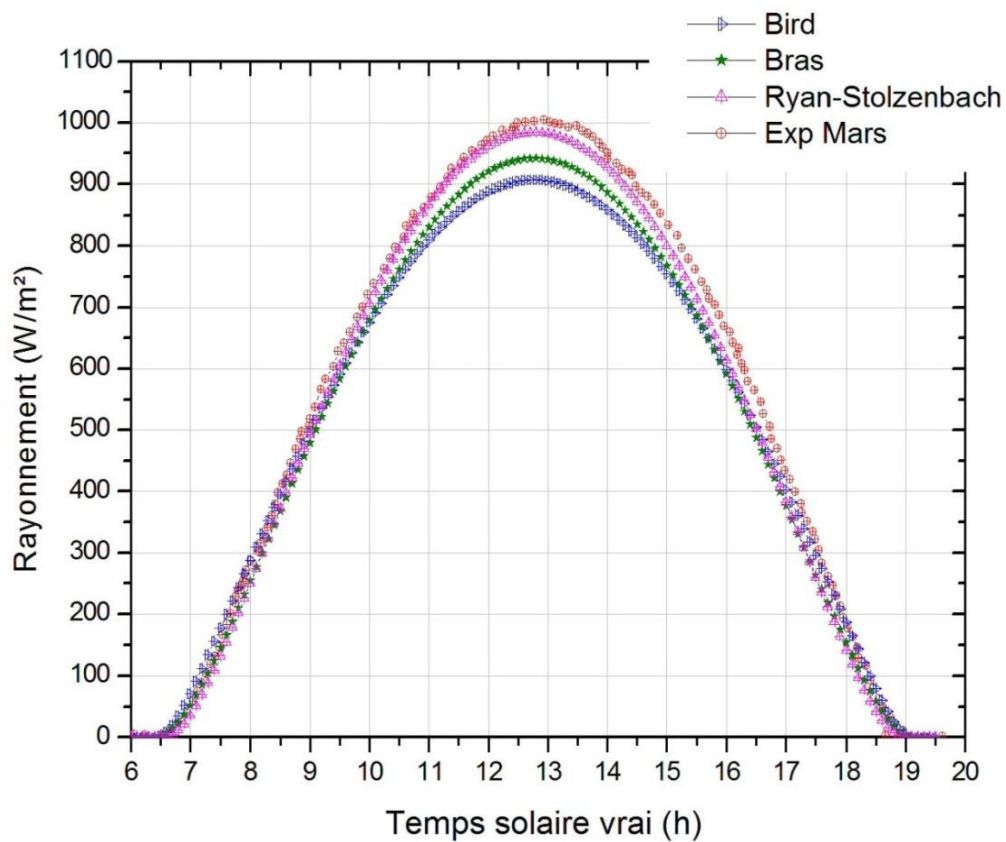


Figure I.9. Validation de la variation du rayonnement solaire pour le mois de Mars.

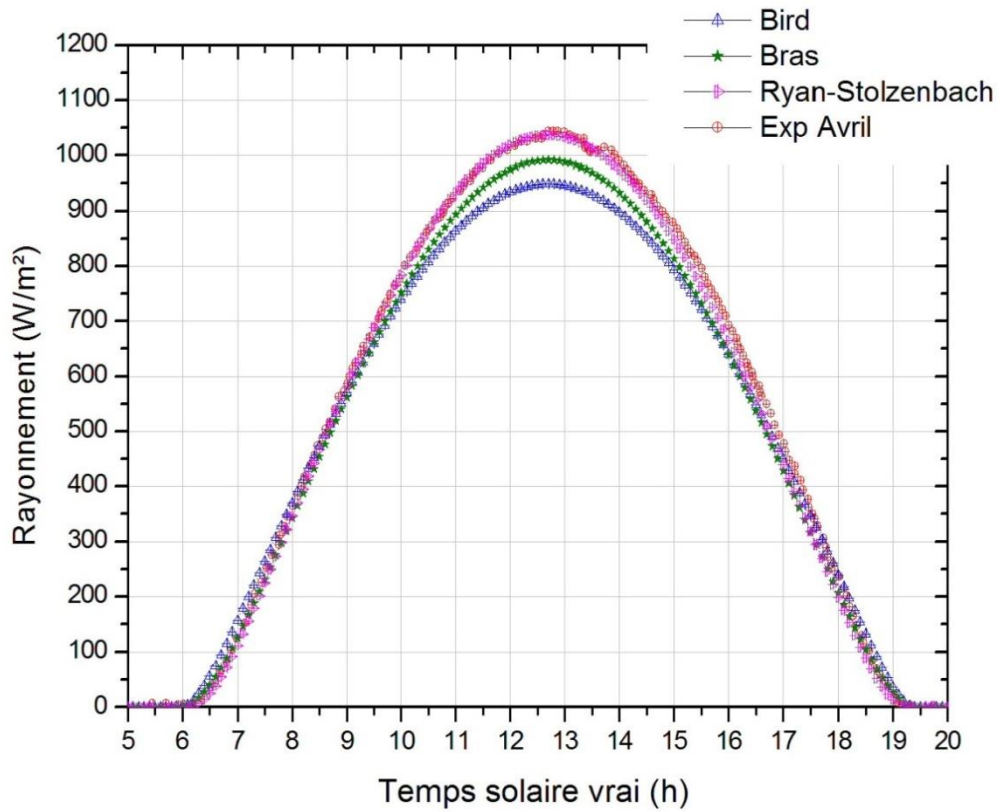


Figure I.10. Validation de la variation du rayonnement solaire pour le mois d'Avril.

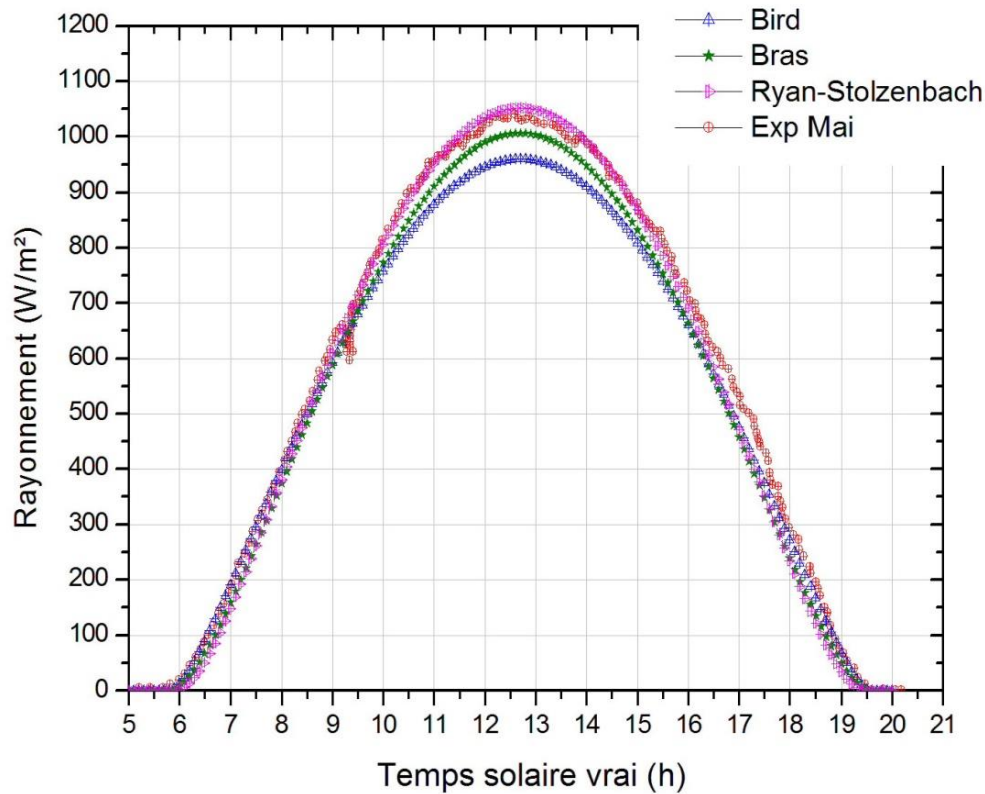


Figure I.11. Validation de la variation du rayonnement solaire pour le mois de Mai.

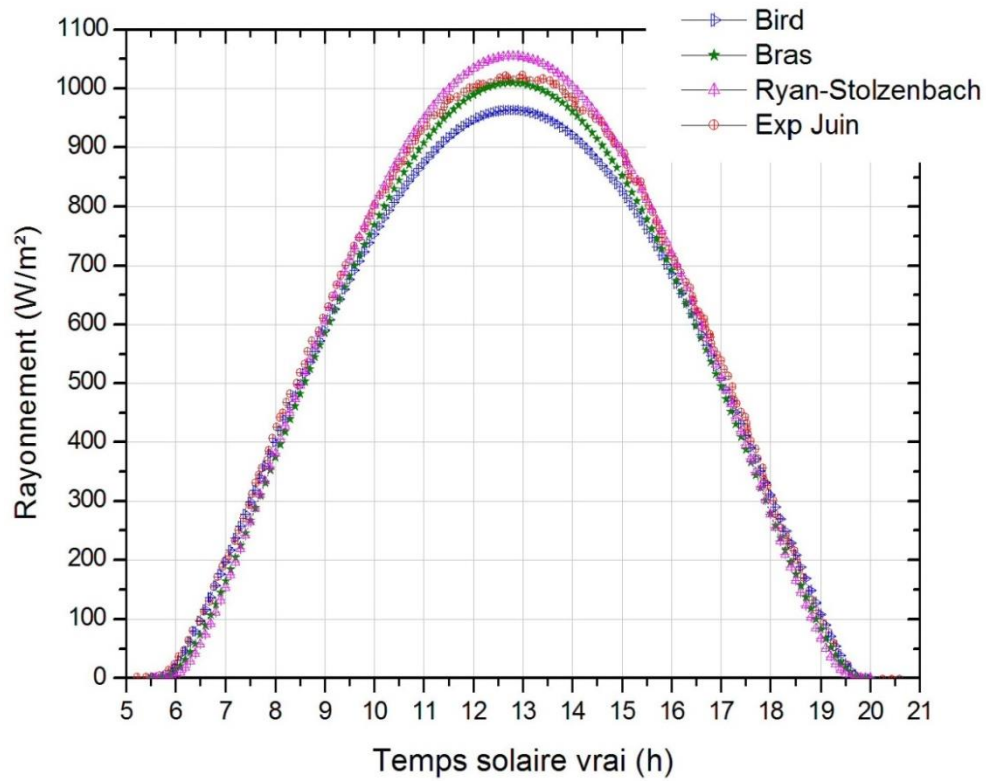


Figure I.12. Validation de la variation du rayonnement solaire pour le mois de Juin.

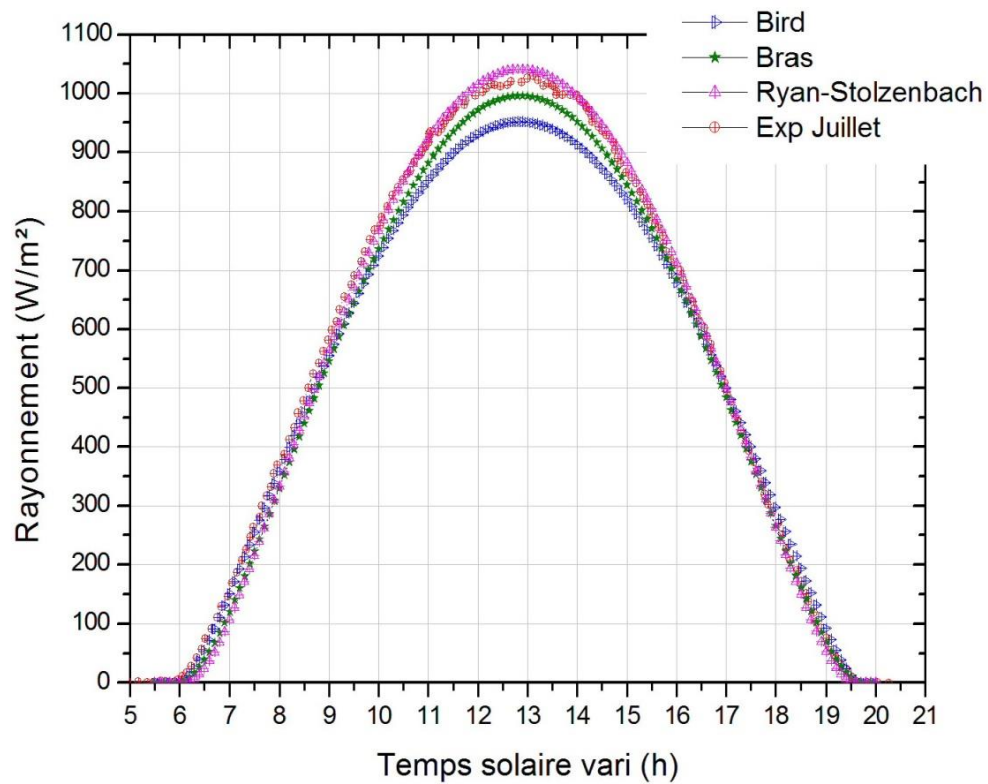


Figure I.13. Validation de la variation du rayonnement solaire pour le mois de Juillet.

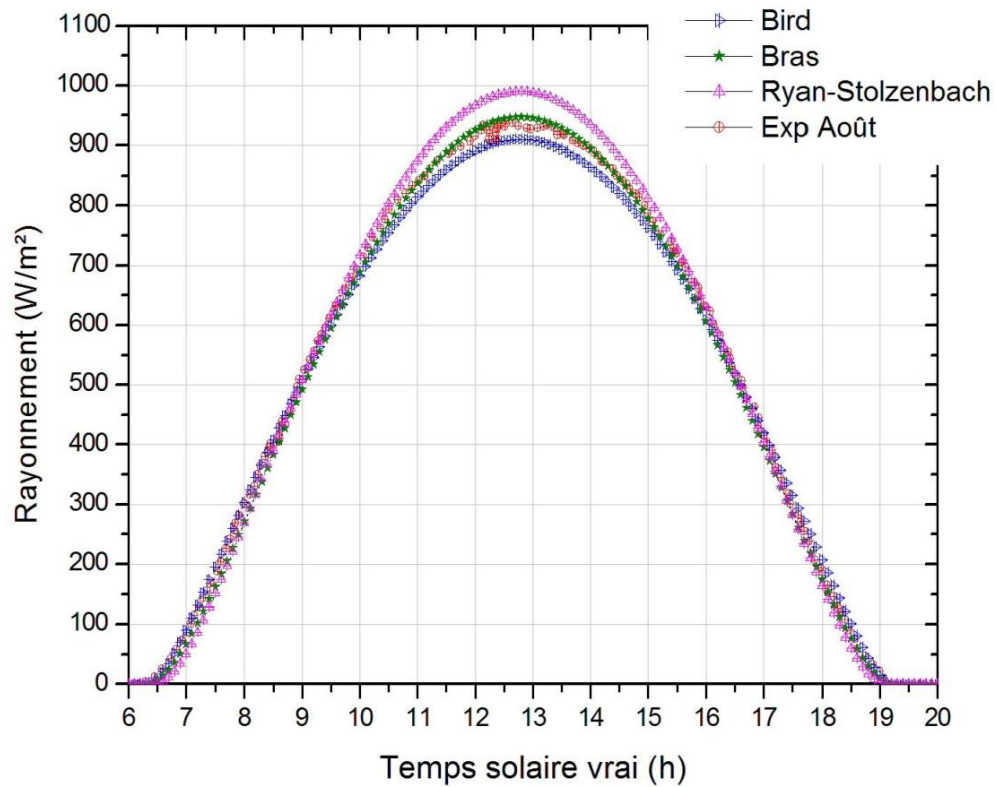


Figure I.14. Validation de la variation du rayonnement solaire pour le mois d'Août.

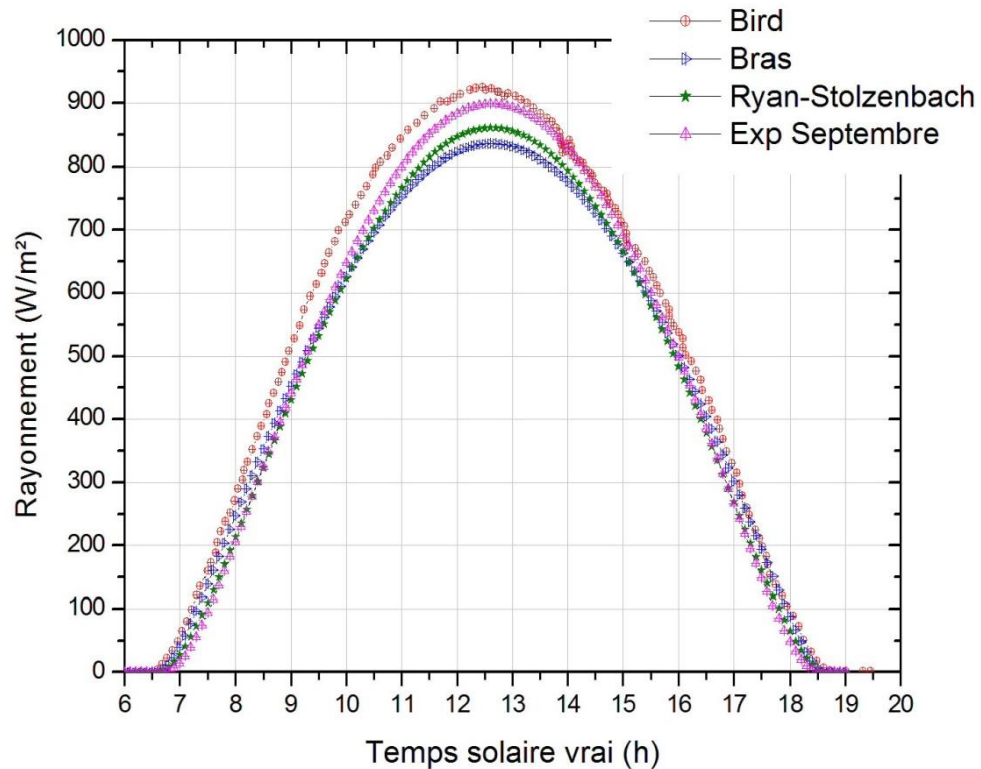


Figure I.15. Validation de la variation du rayonnement solaire pour le mois de Septembre.

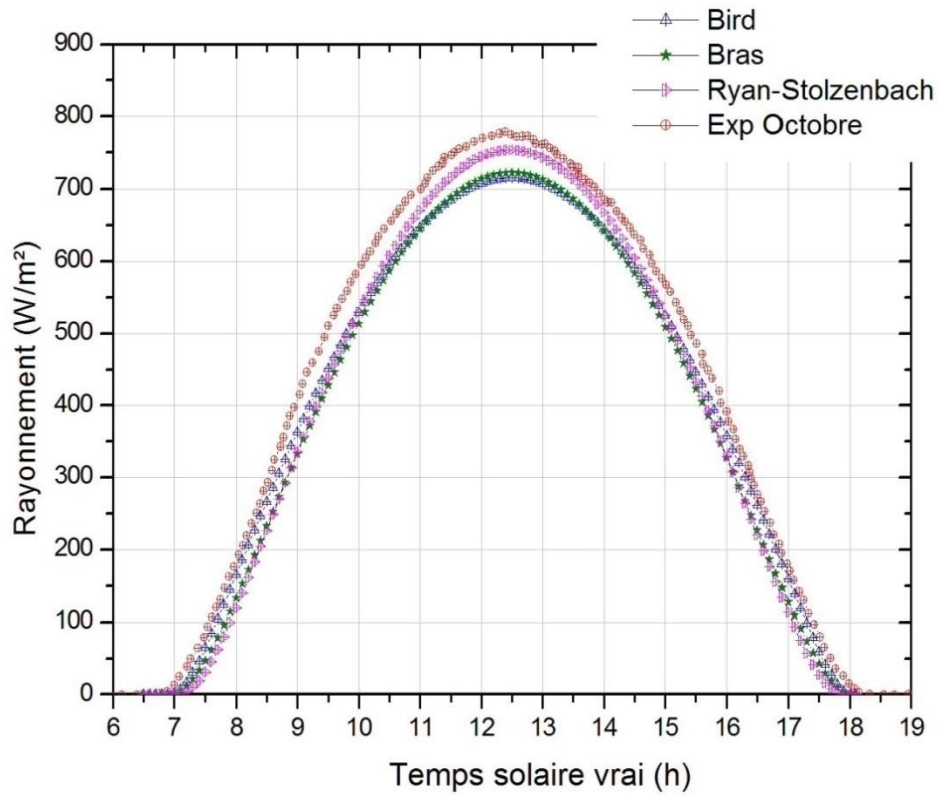


Figure I.16. Validation de la variation du rayonnement solaire pour le mois d’Octobre.

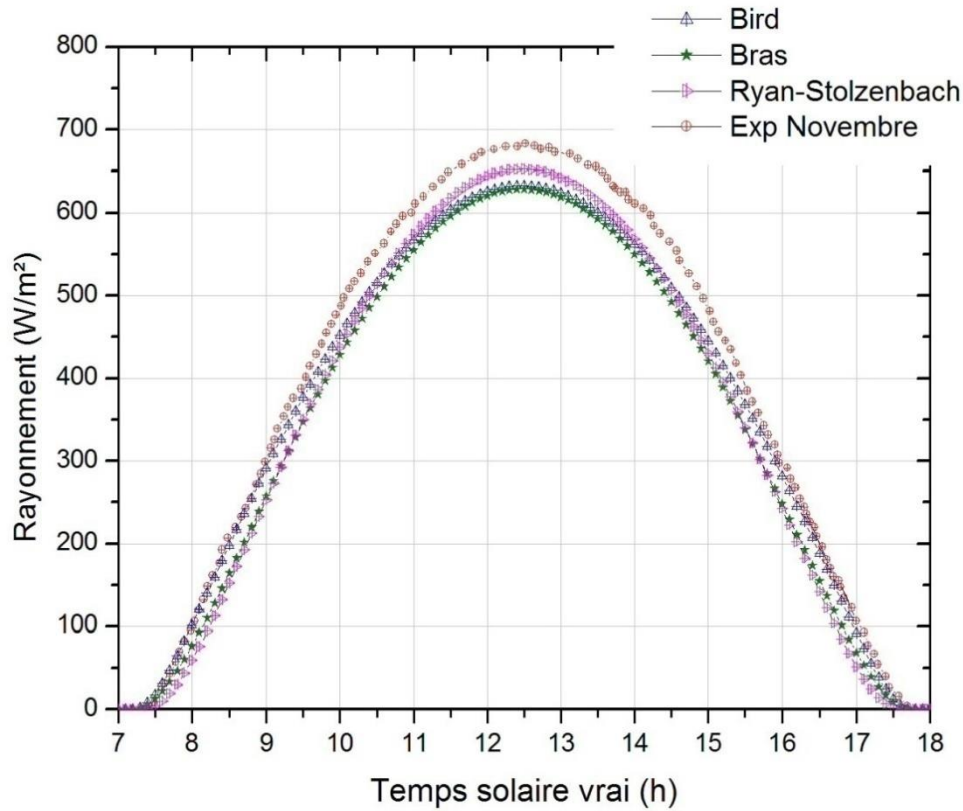


Figure I.17. Validation de la variation du rayonnement solaire pour le mois de Novembre.

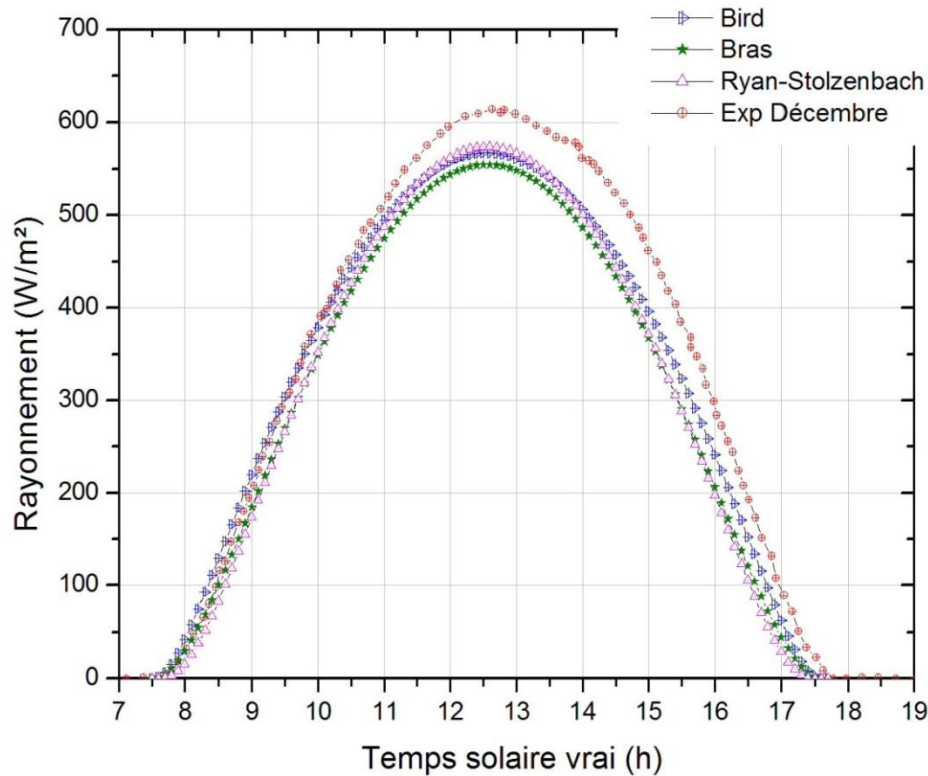


Figure I.18. Validation de la variation du rayonnement solaire pour le mois de Décembre.

Pour obtenir une validation du rayonnement solaire, nous allons comparer les valeurs des rayonnements solaires fournies par la station radiométrique de l'unité de recherche appliquée en énergie renouvelable de Ghardaïa [20], avec les valeurs standards des trois modèles mathématiques, délivrées par un logiciel de calcul Excel, sur un plan horizontal, pendant des journées à ciel clair durant toute l'année 2008.

Les figures I.7. - I.18. représentent les courbes comparatives relatives au rayonnement global, en utilisant le modèle de Bird, Bras et Ryan-Stolzenbach avec les données expérimentales du site de choix.

En général, le traitement des données du rayonnement solaire provenant de la station radiométrique de Ghardaïa, montre des fluctuations dans l'allure de la courbe par rapport à celles de rayonnements solaires estimés par ces trois modèles. Le tableau I.1 indique les erreurs relatives moyennes journalières pour chaque modèle mathématique d'estimation de rayonnement solaire global. Nous remarquons que : le modèle de Bras est le plus proche aux mesures expérimentales, pour le mois de Janvier avec une erreur relative égale à 7,68 par rapport aux autres modèles. Alors que, le modèle de Bird présente de meilleurs résultats pour le mois de Février, Octobre, Novembre et Décembre avec des erreurs relatives de l'ordre de 0,68 %, 4,97 %, 1,24 % et 2,02, respectivement. En effet, le modèle de Ryan-Stolzenbach

correspond à de bonnes mesures expérimentales pour le reste du mois de l'année (du Mars jusqu'au Septembre).

Erreur relative moyenne journalière (%)	Mois	Bird	Bras	Ryan-Stolzenbach
Site de Ghardaïa	Janvier	12,95	07,68	09,46
	Février	00,68	01,00	01,76
	Mars	02,63	02,69	00,47
	Avril	15,62	15,11	12,23
	Mai	14,24	13,56	10,59
	Juin	04,79	03,93	00,61
	Juillet	07,20	06,48	03,27
	Aout	03,56	03,39	00,18
	Septembre	11,44	12,29	09,64
	Octobre	04,97	07,90	05,78
	Novembre	01,24	03,64	02,12
	Décembre	02,02	08,31	07,59

Tableau I.1. Résultats de calcul des erreurs relatives du rayonnement solaire horizontal pour les journées types, dans le site de Ghardaïa.

I.6. Conclusion

Le présent chapitre est un récapitulatif de quelques notions de base concernant le gisement solaire, particulièrement, le rayonnement global horizontal sur la surface du sol. Ces notions nous permettent de comprendre, et d'analyser les performances des installations solaires thermiques.

D'autre part, la modélisation du rayonnement solaire est appliquée par trois modèles Bird, Bras et Ryan-Stolzenbach. Chaque modèle utilisé est basé sur ses propres équations pour déterminer les paramètres géométriques tels que la déclinaison solaire, l'angle horaire, la hauteur du soleil, l'azimut et l'angle d'incidence ; Ainsi que les paramètres atmosphériques dont la masse, l'épaisseur optique de l'atmosphère et le facteur de trouble.

Les paramètres nécessaires pour le calcul des composantes du rayonnement solaire incident sur un plan horizontal, par ciel clair, ont été programmés avec Excel.

Ce travail nous a aussi permis de confronter les valeurs mesurées avec celles estimées par les trois modèles mathématiques choisis. Nous avons, par ailleurs, constaté que le modèle Ryan-Stolzenbach donne une bonne estimation du rayonnement solaire globale pour tous les mois de l'année, à l'exception des mois de Janvier et de Février. Les résultats obtenus pour le site de Ghardaïa sont très proches avec ceux calculés par Excel.

Références bibliographiques

- [1] Duzen H. Aydin H. Sunshine-based estimation of global solar radiation on horizontal surface at Lake Van region (Turkey). *Energy Convers Manage* 2012; 58: 35–46.
- [2] Adaramola M.S. Estimating global solar radiation using common meteorological data in Akure, Nigeria. *Renew Energy* 2012; 47: 38–44.
- [3] <http://sciences.univreunion.fr/laboratoires/le2p/projets/>
- [4] Goswami D.Y. Kreith F. Kreider J.F. Principles of solar engineering. 2^{ème} Édition. Taylor and Francis, Philadelphia, États Unis, 2000.
- [5] Duffie J.A. Beckman W.A. Solar engineering of thermal process. 2^{ème} Édition. John Wiley & Sons, New York, États Unis, 1991.
- [6] <http://www.cadrams-solaires.fr>.
- [7] Kalogirou S.A. Solar Energy Engineering: Processes and Systems. 1^{ère} Édition. Academic Press, Burlington, États Unis, 2009.
- [8] <http://www.ac-grenoble.fr>.
- [9] <http://climat.meteofrance.com>.
- [10] Yang K. Koike T. Ye B. Improving estimation of hourly, daily, and monthly solar radiation by importing global data sets. *Agric Forest Meteorol* 2006; 137: 43–55.
- [11] Angström A. Solar and terrestrial radiation. *Quart J Roy Met Soc* 1924; 50: 121–5.
- [12] Prescott J.A. Evaporation from water surface in relation to solar radiation. *Trans Roy Soc Sci Aust* 1940; 64: 114–25.
- [13] Hunt L.A. Kuchar L. Swanton, C.J. Estimation of solar radiation for use in crop modelling. *Agric Forest Meteorol* 1998; 91 (3–4): 293–300.
- [14] Muneer T. Gul M.S. Evaluation of sunshine and cloud cover based models for generating solar radiation data. *Energy Convers Manage* 2000; 41(5): 461–82.
- [15] Hargreaves G.H. Samani Z.A. Estimating potential evapotranspiration. *J Irrig Drain Eng* 1982; 108: 223–30.
- [16] Bristow K.L. Campbell, G.S. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agric Forest Meteorol* 1984; 31: 59–166.
- [17] Almorox J. Hontoria C. Benito M. Models for obtaining daily global solar radiation with measured air temperature data in Madrid (Spain). *App Energy* 2011; 88: 1703–9.
- [18] Chegaar M. Chibani A. Global solar radiation estimation in Algeria. *Energy Convers Manage* 2001; 42: 967–73.

- [19] Salmi M. Chegaar M. Mialhe P. A Collection of Models for the Estimation of Global Solar Radiation in Algeria. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy* 2011; 6: 187–191.
- [20] Gairaa K. Benkaciali S. Analysis of solar radiation measurements at Ghardaïa area, south Algeria. *Energy Procedia* 2011; 6: 122–129.
- [21] Gairaa K. Bakelli Y. An overview of global solar radiation measurements in Ghardaïa area, south Algeria. *International Journal of Energy and Environment* 2011; 2(2): 255–260.
- [22] Gairaa K. Bakelli Y. Solar Energy Potential Assessment in the Algerian South Area: Case of Ghardaïa Region. *Journal of Renewable Energy* 2013; 2013: 1–11 (Article ID 496348).
- [23] Gairaa K. Benkaciali S. Modélisation numérique des irradiations globale et diffuse au site de Ghardaïa. *Revue des Energies Renouvelables* 2008 ; 11(1) : 129–136.
- [24] Gairaa K. Bakelli Y. A Comparative Study of Some Regression Models to Estimate the Global Solar Radiation on a Horizontal Surface from Sunshine Duration and Meteorological Parameters for Ghradaia Site, Algeria. *ISRN Renewable Energy* 2013; 2013: 1–11 (Article ID 754956).
- [25] <https://www.google.com/images/ Frontières de l'Algérie/ wikipedia>
- [26] Iqbal M. *An Introduction to Solar Radiation*, Academic Press, Department of Mechanical Engineering, University of British Columbia, Canada, 1983.
- [27] Bird R.E. Hulstrom R.L. *Simplified Clear Sky Model for Direct and Diffuse Insolation on Horizontal Surfaces*, Technical Report N°SERI/TR-642-761, Golden, Colorado: Solar Energy Research Institute, 1981.
- [28] Koussa M. Malek A. Haddadi M. Validation de Quelques Modèles de Reconstitution des Eclairements dus au Rayonnement Solaire Direct, Diffus et Global par Ciel Clair. *Revue des Energies Renouvelables* 2006 ; 9(4) : 307–332.
- [29] Saheb-Koussa D. Koussa M. Belhamel M. Reconstitution du Rayonnement Solaire par Ciel Clair. *Revue des Energies Renouvelables* 2006 ; 9(2) :91–97.
- [30] Bras R.L. 1990. *Hydrology*. Addison-Wesley, Reading, MA.
- [31] Ryan P.J. and K.D. Stolzenbach. 1972. *Engineering aspects of heat disposal from power generation*, (D.R.F. Harleman, ed). R.M. Parson Laboratory for Water Resources and Hydrodynamics, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.).

CHAPITRE II

ETUDE ET RÉALISATION D'UN CONCENTRATEUR CYLINDRO- PARABOLIQUE HORIZONTAL

II.1. Introduction

Parmi les installations des centrales solaires thermiques à concentration, les centrales solaires à concentration cylindro-parabolique (CCP) sont considérées comme le moyen le plus utilisable, et le plus efficace pour la production de la chaleur et de l'électricité, à partir de ces technologies. Ce type de concentrateur focalise le rayonnement solaire sur l'absorbeur à l'aide d'un miroir ayant la forme d'une courbe cylindro-parabolique. Ensuite, l'énergie captée sera convertie en chaleur afin de produire l'électricité. L'amélioration des systèmes de la concentration solaire joue un rôle crucial dans le développement des centrales thermiques. Par conséquent, un très grand nombre de recherches et d'études numériques de ce type de concentrateur ont été effectuées pour améliorer les performances thermiques et le transfert de la chaleur. Marif et al. [1], ont développé un programme informatisé basé sur la méthode de différence finie implicite unidimensionnelle, avec une approche d'équilibre énergétique, pour simuler les performances optiques et thermiques d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique, dans les conditions climatiques en Algérie, et considère deux différents fluides caloporteurs, l'eau et une huile thermique « Therminol VP1 », dans cette étude. Alors que Wang et al. [2], ont établi un modèle 3D basé sur une méthode d'éléments finis, pour simuler les phénomènes complexes de transfert de chaleur dans un récepteur d'un capteur cylindro-parabolique. Le fluide de transfert de chaleur est du sel fondu. Ce travail a été effectué, également pour étudier les performances thermiques, ainsi que les paramètres de l'absorbeur et sa géométrie. D'autre part, afin de considérer la distribution non uniforme du rayonnement solaire incident sur le récepteur, Wirz et al. [3], ont couplé la méthode de Monte Carlo ray-tracing avec la méthode des volumes finis pour modéliser en 3D l'écoulement d'une huile thermique de type « Syltherm 800 » qui circule dans le tube absorbeur d'un (CCP). Des travaux similaires ont, également été réalisés par de nombreux chercheurs [4-11].

De plus, de nombreuses études expérimentales et des articles sur ce type de concentrateurs ont fait l'objet d'un examen approfondi [12-18]. Par exemple, Zhang et al. [12], ont conçu un récepteur en forme de U avec une circulation naturelle du fluide caloporteur, au foyer d'un concentrateur cylindro-parabolique pour générer la vapeur d'eau. Alors que Xu et al. [13], ont effectué trois méthodes d'essai différentes, pour déterminer les performances thermiques de CCP, à savoir : la norme ASHRAE 93, la méthode quasi-dynamique dans la norme EN 12975-2, et une nouvelle méthode dynamique développée par les auteurs. Par ailleurs, Lei et al. [14], ont examiné différents paramètres concernant le récepteur d'un CCP, tel que la perte de la chaleur, pour améliorer les performances thermiques

de ce type de concentrateur. Dans la même direction, Razika et al. [15], ont expérimenté et testé les influences de la variation du débit volumétrique et de l'angle d'inclinaison d'un capteur solaire sur les performances thermiques du récepteur.

Notre travail sera essentiellement consacré à une description numérique du comportement thermique de l'absorbeur d'un concentrateur cylindro-parabolique pour différentes concentrations imposées uniformément, et une validation de notre code de calcul avec les résultats expérimentaux d'Abid et al. [19]. Ainsi que, la comparaison des températures de notre prototype pour deux positions de l'absorbeur en utilisant la carte Raspberry Pi3 comme station de mesures.

II.2. Etude théorique du concentrateur cylindro-parabolique

La conception d'un concentrateur solaire est basée essentiellement sur certains paramètres très importants tels que : la réalisation de la courbe parabolique, qui doit être faite avec une grande précision afin d'assurer la meilleure concentration du rayonnement solaire au niveau du foyer récepteur. L'autre exigence, est le bon choix du matériau de fabrication du miroir en question, qui détermine d'une manière directe le facteur de réflexion qui devra être le plus grand possible permettant le maximum de réflexion. Donc, il est très important de faire une étude théorique sur ce type de concentrateur avant de le réaliser.

II.2.1. Performances optiques d'un concentrateur cylindro-parabolique

II.2.1.1. 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 [20, 21]. 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 (Fig. II.1).

$$C = \frac{A_o}{A_r} \quad (\text{II.1})$$

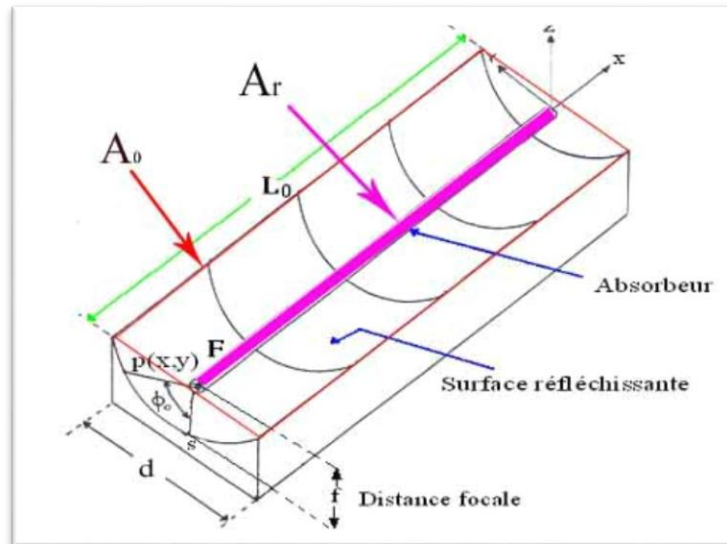


Figure II.1. Paramètres géométriques d'un concentrateur cylindro-parabolique [26].

Le paramètre concentration détermine d'une façon directe, la température d'utilisation (Fig. II.2). Nous pouvons distinguer [20] :

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

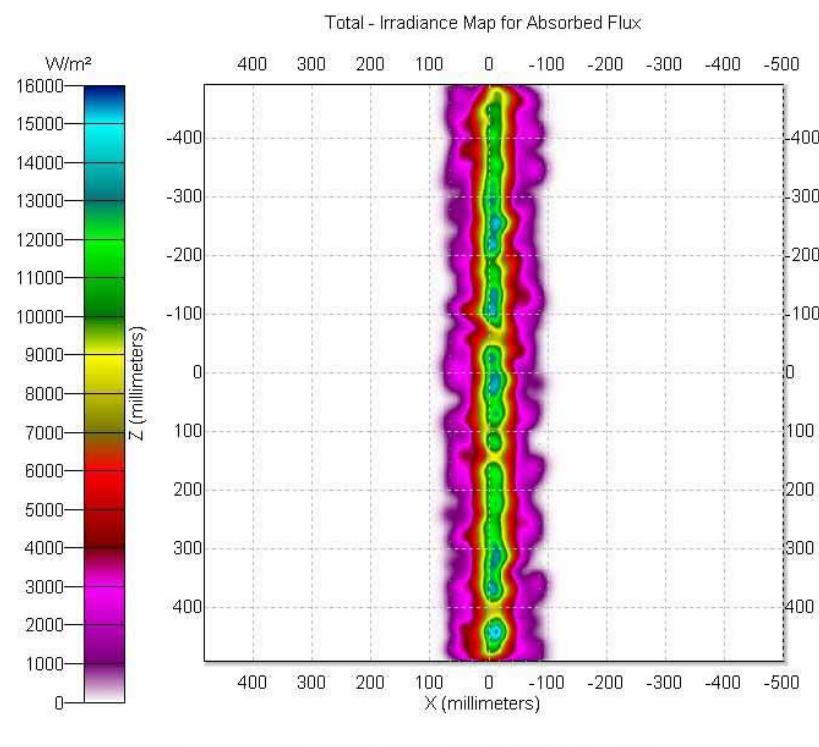


Figure II.2. Concentration des rayons solaires au niveau de l'absorbeur.

Nous considérons un concentrateur d'ouverture A_o et 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. Il ne peut y avoir d'échange net de chaleur entre deux corps portés à la même température [21].

$$Q_{s \rightarrow r} = Q_{r \rightarrow s} \quad \Rightarrow \quad C_{\text{Idéal}} = \frac{1}{\sin(\theta_c)} \quad (\text{II.2})$$

II.2.1.2. 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 d'ouverture, peut être écrite comme suit [21].

$$E = E_b \cdot \rho \cdot (\gamma \cdot \tau \cdot \alpha) C \quad (\text{II.3})$$

II.2.1.3. Angle d'ouverture du concentrateur

L'ouverture de CCP est a , alors que f est la longueur focale (la distance du point focal au sommet). Le faisceau du rayonnement solaire incident sur le réflecteur au point B où le rayon r est au maximum est égal à r_r et fait un angle de ϕ_r , décrit par AFB est donné par la figure II.3 [20].

$$\phi_r = \text{Tan}^{-1} \left[\frac{8 \cdot (f/a)}{16 \cdot (f/a)^2 - 1} \right] = \text{Sin}^{-1} \left(\frac{a}{2 \cdot r_r} \right) \quad (\text{II.4})$$

II.2.1.4. Rayon local du miroir

Pour n'importe quel point du réflecteur parabolique le rayon de miroir est représenté par la relation ci-dessous [20] :

$$r = \frac{2 \cdot f}{1 + \cos(\phi)} \quad (\text{II.5})$$

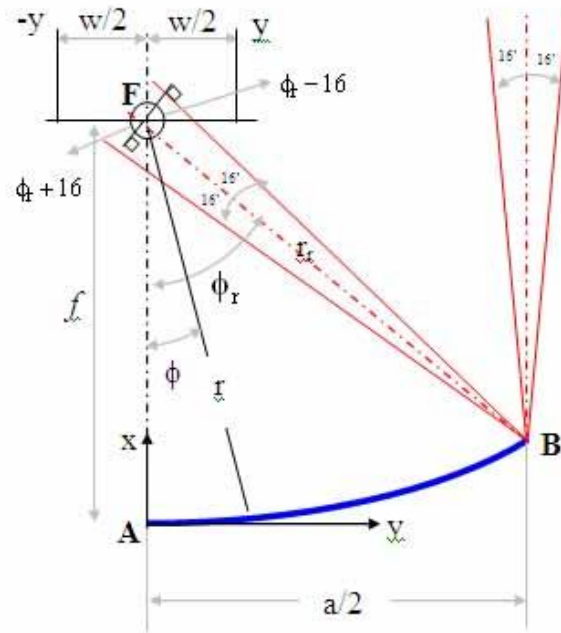


Figure II.3. Dimensionnement du concentrateur et angle d'ouverture [26].

II.2.1.5. Diamètre du récepteur

La figure II.4 montre, schématiquement, comment les rayons réfléchis à partir de la tangente de la parabole déterminent la largeur de la zone focale. La largeur de l'image du soleil dans le plan focal augmente avec l'augmentation de l'angle d'ouverture ϕ . Il est clair depuis ce diagramme que l'angle d'incidence du rayonnement sur la surface de ces formes de récepteur est variable [20].

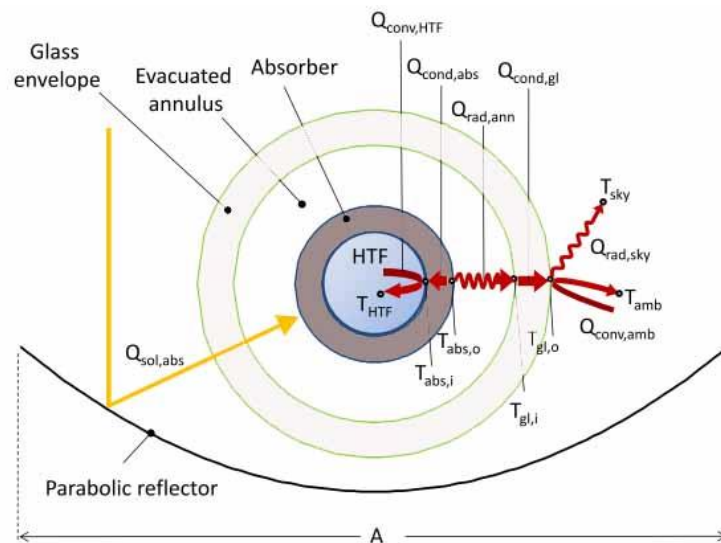


Figure II.4. Schéma de l'absorbeur avec couvert d'un concentrateur cylindro-parabolique [26].

Pour les réflecteurs paraboliques d'une forme et d'un alignement parfait, Nous pouvons calculer le diamètre extérieur D d'un récepteur cylindrique par l'équation suivante

$$[20]: D = 2 \cdot r_r \cdot \sin(0.267) = \frac{a \cdot \sin(0.267)}{\sin(\phi_r)} \quad (II.6)$$

II.2.2. Performances thermiques d'un concentrateur cylindro-parabolique

Le calcul des performances des concentrateurs cylindro-paraboliques suit la même méthode de calcul que celui des capteurs plans. Il est nécessaire de calculer le facteur d'efficacité F' et le coefficient des pertes thermiques U_L , ainsi que le facteur de la chaleur dissipée du collecteur F_R . Nous pourrions alors calculer la puissance gagnée au collecteur Q_u , en connaissant les valeurs de F_R et U_L [22]. La figure II.5 représente l'absorbeur et ses différents éléments.

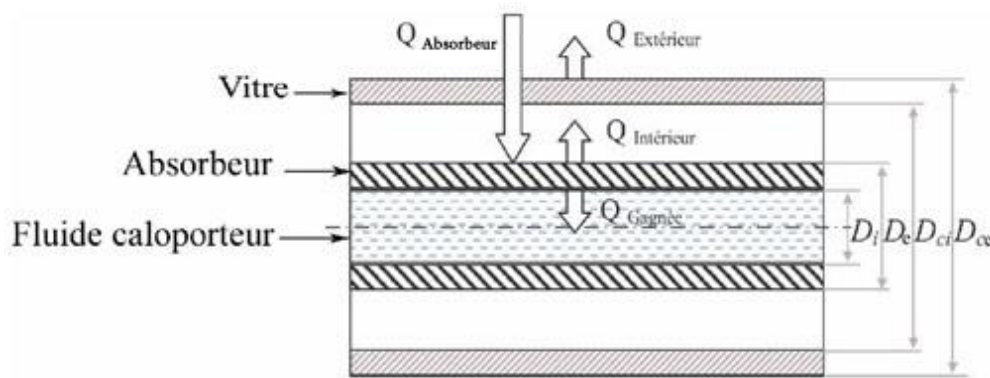


Figure II.5. Schéma de tube absorbeur [26].

II.2.2.1. Coefficient des pertes thermiques U_L (tube non couvert)

Nous considérons l'absorbeur d'un concentrateur cylindro-parabolique non couvert (tube en verre pour réaliser l'effet de serre). Le coefficient des pertes thermiques prend en considération la convection et l'irradiation à partir de la surface et la conduction au niveau du support [19].

$$U_L = h_v + h_r + U_c \quad (II.7)$$

Nous avons [23]:

$$h_v = \frac{Nu \cdot V^{0.6}}{D_e} \quad (II.8)$$

$$Nu = 0,26 \cdot Re^{0.5} + 0,00128 \cdot Re \quad (II.9)$$

Avec [23] :

$$\text{Re} = \frac{Mv \cdot V \cdot D_e}{\mu} \quad (\text{II.10})$$

$$h_r = 4 \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot \bar{T}^3 \quad (\text{II.11})$$

II.2.2.2. Coefficient des pertes thermiques U_L (tube couvert)

Maintenant, si l'absorbeur est couvert avec un tube de verre, de surface A_c , le coefficient d'irradiation entre couvert et absorbeur est différent du coefficient entre absorbeur et couvert, qui est généralement négligeable [20]. Le coefficient des pertes thermiques s'écrit comme suit :

$$U_L = \left[\frac{A_r}{(h_v + h_{r,c-a})A_c} + \frac{I}{h_{r,a-c}} \right]^{-1} \quad (\text{II.12})$$

$$\text{Avec: } h_{r,c-a} = 4 \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot \bar{T}^3 \quad (\text{II.13})$$

$$\text{Et, } h_{r,a-c} = \frac{\sigma \cdot (T_r^2 - T_c^2) \cdot (T_r - T_c)}{\frac{1 - \varepsilon_r}{\varepsilon_r} + \frac{I}{F_{rc}} + \frac{(1 - \varepsilon_c) \cdot A_r}{\varepsilon_c \cdot A_c}} \quad (\text{II.14})$$

II.2.2.3. Facteur d'efficacité (F')

Pour calculer F' nous utiliserons l'équation ci-dessous [20] :

$$F' = \frac{1}{U_L} \cdot \frac{1}{\frac{1}{U_L} + \frac{D_e}{h_{fi} \cdot D_i} + \left(\frac{D_e}{2k} \cdot \ln \left(\frac{D_e}{D_i} \right) \right)} \quad (\text{II.15})$$

II.2.2.4. Facteur de flux du collecteur (F'')

Afin de calculer ce facteur, nous avons utilisé l'équation suivante [20] :

$$F'' = \frac{\dot{m} \cdot C_p}{A_r \cdot U_L \cdot F'} \cdot \left[1 - e^{-\left(\frac{A_r \cdot U_L \cdot F'}{\dot{m} \cdot C_p} \right)} \right] \quad (\text{II.16})$$

Le facteur du flux dégagé du collecteur sera exprimé comme suit :

$$F_R = F'' \cdot F' \quad (\text{II.17})$$

En conséquence :

$$F_R = \frac{\dot{m} \cdot C_p}{A_r \cdot U_L} \cdot \left[1 - e^{\left(\frac{A_r \cdot U_L \cdot F'}{\dot{m} \cdot C_p} \right)} \right] \quad (\text{II.18})$$

II.2.2.5. Puissance utile (Q_u)

Maintenant, nous pouvons déterminer la puissance gagnée par le collecteur au niveau du foyer :

$$Q_u = F_R [E \cdot \rho \tau \alpha \gamma \cdot A_o - U_L \cdot A_r \cdot (T_e - T_a)] \quad (\text{II.19})$$

II.2.2.6. Température de sortie du fluide caloporteur (T_s)

Pour calculer la température de sortie, nous avons appliqué l'équation suivante [23] :

$$T_s = T_e + \frac{Q_u}{\dot{m} \cdot C_p}$$

(II.20)

II.2.2.7. Rendement du concentrateur solaire (η)

Finalement, pour calculer le rendement nous avons utilisé la relation suivante [23] :

$$\eta = \frac{Q_u}{E \cdot A_o \cdot \gamma} \quad (\text{II.21})$$

II.3. Étude théorique de la poursuite solaire

Les systèmes de poursuite solaire permettent de suivre la course du soleil au cours de la journée, afin de minimiser l'angle d'incidence des rayons solaires sur un plan lié au système, ce plan étant le récepteur lui-même ou son support [24]. Ces systèmes sont classés selon différents critères tels que : le nombre d'axes (un ou deux) et le mode de suivi (continu ou quotidien).

II.3.1. Trajet du soleil

Pour un jour donné, la course du soleil dans le ciel s'effectue dans un plan incliné de $(\pi/2 - \varphi)$ sur l'horizontale (Fig. II.6). La trajectoire apparente du soleil sur la voûte céleste aux solstices et aux équinoxes en un lieu situé à 40° de l'altitude nord est présentée sur la figure II.7. Nous noterons que, le soleil ne se lève, exactement à l'est et ne se couche, exactement à l'ouest, que lors des équinoxes.

Pour faciliter l'interpolation, nous utilisons un autre type de diagramme solaire toujours en coordonnées polaires, mais dans lequel le rayon vecteur n'est plus proportionnel à $\text{Cos}(h)$ mais à la distance zénithale $(\pi/2-h)$, l'angle polaire étant égal à α . Ces diagrammes sont construits à l'aide des équations suivantes [21] :

$$\text{Sin}(h) = \text{Cos}(\delta) \cdot \text{Sin}(\varphi) + \text{Cos}(\delta) \cdot \text{Cos}(\varphi) \cdot \text{Cos}(H) \quad (\text{II.22})$$

$$\text{Sin}(\alpha) = \frac{\text{Cos}(\delta) \cdot \text{Sin}(\omega)}{\text{Cos}(h)} \quad (\text{II.23})$$

En un lieu donné, le soleil est à son zénith au midi solaire ($\omega = 0$). Dans l'hémisphère nord, la hauteur du soleil est alors :

$$h = \frac{\pi}{2} - \varphi + \delta \quad (\text{II.24})$$

Finalement, nous pouvons également faire une projection stéréographique sur le plan horizontal de la trajectoire du soleil sur la voûte céleste en utilisant comme centre le nadir. Nous obtenons ainsi, un arc de cercle et les cercles horaires sont transformés également en cercles orthogonaux aux précédents [21].

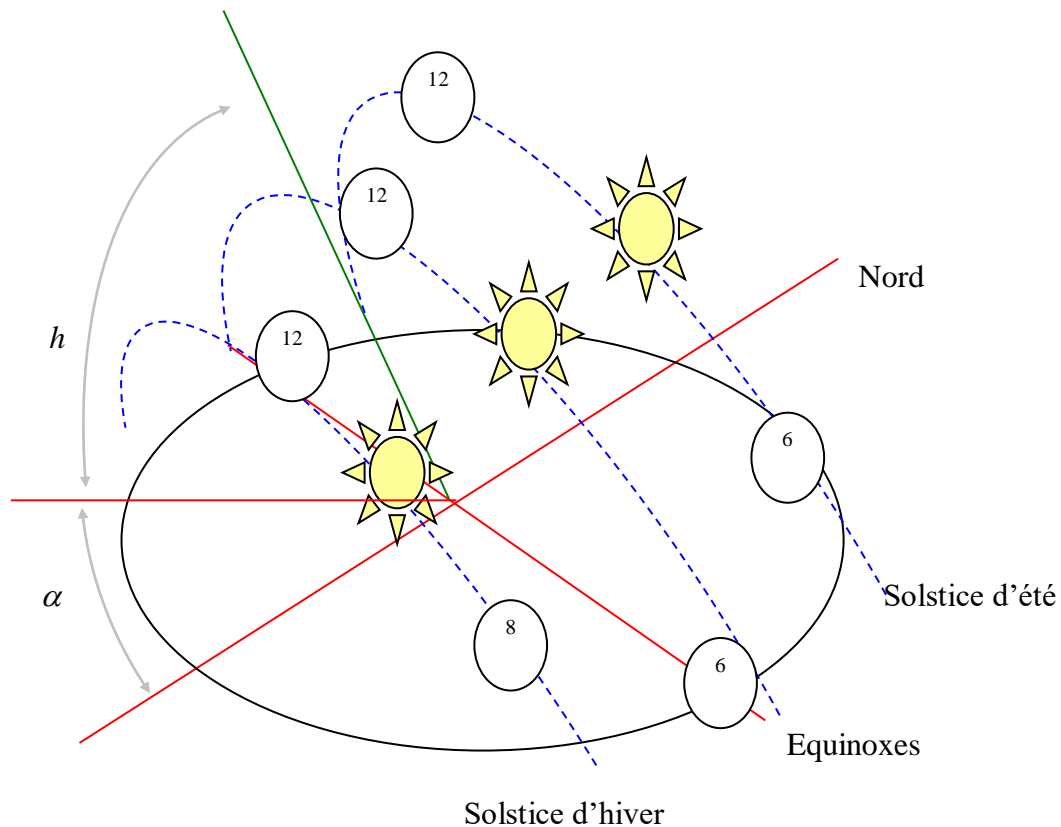


Figure II.6. Positions du soleil dans le ciel durant l'année [26].

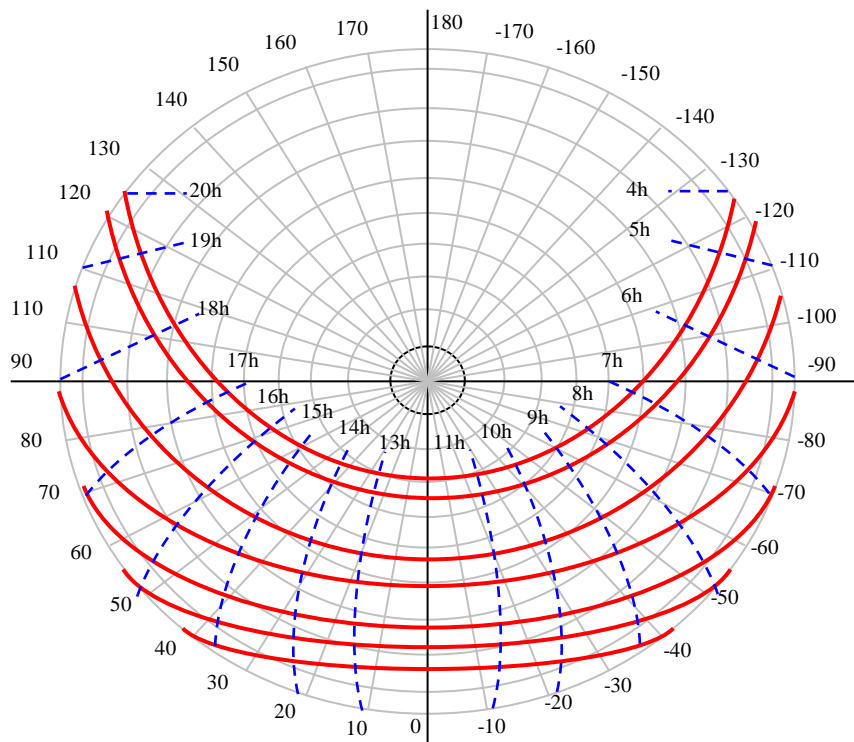


Figure II.7. Trajectoire du soleil dans le ciel pendant une année [26].

II.3.2. Poursuite solaire et effet cosinus

II.3.2.1. Effet cosinus et taux de concentration

Les systèmes de poursuite simplifiés adoptés par les concentrateurs à deux dimensions 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) (Fig. II.8),
- La réduction de la concentration en raison du déplacement de l'image.

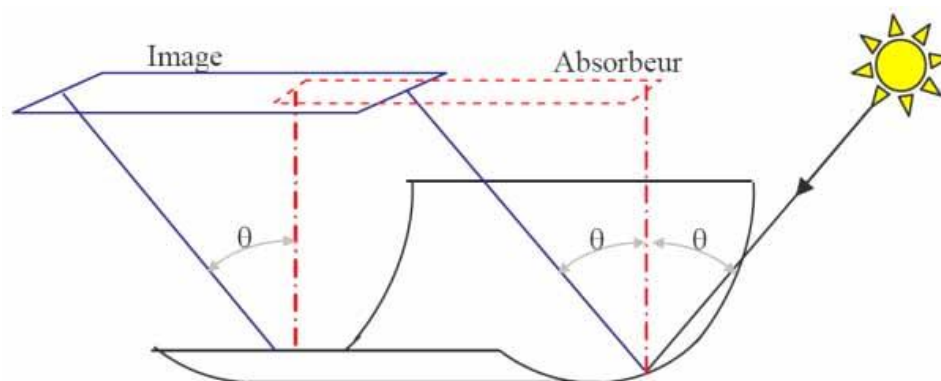


Figure II.8. Illustration de l'effet Cosinus sur les miroirs cylindro-paraboliques [26].

Si, le rayonnement direct incident E_d fait un angle θ avec la normale au plan d'ouverture, le rayonnement au niveau de l'absorbeur sera écrit comme suit [21] :

$$E_c = E_d \cdot \text{Cos}(\theta) \cdot C \quad (\text{II.25})$$

II.3.2.2. Effet cosinus et axe de rotation

Le tableau ci-après résume le paramètre $\text{Cos}(\theta)$ pour différents cas d'orientations (Fig. II.9).

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	$(1 - \text{Cos}^2(\delta) \cdot \text{Cos}^2(\omega))^{1/2}$
4 Axe de rotation horizontal et orienté Nord-Sud	$[(\text{Sin}(\varphi) \cdot \text{Sin}(\delta) + \text{Cos}(\varphi) \cdot \text{Cos}(\delta) \cdot \text{Cos}(\omega))^2 + \text{Cos}^2(\delta) \cdot \text{Sin}^2(\omega)]^{1/2}$

Tableau II.1. Effet Cosinus sur les systèmes de poursuite solaire [21].

Selon les relations exprimés dans le tableau II.1, nous voyons 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 depuis la rentabilité et l'efficacité du système.

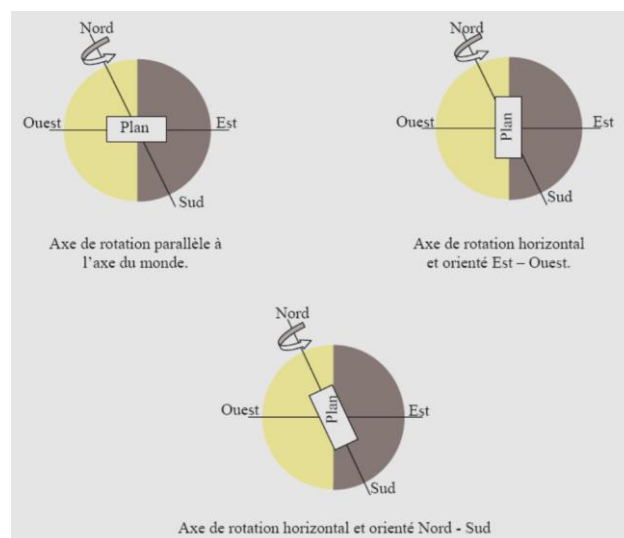


Figure II.9. Orientation de l'axe de rotation selon les différents cas de poursuite [26].

II.4. Description du concentrateur réalisé

La conception d'un concentrateur solaire est basée essentiellement sur certains paramètres très importants tels que : la réalisation de la courbe parabolique, qui doit être faite avec une grande précision afin d'assurer la meilleure concentration du rayonnement solaire au niveau du foyer récepteur. L'autre exigence, est le bon choix du matériau de fabrication du miroir en question, qui détermine d'une manière directe le facteur de réflexion qui devra être le plus grand possible, permettant le maximum de réflexion.

II.4.1. Description du prototype

Le prototype réalisé pour effectuer les tests comporte essentiellement :

- un réflecteur solaire constitué de miroirs rectangulaires de 3 cm de large et 1 m de long fixés sur une tôle inoxydable. L'indice de réflexion des miroirs est 0,95. Il est de forme cylindro-parabolique et constitue l'élément essentiel du concentrateur ;
- une tige en cuivre de longueur 1 m constitue le foyer au niveau duquel se concentreront les rayons du soleil ;
- le concentrateur sera muni d'un vérin de commande manuel, ce qui permettra l'orientation de l'ensemble ;
- un socle pour fixer l'ensemble c'est-à-dire : le réflecteur, les tubes de circulation et la pompe de circulation du fluide caloporteur ;
- une cuve de stockage d'une capacité de 5 litres, relié avec un circuit fermé d'une longueur de 3,5 m muni d'une pompe de circulation du fluide caloporteur à faible débit de (0.03 – 0.07)Kg/s ;
- des thermocouples de type K pour mesurer la température d'entrée, de sortie de l'eau dans la cuve.

II.4.2. Principe de fonctionnement

Le concentrateur cylindro-parabolique est orienté vers l'est dès le lever du soleil. La poursuite solaire sera assurée grâce à un vérin électrique commandé. La focalisation du rayonnement se fait sur le foyer central, le fluide caloporteur qui y circule à l'aide d'une pompe transporte sa chaleur vers la cuve de stockage.

Après l'orientation vers le soleil, nous prenons les mesures chaque 5 minutes, pour voir la variation des paramètres que ce soit : la température ambiante T_a , la température d'entrée T_e , la température de sortie T_s , la température du tube absorbeur T_{sur} , la température de l'eau de la cuve T_{eau} .

II.4.3. Schéma synoptique du système réalisé

La figure II.10 représente le schéma du système réalisé.

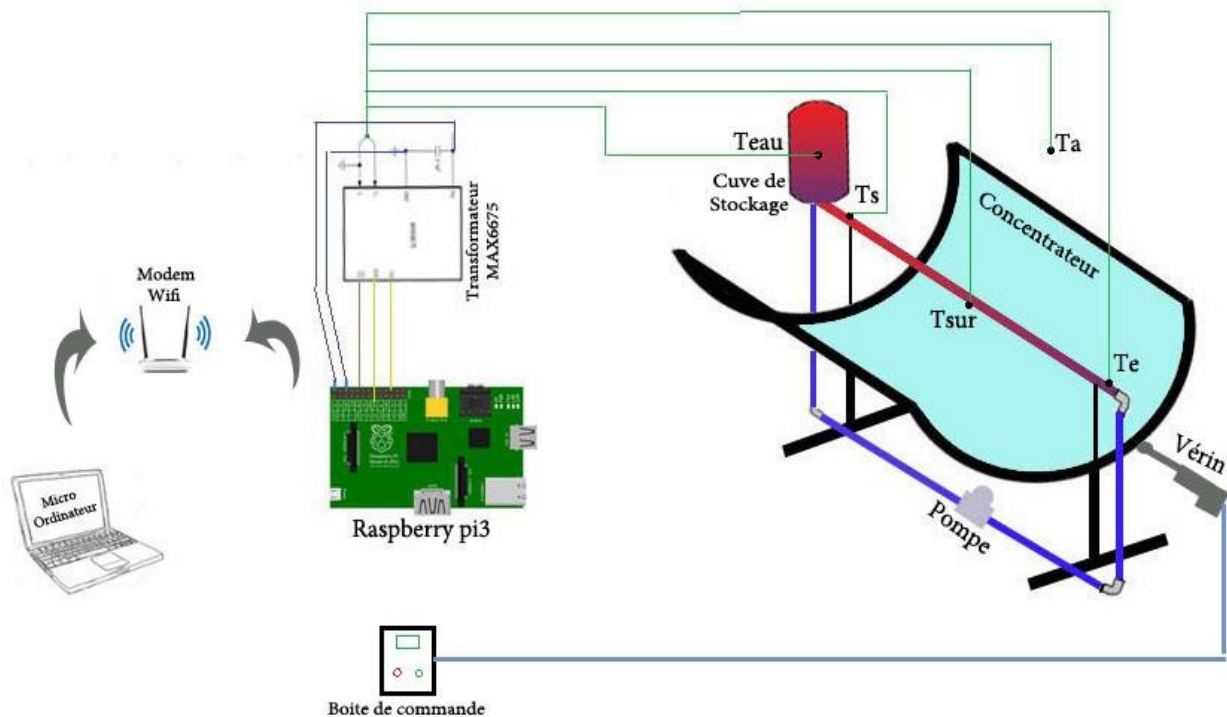


Figure II.10. Schéma synoptique du système réalisé.

II.5. Réalisation du concentrateur cylindro-parabolique

II.5.1. Dimensionnement de la courbe

Avant d'entamer la phase de réalisation, nous avons procédé au dimensionnement du concentrateur solaire, dans le but de déterminer les différents paramètres géométriques du concentrateur, avec la meilleure concentration possible. L'équation de la courbe parabolique a été définie pour permettre la réalisation des charpentes métalliques qui supportent la tôle, ainsi que le calcul du facteur de réflexion du concentrateur. Nous avons fixé des miroirs de 3 cm par 1 m sur une tôle de 1 m par 1,20 m, sous forme cylindro-parabolique. Pour tracer la courbe donnant la forme de la parabole, nous fixons la distance focale $f = 30$ cm, et nous attribuons des valeurs à y pour trouver x , en utilisant l'équation II.26 [20].

$$y = a \cdot x^2 \quad \text{avec:} \quad a = \frac{1}{4 \cdot F} \quad \Rightarrow \quad y = \frac{1}{4 \cdot F} \cdot x^2 \quad (\text{II.26})$$

L'équation donnant le rayon du miroir s'exprime par :

$$r = \frac{2 \cdot F}{1 + \text{Cos}(\varphi)} \quad (\text{II.27})$$

La figure II.11, donne la courbe parabolique du prototype réalisé, tracée à l'aide du logiciel Origine 6.0. Suivi, par la figure II.12, qui représente la photographie du réflecteur cylindro-parabolique réalisé.

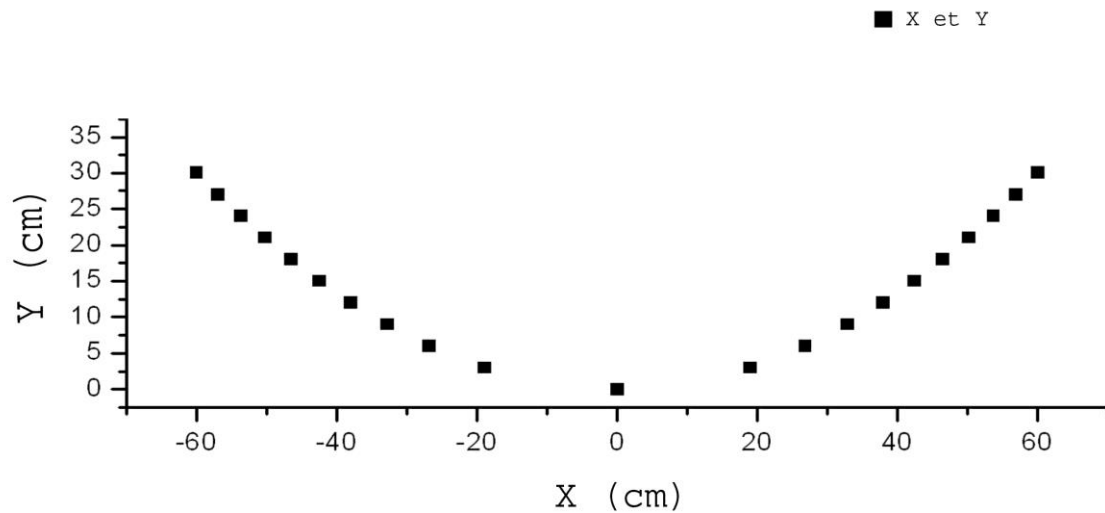


Figure II.11. Courbe parabolique du concentrateur.

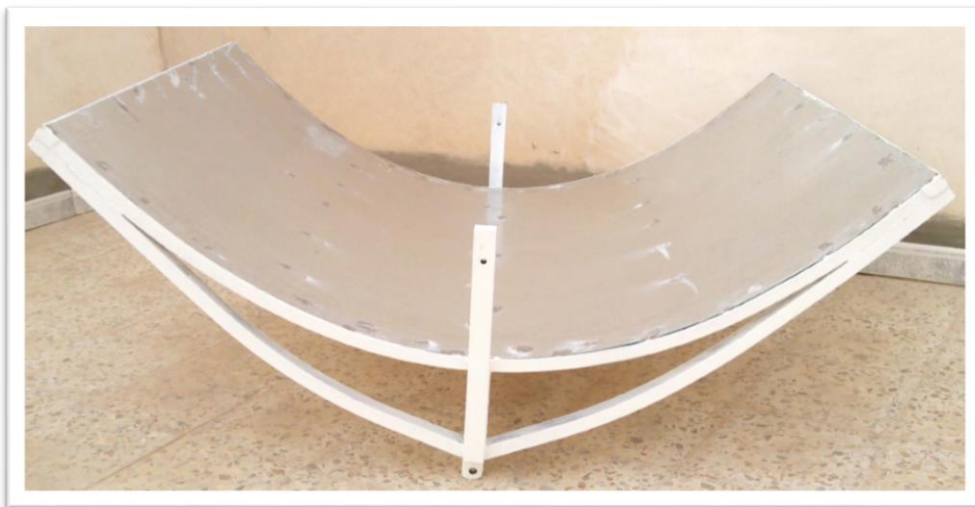


Figure II.12. Photographie du réflecteur cylindro-parabolique réalisé.

II.5.2. Réalisation de la structure porteuse

D'après l'équation II.26 et pour donner la forme parabolique à la tôle, nous avons réalisé une charpente métallique ; sur laquelle est fixée la tôle à l'aide des points de soudures. Afin d'assurer la protection du système, nous avons renforcé la plateforme pour supporter le poids du concentrateur et l'effet des vents. La poursuite solaire est assurée par le vérin électrique, avec commande manuelle, qui fait tourner le concentrateur autour d'un axe. La

figure II.13, représente le schéma du concentrateur réalisé et de la structure porteuse. La figure II.14, illustre des photographies du concentrateur réalisé et de sa structure porteuse.

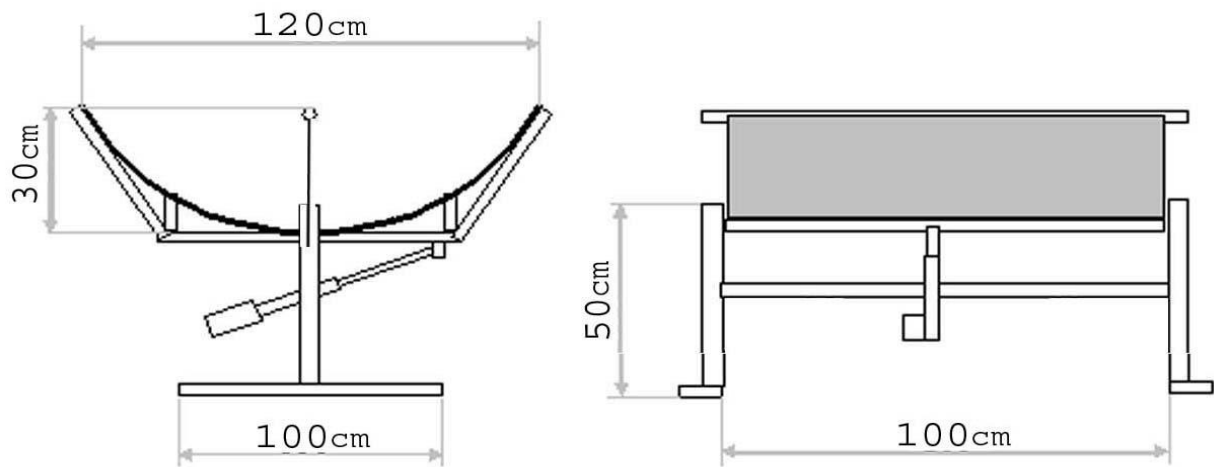


Figure II.13. Schéma du concentrateur réalisé et de la structure porteuse.

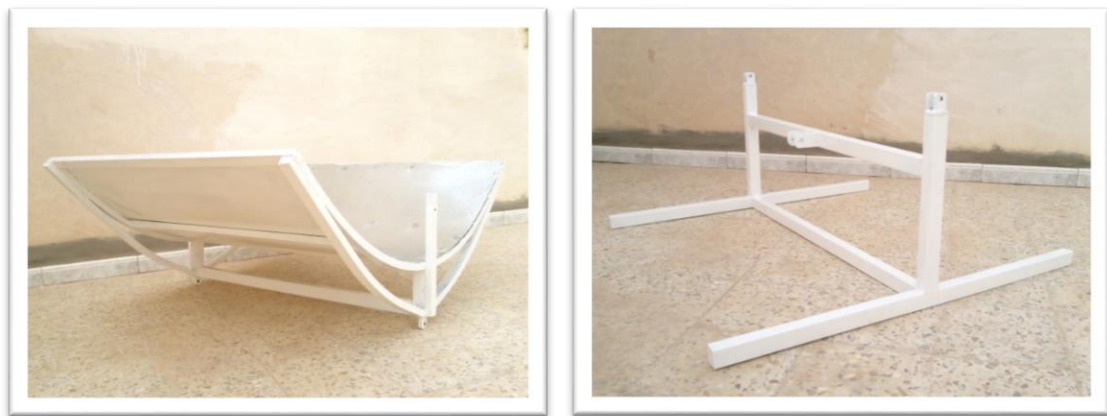


Figure II.14. Photographies du réflecteur et de la structure porteuse.

II.5.3. Dispositif 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 [25]. Dans notre prototype nous avons choisi un vérin électrique destiné aux antennes paraboliques commandé par une boîte de commande (Fig. II.15). Ce choix est basé sur les critères suivants : la puissance, le fonctionnement en milieu hostile, moteur à courant continu, les butées de fin de course. Sur la figure II.16, nous donnons les positions du concentrateur en fonction de l'état du vérin, et nous constatons qu'il faut avoir deux articulations pour la fixation du vérin : l'une au niveau du collecteur 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 suivant :



Figure II.15. Boite de commande de vérin électrique.

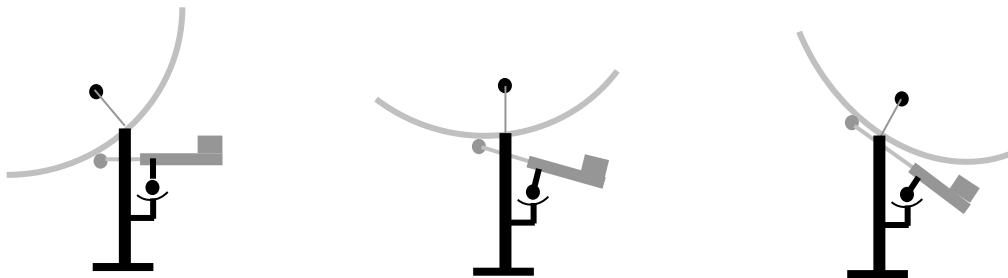


Figure II.16. Positions du concentrateur en fonction de l'état du vérin.

Le principe de fonctionnement du vérin indiqué sur la figure II.17, est simple [26]. 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 pour cela, en appliquant une tension inverse aux bornes du moteur (Fig. II.18).

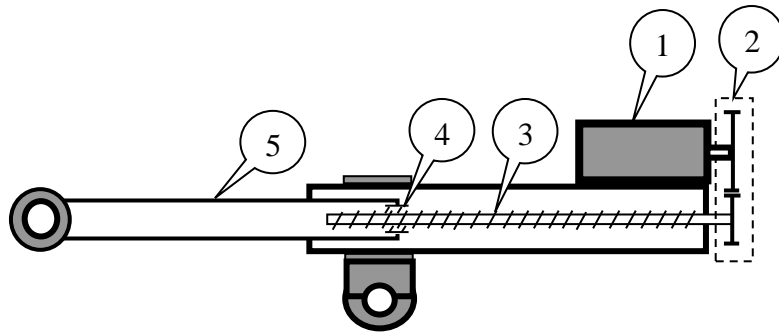


Figure II.17. Schéma du vérin électrique.



Figure II.18. Photographies du vérin électrique utilisé.

II.5.4. Circuit du fluide caloporteur

Le réflecteur cylindro-parabolique concentre les rayons solaires vers le foyer. Dans notre prototype, le foyer est un tube en cuivre recouvert de peinture noire (Fig. II.19 et II.20), de diamètre égal à 22 mm, et de longueur de 1 m, avec une épaisseur de 1 mm. Et pour permettre la circulation du fluide caloporteur vers la cuve, nous avons utilisé une pompe de circulation munie de trois vitesses (Fig. II.21). Deux thermocouples ont été intégrés dans le circuit du fluide pour la collecte des valeurs de températures d'entrée et de sortie de l'absorbeur. La figure II.22, représente le schéma de circuit fermé du fluide caloporteur.



Figure II.19. Tube absorbeur en cuivre et les flexibles.



Figure II.20. Pièces pour la fixation des thermocouples et les flexibles.



Figure II.21. Pompe de circulation.

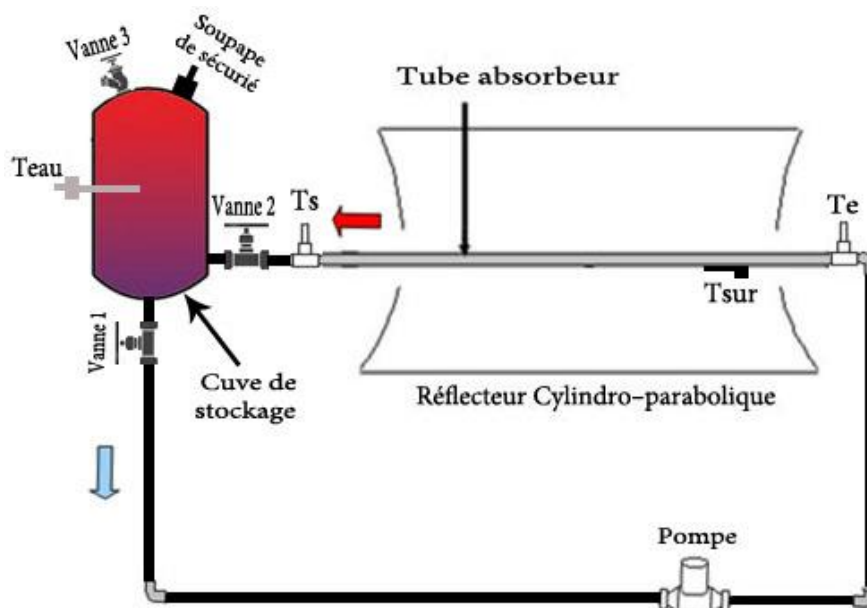


Figure II.22. Circuit fermé du fluide caloporteur.

II.5.5. Cuve de stockage

La cuve de stockage (Fig. II.23) est remplie de 5 litre d'eau. L'entrée et la sortie sont en bas de la cuve. Cette configuration favorise la circulation de la convection naturelle dans l'eau de la cuve : l'eau, relativement plus chaude, et donc moins dense en bas, superposée par l'eau relativement plus froide, et donc plus dense. Cette stratification thermique est instable et entraîne la convection naturelle dans l'eau de la cuve. Cette convection naturelle améliore le transfert thermique et favorise l'homogénéisation relative de la température de l'eau de la cuve.



Figure II.23. Cuve de stockage de la chaleur.



Figure II.24. Isolant thermique fixé à l'extérieur de la cuve.

Pour minimiser les pertes thermiques de la surface extérieure de la cuve vers le milieu ambiant, la cuve est couverte par une couche de trois mm de laine de verre qui est une bonne isolante thermique (Fig. II.24). Un thermocouple fixé au milieu de la cuve sert à mesurer la température de l'eau.

II.5.6. Moyens de mesures (Thermocouples)

Parmi toutes les grandeurs physiques, la mesure de la température est la plus fréquente. En effet, elle détermine, de façon décisive les propriétés des matériaux et c'est pour cette raison, que la mesure précise, et le contrôle très strict de la température sont indispensables dans l'industrie. Actuellement, il existe plusieurs types de capteurs de la température pouvant être utilisés. Citons par exemple :

- thermocouples ;
- thermomètres à dilatation, basés sur les propriétés de dilatation des corps ;
- thermomètres électriques, basés sur les propriétés de résistance électrique d'un conducteur ;
- pyromètres optiques, basés sur la relation entre la température d'un corps et le rayonnement optique qu'il émet [27].

Les thermomètres à dilatation ne présentent pas la souplesse d'emploi nécessaire à l'acquisition numérique et les pyromètres sont d'un coût élevé. Les thermomètres électriques quant à eux, présentent l'avantage de pouvoir entrer dans un processus d'acquisition numérique, et d'être d'un coût, relativement faible. Nous distinguons parmi eux, les capteurs à variation de résistance (thermistances) et les thermocouples.

Les thermocouples ont un temps de réponse plus court et une température de fonctionnement plus élevée que les capteurs à résistance variable, ce qui justifie notre choix de capteurs concernant les mesures prises au niveau du système en question [28].

Nous appelons thermocouple, le système constitué de deux fils métalliques de natures différentes, soudés à l'une de leurs extrémités, et comportant à l'autre extrémité deux bornes de raccordement. Ces fils de raccordement sont à la même température T_a qui est généralement la température ambiante ou celle des bornes de l'appareil de mesure [29].

Lorsque T_p est différente de T_a , il apparaît entre les bornes de raccordement une force électromotrice F.E.M qui dépend du couple métallique A et B et des températures T_p et T_a ; (Fig. II.25 – II.26), sans être pour autant proportionnelle à $T_p - T_a$.



Figure II.25. Thermocouple de type K utilisé.

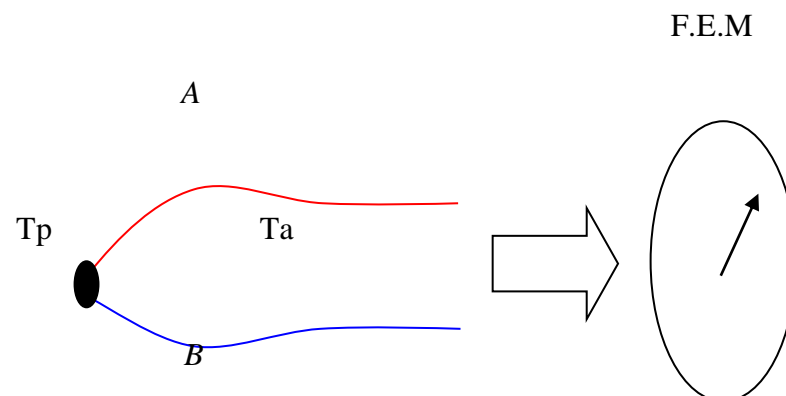


Figure II.26. Principe des thermocouples.

II.6. Étude numérique de la convection mixte pour différentes concentrations au niveau de l'absorbeur d'un CCP

Pour l'étude numérique de l'absorbeur de notre prototype concentrateur cylindro parabolique, nous avons réalisé la conception de la géométrie au moyen du logiciel de maillage Gambit, et utilisé le code de calcul Fluent afin de définir les conditions aux limites. Ceci nous permet d'étudier le comportement thermique de chaque cas des différentes concentrations, et de confronter les résultats obtenus : la température moyenne, la température

en haut et en bas à l'intérieur du tube, le Nusselt moyen et local suivant θ , ainsi que les contours de température au plan de sortie. Nous remarquons, la présence du phénomène de la convection mixte induisant un gradient de Nusselt suivant θ , ayant la forme d'une courbe Gaussienne.

II.6.1. Modèle mathématique

II.6.1.1. Géométrie de l'absorbeur

L'absorbeur étudié est constitué d'un tube cylindrique horizontal de section constante dans lequel circule un fluide caloporteur à l'intérieur. Ce tube de 1 m de longueur, a un diamètre interne de 20 mm, et une épaisseur de la paroi de 1 mm (Fig. II.27). Le tube est chauffé par un flux solaire concentré et absorbé par la paroi externe. Ce flux solaire concentré provient d'un miroir cylindro-parabolique qui réfléchit et concentre le rayonnement solaire sur une bande focale large d'environ 69 mm. Le flux de la chaleur est considéré, uniformément réparti sur la circonférence du tube.

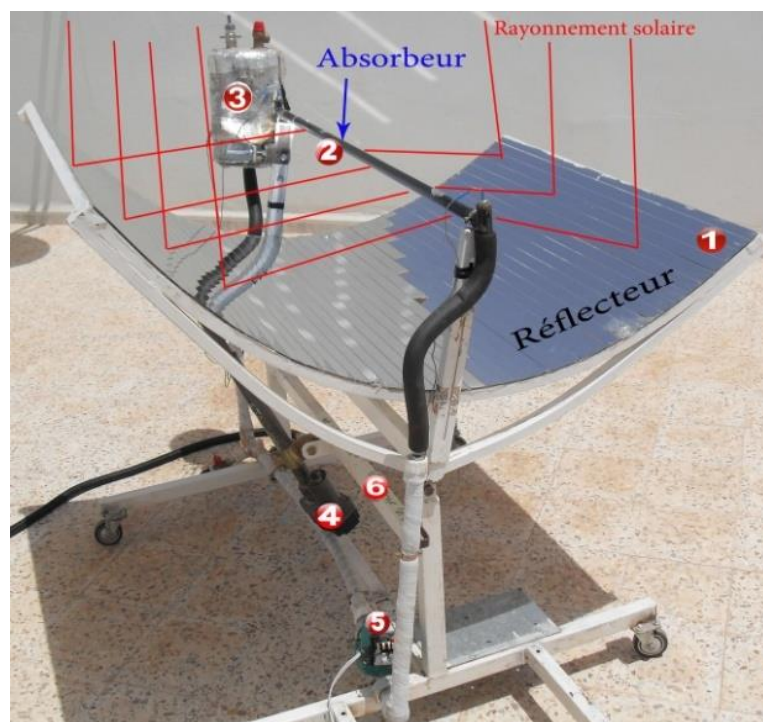


Figure II.27. Représentation schématique du dispositif solaire.

II.6.1.2. Modélisation et maillage de l'absorbeur

La modélisation et le maillage de l'absorbeur ont été réalisés en trois dimensions, axi-symétriquement avec le logiciel de modélisation et de maillage Gambit, en configurant les conditions aux limites dans le logiciel de simulation Fluent. Afin de pouvoir simuler les

conditions de chauffage, le flux solaire uniformément réparti sur la surface du tube, la paroi est modélisée en deux volumes : l'un correspond à la surface extérieure en contact avec l'air, et l'autre à la surface extérieure en bas du tube exposé au flux solaire concentrique. Le maillage qui a été réalisé sous Gambit est un maillage, en forme de O (Fig. II.28), composé de 1.533.600 éléments hexagonaux. Le pas de maillage régulier suivant l'axe d'écoulement est égal à 3 mm. Cette étude est réalisée pour quatre différentes concentrations au niveau de l'absorbeur (Fig. II.29).

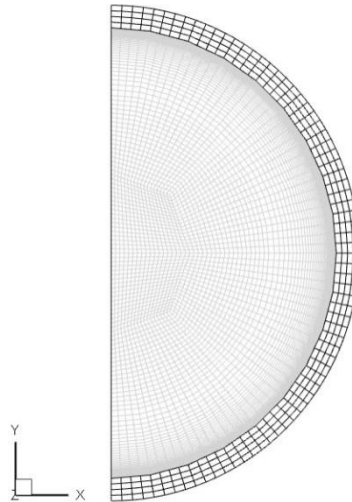


Figure II.28. Maillage axisymétrique du tube absorbeur.

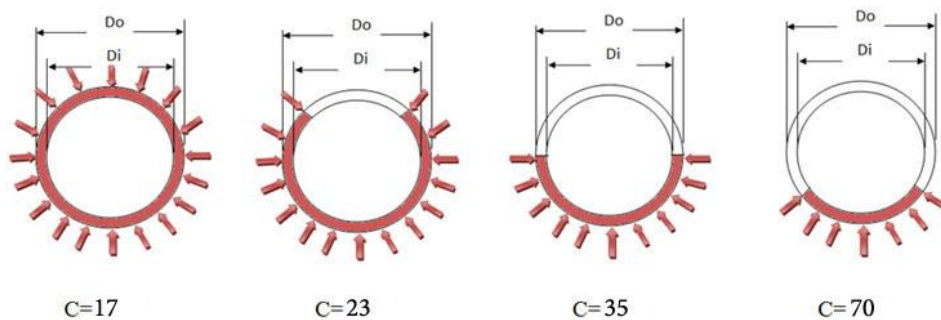


Figure II.29. Différentes concentrations au niveau du tube absorbeur.

II.6.1.3. Équations gouvernantes [30]

L'équation de conservation de la masse est écrite comme suit :

$$\frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} (r^* V_r^*) + \frac{1}{r^*} \frac{\partial V_\theta^*}{\partial \theta} + \frac{\partial V_z^*}{\partial z^*} = 0 \quad (\text{II.28})$$

Alors que, l'équation de conservation de quantité de mouvement radial est donnée par :

$$\frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} (r^* V_r^* V_r^*) + \frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial \theta} (V_\theta^* r^*) + \frac{\partial}{\partial z^*} (V_z^* V_r^*) - \frac{V_\theta^{*2}}{r^*} = -\frac{\partial P^*}{r^*} + \frac{Gr_0^*}{Re_0^2} \cos\theta T^* +$$

$$\frac{1}{Re_0} \left[\frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} (r^* \tau_{rr}^*) + \frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial \theta} (\tau_{r\theta}^*) - \frac{\tau_{\theta\theta}^*}{r^*} + \frac{\partial}{\partial z^*} (\tau_{rz}^*) \right] \quad (\text{II.29})$$

conservation de quantité de mouvement angulaire est :

$$\frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} (r^* V_r^* V_\theta^*) + \frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial \theta} (V_\theta^* V_\theta^*) + \frac{\partial}{\partial z^*} (V_z^* V_\theta^*) + \frac{V_r^* V_\theta^*}{r^*} = -\frac{1}{r^*} \frac{\partial P^*}{\partial \theta} - \frac{Gr_0^*}{Re_0^2} \sin\theta T^* +$$

$$\frac{1}{Re_0} \left[\frac{1}{r^{*2}} \frac{\partial}{\partial r^*} (r^{*2} \tau_{\theta r}^*) + \frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial \theta} (\tau_{\theta\theta}^*) + \frac{\partial}{\partial z^*} (\tau_{\theta z}^*) \right] \quad (\text{II.30})$$

En plus, l'équation de conservation de quantité de mouvement axial :

$$\frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} (r^* V_r^* V_z^*) + \frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial \theta} (V_\theta^* V_z^*) + \frac{\partial}{\partial z^*} (V_z^* V_z^*) = -\frac{\partial P^*}{\partial z^*} + \frac{1}{Re_0} \left[\frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} (r^* \tau_{rz}^*) + \frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial \theta} (\tau_{\theta z}^*) + \right.$$

$$\left. \frac{\partial}{\partial z^*} (\tau_{zz}^*) \right] \quad (\text{II.31})$$

Et, l'équation de conservation de l'énergie est exprimée par:

$$\frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} (r^* V_r^* T^*) + \frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial \theta} (V_\theta^* T^*) + \frac{\partial}{\partial z^*} (V_z^* T^*) = G^* - \frac{1}{Re_0 Pr_0} \left[\frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} (r^* q_r^*) + \frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial \theta} (q_\theta^*) + \right.$$

$$\left. \frac{\partial}{\partial z^*} (q_z^*) \right] \quad (\text{II.32})$$

$$\text{Avec: } G^* = \begin{cases} \frac{K_s^*}{Re_0 Pr_0} & \text{dans le solide} \\ 0 & \text{dans le fluide} \end{cases}$$

Les composantes du tenseur des contraintes visqueuses sont :

$$\tau_{rr}^* = 2\mu^* \frac{\partial V_r^*}{\partial r^*}$$

$$\tau_{r\theta}^* = \tau_{\theta r}^* = \mu^* \left[r^* \frac{\partial}{\partial r^*} \left(\frac{V_\theta^*}{r^*} \right) + \frac{1}{r^*} \frac{\partial V_r^*}{\partial \theta} \right]$$

$$\tau_{\theta\theta}^* = 2\mu^* \left[\left(\frac{1}{r^*} \frac{\partial V_\theta^*}{\partial \theta} + \frac{V_r^*}{r^*} \right) \right]$$

$$\tau_{\theta z}^* = \tau_{z\theta}^* = \mu^* \left[\frac{\partial V_\theta^*}{\partial z^*} + \frac{1}{r^*} \frac{\partial V_z^*}{\partial \theta} \right] \quad (\text{II.33})$$

$$\tau_{zr}^* = \tau_{rz}^* = \mu^* \left[\frac{\partial V_z^*}{\partial r^*} + \frac{\partial V_r^*}{\partial z^*} \right]$$

$$\tau_{zz}^* = 2\mu^* \frac{\partial V_z^*}{\partial z^*}$$

Et, les densités de flux thermique sont :

$$q_r^* = -K^* \frac{\partial T^*}{\partial r^*}, \quad q_\theta^* = -\frac{K^*}{r^*} \frac{\partial T^*}{\partial \theta} \quad \text{et} \quad q_z^* = -K^* \frac{\partial T^*}{\partial z^*} \quad (\text{II.34})$$

II.6.1.4. Conditions aux limites

Un débit massique est imposé sur la section d'entrée, dont les profils de vitesse et de température sont uniformes. La partie en rouge du tube est soumise uniformément, à une source de chaleur avec des pertes thermiques convectives et radiatives de la surface externe de l'absorbeur.

Nous considérons l'hypothèse d'écoulement laminaire suivant : l'axe z et axisymétrique à la normale avec une approximation de Boussinesq, et la gravité s'exerçant suivant la direction y . Un écoulement, dynamiquement et thermiquement pleinement développé avec une correction du débit massique, est appliqué sur la section de sortie.

II.6.2. Résultats et discussion

Afin de valider la fiabilité de simulation du code de calcul Fluent, la simulation est effectuée pour la convection mixte développée entièrement, dans un tube cylindrique en inconel de 1 m de longueur, de 1 cm de diamètre extérieur, de 0,2 mm d'épaisseur, et parcouru par de l'eau. La simulation a été faite selon les conditions aux limites de l'étude expérimentale d'Abid et al. [19].

La figure II.30 représente la validation des résultats simulés de code de calcul Fluent avec les résultats expérimentaux d'Abid. Ces résultats indiquent l'évolution des températures à l'intérieur en bas et en haut du tube. L'écart entre les valeurs de simulation et les valeurs exactes est inférieur à 0,19 %. Ladite figure nous indique que, d'une part, les valeurs simulées sont concordantes avec les valeurs expérimentales, et d'autre part, le code de simulation est donc, fiable.

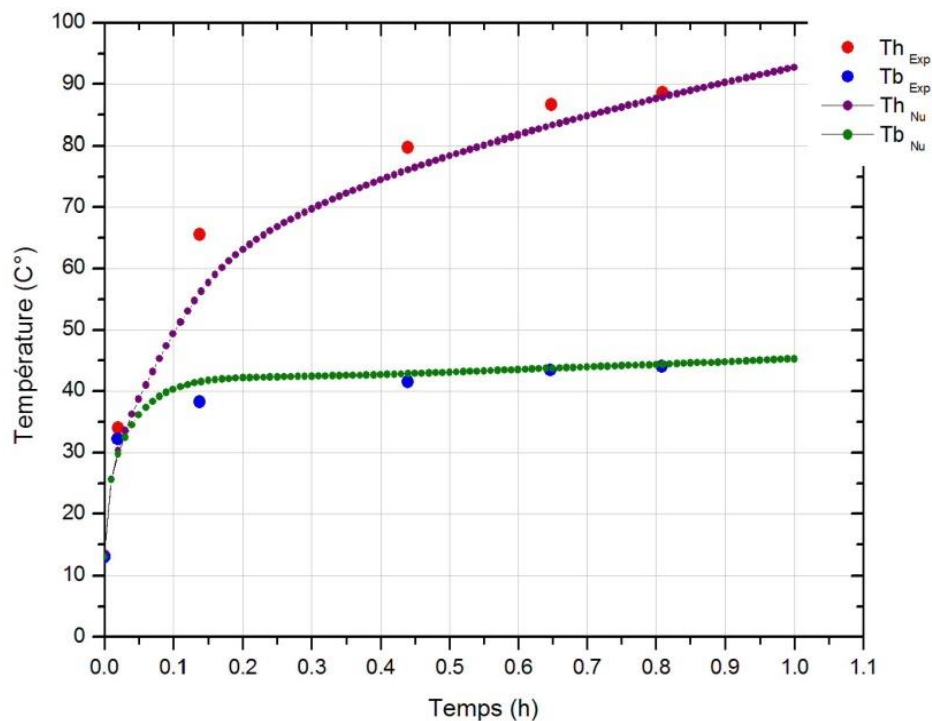


Figure II.30. Validation des résultats simulés de code de calcul Fluent avec les résultats expérimentaux d'Abid et al.

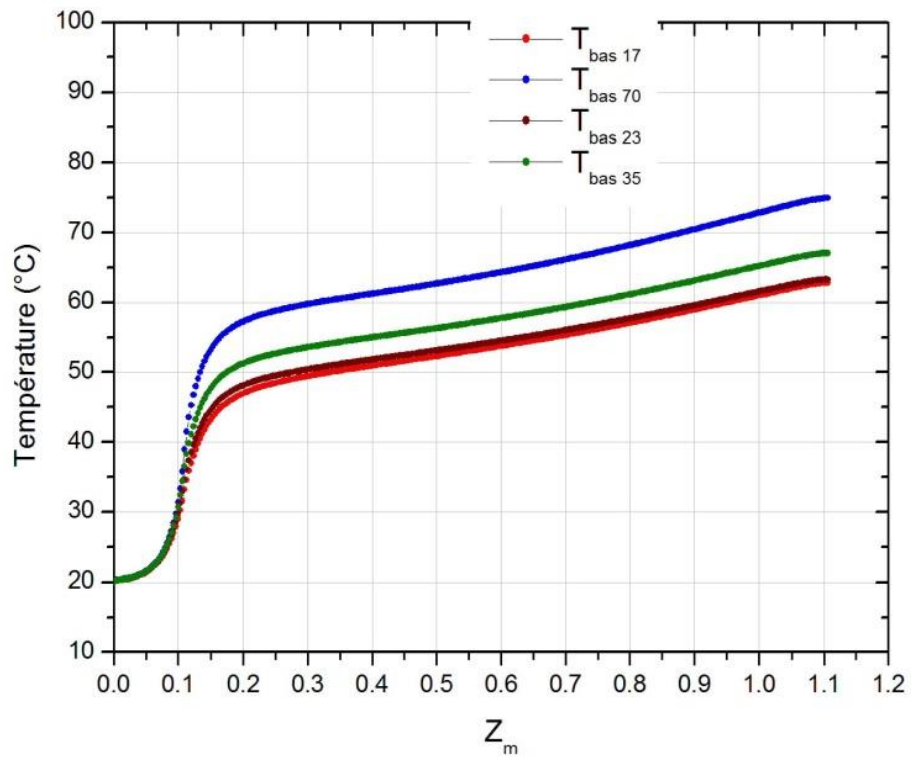


Figure II.31. Développement de la température du bas du tube pour différentes concentrations.

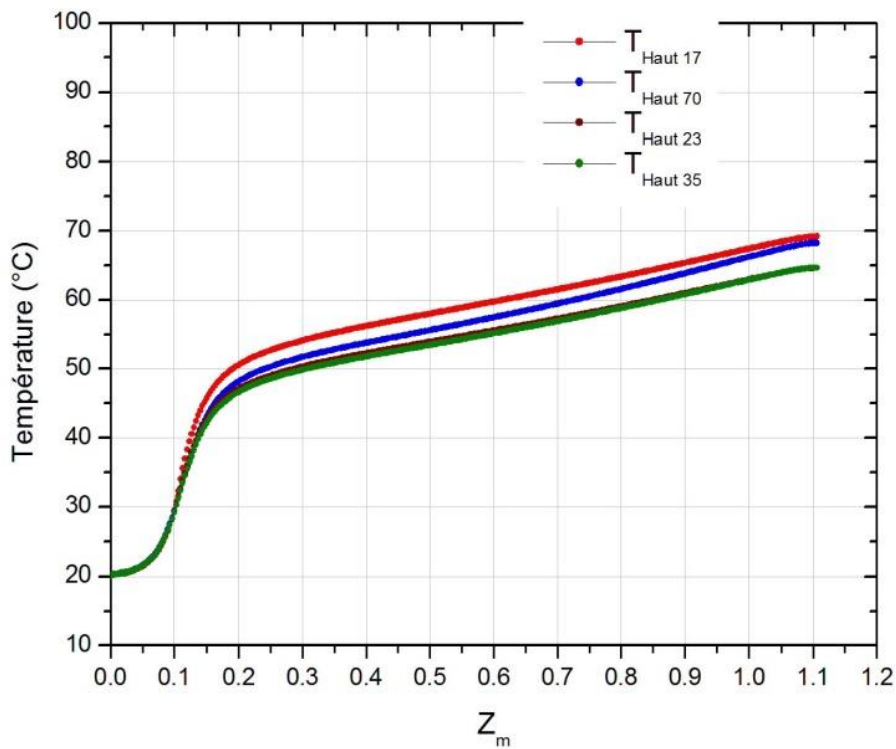


Figure II.32. Développement de la température du haut du tube pour différentes concentrations.

Les figures II.31 et II.32 indiquent, le développement de la température suivant l'axe d'écoulement z pour différentes concentrations. Pour le bas du tube, la température de C_{70} est plus élevée que les autres températures. Mais pour le haut du tube, la température de C_{17} est supérieure à celle de C_{70} , à un $\Delta T = 2^\circ\text{C}$.

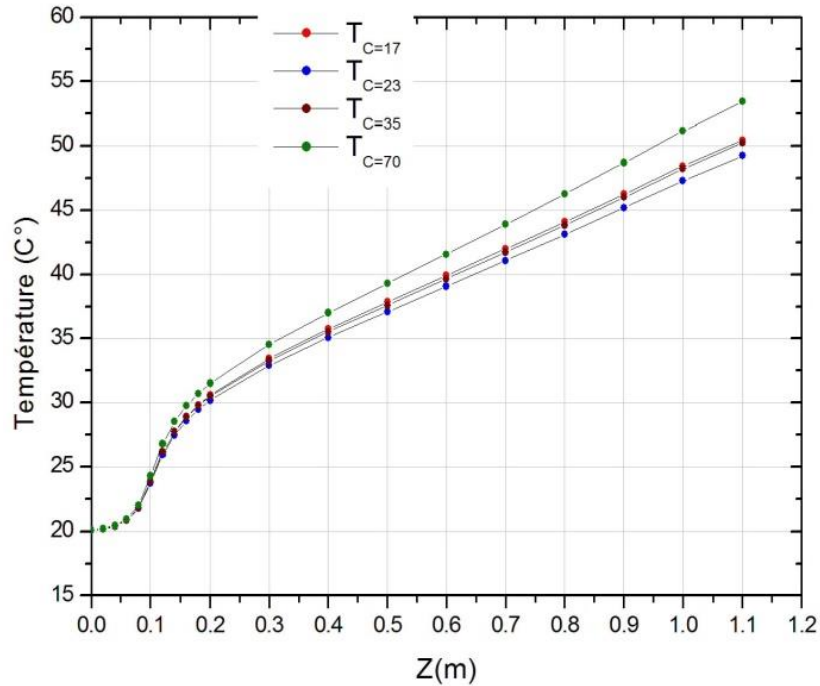


Figure II.33. Température moyenne du tube pour différents flux et concentrations.

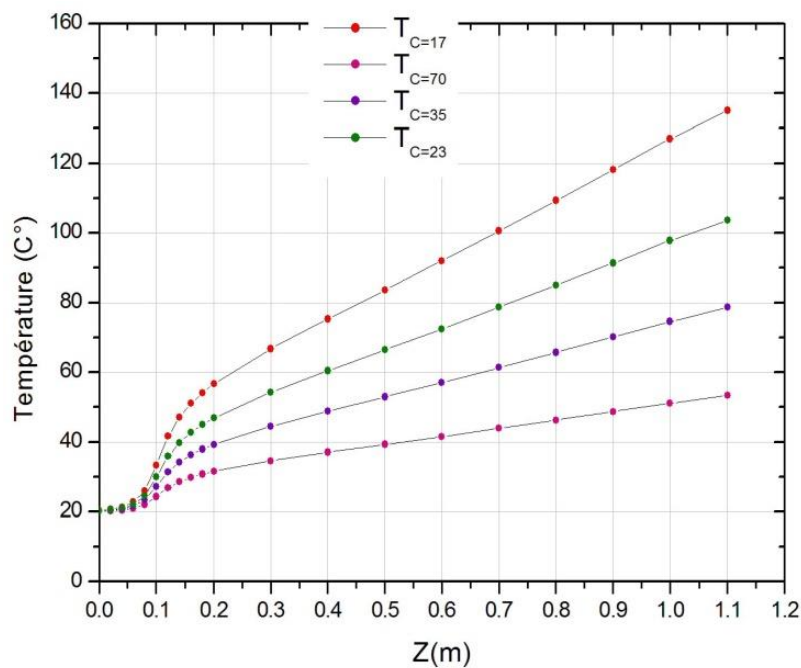


Figure II.34. Température moyenne du tube pour un même flux, à différentes concentrations.

Les figures II.33 et II.34 illustrent l'augmentation de la température moyenne suivant l'axe d'écoulement z , à différentes concentrations. Concernant la figure II.33, la simulation se fait avec différents flux et concentrations imposés. Nous remarquons que, la température de C_{70} est plus élevée que les autres températures. Les températures de C_{17} et C_{35} sont identiques, et plus élevées que celle de C_{23} . Pour la figure II.34, la simulation est faite avec un même flux pour différentes parties du tube absorbeur. Cette figure montre que la température de C_{17} est plus élevée que les autres concentrations.

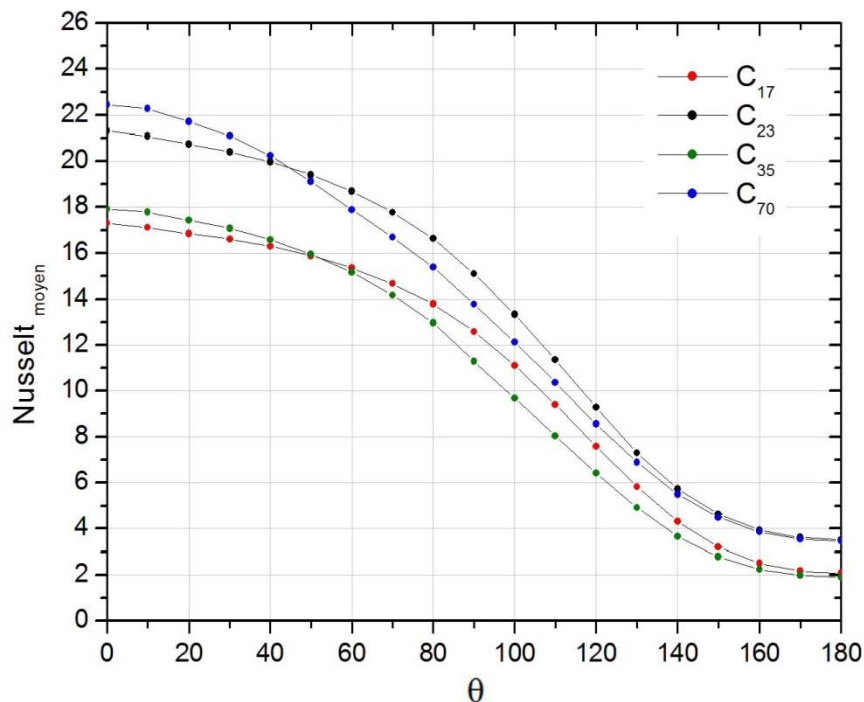


Figure II.35. Nusselt moyen pour différentes concentrations.

Nous avons créé 40 points le long de l'absorbeur, près de la paroi, en utilisant le logiciel Fluent, suivant θ de bas en haut, à un $\Delta\theta = 10^\circ$. La figure II.35 représente, la variation de Nusselt moyenne suivant θ ; cette courbe indique que Nu_{moy} est plus élevé à $\theta = 0^\circ$ par rapport au $\theta = 180^\circ$; ceci est dû au principe de la convection mixte.

La figure II.36 indique, la variation de Nusselt local suivant θ au plan de sortie de l'absorbeur pour différentes concentrations. Nous constatons qu'au bas du tube, à $\theta = 0^\circ$, Nusselt local de C_{70} est plus élevé. Il ressort que, le coefficient d'échange thermique de C_{70} est supérieur aux autres concentrations. À $\theta = 180^\circ$, la variation de Nusselt local pour toutes les concentrations, a tendance à évoluer vers $Nu = 1$.

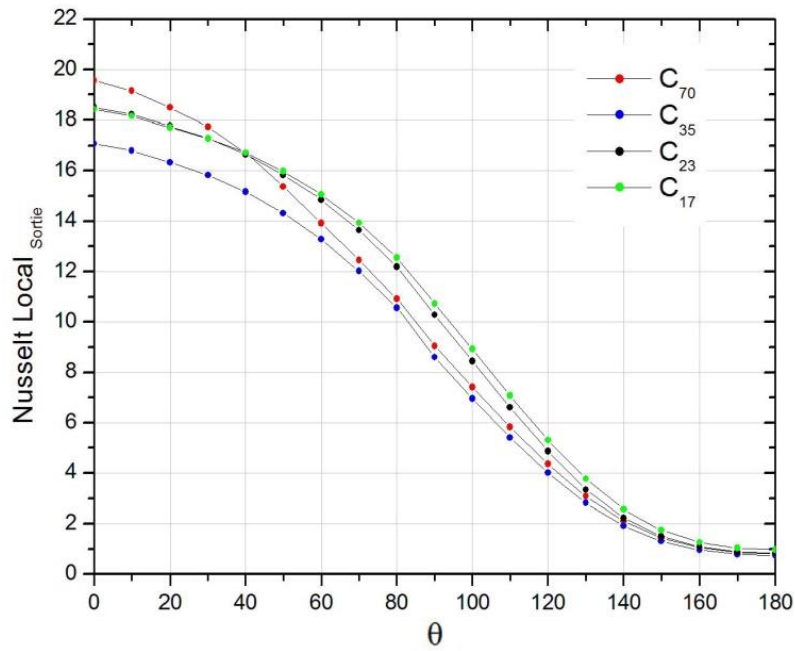


Figure II.36. Nusselt local pour différentes concentrations au plan de sortie.

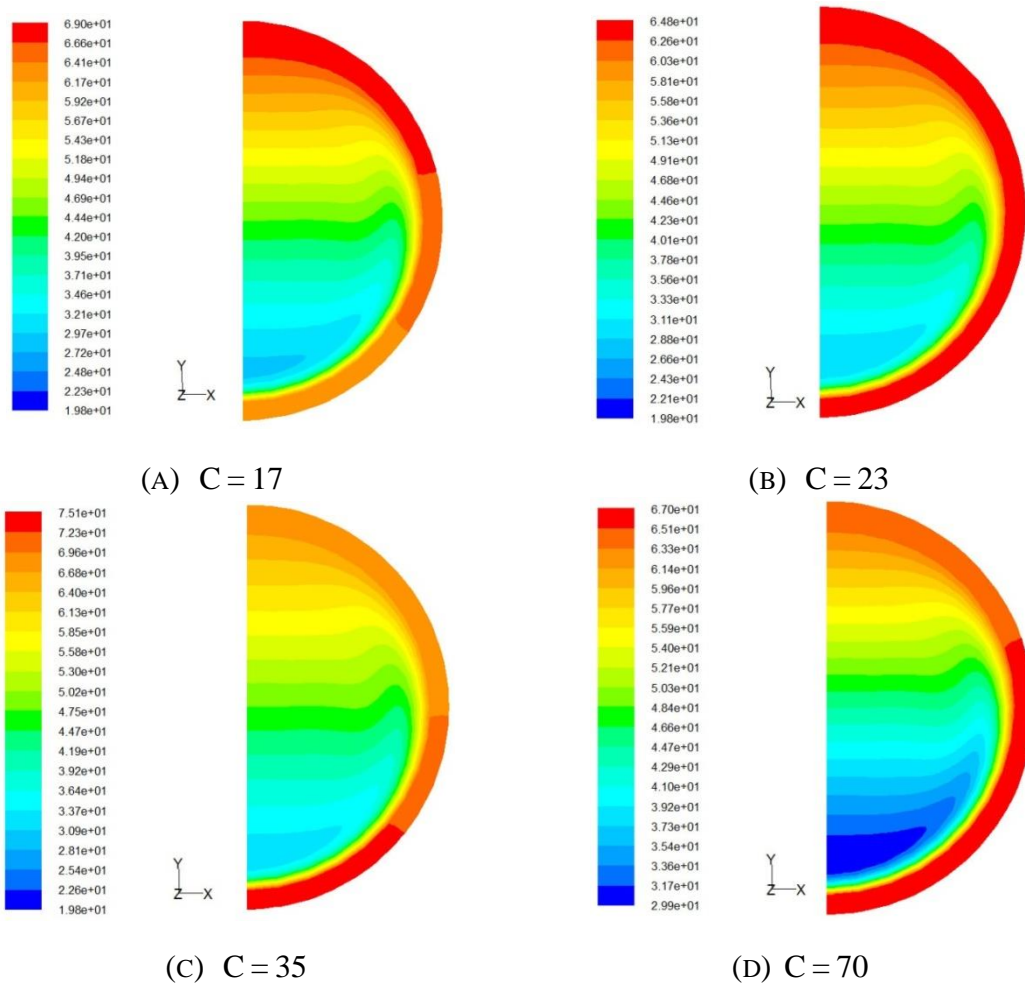


Figure II.37. Distribution de la température au plan de sortie pour différentes concentrations.

À partir du logiciel de calcul Fluent, nous pouvons afficher les contours des températures d'un plant à un z donné. La figure II.37 illustre la distribution de la température au plan de sortie de chaque simulation, pour différentes concentrations A, B, C et D.

II.7. Étude numérique du transfert thermique en convection mixte pour un tube absorbeur d'un CCP à deux différents fluides caloporteurs

Dans cette partie, nous présentons une étude numérique de la convection mixte dans un tube absorbeur en cuivre de notre prototype entre l'eau et l'huile en utilisant le code de calcul Fluent. Le flux solaire instantané de la journée est imposé uniformément, sur l'épaisseur de tube en bas comme source de chaleur, avec une circulation de fluide en régime laminaire. Les résultats obtenus indiquent la différence entre l'échange thermique entre les deux fluides caloporteurs, exprimant l'importance de la chaleur spécifique de l'huile par rapport à l'eau, ainsi que les caractéristiques physiques de l'absorbeur et le débit d'écoulement induit.

II.7.1. Modèle mathématique

Nous avons simulé le même modèle mathématique et les conditions aux limites précédents dans ce chapitre, mais avec deux différents fluides caloporteurs, l'eau et l'huile thermique.

II.7.2. Résultats et discussion

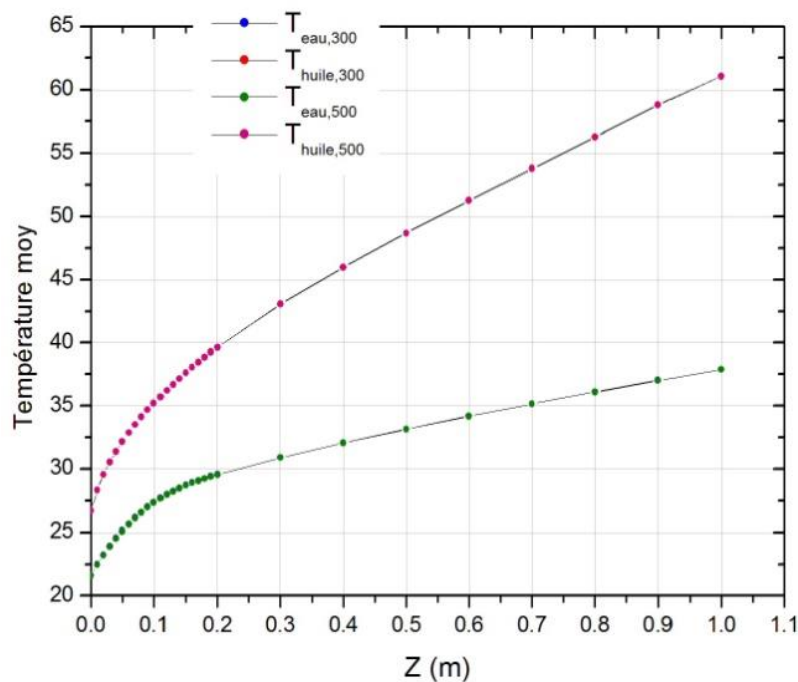


Figure II.38. Température moyenne de l'eau et l'huile suivant l'axe d'écoulement z .

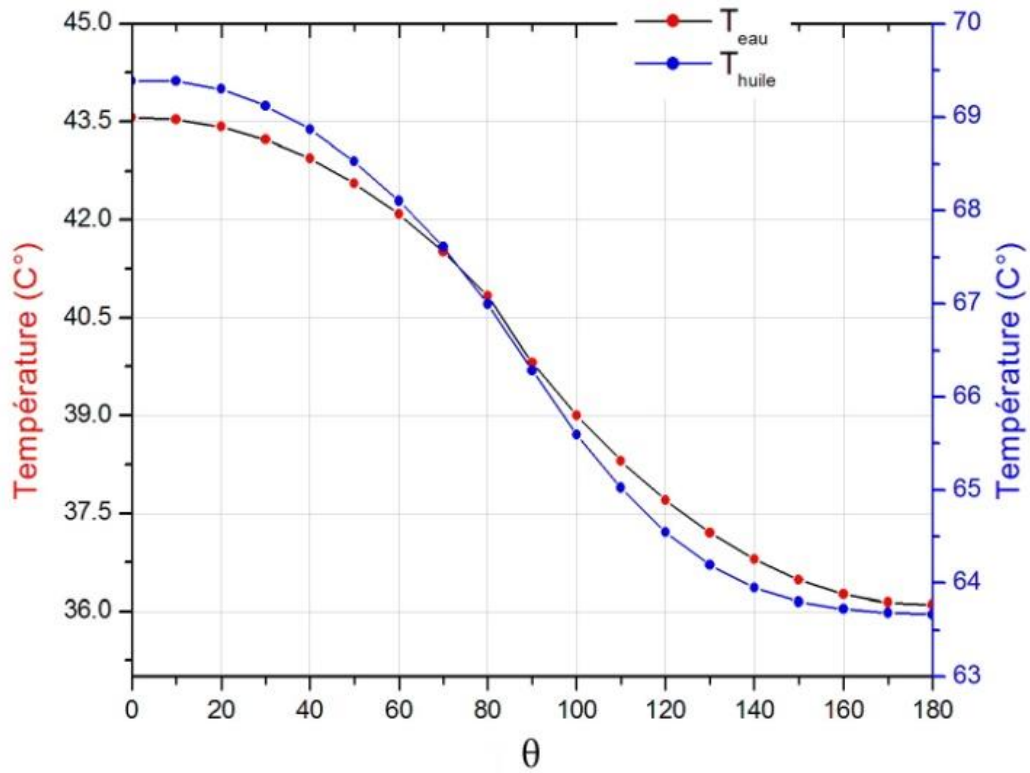


Figure II.39. Température près de la paroi intérieure suivant θ à $z = 0,05$.

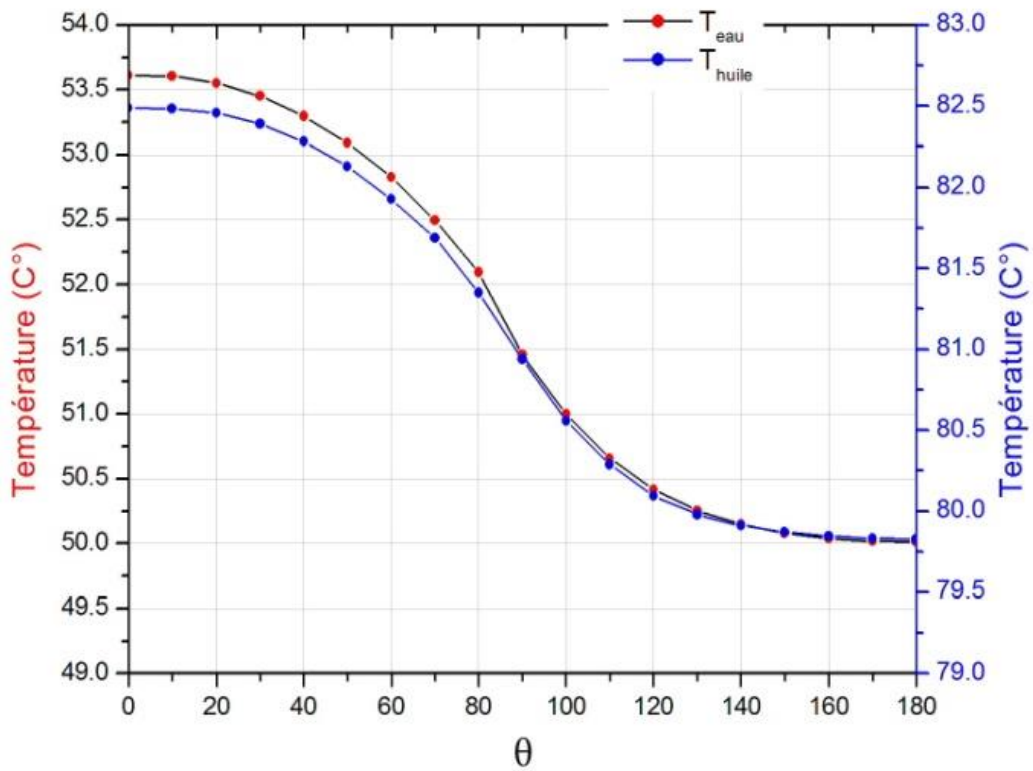


Figure II.40. Température près de la paroi intérieure suivant θ à $z = 0,5$.

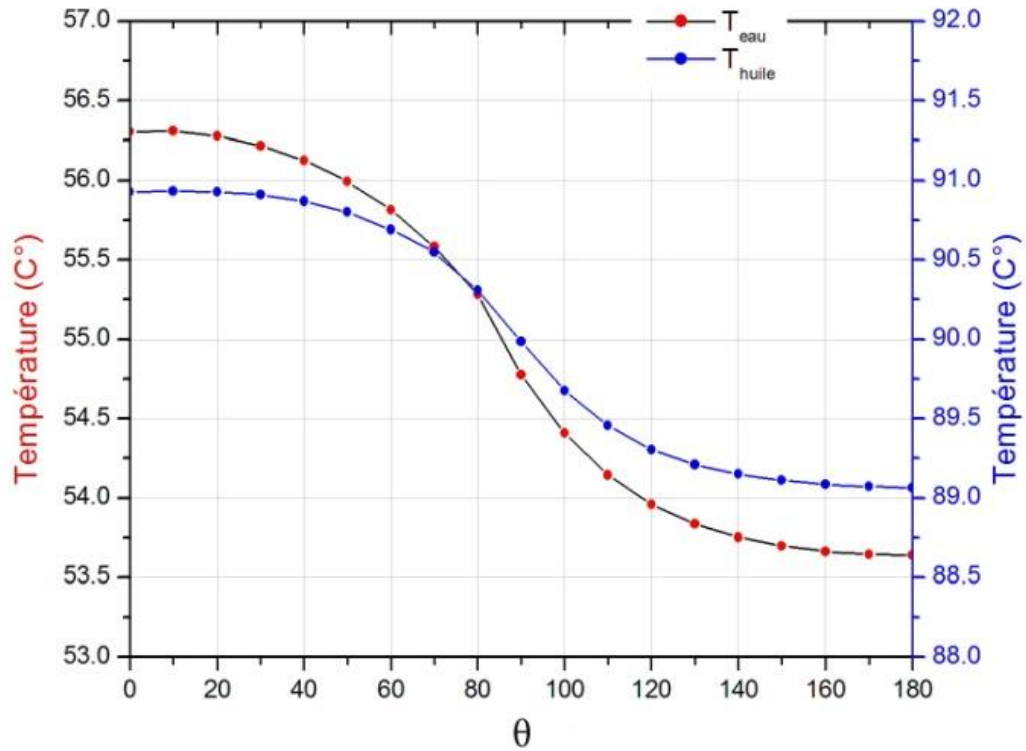


Figure II.41. Température près de la paroi intérieure suivant θ à $z = 1$.

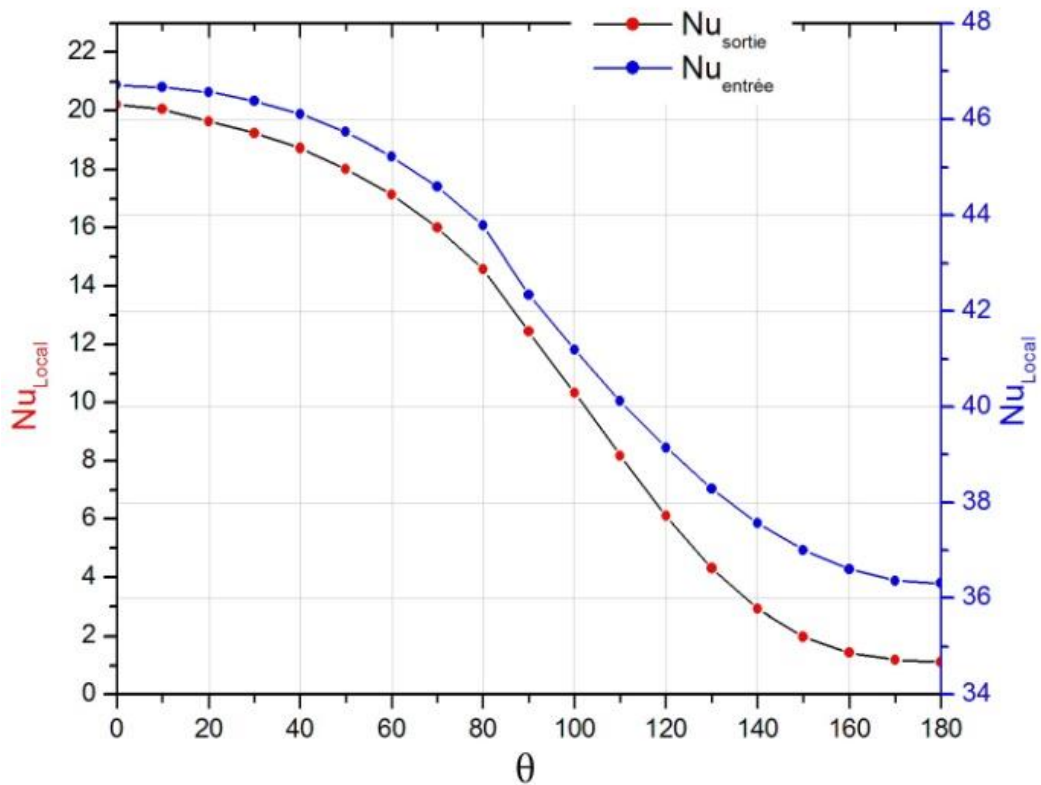


Figure II.42. Comparaison de Nusselt local de l'eau, entre l'entrée et la sortie.

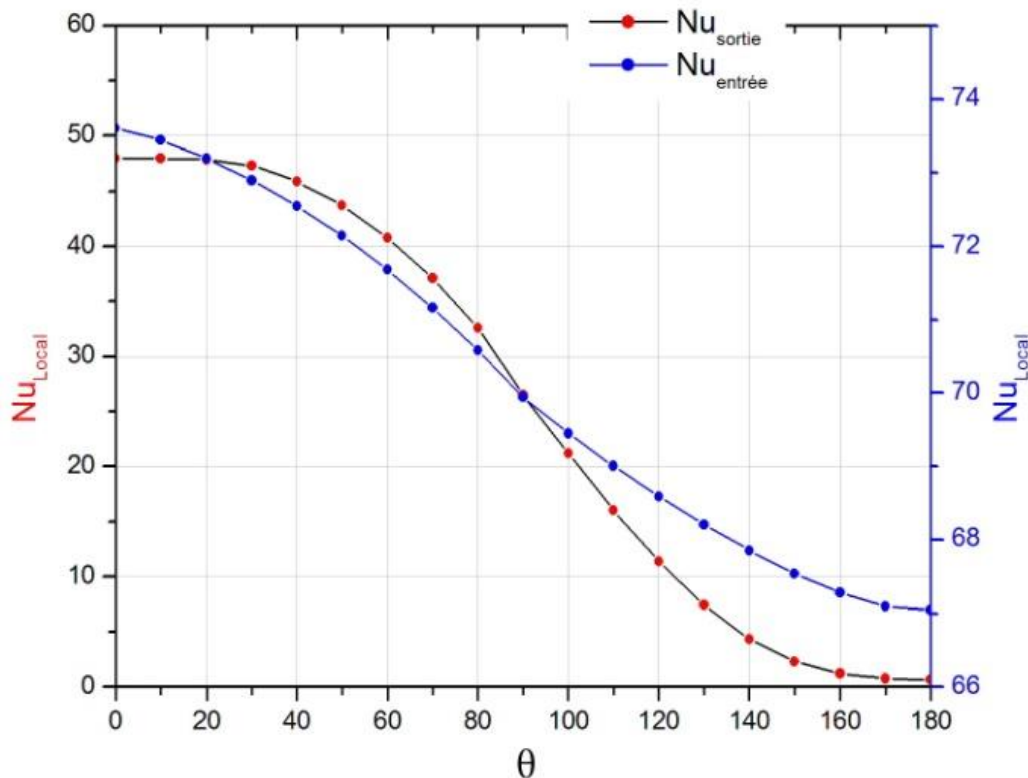


Figure II.43. Comparaison de Nusselt local de l'huile, entre l'entrée et la sortie.

La figure II.38 illustre l'évolution de la température moyenne suivant l'axe d'écoulement z de l'eau et de l'huile, qui présente deux parties : la zone de développement à $z = [0, 0,2]$ et la zone d'établissement linéaire à $z = [0,2, 1]$. À la sortie nous notons un $\Delta T = 24$ °C entre les deux fluides. Cette figure indique aussi l'élimination de l'effet de maillage entre une simulation avec 300 nœuds et 500 nœuds suivant l'axe d'écoulement z .

Les figures II.39, II.40 et II.41 représentent l'évolution de la température de la couche entre la paroi et le fluide suivant θ pour trois différentes positions de z . Ces courbes prennent l'allure des courbes de Gauss [19]. Nous remarquons que, à $z = 0,05$, $\Delta T_{\text{huile}} = 6$ °C et $\Delta T_{\text{eau}} = 7$ °C, à $z = 0,5$ $\Delta T_{\text{huile}} = 3$ °C et $\Delta T_{\text{eau}} = 4$ °C et à $z = 1$ $\Delta T_{\text{huile}} = 1,5$ °C et $\Delta T_{\text{eau}} = 3$ °C.

La différence entre l'huile et l'eau suivant θ , en haut de l'absorbeur à l'entrée $\Delta T_e = 26$ °C, à la sortie $\Delta T_s = 34$ °C. Par contre, en bas de l'absorbeur à l'entrée $\Delta T_e = 28$ °C, et à la sortie $\Delta T_s = 35$ °C.

Ces résultats indiquent que l'échange de chaleur avec l'huile thermique est très important par rapport à l'eau.

Les figures II.42 et II.43 étudient la variation de Nusselt local pour l'eau et l'huile suivant θ . Nous constatons que, les valeurs de l'huile sont plus élevées que celles de l'eau et qu'elles sont plus élevées à l'entrée qu'à la sortie.

II.8. Étude expérimentale du prototype CCP pour deux différents fluides caloporteurs

II.8.1. Description du prototype

Le prototype réalisé pour effectuer les mesures thermiques, comporte, essentiellement les éléments suivants (Fig. II.27).

- réflecteur solaire de forme cylindro-parabolique, qui est l'élément essentiel du concentrateur. Il est constitué de miroirs rectangulaires de 3 cm de largeur et 1 m de longueur, et dont l'indice de réflexion est de 0,95. Ces derniers sont fixés sur une tôle inoxydable ;
- absorbeur, qui est représenté par un tube en cuivre, de 1 m de longueur, et couvert d'une couche de peinture noire. Il constitue le foyer au niveau duquel se concentrent les rayons du soleil ;
- cuve de stockage, d'une capacité de 5 litres, permettant le stockage thermique et en même temps, jouant le rôle d'un ballon d'expansion pour le circuit fermé du fluide caloporteur. Cette cuve couverte d'un isolant, contient dans sa partie basse une entrée et une sortie, et dans sa partie haute une deuxième entrée et une soupape de sécurité ;
- vérin électrique, qui permet l'orientation du concentrateur pour suivre le soleil de l'est à l'ouest ;
- pompe (accélérateur de chaudière) de circulation de fluide caloporteur, qui doit être résistante aux hautes températures. Elle comporte 3 vitesses différentes ;
- socle, pour fixer le dispositif de captation, c'est-à-dire : le réflecteur, la cuve de stockage de la chaleur, l'absorbeur et le circuit du fluide caloporteur.

II.8.2. Principe de fonctionnement

Le concentrateur cylindro-parabolique est orienté vers l'est au lever du soleil jusqu'à l'ouest, pour capter et concentrer le maximum de rayonnements solaires. La poursuite du soleil est assurée grâce à un vérin commandé électriquement. La focalisation du rayonnement se fait sur le foyer central, où circule le fluide caloporteur (eau/huile) à l'aide d'une pompe électrique assurant l'écoulement du fluide caloporteur. Ce fluide transporte les calories vers la cuve de stockage thermique.

Cinq thermocouples de type K sont fixés à l'entrée, à la sortie et sur la surface latérale du tube absorbeur, au milieu de la cuve, et dans l'environnement du concentrateur. Ces thermocouples sont branchés à un afficheur de température pour mesurer, chaque 5 minutes les températures d'entrée T_e , de sortie T_s , de surface du tube absorbeur T_{sur} , du fluide caloporteur de la cuve T_{fluide} , ainsi que la température ambiante T_{amb} .

L'étude que nous présentons a été faite, expérimentalement à Ghardaïa-Algérie, le mois d'Août. L'objectif de ce travail étant de comparer entre le stockage de l'huile thermique et de l'eau. Ainsi, plusieurs tests de mesures ont été effectués dans les mêmes conditions climatiques, pour les deux fluides. Nous avons considéré un régime laminaire, et une cuve de stockage totalement remplie de fluide, afin de comparer la variation des températures du circuit fermé du concentrateur.

II.8.3. Résultats et discussion

Ce travail a été réalisé dans les mêmes conditions climatiques pour les deux fluides caloporteurs ; nous avons choisi des jours ensoleillés à ciel clair, pendant toute la journée. Les tests commencent à 08^h :30 du matin jusqu'à 20^h :30 du soir. À 16^h :00, nous arrêtons la pompe de circulation par fermeture des vannes d'entrée et de sortie de la cuve de stockage, afin d'assurer la conservation de la chaleur à l'intérieur de la cuve.

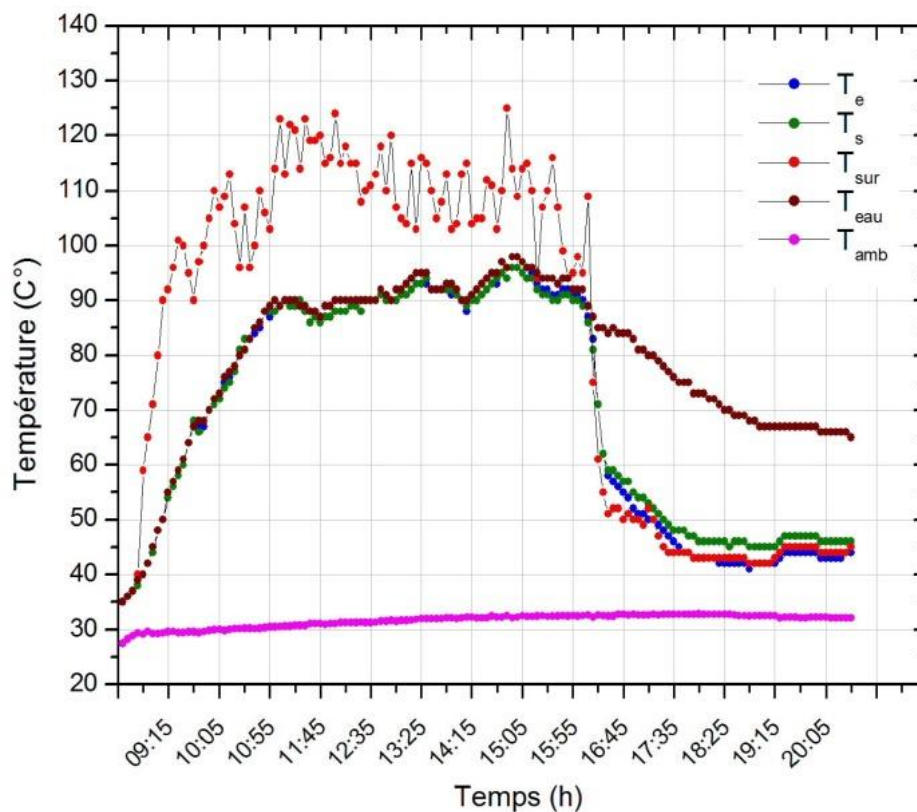


Figure II.44. Évolution de la température de l'eau mesurée le 13/08/2016.

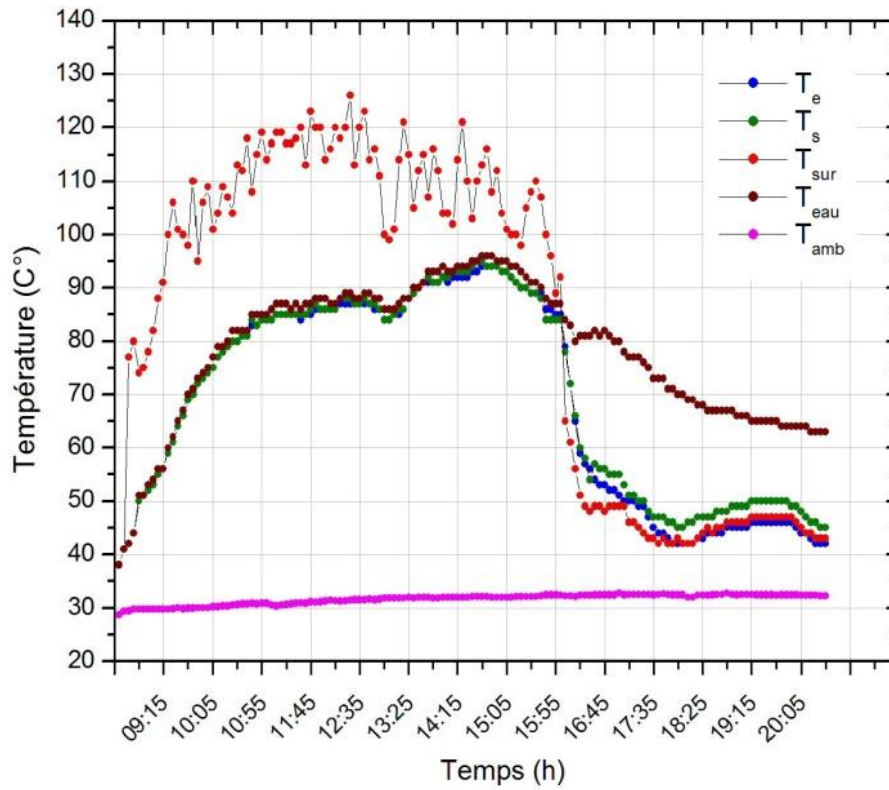


Figure II.45. Évolution de la température de l'eau mesurée le 14/08/2016.

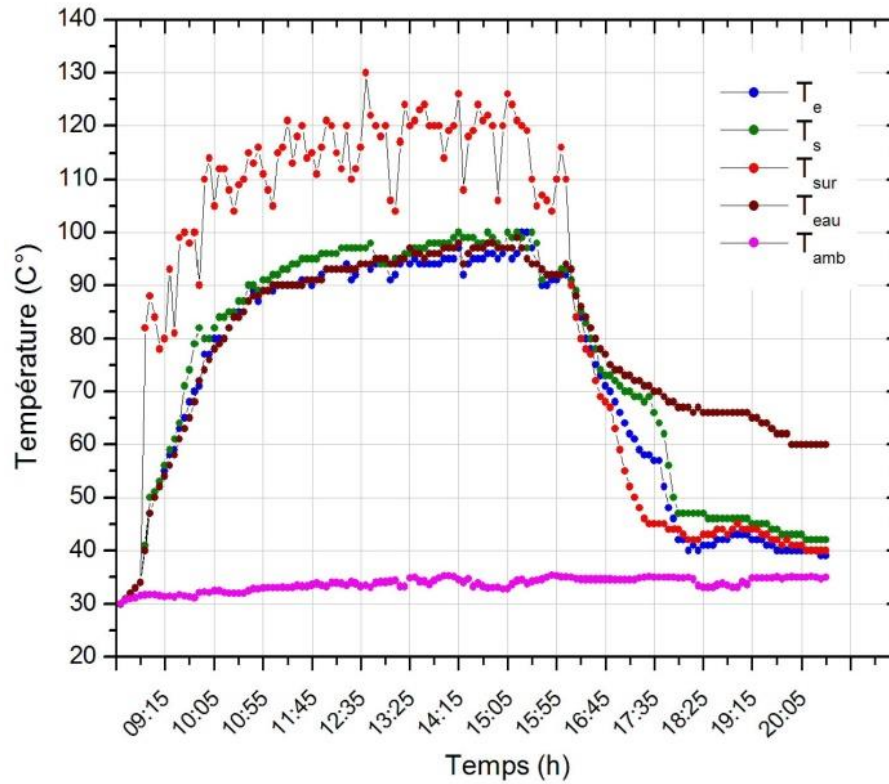


Figure II.46. Évolution de la température de l'eau mesurée le 16/08/2016.

Les figures II.44, II.45 et II.46, représentent l'évolution des températures d'entrée, de sortie, et de la surface de tube absorbeur de l'eau dans la cuve et la température ambiante. Nous remarquons ici que, la température de la surface du tube absorbeur présente des fluctuations. Ces dernières sont dues à la poursuite solaire du 08^h :30 jusqu'à 16^h :00. Pour les températures T_e , T_s et T_{eau} nous constatons qu'elles ont la même évolution durant tout le test, avec des différences allant jusqu'à ($\Delta T = 5 \text{ }^\circ\text{C}$). Mais à partir de 16^h :00, la température de l'eau dans la cuve demeure plus élevée par rapport aux trois autres températures.

La période entre 08^h :30 et 11^h :00, correspond à une augmentation des températures. En revanche, de 11^h :00 à 16^h :00, les températures se stabilisent entre 90 °C et 100 °C pour la cuve, et à l'intérieur de l'absorbeur. Alors que, la surface externe de l'absorbeur demeure stable entre 100 °C et 130 °C. Enfin, de 16^h :00 jusqu'à la fin des tests, nous observons un abaissement des températures.

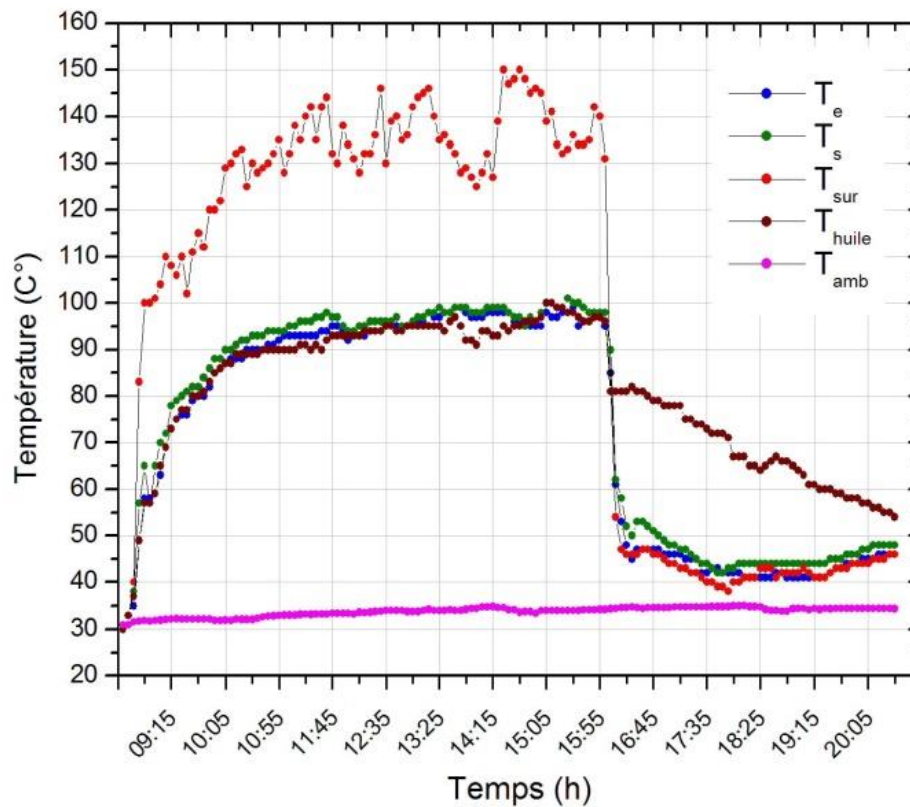


Figure II.47. Évolution de la température de l'huile mesurée le 22/08/2016.

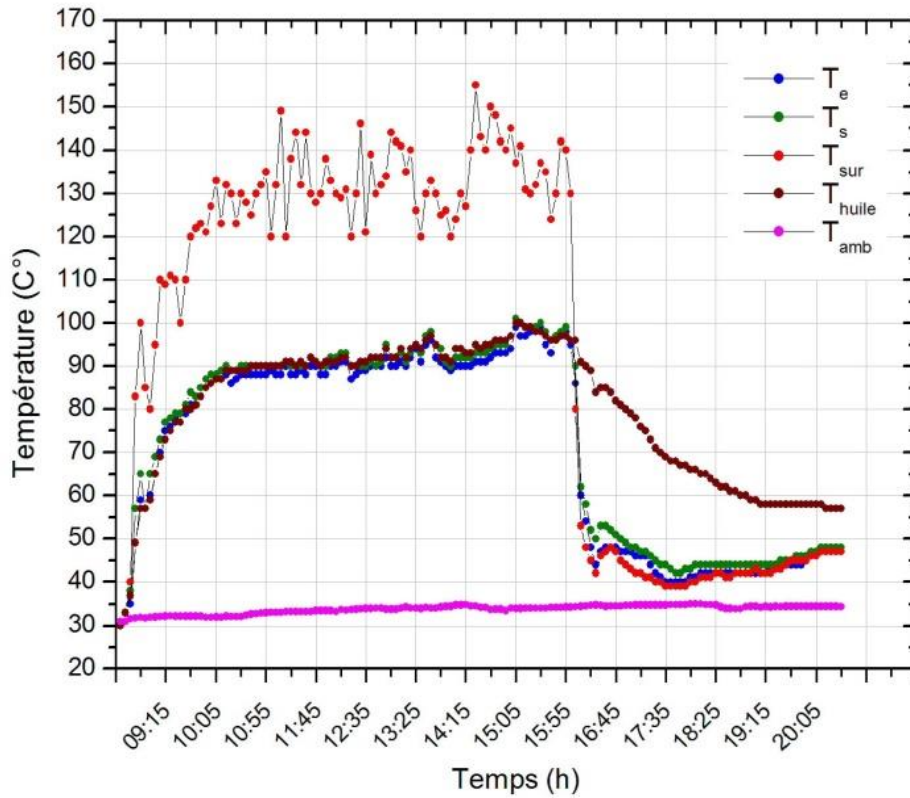


Figure II.48. Évolution de la température de l'huile mesurée le 23/08/2016.

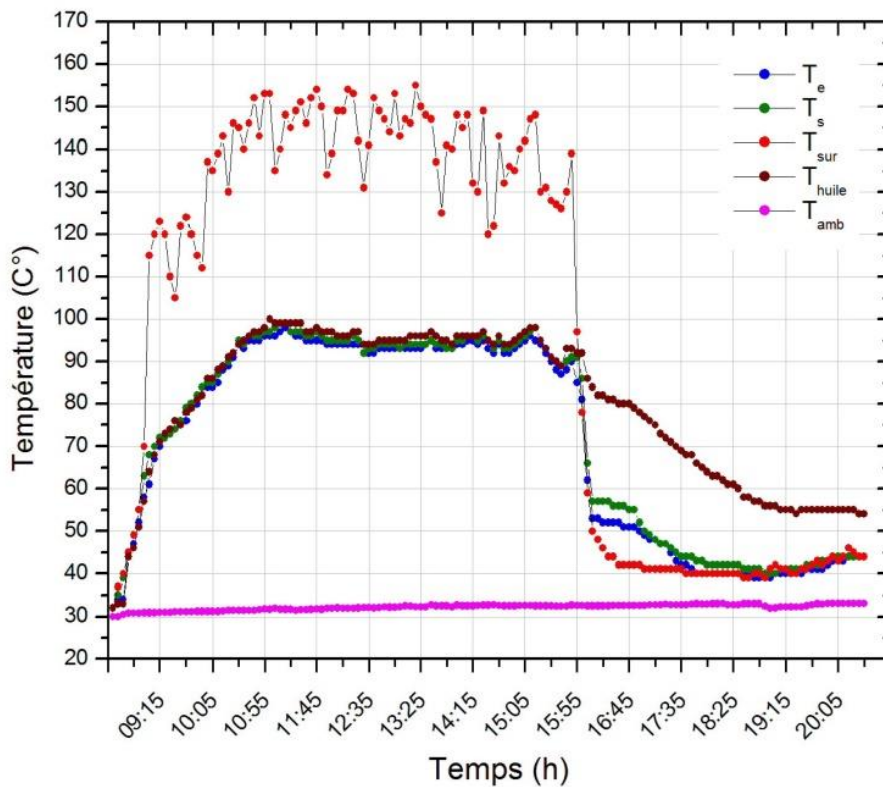


Figure II.49. Évolution de la température de l'huile mesurée le 27/08/2016.

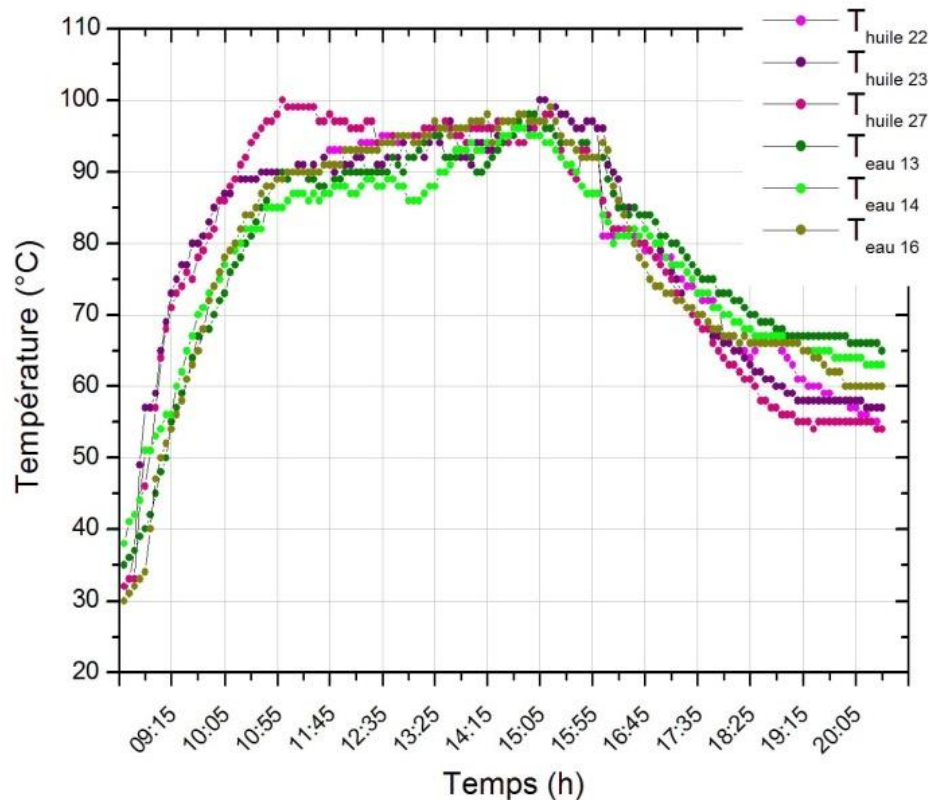


Figure II.50. Comparaison des températures de l'eau et de l'huile pour les journées 13, 14, 16, 22, 23 et 27/08/2016.

Les figures II.47-II.49, illustrent l'évolution des températures mesurées de notre prototype. Les températures T_e , T_s et T_{huile} atteignent $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ de $08^{\text{h}}:30$ jusqu'à $10^{\text{h}}:00$ et restent stables entre $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ de $10^{\text{h}}:00$ jusqu'à $16^{\text{h}}:00$. Après la fermeture des vannes de la cuve de stockage, les températures commencent à diminuer.

La figure II.50, montre une comparaison entre les températures de l'eau et l'huile au milieu de la cuve de stockage. Nous constatons que, les températures de l'huile augmentent rapidement pour atteindre $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $10^{\text{h}}:00$, mais pour l'eau, elles atteignent cette température à $11^{\text{h}}:00$. Après fermeture des vannes, les températures de l'huile diminuent plus rapidement que celles de l'eau. L'huile atteint la température de $54\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $20^{\text{h}}:30$, alors que l'eau arrive à $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ et prend une durée plus longue pour se refroidir.

Ces résultats montrent que l'eau est plus efficace pour le stockage thermique et, donc comme fluide caloporteur pour les concentrateurs cylindro-paraboliques.

II.9. Étude expérimentale du prototype CCP pour deux concentrations différents

II.9.1. Principe de fonctionnement

Le principe de poursuite solaire est le même que le précédent (Fig. II.8). Les tests sont effectués pour deux positions de l'absorbeur. Pour la première position, le centre du tube est posé à une distance focale de 30 cm (Fig. II.51.1). Alors que, pour la deuxième position, le haut du tube est placé à une distance de 30 cm (Fig. II.51.2).

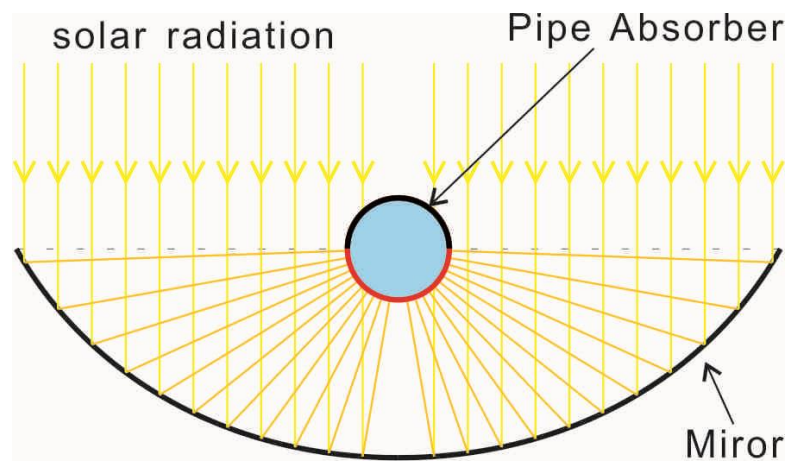


Figure II.51.1. Concentration sur la moitié de l'absorbeur.

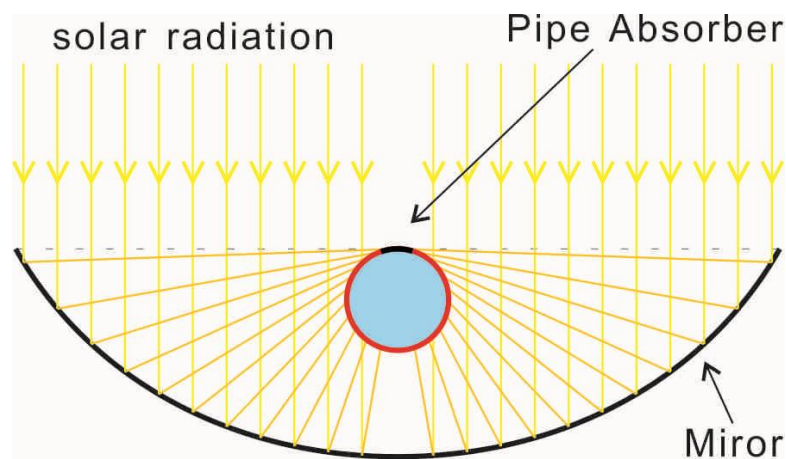


Figure II.51.2. Concentration sur l'entourage de l'absorbeur.

Cinq thermocouples de type K sont fixés à l'entrée, à la sortie et sur la surface latérale du tube absorbant, au milieu de la cuve et dans l'environnement du concentrateur. Ces thermocouples sont raccordés avec Raspberry Pi3 pour mesurer toutes les 10 s, les températures d'entrée T_e , de sortie T_s , de la surface du tube absorbant T_{sur} , du fluide

caloporteur de la cuve T_{eau} , ainsi que la température ambiante T_{amb} , à l'aide d'un programme de python avec enregistrement dans un fichier Excel.

II.9.2. Résultats et discussion

Ce travail a été réalisé dans les mêmes conditions climatiques, à Ghardaïa-Algérie, pour les deux tests, avec la cuve de stockage complètement remplie d'eau ; et pour un même débit d'écoulement pendant les mesures. Nous avons choisi des jours ensoleillés à ciel clair pendant toute la journée. Les tests commencent à 08^h :30, durant une période de 28 heures de mesure. À 15^h :30, nous arrêtons la pompe de circulation avec fermeture des vannes d'entrée et de sortie de la cuve de stockage, afin d'assurer la conservation de la chaleur à l'intérieur de la cuve.

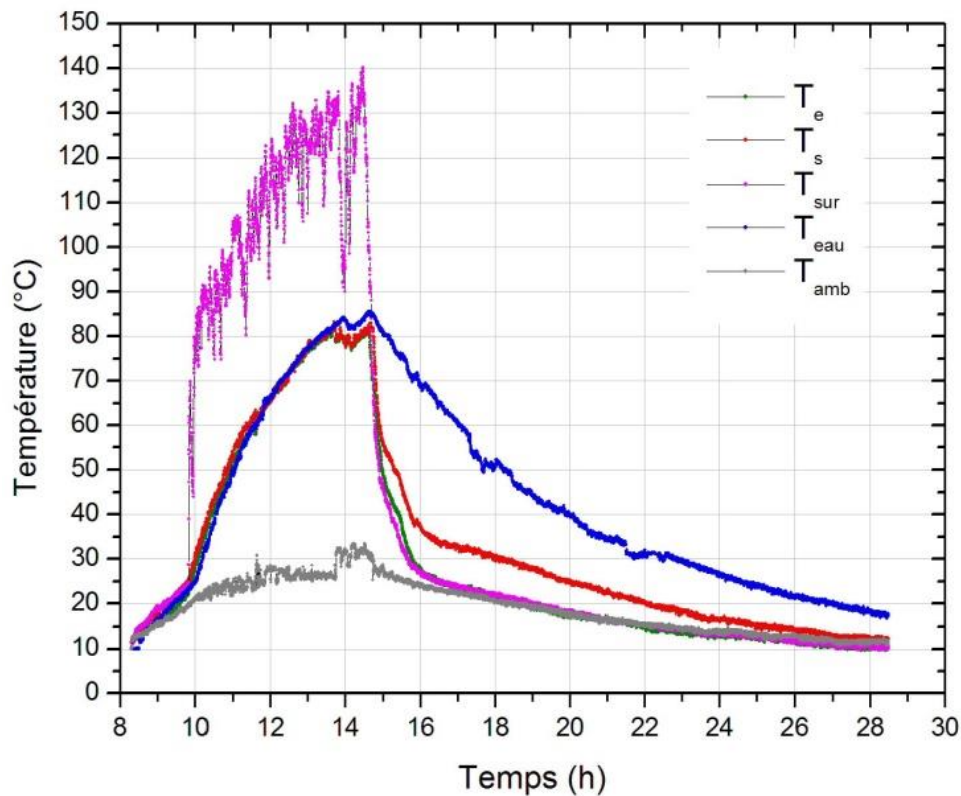


Figure II.52. Évolution des températures pour le cas des rayonnements concentrés sur la moitié de l'absorbeur le 03/02/2017.

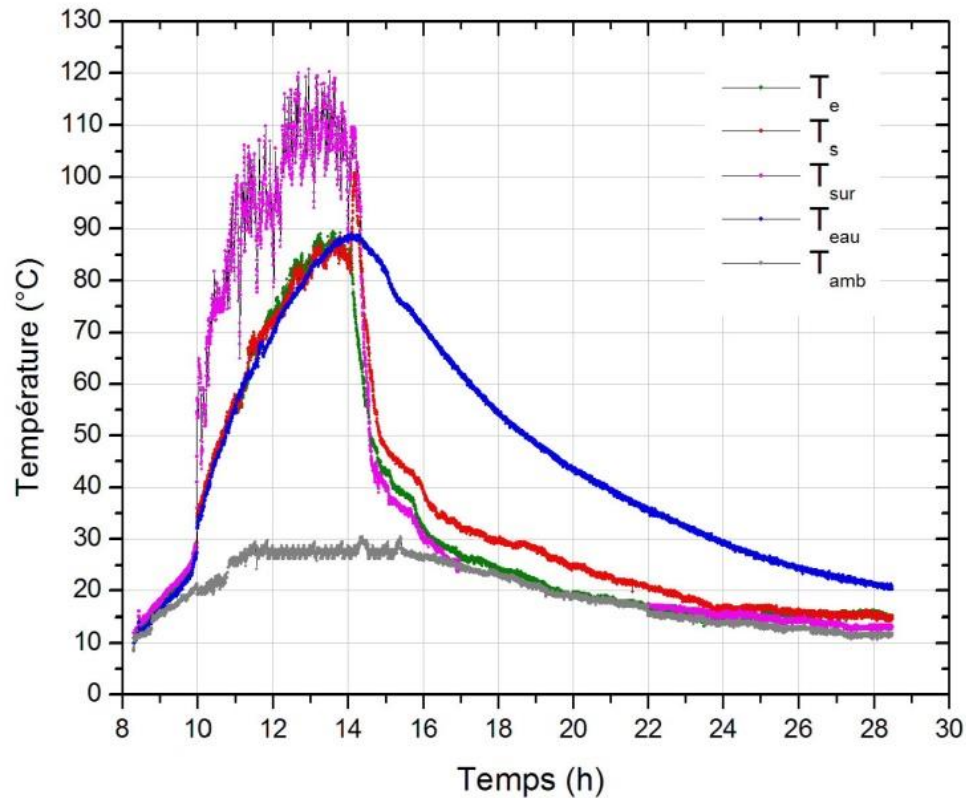


Figure II.53. Évolution des températures pour le cas des rayonnements concentrés sur la totalité de l'absorbeur le 13/02/2017.

Durant les mesures effectuées la période d'hiver, à Ghardaïa, nous avons accompli plusieurs tests, pour les deux cas. Puis, nous avons choisi chacun d'entre eux pour les confronter. La figure II.52 correspond à la journée du 03/02/2017 et la figure II.53 à celle du 13/02/2017. Ces figures indiquent l'évolution des températures T_e , T_s , T_{sur} , T_{eau} et T_{amb} de notre prototype pendant 28 heures.

Nous remarquons que, la température de la surface T_{sur} du tube absorbeur présente des fluctuations dues à la poursuite solaire de 10^h :00 jusqu'à 15^h :00. Pour les températures T_e , T_s et T_{eau} nous constatons qu'elles ont la même évolution de 08^h :30 à 15^h :00, avec des différences allant jusqu'à $\Delta T = 3$ °C. Cependant, à partir de 15^h :00, la température de l'eau dans la cuve demeure plus élevée par rapport aux trois autres températures ; ceci est dû au stockage thermique, pendant le soir.

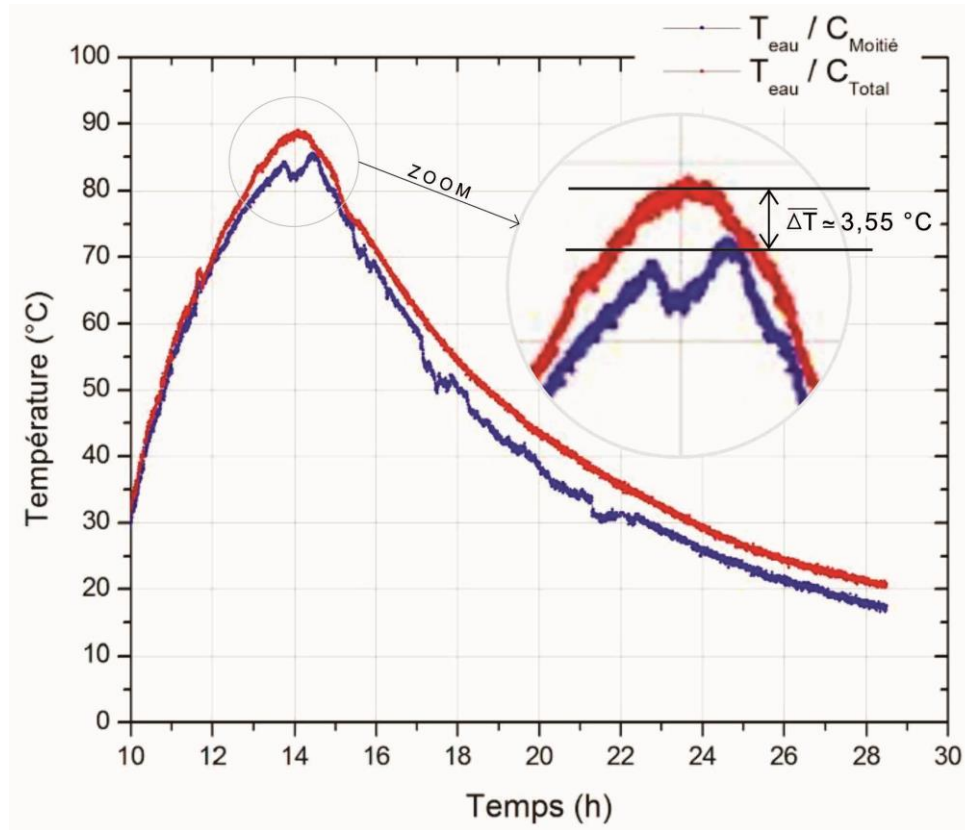


Figure II.54. Comparaison de l'évolution des températures de l'eau pour les deux cas.

La figure II.54 indique, la comparaison est faite entre deux tests effectués pendant deux journées avec un même ensoleillement (ciel clair). La position du tube absorbeur pour le deuxième cas (cas 2) est plus performante par rapport à celle du premier cas (cas1), avec une différence de $\overline{\Delta T} = 3,55 \text{ °C}$. Nous avons conclu que, la distribution de la température sur toute la surface de tube est plus efficace, bien que la concentration de la surface T_{sur} soit faible par rapport au (cas 1).

II.10 Conclusion

L'énergie solaire est une ressource inépuisable qui pourrait fournir à l'humanité l'ensemble de ses besoins en énergie primaire. La conception d'un concentrateur solaire est basée essentiellement sur certains paramètres très importants telles que : la réalisation de la courbe parabolique, qui doit être faite avec une grande précision afin d'assurer la meilleure concentration du rayonnement solaire au niveau du foyer récepteur. L'autre exigence est le bon choix du matériau de fabrication du miroir, ce qui détermine d'une manière directe le facteur de réflexion qui devra être le plus grand possible, permettant le maximum de réflexion.

Dans ce chapitre, nous avons aussi présenté une étude théorique sur notre prototype, où nous avons défini le système d'équation, l'effet de cosinus et la poursuite solaire. De plus, une étude expérimentale a été menée grâce à la réalisation de notre concentrateur. En outre, chaque partie du capteur a été définie en l'occurrence : la courbe parabolique, l'angle d'ouverture, la structure porteuse, et le circuit du fluide caloporteur...etc.

Par ailleurs, une série de mesures expérimentales ont été effectuées, en utilisant des instruments appropriés, consistant en la description du comportement thermique de l'absorbeur d'un CCP pour différentes concentrations imposées sur la surface externe du tube. Concernant l'étude numérique, l'absorbeur est horizontal, le flux de chaleur uniforme, avec un écoulement en régime laminaire pour effectuer le principe de la convection mixte. Nous avons observé, la présence de deux rouleaux transversaux contrarotatifs d'un écoulement secondaire hydrodynamique. Pour l'évolution thermique, la variation moyenne de la température augmente linéairement, après la zone de développement, suivant l'axe d'écoulement z , et en forme de courbe gaussienne suivant θ , avec la validation des résultats expérimentaux d'Abid et al.

D'autre part, les résultats obtenus indiquent la différence entre l'échange thermique entre les deux fluides caloporteurs exprimant l'importance de la chaleur spécifique de l'huile par rapport à l'eau, ainsi que les caractéristiques physiques de l'absorbeur et le débit d'écoulement induit.

Il ressort donc que, la production d'eau chaude et le transfert thermique dépendent, évidemment de l'énergie solaire incidente, la concentration du rayonnement solaire imposé, le choix du fluide caloporteur, le type de matériaux, le diamètre du tube absorbeur, la courbe parabolique, la vitesse d'écoulement, ainsi que les pertes thermiques convectives et radiatives.

Références bibliographiques

- [1] Marif Y. Numerical simulation of solar parabolic trough collector performance in the Algeria Saharan region. *Energy Conversion and Management* 2014; 85: 521–529.
- [2] Wang Y. A three-dimensional simulation of a parabolic trough solar collector system using molten salt as heat transfer fluid. *Applied Thermal Engineering* 2014; 70: 462–476.
- [3] Wirz M. Roesle M. Steinfeld A. Three-Dimensional Optical and Thermal Numerical Model of Solar Tubular Receivers in Parabolic Trough Concentrators. *Journal of Solar Energy Engineering* 2012; 134(4): 1–9.
- [4] Yılmaz I.H. Söylemez M.S. Thermo-mathematical modeling of parabolic trough collector. *Energy Conversion and Management* 2014; 88: 768–784.

- [5] Cheng Z.D. He Y.L. Xiao J. Tao Y.B. Xu R.J. Three-dimensional numerical study of heat transfer characteristics in the receiver tube of parabolic trough solar collector. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 2010; 37(7): 782–787.
- [6] Cheng Z.D. He Y.L. Cui F.Q. Xu R.J. Tao Y.B. Numerical simulation of a parabolic trough solar collector with nonuniform solar flux conditions by coupling FVM and MCRT method. *Solar Energy* 2012; 86: 1770–1784.
- [7] Tzivanidis C. Bellos E. Korres D. Antonopoulos K.A. Mitsopoulos G. Thermal and optical efficiency investigation of a parabolic trough collector. *Case Studies in Thermal Engineering* 2015; 6: 226–237.
- [8] Wu Z. Three-dimensional numerical study of heat transfer characteristics of parabolic trough receiver. *Applied Energy* 2014; 113: 902–911.
- [9] Zheng Z. Xu Y. He Y. Thermal analysis of a solar parabolic trough receiver tube with porous insert optimized by coupling genetic algorithm and CFD. *Science China Technological Science* 2016; 59 (10): 1475–1485.
- [10] Tao Y.B. He Y.L. Numerical study on coupled fluid flow and heat transfer process in parabolic trough solar collector tube. *Sol. Energy* 2010; 84: 1863–1872.
- [11] Liu Q.B. Wang Y.J. Lei J. Jin H.G. Numerical investigation of the thermophysical characteristics of the mid-and-low temperature solar receiver/reactor for hydrogen production. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2016; 97: 379-390.
- [12] Zhang L. Wang W. Yu Z. Fan L. Hu Y. Ni Y. Fan J. Cen, K. An experimental investigation of a natural circulation heat pipe system applied to a parabolic trough solar collector steam generation system. *Solar Energy* 2012; 86(3): 911–919.
- [13] Xu L. Wang Z. Li X. Yuan G. Sun F. Lei D. Li S. A comparison of three test methods for determining the thermal performance of parabolic trough solar collectors. *Solar Energy* 2014; 99: 11–27.
- [14] Lei D. Li Q. Wang Z. Li J. An experimental study of thermal characterization of parabolic trough receivers. *Energy Conversion and Management* 2013; 69: 107–115.
- [15] Razika I. Nabila I. Madani B. Zohra H.F. The effects of volumetric flow rate and inclination angle on the performance of a solar thermal collector. *Energy Conversion and Management* 2014; 78: 931–937.
- [16] Lupfert E. Riffelmann K.J. Experimental analysis of overall thermal properties of parabolic trough receivers. *J. Sol. Energy Eng* 2008; 130: 07–11.
- [17] Burkholder F. Kutscher C. Heat-Loss Testing of Schott's 2008 PTR70 Parabolic Trough Receiver. Technical Report NREL/TP-550-45633, 2009; Colorado-U.S.

- [18] Kasaeian A. Daviran S. Azarian R.D. Rashidi, A. Performance evaluation and nanofluid using capability study of a solar parabolic trough collector. *Energy Convers. Ma.Snag* 2015; 89: 368-375.
- [19] Abid C. Papini F. Ropke A. Veyret D. Etude de la convection mixte dans un conduit cylindrique. Approches analytique/numérique et détermination expérimental de la température de paroi par thermographie infrarouge. *Int. J. Heat Mass Transfer* 1994; 37(1):.91-101. 1994.
- [20] John A. Duffie. William A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal processes*, 2nd Edition, John Wiley & sons inc, New York, 916 pages, 1991.
- [21] Chasseriau, J.M. *Conversion thermique du rayonnement solaire*, Dunod, France, 273 pages, 1984.
- [22] Chekirou W. Boukheit N. Kerbache T. Analyse thermique pour l'absorbeur d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique, 12^{ème} journées internationales de thermique 2005, Maroc.
- [23] Li M. Wang L.L. Investigation of evacuated tube heated by solar trough concentrating system. *Energy conversion & Management* 2006; 47(20): 3591–3601.
- [24] Capderou M. *Atlas solaire d'Algérie*, Tome 1, Volume 1, EPAU, Algérie, 375 pages, 1987.
- [25] http://fr.wikipedia.org/wiki/Fluide_caloporteur,2010
- [26] Gama A. Mémoire de Magister, Ecole nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen. Badi, El-Harrach, 2006-2007.
- [27] Recknagel et al. *Manuel pratique du génie climatique*, PYC Edition, France, 760 pages, Janvier 1995.
- [28] <http://www.iutlannion.fr/LEMEN/MPDOC/NTPF2/SERIE1/therrath.htm.2007.>
- [29] Asch G. *Les capteurs en instrumentation industrielle*, Dunod, France, 852 pages, 1982.
- [30] Boufendi T. Afrid M. Three-Dimensional conjugate conduction-mixed convection with variable fluid properties in a heated horizontal pipe. *Rev. Energ. Ren* 2005; 8: 1-18.

CHAPITRE III

RÉALISATION D'UNE STATION DE MESURES, EN UTILISANT LA CARTE RASPBERRY PI3, POUR DEUX POSITIONS : INCLINÉE ET HORIZONTALE DE L'ABSORBEUR

III.1. Introduction

Le Sahara Algérien est exposé au plein d'ensoleillement pendant toute l'année. Le climat est caractérisé par l'aridité et la chaleur, le long des mois d'été, et il devient plus chaud et plus sec, progressivement tout en allant vers le sud [1-3]. Cette caractéristique est une source énergétique renouvelable gratuite, propre et prometteuse [4].

Le système solaire à concentration linéique (concentrateur cylindro-parabolique) offre la possibilité de produire la vapeur d'eau, afin de tourner une turbine à vapeur, pour la production d'électricité, à partir de l'énergie solaire [5], ainsi que la possibilité de l'hybridation de ces installations dans les centrales thermiques à gaz, pour réduire les frais et la consommation des ressources fossiles, telle que la centrale thermique de Hassi R'Mel [6-8]. L'amélioration des systèmes de concentration solaire joue un rôle crucial dans le développement des centrales thermiques. En effet, un très grand nombre de recherches et d'études expérimentales de ce type de concentrateur ont été effectuées pour améliorer les performances thermiques et le transfert de la chaleur [9-13]. Gama et al. [14], ont réalisé un concentrateur à la ville Ghardaïa avec un système de poursuite solaire automatique. Ils ont utilisé une unité d'acquisition des données AGILENT 34972A [15], pour l'enregistrement de ces dernières. En outre, plusieurs études ont été utilisées pour cette unité d'acquisition [16-18]. Pourtant, ce type d'unité d'acquisition semble être cher, notamment pour les étudiants chercheurs.

Depuis 2012, une nouvelle carte électronique nommée "Raspberry Pi" [19], une véritable carte mère de mini-ordinateur de la taille d'une carte crédit avec un prix raisonnable. Cette carte électronique, nous permet de commander plusieurs paramètres, tels que l'enregistrement des données [20], le domaine robotique et la commande des caméras surveillance [21-23] ...etc.

Le présent travail consiste à une étude expérimentale d'un concentrateur cylindro parabolique réalisé par une station de mesures thermiques à l'aide d'une carte Raspberry Pi. Pour la description de son fonctionnement, nous avons choisi les jours où le ciel est apparu clair, avec deux positions du concentrateur, afin de valider les résultats mesurés et simulés par un logiciel de simulation Trnsys, et de présenter la fiabilité d'utilisation de la carte Raspberry Pi.

III.2. Carte Raspberry Pi

III.2.1. Présentation de la carte Raspberry Pi

La carte Raspberry Pi (Fig. III.1) est une véritable carte mère de mini-ordinateur. Elle a la taille d'une carte de crédit, et ne coûte pas trop cher (environ 30 € pour le modèle B produite en février 2012). Elle a été conçue dans le cadre de la «Fondation Raspberry» [24]. Cet outil, initialement destiné à l'initiation de la programmation informatique en Angleterre, est suffisamment ouvert pour satisfaire de nombreuses exigences en termes d'embarqué. La carte Raspberry Pi est fournie nue, c'est à dire la carte mère seule, sans clavier, ni souris, sans écran, et même, sans périphérique de stockage, ou système d'exploitation. Cette carte sera une occasion d'aborder l'architecture matérielle des ordinateurs avec les élèves.



Figure III.1. Carte Raspberry Pi [25].

III.2.2. Caractéristiques de la carte Raspberry Pi3

La carte Raspberry Pi3 Modèle B :

- produite en février 2012 ;
- processeur Broadcom BCM2837 64 bit à quatre coeurs ARM 1,2 GHz ;
- capacité 1Go de RAM;
- puce Wifi 802.11n et Bluetooth 4.1 intégrée ;
- 4 ports USB, port 10/100 Ethernet ;
- la connectivité au Raspberry Pi est facile et variée : WIFI, HDMI, Réseau... (Fig. III.2).

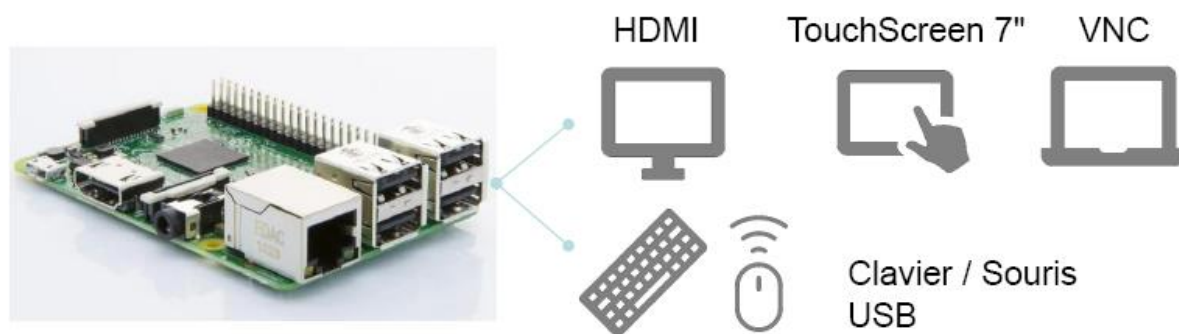


Figure III.2. Différents types de connectivité [24].

III.2.3. Préparation de la carte SD

La Raspberry Pi n'a pas de disque dur pour le stockage de la masse, mais elle a un lecteur de carte mémoire SD (Secure Digital), telles celles que nous le pouvons trouver équipant les appareils photo numériques [25].

Avant de démarrer la Raspberry Pi, il faut préparer une carte SD et y installer la totalité du système d'exploitation (ou OS pour Operating System).

La Raspberry Pi est conçue pour faire fonctionner le système d'exploitation GNU Linux. La philosophie open source de Linux a permis de porter rapidement l'OS à l'architecture matérielle de la Raspberry Pi. Il existe, à l'heure actuelle, plusieurs variantes de Linux utilisables avec le circuit de la Raspberry Pi, appelées distributions Linux (Raspbian, Arch, Pidora, ...etc.).

Par la suite, nous utiliserons une distribution Debian portée et optimisée pour Raspberry Pi nommée Raspbian.

III.2.4. Préparation de la carte sous Windows

Le premier pas est de télécharger le système d'exploitation Linux à partir du site internet suivant (<https://www.raspberrypi.org/downloads>). Donc, nous trouvons plusieurs systèmes en fichier compressé. Le système Raspbian est le système principal utilisé pour Raspberry Pi3 (Fig. III.3) [25].

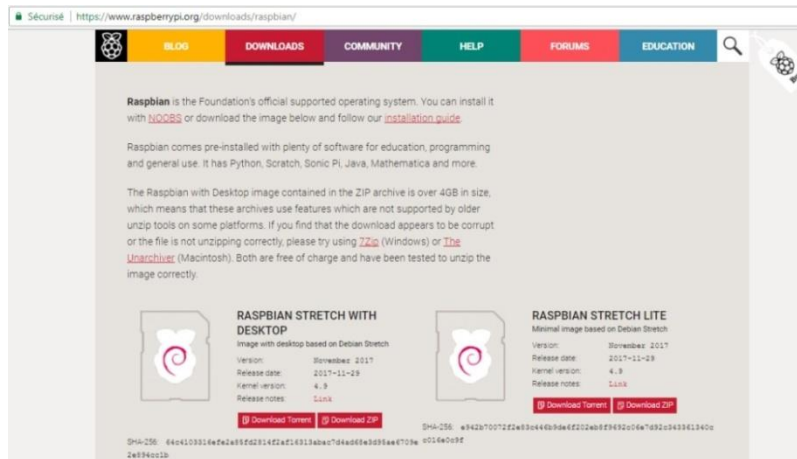


Figure III.3. Présentation du site internet pour le système Linux de Raspberry Pi3.

À la fin de téléchargement, il faut décompresser le fichier. Le système est se trouve sous le nom "wheezy-raspbian.img" (Fig. III.4).



	2013-05-25-wheezy-raspbian.img	٢٠١٣/٠٥/٢٥ م ٠٧:٥٩	Disc Image File	1,894,400 KB
	2013-05-25-wheezy-raspbian.zip	٢٠١٣/٠٥/٢٩ ص ٠٩:٠٤	Compressed (zipp...	506,312 KB

Figure III.4. Fichier d'installation.

III.2.5. Installation de Lunix sur la carte SD à partir d'un micro-ordinateur

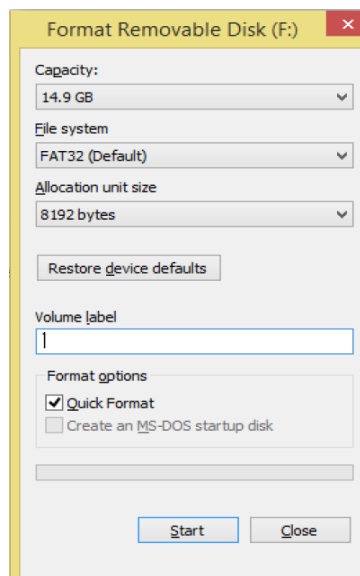


Figure III.5. Formatage de la carte SD [24].

Nous branchons la carte SD sur le micro-ordinateur. Ensuite, nous allons sélectionner le système FAT32 avec le bouton droit, puis nous le formatons, pour confirmer la carte à ce type de préparation (Fig. III.5).

Après la préparation de la carte, nous prenons l'utilitaire "Image Writer" sur Windows à partir du site internet suivant :

<https://sourceforge.net/projects/win32diskimager/files/latest/download> (Fig. III.6).

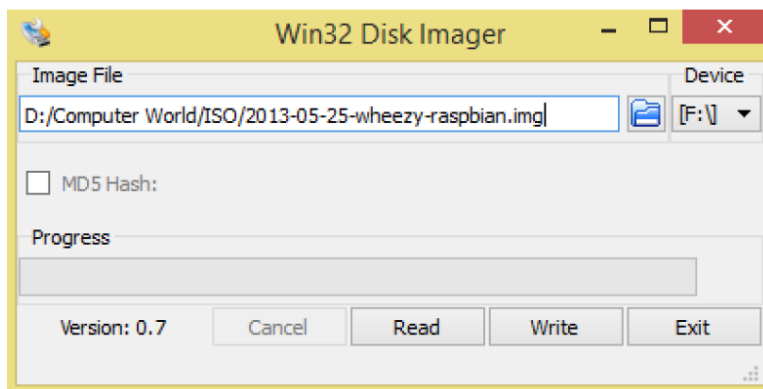


Figure III.6. Logiciel d'installation de l'image Rasbian [24].

En outre, ce logiciel est utilisé pour installer Linux. Pour cela, nous avons suivi les étapes ci-dessous :

- ouvrir le logiciel Image Writer ;
- cliquer sur Device et choisir la carte SD ;
- sélectionner le fichier Rasbian sur la case Image File ;
- cliquer sur Write pour démarrer l'installation de système d'exploitation Rasbian sur la carte SD.

Ce processus se déroule vite et prend un peu de temps, à cause de la rapidité de la carte SD. À la fin de l'installation, un message sera signalé "Write Successful", ce qui indique que le fichier est bien installé (Fig. III.7).

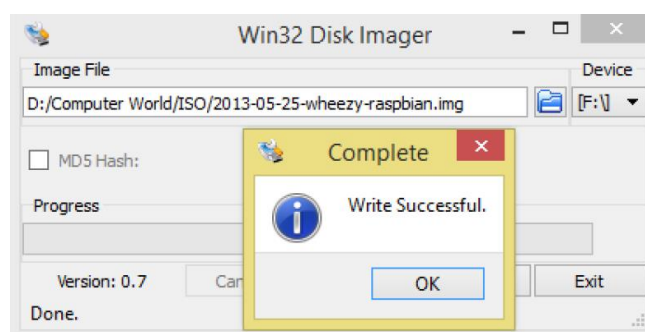


Figure III.7. Installation de l'image Rasbian est effectué [24].

III.2.6. Démarrage de Raspberry Pi

- après l'installation de Rasbian sur la carte SD, cette dernière est placée sur le Raspberry Pi, comme il est indiqué sur la figure III.8;



Figure III.8. Placement de la carte SD sur le Raspberry Pi [24].

- brancher une alimentation de courant sur le "Micro-USB", se qui transforme un voltage de 220 v pour 5 v et un courant de 200 milliampères ;
- connecter le reste des accessoires, le clavier, la souris, le câble HDMI ou le câble RCA, et le câble réseaux internet ;
- après avoir exécuté le courant électrique, le système d'exploitation Linux va démarrer (Fig. III.9).

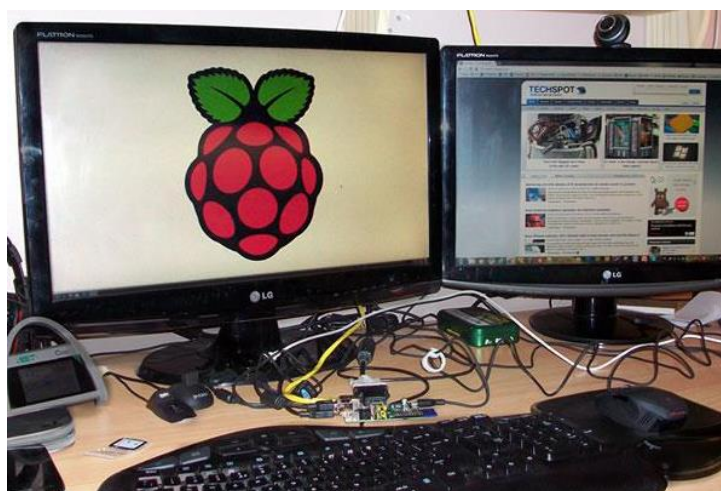


Figure III.9. Démarrage du système Linux sur la carte Raspberry Pi [24].

Une fois que la Raspberry Pi s'est alimentée, des informations de démarrage défilent sur l'écran, et quand tout est « [OK] », un login est demandé. Ce dernier est par défaut « pi » : `login : pi`.

Le mot de passe est donc « raspberry », mais si vous utilisez un clavier « azerty », il faut saisir « rqsberry ». Dans le cas d'un clavier « azerty », il faut en informer le système en entrant dans un utilitaire de configuration avec la commande : `sudo raspi-config` (Fig. III.10).

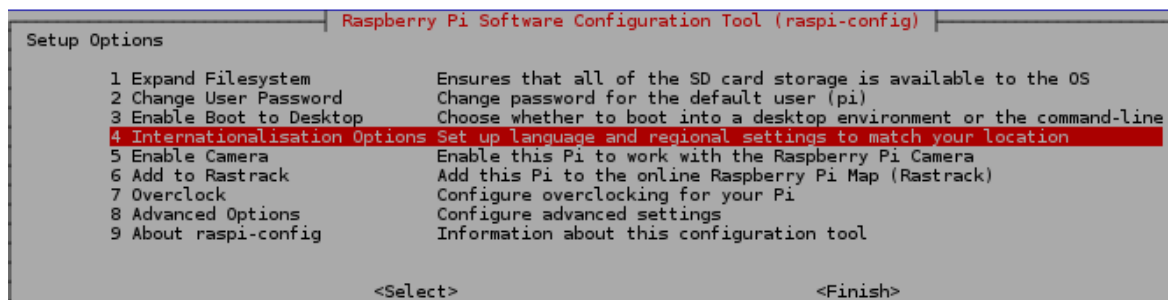


Figure III.10. Configuration du système [24].

Les informations locales sont à renseigner dans le menu numéro 4. Il faudra se rendre ensuite dans les sous-menus I1, I2 et I3 (Fig. III.11).

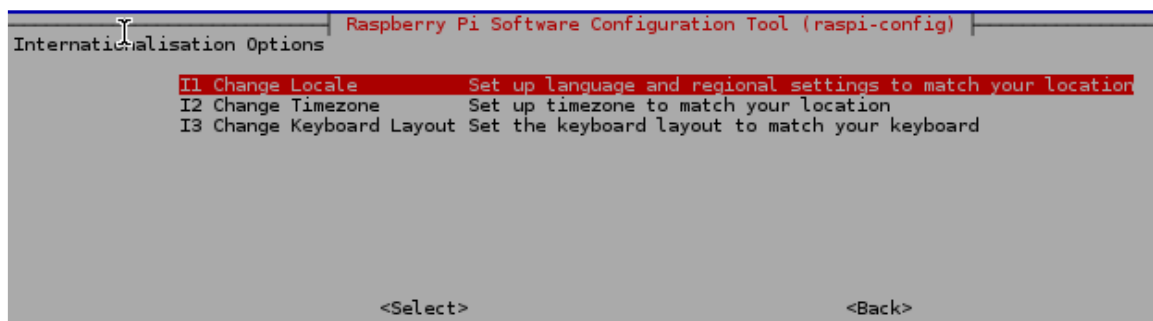


Figure III.11. Configuration du système [24].

Par défaut nous allons choisir la configuration `fr-FR. UTF-8 UTF-8`. Et pour prendre en compte les informations, il est recommandé de redémarrer le système avec la commande : `sudo reboot`.

III.2.7. Découverte des caractéristiques principales

Dorénavant, la Raspberry Pi est un mini-ordinateur opérationnel, dont nous pouvons étudier les caractéristiques principales, à l'aide de quelques commandes à base Unix.

Dans le cadre d'activités de découverte, nous pouvons donner un lien vers l'aide de la commande en ligne Unix : `vcgencmd`. Par exemple, c'est pour mesurer la fréquence du

processeur Broadcom BCM2835 (architecture ARM) : `vcgencmd measure_clock arm`, qui donne la fréquence d'environ 700.000.000 Hz, soit 700 MHz qui est la fréquence par défaut (possibilité d'overclocking) à l'achat de la Raspberry Pi (Fig. III.12).

```
pi@raspberrypi ~ $ vcgencmd measure_clock arm
frequency (45) = 700074000
```

Figure III.12. Fréquence du processeur Broadcom BCM2835.

La mémoire vive est constituée d'une puce Samsung visible à la surface de la carte. L'instruction «4 G» représente la capacité de la mémoire vive en GigaBits (Fig. III.13). Soit, 4 GigaBits = 512 Mo pour la Raspberry modèle B.



Figure III.13. Capacité de la mémoire vive.

Le processeur de la carte est accompagné d'un processeur graphique (ou GPU pour Graphics Processing Unit) afin d'accélérer l'ouverture des tâches graphiques (et celui de la Raspberry Pi est, même plutôt performant pour accélérer le décodage des vidéos en full HD). Une partie des 512 Mo de mémoire vive est spécialement dédiée au GPU (64 M d'après la figure III.14). La répartition mémoire peut être obtenue grâce aux commandes :

```
pi@raspberrypi ~ $ vcgencmd get_mem arm
arm=448M
pi@raspberrypi ~ $ vcgencmd get_mem gpu
gpu=64M
```

Figure III.14. Capacité de la mémoire vive et GPU.

Avec la commande `sudo fdisk -l` (Fig. III.15), la carte SD utilisée ici est apparue sous le nom `/dev/mmcblk0`, avec deux partitions p1 et p2 (environ 8 Go au total, ici).

```
pi@raspberrypi ~ $ sudo fdisk -l
Disk /dev/mmcblk0: 7969 MB, 7969177600 bytes
4 heads, 16 sectors/track, 243200 cylinders, total 15564800 sectors
Units = sectors of 1 * 512 = 512 bytes
Sector size (logical/physical): 512 bytes / 512 bytes
I/O size (minimum/optimal): 512 bytes / 512 bytes
Disk identifier: 0x000c7b31

   Device Boot      Start         End      Blocks   Id  System
/dev/mmcblk0p1            8192       122879        57344    c   W95 FAT32 (LBA)
/dev/mmcblk0p2       122880       7626751       3751936   83   Linux
pi@raspberrypi ~ $
```

Figure III.15. Affichage des partitions de la carte SD.

III.2.8. Environnement graphique

L'environnement graphique ne démarre pas de lui-même, dans la plupart des distributions Linux pour Raspberry Pi. Afin de quitter la console en mode texte, il faut saisir la commande : `startx`

L'environnement de bureau graphique LXDE (Lightweight X11 Desktop Environment) propose un dialogue simplifié avec l'utilisateur auquel sont habitués ceux qui utilisent Windows ou Mac OS X (Fig. III.16).

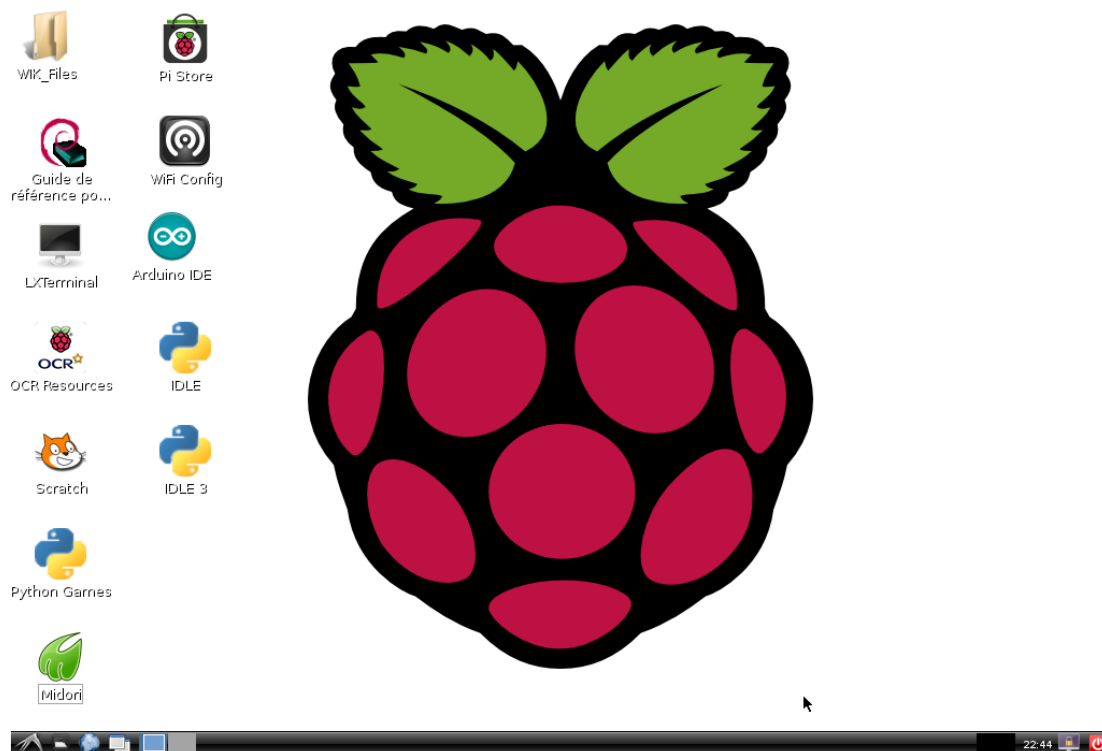


Figure III.16. Environnement du bureau graphique [24].

À gauche du bureau, nous trouvons les raccourcis IDLE et IDLE3 vers les ateliers de développement pour le langage Python (pour les versions 2.7 et 3.x, respectivement).

Nous trouvons également le raccourci vers LXTerminal, qui ouvre un terminal permettant d'émettre des commandes Linux dans une fenêtre en mode texte, sans quitter l'interface graphique (Fig. III.17).

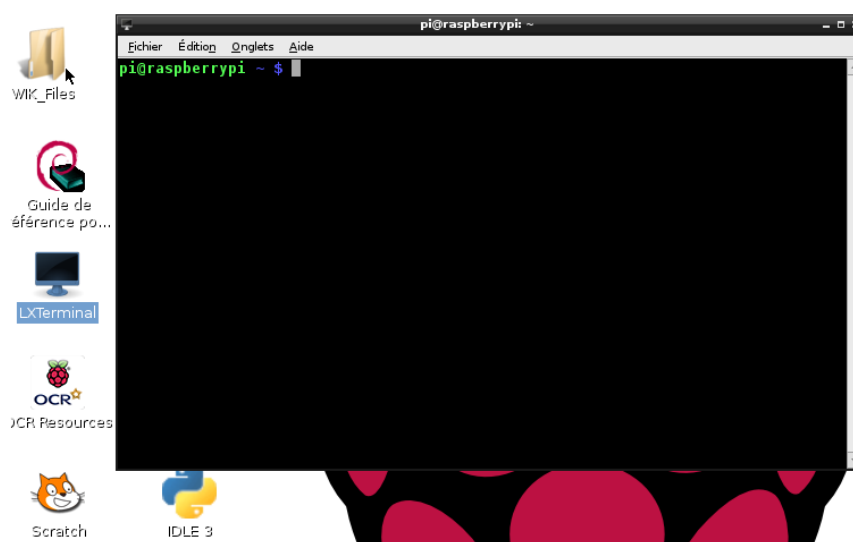


Figure III.17. Raccourci LXTerminal [24].

III.2.9. Système des fichiers

Les données sont structurées d'une façon logique, grâce à une arborescence de répertoires. Dans un terminal (icône LXTerminal), nous pouvons découvrir, en partie, cette arborescence avec un jeu d'instructions :

cd	(Change Directory)	permet de naviguer d'un répertoire à un autre dans le système de fichiers
ls	(LiSting)	affiche le contenu du répertoire courant
mkdir	/	créer un nouveau répertoire
rmdir	(Remove)	supprimer un répertoire une fois qu'il a été vidé de ses fichiers avec la commande rm (Remove)

Tableau III.1. Instructions des commandes [24].

Le répertoire par défaut à l'ouverture du terminal est `/home/pi` (signalé par le `~` dans le prompt). Un exemple de séquence commentée :

cd /	Aller dans le répertoire racine.
man ls	man pour manuel, aide pour la commande ls. Un bon réflexe pour obtenir de l'aide.
ls	Lister le contenu du répertoire.
ls -l	Avec l'option -l.
cd home	Chaque compte d'utilisateur possède un sous-répertoire dans ce répertoire pour y stocker ses données personnelles.
cd pi	Compte utilisateur pi par défaut.
mkdir MonRepertoire	Créer un répertoire nommé mon Répertoire dans le répertoire courant.
cd MonRepertoire	Aller dans le répertoire MonRepertoire.
ls -l	Lister le contenu du répertoire (vide pour l'instant).

Tableau III.2. Exemples de séquences commentées [24].

Grâce à l'environnement de développement Python IDLE, nous pouvons créer un premier programme HelloWorld.py sauvegardé dans mon Répertoire (Fig. III.18):

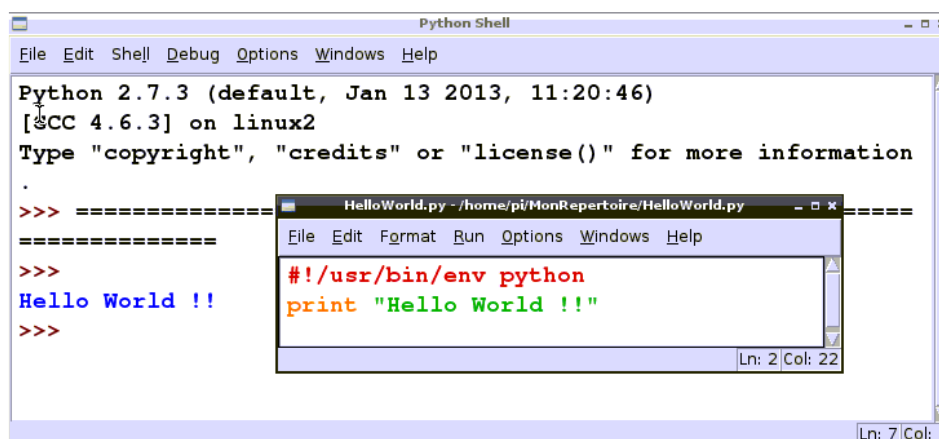


Figure III.18. Programmation sur python [24].

Dans un terminal, nous lançons l'exécution du programme avec la commande : `python HelloWorld.py` (Fig. III.19).

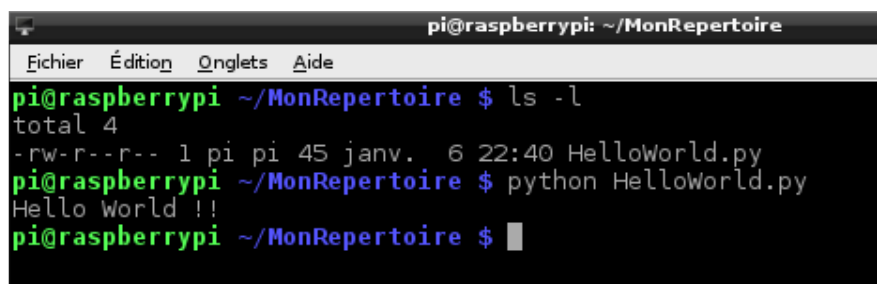


Figure III.19. Exécution du programme python.

Pour rendre le fichier HelloWorld.py exécutable, nous utilisons la commande `chmod` avec l'option `+x` de la façon suivante : `chmod +x HelloWorld.py` (Fig. III.20).



```
pi@raspberrypi: ~/MonRepertoire
Fichier  Édition  Onglets  Aide
pi@raspberrypi ~/MonRepertoire $ ls -l
total 4
-rw-r--r-- 1 pi pi 45 janv.  6 22:40 HelloWorld.py
pi@raspberrypi ~/MonRepertoire $ chmod +x HelloWorld.py
pi@raspberrypi ~/MonRepertoire $ ls -l
total 4
-rwxr-xr-x 1 pi pi 45 janv.  6 22:40 HelloWorld.py
pi@raspberrypi ~/MonRepertoire $
```

Figure III.20. Exécution du fichier HelloWorld.py.

Nous pouvons maintenant lancer l'exécution sans invoquer le programme Python grâce à la commande : `./HelloWorld.py` (Fig. III.21).



```
pi@raspberrypi: ~/MonRepertoire
Fichier  Édition  Onglets  Aide
pi@raspberrypi ~/MonRepertoire $ ls -l
total 4
-rwxr-xr-x 1 pi pi 45 janv.  6 22:40 HelloWorld.py
pi@raspberrypi ~/MonRepertoire $ ./HelloWorld.py
Hello World !!
pi@raspberrypi ~/MonRepertoire $
```

Figure III.21. Exécution sans invoquer de Python.

III.2.10. Connexion de Raspberry Pi avec le réseau

Pour connecter la Raspberry Pi au réseau (Fig. III.22), nous profitons du fait, que le réseau où sont connectés les ordinateurs de la classe, profite d'un service DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol) dont la fonction est de distribuer des adresses IP aux hôtes connectés. Le client DHCP est activé par défaut, sur la distribution Linux proposée et installée sur la carte SD, de sorte que vous n'avez plus qu'à connecter votre Raspberry Pi à une prise Ethernet murale disponible de la salle (ou via un switch).

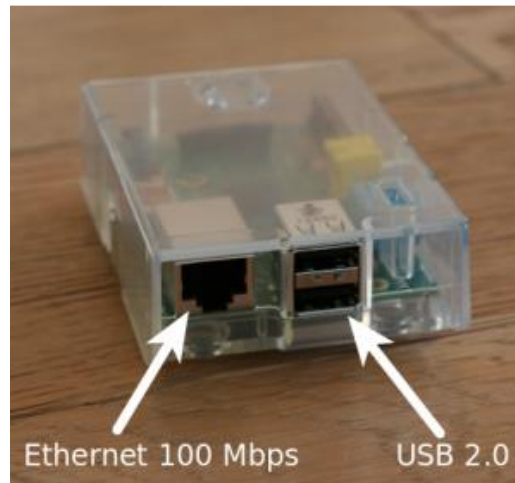


Figure III.22. Branchement du câble réseau [24].

Sur la copie d'écran ci-dessus, le navigateur Midori est ouvert. La Raspberry Pi est connectée au réseau Internet (Fig. III.23).

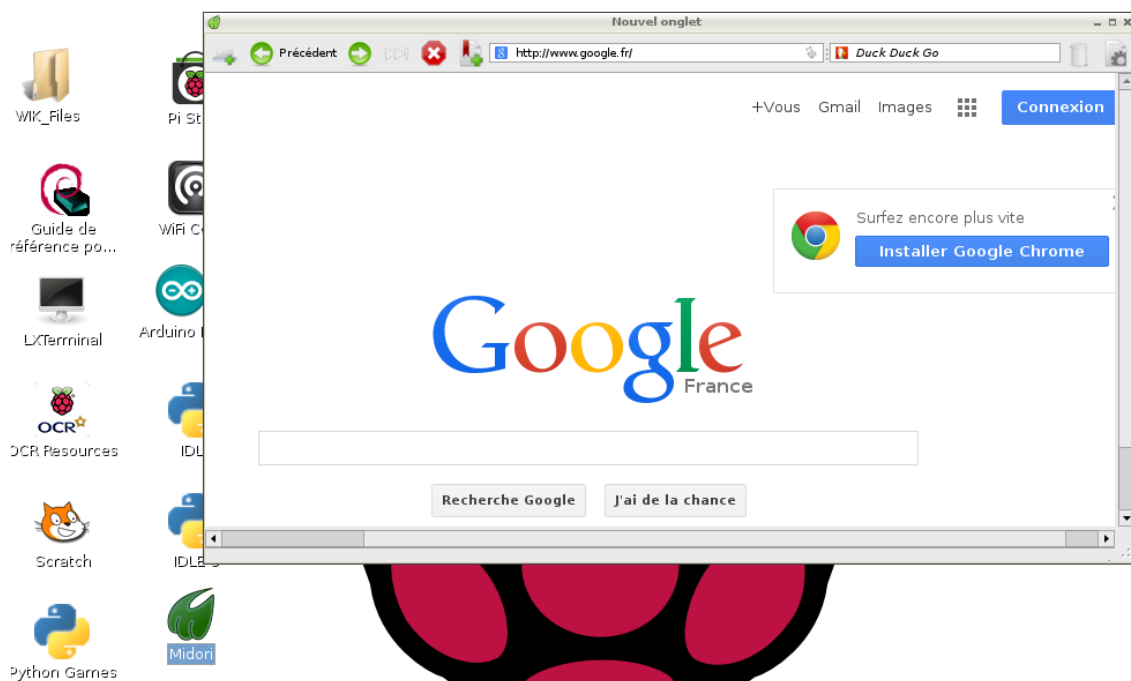
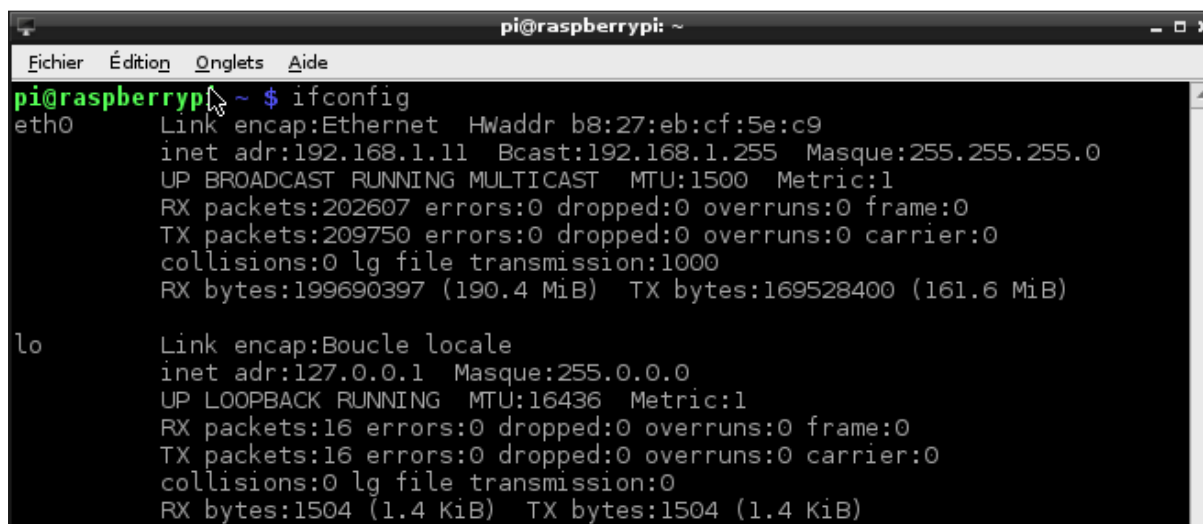


Figure III.23. Raspberry Pi connecté au réseau [24].

Pour voir la configuration réseau, il suffit de saisir la commande `ifconfig` dans un Terminal (Fig. III.24):



```
pi@raspberrypi: ~ $ ifconfig
eth0      Link encap:Ethernet  Hwaddr b8:27:eb:cf:5e:c9
          inet adr:192.168.1.11  Bcast:192.168.1.255  Masque:255.255.255.0
          UP BROADCAST RUNNING MULTICAST  MTU:1500  Metric:1
          RX packets:202607 errors:0 dropped:0 overruns:0 frame:0
          TX packets:209750 errors:0 dropped:0 overruns:0 carrier:0
          collisions:0 lg file transmission:1000
          RX bytes:199690397 (190.4 MiB)  TX bytes:169528400 (161.6 MiB)

lo        Link encap:Boucle locale
          inet adr:127.0.0.1  Masque:255.0.0.0
          UP LOOPBACK RUNNING  MTU:16436  Metric:1
          RX packets:16 errors:0 dropped:0 overruns:0 frame:0
          TX packets:16 errors:0 dropped:0 overruns:0 carrier:0
          collisions:0 lg file transmission:0
          RX bytes:1504 (1.4 KiB)  TX bytes:1504 (1.4 KiB)
```

Figure III.24. Terminal indiquant la connectivité de Raspberry Pi au réseau.

L'adresse IP, est l'adresse de diffusion (broadcast) et le masque affecté sont affichés (interface eth0).

Même, si ce n'est pas utile pour les premières activités, vous pouvez profiter de la connexion Internet, pour mettre à jour les logiciels installés grâce au gestionnaire de paquetages installé dès le départ sur la distribution Linux. Un paquetage sous linux est le regroupement d'un logiciel principal avec tous ses fichiers et ses bibliothèques pour fonctionner. L'outil apt disponible en ligne de commande dans un terminal, assure la gestion et le suivi de tous les logiciels installés, des bibliothèques et des dépendances entre applications et/ou bibliothèques.

La mise à jour complète du système s'effectue en deux temps :

`sudo apt-get update`, pour actualiser le cache du logiciel apt.

`sudo apt-get upgrade`, pour mettre à jour toute la distribution.

III.2.11. Connexion à la Raspberry Pi sur un poste distant

À partir du moment où l'adresse IP de la Raspberry Pi est connue, nous pouvons s'y connecter à partir d'un autre poste informatique du réseau pour y effectuer certaines opérations à distance (Fig. III.25), voire en prendre le contrôle comme si vous travailliez sur la Raspberry Pi. L'écran, le clavier et la souris reliés à la carte embarquée ne sont, alors plus utiles.

Il faut faire attention avec le DHCP, celle-ci est attribuée pour un temps limité et peut changer d'une session à l'autre ; ce qui oblige, dans ce cas, à brancher au moins un écran à chaque démarrage pour visualiser l'IP attribuée. Il existe bien sûr des alternatives :

- attribuer une IP fixe, à voir avec les services informatiques du lycée. Il vous faudra pour cela modifier le fichier de configuration `/etc/network/interfaces` (voir par exemple, Attribution d'un IP fixe) ;
- sinon, nous pouvons utiliser un logiciel qui scanne une plage d'adresse IP, tel Advanced IP Scanner, mais la recherche peut prendre du temps.

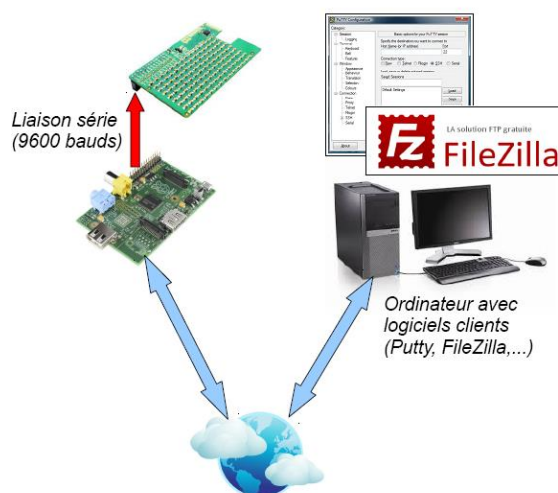


Figure III.25. Connexion à la Raspberry Pi sur un poste distant [24].

Sur un poste distant sous Windows, une simple commande `ping` tapée dans une console d'exécution permet de vérifier que la connexion est bien établie (Fig. III.26).

```
C:\Windows\system32\cmd.exe
C:\Users>ping 192.168.1.14
Envoi d'une requête 'Ping' 192.168.1.14 avec 32 octets de données :
Réponse de 192.168.1.14 : octets=32 temps=691 ms TTL=64
Réponse de 192.168.1.14 : octets=32 temps=199 ms TTL=64
Réponse de 192.168.1.14 : octets=32 temps=122 ms TTL=64
Réponse de 192.168.1.14 : octets=32 temps=45 ms TTL=64
Statistiques Ping pour 192.168.1.14:
    Paquets : envoyés = 4, reçus = 4, perdus = 0 (perte 0%),
    Durée approximative des boucles en millisecondes :
        Minimum = 45ms, Maximum = 691ms, Moyenne = 264ms
C:\Users>
```

Figure III.26. Connexion bien établie [24].

III.2.12. Putty

Putty (<http://www.putty.org/>) est un logiciel Windows qui permet de prendre le contrôle à distance du Raspberry Pi, en utilisant le protocole SSH (Secure Shell). Si vous

utilisez la distribution Linux proposée avec la Pi-Lite, un client SSH est activé par défaut (voir dans l'utilitaire rasi-config). Le dialogue s'effectue uniquement dans une console en mode texte. Il se présente sous la forme d'un simple fichier exécutable (putty.exe) (Fig. III.27).

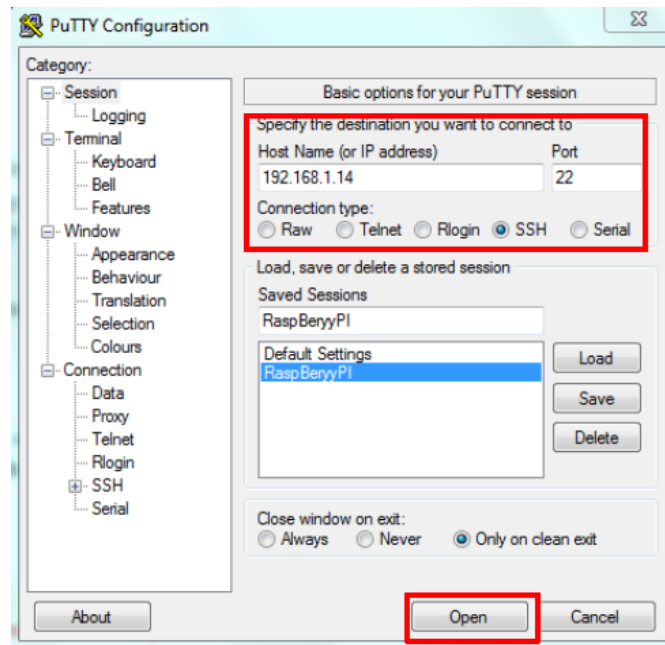


Figure III.27. Logiciel de contrôle à distance [24].

Cet outil, peut être intéressant pour exécuter des commandes Linux, exécuter des programmes Python, gérer des fichiers...etc (Fig. III.28). Mais, il ne permet pas une prise de contrôle avec l'environnement de bureau LXDE en mode graphique.

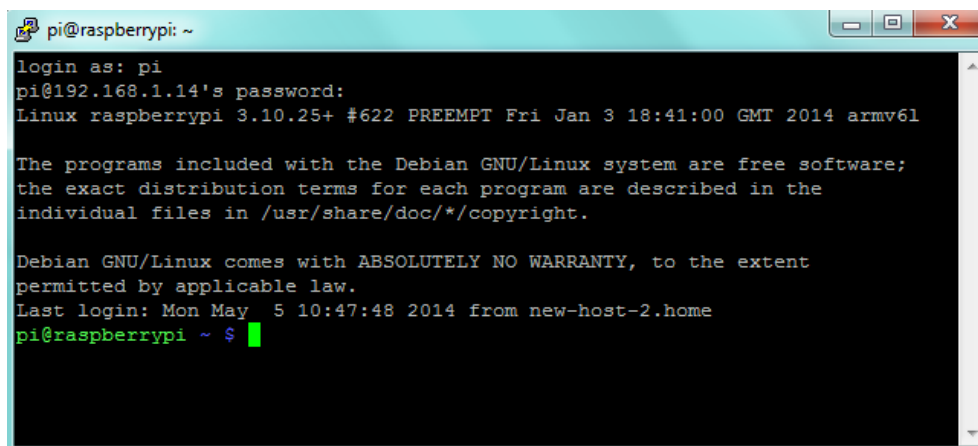


Figure III.28. Espace d'exécution les commandes de Linux [24].

III.2.13. FileZilla

FileZilla est un client FTP (File Transfer Protocol) libre qui permet de télécharger des fichiers sur un serveur. Il propose une interface graphique à la façon d'un gestionnaire de fichiers, et prend en charge le protocole SSH (Fig. III.29).

Le site officiel : <https://filezilla-project.org/>, suivre les indications après avoir cliqué sur le lien « Download FileZilla Client ».

Prendre un rendez-vous dans le « Gestionnaire de Sites » pour créer la connexion :

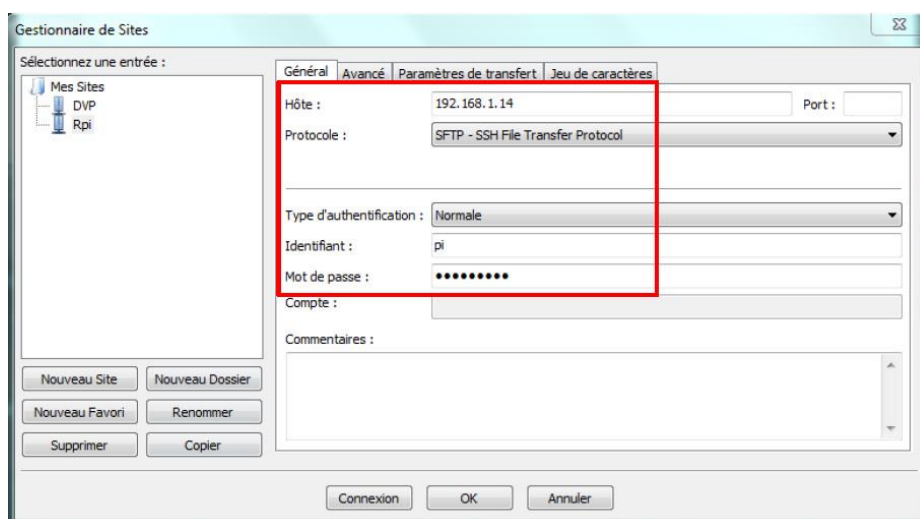


Figure III.29. Étapes de connexion FileZilla entre le PC et le Raspberry Pi [24].

Une fois connecté à la Raspberry Pi, vous pouvez y déposer vos fichiers, par simple glissement de souris (Fig. III.30).

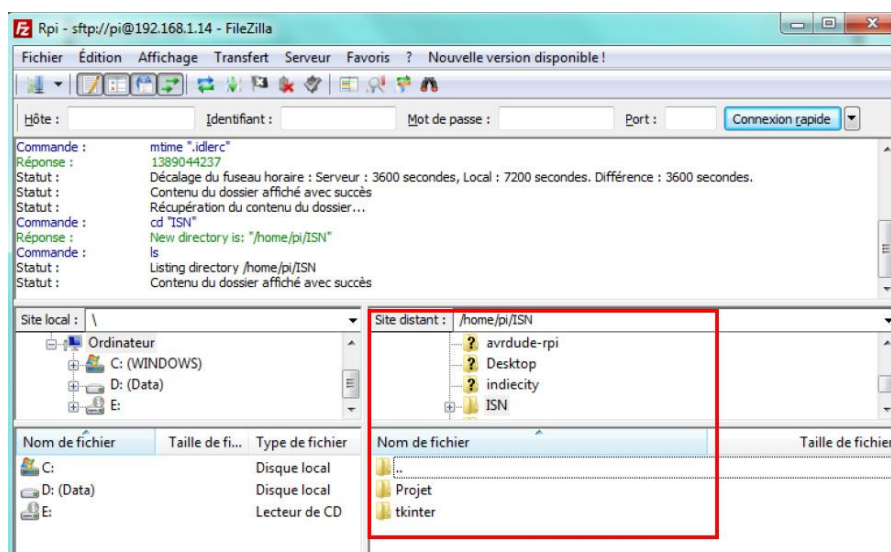


Figure III.30. FileZilla connecté au Raspberry Pi [24].

Sur un PC distant, l'étudiant peut préparer et mettre au point son programme Python avant de le transférer sur la Raspberry grâce à FileZilla. Il peut ensuite lancer son exécution dans une console Putty.

Avec quelques précautions, il est possible d'ouvrir plusieurs sessions avec Putty et donc, faire travailler plusieurs étudiants à distance, sur une même carte Raspberry Pi.

III.3. Réalisation d'une station de mesures, en utilisant la carte Raspberry Pi3, pour deux positions, inclinée et horizontale, de l'absorbeur

Dans ce travail, nous avons proposé, une station de mesures installée à la région de Ghardaïa-Algérie. En utilisant une carte Raspberry Pi3 avec un concentrateur cylindro-parabolique, où nous avons mesuré le comportement thermique de ce prototype, avec deux positions de l'absorbeur vis-à-vis des rayonnements solaires, tout en réduisant les pertes thermiques optiques, afin de voir la fiabilité et la variation des températures avec cette station de mesures.

Face à ce constat, ce travail s'intéresse à faciliter la réalisation des projets de recherche par l'utilisation de la carte Raspberry Pi3, ainsi que la commande des données par wifi et leurs transferts de la carte vers le micro-ordinateur, pour leurs traitements. En outre, il permet de minimiser le coût et le câblage des stations de mesures thermiques.

III.3.1. Caractéristiques du concentrateur réalisé

Paramètres du concentrateur	
F [m]	0,20
D _o [m]	0,022
D _{in} [m]	0,020
L [m]	1
C [...]	34,74
A _o [m ²]	1,2

Tableau III.3. Caractéristiques du prototype.

III.3.2. Principe de fonctionnement

Même principe de fonctionnement indiqué dans le deuxième chapitre (II.8), sauf que le fluide caloporteur utilisé est de l'eau (Fig. III.31).



Figure III.31. Photo du concentrateur réalisé.

Cinq thermocouples de type K sont branchés à un transformateur MAX6675 [27] qui transforme le signal des thermocouples vers la carte Raspberry Pi3, pour mesurer chaque 10 secondes les températures d'entrée T_e , de sortie T_s et surface du tube absorbeur T_{sur} , de l'eau dans la cuve T_{eau} ainsi que la température ambiante T_{amb} , (Fig. III.32).

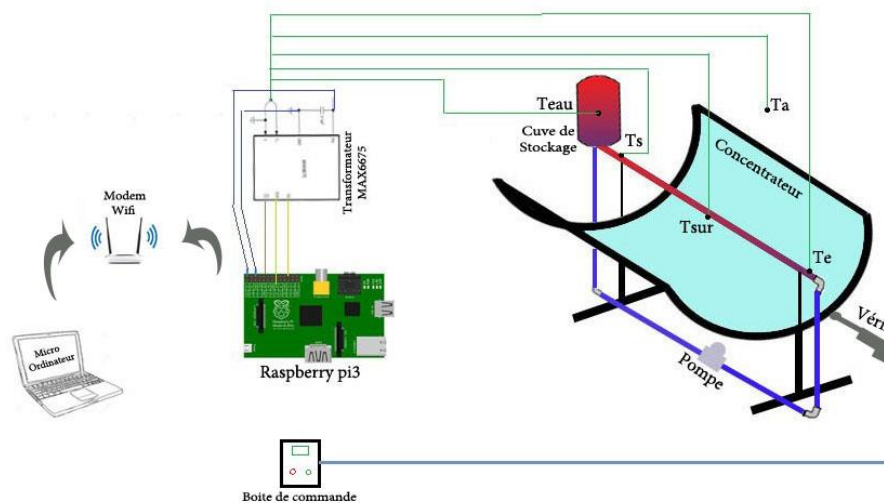


Figure III.32. Principe de fonctionnement et d'enregistrement des données.

Nous avons élaboré un programme de calcul en Python. Le programme commence par la lecture des entrées et des sorties de cette carte électronique, ainsi que la lecture de composants de transformateur MAX6675 de chaque thermocouple, le langage Python est installé sur Linux, qui est le soft de ce mini-ordinateur Raspberry Pi3, après le lancement du programme, à partir de 06^h :00 du matin jusqu'à 22^h :00. Le code mesure chaque 10 s et enregistre les valeurs des températures dans un fichier Excel.

Nous avons fabriqué une armoire en bois pour envelopper et protéger la carte Raspberry Pi3 (Fig. III.33). Le refroidissement est fourni à l'aide d'un système de ventilation composé de trois ventilateurs installés en bas, pour éviter le réchauffement du processeur et de faciliter leur fonctionnement.

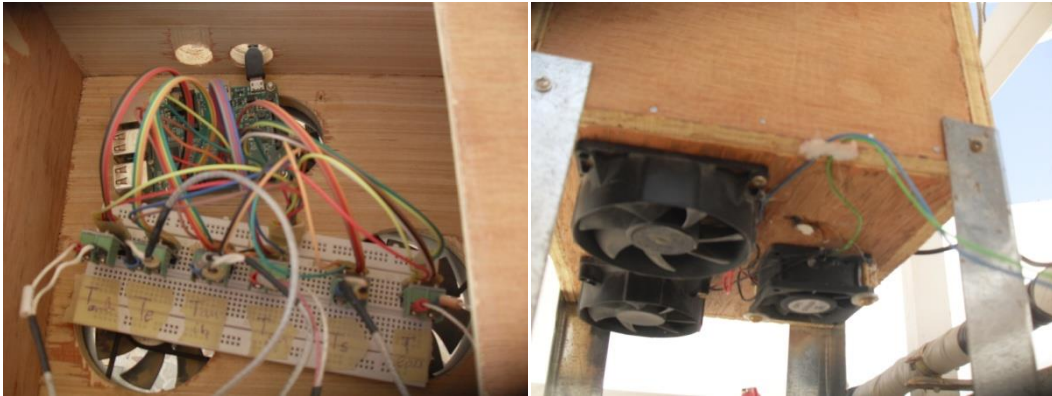


Figure III.33. Raspberry Pi3 muni d'une armoire de protection.

III.3.3. Simulation par TRNSYS

Afin de valider nos résultats expérimentaux, nous avons utilisé le logiciel de simulation TRNSYS 16 [28], qui est un logiciel puissant, complet et extensible, dédié à la simulation thermique et dynamique des systèmes énergétiques. Les dernières versions permettent de simuler de nombreux types d'installations solaires (photovoltaïque, thermique, ...etc). La figure III.34 illustre le schéma de la simulation réalisée :

Weather : Le rayonnement solaire du site de Ghardaïa (altitude = 450 m, longitude = 3,42° et latitude = 32,23°) ;

Type 536 : Le concentrateur cylindro-parabolique, avec (une concentration $C = 34,74$, une ouverture de captation $A_0 = 1,2 \text{ m}^2$ et un absorbeur de diamètre extérieur $D_o = 0,022 \text{ m}$) ;

Tank : Une cuve de stockage d'une capacité de 5 litres d'eau ;

Pump : La pompe de circulation de l'eau pour un débit de 0.027 kg/s ;

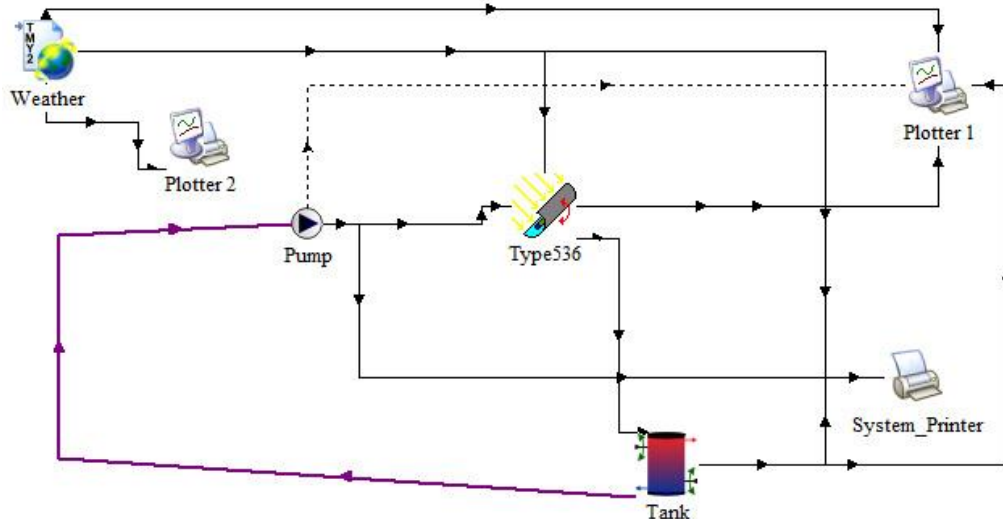


Figure III.34. Schéma d'installation simplifié par TRNSYS.

Plotter 1 et 2 : Objets pour l'affichage graphique ;

System_Printer : L'enregistrement des fichiers Data ;

Après avoir lié les composants de l'installation entre eux (dans un circuit fermé), il suffit de cliquer deux fois sur chaque composant pour le configurer. Par exemple, pour le concentrateur, nous introduisons les données correspondantes comme la surface d'ouverture, la chaleur spécifique du fluide caloporteur, le nombre de concentrateurs...etc.

III.3.4. Résultats et discussion

Ce travail a été réalisé dans les mêmes conditions climatiques ; nous avons choisi des jours ensoleillés où le ciel est clair, pendant toute la journée. Les tests commencent à 06^h :00 du matin jusqu'à 22^h :00. À 15^h :00, la pompe de circulation est arrêtée par la fermeture des vannes d'entrées et de sorties de la cuve de stockage, afin d'assurer la conservation de la chaleur à l'intérieur de la cuve.

Les figures III.35-III.36 indiquent la comparaison de la variation des températures expérimentales et simulées, d'entrée et de sortie du tube absorbeur de notre prototype, prélevé le 05 et le 07/08/2017.

Pour les tests expérimentaux, la concentration commence à 09^h :30 au niveau de l'absorbeur jusqu'à 14^h :30, à cause de l'emplacement du concentrateur dans une terrasse d'habitation qui n'était pas bien exposée au soleil ; pour cette raison, nous remarquons un grand écart entre les résultats simulés et les mesures, entre 06^h :00 jusqu'à 09^h :30, et 14^h :30 jusqu'à 19^h :00.

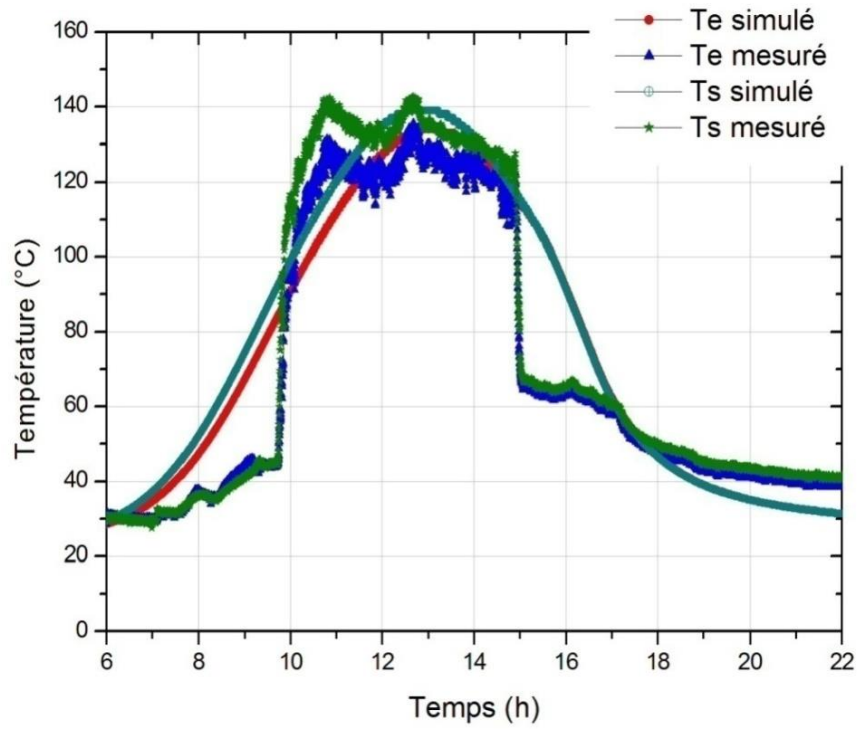


Figure III.35. Variation des températures du CCP (relevées le 05/08/2017).

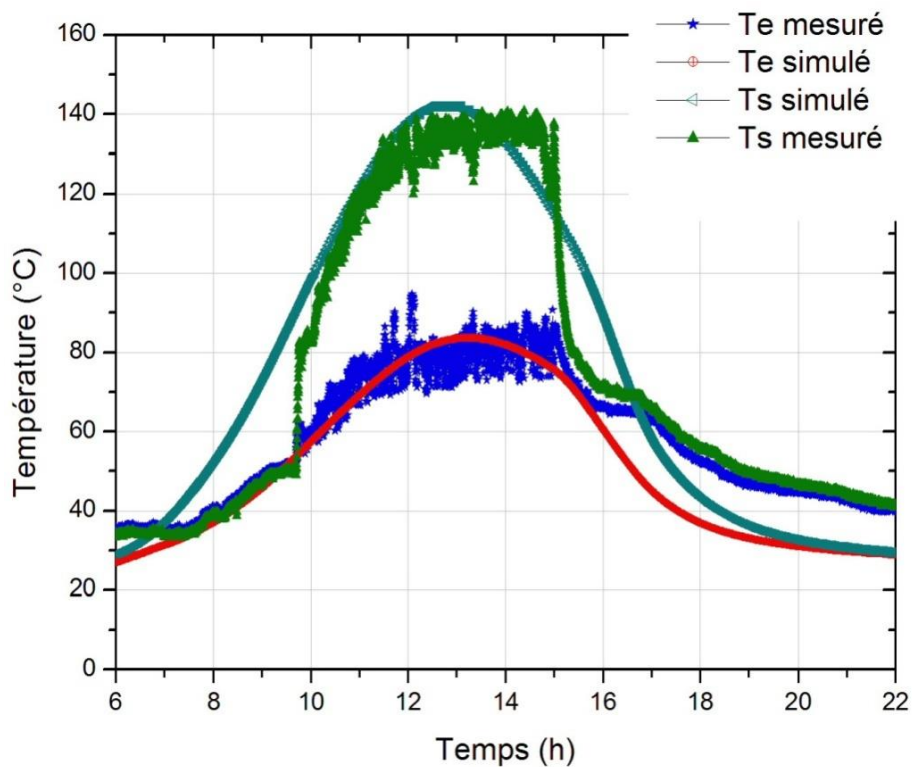


Figure III.36. Variation des températures du CCP (relevées le 07/08/2017).

Nous remarquons ici que l'écart des températures entre l'entrée et la sortie (ΔT) du 07/08/2017 est plus important que le 05/08/2017, ce qui indique l'importance de l'inclinaison du concentrateur, et l'élimination de l'effet de cosinus.

Les mesures expérimentales augmentent rapidement au début de concentration à 09^h :30 jusqu'à 10^h :00 ; ce qui désigne l'importance de l'échange thermique dans cette période, et la stabilisation thermique entre 10^h :00 jusqu'à 15^h :00, la fin de la concentration.

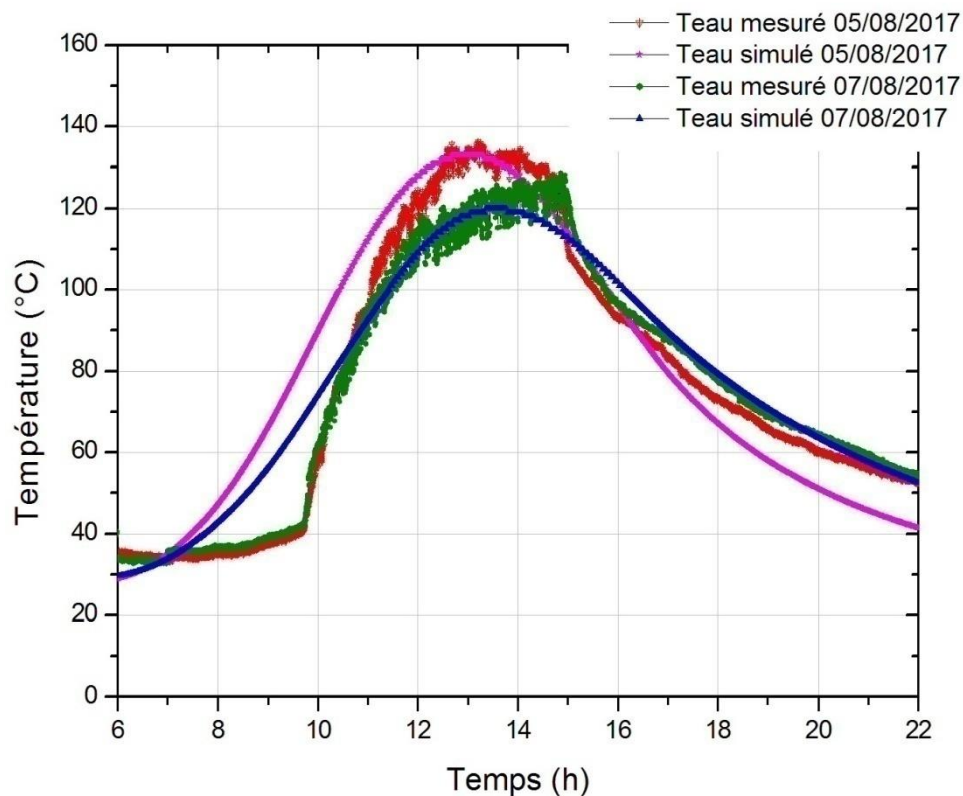


Figure III.37. Comparaison des températures d'eau mesurées et simulées pour les deux journées.

La figure III.37, indique la comparaison d'évolution de la température de l'eau, mesurée et simulée pour les deux journées 05 et 07/08/2017. Les résultats expérimentaux des températures de l'eau dans la cuve, augmentent lentement au début du test, par rapport aux autres températures, puis elles baissent, doucement après la fermeture des vannes de la cuve, jusqu'à atteindre 50°C à 22^h :00 ; ceci est dû à la quantité de l'eau dans la cuve de stockage. Cette variation implique un ajustement entre les valeurs mesurées et simulées.

La figure III.38, représente la comparaison entre le rendement instantané du concentrateur, simulé et mesuré des journées 05 et 07/08/2017. Cette courbe indique une bonne validation entre les valeurs mesurées et simulées par le code de calcul TRNSYS.

La différence entre les deux journées est due au rendement optique, obtenu au cas où le concentrateur est inclinée $\eta_o = 0,59$, ou bien s'il est horizontal $\eta_o = 0,48$, ce qui indique l'importance de l'élimination de l'effet cosinus, ainsi qu'il faut permettre aux rayonnements solaires d'être perpendiculaires sur la surface d'ouverture du concentrateur.

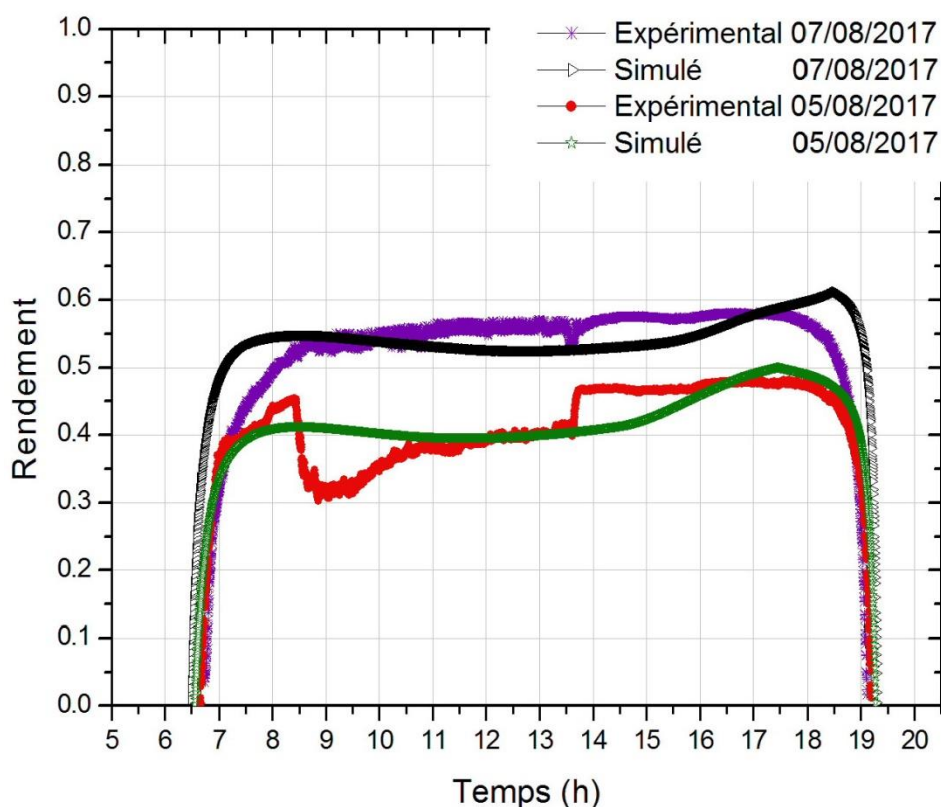


Figure III.38. Comparaison des performances thermiques expérimentales et simulées pour les deux journées 05 et 07/08/2017.

Les deux dernières figures III.39-III.40 montrent la variation des températures de la surface externe de tube absorbeur et la température ambiante ; en ce qui concerne la température T_{sur} , nous constatons des grandes fluctuations entre 09^h :30 et 14^h :30, par apport aux autres températures à des petites fluctuations ; ceci est dû à la poursuite solaire ; ce qui indique la précision des mesures de la carte Raspberry Pi3 et leur bon fonctionnement.

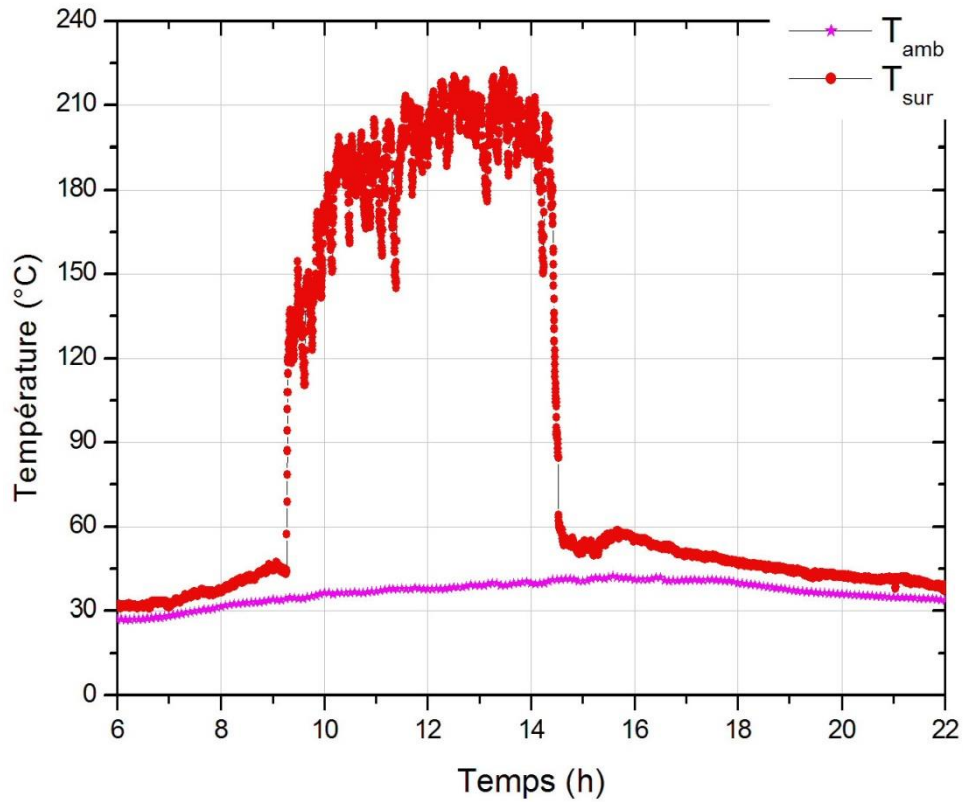


Figure III.39. Températures T_{sur} et T_{amb} pour la journée 05/08/2017.

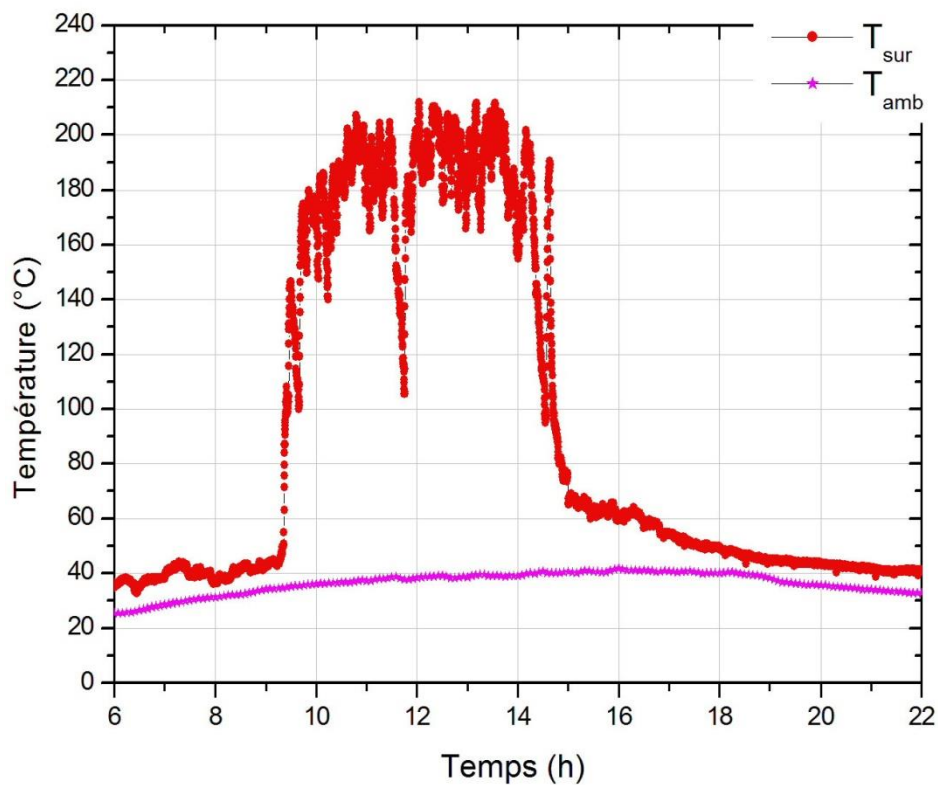


Figure III.40. Températures T_{sur} et T_{amb} pour la journée 07/08/2017.

III.4. Conclusion

Ce travail est basé sur deux buts principaux : le premier est l'utilisation de la carte Raspberry Pi3 comme station de mesure dans ces types d'installations thermiques. Nous avons expliqué la méthode de fonctionnement et d'installation des thermocouples avec le transformateur MAX6675, afin d'enregistrer les valeurs dans un fichier Excel, est transporté les données par wifi entre le Raspberry Pi3 et le Micro-ordinateur, tout en bénéficiant de leur précision, de sa facilité d'emplacement, et d'utilisation pour les chercheurs, ainsi que de leur coût raisonnable par rapport aux autres unités d'acquisition des données qui sont trop chères.

Le deuxième but, consiste à la description du comportement thermique de ce prototype ; quand le concentrateur orienté, perpendiculairement soit vers le soleil, ou bien horizontal, est confronté avec les résultats obtenus, nous avons lancé une série de mesures pour plusieurs journées de ciel clair, toujours pour le même site de Ghardaïa, pour les deux positions de l'absorbeur, avec une simulation par le code de calcul TRNSYS, dans les mêmes conditions climatiques et expérimentales.

Nous avons choisi les deux meilleurs tests, pour la comparaison de ce dernier avec un commentaire sur les résultats, en plus de quelques remarques.

Références bibliographiques

- [1] Capderou M. Atlas Solaire de l'Algérie, Tome 1, Vol 1 et 2, Modèles Théoriques et Expérimentaux, Office des Publications Universitaires, Algérie, 1987.
- [2] Maafi A. A survey of photovoltaic activities in Algeria. *Renewable Energy* 2000; 20(1):9–17.
- [3] Gairaa K. Bakelli Y. Solar Energy Potential Assessment in the Algerian South Area: Case of Ghardaia Region. *Journal of Renewable Energy* 2013; 2013: 1-11 (Article ID 496348).
- [4] Moumami A. Hamani N. Moumami N. Mokhtari Z. Estimation du Rayonnement Solaire par Deux Approches Semi Empiriques dans le Site de Biskra, *Proceeding du 8^{ème} Séminaire International sur la Physique Energétique, SIPE'06*, Centre Universitaire de Béchar, Algérie, 11 et 12 Novembre 2006.
- [5] Gama A. Haddadi M. Malek A. Etude et réalisation d'un concentrateur cylindro parabolique avec poursuite solaire aveugle. *Revue des Energies Renouvelables* 2008; 11(3) : 437- 451.
- [6] Behar O. Khellaf A. Mohammedi K. Ait-Kaci, S. A review of integrated solar combined cycle system (ISCCS) with a parabolic trough technology. *Renew Sustain Energy Rev* 2014; 39:223–50.

- [7] Derbal-Mokranea H. Bouaichaoui S. El Gharbi N. Belhamel M. Benzaoui A. Modeling and numerical simulation of an integrated solar combined cycle system in Algeria. *Procedia Eng* 2012; 33:199–208.
- [8] Boukelia T. Mecibah MS. Parabolic trough solar thermal power plant: potential, and projects development in Algeria. *Renew Sustain Energy Rev* 2013; 21:288–97.
- [9] Bakos G. Design and construction of a two-axis sun tracking system for parabolic trough collector (PTC) efficiency improvement. *Renewable Energy* 2006; 31: 2411–2421.
- [10] Brooks M.J. Mills I. Harms T. M. Design, construction and testing of a parabolic trough solar collector for a developing-country application, in *Proceedings of the ISES Solar World Congress, Orlando, FL, 6–12 August 2005*.
- [11] Venegas-Reyes E. Jaramillo O.A. Castrejon-García R. Aguilar J.O. Sosa- Montemayor F. Design, construction, and testing of a parabolic trough solar concentrator for hot water and low enthalpy steam generation. *J. Renew. Sustain. Energy* 2012; 4(5): 053103. doi:10.1063/1.4751461.
- [12] García-Fernández A. Zarza E. Valenzuela L. Pérez, M. Parabolic-trough solar collectors and their applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010; 14(7):1695–721.
- [13] Kumaresan G. Sudhakar P. Santosh R. Velraj R. Experimental and numerical studies of thermal performance enhancement in the receiver part of solar parabolic trough collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2017; 77: 1363–1374.
- [14] Gama A. Larbes C. Malek A. Yettou F. Adouane B.J. Design and realization of a novel sun tracking system with absorber displacement for parabolic trough collectors, *Renew Sustain Energy* 2013; 5(3): 033108. doi:10.1063/1.4807476.
- [15] <http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/1310/0900766b81310fab.pdf>
- [16] Guenounou A. Malek A. Aillerie M. Comparative performance of PV panels of different technologies over one year of exposure: application to a coastal. *Energy Conversion and Management* 2016; 114: 356–363.
- [17] Klaus D. Klawinski D. Amrehn S. Tiemann M. Wagner T. Light activated resistive ozone sensing at room temperature utilizing nanoporous In₂O₃ particles: influence of particle size, *Sens. Actuators B: Chem* 2015; 217: 181–185.
- [18] Giancaterini L. Emamjomeh S.M. De Marcellis A. Palange E. Resmini A. Anselmi-Tamburini U. Cantalini C. The influence of thermal and visible light activation modes on the NO₂ response of WO₃ nanofibers prepared by electrospinning. *Sensors and Actuators B: Chemical* 2016; 229: 387–395.

- [19] Upton E. Halfacree G. Raspberry Pi User Guide; John Wiley, Sons: Hoboken, NJ, USA, 2013.
- [20] Vujović V. Maksimović M. Raspberry Pi as a Sensor Web node for home automation. Computers, Electrical Engineering 2015; 44:153–171.
- [21] Menezes V. Patchava V. Gupta M.S.D. Surveillance and monitoring System using Raspberry-Pi and simple CV. International Conference on Green Computing and Internet of Things (ICGCIoT) 2015. doi:10.1109/icgciot.2015.7380661
- [22] Amit A.N. Gangotri N. An internet of things approach for security surveillance using raspberry-Pi - a survey. International Research Journal of Engineering and Technology 2017; 04(04): 1288–1291.
- [23] Sunil Kumar A. Rahul Reddy P. An Internet of Things approach for motion detection using Raspberry-Pi, J. International Journal of Advanced Technology and Innovative Research 2016; 08(19): 3622- 3627.
- [24] Livre Raspberry Pi tout simplement, Abdelah A.A.
- [25] Duffie J.A. Beckman W.A. Solar Engineering of Thermal Processes, 2nd Edition, John Wiley, Sons Inc, New York, pp. 331 - 375, 1991.
- [26] Chasseriau J.M. Conversion thermique du rayonnement solaire, Dunod, France, 273 pages, 1984.
- [27] <https://www.maximintegrated.com/en/products/analog/sensors-and-sensor-interface/MAX6675.html>.
- [28] Klein S.A et al. TRNSYS version 16, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, 2004. Available Online, see <http://sel.me.wisc.edu/trnsys>

CHAPITRE IV

ÉTUDE ET RÉALISATION D'UN CAPTEUR CYLINDRO-PARABOLIQUE ENVELOPPÉ PAR UNE SERRE, AVEC UNE POURSUITE SOLAIRE AUTOMATIQUE

IV.1. Introduction

Dans le contexte actuel, l'exploitation des rayonnements solaires directs, considéré comme une ressource principale à l'échelle planétaire, surtout dans le domaine des technologies de conversion en énergie utile par l'être humain, avec un faible impact environnemental, est l'une des solutions envisagées à l'heure actuelle [1].

Or, l'un des paramètres clés pour la conception de ces systèmes est le bon choix du fluide circulant dans l'échangeur solaire, ainsi que la réduction des pertes thermiques par l'utilisation d'une serre. Cette dernière est une composante essentielle, pour le succès de l'introduction de l'énergie solaire dans le domaine industriel [2, 3].

Les principaux avantages que procure l'utilisation d'une serre en verre, de point de vue technique, est d'améliorer d'une manière significative la stabilité structurelle, en fonction de leur construction. En d'autre terme, il confère au concentrateur un support rigide, en assurant une précision géométrique du concentrateur pour une longue durée de vie, d'une part [4] ; d'autre part, le couvercle en verre qui couvre toute la surface plate de CCP, permet la protection de réflecteur de la détérioration causée par les conditions environnementales, ainsi que des frottements résultant du brossage lors de processus de nettoyage [5].

Nous proposons, dans un premier temps de présenter le prototype étudié et sa conception, avec son principe de fonctionnement. Une seconde partie consistera à déterminer les performances thermiques de ce système, une étude expérimentale permet de définir les effets environnement sur les tests obtenus, durant la période de printemps au niveau du site Ghardaïa-Algérie.

Aussi, nous présentons le nouveau circuit électronique de poursuite solaire automatique qui assure le suivi du soleil pendant toute la journée du test, et son efficacité avec le programme d'enregistrement des mesures automatiques dans un fichier Excel, en utilisant la carte Raspberry pi3 et Arduino. Cette étude est menée pour éliminer l'effet de cos et augmenter le transfert de chaleur au niveau de l'absorbeur avec une enveloppe du verre.

Enfin nous décrivons dans une dernière section, les simulations que nous avons réalisé et nous avons présenté les résultats obtenus sur l'ensemble du système. Ce chapitre est terminé avec une étude financière de ce projet.

IV.2. Composants du prototype cylindro-parabolique

Les mêmes étapes de réalisation du premier concentrateur ont été établies. Ce deuxième prototype est réalisé avec élimination de l'effet cosinus, en utilisant un vérin

manuel qui permet l'orientation du concentrateur vers une position perpendiculaire au soleil entre l'été et l'hiver. Nous avons, ainsi enveloppé la surface de la captation par une enveloppe en verre afin d'éviter le maximum de poussière, et d'augmenter le transfert de la chaleur au niveau de l'absorbeur. Ce prototype est installé avec un système de poursuite solaire automatique, qui est composé d'une carte Raspberry Pi3 et Arduino.

IV.2.1. Dimensionnement de la courbe

La courbe que nous avons réalisée (Fig. IV.1), à une distance focale $f = 0,20$ m, selon l'équation (II.26), indiquée dans le chapitre II.

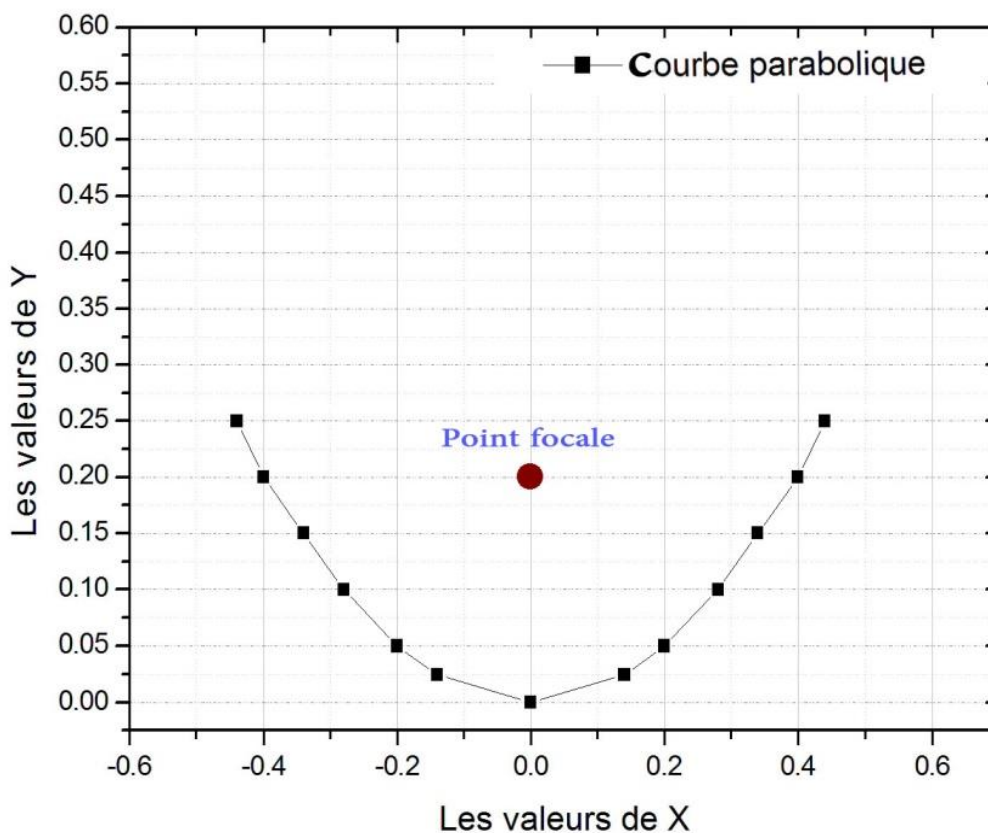


Figure IV.1. Courbe cylindro-parabolique en 2D.

Après le calcul du point de la courbe parabolique, nous avons fabriqué cette parabole dans l'atelier familiale. Sur une plate-forme de travail, nous avons fixé des morceaux de fer-rond avec des points de soudure, afin de plier la charpente du réflecteur autour de ses points de soudure. Une tôle inoxydable de 1,5 mm d'épaisseur est formée sur cette charpente métallique, pour fixer les morceaux de miroir (3 mm de largeur et 1,5 m de longueur) avec un tube de silicone, pour obtenir une réflexion de 0,95.

IV.2.2. Structure porteuse

Afin de fixer l'ensemble du concentrateur : le réflecteur, l'enveloppe en verre, le circuit du fluide caloporteur et la cuve de stockage... etc, nous avons fabriqué une structure porteuse avec deux axes de rotation, qui permet de faciliter la rotation du concentrateur, du matin jusqu'au soir, et aussi, entre l'été et l'hiver.

Pour renforcer la base, nous avons utilisé trois barres métalliques de longueur de 1,50 m, et trois barres de longueur de 0,80 m, qui sont soudées d'une manière croisée comme il est indiqué sur la figure IV.2.

Afin de faciliter le déplacement du concentrateur et leur orientation vers l'axe du Nord-Sud, quatre roues ont été utilisées pour cette objective, et pour éviter les vibrations au cours de la poursuite solaire, un pied est incorporé au milieu, qui sert comme une vis pour une bonne fixation de l'ensemble des éléments.



Figure IV.2. Structure porteuse.

IV.3. Dispositif de poursuite solaire

IV.3.1. Poursuite solaire entre l'été et l'hiver

Le vérin manuel (Fig. IV.3) réalisé, a pour but de s'imposer la surface d'ouverture du concentrateur perpendiculaire au soleil, entre l'été et l'hiver. Ce verin présente deux articulations fixées par deux vis filetées aux extrémités ; ces dernières sont reliées avec deux

écrous soudés sur le bras de rotation de 0,53 m de longueur, ce qui facilite l'orientation de la parabole.

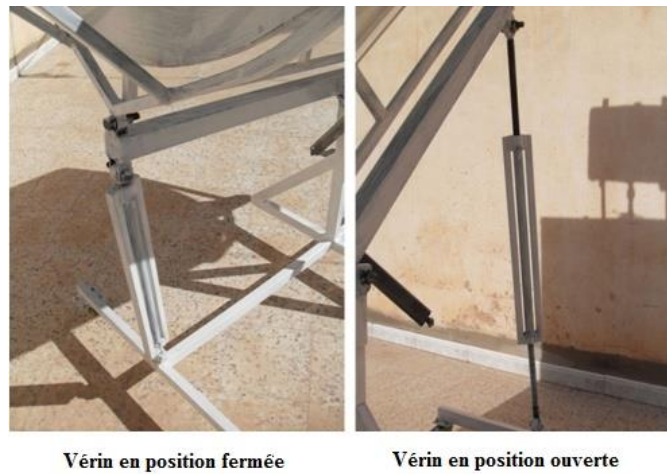


Figure IV.3. Vérin manuel à l'état fermé et ouvert.

La poursuite solaire ne présente pas un changement remarquable entre les jours proches, alors qu'elle change légèrement, d'un mois à l'autre. Cependant, un changement radical entre les saisons est remarqué, en été, le vérin est fermé totalement, par contre, en hiver, il s'ouvre au maximum.

IV.3.2. Poursuite journalière

Elle donne la possibilité de poursuivre le soleil, du matin jusqu'au soir, avec un vérin électrique commandé par un circuit électronique automatique, en utilisant une carte Raspberry Pi3 et Arduino, comme elle est indiquée sur la figure IV.4.



Figure IV.4. Circuit électronique.

IV.3.3. Fonctionnement de la poursuite solaire journalière

Avant de commencer la poursuite, le programme permet au vérin de se diriger vers l'Est, lors du lever du soleil « état initial ». Le système de poursuite se compose d'une carte Raspberry Pi3, qui commande la carte Arduino. Le programme commence la lecture des valeurs des deux LDR qui sont fixés au milieu de la surface d'ouverture du concentrateur.

Le LDR est un composant électronique dont la résistivité varie en fonction de la quantité de lumière incidente : plus elle est éclairée, plus sa résistivité baisse. Pour effectuer les mesures, nous devons injecter une tension pour avoir un signal à la sortie (c'est un capteur passif), la tension d'alimentation est de 5 v. En cas d'absence de lumière, la résistivité sera trop élevée (infinie). Pour le cas contraire, avec une bonne luminosité, la résistivité devient trop faible.

Les valeurs mesurées par l'entrée analogique de la carte Arduino varie de (1-1023). Avec ces valeurs, le programme permet, donc, de calculer un Δ_{LDR} et le comparer avec (X), sachant que (X) est une valeur mesurée quand le panneau est perpendiculaire au soleil. Si $\Delta_{LDR} > X$, le vérin tourne vers l'Ouest, et cherche un maximum de luminosité avec un pas égale à 0,25 s.

Le circuit est composé de : Carte Raspberry Pi3 ; Carte Arduino type UNO ; Deux Reliers ; Bobine de 34 v ; Vérin électrique ; Deux LDR ; Planche de bois ; Armoire métallique et Ventilateurs de refroidissement.



Figure IV.5. Armoire métallique de protection du circuit électrique.

Les composants sont fixés sur une planche de bois, pour éviter la production d'un court circuit. Ils sont, aussi placés dans une armoire métallique (Fig. IV.5), en présence d'un système de refroidissement afin d'éviter le réchauffement de la bobine et les cartes de

commande. Cette armoire a pour but de protéger le circuit à des contraintes environnementales telles que, la poussière et la pluie.

IV.3.4. Organigramme du programme de poursuite solaire

L'organigramme ci-dessous présente le fonctionnement du programme réalisé de poursuite solaire journalière (Fig. IV.6), en plus d'un schéma global de branchement électronique entre les LDR et Arduino (Fig. IV.7).

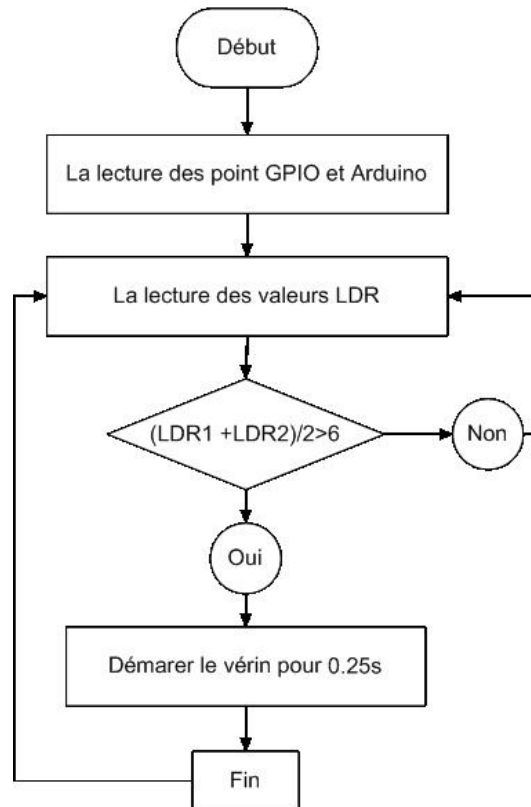


Figure IV.6. Organigramme du programme de poursuite solaire.

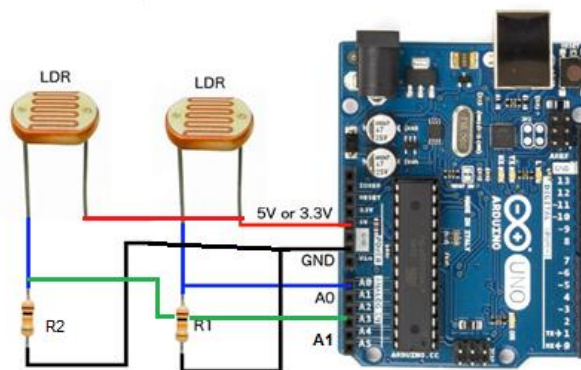


Figure IV.7. Schéma global de branchement électronique entre les LDR et Arduino.

IV.3.5. Fonctionnement du programme d'enregistrement des données

Nous avons élaboré un programme de calcul en Python. Le programme commence par la lecture des entrées et des sorties de cette carte électronique, ainsi que la lecture des composants du transformateur MAX6675, de chaque thermocouple. Le langage Python est installé sur Linux, qui est le soft de ce mini-ordinateur Raspberry Pi3. Après le lancement du programme, à partir de 10^h :00 du matin jusqu'à 22^h :00, le code mesure chaque 10 s, et enregistre les valeurs des températures (T_e , T_s , T_{sur} , T_{amb} , $T_{air\ in}$ et T_{eau}) dans un fichier Excel.

IV.3.6. Organigramme du programme d'enregistrement des données

L'organigramme présente le fonctionnement du programme réalisé pour l'enregistrement des données (Fig. IV.8).

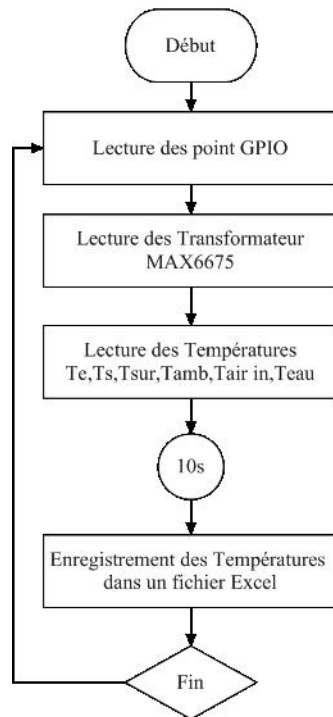


Figure IV.8. Organigramme du programme d'enregistrement des données.

IV.4. Résultats expérimentaux

IV.4.1. Résultats obtenus le mois de Mars

Les figures suivantes présentent des essais préliminaires de notre prototype, le mois de Mars 2018. Durant cette période de printemps, le site de Ghardaïa se caractérise par des perturbations météorologiques et de changement climatique durant toute la journée.

La figure IV.9 représente les résultats d'un test effectué le 14/03/2018, en utilisant une quantité d'eau égale à 10 L. Notre prototype est laissé nu (sans enveloppe en verre). Le test commence à 09^h :00 du matin, tandis que les rayonnements solaires se concentrent au niveau du foyer à 10^h :15. Au début de la journée, le ciel est apparu clair, mais à partir de 12^h :30 jusqu'à 13^h :15, il est remarqué un passage de nuages (Fig. IV.10), ce qui a entraîné la chute des températures.

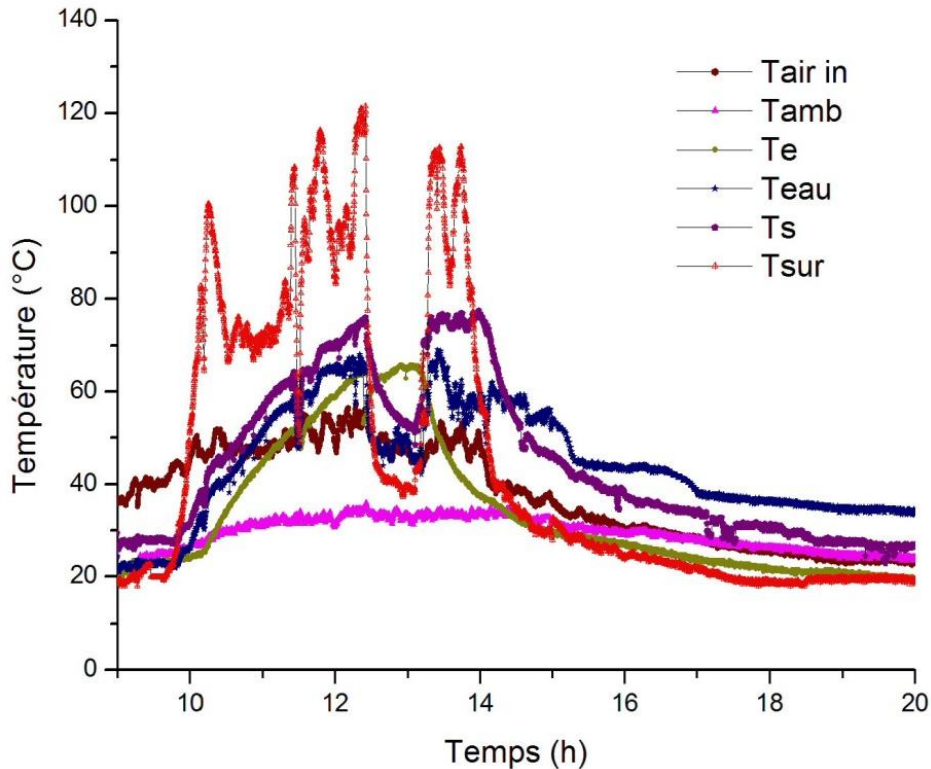


Figure IV.9. Résultats obtenus le 14/03/2018.



Figure IV.10. Passage des nuages.

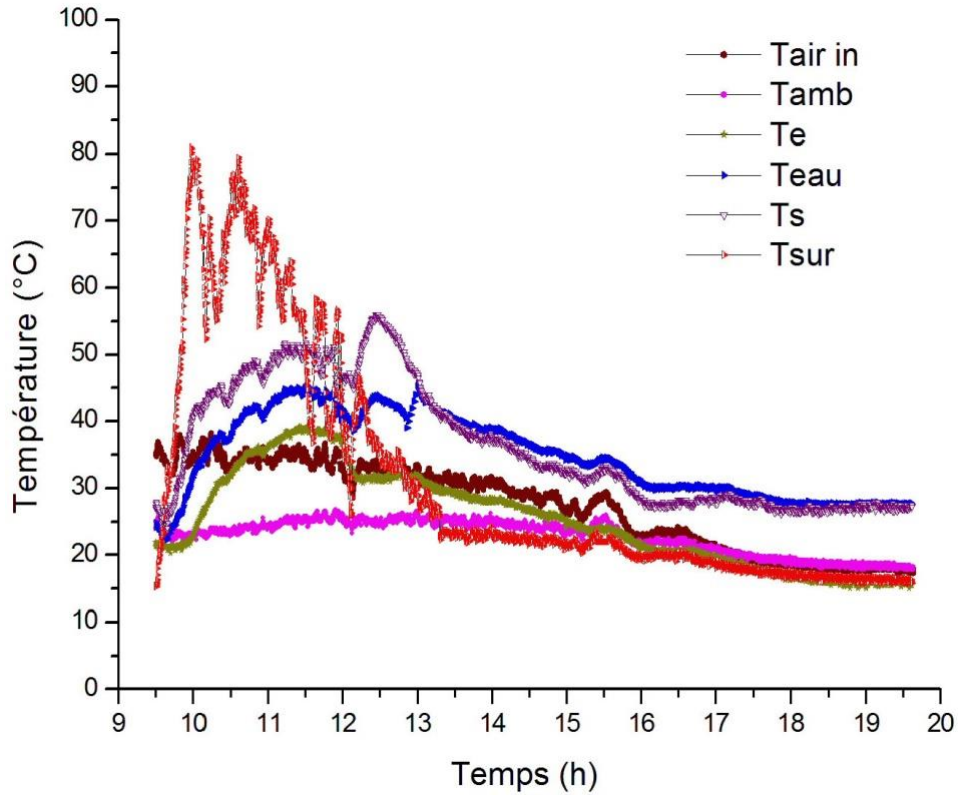


Figure IV.11. Résultats obtenus le 20/03/2018.

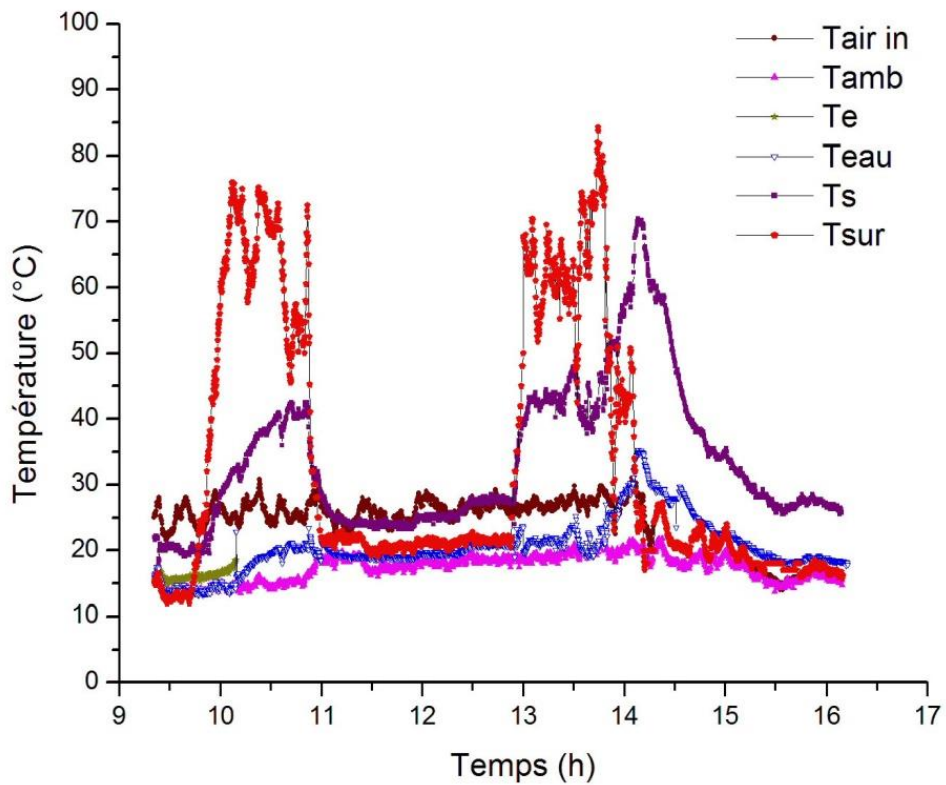


Figure IV.12. Résultats obtenus le 22/03/2018.

Concernant la figure IV.11, le test est effectué le 20/03/2018 :

- le réflecteur est sans serre ;
- une quantité d'eau égale à 10 L ;
- début du test à 09^h:50;
- la concentration des radiations solaires au niveau du foyer commence à 10^h:15;
- vent de sable pendant toute la journée (Fig. IV.13), avec un ciel n'étant pas clair (Fig. IV.14);
- fermeture des vannes de la cuve à 13^h:00;
- arrêt du test à 19^h:30.



Figure IV.13. Effet du vent de sable.



Figure IV.14. Ciel sombre.



Figure IV.15. Aspect des palmiers indique la vitesse du vent pendant la journée.

Concernant la figure IV.12, le test est effectué le 22/03/2018 :

- le réflecteur sans serre ;
- une quantité d'eau égale à 10 L ;

- début du test à 09^h:35;
- la concentration des radiations solaires au niveau du foyer commence à 10^h:20;
- température ambiante moyenne de toute la journée égale à 11 °C « journée froide » ;
- vent très forts (Fig. IV.15).

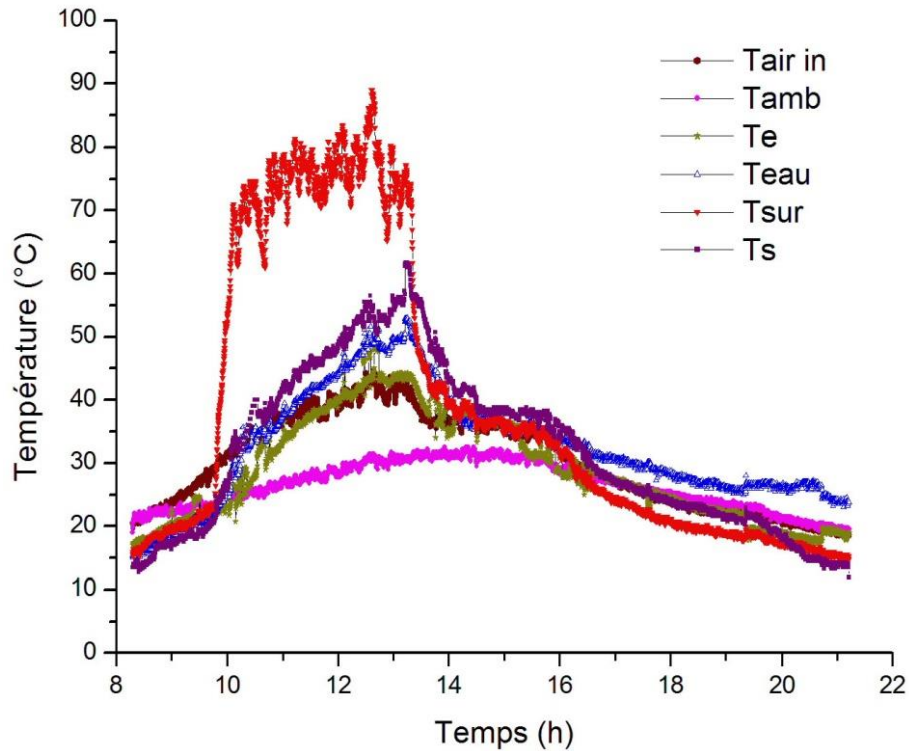


Figure IV.16. Résultats obtenus le 31/03/2018.

Concernant la figure IV.16, le test est effectué le 31/03/2018 :

- le réflecteur sans serre ;
- une quantité d'eau égale à 10 L ;
- début du test à 08^h:30;
- la concentration des radiations solaires au niveau du foyer commence à 10^h:15;
- fermeture des vannes à 14^h:05;
- arrêt du test à 21^h:00;
- ciel sombre, brouillard de sable (Fig. IV.17).



Figure IV.17. Ciel assombri avec brouillard de sable.

IV.4.2. Résultats obtenus le mois d'Avril

Les figures suivantes représentent des essais de notre prototype le mois d'Avril 2018.

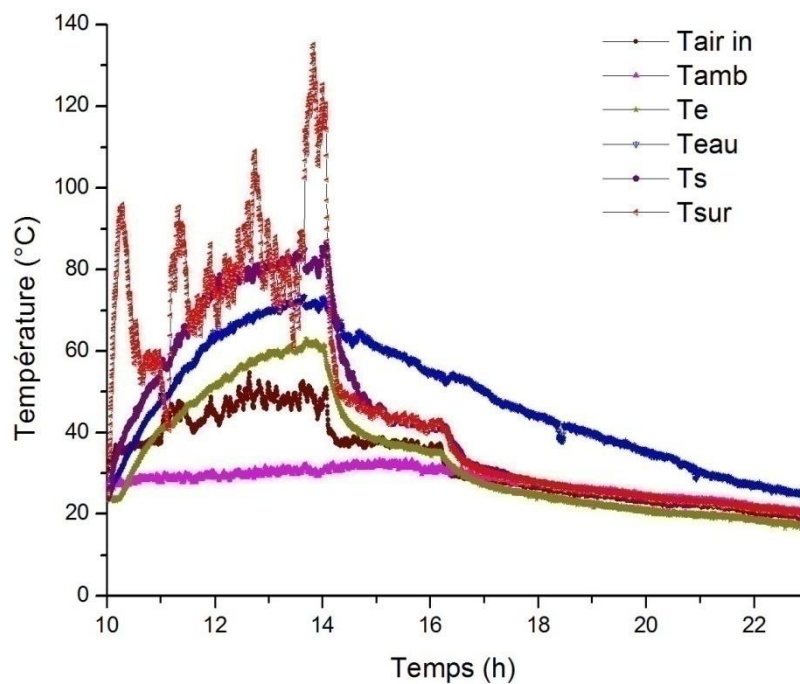


Figure IV.18. Résultats obtenus le 16/04/2018.

Concernant la figure IV.18, le test est effectué le 16/04/2018 :

- le réflecteur sans serre ;

- une quantité d'eau égale à 10 L;
- début du test à 10^h:00;
- la concentration des radiations solaires au niveau du foyer commence à 10^h:15;
- fermeture des vannes à 14^h:30;
- un problème technique est détecté pour le thermocouple de T_{sur} (le thermocouple n'est pas bien placé).

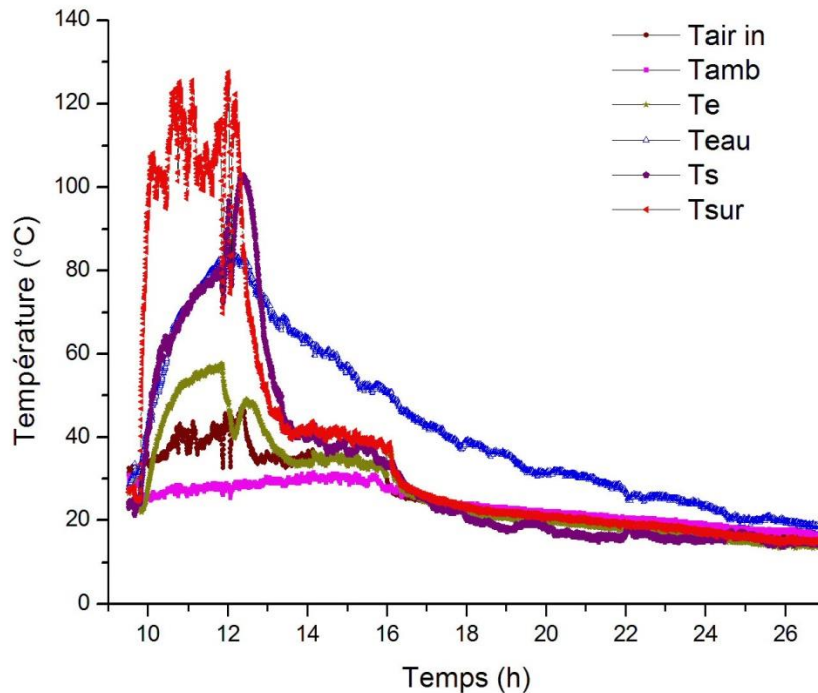


Figure IV.19. Résultats obtenus le 18/04/2018.

Concernant la figure IV.19, le test est effectué le 18/04/2018 :

- le réflecteur sans serre ;
- une quantité d'eau égale à 5 L ;
- début du test à 09^h:52;
- la concentration des radiations solaires au niveau du foyer commence à 10^h:10;
- passage des nuages à 11^h:24;
- un grand passage des nuages «pas d'ensoleillement» à 12^h:30 (Fig. IV.20);
- fermeture des vannes à 12^h:30.

Durant cette période de printemps, le climat se change brutalement entre le matin et le soir. Dans la même journée, nous remarquons une alternance entre un ciel bien ensoleillé,

un ciel nuageux, des tempêtes de vents de sable ou de pluies. C'est une période instable, du point de vue météorologie, au site de Ghardaïa-Algérie.



Figure IV.20. Absence totale du soleil le 18/04/2018.

Pour assurer une bonne protection de notre prototype, contre les effets de changements climatiques, que ce soit la poussière (Fig. IV.21) ou bien la pluie (Fig. IV.22), nous avons couvert toute la surface d'ouverture du notre prototype avec une enveloppe en verre (Fig. IV.23). Par conséquent, cette enveloppe permet aussi d'éliminer le maximum des pertes thermiques et d'augmenter le transfert de la chaleur de l'absorbeur.



Figure IV.21. Problème de la poussière.

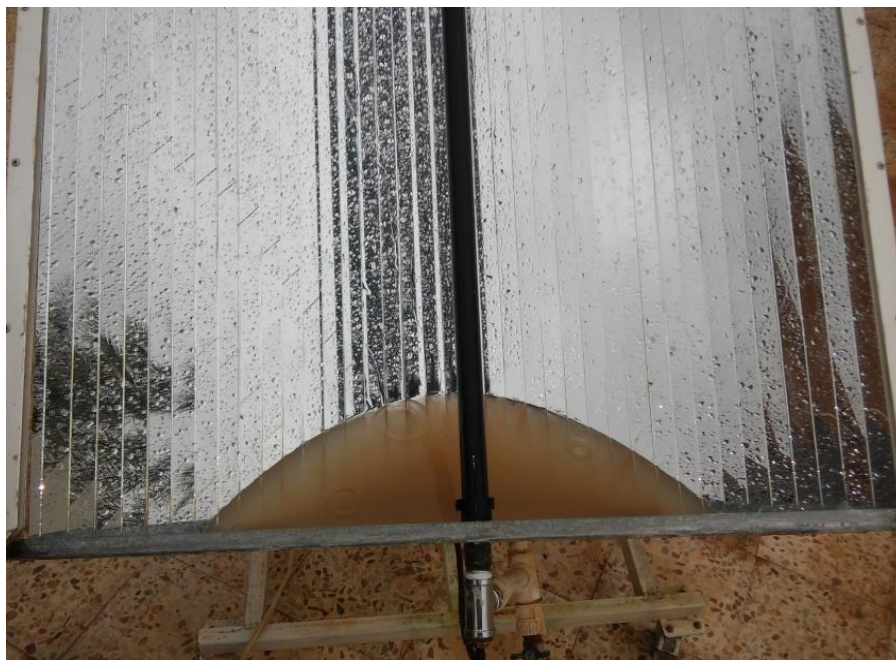


Figure IV.22. Problème de la pluie.

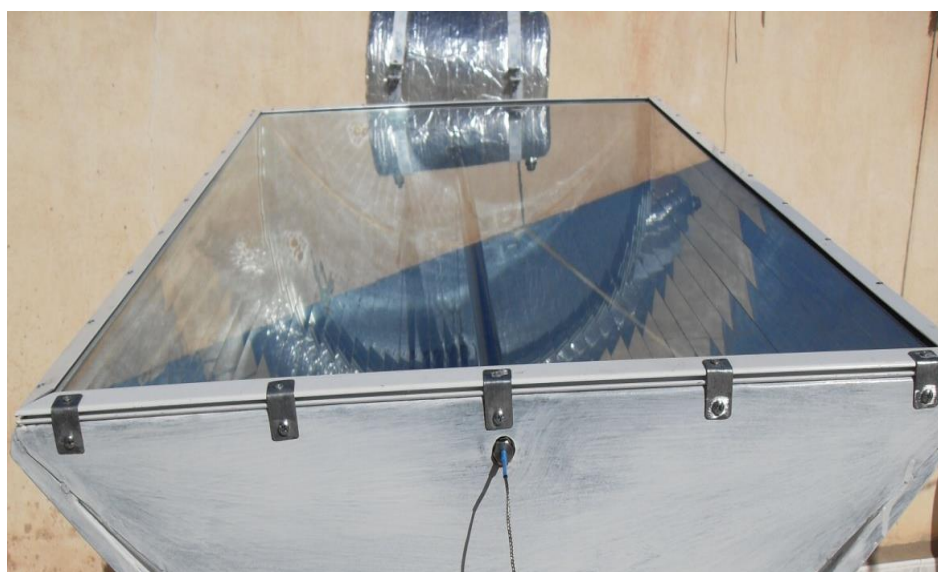


Figure IV.23. Enveloppe en verre.

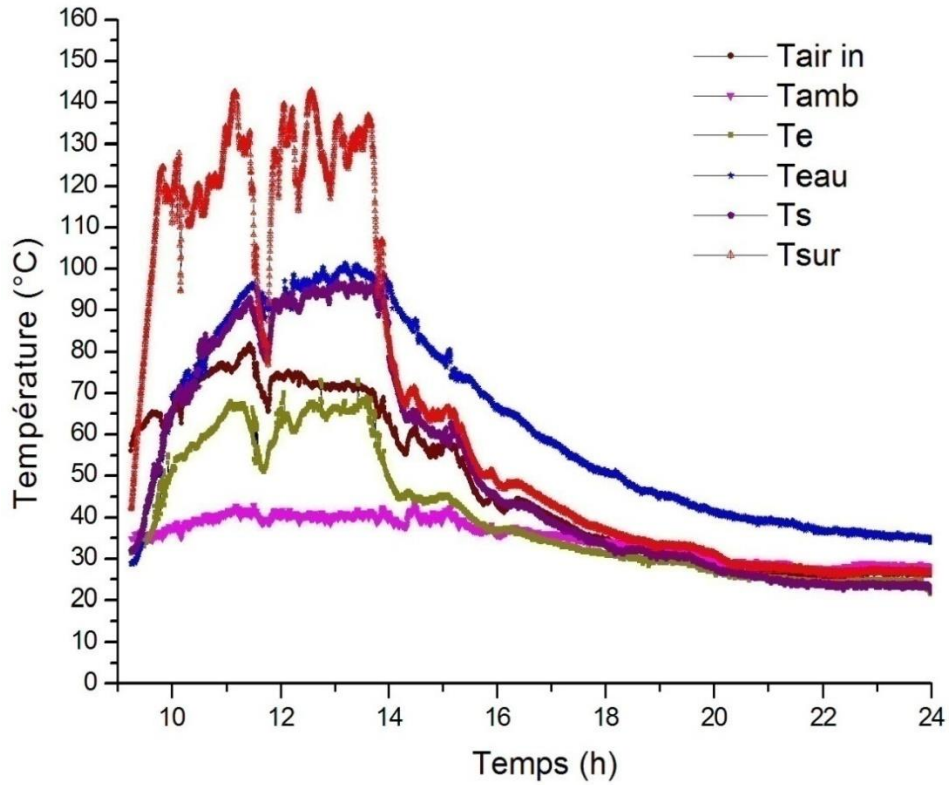


Figure IV.24. Résultats obtenus le 24/04/2018.

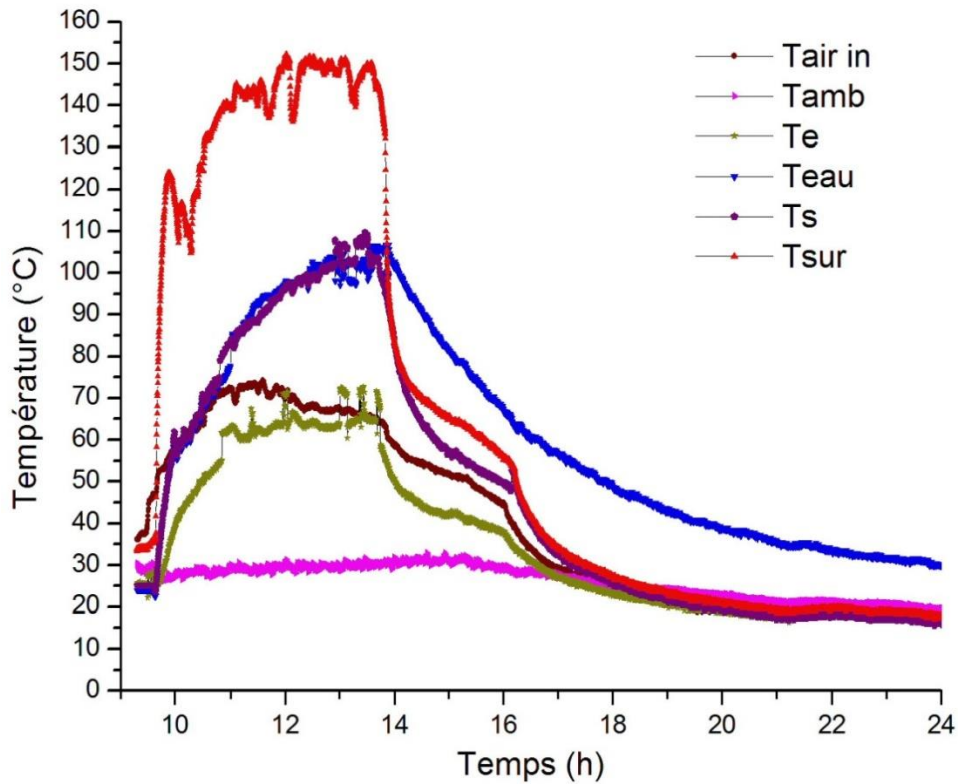


Figure IV.25. Résultats obtenus le 03/05/2018.

Concernant la figure IV.24, le test est effectué le 24/04/2018 :

- le réflecteur est enveloppé par une serre ;
- une quantité d'eau égale à 10 L ;
- début du test à 09^h:26 ;
- la concentration des radiations solaires au niveau du foyer commence à 10^h:05 ;
- passage des nuages à 11^h:55 ;
- fermeture des vannes à 14^h:30 ;
- arrêt du test à 00^h:00.

Concernant la figure IV.25, le test effectué le 03/05/2018 :

- le réflecteur est enveloppé par une serre ;
- une quantité d'eau égale à 10 L ;
- début du test à 09^h:30 ;
- la concentration des radiations solaires au niveau du foyer commence à 10^h:00 ;
- fermeture des vannes à 14^h:30 ;
- arrêt du test à 00^h:00.

Dans les deux tests précédents (Figs. IV.24 et IV.25), nous remarquons que la température $T_{\text{air in}}$ est plus élevée par rapport aux autres tests ; ce qui indique l'importance de l'enveloppe en verre et l'effet de serre. En outre, les températures T_s et T_{sur} , ont atteint des valeurs égales à 100 °C et 150 °C respectivement.

IV.5. Simulation numérique du prototype et le comportement thermique résulte

Pour une étude numérique de notre prototype concentrateur cylindro-parabolique (CCP), nous avons réalisé la conception de la géométrie à l'aide d'un logiciel de maillage Gambit, en utilisant un code de calcul Fluent, afin de définir les conditions aux limites. Ceci nous permet d'étudier le comportement thermique de l'absorbeur dans le cas d'un écoulement laminaire, avec un profil de vitesse parabolique à l'entrée.

IV.5.1. Modèle mathématique

IV.5.1.1. Géométrie de l'absorbeur

L'ensemble étudié est constitué d'un tube cylindrique de 1,5 m de longueur et un diamètre extérieur égale 0,028 m, avec une enveloppe en verre de 1,5 m de longueur et 0,90 m de largeur (Fig. IV.26). Le tube est chauffé par un flux solaire concentré et absorbé par la paroi externe. Ce flux solaire concentré provient d'un miroir cylindro-parabolique qui

réfléchit et concentre le rayonnement solaire sur le foyer. Le flux de chaleur est considéré, uniformément réparti sur la circonférence du tube.



Figure IV.26. Représentation du dispositif solaire.

IV.5.1.2. Modélisation et maillage de l'absorbeur

La modélisation et le maillage de l'absorbeur ont été réalisés en trois dimensions, axisymétriquement avec le logiciel de modélisation et de maillage Gambit, en configurant les conditions aux limites par un logiciel de simulation Fluent. Afin de pouvoir simuler les conditions de chauffage, le flux solaire, uniformément imposé comme une source de chaleur dans l'épaisseur de tube absorbeur. Le maillage qui a été réalisé par Gambit est un maillage en forme de O, dans le tube (Fig. IV.27), alors qu'il a suivi la courbe parabolique de réflecteur, à l'extérieur (Fig. IV.28).

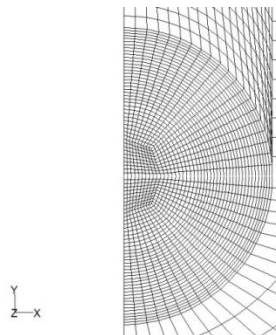


Figure IV. 27. Zoom de maillage au niveau de tube absorbeur.

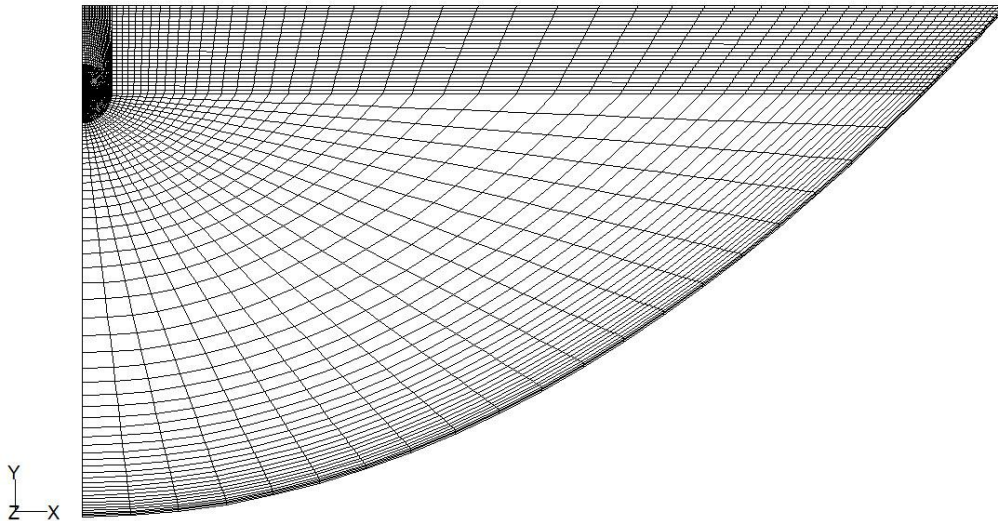


Figure IV.28. Maillage axisymétrique du concentrateur.

IV.5.1.3. Équations gouvernantes

Les mêmes équations que nous avons utilisées dans le deuxième chapitre, et les plus connues par le logiciel de simulation Fluent.

IV.5.1.4. Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont les suivantes :

- une source de chaleur imposée uniformément sur l'épaisseur de tube ;
- un débit massique uniforme est imposé sur la section d'entrée ;
- profil de vitesse uniforme sur la section d'entrée ;
- profil de température uniforme sur la section d'entrée ;
- des pertes thermiques convectives et radiatives de la surface externe de tube absorbeur ;
- un écoulement laminaire suivant l'axe z ;
- nous prenons l'axisymétrie suivant l'axe y ;
- le fluide d'écoulement est de l'eau, avec une approximation de Boussinesq ;
- la gravité s'exerce suivant la direction y ;
- un écoulement, dynamiquement, thermiquement et pleinement développé est appliqué sur la section de sortie.

IV.5.2. Résultats et discussion

IV.5.2.1. Résultats du tube absorbeur

La figure IV.29 présente les profils des vitesses sur le plan d'entrée et son développement jusqu'au plan de sortie du tube, ce qui révèle l'effet de la gravité suivant l'axe y et ainsi les frottements avec la paroi intérieure de tube.

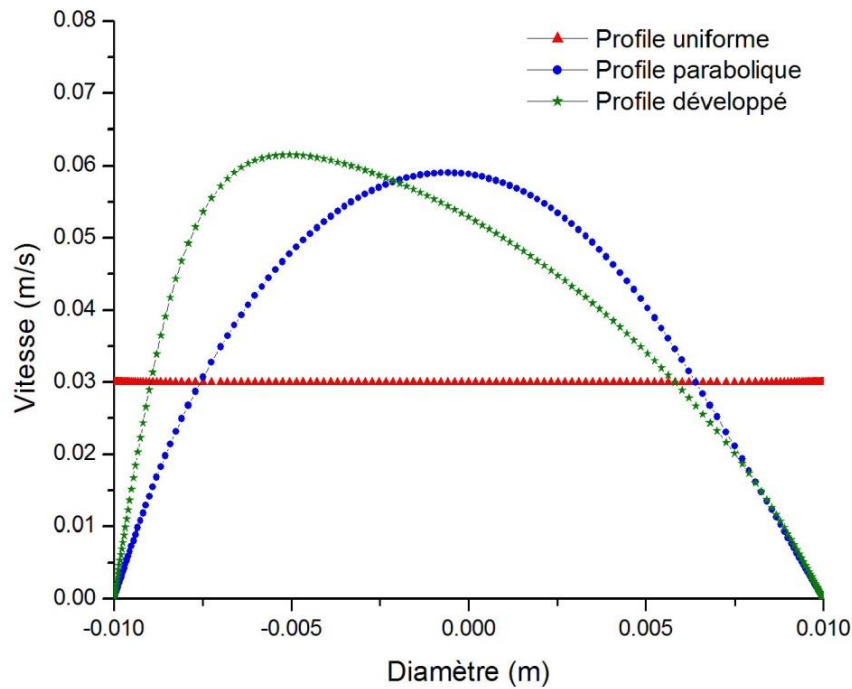


Figure IV.29. Profils de vitesse suivant l'axe d'écoulement z .

Les figures IV.30-IV.33 montrent les contours des vitesses en deux dimensions, au plan x,y suivant l'axe d'écoulement z . Quand nous nous approchons vers la paroi intérieure du tube, la vitesse est réduite vers la valeur zéro. Par contre, le maximum de vitesse est obtenu dans la partie médiane inférieure du tube (désignée en rouge dans ces figures).

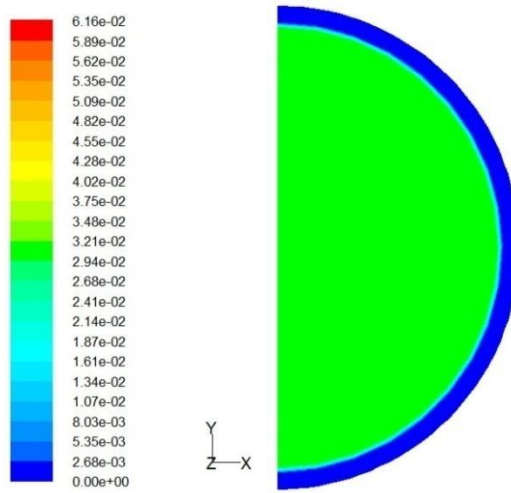


Figure IV.30. Contour de vitesse à $z = 0$ m.

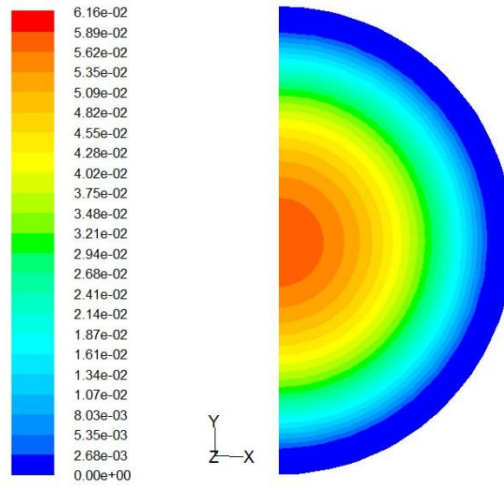


Figure IV.31. Contour de vitesse à $z = 0,5$ m.

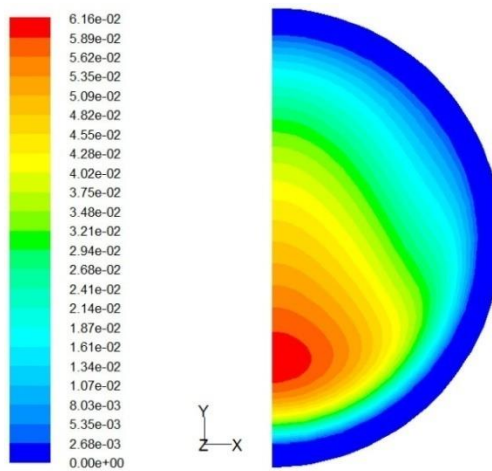


Figure IV.32. Contour de vitesse à $z = 1$ m.

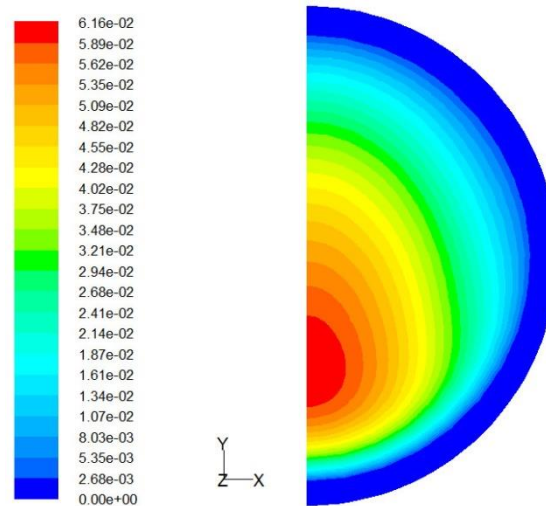


Figure IV.33. Contour de vitesse à $z = 1,6$ m.

Les figures IV.34-IV.37 illustrent les contours des températures en deux dimensions au plan xy , suivant l'axe d'écoulement z . Quand nous nous approchons vers la paroi intérieure du tube, la température augmente au maximum, et le minimum de température est obtenu dans la partie médiane inférieure du tube, qui est désignée en bleu dans les figures. À partir de ces figures, nous pouvons dire que la convection mixte dans ce cas, donne des rouleaux transversaux contrarotatifs, suivant l'axe d'écoulement z .

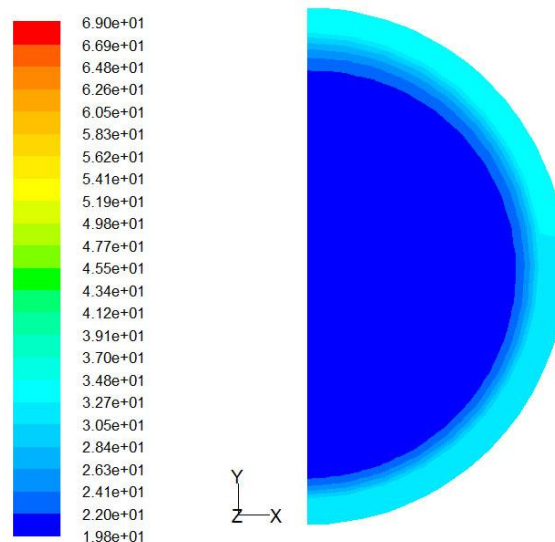


Figure IV.34. Contour de température à $z = 0,6$ m.

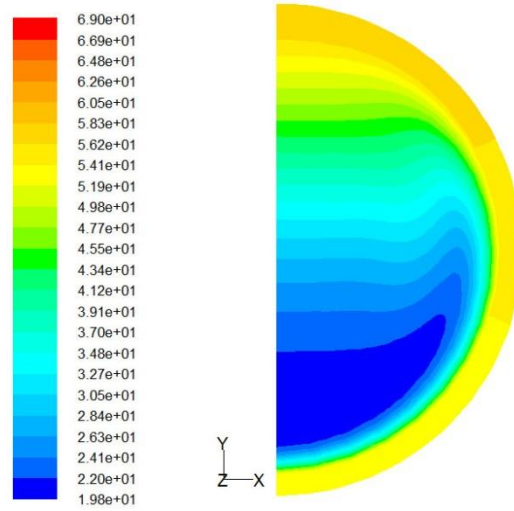


Figure IV.35. Contour de température à $z = 1$ m.

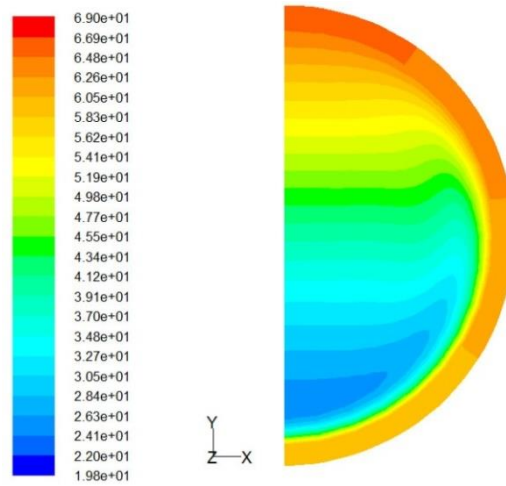


Figure IV.36. Contour de température à $z = 1,4$ m.

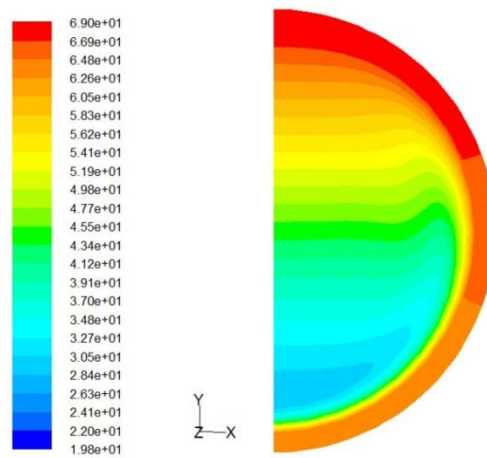


Figure IV.37. Contour de température à $z = 1,6$ m.

La figure IV.38 donne le développement de la température suivant l'axe d'écoulement z . Dans cette figure, nous remarquons la présence de quatre zones différentes :
 A : zone de développement hydrodynamique caractérisé par un profil parabolique à $z = 0,5$ m. De plus, aucun de transfert de la chaleur dans cette zone.

B : zone caractérisée par un écoulement de retour, à cause du transfert de la chaleur dans les parties C et D.

B et C : zones de développement thermique.

D : zone d'écoulement thermique pleinement développé.

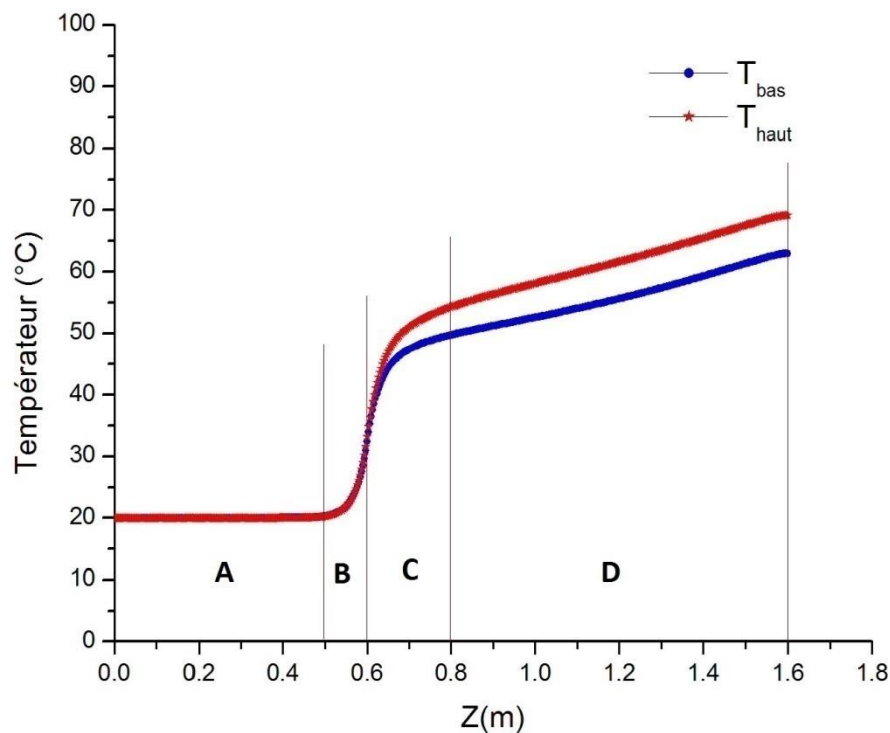


Figure IV.38. Développement des températures suivant z .

IV.5.2.2. Résultats obtenus à l'intérieur de la serre

Dans cette partie, nous avons simulé l'ensemble du concentrateur (le réflecteur, l'absorbeur, et l'enveloppe de la serre). Le problème, c'est que nous ne pouvons pas augmenter le nombre de nœuds dans le logiciel de maillage "Gambit" ainsi que le logiciel de simulation Fluent, par un simple ordinateur. Il faut que cette simulation complexe se fasse au niveau d'une station de calcul professionnel.

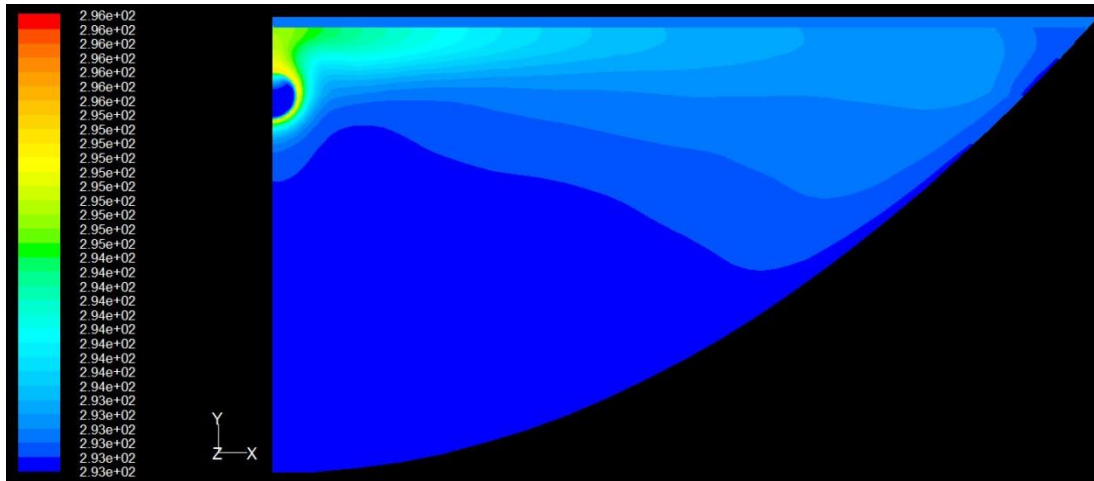


Figure IV.39. Contour de température à l'intérieur de la serre, $z = 0,09$ m.

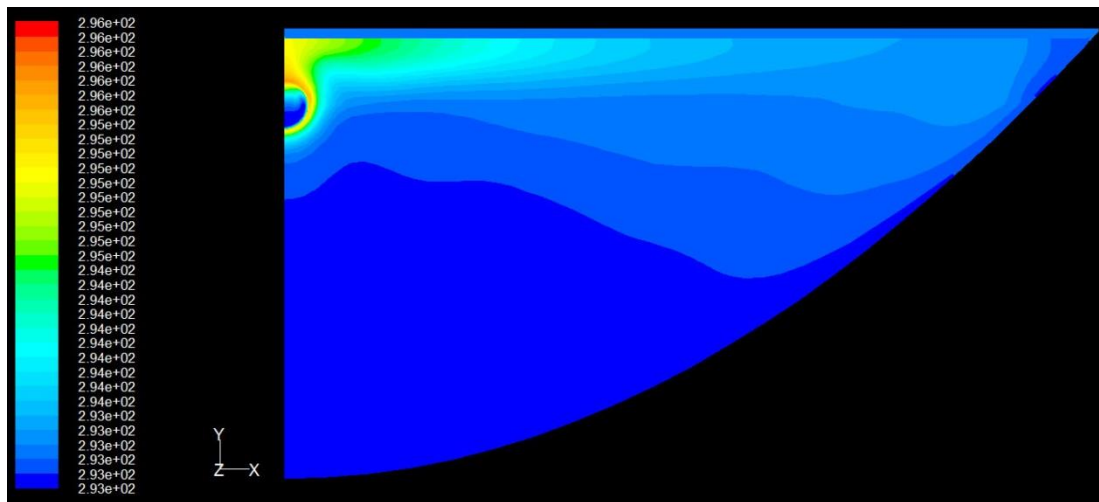


Figure IV.40. Contour de température à l'intérieur de la serre, $z = 0,5$ m.

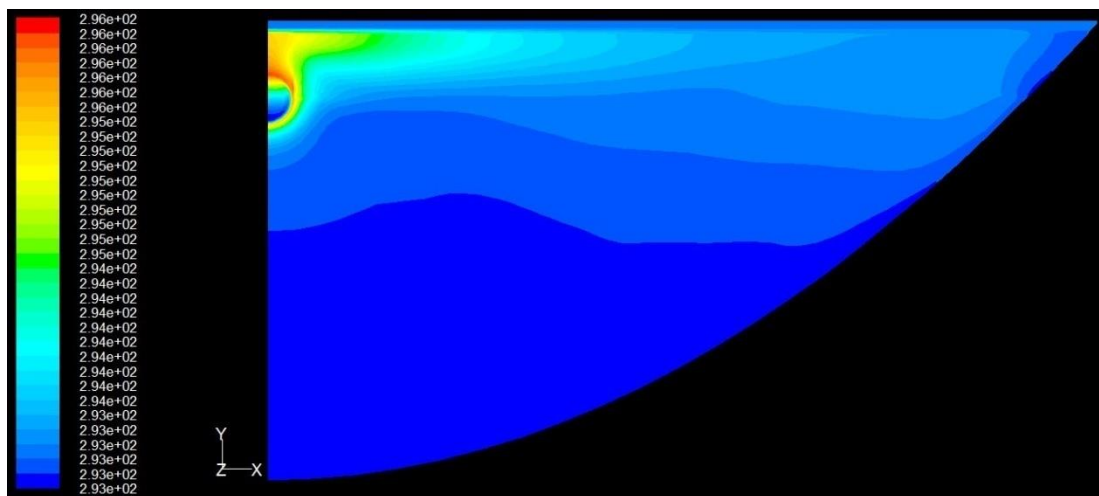


Figure IV.41. Contour de température à l'intérieur de la serre, $z = 1$ m.

L'ensemble des figures IV.39-IV.41, montrent les contours de la température obtenue dans l'enveloppe de la serre, au plan xy suivant l'axe d'écoulement z. Nous avons pris trois plans, à l'entrée, au milieu, et à la sortie.

Nous n'avons pas pu baser sur ces résultats car le nombre de nœuds est faible.

IV.6. Coût du prototype

Outils	Quantité	Coût (Da)
Armoire métallique	1	4000.00
Carte arduino	1	3500.00
Carte raspberry Pi3	1	15000.00
Charpente métallique	1	23000.00
Cuve de stockage (15 l)	1	750.00
Détecteur de lumière	2	300.00
Enveloppe en verre (1,5 m x 0,90 m)	1	1500.00
Huile thermique 20 l	-	3800.00
Isolant de la cuve	1	1200.00
Miroirs (1,5 m x 1,10 m)	1	2500.00
Planche de bois (0,50 m x 0,30 m)	1	500.00
Plaque de branchement	1	900.00
Pompe de circulation de trois débits	1	7000.00
Raille en aluminium forme U (5 m)	1	2000.00
Relié électrique (220 v pour 5 v)	4	250.00
Résistance électrique	2	50.00
Roues	4	800.00
Thermocouple type K	10	8000.00
Tôle inoxydable (1,5 m x 1,10 m)	1	6500.00
Transformateur (34 v)	1	2500.00
Transformateur Max6675	10	3000.00
Tube de circulation en plastique résistant	1	500.00
Tube en cuivre (1,70 m, Ø = 0,022 m)	1	3000.00
Tube silicone	2	400.00
Vanne de fermeture	4	1600.00
Ventilateur (220 v)	1	1000.00
Vérin électrique	1	4000.00
Vérin manuelle	1	1800.00
Total		99350.00

Tableau IV.1. Coût du prototype sujet de l'étude.

Le tableau IV.1. illustre les dépenses relatives à la réalisation de notre prototype pour un montant total de 99.350.00 DA. Etant donné le coût raisonnable de cette expérimentation, il nous a été possible de réaliser des projets de recherche comme celui-ci ; ce qui a encouragé les doctorants d'aller, beaucoup plus, vers la recherche expérimentale, que pour une étude de simulation. Nous pouvons exploiter ce type des capteurs à des fins socio-économiques, pour la construction des réseaux de chauffage central : des bâtiments, des écoles, des usines...etc Ceci, afin de réduire le coût de chauffage électrique, et même, d'abaisser le taux de pollution résultant des énergies fossiles. L'utilisation de la carte Raspberry nous permet, aussi de suggérer la création, à Ghardaïa, d'une centrale thermique de grande puissance, moins coûteuse, et pourvue d'une commande à distance, tout en exploitant les résultats de notre étude.

IV.7. Conclusion

Dans les phénomènes de transfert de chaleur, il est très important de prendre en considération l'augmentation du transfert thermique par l'augmentation de la surface d'échange, le choix des matériaux et les fluides de transfert, ainsi que la réduction des pertes thermiques conductives, convectives et radiatives.

Dans ce travail, nous avons proposé un nouveau système de poursuite solaire d'un concentrateur cylindro-parabolique réalisé au site de Ghardaïa-Algérie. Nous avons commencé avec la conception mécanique, où nous avons réalisé un prototype différent de celui du deuxième chapitre, en utilisant un vérin manuel assurant un suivi perpendiculaire du soleil pendant toute l'année, en éliminant l'effet cosinus. Un vérin électrique commandé automatiquement, est ainsi utilisé, afin d'assurer la rotation du matin jusqu'au soir. Une pièce très importante : enveloppe en verre, est rajoutée. Cette dernière permet la réduction des pertes thermiques convectives et radiatives, autour de l'absorbeur.

Un circuit électronique comprenant une carte Raspberry Pi3 et Arduino, commandé par un micro-ordinateur à distance, à l'aide d'un réseau wifi local, sert à mesurer le comportement thermique de notre prototype. Les tests effectués ont démontré un travail optimal avec une bonne précision, tout au long de la journée. Les résultats discutés et expliqués, selon le climat de la journée du test. Les mesures avec l'effet de serre donnent une très bonne augmentation des températures par rapport aux tests sans effet de serre.

Une étude numérique par un logiciel de calcul Fluent est effectuée sur notre prototype, par laquelle nous avons présenté les résultats thermiques et hydrodynamiques du tube absorbeur et de l'enveloppe en verre.

Références bibliographiques

- [1] Gama A. Haddadi M. Malek A. Etude et réalisation d'un concentrateur cylindro parabolique avec poursuite solaire aveugle. *Revue des Energies Renouvelables* 2008 ; 11(3) : 437–451.
- [2] Kennedy C E. Terwilliger K. Optical durability of candidate solar reflectors. *J. Sol. Energy Eng* 2005; 127; 262–268.
- [3] Sutter F. Ziegler S. Schmuücker M. Heller P. Pitz-Paal R. Modelling of optical durability of enhanced aluminum solar reflectors. *J. Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 2012; 107, 37–45.
- [4] Fernández-García A. Rojas E. Pérez M. Silva R. Hernández-Escobedo Q. Manzano-Agugliaro F. A parabolic-trough collector for cleaner industrial process heat. *Journal of Cleaner Production* 2015; 89, 272–285.
- [5] Fernandez-García A. Alvarez-Rodrigo L. Martínez-Arcos L. Aguiar R. Marquez-Payes, J.M. Study of different cleaning methods for solar reflectors used in CSP plants. *Energy Procedia* 2014; 49: 80–89.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Conclusion générale et perspectives

Ghardaïa, l'une des régions du Sahara algérien, est caractérisée par son ensoleillement, le long de l'année. De ce fait, nous pouvons profiter d'une centrale thermique à concentration comme celle existant dans la zone industrielle de Hassi-R'mel.

La technologie de concentration linéique des réflecteurs cylindro-paraboliques est la plus fréquente. Actuellement, elle est utilisée par les plus puissantes centrales solaires à l'échelle mondiale. Le travail réalisé dans cette thèse, est une contribution à l'étude d'un concentrateur cylindro-parabolique en présence d'une serre. Nous nous intéressons particulièrement, au stockage thermique et à l'augmentation de transfert de la chaleur au niveau de l'absorbeur.

Les résultats expérimentaux de l'évaluation du gisement solaire sont validés par trois modèles mathématiques choisis (Bird, Bras et Ryan-Stolzenbach) avec ceux dont dispose l'unité de Recherche Appliquée en Énergie Renouvelable, de Ghardaïa. Les paramètres nécessaires pour le calcul des composantes du rayonnement solaire incident sur un plan horizontal, par ciel clair, ont été programmés par Excel ; ceci nous a permis de constater que le modèle Ryan-Stolzenbach donne une bonne estimation du rayonnement solaire global pendant la majorité des mois de l'année.

De plus, nous avons réalisé un concentrateur cylindro-parabolique horizontal au plan de la terre avec un stockage thermique durant la nuit. L'expérimentation est subdivisée en deux parties. En premier lieu, nous avons utilisé différentes concentrations des radiations solaires, afin d'indiquer l'importance de la concentration imposée au niveau de l'absorbeur ainsi que l'augmentation de sa surface d'échange. Afin que la concentration soit appliquée sur la majorité de l'entourage de l'absorbeur, le haut du tube de l'absorbeur doit être placé à une distance focale de 30 cm. Les résultats de la simulation numérique montrent que, pour un meilleur échange thermique, la totalité ou le quart du tube absorbeur doit être exposé aux radiations solaires. En deuxième lieu, une étude est faite afin de choisir le type de fluide caloporteur approprié pour notre CCP. L'utilisation de deux fluides caloporteurs, l'eau et l'huile thermique Seriola 320, a permis de déduire que l'huile est caractérisée par un très bon, échange thermique que l'eau, et ce, grâce à leur chaleur spécifique. Néanmoins, pendant la période de stockage, la chaleur de l'huile diminue rapidement, à l'inverse de l'eau qui garde la chaleur pendant la nuit. Pour cette raison, l'eau est choisie en tant que fluide caloporteur adéquat pour notre prototype ; et dans ce cas-là, il est nécessaire de prendre en considération l'augmentation de la surface de captation, et la surface d'absorption.

Par ailleurs, nous avons créé une station pour mesurer les températures de notre prototype en utilisant une carte Raspberry Pi3. Cette dernière permet de faciliter l'enregistrement des données mesurées dans un fichier Excel, par distance, le long de 24 heures, chaque 10 s, le temps nécessaire pour sauvegarder les mesures.

Enfin, un autre concentrateur cylindro-parabolique est orienté perpendiculairement vers le soleil, pendant toutes les périodes de l'année, à l'aide d'un vérin manuel, afin d'éliminer l'effet cosinus. De même, un circuit électronique de poursuite solaire est conçu à l'aide d'une carte Raspberry Pi3 et une carte Arduino, et ce, afin d'assurer une très bonne concentration au niveau de l'absorbeur. Les tests expérimentaux pour cette étape sont effectués durant la période du printemps. Cette dernière se caractérise par des perturbations climatiques au site de Ghardaïa, ce qui a affecté, d'une façon indirecte, quelques résultats obtenus. Il est à noter que le fait d'envelopper notre concentrateur par une serre, a permis d'augmenter le transfert de la chaleur au niveau de l'absorbeur, de réduire les pertes thermiques convectives et radiatives vers le milieu ambiant, ainsi que la protection du réflecteur et l'absorbeur contre la poussière et la pluie, et donc, de minimiser le coût de nettoyage. Une simulation numérique est faite, en utilisant un logiciel de calcul Fluent, pour montrer les contours des températures et des vitesses à l'intérieur du tube absorbeur, et dans l'enveloppe de la serre.

Les perspectives suivantes doivent être envisagées pour nos futures recherches :

- poursuivre le développement d'un concentrateur cylindro-parabolique sous des normes, lui permettant de fonctionner dans n'importe quelles conditions de travail, afin de valider son utilisation quelle que soit la région saharienne.
- introduire de nouveaux matériaux légers et efficaces avec un coût raisonnable, pour le circuit du fluide caloporteur, afin de réduire les pertes thermiques.
- Utiliser une bonne isolation pour la cuve de stockage, comme celle des cumulus d'eau chaude sanitaire.
- utiliser une caméra infrarouge pour détecter la stratification de la température dans le tube absorbeur.
- ajouter des thermocouples le long de la cuve du stockage, afin de localiser la stratification de la chaleur à l'intérieur.
- installer le concentrateur dans une terrasse bien exposée au soleil, pour capter le maximum des radiations durant la journée.

- utiliser une station de calcul numérique professionnelle, afin d'augmenter le nombre de nœuds avec le raffinement de maillage près des parois de changement thermique, pour l'obtention de résultats satisfaisants et fiables.
- fabriquer un modèle de ce concentrateur à l'échelle industrielle et utiliser des cuves de stockage souterraines pour approcher les mesures de la réalité.

ANNEXES

Annexe I. Caractéristiques de l'huile thermique SERIOLA 320

UTILISATIONS

- ✓ Tout système ouvert de chauffage par fluide caloporteur. Toute installation présentant un contact continu avec l'atmosphère : Bain Marie, Bain d'huile chaude.
- ✓ Toute application nécessitant un fluide de point de feu supérieur à la température de fonctionnement.
- ✓ Eventuellement graissage simple d'organes à haute température.
- ✓ Compte-tenu de sa viscosité élevée, la **SERIOLA 320** n'est pas recommandée pour les circuits à circulation forcée. Dans ces cas, nous retiendrons la gamme **SERIOLA ETA**.

SPECIFICATIONS

- ✓ Standards internationaux «ISO 6743/12 classe L-QA »

AVANTAGES

- ✓ Protection antioxydante permettant de retarder l'altération du bain d'huile même à haute température en contact avec l'air atmosphérique.
- ✓ Point de feu élevé permettant d'améliorer la sécurité d'une installation de type «ouvert ».
- ✓ Faible émission de vapeur permettant la conservation de la salubrité des locaux.
- ✓ Faible volatilité : la **SERIOLA 320** présente un point initial de distillation supérieur à 350 °C, elle conduit donc à une très faible consommation en service.

CARACTERISTIQUES

CARACTERISTIQUES TYPES	METHODES	UNITES	SERIOLA 320
Masse volumique à 20°C	ISO 3675	[kg/m ³]	897
Viscosité cinématique à 40°C	ISO 3104	[mm ² /s]	310
Viscosité cinématique à 100°C	ISO 3104	[mm ² /s]	24,5
Viscosité cinématique à 200°C	ISO 3104	[mm ² /s]	3,77
Point éclair VO	ISO 2592	[°C]	280
Point de feu VO	ISO 2592	[°C]	320
Point d'écoulement	ISO 3016	[°C]	- 9
Indice d'acide	ISO 6618	[mgKOH/g]	0,02
Résidu Ramsbottom	-	[%]	0,3

Annexe II. Programme de poursuite solaire

```
from nanpy import Arduino
from nanpy import serial_manager
#serial_manager.connect('/dev/ttyACM0')      # serial
connection to Arduino
from time import sleep

LED1 = 11
LED = 10

LDR_1 = 14
LDR_2 = 15

Arduino.pinMode(LED, Arduino.OUTPUT)
Arduino.pinMode(LED1, Arduino.OUTPUT)
Arduino.pinMode(LDR_1, Arduino.INPUT)
Arduino.pinMode(LDR_2, Arduino.INPUT)

while True:
    val_1 = Arduino.analogRead(LDR_1)
    val_2 = Arduino.analogRead(LDR_2)
    print "reading analog ....."
    print val_1
    print val_2
    delta = val_1 - val_2
    #print dif
    #sleep(1)

    if delta > 3:

        Arduino.digitalWrite(LED1, Arduino.HIGH)
        Arduino.digitalWrite(LED, Arduino.LOW)
        sleep(0.25)
        Arduino.digitalWrite(LED1, Arduino.LOW)
        Arduino.digitalWrite(LED, Arduino.LOW)
        sleep(5)

    else :
        Arduino.digitalWrite(LED1, Arduino.LOW)
        Arduino.digitalWrite(LED, Arduino.LOW)

    sleep(0.5)
```

Annexe III. Programme d'enregistrement des mesures des températures

```
#!/usr/bin/python
import RPi.GPIO as GPIO
import time
import csv

class MAX6675(object):
    '''Python driver for [MAX6675 Cold-Junction Compensated
    Thermocouple-to-Digital
    Converter] (http://www.adafruit.com/datasheets/MAX6675.pdf)
    Requires:
    - The [GPIO Library] (https://code.google.com/p/raspberry-gpio-python/) (Already on most Raspberry Pi OS builds)
    - A [Raspberry Pi] (http://www.raspberrypi.org/)
    '''
    def __init__(self, cs_pin, clock_pin, data_pin, units =
    "c", board = GPIO.BOARD):
        '''Initialize Soft (Bitbang) SPI bus
        Parameters:
        - cs_pin:    Chip Select (CS) / Slave Select (SS) pin
        (Any GPIO)
        - clock_pin: Clock (SCLK / SCK) pin (Any GPIO)
        - data_pin:  Data input (SO / MOSI) pin (Any GPIO)
        - units:    (optional) unit of measurement to return.
        ("c" (default) | "k" | "f")
        - board:    (optional) pin numbering method as per
        RPi.GPIO library (GPIO.BCM (default) | GPIO.BOARD)
        '''
        self.cs_pin = cs_pin
        self.clock_pin = clock_pin
        self.data_pin = data_pin
        self.units = units
        self.data = None
        self.board = board

        # Initialize needed GPIO
        GPIO.setmode(self.board)
        GPIO.setup(self.cs_pin, GPIO.OUT)
        GPIO.setup(self.clock_pin, GPIO.OUT)
        GPIO.setup(self.data_pin, GPIO.IN)

        # Pull chip select high to make chip inactive
        GPIO.output(self.cs_pin, GPIO.HIGH)

    def get(self):
        '''Reads SPI bus and returns current value of
        thermocouple.'''
        self.read()
        self.checkErrors()
```

```

        return getattr(self, "to_" +
self.units)(self.data_to_tc_temperature())

    def read(self):
        '''Reads 16 bits of the SPI bus & stores as an integer
in self.data.'''
        bytesin = 0
        # Select the chip
        GPIO.output(self.cs_pin, GPIO.LOW)
        # Read in 16 bits
        for i in range(16):
            GPIO.output(self.clock_pin, GPIO.LOW)
            time.sleep(0.001)
            bytesin = bytesin << 1
            if (GPIO.input(self.data_pin)):
                bytesin = bytesin | 1
            GPIO.output(self.clock_pin, GPIO.HIGH)
            time.sleep(0.001)
        # Unselect the chip
        GPIO.output(self.cs_pin, GPIO.HIGH)
        # Save data
        self.data = bytesin

    def checkErrors(self, data_16 = None):
        '''Checks errors on bit D2'''
        if data_16 is None:
            data_16 = self.data
        noConnection = (data_16 & 0x4) != 0          # tc input
bit, D2

        if noConnection:
            raise MAX6675Error("No Connection") # open
thermocouple

    def data_to_tc_temperature(self, data_16 = None):
        '''Takes an integer and returns a thermocouple
temperature in celsius.'''
        if data_16 is None:
            data_16 = self.data
        # Remove bits D0-3
        tc_data = ((data_16 >> 3) & 0xFFF)
        # 12-bit resolution
        return (tc_data * 0.25)

    def to_c(self, celsius):
        '''Celsius passthrough for generic to_* method.'''
        return celsius

    def to_k(self, celsius):
        '''Convert celsius to kelvin.'''
        return celsius + 273.15

```

```
def to_f(self, celsius):
    '''Convert celsius to fahrenheit.'''
    return celsius * 9.0/5.0 + 32

def cleanup(self):
    '''Selective GPIO cleanup'''
    GPIO.setup(self.cs_pin, GPIO.IN)
    GPIO.setup(self.clock_pin, GPIO.IN)

class MAX6675Error(Exception):
    def __init__(self, value):
        self.value = value
    def __str__(self):
        return repr(self.value)

if __name__ == "__main__":

    # default example
    cs_pin = 31
    clock_pin = 33
    data_pin = 29
    units = "c"
    thermocouple = MAX6675(cs_pin, clock_pin, data_pin, units)
    running = True
    while(running):
        try:
            try:
                tc = thermocouple.get()
                # print tc
                temp = []
                temp.append(tc)
                with open ('Te.csv', 'a') as f:

                    writer = csv.writer(f)
                    writer.writerow(temp)
                    temp.remove(tc)

                time.sleep(10)
            except MAX6675Error as e:
                tc = "Error: "+ e.value
                running = False
                print("tc: {}".format(tc))
            time.sleep(1)
        except KeyboardInterrupt:
            running = False
    thermocouple.cleanup()
```

Annexe IV. Publications et communications effectuées**Publications Internationales**

1. Tahtah R. Bouchoucha A. Abid C. Fatmi H. Kezrit D. Numerical study of mixed convection for different concentrations of a parabolic trough collector and experimental determination of temperatures (case study for winter climatic conditions). *International Journal of Ambient Energy* 2019; DOI: 10.1080/01430750.2018.1562973.
2. Boukelia T E. Mecibah M S. Tahtah R. Gairaa K. Introducing the best model for estimation the monthly mean daily global solar radiation on a horizontal surface (Case study: Algeria). *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2014; 36:194–202.

Conférences Internationales

1. Tahtah R. Bouchoucha A. Benkafada F. Etude et Réalisation d'un Concentrateur Cylindro-Parabolique. *International Conference on Electrical engineering (CIGE'2013)* 17-19 November 2013 at Bechar University Bechar, Algeria,
2. Tahtah R. Bouchoucha A. Benkafada F. Fatmi H. Etude expérimentale de l'énergie gagnée par élimination de l'effet cos d'un Concentrateur Cylindro-Parabolique, 2nd *International Conférence on Electrical Energy and Systems (ICEES 2014)* 21-23 October 2014 at Badji Mokhtar University, Annaba, Algeria.
3. Tahtah R. Bouchoucha A. Benkafada F. Abid C. Etude numérique du transfert thermique en convection mixte pour un tube absorbeur d'un capteur cylindro parabolique a deux différents fluides caloporteurs. *Third International Conference on Energy, Materials, Applied Energetics and Pollution. ICEMAEP 2016*, October 30-31, 2016, Constantine, Algeria.
4. Tahtah R. Bouchoucha A. Abid C. Kadja M. Benkafada F. Experimental study of heat transfers in parabolic trough solar receiver: using two different heat transfer fluids. *AIP Conference Proceedings* 2017; 1814:8, Paris, France.