

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA

RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Faculté du Génie de la Construction

INCUBATEUR UMMTO

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du Diplôme de Master/ Startup

Dans le cadre de l'arrêté ministériel 1275

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Energétique



**Thème : Etude et réalisation d'un capteur solaire cylindro-parabolique
à stockage d'énergie par Matériau à Changement de Phase**

Présenté par :

LOUAGUENOUNI Redouane

SELLAMI Brahim

Devant le jury :

Président : LAMROUS Nacer

Professeur / UMMTO

Examineur : BOUDAUD Salah

Maître de conférences classe B / UMMTO

Encadrant : MAKHLOUF Said

Professeur / UMMTO

Co-encadrante : DJEFEL Dihia

Maître de Conférences classe B / UMMTO

Représentant de l'incubateur : KHELIL Nacim Maître de conférence classe A / UMMTO

Représentante du CATI : TEBBICHE Hocine Maître de conférence classe A / UMMTO

Promotion : 2023/2024

Remerciements

Louange à Dieu, par la grâce duquel les bonnes actions sont accomplies, et que la bénédiction et la paix soient sur notre maître Muhammad, ainsi que sur toute sa famille et ses compagnons. En ce moment particulier, nous souhaitons exprimer nos sincères remerciements et notre gratitude à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Tout d'abord, nous adressons nos sincères remerciements et notre gratitude à nos familles chères, qui ont toujours été notre premier soutien. Ils nous ont apporté soutien et encouragement à chaque étape de nos études, et leur présence à nos côtés a eu un grand impact sur la réalisation de cet objectif.

Nous tenons également à remercier tous ceux qui ont contribué à notre éducation et à notre développement tout au long de notre parcours académique, depuis la petite enfance jusqu'à notre diplôme universitaire, pour les connaissances et le soutien qu'ils nous ont apportés. Leur effort a été déterminant pour nous préparer à relever les défis de l'avenir.

Nous n'oublions pas nos chers collègues et amis, qui ont partagé avec nous ce voyage. Les moments que nous avons passés ensemble ont été riches en défis et en réussites, et leurs souvenirs resteront à jamais gravés dans nos cœurs.

Nous exprimons également notre sincère gratitude, que notre mémoire ne peut contenir, à toutes les personnes qui ont généreusement accordé de leur temps et de leur attention pour réaliser ce travail, de près ou de loin.

Nous souhaitons à tous un succès continu.

Dédicaces

Je dédie le fruit de mes efforts à toutes les personnes qui me tiennent à cœur, notamment :

Mes généreux parents, qui m'ont accompagné à chaque étape de ce voyage et n'ont rien épargné pour ma réussite. Je demande à Dieu de bénir leur vie et de leur accorder la miséricorde guidée et le paradis.

Mon frère et mes sœurs qui ont été une source de soutien et d'encouragement.

Mes amis et collègues qui ont partagé mes moments d'étude et d'apprentissage.

Redouane

Dédicaces

Je dédie ce petit travail à tous les membres de ma famille,
en particulier à mes chers parents, que Dieu prolonge leur vie,
pour leur soutien continu jusqu'à ce que je réussisse.

Je le dédie également à mes frères et sœurs.

Je n'oublierai pas tous mes amis et tous ceux qui m'ont
aidé à terminer ce mémoire.

Brahim

Liste des figures

Figure 1.1: Orbite de la terre autour de soleil .	3
Figure 1.2: Sphère céleste.	4
Figure 1.3 : Coordonnées géométriques.	5
Figure 1.4 : Variation de la déclinaison solaire.	6
Figure 1.5 : Angle horaire.	7
Figure 1.6 : Azimut et hauteur du soleil.	8
Figure 1.7 : Angle zénithal.	8
Figure 1.8 : Angle d'incidence.	8
Figure 1.9 : Composition du spectre solaire.	10
Figure 1.10 : Composantes du rayonnement solaire au sol.	12
Figure 1.11 : Carte du monde de l'enseilllement moyen annuel.	13
Figure 2.1 : Capteurs plans.	15
Figure 2.2 : Capteurs à tube sous vide	15
Figure 2.3 : Implantation Capteur moquette (source HELIOPAC).	16
Figure 2.4 : Capteur solaire à air	16
Figure 2.5 : Concentrateur centrale a tour	17
Figure 2.6 : Concentrateur parabolique	18
Figure 2.7 : Capteur cylindro-parabolique	18
Figure 3.1 : Différents types de stockage de l'énergie thermique.	19
Figure 3.2 : Chaleur (enthalpie) emmagasinée dans un matériau lors d'un changement de phase solide liquide.	20
Figure 3.3 : L'enthalpie spécifique en fonction de la température Courbe(a) pour un corps pur, courbe(b) pour un mélange.	23
Figure 3.4 : Classification des MCP.	25
Figure 3.5 : Les pommes contiennent un MCP.	29
Figure 3.6 : Récipients du sang contient un MCP.	29
Figure 3.7 : Evolution théorique de Température en fonction du temps	31
Figure 3.8 : Solidification présentant une surfusion.	31
Figure 4.1: Propriétés géométriques de la parabole	34
Figure 4.2: Graphe d'une parabole d'équation : $y = \frac{x^2}{2p}$.	36

Figure 4.3: Angle d'ouverture d'une parabole en fonction de la distance focale.....	37
Figure 4.4 : Surface d'ouverture du collecteur et du récepteur.	38
Figure 4.5 : Loi de la réflexion.....	39
Figure 4.6 : Variation du coefficient de réflexion en fonction de la longueur d'onde	40
Figure 4.7 : Coupe longitudinale/radial d'un récepteur du capteur cylindro-parabolique.	41
Figure 4.8: Coefficient d'absorption de surfaces peintes.....	42
Figure 4.9 : Montage d'un capteur cylindro- parabolique.	43
Figure 4.10 : La conduction.	44
Figure 4. 11 : Exemple de convection.	44
Figure 4.12 : Schématisation des échanges thermiques entre les différents éléments du collecteur cylindro-parabolique.....	45
Figure 5.1 : Les différentes dimensions de concentrateur cylindro-prabolique.....	51
Figure 5.2 : Surface de réflecteur.....	53
Figure 5.3 : Courbe de la parabole tracée avec Logiciels de la Parabola.....	53
Figure 5.4 : Courbe de la parabole $y = \frac{x^2}{2p}$ tracée avec Excel.....	54
Figure 5.5 : Evolution de la température de sortie d'eau et de la température de fusion du MCP en fonction de la longueur des récepteurs.	58
Figure 5.6: Etape de réalisation de cadre de support pour la structure cylindrique équivalent.....	59
Figure 5.7 : Étapes d'installation des panneaux en polystyrène.....	60
Figure 5.8 : Etape de fabrication des feuilles en aluminium.....	61
Figure 5.9 : Étapes d'installation des tôles d'aluminium.....	62
Figure 5.10 : Dimensions de la cannette 1.....	63
Figure 5.11 : Dimensions de la cannette 2.....	63
Figure 5.12 : La surface d'échange de récepteur.....	63
Figure 5.13 : La cire de paraffine.....	68
Figure 5.14 : Colle époxy rapide Alteco en 2 tubes A/B.....	69
Figure 5.15 : La colle polyester.....	70
Figure 5.16 : Découpe et perçage de canettes.....	71
Figure 5.17: Découpe et perçage des ailettes.....	72
Figure 5.18 : Étapes de préparation du récepteur.....	74
Figure 5.19 : Étapes d'installation des récepteurs à l'emplacement spécifié.....	75

Figure 5.20 : Réservoir d'eau.....	78
Figure 5.21 : La pompe.....	78
Figure 5.22: Schéma d'acquisition de données avec thermocouple.....	79
Figure 5.23 : Thermocouple couple de type K.....	80
Figure 5.24 : Pico Technology Enregistreur de données, Température.....	80
Figure 6.1 : Composants du capteur solaire cylindro _parabolique pendant l'expérience.....	82
Figure 6.2 : Courbes des températures au cours du 1 ^{er} test le 11/09/2024	84
Figure 6.3 : Courbes des températures au cours du 2 ^{eme} test le 17/09/2024	85
Figure 6.4: Courbes des températures au cours du 3 ^{eme} test le 29/09/2024.....	86
Figure 6.5 : Courbes des températures au cours du 1er test le 12/09/2024.....	88
Figure 6.6 : Courbes des températures au cours du 2eme test le 15/09/2024.....	89
Figure 6.7 : Courbes des températures au cours du 3eme test le 1/10/2024.....	90
Figure 6.8 : Courbes des températures au cours du 1er test le 9/10/2024 Cycle de charge	92
Figure 6.9 : Courbes des températures au cours du 1er test le 9/10/2024 Cycle Décharge	93
Figure 6.10 : Courbes des températures au cours du 2eme test le 13/10/2024 Cycle de charge.	94
Figure 6.11 : Courbes des températures au cours du 2eme test le 13/10/2024 Cycle Décharge..	95
Figure 6.12 : Courbes des températures au cours du 3eme test le 14/10/2024 Cycle de charge..	97
Figure 6.13 : Courbes des températures au cours 3eme test le 14/10/2024 Cycle Décharge	98
Figure 6.14 : Courbes des températures au cours du 4eme test le 16/10/2024 Cycle de charge..	99
Figure 6.15 : Courbes des températures au cours du 4eme test le 16/10/2024 Cycle Décharge..	99

Liste des tableaux

Tableau 1.1: Résumé de la capacité solaire en Algérie	12
Tableau 3.1 : Avantages et inconvénients des MCP.	28
Tableau 5.1: Coordonnées de quelques points de notre courbe.....	53
Tableau 5.2 : Evolution de la température en fonction de la longueur du récepteur.....	57
Tableau 5.3 : Caractéristiques de paraffine.....	66
Tableau 5.4 : Caractéristiques du capteur cylindro-parabolique.....	76
Tableau 5.5 : Les caractéristiques des matériaux utilisés.....	76
Tableau 6.1 : Paramètres des jours (11 , 17, 29 septembre 2024)	80
Tableau 6.2 : Rayonnement global sur un plan fixe pour les journées du (11, 17, 29 Septembre à Tizi-Ouzou)	81
Tableau 6.3 : Les températures obtenues au cours du 1 ^{eme} test.....	81
Tableau 6.4 : Les températures obtenues au cours du 2 ^{eme} test.....	82
Tableau 6.5 : Les températures obtenues au cours du 3 ^{eme} test.....	83
Tableau 6.6 : Paramètres des jours (12, 15 Septembre et 1er Octobre 2024)	84
Tableau 6.7 : Rayonnement global sur un plan fixe pour les journées du (12,15 Septembre et 1er Octobre 2024 à Tizi-Ouzou)	84
Tableau 6.8 : Les températures obtenues au cours du 1 ^{er} test.....	85
Tableau 6.9 : Les températures obtenues au cours du 2 ^{eme} test.....	86
Tableau 6.10 : Les températures obtenues au cours du 3 ^{eme} test.....	87
Tableau 6.11 : Paramètres des jours (09, 13, 14, 16 Octobre 2024).....	88
Tableau 6.12 : Rayonnement global sur un plan fixe pour les journées du 09,13,14,16 Octobre 2024 à Tizi-Ouzou).....	88
Tableau 6.13 : Les températures obtenues au cours du 1 ^{er} test.....	89
Tableau 6.14 : Les températures obtenues au cours du 1 ^{er} test.....	90
Tableau 6.15 : Les températures obtenues au cours du 2 ^{eme} test.....	92
Tableau 6.16 : Les températures obtenues au cours du 2 ^{eme} test.....	93
Tableau 6.17 : Les températures obtenues au cours du 3 ^{eme} test.....	94
Tableau 6.18 : Les températures obtenues au cours du 3 ^{eme} test.....	95
Tableau 6.19 : Les températures obtenues au cours du 4 ^{eme} test.....	96
Tableau 6.20 : Les températures obtenues au cours du 4 ^{eme} test.....	97

Nomenclature

<u>Chapitre 1 : Gisement solaire</u>	
δ : La déclinaison du Soleil	[Degré°]
ω : Angle horaire du soleil	[Degré°]
θ_z : Angle zénithal	[Degré°]
ω_0 : L'angle horaire au coucher du soleil	[Degré°]
S_0 : La durée du jour	[Heure]
I : La valeur corrigée de la constante solaire	[W/m ²]
<u>Chapitre 3 : Généralités sur les matériaux à changement de phases</u>	
MCP : Les matériaux à changement de phase	[-]
T_F : Température de fusion	K
T_i : Température initiale	K
T_f : Température finale	K
<u>Chapitre 4 : Etude théorique d'un concentrateur solaire Cyllindro-parabolique</u>	
ψ : Angle d'ouverture d'une parabole	[Degré°]
d : Diamètre de l'ouverture de la parabole.	[m]
f : Distance focale	[m]
P_f : La profondeur de la parabole	[m]
A_a : La surface d'ouverture	[m ²]
S : La longueur de l'arc de la parabole	[m]
A : Surface cylindro-parabolique	[m ²]
L : La longueur de cylindro-parabolique	[m]
A_r : La surface du récepteur	[m ²]
C : Le taux de concentration	[-]
\emptyset : Flux de chaleur	J/s
λ : Conductivité thermique	[W/m. K]
A : Surface d'échange	[m ²]
h : Le coefficient de transfert de chaleur par convection	W/(m ² .K)
S : La surface de contact entre le fluide et le solide	[m ²]
T_p : La température de la surface du solide	K
T_f : La température du fluide environnant	K
ϵ : Émissivité thermique du matériau.	[-]
σ : Constante de Stefan-Boltzmann	W/(m ² . K ⁴)
T : Température absolue du corps.	K

Pr : Le nombre de Prandtl	[-]
Re : Le nombre de Reynolds.	[-]
Nu : Le nombre de Nusselt	[-]
μ : La viscosité dynamique	[kg/s.m]
ν : Viscosité cinématique	[m ² / s]
ρ : Masse volumique	[kg /m ³]
\dot{m} : Débit massique	[Kg/s]
Cp : Chaleur spécifique	[J /kg.K]
T_{MCP} : Température de fusion de MCP	[K]
a_v : Coefficient d'absorption de la cannette.	[-]
ρ_c : Coefficient de réflexion du collecteur	[-]
η_v : Coefficient de transmission de la vitre	[-]
ρ_c : Réflectivité du miroir	[-]
p_c : Puissance reçue à l'ouverture du collecteur	W
A_{rec} : La surface d'échange du récepteur	m ²

Résumé :

Notre travail consiste à étudier et réaliser un concentrateur solaire cylindro_parabolique, de deux mètres de long et de un mètre de large, avec stockage d'énergie utilisant un matériau à changement de phase pour produire de l'eau chaude sanitaire. A travers cette expérimentation, nous visons à améliorer les performances du capteur thermique et à augmenter son rendement en prolongeant la période de rétention de chaleur. Ce qui améliore l'efficacité d'utilisation de l'énergie solaire. Nous prévoyons également de mesurer les températures et d'évaluer l'efficacité du système à différents intervalles en faisant plusieurs tests d'évaluation, ce qui nous permettra d'améliorer la conception du système et de varier les matériaux utilisés à l'avenir.

Mots clés : concentrateur solaire cylindro_parabolique, matériau à changement de phase, l'énergie solaire

ملخص

يتكون عملنا من دراسة وإنتاج مكثف شمسي مكافئ أسطواني بطول مترين وعرض متر واحد، مع تخزين الطاقة باستخدام مادة متغيرة الطور لإنتاج الماء الساخن المنزلي. نهدف من خلال هذه التجربة إلى تحسين أداء الحساس الحراري وزيادة كفاءته من خلال إطالة فترة الاحتفاظ بالحرارة. مما يحسن كفاءة استخدام الطاقة الشمسية. ونخطط أيضًا لقياس درجات الحرارة وتقييم كفاءة النظام على فترات مختلفة من خلال إجراء العديد من اختبارات التقييم، مما سيسمح لنا بتحسين تصميم النظام وتنوع المواد المستخدمة في المستقبل.

الكلمات المفتاحية: مكثف شمسي مكافئ أسطواني، مادة متغيرة الطور، الطاقة الشمسية

Abstract:

Our work consists of studying and realizing a cylindrical parabolic solar concentrator, two meters long and one meter wide, with energy storage using a phase change material to produce domestic hot water. Through this experiment, we aim to improve the performance of the thermal collector and increase its efficiency by extending the heat retention period. This improves the efficiency of using solar energy. We also plan to measure temperatures and evaluate the efficiency of the system at different intervals by doing several evaluation tests, which will allow us to improve the design of the system and vary the materials used in the future.

Keywords: Cylindrical-parabolic solar concentrator, PMC, solar energy

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

Résumé

Introduction générale 1

Chapitre 1 : Gisement solaire

1.1 Mouvement du globe terrestre..... 3

1.2 La sphère céleste 4

1.3 Coordonnées géographiques terrestres..... 4

1.4 Coordonnées horaires 5

1.4.1 La déclinaison du Soleil (δ) 5

1.4.2 Angle horaire du soleil (ω) 6

1.5 Coordonnées horizontales 7

1.5.1 Hauteur du soleil 7

1.5.2 Azimut du soleil..... 8

1.5.3 Angle zénithal (z)..... 8

1.5.4 Angle d'incidence..... 9

1.6 Durée d'insolation 9

1.7 Rayonnement solaire 9

1.7.1 Rayonnement hors atmosphère d'un lieu..... 9

1.7.2 Rayonnement solaire en atmosphère 9

1.8 La constante solaire 10

1.9 Rayonnement solaire arrivant au sol 11

1.9.1 Rayonnement global 11

1.9.2 Rayonnement solaire direct..... 11

1.9.3 Rayonnement solaire diffus 11

1.9.4 Rayonnement solaire réfléchi (Albédo) 11

1.10 Le rayonnement solaire en Algérie 12

1.11 Conclusion..... 13

Chapitre 2 : Les capteurs solaires thermiques

2.1 Définition 14

2.2	Les différents types de capteur solaire	14
2.2.1	Capteurs sans concentration (stationnaires).....	14
2.2.2	Capteurs à concentration.....	17
Chapitre 3 : Généralités sur les matériaux à changement de phase		
3.1	Différentes technologies de stockage thermique.....	19
3.1.1	Stockage thermique sensible	20
3.1.2	Stockage thermique latent	22
3.2	Définition d'un matériau à changement de phase (MCP).....	23
3.3	Propriétés des matériaux à changement de phase	24
3.4	Comment ça marche.....	25
3.5	Types des matériaux à changement de phase (MCP)	25
3.5.1	Les MCP Organiques.....	25
3.5.2	Les MCP Inorganiques.....	27
3.5.3	Les MCP Eutectiques.....	27
3.6	Avantages et inconvénients	27
3.7	Domaines d'applications des MCP.....	29
3.7.1	Transport de produits alimentaires et de médicaments.....	29
3.7.2	MCP dans Textile.....	29
3.7.3	MCP en réfrigérateur domestique	29
3.7.4	Stockage de l'énergie solaire par MCP	30
3.7.5	Isolation des bâtiments.....	30
3.8	Les problèmes liés au changement de phase.....	30
3.9	Conclusion.....	32
Chapitre 4 : Etude théorique d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique		
4.1	Principe de fonctionnement.....	33
4.2	La géométrie du concentrateur cylindro-parabolique	34
4.2.1	Géométrie parabolique.....	34
4.2.2	Système optique d'une surface cylindro parabolique	38
4.3	Composants d'un concentrateur solaire parabolique	39
4.3.1	Réflecteur.....	39
4.3.2	Récepteur	41
4.3.3	Fluide caloporteur	42
4.4	Positionnement du concentrateur cylindro-parabolique.....	42
4.5	Les différents modes de transferts thermiques dans un capteur solaire	43

4.5.1	La conduction.....	43
4.5.2	La convection.....	44
4.5.3	Le rayonnement	44
4.6	Bilan thermique sur le concentrateur cylindro- parabolique.....	45
	Transfert de chaleur entre MCP et le fluide caloporteur	46
4.7	Les pertes thermiques	47
4.7.1	Pertes par Convection	47
4.7.2	Les pertes par rayonnement	48
4.8	Conclusion.....	48
Chapitre 5 : Réalisation du concentrateur solaire cylindro-parabolique		
5.1	Les différentes étapes de réalisation.....	49
5.1.1	Le réflecteur	50
5.1.2	Bilan thermique.....	54
5.1.3	Réalisation de réflecteur solaire.....	58
5.1.4	Le récepteur	61
5.1.5	Réalisation de récepteur.....	69
5.1.6	Fabrication du stockeur.....	76
5.1.7	La pompe	77
5.2	Mesure de température	78
5.2.1	Les Thermocouples	78
5.2.2	Types de thermocouples :.....	78
5.2.3	Comment lire les données.....	79
5.2.4	Les graphes	79
5.3	Conclusion.....	79
Chapitre 6 : Résultats et discussions		
6.1	L'expérimental	81
6.1.1	Les résultats obtenus avec le capteur cylindro-parabolique sans verre	81
➤	Le premier test réalisé le 11/09/2024.....	82
➤	Le deuxième test réalisé le 17/09/2024	83
➤	Le troisième test réalisé le 29/09/2024	84
6.1.2	Les résultats obtenus avec le capteur cylindro-parabolique avec verre	85
➤	Le premier test réalisé le 12/09/2024	86
➤	Le deuxième test réalisé le 15/09/2024	87
➤	Le troisième test réalisé le 1/10/2024	88

6.1.3	Le cycle stockage/déstockage	89
➤	Le premier test réalisé le 9/10/2024	90
➤	Le deuxième test réalisé le 13/10/2024	92
➤	Le troisième test réalisé le 14/10/2024	95
➤	Le quatrième test réalisé le 16/10/2024	97
6.2	Discussion des résultats	99
6.3	Étude d'efficacité du chauffage	100
6.4	Problèmes rencontrés	102
6.5	Conclusion :	103
Chapitre 7 : Présentation du projet startup		
7.1	Premier axe : Présentation du projet	104
7.1.1	Idée de projet (solution proposée)	104
7.1.2	Valeurs proposées pour le projet de capteur solaire cylindro-parabolique	104
7.1.3	L'équipe du projet est composée des membres suivants :	105
7.1.4	Notre objectif	105
7.1.5	Calendrier d'achèvement du projet	106
7.2	Deuxième axe : Aspects innovants	106
7.2.1	Nature des innovations	106
7.3	Troisième axe : Analyse stratégique du marché	107
7.3.1	Le segment du marché	107
7.3.2	Mesurer l'intensité concurrentielle	107
7.3.3	Stratégie marketing	108
7.4	Quatrième axe : Plan de production et organisation	108
7.4.1	Processus de production	108
7.4.2	La main d'œuvre	108
7.4.3	Partenaires clés	109
7.5	Cinquième axe : Plan financier	109
7.5.1	Coûts et frais	109
7.5.2	Le Chiffre d'affaires	110
Conclusion générale		111

Introduction générale

L'énergie solaire, l'origine de la vie sur Terre, est exploitée depuis l'aube de l'histoire par les humains. Il existe de nombreuses technologies pour produire de la chaleur pour différentes applications (chauffage, distillation, climatisation et électricité) et la consommation d'énergie a augmenté ces dernières années avec une croissance rapide des secteurs résidentiel, commercial et industriel.

Une des technologies les plus fréquemment utilisées pour exploiter cette forme d'énergie, est le capteur solaire thermique, plan ou à concentration.

Bien que cette énergie soit très largement disponible à la surface de la terre, sa variabilité dans la journée et au cours de l'année, son rendement de conversion souvent faible et son niveau d'énergie aléatoire, rendent cette énergie peu commandable d'utilisation.

C'est dans le but d'améliorer l'efficacité thermique d'une installation solaire et sa capacité à fournir de l'énergie en continu, que nous avons conçu un capteur solaire à concentration cylindro-parabolique muni d'un système de stockage d'énergie par le biais d'un matériau à changement de phase.

Le travail de mémoire est scindé en cinq chapitres, décrits ci-après :

Le premier chapitre est consacré à l'étude du gisement solaire, où les définitions de base du rayonnement solaire sont rappelées. De plus, une explication détaillée des systèmes de coordonnées utilisés pour déterminer l'emplacement du soleil et son effet sur Terre a été abordée.

Dans le second chapitre, nous avons rapporté les différents types de systèmes solaires thermiques existants. Les systèmes les plus courants sont examinés avec leurs caractéristiques essentielles, leurs avantages et inconvénients ainsi que l'analyse de la façon dont chacun d'entre eux fonctionne.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude des matériaux à changement de phase, ces matériaux jouent un rôle important dans les systèmes solaires et leur efficacité thermique. Ainsi, nous avons rapporté dans ce chapitre, les différents matériaux utilisés dans ce domaine avec leurs propriétés thermo physiques essentielles, notamment leur température de fusion et leur chaleur latente.

Les principes qui sont à la base de la conception du concentrateur sont rappelés, ainsi que la théorie explicative de la concentration par une surface parabolique et son efficacité.

Dans le cinquième chapitre, l'accent a été mis sur le processus de création d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique, où les étapes techniques et d'ingénierie nécessaires pour concevoir et fabriquer ce système ont été investiguées.

Dans le sixième chapitre, les résultats expérimentaux visant à suivre les variations de température dans différentes conditions, telles que l'influence des conditions météorologiques, seront présentées et analysées. Ce chapitre met en lumière l'efficacité du système solaire étudié, la performance des matériaux à changement de phase (MCP) utilisés, ainsi que les variations du stockage thermique en fonction des conditions de fonctionnement.

Le chapitre sept présente une vue d'ensemble de notre projet au sein de l'entreprise émergente, en abordant l'idée du projet, ainsi que ses objectifs, le plan de mise en œuvre et les innovations technologiques proposées. Il comprend également une analyse du marché et de la concurrence, et rappelle les détails du processus de production, l'organisation, les principaux partenaires, ainsi que le plan financier, qui inclut des estimations des coûts et des revenus potentiels.

Enfin, la conclusion récapitule les points clés ressortis des résultats atteints, tout en mettant en évidence les principales destinations théoriques et pratiques qui contribuent à la promotion de l'énergie solaire. La conclusion comprend également de futures recommandations pour des études supplémentaires et des améliorations possibles des technologies utilisées.

Chapitre 1 : Gisement solaire

À une époque où le monde s'efforce d'atteindre la durabilité et de réduire sa dépendance aux sources d'énergie traditionnelles, l'énergie solaire apparaît comme l'une des options les plus prometteuses pour répondre aux besoins énergétiques futurs. L'exploitation de cette énergie renouvelable dépend d'une compréhension globale de ses caractéristiques et de ses ressources, que ce chapitre aborde en détail.

Ce chapitre comprend une étude complète de gisement solaire, en commençant par les concepts de base sur le mouvement de la Terre et son effet sur le rayonnement solaire, en passant par une explication des systèmes de coordonnées utilisées pour déterminer la position du Soleil dans le ciel, tels que les systèmes géographiques et les coordonnées temporelles. Nous passerons également en revue les différentes formes de rayonnement solaire, notamment le rayonnement direct et diffus, ainsi que l'effet de l'atmosphère sur ces phénomènes. Focus sur le cas de l'Algérie comme cas d'étude riche en potentiel énergétique solaire.

1.1 Mouvement du globe terrestre

La rotation façonne essentiellement le mouvement de la Terre. La rotation fait référence à la rotation de la Terre sur son axe pendant 24 heures, entraînant une alternance du jour et de la nuit. C'est le mouvement de rotation propre de la Terre.

Elle tourne en même temps autour du soleil selon une trajectoire elliptique pendant environ 365.25 jours, c'est le mouvement de précession de la terre ou tour du soleil, qui se fait en une année. Les saisons changent en raison de l'inclinaison de l'axe de la Terre de 23,5 degrés.

[1]

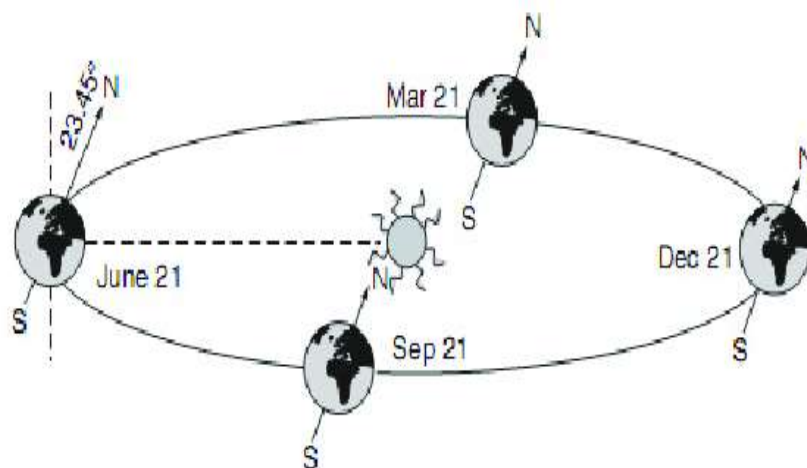


Figure 1.1 : Orbite de la terre autour de soleil.

1.2 La sphère céleste

La sphère céleste est une sphère imaginaire de rayon aléatoire, centrée autour de la Terre, sur laquelle on définit différentes coordonnées pour déterminer l'emplacement des corps célestes, ainsi que leurs trajectoires apparentes dans le ciel. Les coordonnées les plus couramment utilisées sont la longitude et la latitude célestes. La longitude céleste mesure l'angle Est-Ouest autour de la sphère céleste à partir d'un point de référence appelé point vernal, tandis que la latitude céleste mesure l'angle Nord-Sud par rapport à l'équateur céleste, fournissant ainsi une valeur uniforme, cadre de référence pour observer le ciel de n'importe où sur terre.[2]

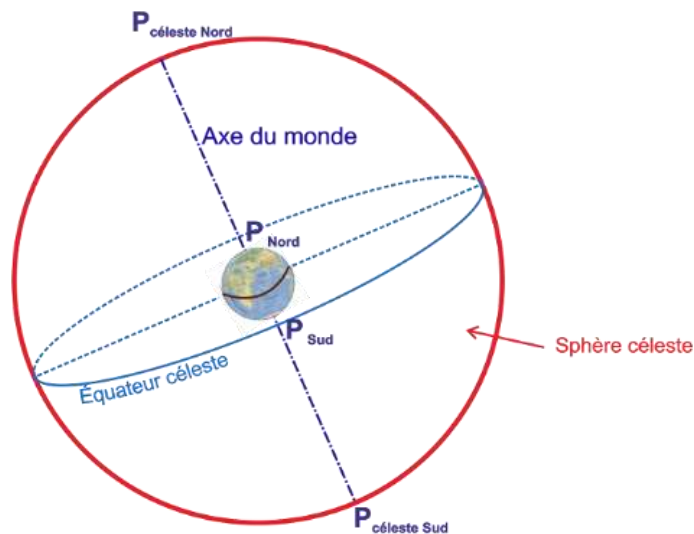


Figure 1.2 : Sphère céleste.

1.3 Coordonnées géographiques terrestres

Un système appelé coordonnées géographiques terrestres permet de localiser des points précis sur la surface de la Terre. La latitude, la longitude et l'altitude sont les composantes principales. La latitude est une mesure angulaire qui indique la position d'un point sur la Terre par rapport à l'équateur, considérée comme la latitude zéro (0°).

Il peut être représenté en degrés ($^\circ$), minutes ($'$) et secondes ($''$). La latitude a des valeurs positives dans l'hémisphère Nord (jusqu'à $+90^\circ$) et négatives dans l'hémisphère Sud (jusqu'à -90°). La longitude indique la position d'un point vers l'Est ou l'Ouest par rapport au méridien de Greenwich en Angleterre.

Les valeurs de longitude vont de 0° à 180° , mesurées à partir du méridien de Greenwich et orientées vers l'Est et l'Ouest.

Enfin, la mesure de la hauteur d'un point par rapport au niveau moyen de la mer est appelée altitude. En règle générale, sa mesure est exprimée en mètres.[3]

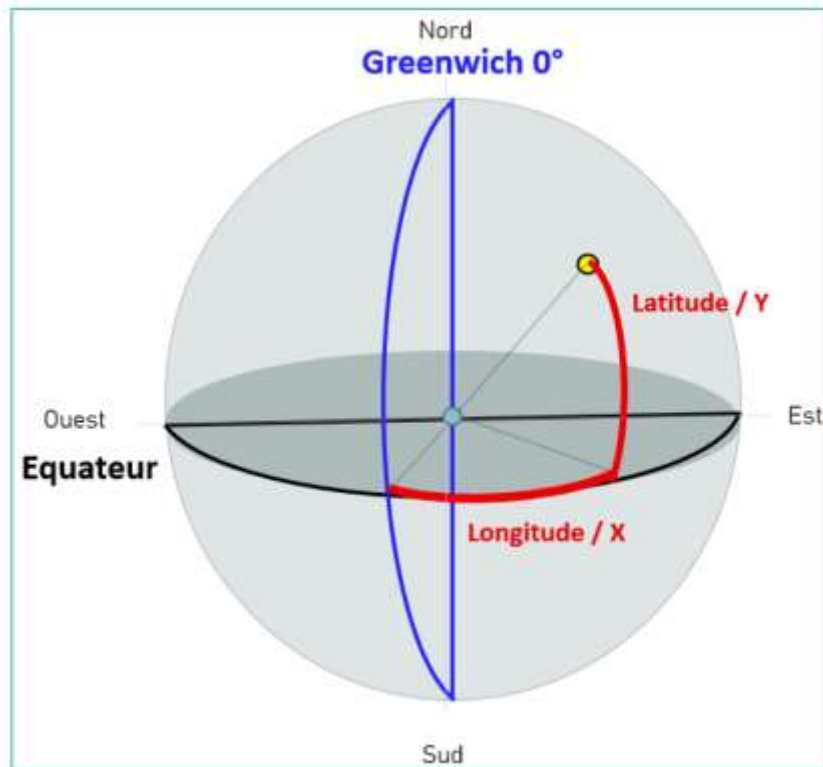


Figure 1.3 : Coordonnées géométriques. [3]

1.4 Coordonnées horaires

Les coordonnées horaires dépendent uniquement de l'heure d'observation et non du lieu d'observation. Il est formé des deux coordonnées suivantes :

1.4.1 La déclinaison du Soleil (δ)

L'angle δ du soleil est l'angle entre l'écliptique et le plan de l'équateur terrestre.

En raison de l'inclinaison de l'axe de la Terre et de sa rotation annuelle, l'angle de déclinaison varie au cours de l'année. Au solstice d'hiver, la déclinaison du soleil est de $-23,44$ degrés (en dessous de l'équateur) et elle vaut $+23,44$ degrés (au-dessus de l'équateur) au solstice d'été.

La déclinaison du soleil est nulle aux équinoxes, c'est-à-dire que les rayons solaires sont parallèles au plan équatorial. L'équation de Copernic, en prenant la déclinaison comme constante sur une journée, donne la relation entre ces deux grandeurs δ :

$$\delta = 23,45 \left[\sin\left(\frac{2\pi(284+d)}{365}\right) \right] \quad (1.1)$$

d : représente le numéro de la journée de l'année à partir du premier janvier.

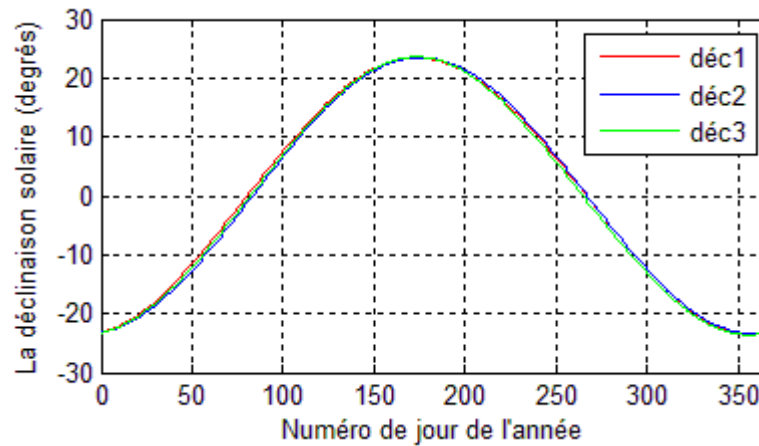


Figure 1.4 : Variation de la déclinaison solaire. [4]

1.4.2 Angle horaire du soleil (ω)

L'angle ou l'arc situé sur le plan équatorial dans le sens rétrograde s'étendant de l'axe sud plan méridien du lieu vers la ligne méridienne traversant le centre du soleil est appelé angle horaire. Cet angle détermine le temps solaire vrai (TSV). L'heure de midi (TSV) augmente de 15 degrés par heure pendant 24 heures, soit une rotation complète de 360 degrés. Lorsque l'angle $\omega = 0$, cela signifie qu'il correspond à la longitude locale.

La formule ci-dessous donne l'angle horaire ω ($^{\circ}$) :

$$\omega = 15 (\text{TSV} - 12) \quad (1.2)$$

TSV : est le temps solaire vrai en heure, se calcule par l'équation suivante :

$$\text{TSV} = \text{TU} + \frac{L}{15} + \text{ET} \quad (1.3)$$

$$\text{ET} = 9,8 \sin(2\beta) - 7,53 \cos \beta - 1,5 \sin \beta \quad (1.4)$$

$$\beta = \frac{2\pi(284 + d)}{365} \quad (1.5)$$

TU : est le temps universel du méridien de GREENWICH (GTM).

ET : équation du temps.

β : exprimé en radians, dépend du numéro du jour de l'année.

L : exprimé en radians, est latitude .

Cette formule n'est pas valable pour les heures de lever et de coucher du soleil. L'angle horaire du coucher, et lever dépendent de la déclinaison et de la latitude du lieu :

$$\omega_0 = \cos^{-1} (-\tan \varphi \tan \delta) \quad (1.6)$$

φ : latitude du lieu

L'angle horaire du coucher est tout simplement l'opposé de l'angle horaire du lever.

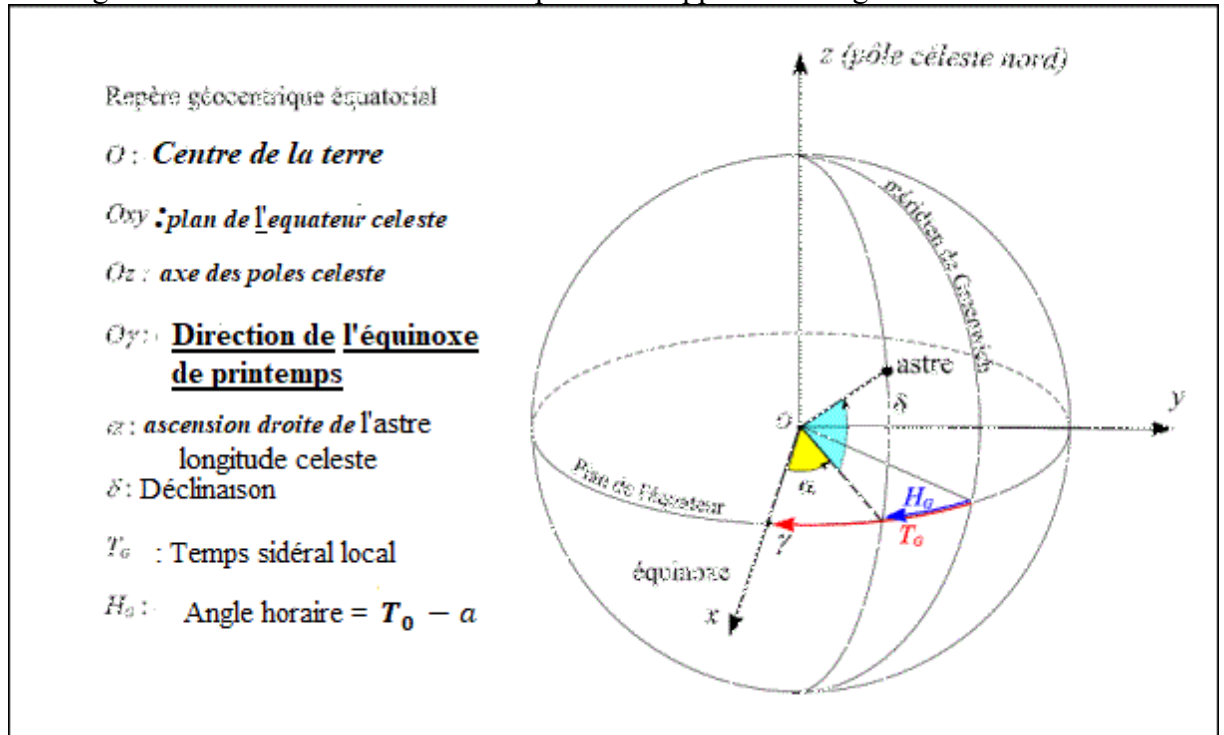


Figure 1.5 : Angle horaire. [5]

1.5 Coordonnées horizontales

1.5.1 Hauteur du soleil

L'angle qui se forme entre la direction de l'étoile et son position sur le plan horizontal est appelé l'élévation angulaire du soleil, et il varie en fonction de divers facteurs tels que la déviation d'angle, le temps et la latitude. En général, elle est exprimée en degrés, minutes et secondes. Il n'a pas de valeur au lever ou au coucher du soleil et est maximal à midi solaire.

De telle façon que :

$$\sin h = \cos \delta \cos \omega \cos \varphi + \sin \delta \sin \varphi \quad (1.7)$$

1.5.2 Azimut du soleil

C'est l'angle mesuré dans le plan horizontal du lieu compris entre la direction "Nord" et la projection du soleil sur ce plan. La direction "Sud" du lieu est quelque fois prise comme référence des azimuts.

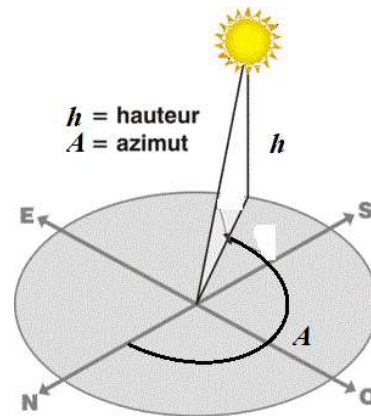


Figure 1.6 : Azimut et hauteur du soleil.[6]

1.5.3 Angle zénithal (z)

C'est l'angle entre la ligne perpendiculaire à la surface de la Terre au point d'observation et la ligne reliant l'observateur à l'objet céleste. Lorsque le soleil est directement au-dessus de l'observateur, l'angle zénithal est de 0 degré, tandis que l'angle zénithal est de 90 degrés lorsqu'il est à l'horizon.

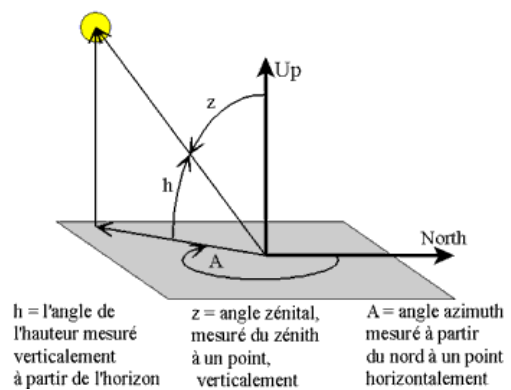


Figure 1.7: Angle zénithal. [7]

$$\cos z = \cos \omega \cos \varphi \cos \delta + \sin \delta \sin \varphi \quad (1.8)$$

1.5.4 Angle d'incidence

L'angle d'incidence désigne l'angle qui existe entre le rayon incident et la normale à la surface à l'endroit où le rayon entre en contact avec cette surface.

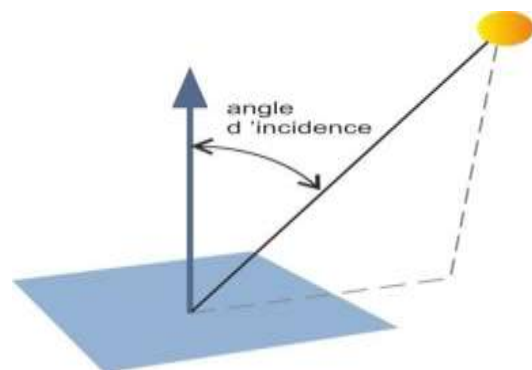


Figure 1.8 : Angle d'incidence. [8]

1.6 Durée d'insolation

L'insolation est la durée pendant laquelle la surface est exposée à la lumière du soleil, supérieure à 120 watts/m² (la norme de la Convention de l'Organisation météorologique mondiale de 1981). La durée de l'insolation est influencée par divers facteurs tels que la latitude, la saison, les conditions météorologiques et l'environnement local. L'angle direct du soleil permet aux régions les plus proches de l'équateur de bénéficier de périodes d'ensoleillement plus longues. Théoriquement c'est la durée de jour :

$$S_0 = \frac{2\omega_0}{15} \quad (1.9)$$

ω_0 : est égale à l'angle horaire au coucher du soleil (°).

S_0 : la durée du jour(h)

La durée d'insolation réelle mesurée par un héliographe est généralement inférieure à S_0 .

1.7 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est l'énergie résultant de la fusion de l'hydrogène présent dans le soleil. Cette énergie est émise sous forme de rayonnement électromagnétique qui traverse l'espace pour atteindre la Terre. La quantité reçue sur terre n'est pas constante et varie au cours de la journée en fonction des saisons, des nuages, de l'angle d'incidence et de la réflexion de la surface de l'atmosphère.

1.7.1 Rayonnement hors atmosphère d'un lieu

L'énergie électromagnétique du soleil qui atteint la surface de l'atmosphère d'un lieu est appelée rayonnement extra-atmosphérique, également appelé rayonnement extraterrestre. La situation géographique du lieu (latitude et longitude), le jour, la saison et les conditions météorologiques du soleil (vent) sont autant de facteurs qui affectent ce rayonnement. La répartition spectrale du rayonnement solaire en dehors de l'atmosphère est la suivante :

9,2% en rayonnement ultraviolet, longueur d'onde comprise entre 0,2 et 0,25 μm

42,4% visible de 0,4 à 0,8 μm

48,4% dans l'infrarouge, supérieures à 0,8 μm

1.7.2 Rayonnement solaire en atmosphère

Lorsque la lumière du soleil pénètre dans l'atmosphère, le rayonnement électromagnétique interagit avec les molécules d'air, les nuages, les aérosols et les composés atmosphériques. Dans l'atmosphère, des gaz comme l'ozone, la vapeur d'eau et le CO₂

absorbent certaines longueurs d'onde comme l'UV par l'ozone et l'IR par la vapeur d'eau et le CO₂.

Les molécules d'air diffusent les courtes longueurs d'onde et les particules, comme les poussières et les aérosols diffusent et réfléchissent les plus grandes longueurs d'ondes. Le reste du rayonnement est transmis vers la terre, sous forme de rayonnement direct ou diffus.

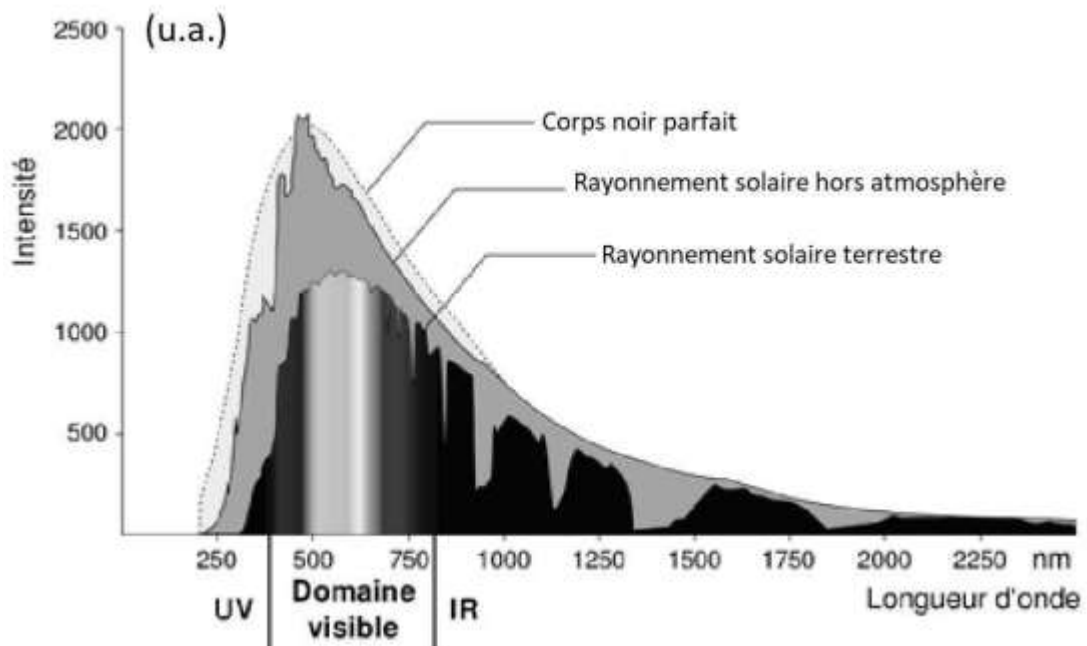


Figure 1.9 : Composition du rayonnement solaire. [9]

1.8 La constante solaire

C'est la puissance reçue par une surface unitaire placée perpendiculairement aux rayons solaires à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre lorsque la terre se trouve à la distance moyenne du soleil. Cette valeur est de 1361 W/m² et varie selon les fluctuations du cycle solaire ($\pm 1\%$). La puissance reçue par cette surface hors atmosphère varie cependant en fonction du jour de l'année, en relation avec la distance Terre-Soleil : Ainsi elle s'écrit :

$$I = 1367 (1 + 0.033 \cos \beta) \quad (1.10)$$

Le terme β représente l'angle de jour en radians. Cet angle est lié au jour de l'année (noté souvent n , avec $n=1$ pour le 1er janvier).

L'angle β est donné par la relation :

$$\beta = \frac{2\pi(n-1)}{365} \quad (1.11)$$

1.9 Rayonnement solaire arrivant au sol

1.9.1 Rayonnement global

Le rayonnement global est la somme du rayonnement direct, du diffus et du rayonnement réfléchi reçus par une surface d'un mètre carré.

1.9.2 Rayonnement solaire direct

L'intensité du rayonnement direct arrivant au sol dépend de l'épaisseur de l'atmosphère traversée, de la hauteur du Soleil, de la position géographique du lieu où le rayonnement est recueilli, de la saison et de l'heure du jour. Il diminue fortement en présence de nuages, brouillard et pollution, et sera plus important par temps clair et en milieu de journée.

1.9.3 Rayonnement solaire diffus

L'énergie solaire qui atteint la surface de la Terre après avoir été diffusée par les particules de l'atmosphère est appelée rayonnement solaire diffus. La diffusion de la lumière solaire par les molécules d'air, les particules en suspension dans l'atmosphère et les nuages provoque le rayonnement solaire diffus. La quantité de particules en suspension dans l'air et l'angle d'incidence du soleil sont des facteurs atmosphériques qui déterminent la quantité de rayonnement solaire diffusé.

1.9.4 Rayonnement solaire réfléchi (Albédo)

La capacité d'une surface à réfléchir la lumière du soleil s'appelle l'albédo. Les surfaces à albédo élevé, comme la neige et la glace, réfléchissent davantage la lumière du soleil que les surfaces à faible albédo, comme les océans et les forêts.

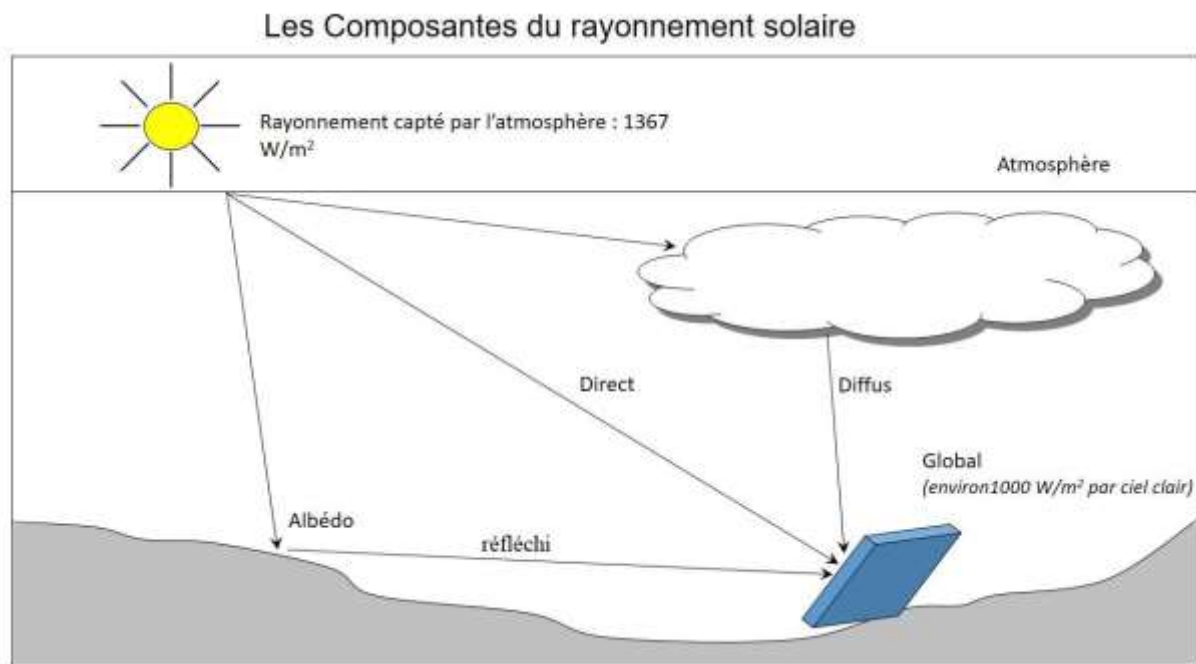


Figure 1.10 : Composantes du rayonnement solaire au sol. [10]

1.10 Le rayonnement solaire en Algérie

L'Algérie, située dans la région du Maghreb en Afrique du Nord, possède l'une des concentrations de rayonnement solaire les plus élevées au monde. Grâce à sa situation géographique favorable, l'Algérie bénéficie de l'abondance de l'énergie solaire, lui permettant d'utiliser efficacement l'énergie solaire comme source d'énergie renouvelable. [7]

La période d'insolation annuelle en Algérie dépasse 2000 heures sur la quasi-totalité de son territoire et atteint 2650 heures dans les régions côtières et 3000 Heures/an dans les hauts plateaux et jusqu'à 3500heures /an dans les régions sahariennes.

L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 mètre carré est en moyenne de $1700 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ au Nord (régions côtière) , $1900\text{Kwh /m}^2/\text{an}$ dans les hauts plateaux et peut atteindre $2560 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ dans le Sahara au Sud. Le tableau suivant résume la capacité solaire en Algérie :

Tableau 1.1: Résume la capacité solaire en Algérie. [7]

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie %	4	10	86
Durée moyenne D'enseillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne Reçue (kWh/m ² /an)	1700	1900	2560

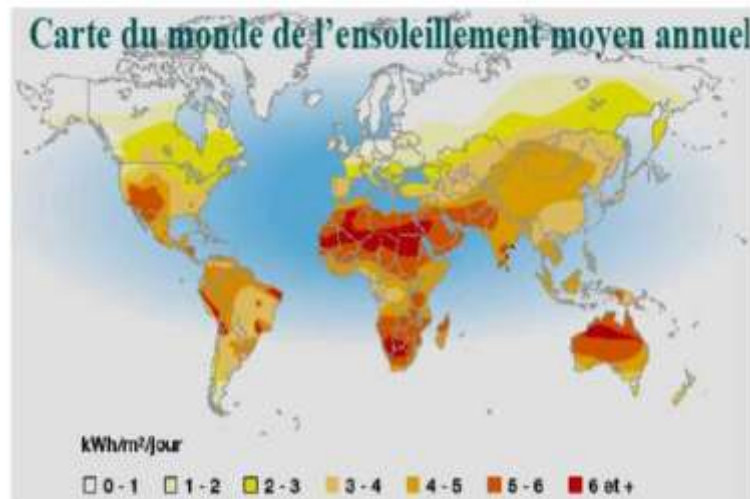


Figure 1.11 : Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel.

1.11 Conclusion

L'étude de la collecte du rayonnement solaire souligne la nécessité de créer de nouveaux sites pour l'installation de systèmes d'énergie solaire. L'orientation optimale des panneaux solaires, qui reçoivent directement l'énergie solaire, améliore considérablement les performances du système dynamique. De plus, l'utilisation de la technologie de suivi du soleil peut accroître de manière significative l'efficacité du système, car cette méthode de guidage actif permet de suivre le mouvement du soleil dans le ciel. En exploitant ces moteurs avancés, une amélioration significative de la collecte et de l'efficacité de l'énergie solaire peut être obtenue, ce qui conduit à une production solaire durable et efficace.

Chapitre 2 :

Les capteurs solaires thermiques

Les capteurs solaires thermiques constituent une technologie clé dans l'énergie solaire, qui vise à convertir la lumière du soleil en chaleur utilisable.

Dans ce deuxième chapitre, nous réaliserons une étude générale sur les capteurs solaires thermiques, en plus d'une étude approfondie sur les concentrateurs cylindro-paraboliques.

Les capteurs solaires thermiques sont une solution durable et écologique pour la production de chaleur, réduisant ainsi la dépendance aux énergies fossiles et contribuant à la lutte contre le changement climatique.

2.1 Définition

Un capteur solaire thermique est un dispositif conçu pour capter l'énergie solaire transmise par rayonnement et la transférer à un fluide caloporteur (gaz ou liquide) sous forme de chaleur.

Ils sont souvent utilisés pour chauffer l'eau destinée aux besoins domestiques, pour chauffer des bâtiments ou pour des processus industriels nécessitant de la chaleur. Les capteurs solaires thermiques se présentent sous différentes formes, tels que des panneaux plats ou à courbures et des tubes sous vide, chacun adapté à des applications spécifiques en fonction de leurs performances thermiques et de leur efficacité.

2.2 Les différents types de capteur solaire

Il existe deux types de capteurs solaires thermiques. Chaque type présente plusieurs formes, conçues pour répondre à des besoins spécifiques de conversion de l'énergie solaire en chaleur. Voici quelques-uns des principaux types de capteurs solaires :

2.2.1 Capteurs sans concentration (stationnaires)

➤ Capteurs plans [11]

Les capteurs planaires sont certainement la technologie la plus ancienne, la plus répandue et la plus étudiée pour les applications basse température (eau chaude sanitaire et chauffage).

Un capteur planaire est un système relativement simple constitué d'une surface « noire » plane qui absorbe l'énergie solaire et qui est munie d'un moyen de transfert de l'énergie absorbée au fluide caloporteur, ainsi que d'un couvercle qui protège l'absorbeur tout en étant transparent à la lumière du soleil radiant. La face arrière de l'absorbeur ainsi que les côtés du caisson où tout est inséré sont isolés pour réduire les pertes thermiques par conduction.

Dans les capteurs à circulation de fluide, le fluide caloporteur circule dans des tubes, et remplacés par des conduits dans les capteurs à air.



Figure 2.1 : Capteurs plans [11].

➤ Capteurs à tube sous vide

Les collecteurs à tubes sous vide, également connus sous le nom de capteurs solaires à tubes sous vide, sont une technologie de collecte d'énergie solaire utilisée pour convertir la lumière du soleil en énergie thermique avec un rendement supérieur. Ils sont principalement utilisés pour chauffer l'eau, mais peuvent également être utilisés pour chauffer l'air ou pour d'autres applications nécessitant de l'énergie thermique. Le fluide caloporteur circule dans des tubes fins servant d'absorbeur insérés dans des tubes concentriques dans lesquels le vide est fait pour réduire les pertes de chaleur. Ils sont surtout utilisés dans les pays froids.



Figure 2.2 : Capteurs à tube sous vide. [12]

➤ Capteur non vitré

C'est un type de capteur solaire qui n'a pas de verre pour recouvrir la surface absorbante. Contrairement aux capteurs vitrés qui utilisent du verre transparent pour transmettre et retenir la chaleur du soleil, les capteurs non vitrés sont ouverts à l'air. Il est principalement utilisé pour chauffer l'air ou l'eau à des températures modérées, entraînant cependant des pertes de chaleur assez importantes.



Figure 2.3 : Implantation Capteur moquette (source HELIOPAC) [11].

➤ Capteur solaire à air

Un capteur solaire à air est un dispositif conçu pour capter la chaleur solaire et la transférer à un flux d'air pour le réchauffer, offrant ainsi une solution durable et respectueuse de l'environnement pour une variété d'applications telle que le chauffage, le séchage et la ventilation.



Figure 2.4 : Capteur solaire à air [11].

2.3 Capteurs à concentration

Les capteurs à concentration comme tout capteur thermique est un dispositif destiné à absorber le rayonnement solaire et à transmettre la chaleur ainsi produite à un fluide caloporteur. Dans ces systèmes à concentration, le rayonnement solaire est reçu par une surface d'ouverture puis dirigé vers un absorbeur de surface plus petite grâce à une ou plusieurs réflexions.

2.3.1 Concentrateur central à tour

Ce type de centrale solaire thermique est constitué de plusieurs miroirs (héliostats) conçus pour s'orienter vers le soleil et diriger la lumière solaire vers une zone située au sommet de la tour centrale où se trouve un récepteur thermique contenant un fluide caloporteur. Dans le récepteur, la chaleur concentrée est tellement importante qu'elle permet d'obtenir des températures du fluide caloporteur pouvant dépasser 1000°C , transformant un liquide en vapeur surchauffée pour entraîner une turbine et produire de l'électricité. [13]



Figure 2.5 : Concentrateur centrale a tour. [13]

➤ Concentrateur parabolique

Un concentrateur parabolique est un appareil qui permet de concentrer la lumière solaire en utilisant un réseau de miroirs incurvés sur un récepteur central contenant un fluide caloporteur comme de l'huile thermique ou de l'eau. Le fluide est chauffé à des températures extrêmement élevées par la lumière solaire concentrée. Ensuite, cette chaleur peut être exploitée afin de produire de la vapeur et d'alimenter une turbine connectée à un générateur électrique.

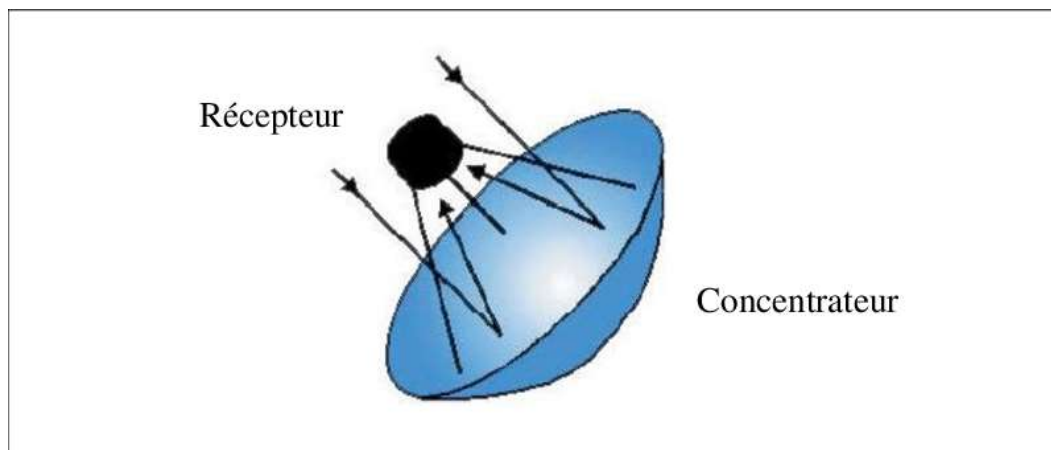


Figure 2.6 : Concentrateur parabolique. [14]

➤ Concentrateur cylindro-parabolique

Un capteur cylindro-parabolique est un type de dispositif utilisé dans les centrales solaires thermiques pour concentrer la lumière solaire sur une ligne focale. Il est constitué d'un miroir cylindro-parabolique linéaire qui collecte et concentre le rayonnement solaire sur un tube récepteur situé le long de sa ligne focale. Ce système permet de chauffer un fluide caloporteur à des températures élevées, qui peut ensuite être utilisé pour produire de l'électricité ou pour d'autres applications comme la climatisation solaire ou la désalinisation.

Les centrales solaires à capteurs cylindro-paraboliques sont particulièrement adaptées aux régions arides et désertiques où l'ensoleillement est intense et constant.



Figure 2.7 : Capteur cylindro-parabolique. [14]

Chapitre 3 :

**Généralités sur les matériaux à
changement de phase**

L'énergie solaire reste une ressource inépuisable et essentielle pour la transition vers des systèmes énergétiques durables. Toutefois, son caractère intermittent pose de grands défis en termes de stockage.

Pour relever les défis de l'intermittence de l'énergie solaire, il est essentiel de réaliser des efforts de recherche importants afin d'améliorer l'efficacité des systèmes de stockage existants et de développer de nouvelles technologies.

La solution essentielle pour surmonter l'intermittence de l'énergie solaire réside dans le stockage thermique. Entre les diverses possibilités de stockage, le stockage thermique par chaleur latente offre des avantages importants. Les matériaux à changement de phase (MCP) permettent d'avoir une grande capacité de stockage tout en réduisant leur encombrement. [15]

3.1 Différentes technologies de stockage thermique

L'énergie thermique est la somme des énergies potentielles et cinétiques des atomes et des molécules qui composent la matière. Grâce aux vibrations atomiques et moléculaires, de l'énergie thermique est produite dans la matière. Ainsi, l'énergie thermique peut être stockée sous forme de changement dans l'énergie interne d'une substance, qui peut être une chaleur sensible, latente ou thermochimique, ou une combinaison de celles-ci.

La figure 3.1 présente un aperçu des principales technologies de stockage de l'énergie thermique.

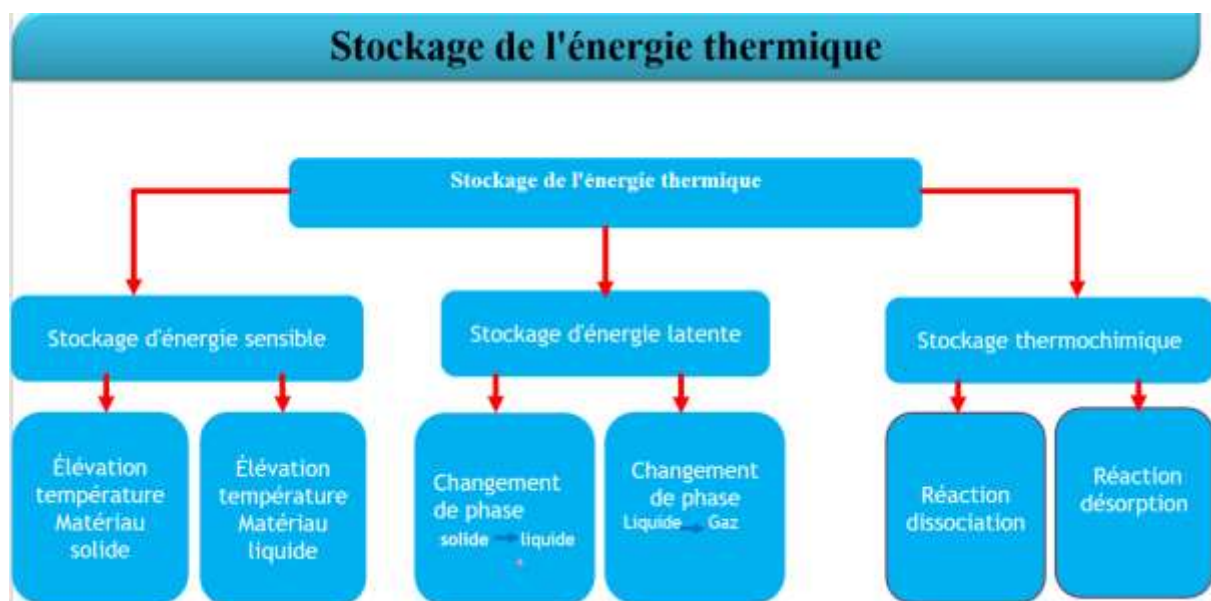


Figure 3.1: Différents types de stockage de l'énergie thermique. [16]

3.1.1 Stockage thermique sensible [17]

Le stockage thermique sensible constitue une méthode efficace pour emmagasiner de l'énergie thermique en modifiant la température d'un matériau, qu'il soit solide ou liquide. Ce processus repose sur le principe fondamental de la thermodynamique, où l'énergie est stockée sous forme d'une élévation de température du matériau de stockage, sans changement de phase et dans un système fermé vis-à-vis de son environnement. La quantité d'énergie stockée est déterminée par la masse du matériau, sa capacité calorifique spécifique, ainsi que la différence de température entre l'entrée et la sortie du système. Les matériaux utilisés dans ce type de stockage se divisent généralement en deux catégories : liquides tels que l'eau ou les fluides à base d'huile, et solides tels que les pierres ou les métaux. Ce processus offre la possibilité de répéter les cycles de stockage et de récupération de la chaleur accumulée à plusieurs reprises, sans compromettre son efficacité, constituant ainsi un avantage significatif de cette méthode. Cependant, le principal inconvénient réside dans le volume important requis pour le stockage, dicté par la capacité calorifique du matériau de stockage et l'amplitude de variation de température. Pour maximiser l'efficacité du stockage, il est crucial d'utiliser des matériaux présentant une capacité thermique élevée (C_p), une stabilité à long terme lors des cycles thermiques, une compatibilité avec le récipient de stockage, et une économie de coûts.

Cette quantité de chaleur est calculée à partir de l'équation suivante :

$$\Delta H = H_f - H_i = \int_{T_i}^{T_f} m \times C_{(T)} \times dT \quad (3.1)$$

Si la chaleur spécifique peut être considérée comme constante dans l'intervalle de températures entre T_i et T_f , ($C_{(T)} = \text{constant} = C$) alors :

$$\Delta H = m C (T_f - T_i) \quad (3.2)$$

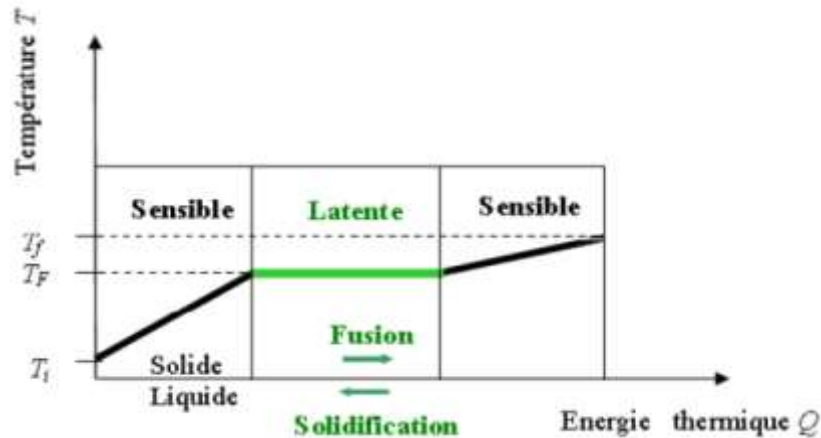


Figure 3.2 : Chaleur (enthalpie) emmagasinée dans un matériau lors d'un changement de phase solide liquide. [18]

Bilan thermique de transformation de Figure 3.2

1. L'énergie pour chauffer matériau à changement de phase de T_i à T_F :

Dans cette étape, le matériau à changement de phase est toujours sous forme solide, donc on utilise l'équation classique pour calculer l'énergie thermique (sans tenir compte de la fusion) :

$$\text{Ecart de température dans la phase solide : } \Delta T_{\text{MCP s}} = T_F - T_i$$

$$Q_s = m_{\text{MCP s}} \times C_{p_{\text{MCP s}}} \times \Delta T_{\text{MCP s}}$$

$C_{p_{\text{MCP s}}}$ est la capacité calorifique spécifique du MCP solide

2. L'énergie nécessaire pour faire fondre le MCP à la température de fusion (T_F) :

$$Q_F = m_{\text{MCP}} \times L_T$$

- L_T est la chaleur latente de fusion du MCP

3. L'énergie pour chauffer la paraffine de la température de fusion T_F à température finale T_f :

Une fois que le MCP a fondu, nous devons calculer l'énergie nécessaire pour chauffer le liquide de T_F à T_f en utilisant la même équation :

$$\text{Ecart de température dans la phase liquide : } \Delta T_{\text{MCP l}} = T_f - T_F$$

$$Q_l = m_{MCP1} \times C_{p_{MCP1}} \times \Delta T_{MCP1}$$

$C_{p_{MCP1}}$ est la capacité calorifique spécifique du MCP liquide

L'énergie totale stockée dans le MCP :

Maintenant, nous pouvons calculer l'énergie totale stockée dans le MCP pendant l'expérience, en additionnant l'énergie de chaque étape :

$$Q_{tot} = Q_s + Q_F + Q_l$$

$$Q_{tot} = m_{MCPs} \times C_{p_{MCPs}} \times \Delta T_{MCPs} + m_{MCP} \times L_T + m_{MCP1} \times C_{p_{MCP1}} \times \Delta T_{MCP1}$$

3.1.2 Stockage thermique latent [19]

Le stockage thermique latent (STL) est une méthode attrayante pour stocker une grande quantité d'énergie, car il permet de stocker la chaleur sous forme de chaleur latente de fusion à une température constante, correspondant à la température de transition de phase. La chaleur latente, qui est l'énergie absorbée ou libérée lors des changements d'état de la matière, est significativement plus importante que la chaleur sensible pour un écart de température donné. Par exemple, fondre 1 kg de glace nécessite 80 fois plus d'énergie que celle requise pour élever la température de 1 kg d'eau de 1°C. Cette caractéristique permet l'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) avec des températures de fusion adaptées aux besoins.

Dans le cas d'un changement d'état tel que la fusion, la quantité de chaleur mise en jeu est définie par l'équation :

$$Q = m (h_f - h_i) = m \times \Delta h_F \quad (3.3)$$

Où (Δh_F) est l'enthalpie spécifique de fusion. Cette quantité de chaleur doit porter le matériau de sa température initiale (T_i) à sa température de fusion (T_F), ce qui peut être exprimé comme :

$$Q = m (h_f - h_i) = m \times C_p (T_F - T_i) + m \times \Delta h_F \quad (3.4)$$

Dans le cas d'un corps pur, on observe une variation linéaire de la température en fonction du temps tandis que pendant le changement d'état la température reste constante. Si la température de changement de phase d'un corps pur est T_F .

$T_i \leq T_F \leq T_f$, alors l'énergie stockée lors de cette transformation est :

$$\Delta H = \int_{T_i}^{T_F} m \times c_{p_s} \times dT + \int_{T_F}^{T_f} m \times c_{p_L} \times dT \quad (3.5)$$

C_{p_s} : chaleur spécifique du corps à l'état solide.

C_{p_L} : chaleur spécifique du corps à l'état liquide.

En représentant l'enthalpie spécifique en fonction de la température (Figure 4.3), on observe une variation linéaire de la température en fonction du temps pour un corps pur pendant le chauffage du matériau avant sa température de fusion, tandis que pendant le changement d'état la température reste constante (courbe a).

Pour un mélange, il n'y a plus de discontinuité dans la variation d'enthalpie (courbe b) sauf si on forme un composé défini avec fusion congruente (qui a le même comportement qu'un corps pur).

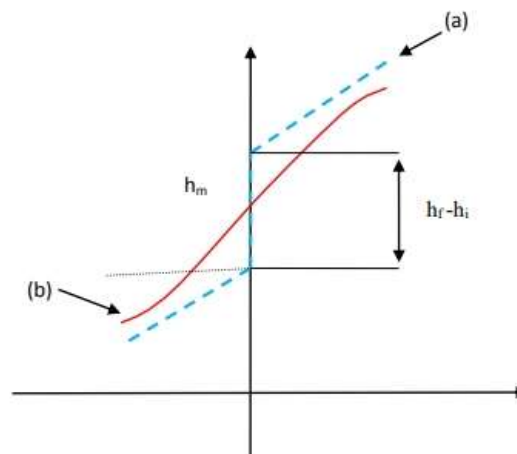


Figure 3.3 : L'enthalpie spécifique en fonction de la température, courbe(a) pour un corps pur, courbe(b) pour un mélange. [18]

Les principaux avantages du stockage par chaleur latente incluent la stabilité de la température de solidification ou de fusion pendant le stockage/déstockage, la disponibilité d'une variété de matériaux avec des températures de fusion différentes, l'utilisation des MCP pour éviter les problèmes de surchauffe, et une capacité de stockage de chaleur latente bien plus élevée que celle de la chaleur sensible.

3.2 Définition d'un matériau à changement de phase (MCP)

Une substance à changement de phase est toute substance capable de changer d'état physique à des températures spécifiées. Pour stocker l'énergie thermique, les matériaux bénéficient du processus d'absorption ou de libération d'énergie lors de la transition entre les phases solide et liquide, ou entre les phases liquide et gazeuse. Ces matériaux peuvent être divisés en plusieurs types en fonction de leurs propriétés et applications. [20]

3.3 Propriétés des matériaux à changement de phase [21]

Chaleur latente de changement de phase

La chaleur latente fait référence à la quantité d'énergie absorbée ou libérée lorsqu'une substance passe d'une phase à une autre sans changement de température. Cette propriété est importante car elle détermine la quantité d'énergie qui peut être stockée ou libérée par une substance.

Les matériaux à chaleur latente élevée peuvent stocker de grandes quantités d'énergie, ce qui les rend adaptés aux applications de stockage thermique.

Température de changement de phase

La température de changement de phase est le point auquel une substance commence à passer d'un état à un autre. Ce degré varie en fonction du type de matériau et de ses applications.

Le choix d'un matériau avec une température de changement de phase appropriée contribue à améliorer l'efficacité du système de stockage thermique.

Stabilité thermique

Il fait référence à la capacité d'un matériau à conserver ses propriétés physiques et chimiques au cours de cycles répétés de changement de phase.

La stabilité thermique garantit l'efficacité à long terme du matériau dans des applications pratiques et réduit le besoin de remplacement fréquent.

La conductivité thermique est la capacité d'un matériau à transférer la chaleur d'une zone à une autre. Les matériaux à conductivité thermique élevée sont plus efficaces pour diffuser la chaleur dans un matériau.

L'échange thermique comprend la manière dont l'échange thermique entre les matériaux à changement de phase affecte les performances globales. Les matériaux qui ont une bonne capacité d'échange thermique sont plus efficaces pour réguler les températures.

3.4 Comment ça marche

Absorption de chaleur : Lorsqu'une substance est chauffée jusqu'à sa température de transition, elle commence à fondre. Au cours de ce processus, le matériau absorbe la chaleur et la stocke sous forme d'énergie potentielle.

Stockage de chaleur : l'énergie est stockée sous forme de chaleur latente dans une substance lorsqu'elle passe de l'état solide à l'état liquide.

Libération de chaleur : Lorsque la température baisse, la substance gèle et retourne à son état solide, libérant la chaleur emmagasinée.

3.5 Types des matériaux à changement de phase (MCP) [20]

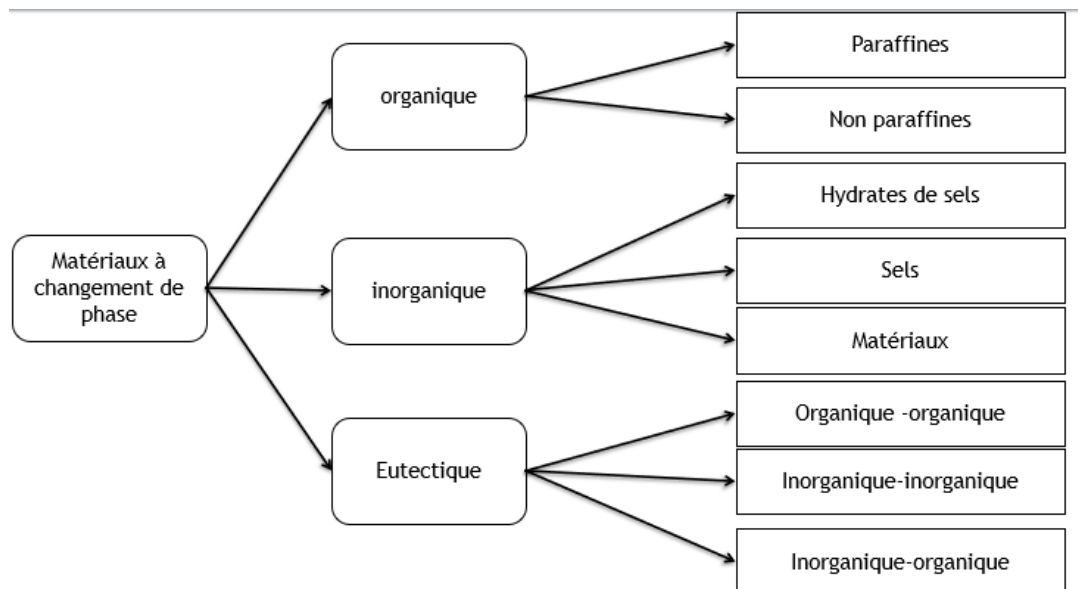


Figure 3.4 : Classification des MCP. [22]

3.5.1 Les MCP Organiques

Les températures de fusion de ces matériaux sont généralement relativement basses, généralement comprises entre 0°C et 100°C.

Ils se composent principalement de deux types :

Les MCP organiques, qui sont généralement des hydrocarbures saturés de la famille des alcanes C_nH_{2n+2} , sont appelés paraffines. Les paraffines sont principalement constituées d'hydrocarbures linéaires ou ramifiés, qu'ils soient extraits du pétrole brut ou synthétisés chimiquement. Les paraffines sont couramment utilisées car elles ont une capacité de stockage

thermique plus élevée et restent solides à des températures normales. Cependant, certaines propriétés des paraffines, telles qu'une faible conductivité thermique et une inflammabilité, peuvent présenter des obstacles, notamment en ce qui concerne leur compatibilité avec les plastiques. Afin de résoudre ces problèmes, il est possible de modifier la composition des paraffines et des dispositifs de stockage.

Différentes cires paraffiniques : (C.K Jotshi et all 1992)[22,23]

Dans ce paragraphe, quelques exemples de cire paraffiniques, soit pure soit en mélange, sont présentés.

N-octadécane ($C_{18}H_{38}$) ; cette cire fond à $T = 28^{\circ}C$ et à une chaleur de fusion de 244 kJ/kg.

N-écossant ($C_{20}H_{42}$) : sa fusion est congruente à $T = 28^{\circ}C$, la chaleur de fusion est de 247 kJ/kg.

N-octadécane et N-écossant sont très inflammables quand ils sont exposés à une flamme. Ils s'oxydent facilement. Ils ne sont pas toxiques. Ils ont relativement une bonne conductivité thermique. Purs, ces composés sont très chers.

112/118 white scale cire : ces cires paraffiniques sont issues du raffinage du pétrole brut (Pennsylvania-grade).

Elles font apparaître deux transitions de phase solide avant leur domaine de fusion ($42-48^{\circ}C$). Ces cires ont été soumises à de la température de la transition du profil de la transition.

P11 : cette cire a une chaleur latente de 210 kJ/kg et sa solidification se produit à $T = 45-48^{\circ}C$ en forme de capsule sphérique, elle a subi 2600 Cycles thermiques sans se détériorer.

Conditionnement de ces paraffines

Bien que les paraffines aient les propriétés recherchées pour le MCP, leur faible conductivité gêne la cinétique de charge/décharge de l'énergie thermique. Pour résoudre ce problème, une méthode a été proposée, qui consiste à augmenter la conductivité apparente en incorporant une matrice métallique ou des fibres de carbone.

3.5.2 Les MCPs Inorganiques

Ce sont des composés qui ne contiennent pas de carbone, à l'exception du dioxyde de carbone, ces MCPs ont généralement des températures de fusion plus élevées que les MCPs organiques, allant de 100 °C à 1000 °C. Ce sont des composés inorganiques.

Sels humides

Sels aqueux, constitués de sels minéraux et d'eau, de formule générale AB_nH_2O . Ils offrent des avantages significatifs pour le stockage de la chaleur latente, tels qu'une température de fusion élevée, une enthalpie de fusion élevée et une conductivité thermique élevée. Cependant, ils présentent plusieurs inconvénients importants, tels que la fusion par séparation de phases, le sous-refroidissement et le risque de corrosion.

Matériaux métalliques

Les matériaux métalliques sont des matériaux eutectiques ayant une faible température de fusion et leur conductivité thermique est également élevée. Ils n'ont pas encore été largement utilisés dans la technologie MCP en raison de considérations de poids.

3.5.3 Les MCPs Eutectiques

Sont des mélanges de deux ou plusieurs substances qui fondent et se solidifient à une température constante. Ces mélanges peuvent être composés d'éléments organiques, inorganiques ou d'une combinaison des deux, en fonction des exigences de température et des propriétés désirées pour l'application spécifique. En modifiant les proportions des composants du mélange, les MCPs eutectiques permettent de choisir les températures de changement de phase de manière flexible, ce qui les rend adaptés à une large gamme d'applications.

3.6 Avantages et inconvénients

Chaque type de MCP présente des avantages et des inconvénients distincts que nous présenterons dans le tableau suivant :

Tableau 3.1 : Avantages et inconvénients des MCP. [24]

	Avantages	Inconvénients
Organiques	<ul style="list-style-type: none"> - La surfusion est négligeable. - Peu sensible aux cycles de fusion/solidification. - Haute enthalpie de fusion (180 à 230 kJ/kg) - Grande capacité de stockage thermique - Chimiquement stable et inerte - Sûr et réutilisable 	<ul style="list-style-type: none"> - Faible conductivité thermique (0,18-0,25W/m.K) - Agrandissement important du volume. - Inflammable. - Coût élevé par rapport aux sels aqueux. - Instabilité à haute température.
Inorganiques	<ul style="list-style-type: none"> - Disponibilité. - Grande chaleur de fusion. - Conductivité thermique élevée. - Faible Dilatation volumique. - Bon marché. - Ininflammables. 	<ul style="list-style-type: none"> - Fusion par séparation de phases. - Sous-refroidissement. - Risque de corrosion.
Eutectiques	<ul style="list-style-type: none"> - leurs chaleurs latentes volumétriques sont légèrement supérieures. - Haute densité de stockage d'énergie. - Large plage de températures de fusion. - Réduction des coûts de fabrication. - Adaptabilité à diverses applications. 	<ul style="list-style-type: none"> - peu de données disponibles sur les propriétés thermiques. - la formulation des mélanges eutectiques est difficile et complexes. - Possibilité d'incompatibilités chimiques entre les composants. - Risque de ségrégation dans le mélange. - Perte d'efficacité liée aux cycles de fusion/solidification. - Risque de surfusion, surtout avec des compositions mal équilibrées.

3.7 Domaines d'applications des MCPs

Les MCPs ont gagné en popularité dans le domaine du stockage d'énergie thermique en raison de leur capacité de stockage élevée et de leur utilisation dans différents secteurs.

3.7.1 Transport de produits alimentaires et de médicaments

Les MCPs jouent un rôle crucial dans le transport alimentaire et pharmaceutique pour maintenir la stabilité thermique des produits sensibles, du fait de leur proximité directe avec les éléments à conserver. [25]



Figure 3.5 : Les pommes contiennent un MCP. [26]



Figure 3.6 : Récipients du sang contiennent un MCP.

3.7.2 MCP dans Textile

Les textiles modernes intègrent des MCP pour réguler la température corporelle pendant l'activité physique. Ces microcapsules, logées au cœur des fibres, absorbent et libèrent la chaleur de manière réactive, procurant ainsi un confort thermique optimal dans diverses conditions climatiques.

3.7.3 MCP en réfrigérateur domestique

L'incorporation de matériaux à changement de phase dans les réfrigérateurs domestiques constitue une solution efficace et économique pour réduire la consommation d'énergie et atténuer les périodes de pointe de demande en électricité, tout en garantissant une meilleure conservation des aliments.

3.7.4 Stockage de l'énergie solaire par MCP

L'énergie solaire a le potentiel de contribuer de manière significative au bilan énergétique mondial en convertissant l'énergie solaire en énergie thermique. Pour faire fonctionner les installations solaires, une énergie supplémentaire est nécessaire en raison des changements saisonniers et météorologiques. Le stockage de l'énergie solaire via des matériaux à changement de phase est une solution prometteuse. Ces matériaux absorbent la chaleur du soleil pendant la journée et la restituent pendant la nuit ou lorsque le soleil est masqué, pour diverses utilisations comme le fonctionnement d'une turbine ou le chauffage. Avec les progrès technologiques, le stockage d'énergie solaire par MCP devient de plus en plus viable et jouera un rôle crucial dans la transition vers une énergie propre et renouvelable.

3.7.5 Isolation des bâtiments

En effet, l'utilisation de matériaux à changement de phase dans l'isolation des bâtiments constitue une application très intéressante et prometteuse. Les MCPs peuvent améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments en régulant les fluctuations de température intérieure et en réduisant la dépendance aux systèmes de chauffage et de refroidissement.

3.8 Les problèmes liés au changement de phase

La surfusion : Ce phénomène est particulièrement problématique dans le contexte du stockage par chaleur latente, où l'efficacité dépend de la capacité du matériau à changer de phase à une température précise. En pratique, les courbes de solidification diffèrent souvent des prévisions théoriques en raison de la surfusion, qui retarde la cristallisation et empêche ainsi une utilisation optimale de la chaleur latente. Le matériau peut rester liquide jusqu'à plusieurs dizaines de degrés en dessous de la température de fusion dans certains cas, par contre, on n'observe jamais un solide pur au-delà de la température de fusion. [15]

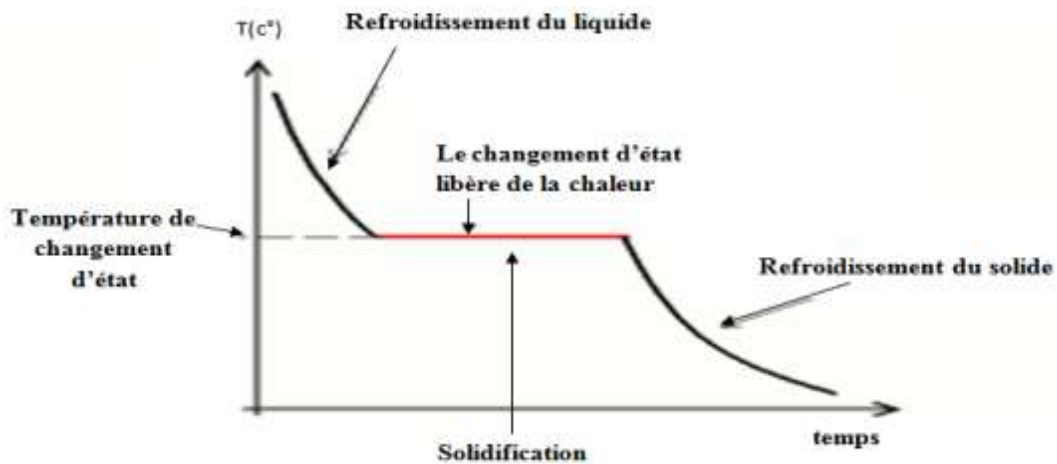


Figure 3.7 : Evolution théorique de Température en fonction du temps. [27]

Sur la zone de solidification de la (Fig 3.8), on note une chute de température qui s'accompagne d'un dégagement de chaleur, ce dernier est d'autant plus élevé que la masse du liquide est grande. Si l'échange de chaleur avec l'extérieur est faible, la surfusion empêche l'utilisation de la chaleur latente de changement de phase à la température voulue.

Pour remédier à ce problème, plusieurs solutions sont proposées: l'incorporation d'additifs tensio-actifs pour réduire la tension superficielle et favoriser la nucléation. L'ajout de cristaux stables servent de points de nucléation pour initier la cristallisation, et le maintien de zones froides à l'intérieur du matériau peut faciliter un refroidissement contrôlé. [29]

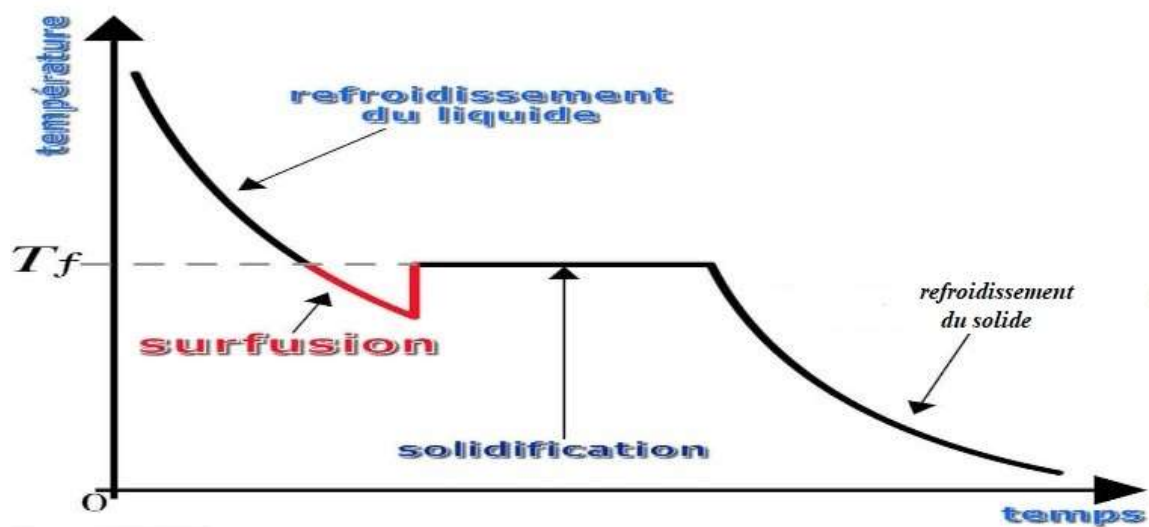


Figure 3.8 : Solidification présentant une surfusion. [28]

3.9 Conclusion

L'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) pour le stockage de l'énergie thermique présente un grand potentiel dans divers domaines, notamment le chauffage, le refroidissement et la production d'électricité. Ces matériaux constituent une solution efficace pour stocker et libérer de grandes quantités d'énergie thermique en exploitant les changements de phase, tels que la fusion et la solidification, maintenant ainsi des températures stables et minimisant les variations de température dans les systèmes. Ce qui en fait une technologie prometteuse pour répondre aux défis énergétiques et environnementaux actuels.

Chapitre 4 :

Etude théorique d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique

L'énergie solaire est puissante, mais relativement peu dense. Pour exploiter cette énergie au niveau industriel, il est nécessaire de concentrer le rayonnement solaire. C'est là qu'intervient la technique du capteur solaire à concentration, qui permet d'atteindre des températures suffisantes pour des procédés nécessitant de la vapeur ou de l'eau très chaude.

Dans ce chapitre, nous allons mener une étude théorique sur un type spécifique de concentrateur solaire : le concentrateur solaire cylindro-parabolique.

4.1 Principe de fonctionnement

Le capteur solaire cylindro-parabolique, objet de notre étude, a pour but de concentrer et de convertir l'énergie solaire incidente en énergie thermique, qui est ensuite extraite par le fluide circulant dans le tube caloporteur.

Il commence à fonctionner lorsque le capteur reçoit le flux solaire sur la surface réfléchissante en feuille d'aluminium, conçue pour recevoir la lumière du soleil, la concentrer et la réfléchir sur la surface réceptrice. Le récepteur est constitué d'un tube en aluminium noir fabriqué à partir de canettes conçues pour recevoir la lumière directe et concentrée du rayonnement solaire, et contient un tube de cuivre à l'intérieur où circule le fluide caloporteur. Un matériau à changement de phase est inséré entre les deux tubes, dans notre cas nous utilisons de la paraffine. Le tube en aluminium absorbe le rayonnement solaire qui transmet par conduction la chaleur au matériau à changement de phase, changeant ainsi son état physique de solide à liquide. Lorsque le matériau à changement de phase passe de l'état solide à l'état liquide, il emmagasine la chaleur et en l'absence de lumière solaire, le matériau à changement de phase revient à son état initial (solide), libérant la chaleur qu'il a stockée, de sorte que l'accumulateur continue de fonctionner plus longtemps. Ensuite, la chaleur est transférée à travers la surface du tube de cuivre du matériau à changement de phase au fluide caloporteur. Dans notre cas, nous utilisons de l'eau comme fluide caloporteur. Nous avons utilisé des tubes de cuivre en forme de serpentin pour permettre la circulation du liquide, sa longueur est donc petite, ce qui signifie qu'il ne prend pas beaucoup de place.

Ce processus est utilisé pour élever la température de l'eau à des niveaux adaptés à des utilisations industrielles ou de chauffage.

4.2 La géométrie du concentrateur cylindro-parabolique

4.2.1 Géométrie parabolique

La parabole est une courbe plane symétrique par rapport à un axe approximativement en forme de U. Elle peut être définie comme une courbe dont chaque point se situe à égale distance d'un point fixe appelé foyer et d'une ligne fixe appelée directrice. La droite perpendiculaire à la directrice qui passe par le foyer est l'axe de symétrie de la parabole, son intersection avec la parabole est le sommet.

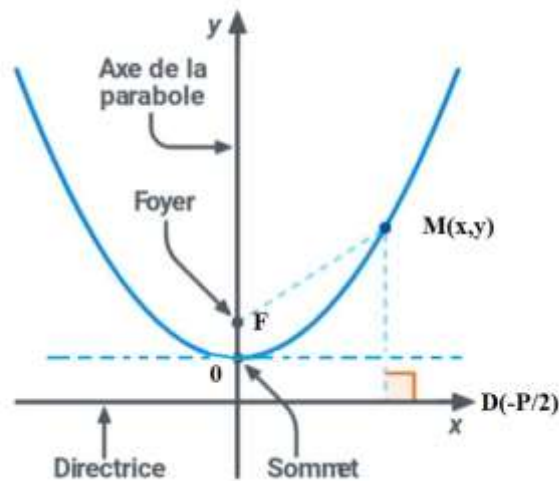


Figure 4.1: Propriétés géométriques de la parabole.

➤ Equation d'une parabole

L'équation générale d'une parabole est :

$$y = ax^2 + bx + c \quad (4.1)$$

a, b et c sont des coefficients qui déterminent les caractéristiques de la parabole :

a : détermine principalement la forme et l'orientation de la parabole :

Si $a > 0$, la parabole s'ouvre vers le haut.

Si $a < 0$, la parabole s'ouvre vers le bas.

Plus grande est la valeur absolue de $|a|$, plus étroite est la parabole.

b : est le coefficient linéaire. Il détermine le déplacement horizontal de la parabole par rapport à l'origine et l'orientation de la parabole.

Si ($b > 0$), la parabole est déplacée vers la gauche, et si ($b < 0$), elle est déplacée vers la droite.

Il n'est pas nécessairement présent dans toutes les paraboles.

Si $b \neq 0$ il influence l'inclinaison de la parabole par rapport à l'axe des x

c : est le coefficient constant. Il détermine la position verticale de la parabole par rapport à l'axe des y . Si $c > 0$, la parabole est déplacée vers le haut ; si $c < 0$, elle est déplacée vers le bas

Si la parabole est donnée par son foyer F qui a pour coordonnées $(0, \frac{p}{2})$ et une directrice, qui a pour équation $y = -\frac{p}{2}$ (on appelle p : Paramètre de la parabole), l'équation de la parabole sera donnée par : [30]

$$y = \frac{x^2}{2p} \quad (4.2)$$

➤ Equation réduite d'une parabole

On choisit un repère orthonormé (S, i, j) d'origine S le sommet de la parabole, d'axe des ordonnées (Δ) , l'axe focal, tel que le point F a pour coordonnées $(0, \frac{p}{2})$. Dans ce repère,

l'ordonnée de F est strictement positive et le point K a pour coordonnées $(0, -\frac{p}{2})$.

Soient $M(x, y)$ un point du plan et $H(x, -\frac{p}{2})$ son projeté orthogonal sur (D)

$$\text{Soit } M \in (p) : MF^2 = MH^2 \leftrightarrow x^2 + (y - \frac{p}{2})^2 = (y + \frac{p}{2})^2$$

Après simplification, la parabole a pour équation : $y = \frac{x^2}{2p}$

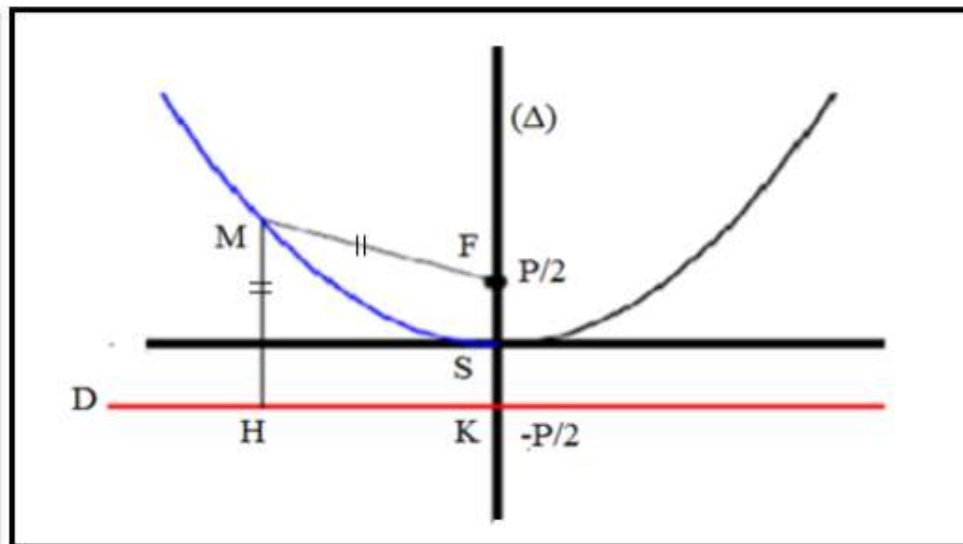


Figure 4.2 : Graphe d'une parabole d'équation : $y = \frac{x^2}{2p}$. [31]

➤ Caractéristiques d'une parabole

➤ Angle d'ouverture d'une parabole

L'angle d'ouverture d'une parabole fait référence à la mesure de la "largeur" de la parabole, c'est-à-dire à quel point ses branches s'éloignent de l'axe de symétrie (ou axe des y).

L'angle d'ouverture d'une parabole augmente avec la diminution de la distance focale et devient plus petit avec l'augmentation de f . Plus f augmente, plus l'angle est petit, donc la parabole est relativement plate. [32]

$$\tan \psi = \frac{\frac{d}{f}}{2 - \frac{1}{8} \left(\frac{d}{f} \right)^2} \quad (4.3)$$

d : diamètre de l'ouverture de la parabole.

f : distance focale $f = \frac{p}{2}$

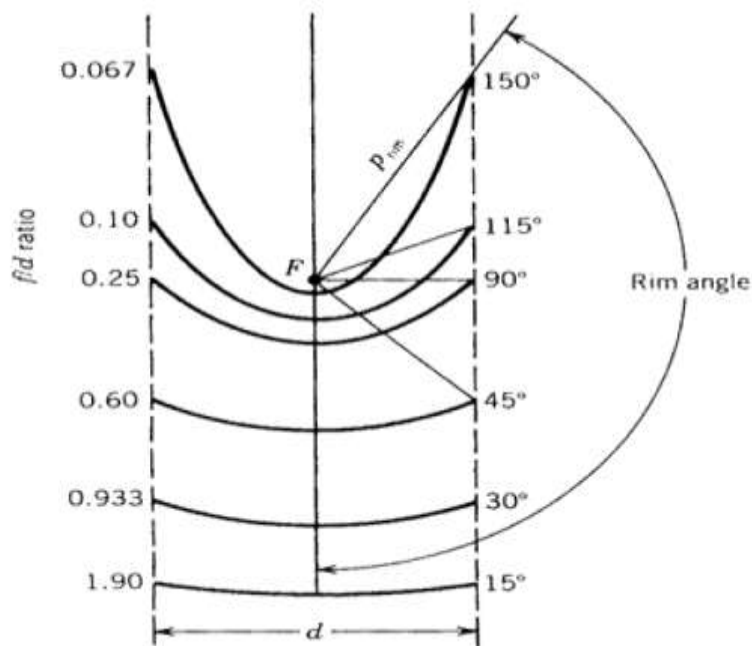


Figure 4.3 : Angle d'ouverture d'une parabole en fonction de la distance focale. [33]

- **La profondeur de la parabole** est la distance verticale entre l'extrémité de la parabole et le sommet (D) de la parabole [30]. Elle est définie par :

$$P_f = \frac{d^2}{16f} \quad (4.4)$$

- **La surface d'ouverture** est la zone circulaire qui s'appuie sur le diamètre d'ouverture

$$A_a = \pi \frac{d^2}{4} \quad (4.5)$$

- **La longueur de l'arc (S) de la parabole** peut être déterminée par l'équation suivante : [34]

$$S = \frac{d}{2} \sqrt{\left(\left(\frac{4P_f}{d}\right)^2 + 1\right)} + 2f \ln\left[\frac{4P_f}{d} + \sqrt{\left(\left(\frac{4P_f}{d}\right)^2 + 1\right)}\right] \quad (4.6)$$

- **Surface cylindro-parabolique**, déterminée par l'équation suivante :

$$A = S \times L \quad (4.7)$$

L : La longueur de cylindro-parabolique

4.2.2 Système optique d'une surface cylindro-parabolique

Un système optique utilisant une surface cylindro-parabolique est conçu pour concentrer la lumière solaire sur un récepteur situé le long de son axe focal. Voici les principaux éléments et caractéristiques d'un tel système.

➤ La surface du miroir et la surface d'ouverture

Le miroir est une combinaison d'un cylindre et d'une parabole. Cela signifie qu'il a une surface parabolique dans une direction (généralement verticale) et une surface cylindrique dans l'autre direction (généralement horizontale).

La section parabolique concentre la lumière solaire incidente le long de son axe focal, tandis que la section cylindrique dirige cette lumière vers le récepteur.

➤ La surface du récepteur

- Le récepteur est placé à l'endroit où la lumière solaire focalisée converge.
- Lorsque la lumière solaire frappe la surface parabolique, elle est réfléchiée de manière à converger vers le point focal du miroir.

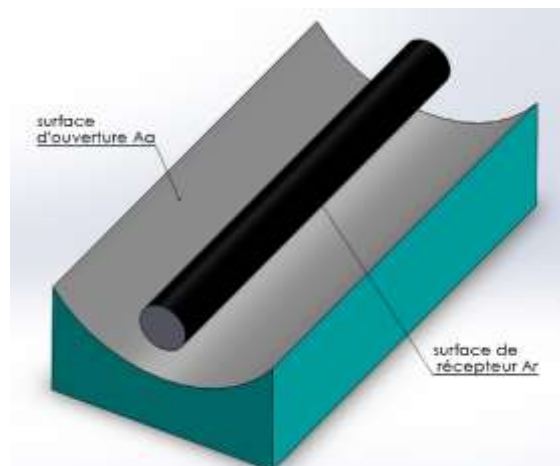


Figure 4.4 : Surface d'ouverture du collecteur et du récepteur.

- **Le taux de concentration** est défini comme le rapport de la surface de l'ouverture (A_a) à la surface du récepteur (A_r)

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad (4.8)$$

4.3 Composants d'un concentrateur solaire parabolique

Le collecteur est la composante de base du champ solaire. Il est constitué d'un réflecteur cylindro-parabolique (miroir), d'une structure métallique (en acier), d'un tube récepteur et d'un système de poursuite solaire. La structure métallique doit être suffisamment solide afin de résister aux importantes contraintes mécaniques liées au vent.

4.3.1 Réflecteur

C'est une surface incurvée qui reflète la lumière du soleil vers une ligne focale précise. Les réflecteurs concentrant l'énergie solaire sont généralement constitués d'un miroir ou d'un autre métal réfléchissant.

➤ Définitions de base de la réflexion

➤ Réflexion

La lumière interagit avec la matière qu'elle rencontre. Elle peut être absorbée, transmise ou réfléchi avec des ratios dépendant de certains facteurs comme la longueur d'onde de rayonnement, l'angle d'incidence θ_i et les propriétés du matériau récepteur.

A ce dernier sont être associés l'absorptivité la diffusivité et la transmissivité monochromatique

Ces paramètres sont combinés et obéissent à la loi de conservation de l'énergie, qui stipule que : $\alpha_\lambda + \tau_\lambda + \rho_\lambda = 1$

Loi de la réflexion

La première loi de la réflexion stipule que le rayon incident et le rayon réfléchi perpendiculairement à la surface réfléchissante au point d'incidence se trouvent dans le même plan. La deuxième loi de la réflexion stipule que l'angle d'incidence θ_i d'une onde ou d'un flux de particules réfléchi depuis une frontière, mesuré à partir d'une normale à la surface, est égal à l'angle de réflexion θ_r , mesuré à partir de la même normale à la surface.

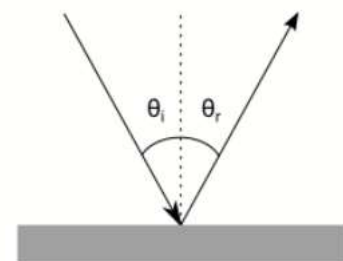


Figure 4.5 : Loi de la réflexion

➤ Choix du métal de réflecteur

Pour la surface réfléchissante de la parabole, il convient d'utiliser un métal qui reflète le mieux la lumière du soleil. La réflexion du métal est caractérisée par son coefficient de réflexion.

Nous avons vu que l'énergie solaire atteignant la Terre provient principalement de la lumière ultraviolette (UV-A), le visible et l'infrarouge. Il faut donc choisir un métal présentant un coefficient de réflexion élevé pour les longueurs d'onde concernées entre 280 et 1400 nm. [30]

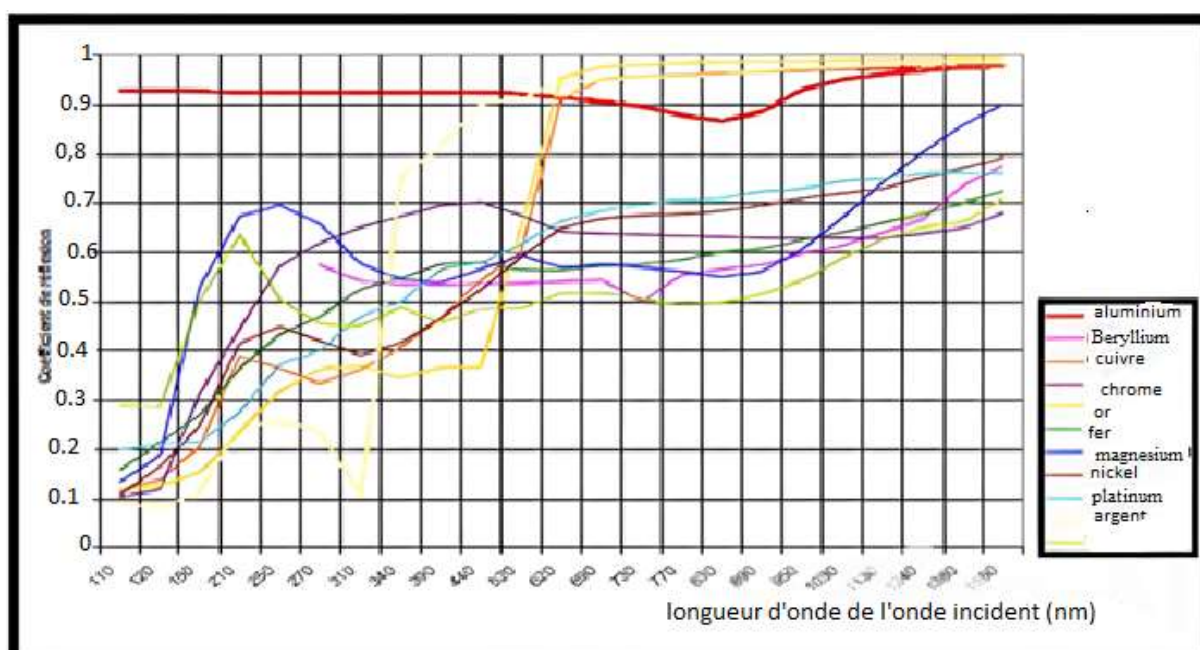


Figure 4.6 : Variation du coefficient de réflexion en fonction de la longueur d'onde Perpendiculaire à la surface. [35]

Grâce à cette figure, on peut remarquer qu'entre 100 et 600 nm, l'aluminium a le meilleur coefficient de réflexion (environ 0,92). Après 600 nm, l'or, l'argent et le cuivre ont un coefficient de réflexion plus élevé. Cependant, l'aluminium conserve un coefficient de réflexion avoisinant 0,9. En conclusion, l'aluminium est le meilleur métal du point de vue de la réflexion des rayons de longueurs d'ondes comprises entre 100 et 1400 nm. Ce métal n'est de plus pas trop cher, contrairement à l'or ou l'argent.

4.3.2 Récepteur

Le récepteur doit absorber un maximum de flux solaire concentré, le convertir en énergie thermique, et cette chaleur est transférée au fluide caloporteur. La surface du récepteur doit avoir une bonne conductivité thermique. Il est important que le récepteur soit en métal car seuls les métaux ont de bons coefficients de conduction thermique (cuivre : 360 W/m.K, aluminium : 200 W/m.K, acier : 60 W/m.K)

Le récepteur est constitué d'un tube en aluminium contenant un autre tube en cuivre à l'intérieur. Un matériau à changement de phase est placé entre les deux tubes et le fluide caloporteur passe dans un tube en cuivre. Nous appliquons la peinture noire sur le tube en aluminium car il présente un coefficient d'absorption élevé.

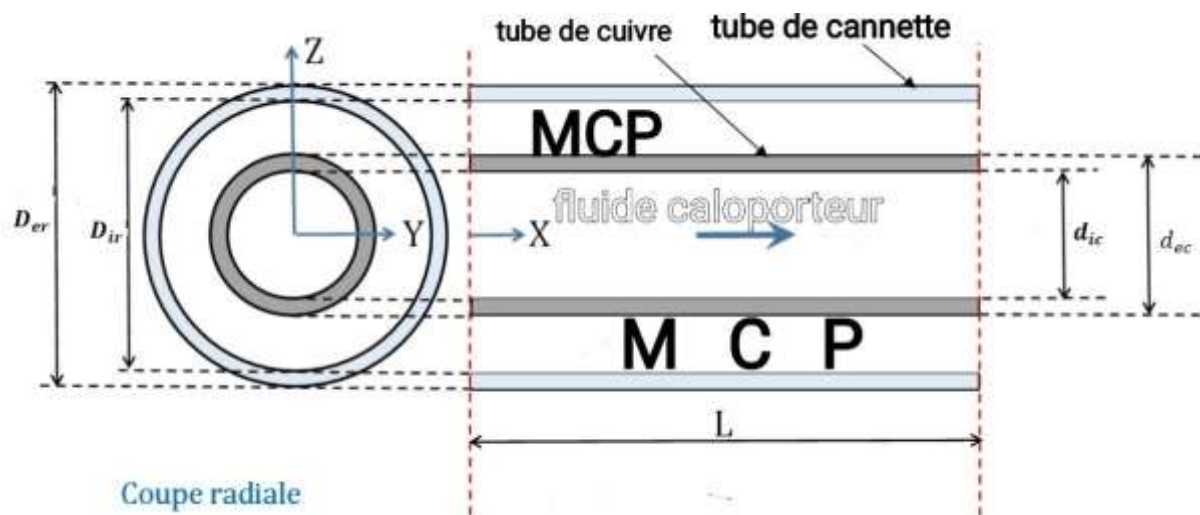


Figure 4.7 : Coupe longitudinale/radiale d'un récepteur du capteur cylindro-parabolique.

Avec :

d_{ic} et d_{ec} sont les diamètres intérieur et extérieur du tube de cuivre.

D_{ir} et D_{er} sont les diamètres intérieur et extérieur du récepteur (tube de cannette).

➤ Coefficient d'absorption

Le coefficient d'absorption fait référence à la mesure de la capacité d'un matériau à absorber le rayonnement incident, tel que la lumière. Le coefficient d'absorption solaire d'une surface exprime, par un nombre compris entre 0 et 1, le pourcentage de l'énergie radiante incidente absorbée par cette surface (ultraviolet, spectre visible et Infrarouge). Le rayonnement qui n'est pas absorbé est réfléchi.








Coefficient d'absorption de surfaces peintes	
Couleur	Coef. d'absorption
 Blanc	0,18
 Jaune	0,33
 Orange	0,41
 Rouge sombre	0,57
 Vert sombre	0,88
 Bleu foncé	0,91
 Noir	0,94

Figure 4.8 : Coefficient d'absorption de surfaces peintes. [36]

4.3.3 Fluide caloporteur

Le rôle du fluide caloporteur est de transférer l'énergie convertie sous forme de chaleur à travers l'absorbeur pour utilisation ou stockage, et il doit répondre aux conditions suivantes :

- Faible viscosité
- Point d'ébullition élevé et point de congélation bas.
- Résistance chimique des matériaux de composition.
- Faibles pertes de charge.
- Coefficient de transfert thermique élevé.
- Capacité thermique élevée

Parmi les différents types de fluides caloporteurs on peut citer : Huiles, Sels fondus, Gaz, Eau liquide, Liquides organiques (butane, propane, etc...).

4.4 Positionnement du concentrateur cylindro-parabolique

Il existe deux approches principales pour positionner un concentrateur cylindro-parabolique : l'alignement nord-sud et l'alignement est-ouest.

Dans la première situation, le tube récepteur est parallèle à l'axe de rotation de la Terre, ce qui demande un simple asservissement en rotation pour suivre le soleil tout au long de la journée. Cela garantit une capture efficace en permanence.

Dans le deuxième cas, la direction du tube récepteur est Est-Ouest, ce qui demande des

ajustements deux à trois fois par jour à fin d'améliorer la réception du rayonnement solaire. Malgré son manque d'efficacité globale, cette configuration permet une plus grande souplesse dans l'orientation du capteur.

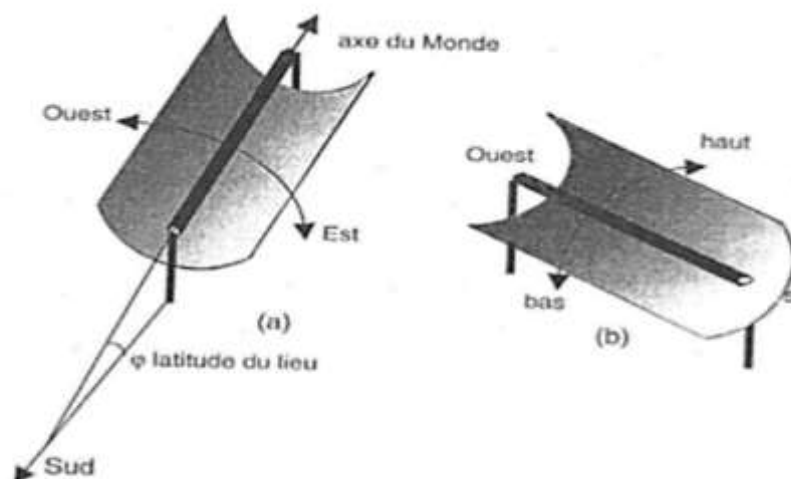


Figure 4.9 : Montage d'un capteur cylindro- parabolique.

(a) Suivant l'axe du Monde.

(b) Suivant la direction Est-Ouest

4.5 Les différents modes de transferts thermiques dans un capteur solaire [37]

4.5.1 La conduction

La conduction fait référence au processus de transfert de chaleur à travers une substance, qu'elle soit solide, liquide ou gazeuse, en raison du mouvement des molécules. Dans le contexte de la chaleur, la conduction thermique se produit lorsque les molécules les plus proches d'une source de chaleur augmentent leur énergie cinétique et transfèrent cette énergie aux molécules voisines, diffusant ainsi la chaleur dans toute la substance.

La loi correspondant à ce processus de diffusion thermique est la **loi de FOURIER**, donnée par la relation suivante :

$$\vec{\Phi} = -\lambda \times A \times \overrightarrow{\text{grad}} T \quad (4.9)$$

$\vec{\Phi}$: Flux de chaleur W .

A : surface d'échange (m^2)

λ : Conductivité thermique du matériau.

A : surface d'échange



Figure 4.10 : La conduction.

4.5.2 La convection

Effectivement, le transfert de chaleur par convection se produit lorsque la différence de température entre un fluide (liquide ou gaz) et un solide entraîne un échange de chaleur

Le flux échangé est donné par la **loi de NEWTON**.

$$\phi = h \times S \times (T_p - T_{fl}) \quad (4.10)$$

ϕ : le flux de chaleur (en W ou en J/s),

h : est le coefficient de transfert de chaleur par convection (en $W/(m^2 \cdot K)$),

S : la surface de contact entre le fluide et le solide (en m^2),

T_p : la température de la surface du solide (en K),

T_{fl} : la température du fluide environnant (en K).

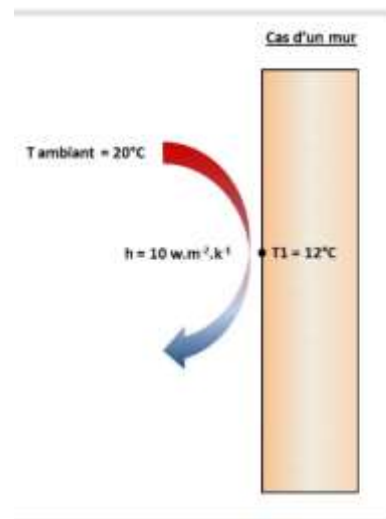


Figure 4.11 : Exemple de convection.

- **La convection forcée** : le mouvement du milieu est engendré par un dispositif externe (le vent, une pompe, un ventilateur... etc.).
- **La Convection Naturelle** est le régime d'écoulement obtenu lorsque l'on chauffe un fluide sans qu'il n'y ait d'écoulement "extérieur" imposé.

4.5.3 Le rayonnement

Le rayonnement thermique est un transfert de chaleur par mode électromagnétique. Le flux est donné par la relation issue de la **loi de Stefan BOLTZMANN**.

$$\phi = \varepsilon \times \sigma \times T^4 \quad (4.11)$$

ϕ : Densité de flux de chaleur émis par le corps (W/m^2).

ϵ : Émissivité thermique du matériau.

σ : Constante de Stefan-Boltzmann évaluée à $5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$.

T : Température absolue du corps (K).

4.6 Bilan thermique sur le concentrateur cylindro-parabolique

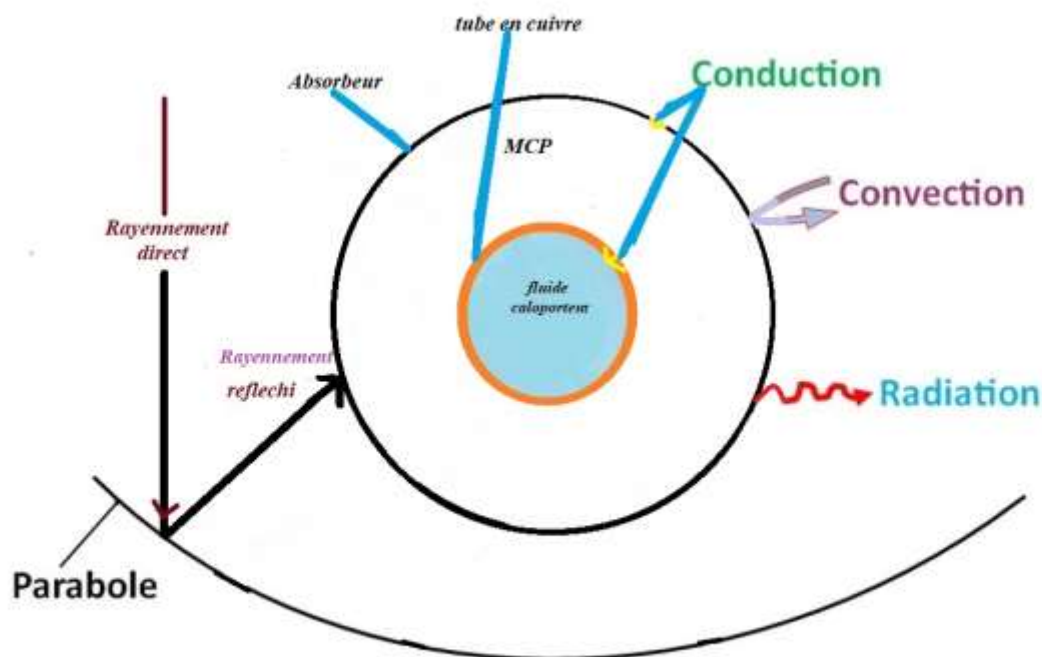


Figure 4.12 : Schématisation des échanges thermiques entre les différents éléments du collecteur cylindro-parabolique.

Le fluide caloporteur échange de la chaleur avec un tube en cuivre par convection, chaleur qui provient du matériau à changement de phase (MCP)

Variation d'enthalpie du fluide caloporteur entre l'entrée ($T_{fl e}$) et la sortie ($T_{fl s}$) du tube :

$$Q_f = \dot{m}_{fl} \times C_{p_{fl}} \times (T_{fl s} - T_{fl e})$$

Où :

\dot{m}_{fl} : débit du fluide caloporteur

C_{pfl} : chaleur spécifique du fluide caloporteur

T_{fls} : température de sortie du fluide caloporteur

T_{fle} : température d'entrée du fluide caloporteur

Transfert de chaleur entre le tube en cuivre et le fluide caloporteur

Considérant la convection forcée du fluide caloporteur dans le tube en cuivre, $q_{gagnée}$ est calculée par l'équation de Dittus-Boelter pour l'écoulement totalement développé dans un tube circulaire lisse. Par conséquent, le nombre de Nusselt local est donné par [38] :

$$Nu_1 = 0.023 \times Re^{\frac{4}{5}} \times Pr^{\frac{1}{3}} \quad (4.12)$$

Où $0,7 < Pr < 100$ et $10^4 < Re < 1.2 \times 10^5$

Pr est le nombre de Prandtl et Re le nombre de Reynolds.

Le nombre de Reynolds Re , pour un flux dans un tube circulaire est donné par :

$$Re = \frac{\rho \times V \times d}{\mu} = \frac{4 \times \dot{m}}{\pi \times d \times \mu} \quad (4.13)$$

Avec μ est la viscosité du fluide caloporteur.

Le nombre de Prandtl est donné par :

$$Pr = \frac{\mu \times Cp}{\lambda} \quad (4.14)$$

Le coefficient d'échange convectif entre le fluide caloporteur et l'absorbeur h est donné par l'équation suivante :

$$Nu = \frac{h \times d}{\lambda} \rightarrow h = \frac{Nu \times \lambda}{d} \quad (4.15)$$

λ est la conductivité thermique du fluide caloporteur.

➤ Bilant thermique sur un élément de longueur dx de l'échangeur

Flux élémentaire cédé par le MCP en fusion (à température de fusion constante)

$$d\phi = h_e \times dS \times (T_{MCP} - T_{(x)}) \quad (4.16)$$

Flux élémentaire reçu par l'eau au passage dans le tube de longueur dx , la paroi du tube étant supposée à la température du MCP.

$$d\phi = \dot{m}_e \times Cp_e \times dT \quad (4.17)$$

$$\dot{m}_e \times Cp_e \times dT = h_e \times dS \times (T_{MCP} - T_{(x)})$$

$$\dot{m}_e \times Cp_e \times dT = h_e \times \pi \times d_i \times dx \times (T_{MCP} - T_{(x)})$$

$$\frac{dT}{(T_{MCP} - T_{(x)})} = \frac{h_e \times \pi \times d_i \times dx}{\dot{m}_e \times Cp_e}$$

$$\int_{T_{ee}}^{T_{es}} \frac{dT}{(T_{(x)} - T_{MCP})} = - \int_0^L \frac{h_e \times \pi \times d_i \times dx}{\dot{m}_e \times Cp_e}$$

$$\text{Ln} \left[\frac{(T_{es} - T_{MCP})}{(T_{ee} - T_{MCP})} \right] = - \left[\frac{h_e \times \pi \times d_i \times L}{\dot{m}_e \times Cp_e} \right]$$

$$\frac{(T_{es} - T_{MCP})}{(T_{ee} - T_{MCP})} = \exp \left[- \frac{h_e \times \pi \times d_i \times L}{\dot{m}_e \times Cp_e} \right]$$

$$T_{es} = T_{MCP} - (T_{MCP} - T_{ee}) \exp \left[- \frac{h_e \times \pi \times d_i \times L}{\dot{m}_e \times Cp_e} \right] \quad (4.18)$$

4.7 Les pertes thermiques [39]

Une fois que les rayons solaires parviennent au récepteur au-dessus de la température ambiante, il en résulte un processus de perte de chaleur du récepteur.

Les pertes thermiques se produisent par convection, rayonnement et conduction. Cela dépend de la différence de température entre le récepteur et l'environnement, ainsi que de la géométrie du récepteur et du concentrateur solaire.

4.7.1 Pertes par Convection

Elles dépendent de la vitesse du vent ainsi que de sa direction par rapport au a l'axe de cylindre. Ces pertes sont proportionnelles à la surface de l'absorbeur ainsi qu'à la différence entre la température de surface du l'absorbeur et la température ambiante, selon la formule suivante [39].

$$Q_{\text{conv}} = h_{\text{conv}} A_{\text{abs}} (T_{\text{abs}} - T_{\text{amb}}) \quad (4.19)$$

Le coefficient de transfert de chaleur par convection est donné par l'équation suivante:

$$\text{Nu} = \frac{h \times d}{\lambda_{\text{air}}} \rightarrow h = \frac{\text{Nu} \times \lambda_{\text{air}}}{d} \quad (4.20)$$

Le nombre de Nusselt peut être calculé par la relation de Churchill et Chu, comme suit :

$$\text{Nu} = \left(0,60 + \frac{0,387 \text{ Ra}^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0,559}{\text{Pr}}\right)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{8}{27}}}\right)^2 \quad (4.21)$$

Le nombre de Rayleigh **Ra** :

$$\text{Ra} = \frac{g \times \beta \times d^3 (T_{\text{abs}} - T_{\text{amb}})}{\nu \times \alpha} = \text{Gr} \times \text{Pr} \quad (4.22)$$

Le nombre de Prandtl est donné par :

$$\text{Pr} = \frac{\mu \times c_p}{\lambda_{\text{air}}} \quad (4.23)$$

4.7.2 Les pertes par rayonnement

Ce sont les pertes de chaleur dû à l'émission de rayonnement infrarouge du récepteur. La perte de chaleur augmente à mesure que la température du récepteur augmente et dépasse la température ambiante.

La perte de chaleur radiative dépend de l'émissivité de la surface (ϵ_{abs}), de la constante de Stefan-Boltzmann (σ), de la température de surface (T_{abs}) et de la température ambiante Kelvin (T_{ciel}) [34].

$$Q_{\text{ray}} = \epsilon_{\text{abs}} \sigma A_{\text{abs}} (T_{\text{abs}}^4 - T_{\text{ciel}}^4) \quad (4.24)$$

4.8 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'explorer en profondeur les diverses facettes des capteurs solaires, depuis leur typologie jusqu'à leur performance. Nous avons analysé les principes sous-jacents, les composants essentiels et les paramètres déterminants pour leur efficacité. En examinant les modes de transfert thermique et en évaluant le bilan thermique, nous avons saisi l'importance cruciale de ces dispositifs dans la conversion de l'énergie solaire en une forme utilisable et leur rôle essentiel dans la création d'un avenir énergétique durable.

Chapitre 5 :

Réalisation du concentrateur solaire cylindro-parabolique

Dans ce chapitre, nous abordons les étapes de conception et de construction d'un condenseur cylindrique parabolique équipé d'un système de stockage thermique à base de matériaux à changement de phase (MCP) pour la production d'eau chaude sanitaire. Des canettes de soda en aluminium ont été choisies comme matériau de base pour créer le récepteur solaire dans le capteur solaire à cylindre parabolique. Il convient de noter que le recyclage de ces canettes contribue à réduire l'impact environnemental associé à leur production, ce qui renforce nos efforts vers la durabilité et la réduction de la perte de ressources naturelles.

Le récepteur solaire est conçu en forme de serpent, une conception innovante qui réduit l'espace utilisé et augmente la vitesse de circulation du fluide à l'intérieur du capteur, améliorant ainsi l'efficacité du transfert de chaleur. De plus, la paraffine est incorporée en tant que matériau à changement de phase (MCP) dans le système, ce qui contribue à améliorer l'efficacité du stockage thermique. Cela permet de stocker la chaleur pendant de longues périodes même en l'absence de soleil, augmentant ainsi l'efficacité globale du système.

Ce capteur solaire a été réalisé au Département de Génie Mécanique de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, témoignant de l'engagement de l'institution en faveur de la recherche et de l'innovation dans le domaine des énergies renouvelables.

5.1 Les différentes étapes de réalisation

Avant de commencer la fabrication de capteur solaire cylindro-parabolique, nous avons préparé une conception intégrée à l'aide du logiciel SolidWorks, en tenant compte de toutes les spécifications techniques et des besoins opérationnels pour garantir des performances optimales du produit. Le schéma de base est présenté dans la figure 5.1.

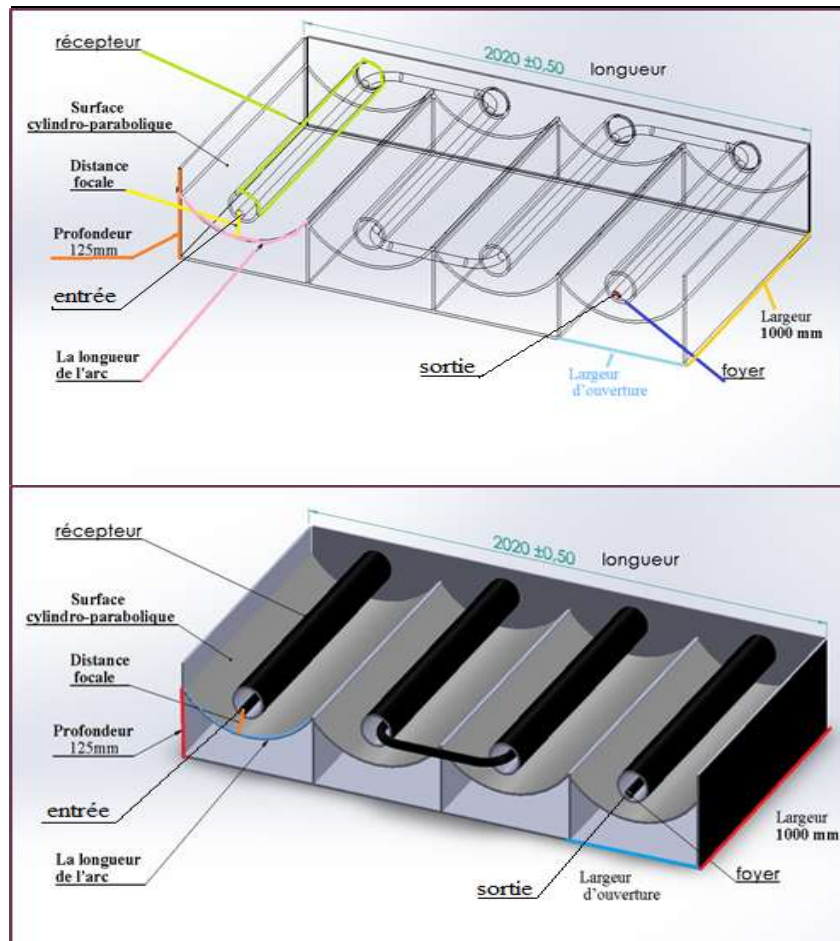


Figure 5.1 : Les différentes dimensions de concentrateur cylindro-parabolique

5.1.1 Le réflecteur

Calculs des différentes dimensions de la parabole

Les différentes dimensions de la parabole sont prises en prenant, notamment, l'angle d'ouverture à 90° et la longueur $L = 100$ cm et une largeur d'ouverture $d = 50$ cm.

A partir de la **figure 4.3** pour un angle d'ouverture de 90° on a : $\frac{f}{d} = 0,25$

➤ **f : Distance focale**

$$f = 0,25 \times d = 0,25 \times 500 = 125 \text{ mm} = 12,5 \text{ cm}$$

➤ **P_f : Profondeur**

$$P_f = \frac{d^2}{16f} = \frac{500^2}{16 \times 125} = 125 \text{ mm} = 12,5 \text{ cm}$$

➤ **Angle d'ouverture ψ**

$$\tan \psi = \frac{\frac{d}{f}}{2 - \frac{1}{8} \left(\frac{d}{f}\right)^2} = \frac{\frac{500}{125}}{2 - \frac{1}{8} \left(\frac{500}{125}\right)^2} = \frac{4}{0} = \alpha$$

$$\psi = \arctan \alpha = 90^\circ \text{ C}$$

➤ **La surface d'ouverture**

$$A_a = \pi \frac{d^2}{4} = 3,14 \frac{500^2}{4} = 196250 \text{ mm}^2 = 0,196250 \text{ m}^2$$

➤ **La longueur de l'arc (S)**

$$S = \frac{d}{2} \sqrt{\left(\left(\frac{4P_f}{d}\right)^2 + 1\right)} + 2f \ln\left[\frac{4P_f}{d} + \sqrt{\left(\left(\frac{4P_f}{d}\right)^2 + 1\right)}\right]$$

$$S = \frac{500}{2} \sqrt{\left(\left(\frac{4 \times 125}{500}\right)^2 + 1\right)} + 2 \times 125 \times \ln\left[\frac{4 \times 125}{500} + \sqrt{\left(\left(\frac{4 \times 125}{500}\right)^2 + 1\right)}\right]$$

$$S = 573,64 \text{ mm} = 57,364 \text{ cm}$$

➤ **La surface des réflecteurs**

$$A_{\text{réf}} = S \times L = 573,64 \times 1000 = 576310 \text{ mm}^2 = 0,576310 \text{ m}^2$$

➤ **La longueur de l'arc de réflecteur non concerné**

$$S_0 = \frac{d}{2} \sqrt{\left(\left(\frac{4P_f}{d}\right)^2 + 1\right)} + 2f \ln\left[\frac{4P_f}{d} + \sqrt{\left(\left(\frac{4P_f}{d}\right)^2 + 1\right)}\right]$$

$$S_0 = \frac{52}{2} \sqrt{\left(\left(\frac{4 \times 1,75}{52}\right)^2 + 1\right)} + 2 \times 125 \times \ln\left[\frac{4 \times 1,75}{52} + \sqrt{\left(\left(\frac{4 \times 1,75}{52}\right)^2 + 1\right)}\right]$$

$$S_0 = 59,78 \text{ mm} = 5,978 \text{ cm}$$

À l'aide du logiciel SolidWorks, nous avons préparé une conception montrant la surface réfléchissante qui réfléchit et la surface réfléchissante qui ne réfléchit pas pour un réflecteur solaire.

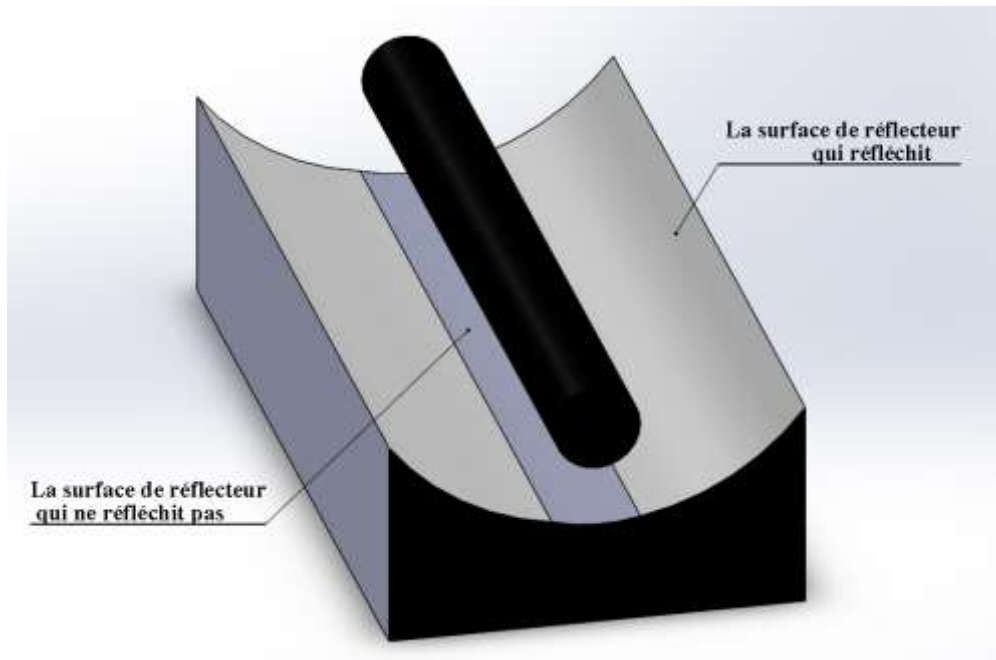


Figure 5.2 : Surface de réflecteur.

- La surface de l'arc de réflecteur qui ne réfléchit pas

$$A_0 = L \times S_0 = 1000 \times 59,78 = 59780 \text{ mm}^2 = 0,05978 \text{ m}^2$$

- La surface totale réfléchissante

$$A_{\text{tot}} = A_0 - A = 0,576 - 0,059 = 0,517 \text{ m}^2$$

Dans ce qui suit, nous avons développé un tracé détaillé de la courbe parabolique du capteur solaire. Le travail a été réalisé à l'aide de l'application courbe parabolique.

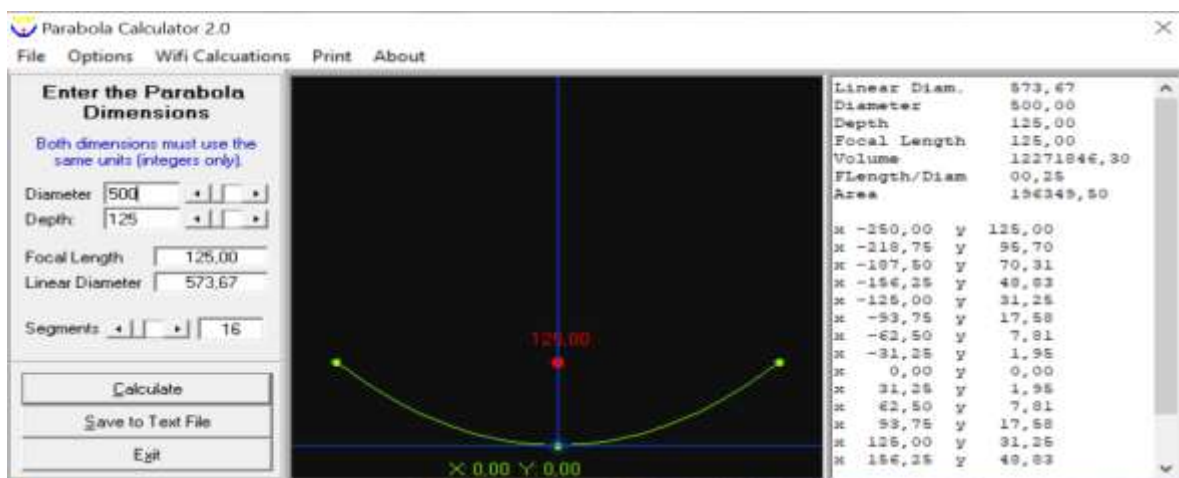


Figure 5.3 : Courbe de la parabole tracée avec Logiciels de la Parabole.

Le tableau suivant représente les valeurs obtenues à partir de l'application de courbe équivalente.

Tableau 5.1 : Coordonnées de quelques points de notre courbe.

x	y
-250,00	125,00
-218,75	95,70
-187,50	70,31
-156,25	48,83
-125,00	31,25
-93,75	17,58
-62,50	7,81
-31,25	1,95
00,00	00,00
31,25	1,95
62,50	7,81
93,75	17,58
125,00	31,25
156,25	48,83
187,50	70,31
218,75	95,70
250,00	125,00

En utilisant les valeurs tirées de l'application de courbe parabolique, nous avons développé un dessin détaillé sous Word de la courbe équivalente du capteur solaire cylindro-parabolique.

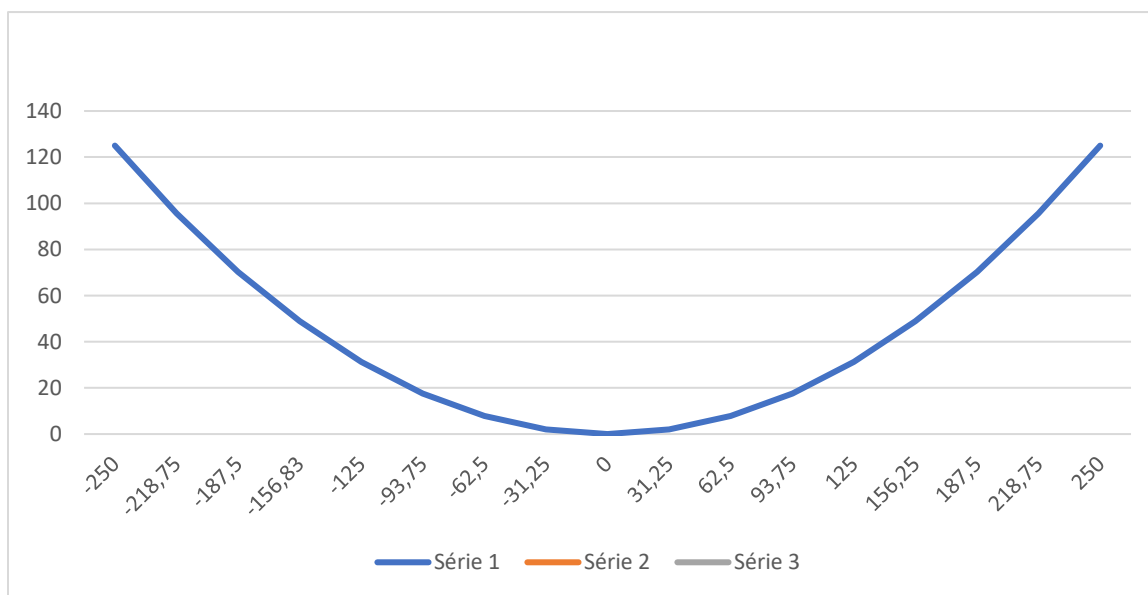


Figure 5.4 : Courbe de la parabole $y = \frac{x^2}{2P}$ tracée avec Excel.

5.1.2 Bilan thermique

Afin de déterminer la taille du concentrateur solaire, nous avons supposé que la vitesse de l'eau est de 2 mètres par seconde et que la température de l'eau à l'entrée est de 20 degrés Celsius, en plus de la température de fusion du matériau à changement de phase que nous utiliserons est de 55 degrés Celsius.

➤ **Le calcul de la température de sortie de l'eau**

$$T_{MCP} = 55^{\circ}\text{C}$$

$$T_{e.eau} = 20^{\circ}\text{C} \text{ (Eau de robinet)}$$

$$V_{eau} = 2 \text{ m/s}$$

➤ **Le calcul de la valeur moyenne**

$$\mu_{moyen} = \frac{\mu_{(20^{\circ}\text{C})} + \mu_{(40^{\circ}\text{C})}}{2} = \frac{(1,003 + 0,653)10^{-3}}{2} = 0,828 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$$

$$\lambda_{moyen} = \frac{\lambda_{(20^{\circ}\text{C})} + \lambda_{(40^{\circ}\text{C})}}{2} = \frac{(598,4 + 630,6)10^{-3}}{2} = 0,6145 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$Cp_{moyen} = \frac{Cp_{(20^{\circ}\text{C})} + Cp_{(40^{\circ}\text{C})}}{2} = \frac{(4181 + 4177)10^{-3}}{2} = 4179 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\rho_{moyen} = \frac{\rho_{(20^{\circ}\text{C})} + \rho_{(40^{\circ}\text{C})}}{2} = \frac{(998,21 + 995,22)}{2} = 995,21 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

➤ **Le calcul du débit volumique**

$$q_v = A \times V$$

A : section de tube de cuivre

V : la vitesse débitante estimée (prise égale) à 2 m/s

$$A = \frac{\pi \times d_i^2}{4} = \frac{3,14 \times 14^2}{4} = 153,86 \text{ mm}^2 = 0,00015386 \text{ m}^2$$

$$q_v = 0,00015386 \times 2 = 0,00030772 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 0,30772 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 18,46 \frac{\text{l}}{\text{min}}$$

➤ **Le calcul du débit massique**

$$\dot{m}_e = q_v \times \rho = 0,00030772 \times 995,21 = 0,30624 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

➤ **Le calcul du nombre adimensionnel de Reynolds**

$$Re = \frac{\rho_{\text{eau}} \times V_{\text{eau}} \times d_i}{\mu_{\text{eau}}} = \frac{995,21 \times 2 \times 0,014}{0,828 \times 10^{-3}} = 33654$$

$Re > 10^4$ Le régime d'écoulement est donc turbulent

➤ **Le calcul du nombre adimensionnel de Prandtl**

$$Pr = \frac{\mu_{\text{eau}} \times Cp_{\text{eau}}}{\lambda_{\text{eau}}} = \frac{0,828 \times 10^{-3} \times 4179}{0,6415} = 5,63$$

➤ **Le calcul du nombre adimensionnel de Nusselt**

En convection forcée, pour un régime turbulent, la corrélation utilisée pour un écoulement à l'intérieur de tubes lisses est :

$$0,7 < Pr < 100 \text{ et } 10^4 < Re < 1,2 \times 10^5$$

$$Nu = 0,023 \times Re^{\frac{4}{5}} \times Pr^{\frac{1}{3}}$$

Soit :

$$Nu = 0,023 \times 33654^{\frac{4}{5}} \times 5,63^{\frac{1}{3}} = 180,61$$

➤ **Le calcul du coefficient d'échange h_e**

$$Nu = \frac{h_e \times di}{\lambda_{\text{eau}}} \rightarrow h_e = \frac{Nu \times \lambda_{\text{eau}}}{di} = \frac{151,34 \times 0,6145}{0,014} = 7927,48$$

➤ **Bilant thermique pour un élément de longueur dx de l'échangeur**

Flux élémentaire cédé par le MCP en fusion (à température de fusion constante)

$$d\phi = h_e \times dS \times (T_{\text{MCP}} - T_{(x)})$$

Flux élémentaire reçu par l'eau au cours de son passage dans le tube de longueur dx

$$d\Phi = \dot{m}_e \times Cp_e \times dT$$

$$\dot{m}_e \times Cp_e \times dT = h_e \times dS \times (T_{MCP} - T_{(x)})$$

$$\dot{m}_e \times Cp_e \times dT = h_e \times \pi \times d_i \times dx \times (T_{MCP} - T_{(x)})$$

$$\frac{dT}{(T_{MCP} - T_{(x)})} = \frac{h_e \times \pi \times d_i \times dx}{\dot{m}_e \times Cp_e}$$

$$\int_{T_{ee}}^{T_{es}} \frac{dT}{(T_{(x)} - T_{MCP})} = - \int_0^L \frac{h_e \times \pi \times d_i \times dx}{\dot{m}_e \times Cp_e}$$

$$\text{Ln} \left[\frac{(T_{es} - T_{MCP})}{(T_{ee} - T_{MCP})} \right] = - \left[\frac{h_e \times \pi \times d_i \times L}{\dot{m}_e \times Cp_e} \right]$$

$$\frac{(T_{es} - T_{MCP})}{(T_{ee} - T_{MCP})} = \exp \left[- \frac{h_e \times \pi \times d_i \times L}{\dot{m}_e \times Cp_e} \right]$$

$$T_{es} = T_{MCP} - (T_{MCP} - T_{ee}) \exp \left[- \frac{h_e \times \pi \times d_i \times L}{\dot{m}_e \times Cp_e} \right]$$

Pour **L = 1m**

$$T_{es} = T_{MCP} - (T_{MCP} - T_{ee}) \exp \left[- \frac{h_e \times \pi \times d_i \times L}{\dot{m}_e \times Cp_e} \right]$$

$$T_{es} = 55 - (55 - 20) \exp \left[- \frac{7749,8 \times 3,14 \times 0,014 \times 1}{0,30624 \times 4179} \right]$$

$$T_{es} = 28,18^\circ\text{C}$$

Pour **L=3 m**

$$T_{es} = T_{MCP} - (T_{MCP} - T_{ee}) \exp \left[- \frac{h_e \times \pi \times d_i \times L}{\dot{m}_e \times Cp_e} \right]$$

$$T_{es} = 55 - (55 - 20) \exp \left[- \frac{7749,8 \times 3,14 \times 0,014 \times 3}{0,30624 \times 4179} \right]$$

$$T_{es} = 39,25^\circ\text{C}$$

Pour **L=4m**

$$T_{es} = T_{MCP} - (T_{MCP} - T_{ee}) \exp \left[- \frac{h_e \times \pi \times d_i \times L}{\dot{m}_e \times Cp_e} \right]$$

$$T_{es} = 55 - (55 - 20) \exp \left[- \frac{7749,8 \times 3,14 \times 0,014 \times 4}{0,30624 \times 4179} \right]$$

$$T_{es} = 42,93^{\circ}\text{C}$$

Pour $L=5$ m

$$T_{es} = T_{MCP} - (T_{MCP} - T_{ee}) \exp\left[-\frac{h_e \times \pi \times d_i \times L}{\dot{m}_e \times Cp_e}\right]$$

$$T_{es} = 55 - (55 - 20) \exp\left[-\frac{7749,8 \times 3,14 \times 0,014 \times 5}{0,30624 \times 4179}\right] = T_{es} = 45,75^{\circ}\text{C}$$

Pour $L=7$ m

$$T_{es} = T_{MCP} - (T_{MCP} - T_{ee}) \exp\left[-\frac{h_e \times \pi \times d_i \times L}{\dot{m}_e \times Cp_e}\right]$$

$$T_{es} = 55 - (55 - 20) \exp\left[-\frac{7749,8 \times 3,14 \times 0,014 \times 7}{0,30624 \times 4179}\right] = T_{es} = 49,57^{\circ}\text{C}$$

Tableau 5.2 : Evolution de la température en fonction de la longueur du récepteur.

Longueur (m)	1	2	3	4	5	6	7	9	11	12
Température (°C)	28,18	34,44	39,25	42,93	45,75	47,9	49,5	51,81	53,12	53,56

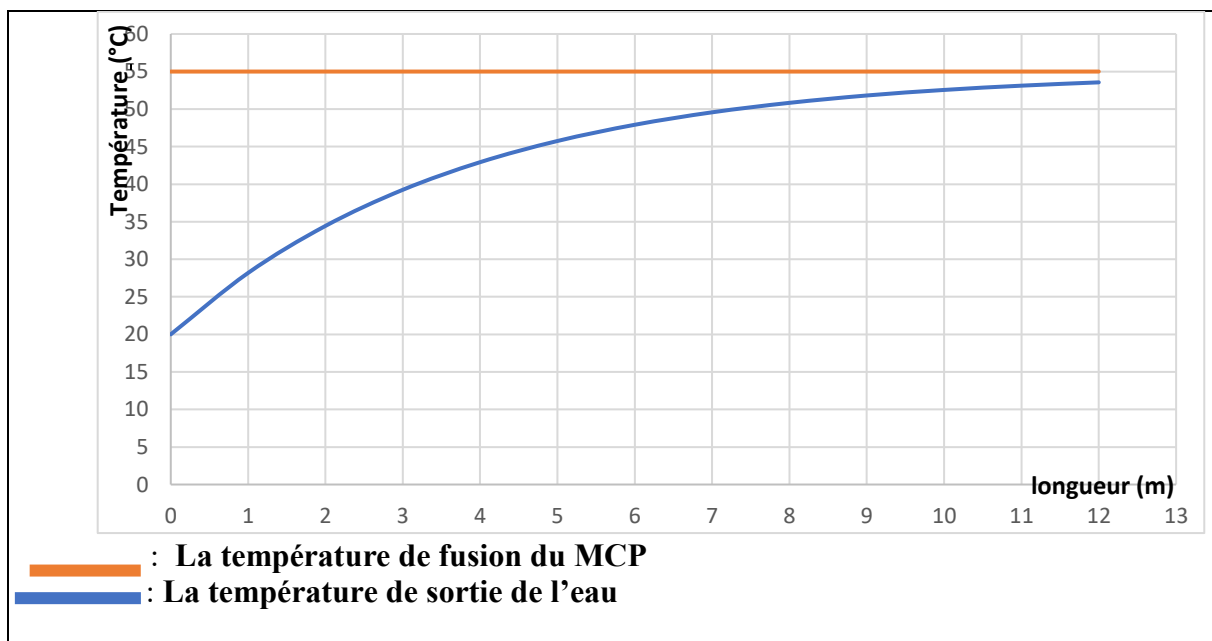


Figure 5.5 : Evolution de la température de sortie d'eau et de la température de fusion du MCP en fonction de la longueur des récepteurs.

5.1.3 Réalisation du réflecteur solaire

Première étape

La première étape de notre travail a concerné la préparation et la collecte de matériaux à utiliser pour la réalisation du réflecteur solaire. Pour ce faire, nous avons récupéré une planche en bois de 2 m de longueur et 1 m de largeur pour constituer la base du concentrateur solaire.

Deuxième étape

Après avoir préparé trois plaques en bois, chacun mesurant 2 mètres de long et environ 1,5 cm d'épaisseur, nous avons dessiné sur ces planches en bois la courbe parabolique précédemment dessinée (**Figure 5.4**). Il a été procédé de manière à dessiner quatre courbes adjacentes dans chaque pièce, et ont été découpées en menuiserie à l'aide d'outils précis. Par la suite, ces pièces ont été installées au milieu et sur les côtés de la base pour former un cadre de support pour la structure cylindrique équivalente, en plus de deux morceaux de bois à fixer de chaque côté de la base. Chaque pièce mesurait 1 mètre de long et 35 centimètres de large.



Figure 5.6 : Etape de réalisation de cadre de support pour la structure cylindrique équivalent.

Troisième étape

Pour cette étape, nous avons rempli la structure du concentrateur solaire avec des feuilles de polystyrène, en plus de couper la feuille de polystyrène sur une longueur de 60 cm. Aussi, il a été procédé à l'étape suivante qui consiste à couper le polystyrène en deux dans le sens de la longueur tous les 5 cm et de le casser pour former des structures cylindriques équivalentes. Nous avons utilisé du polystyrène comme isolant pour réduire les pertes de chaleur du capteur.



Figure 5.7: Étapes d'installation des panneaux en polystyrène .

Quatrième étape

Dans cette étape, nous avons choisi d'utiliser l'aluminium comme réflecteur. A défaut de fournir des feuilles d'aluminium suffisamment grandes, nous avons découpé des feuilles d'étain (tableaux d'écriture) de 1 mètre de long et 60 centimètres de large et d'une épaisseur de

300 μm pour former une structure parabolique. Par la suite, nous avons collé des feuilles d'aluminium dessus et l'avons laissé sécher.



Figure 5.8 :Etape de fabrication des feuilles en aluminium.

Cinquième étape :

Cette étape consiste essentiellement à placer les feuilles recouvertes d'aluminium à l'endroit désigné pour former le réflecteur.



Figure 5.9 : Étapes d'installation des tôles d'aluminium.

5.1.4 Le récepteur

A Le choix de cannettes

Nous avons choisi des cannettes de soda en aluminium comme matériau de base pour créer le récepteur solaire de notre capteur solaire cylindro_ parabolique. Ces cannettes ont été choisies en raison de leur fine épaisseur qui contribue à augmenter la transmission thermique, ce qui facilite un transfert rapide de chaleur vers l'intérieur, améliorant ainsi l'efficacité des performances. Pour mener notre étude, nous avons choisi deux modèles de boîtes différents. Ceci nous permettra d'analyser l'effet de différentes conceptions.

De plus, nous tenons à souligner que le recyclage de ces cannettes contribue à réduire l'impact environnemental associé à leur production, ce qui soutient nos efforts visant à atteindre une plus grande durabilité et à améliorer le cycle de vie des produits en général.

Calcul des différentes dimensions du récepteur

- La surface de la canette de soda fait référence à la surface externe totale de la canette et peut être calculée en fonction des dimensions de la canette.

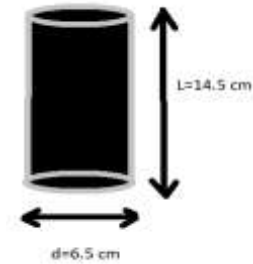
Pour calculer, nous utilisons la formule de l'aire

$$s_c = 2 \times \pi \times r \times h$$

Où :

r : est le rayon de la base circulaire de la canette

h : est la hauteur de la canette



La canette 1

Figure 5.10 : Dimensions de la canette 1

$$s_{c1} = 2 \times 3,14 \times 0,0325 \times 0,145 = 0,0295m^2$$

La canette 2

$$s_{c2} = 2 \times 3,14 \times 0,026 \times 0,134 = 0,0218m^2$$

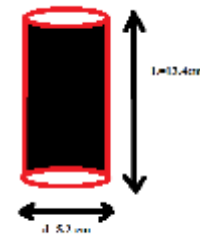


Figure 5.11 : Dimensions de la canette 2

- La surface d'échange d'une canette de soda fait référence à la surface totale sur laquelle le réflecteur concentre la lumière du soleil sur une petite zone pour augmenter l'intensité du rayonnement solaire.

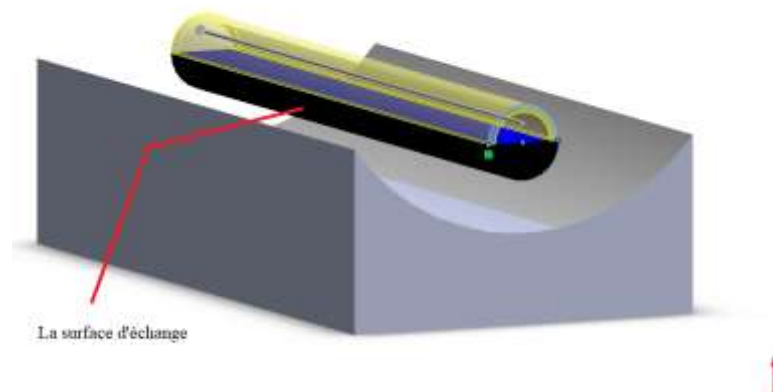


Figure 5.12 : La surface d'échange de récepteur

Pour calculer, nous utilisons cette formule

$$S_{ech} = \frac{S_c}{2}$$

S_{ech} : la surface de la cannette recevant le rayonnement réfléchi

La cannette 1

$$S_{ech} = \frac{0,0295}{2} = 0,01475m^2$$

La cannette 2

$$S_{ech} = \frac{0,0218}{2} = 0,0109m^2$$

- La surface totale de réception est la surface de toutes les cannettes de soda utilisées pour former un récepteur dans le concentrateur solaire, où la chaleur est collectée.

Cette superficie comprend toutes les zones captant l'énergie solaire.

La cannette 1

$$S_{tot} = S_{c1} \times N_{can} = 0,0295 \times 7 = 0,2065m^2$$

N_{can} : nombre de cannettes

La cannette 2

$$S_{tot} = S_{c2} \times N_{can} = 0,0218 \times 8 = 0,1744 m^2$$

- Volume de la canette v_c : Il s'agit de l'espace interne total disponible à l'intérieur d'une canette de soda. Il est calculé à l'aide de cette formule qui est :

La cannette 1

$$v_{c1} = \pi \times r^2 \times L = 3,14 \times 0,0325^2 \times 0,145 = 4,8 \times 10^{-4}m^3$$

$$v_{c tot} = v_{c1} \times N_{can} = 4,8 \times 10^{-4} \times 7 = 33,6 \times 10^{-4}m^3$$

La cannette 2

$$v_{c2} = \pi \times r^2 \times L = 3,14 \times 0,026^2 \times 0,134 = 2,844 \times 10^{-4}m^3$$

$$v_{c\ tot} = v_{c2} \times N_{can} = 2,844 \times 10^4 \times 8 = 22,75 \times 10^{-4} m^3$$

- La capacité de la canette à échanger de l'énergie thermique détermine l'efficacité de la canette à absorber la chaleur du soleil et à la convertir en énergie thermique, ce qui entraîne une augmentation plus rapide de la température du liquide.

Il est calculé à l'aide de cette formule qui est :

La cannette 1

$$C_1 = \frac{S_{ech}}{v_{c1}} = \frac{0,01475}{4,8 \times 10^4} = 30,7 m^{-1}$$

La cannette 2

$$C_2 = \frac{S_{ech}}{v_{c2}} = \frac{0,0109}{2,844 \times 10^4} = 38,27 m^{-1}$$

- **Calculer la densité de flux réfléchi φ :**

Le rayonnement global sur un plan fixe pour la journée du 5/6/2024 à Tizi Ouzou.

$$\varphi = 700 W/m^2 \quad [40]$$

- Le rayonnement incident I_{in} : Il s'agit de la quantité d'énergie solaire frappant la surface du réflecteur dans un système de concentration solaire.

$$I_{in} = \varphi \times S_{ref}$$

φ : Le rayonnement global

S_{ref} : La surface de l'arc effective de réflecteur qui réfléchit

$$S_{ref} = L \times l$$

l : Largeur de la partie réfléchissante du réflecteur

L : Longueur du récepteur

$$l = d_{ref} - d_{rec}$$

d_{ref} : Largeur totale de l'arc du réflecteur

d_{rec} : La largeur horizontale du dispositif de réception

La cannette1

$$l = d_{\text{ref}} - d_{\text{rec}} = 500 - 65 = 435\text{mm}$$

$$S_{\text{ref}} = L \times l = 1000 \times 435 = 435000\text{mm}^2 = 0,435\text{m}^2$$

$$I_{\text{in}} = \varphi \times S_{\text{ref}} = 700 \times 0,435 = 304,5 \text{ W}$$

La cannette 2

$$l = d_{\text{refl}} - d_{\text{recp}} = 500 - 52 = 448\text{mm}$$

$$S_{\text{ref}} = L \times l = 1000 \times 448 = 448000\text{mm}^2 = 0,448\text{m}^2$$

$$I_{\text{in}} = \varphi \times S_{\text{ref}} = 700 \times 0,448 = 313,6 \text{ W}$$

- Le rayonnement réfléchi : Le rayonnement solaire réfléchi est la partie de la lumière solaire qui est réfléchiée par une surface réfléchissante plutôt qu'absorbée.

La cannette1

$$I_{\text{ref}} = I_{\text{in}} \times \rho = 304,5 \times 0,92 = 280,14 \text{ W}$$

La cannette 2

$$I_{\text{ref}} = I_{\text{in}} \times \rho = 313,6 \times 0,92 = 288,512 \text{ W}$$

ρ : Coefficient de reflexion de l'aluminium

- Densité de flux réfléchi : est la quantité de rayonnement solaire réfléchiée par unité de surface réfléchissante, exprimée en watts par mètre carré (W/m^2).
Plus la densité de flux réfléchi est élevée, plus la quantité de rayonnement solaire atteignant le récepteur est importante, ce qui signifie que plus d'énergie thermique est disponible pour le système.

La cannette1

$$I_{\text{ref}} = \varphi \times S_{\text{rec}}$$

$$S_{\text{rec}} = 0,065 \times 1 = 0,065 \text{ m}^2$$

$$\varphi = \frac{I_{\text{ref}}}{S_{\text{rec}}} = \frac{280,14}{0,065} = 4309,84 \text{ W /m}^2$$

La cannette 2

$$I_{\text{ref}} = \varphi \times S_{\text{ref}}$$

$$S_{\text{réc}} = 0,052 \times 1 = 0,052 \text{ m}^2$$

$$\varphi = \frac{I_{\text{ref}}}{S_{\text{réc}}} = \frac{288,512}{0,052} = 5548,30 \text{ W /m}^2$$

$S_{\text{réc}}$: Surface d'horizontale de récepteur

Nous avons décidé de choisir la deuxième canette de soda car sa capacité à échanger de l'énergie thermique est supérieure à celle de la première. De plus, la densité de flux réfléchi de la première canette de soda est inférieure à la densité de flux réfléchi de la seconde canette.

B- Choix de MCP

➤ Matériaux à changement de phase

Nous avons choisi la cire de paraffine (cire utilisée pour l'éclairage) comme matériau à changement de phase à utiliser dans le stockage de l'énergie thermique pour le chauffage de l'eau domestique en raison de ses propriétés appropriées. Les propriétés du MCP utilisé dans le présent travail sont rapportées dans le tableau ci-dessous [38 ,41] :

Tableau 5.3 : Caractéristiques de paraffine

Propriété	Valeur
Chaleur latente de fusion (kJ/kg)	210
Point de fusion (°C)	55
Densité de la paraffine solide (kg/m ³)	850
Densité de la paraffine liquide (kg/m ³)	790
Conductivité thermique solide (W/m. K)	0,25
Conductivité thermique liquide (W/m. K)	0,2
Chaleur spécifique solide (kJ/kg. K)	2,14
Chaleur spécifique du liquide (kJ/kg. K)	2,10

La conductivité thermique de la cire de paraffine étant très faible, nous avons pensé à trouver une solution pour améliorer la conductivité thermique de la cire de paraffine. Une solution proposée consiste à utiliser des ailettes en aluminium pour améliorer la cinétique de

charge et de décharge. L'aluminium a une conductivité thermique relativement élevée d'environ 237 W/m. K comparée à la cire de paraffine qui peut être inférieure à 0,2 W/m.K. Cela permet aux ailettes en aluminium de transférer la chaleur plus efficacement.

L'ajout d'ailettes en aluminium à la cire de paraffine améliore considérablement les performances du système en améliorant la conductivité thermique et en distribuant la chaleur plus efficacement. Cela contribue à accélérer le processus de chauffage et de refroidissement de la cire, à améliorer l'efficacité du stockage et de la libération d'énergie, ainsi qu'à améliorer la réactivité dans différents environnements.

➤ Préparation de cire de paraffine

Pour mener à bien les essais, nous avons utilisé 15 boîtes de cire et avons réduit les bougies en petits débris et ce pour les insérer plus facilement dans les canettes de soda.



Figure 5.13 : La cire de paraffine.

Calcul de la quantité de matériaux à changement de phase dans un seul récepteur

- Volume de tube de cuivre :

$$v_{\text{tube}} = \pi \times r^2 \times L = 3,14 \times 0,008^2 \times 1 = 2,009 \times 10^{-4} \text{m}^3$$

- Volume de MCP

$$v_{\text{MCP}} = v_{\text{canette}} - v_{\text{tube}} = 22,75 \times 10^{-4} - 2,009 \times 10^{-4} = 20,74 \times 10^{-4} \text{m}^3$$

- La masse de paraffine

$$M = \text{densité} \times \text{volume} = 800 \times 20,74 \times 10^{-4} = 1,6592 \text{ kg}$$

C- Le choix de la colle

Nous avons choisi la colle Alteco AB, car elle recèle de bonnes caractéristiques, notamment sa résistance aux températures élevées pour le collage des canettes de soda et des tuyaux en cuivre.

Colle époxy rapide Alteco en 2 tubes A/B.

La colle utilisée est de nom commercial Alteco, caractérisée par ses bonnes propriétés d'adhésion. C'est un adhésif utilisé pour des tuyaux A/B dans la construction et l'industrie. Elle convient pour les réparations et le soudage, cela rend la force de liaison supérieure. Elle adhère sur tous les métaux, plastiques, caoutchouc, bois, céramique, verre et béton. Résistant aux acides, aux alcalis, à l'huile, aux solvants et aux produits chimiques. Ininflammable, non rétractable et imperméable. Capacité : 10g.

Mode opératoire

L'application de colle époxy suit un protocole bien défini, récapitulé ci-après :

- 1- On utilise une quantité égale de matériaux A et B (selon les besoins), puis on mélange les deux matériaux pendant trois minutes.
- 2- Placez-le sur la surface à réparer et laissez-le agir environ une demi-heure.



Figure 5.14 : Colle époxy rapide Alteco en 2 tubes A/B.

La colle polyester

La colle polyester est une matière synthétique thermoplastique à deux composants. Le premier composant est un mélange de résine polyester insaturée et d'un monomère vinylique tel que le styrène. Ce composant a un aspect liquide ou pâteux et est probablement renforcé de fibres de verre. Le deuxième ingrédient est un initiateur de radicaux tel que le peroxyde de benzoyle. Il se présente sous forme de poudre.

Lors du mélange des deux composants et grâce à l'ajout d'une petite quantité d'initiateur, une réaction chimique (réticulation) se produit entre le polyester insaturé et le monomère vinylique.



Figure 5.15 : La colle polyester.

5.1.5 Réalisation du récepteur

Les travaux de conception et de la fabrication du récepteur ont été menés au sein de la halle technologique située à Oued-Aissi à Tizi-Ouzou. Ce dernier dispose d'un matériel nécessaire pour préparer les différentes étapes, notamment, les canettes de soda et ailettes.

➤ Préparation des canettes

Après avoir effectué les calculs nécessaires pour trier et choisir les canettes de soda en aluminium adaptées à notre récepteur, mesurant chacune 52 mm de diamètre et 134 mm de longueur, nous avons d'abord sélectionné des canettes de soda exemptes d'impuretés et les avons bien nettoyées. Ensuite, nous avons commencé le processus de découpe des canettes de soda, en retirant d'abord soigneusement le dessus de toutes les canettes de soda à l'aide d'un aiguiseur

de couteaux et de lames tranchantes. Nous avons ensuite procédé à la fabrication d'un moule en aluminium adapté à la taille des canettes et au perçage d'un trou (assimilé à un moule) au milieu d'un de ses côtés, d'un diamètre de 16 mm. Ensuite, le moule a été placé dans les canettes de soda pour qu'il s'adapte parfaitement à l'intérieur, afin de conserver sa forme pendant le perçage. Par la suite, nous avons percé un trou d'un diamètre de 16 mm au milieu de l'autre côté des canettes. Pour ce faire, nous avons utilisé un tour pour fabriquer le moule et le poinçonner au milieu. Cela permettra aux canettes d'être montées sur des tubes en cuivre. Les différentes étapes sont présentées dans la figure 5.16.

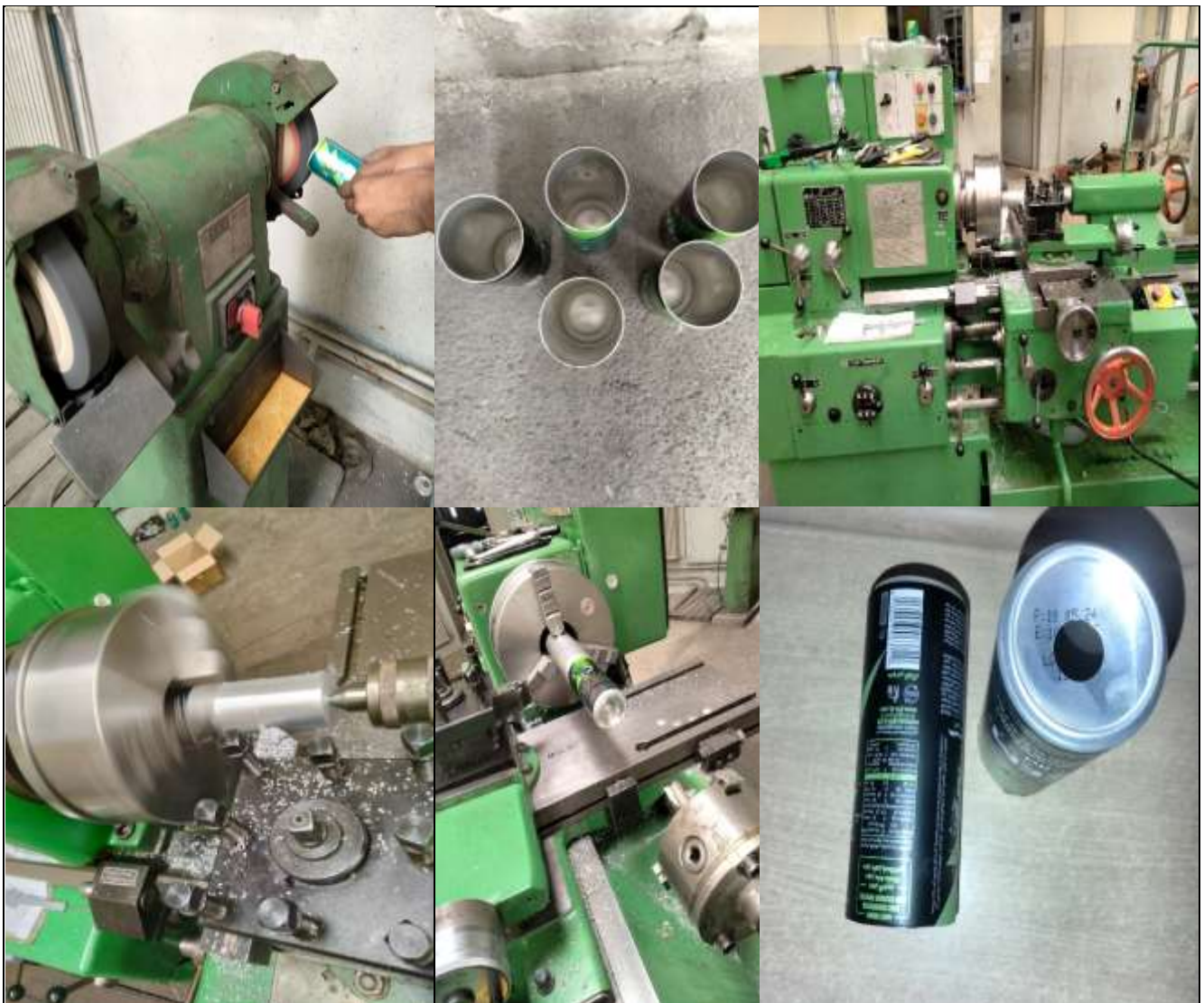


Figure 5.16 : Découpe et perçage de canettes.

➤ **Préparation des ailettes**

Nous avons découpé les canettes en aluminium avec des ciseaux en disques d'un diamètre de 52 mm pour les adapter aux canettes. Après cela, nous avons percé un trou au milieu de chaque disque d'un diamètre de 16 mm à l'aide d'une perceuse.

Pour la préparation des ailettes, nous avons découpé les canettes en aluminium avec des ciseaux en disques d'un diamètre de 52 mm pour les adapter aux canettes. Après cela, nous avons percé un trou au milieu de chaque disque d'un diamètre de 16 mm à l'aide d'une perceuse. Les différentes étapes suivies sont montrées dans la figure 5.17.



Figure 5.17 : Découpe et perçage des ailettes.

➤ Préparation de récepteur

Après avoir fini de préparer les canettes de soda, il a été procédé par la suite à la mise en place et la préparation du récepteur. Pour ce faire, nous avons retenus quatre tubes de cuivre de 16 mm de diamètre et 110 mm de long et avons commencé par insérer le tube de cuivre dans les canettes de soda, en ajoutant un peu de paraffine et en pressant la cire de paraffine dans la canette avec un bâton pour chasser l'air, puis en ajoutant les nageoires. Le processus a été répété à plusieurs reprise jusqu'à ce que la canette de soda soit pleine, puis on la colle avec de la colle Altico AB sur les bords et au milieu de la canette de soda. De même manière, nous préparons une autre canette remplie de cire de paraffine et d'ailettes à coller à la première canette, et nous répétons le processus jusqu'à la neuvième canette de soda.



Figure 5.18 : Étapes de préparation du récepteur.

Peinture absorbante

Nous avons choisi le noir pour peindre la surface du récepteur solaire car les matériaux noirs ont tendance à être plus chauds que les matériaux de couleur claire lorsqu'ils sont exposés

à la lumière du soleil en plus d'absorber la majeure partie du spectre lumineux, ce qui les rend efficaces pour convertir le rayonnement solaire en chaleur.

➤ **Installation des récepteurs à l'endroit désigné**

Pour mieux réussir l'opération de la mise en place des récepteurs, nous découpons en premier deux morceaux de verre de 2 mètres chacun de long et 30 cm de large. De plus, nous avons également déterminé l'emplacement des récepteurs dans les deux morceaux de verre, et percé des trous dans le verre à la place des récepteurs d'un diamètre de 16 mm, longitudinalement, jusqu'à l'extrémité du bord du verre, pour faciliter l'installation des récepteurs. Par suite, nous avons également préparé 8 morceaux de bois, chacun mesurant 15 cm de long et 5 cm de large, et les avons collés avec de la lysine. Aussi, nous avons percé des trous dans les pièces à la place des récepteurs d'un diamètre de 16 mm et dans le sens de la longueur jusqu'à l'extrémité d'un bord, tout comme nous l'avons fait pour le verre. Après cela, nous avons procédé à l'installation des récepteurs à l'endroit désigné. Dès que le choix du lieu a été désigné, nous avons collé les tubes en cuivre avec la colle Alteco, et le concentrateur solaire était prêt pour une expérimentation préliminaire.



Figure 5.19 : Étapes d'installation des récepteurs à l'emplacement spécifié.

Tableau 5.4 : Caractéristiques du capteur cylindro-parabolique.

Symbole	Paramètre	Valeur	Unité
Structure du support en bois			
L	Longueur	2	m
l	Largeur	1	m
Support cylindro-parabolique			
L	Longueur	1	m
d	Largeur d'ouverture	0,5	m
<i>f</i>	Distance focale	0,125	m
<i>P_f</i>	Profondeur	0,125	m
<i>ψ</i>	Angle d'ouverture	90	°
<i>A_a</i>	La Surface d'ouverture	0,196250	<i>m</i> ²
<i>S</i>	La longueur de l'arc	0,57364	<i>m</i>
<i>A_{réf}</i>	La Surface des réflecteurs	0,576310	<i>m</i> ²
Récepteurs (conduite de Cannelle +Tube De Cuivre)			
L	Longueur des Cannelles	1	m
e	Épaisseur	0,13	mm
<i>L₁</i>	Longueur du Tube De Cuivre	1,10	m
<i>d_i</i>	Diamètre intérieur de tube cuivre	0,014	m
<i>d_e</i>	Diamètre extérieur de tube cuivre	0,016	m

➤ **Rapport de concentration**

$$C = \frac{A_0}{A_r} = \frac{0,517}{0,1744} = 2,96$$

Tableau 5.4 : Les caractéristiques des matériaux utilisés.

Cuivre	
Masse volumique kg/m^3	$\rho = 8954$
Conductivité thermique $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$	$\lambda = 383$
Chaleur spécifique $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$	$C_p = 386$
Température de fusion $^\circ\text{C}$	$T = 1085$
L'émissivité	$\varepsilon = 0,07$
Aluminium	
Masse volumique kg/m^3	$M = 2719$
Conductivité thermique $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$	$\lambda = 202,4$
Chaleur spécifique $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$	$c_p = 871$
Coefficient de réflexion	$\rho = 0,92$
Peinture noire	
Absorptivité	$\alpha = 0,95$
Emissivité	$\varepsilon = 0,05$
L'eau	
Chaleur spécifique $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$	$C_p = 4180$
Conductivité thermique $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$	$\lambda = 0,6071$ (a 25°C)
Masse volumique kg/m^3	$\rho_0 = 1000$
La viscosité dynamique $\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$	$\mu = 1,002 \times 10^{-3}$ (a 25°C)

5.1.6 Fabrication du stockeur

Après avoir terminé la construction du capteur solaire thermique, et afin de réaliser des expériences sur celui-ci, nous avons ajouté un réservoir d'eau d'une capacité de 50 litres.

Mode opératoire : Comment faire un réservoir

Comme première étape, nous avons tout d'abord fabriqué la structure extérieure en bois, puis avons placé le réservoir d'eau à l'intérieur. Entre le châssis et le réservoir, nous avons ajouté un matériau en polystyrène pour l'isolation thermique, ce qui contribue à réduire les pertes de chaleur. De plus, nous avons ajouté des canettes en aluminium remplies de cire de paraffine, un matériau capable de stocker efficacement la chaleur. La cire de paraffine absorbe la chaleur

pendant la journée et la restitue lentement pendant la nuit, ce qui améliore la continuité de l'apport d'énergie thermique.



Figure 5.20 : Réservoir d'eau

5.1.7 La pompe

Pour faire circuler le fluide caloporteur dans le capteur, nous avons choisi pour nos expérimentations une pompe de machine à laver, car le débit d'eau est de 4,5 litres par minute, ce qui la rend adaptée à cet usage.



Figure 5.21 : La pompe.

➤ Mesure du débit

Pour mesurer le débit du fluide caloporteur à la sortie du capteur, nous avons utilisé une méthode traditionnelle basée sur un chronomètre. Cette méthode est basée sur le calcul du temps nécessaire pour remplir un réservoir de 1 litres, ce qui permet de déterminer avec précision le débit.

5.2 Mesure de température

Pour mesurer différentes températures sur l'appareil (concentrateur solaire + stockage), nous placerons les thermocouples aux emplacements suivants :

- Le thermocouple à l'entrée du fluide transfère la chaleur au condenseur.
- Thermocouple en sortie du fluide caloporteur du condenseur.
- Thermocouple sur la paroi inférieure de l'absorbeur.
- Thermocouple à l'intérieur du réservoir de stockage.
- Un thermocouple pour mesurer la température ambiante.

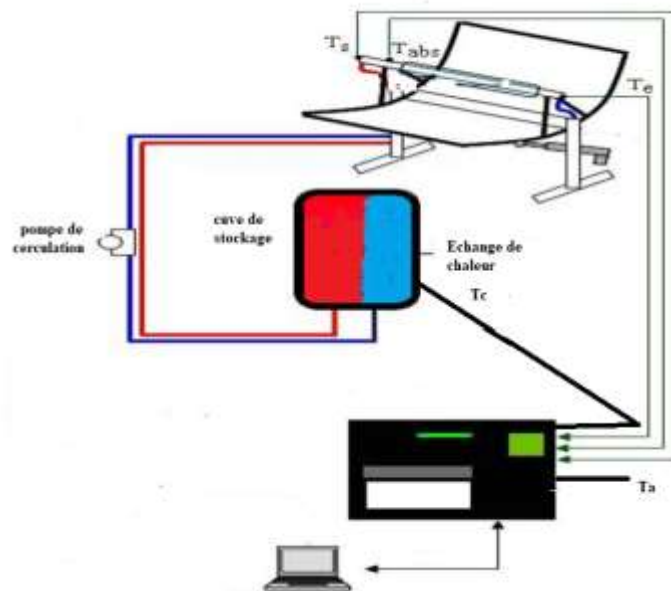


Figure 5.22 : Schéma d'acquisition de données avec thermocouple.

5.2.1 Les Thermocouples

Un thermocouple est un capteur permettant de mesurer des températures selon le principe de l'effet Seebeck. Il se compose de deux fils métalliques différents connectés en un point appelé point double, où une tension électrique est générée proportionnelle à la différence de température entre le point double et le point de référence.

5.2.2 Types de thermocouples

Type K : Fabriqué en nickel et chrome, utilisé dans diverses applications.

Type J : en fer et nickel, utilisé à basse température.

Type T : fabriqué en cuivre et alliage de cuivre, utilisé dans les applications scientifiques.



Figure 5.23 : Thermocouple couple de type K.

5.2.3 Comment lire les données

Pour la collecte de données, un enregistreur de données tel que le « Pico USB TC-08 » informatisé facile à utiliser est utilisé, ce qui permet de collecter et d'analyser facilement les données de jusqu'à 8 thermocouples.



Figure 5.24 : Pico Technology Enregistreur de données, Température.

5.2.4 Les graphes

Les résultats sont donnés par les graphes ci-dessous tracés à partir de logiciel Origin.

5.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné les étapes de conception, de fabrication et d'assemblage du capteur cylindrique et de l'unité de stockage équivalents. Nous avons également expliqué la méthode et l'instrument nécessaires pour mesurer les températures nécessaires à l'étude.

Chapitre 6 :

Résultats et discussions

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats expérimentaux obtenus à partir d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique installé au département de génie mécanique de l'Université Mouloud Mammeri, dans la wilaya de Tizi-Ouzou. Parmi les différents tests effectués, nous avons sélectionné des résultats spécifiques pour certains jours, afin de fournir une analyse approfondie des performances du concentrateur solaire dans des conditions climatiques variées, ce qui permet de mieux comprendre son efficacité et sa capacité à collecter et stocker l'énergie thermique.

➤ **Fonctionnalités du site de Tizi Ouzou**

- Latitude : $36,71^\circ$
- Longitude : $4,05^\circ$
- Hauteur : 229 m

➤ **Spécifications du capteur**

- Type : Capteur solaire thermique cylindro-parabolique
- Circulation du liquide : Utilisation de tubes en cuivre sous forme de serpentin pour permettre la circulation du fluide.
- Fluide caloporteur : L'eau du robinet est utilisée comme fluide caloporteur.
- Inclinaison : Le capteur est conçu avec une inclinaison d'un angle variable de 0° à 45° pour une production d'énergie solaire optimale.
- Stockage d'énergie : Le stockage thermique est assuré par l'utilisation de la cire de paraffine comme matériau à changement de phase.



Figure 6.1 : Photo des composants du capteur solaire cylindro-parabolique

6.1 L'expérimental

6.1.1 Les résultats obtenus avec le capteur cylindro-parabolique sans verre

Nous avons réalisé les premières expériences sans verre. Après avoir terminé l'assemblage de tous les éléments, avant chaque début de l'expérience nous avons placé les thermocouples à différents endroits du capteur et nous avons rempli le réservoir de 40 litres d'eau dans le réservoir.

Les tableaux suivants comportent les données météorologiques ainsi que les différents paramètres des journées de mesures (11, 17, 29 Septembre 2024)

Tableau 6.1: Paramètres des jours (11, 17, 29 Septembre 2024). [42]

paramètres	Jr 11 / 09	Jr 17 / 09	Jr 29 / 09
Température maximale (°C)	29	25	29
Température minimale (°C)	27	22	26
Vitesse du vent (Km /h)	8	10	16
Précipitation (%)	0	0	0
Humidité (%)	41	48	47

Tableau 6.2 : Rayonnement global sur un plan fixe pour les journées du (11, 17, 29 Septembre 2024 à Tizi-Ouzou). [40]

Rayonnement global (w/m^2)	Jr 11 / 09	Jr 17 / 09	Jr 29 / 09
11 :00	725	245	655
12 :00	797	338	727
13 :00	801	388	725
14 :00	601	582	678
15 :00	550	580	566
Total	3474	2133	3351

➤ **Premier test réalisé le 11/09/2024**

Le temps était ensoleillé, le ciel était clair et le vent était léger pour la journée du 11/09/2024. Les valeurs obtenues sont présentées dans le tableau et la figure suivants :

Tableau 6.3 : Les températures obtenues au cours du 1^{eme} test

Heure	T_1 entrée (°C)	T_2 sortie(°C)	T_3 abs(°C)
12 :15	31,7	33,35	68,76
12:30	32,74	33,35	68,48
12 :45	35,64	38,13	70,27
13 :00	37,93	39,44	68,88
13 :15	38,89	40,5	69,49
13 :30	39,86	41,4	67,65
13 :45	40,94	42,42	66,75
14 :00	41,65	43,05	64,41
14 :15	43,27	43,65	65,33
14 :30	44,27	43,98	64 ,98
14 :45	44,15	44,28	63,04
15 :00	44,52	44,55	60,77

La figure ci-dessous reprend le tracé des courbes de températures mesurées en fonction du temps.

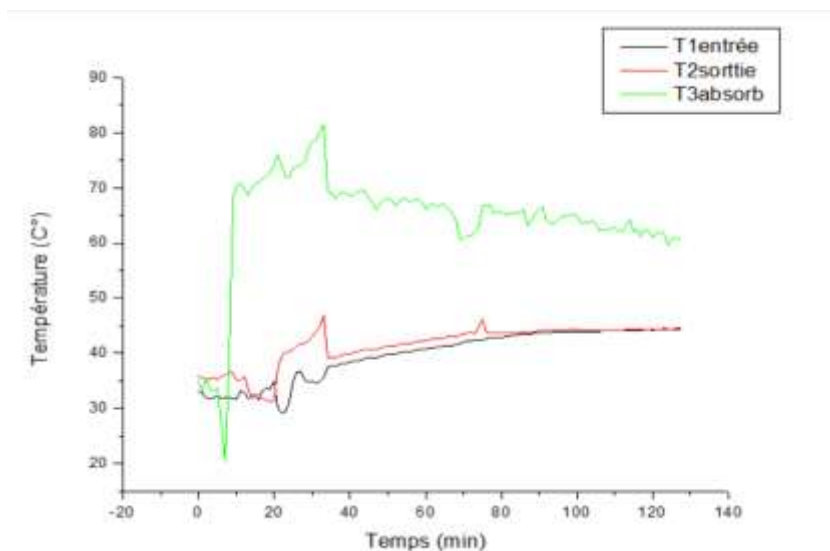


Figure 6.2 : Courbes des températures au cours du 1^{er} test

➤ Deuxième test réalisé le 17/09/2024

Le temps était doux, le ciel nuageux et le vent relativement fort léger pour la journée du 17/09/2024. Les valeurs obtenues sont présentées dans le tableau et la figure suivants :

Tableau 6.4 : Les températures obtenues au cours du 2^{eme} test

Heure	T_1 entrée (°C)	T_2 sortie(°C)	T_3 abs (°C)	T_5 amb (°C)	T_4 Cuve (°C)
11 :15	27,08	28,07	69,77	26,27	27
11 :30	30,91	33,27	69,28	27,76	29,9
11 :45	32,98	33,58	55,23	27,45	30,65
12 :00	33,09	33,62	54,33	25,98	30,9
12 :15	34,44	35,14	65,44	30,08	34,21
12 :30	36,13	36,7	64,39	28,76	36,03
12 :45	37,63	37,7	64,86	26,97	37,26
13 :00	37,67	37,72	63,57	29	37,28
13 :15	38,31	38,92	67,5	28,15	29,49
13 :30	39,18	39,92	71,11	29,43	39,24
13 :45	40,36	41,1	70,34	28,04	40,5
14 :00	41,59	42,37	70,74	28,24	41,8
14 :15	42,76	43,57	70,6	28,52	42,95
14 :30	44	44,2	73,31	28,29	44,14
14 :45	44,31	43,86	71,3	28,51	43,65
15 :00	44,12	43,89	70,74	28,76	44,14

La figure ci-dessous reprend le tracé des courbes de températures mesurées en fonction du temps

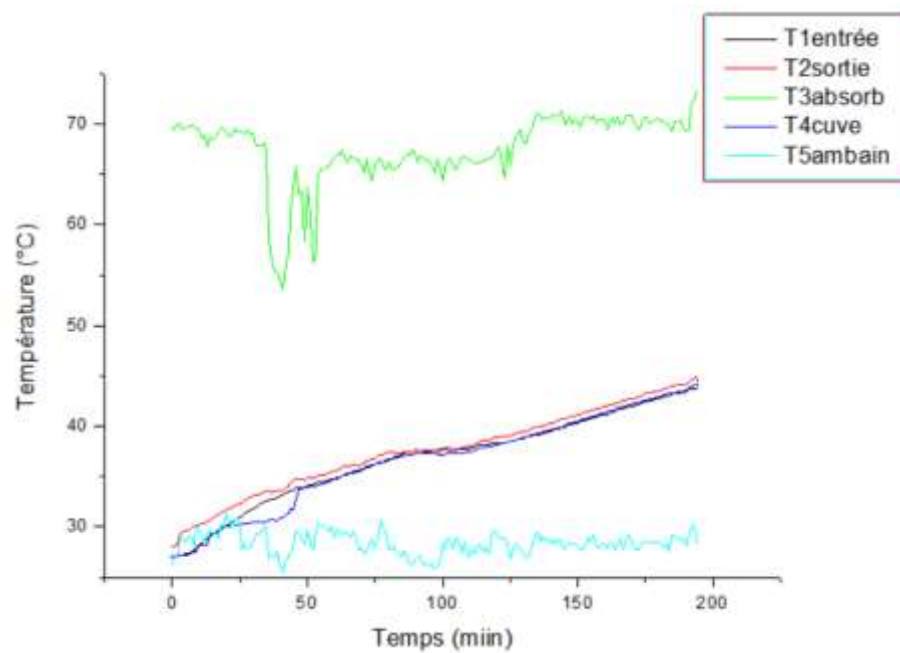


Figure 6.3 : Courbes des températures au cours du 2^{eme} test

➤ Troisième test réalisé le 29/09/2024

Le temps était modéré, le ciel était nuageux et le vent était relativement léger pour la journée du 29/09/2024. Les valeurs obtenues sont présentées dans le tableau et la figure suivants :

Tableau 6.5 : Les températures obtenues au cours du 3^{eme} test

Heure	T_1 entrée (°C)	T_2 sortie(°C)	T_3 abs (°C)	T_4 Cuve (°C)	T_5 amb (°C)
12 :00	27,26	29,12	67,15	27,12	27,23
12 :15	31,59	34,89	66,51	31,44	26,34
12:30	34,19	35,88	66,23	34,21	27,74
12 :45	36,27	37,89	64,89	36,42	28,57
13 :00	38,51	39,99	65,41	38,53	28,92
13 :15	40,47	41,74	64,62	40,42	27,79
13 :30	42,15	43,61	67,09	42,27	28,13
13 :45	43,59	44,98	67,57	43,75	29,12
14 :00	45,11	46,58	66,91	45,41	28,33
14 :15	46,17	47,62	65,4	46,71	30,49
14 :30	47,35	48,63	70,81	47,71	30,5
14 :45	48,16	49,22	65,83	48,51	31,13
15 :00	48,89	49,96	66,48	49,2	31,34
15 :15	49,52	50,46	66,14	49,73	30,7
15 :30	50,44	51,14	64	50,52	30,36

La figure ci-dessous reprend le tracé des courbes de températures mesurées en fonction du temps.

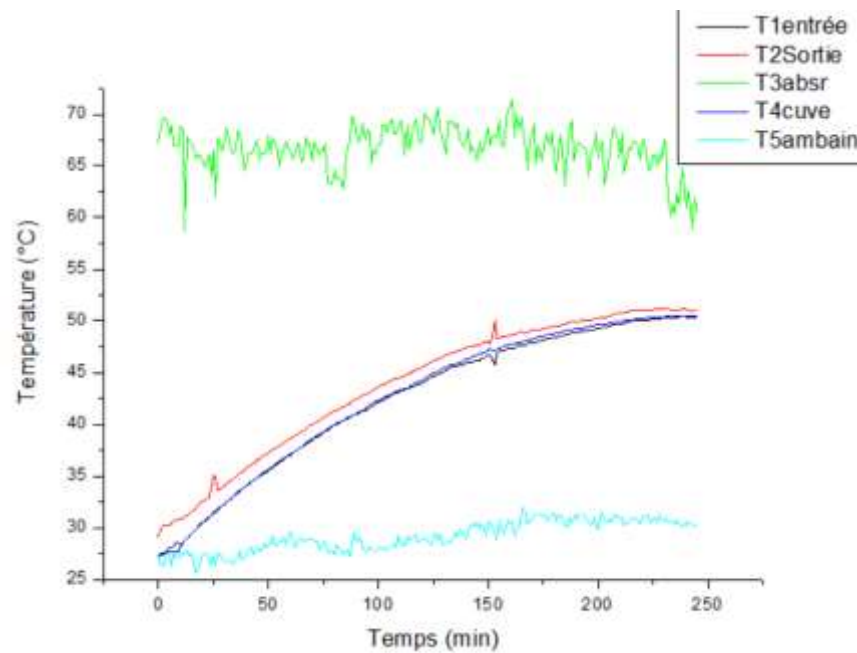


Figure 6.4 : Courbes des températures au cours du 3^{ème} test

6.1.2 Les résultats obtenus avec le capteur cylindro-parabolique avec verre

Les tableaux suivants comprennent les données météorologiques ainsi que divers paramètres pour les derniers jours de mesures (12, 15 Septembre et le 1er Octobre 2024)

Tableau 6.6 : Paramètres des jours (12, 15 Septembre et le 01 Octobre 2024). [42]

paramètres	Jr 12 / 09	Jr 15 / 09	Jr 01 / 10
Température maximale (°C)	28	27	30
Température minimale (°C)	25	24	24
Vitesse du vent (Km /h)	14	18	13
Précipitation (%)	0	0	0
Humidité (%)	50	47	44

Tableau 6.7 : Rayonnement global sur un plan fixe pour les journées du (12, 15 Septembre et le 01 Octobre 2024 à Tizi-Ouzou). [40]

Rayonnement global(w/m^2)	Jr 12 / 09	Jr 15 / 09	Jr 01 / 10
10 :00	409	583	544
11 :00	603	710	668
12 :00	648	781	734
13 :00	428	790	737
14 :00	243	737	677

15 :00	292	625	559
Total	2623	5007	3919

➤ **Premier test réalisé le 12/09/2024**

Le temps était ensoleillé, le ciel était partiellement nuageux et le vent était léger pour la journée du 12/09/2024. Les valeurs obtenues sont présentées dans le tableau et la figure suivants :

Tableau 6.8 : Les températures obtenues au cours du 1^{er} test

Heure	T_1 Entrée (°C)	T_2 Sortie (°C)	T_3 Abs (°C)	T_4 Amb(°C)
11 :00	29,1	30,71	59,39	27,41
11 :15	30,53	30,61	64,04	26,41
11:30	31,26	31,66	65,32	26,66
11 :45	32,8	31,52	65,79	27,64
12 :00	33,7	33,72	70,2	28,09
12 :15	34,18	35,26	72,12	28,22
12:30	35,57	37,18	73,57	29,33
12 :45	37,6	39,64	73,44	29,4
13 :00	39,36	41,54	66,89	29,09
13 :15	40,98	42,91	68,07	29,16
13 :30	43,15	44,53	74,3	30,64
13 :45	44,73	46,28	74,44	30,32
14 :00	46,84	48,66	74,94	30,83
14 :15	49,04	50,44	74,61	31,36
14 :30	50,72	51,87	74,5	31,02
14 :45	52,03	53,1	76,21	32,05
15 :00	53,07	54,24	77,16	30,8
15 :15	55,23	55,87	74,53	30,85

La figure ci-dessous reprend le tracé des courbes de températures mesurées en fonction du temps

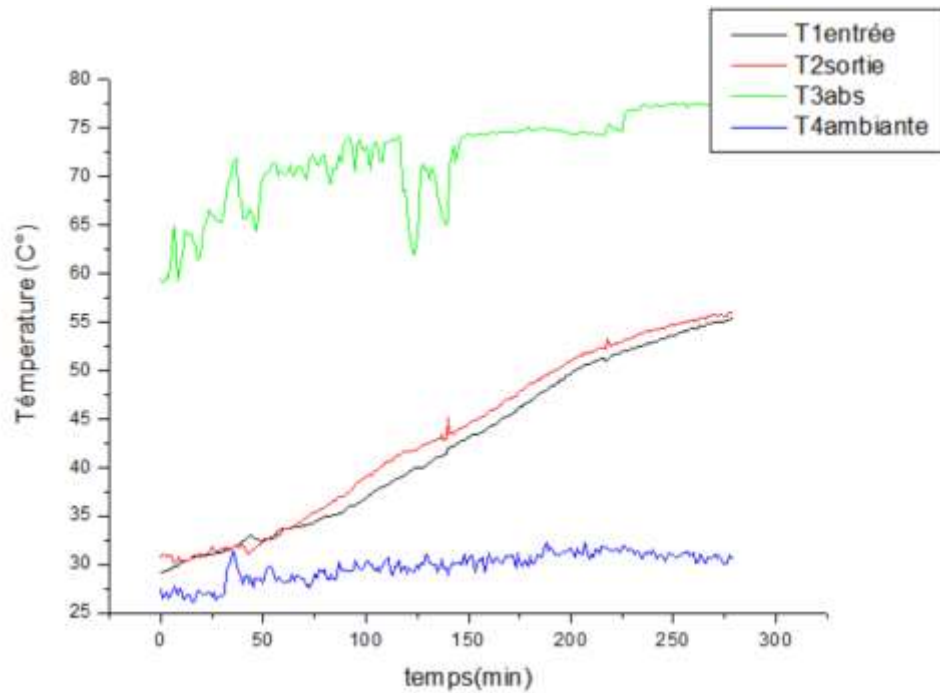


Figure 6.5 : Courbes des températures au cours du 1^{er} test

➤ Deuxième test réalisé le 15/09/2024

Le temps était ensoleillé, le ciel était dégagé et il n'y avait pas de vent léger pour la journée du 15/09/2024. Nous nous sommes arrêtés à 13h 30 mn pour remédier aux fuites de MCP dans le tube récepteur.

Les valeurs obtenues sont présentées dans le tableau et la figure suivants :

Tableau 6.9 : Les températures obtenues au cours du 2^{eme} test

Heure	T_1 Entrée (°C)	T_2 Sortie (°C)	T_3 Abs (°C)	T_4 Amb (°C)	T_5 Cuve (°C)
11 :15	29,85	36,58	96,55	25,41	30,46
11:30	35,56	37,51	76,83	27,1	33,39
11 :45	38,85	40,71	76,84	26,59	36,53
12 :00	42,07	43,7	76,99	27,12	40,34
12 :15	44,49	46,59	76,67	27,73	43,49
12:30	47,79	49,26	79,65	28,38	46,3
12 :45	50,06	51,44	79,94	28	47,7
13 :00	52,2	53,58	80,25	27,71	49,69
13 :15	54,33	55,67	80,62	29,31	52,15
13 :30	55,95	57,19	80,68	28,69	52,51

La figure ci-dessous reprend le tracé des courbes de températures mesurées en fonction du temps

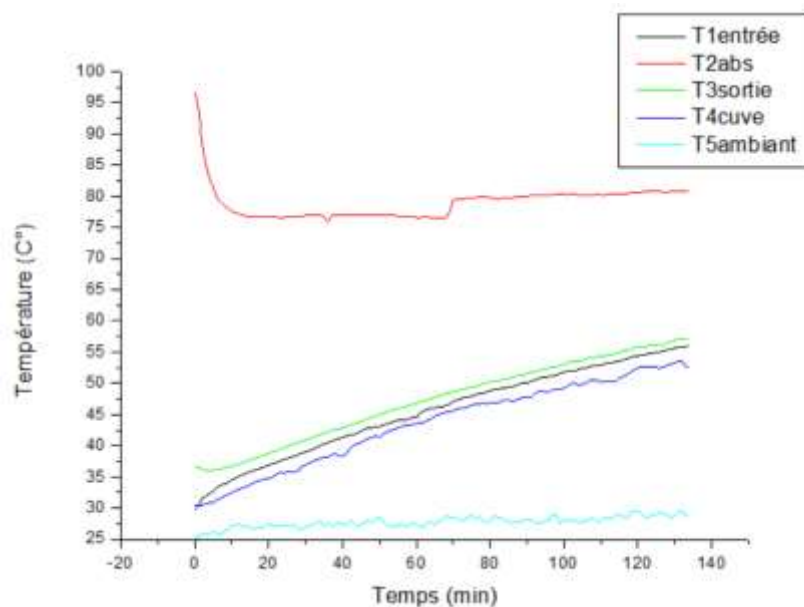


Figure 6.6 : Courbes des températures au cours du 2^{ème} test

➤ **Troisième test réalisé le 1/10/2024**

Le temps était modéré, le ciel était partiellement nuageux et le vent était relativement léger pour la journée du 1/10/2024. Les valeurs obtenues sont présentées dans le tableau et la figure suivants :

Tableau 6.10 : Les températures obtenues au cours du 3^{ème} test

Heure	T_1 Entrée (°C)	T_2 Sortie (°C)	T_3 abs (°C)	T_4 amb (°C)	T_5 Cuve (°C)
10 :15	25,91	27,88	53,44	24,02	25,74
10:30	26,6	28,26	56,31	26,91	27,85
10:45	29,27	31,74	66,66	27,09	29,29
11:00	31,04	33,99	70,62	27,11	31,1
11 :15	33,12	36,2	70,97	28,09	33,06
11:30	36,33	39,61	72,56	29,38	36,71
11 :45	38,54	41,96	71,84	30,28	39
12 :00	40,33	43,99	71,86	30,79	41,09
12 :15	42,36	46	71,96	31,86	43,24
12 :30	43,38	47,15	71,46	32,11	44,52
12:45	45,36	49,16	74,48	32,27	46,67
13 :00	47,27	50,99	74,77	32,51	48,4
13 :15	49,12	52,63	74,93	32,62	50,08
13:30	50,78	54,18	76,22	32,77	51,68
13 :45	52,39	55,64	76,73	32,95	53,27
14 :00	53,73	56,79	76,17	32,65	54,58

14 :15	54,49	57,56	75,81	32,4	55,48
14 :30	55,93	58,73	76,35	33,72	56,43
14 :45	56,63	59,36	76,2	33,38	57,42
15 :00	56,84	62,51	78,43	33,01	59,98
15 :15	57,82	62,48	76,67	32,71	60,47

La figure ci-dessous reprend le tracé des courbes de températures mesurées en fonction du temps.

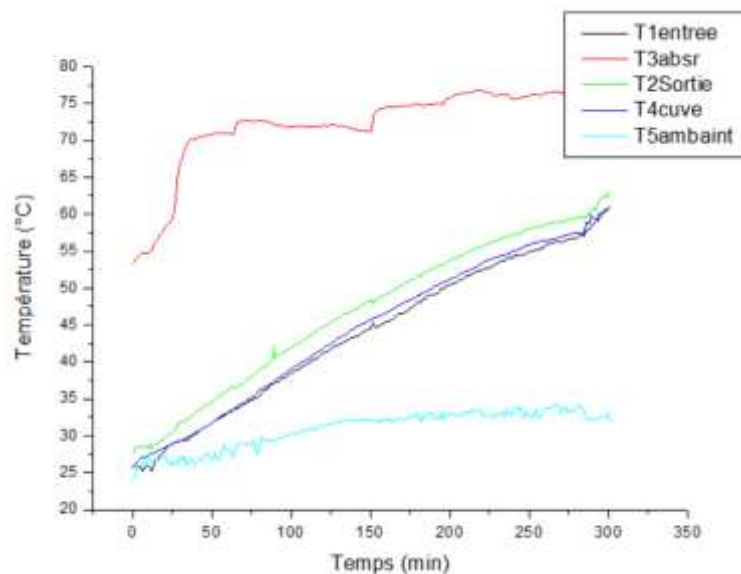


Figure 6.7 : Courbes des températures au cours du 3^{eme} test

6.1.3 Le cycle stockage/déstockage

Les tableaux suivants incluent les données météorologiques ainsi que divers indicateurs pour les derniers jours de mesure (09, 13, 14, 16 Octobre 2024)

Tableau 6.11: Paramètres des jours (09, 13, 14, 16 Octobre 2024). [42]

Paramètres	Jr 09/10	Jr 13/10	Jr 14/10	Jr 16/10
Température maximale (°C)	30	35	36	32
Température minimale (°C)	26	31	30	27
Vitesse du vent (Km /h)	10	6	13	10
Précipitation (%)	0	0	0	0
Humidité (%)	48	28	27	63

Tableau 6.12 : Rayonnement global sur un plan fixe pour les journées du 09, 13, 14,16 Octobre 2024 à Tizi-Ouzou). [40]

Rayonnement global (w/m^2)	Jr 09/10	Jr 13/10	Jr 14/10	Jr 16/10
10 :00	521	298	598	498
11 :00	417	555	675	618
12 :00	176	685	679	679
13 :00	177	627	678	678
14 :00	193	299	515	615
15 :00	131	127	492	492
Total	1615	2591	3637	3580

➤ **Premier test réalisé le 9/10/2024**

➤ **Cycle de charge (ou stockage)**

Le temps était modéré, le ciel était partiellement nuageux et le vent était relativement léger pour la journée du 9 /10/2024. Les valeurs obtenues sont présentées dans le tableau et la figure suivants :

Tableau 6.13 : Les températures obtenues au cours du 1^{er} test

Heure	T_2 sortie (°C)	T_1 entrée(°C)	T_3 abs (°C)	T_4 Cuve (°C)	T_5 amb (°C)
10 :00	23,94	23,23	29,55	23,5	21,68
10 :15	24,2	23,89	47,93	24,15	22,03
10:30	25,02	24,11	57,17	24,98	23,02
10:45	26,17	24,98	61,28	25,78	24,15
11:00	29,33	26,48	66,18	27,99	26,53
11 :15	35,45	34,5	68,94	34,17	27,33
11:30	37,19	36,11	63,55	35,93	28,22
11 :45	38,48	37,19	63,91	37	29,71
12 :00	39,18	38,2	65,53	39,05	30,83
12 :15	40,19	39,97	65,68	38,71	30,16
12 :30	41,1	40,25	64,58	39,23	29,68
12:45	43,58	41	73,92	39,97	29,23
13 :00	43,35	42,34	68,74	41,71	28,58
13 :15	44,38	43,05	66,3	42,09	29,47
13:30	45,21	44,1	61,52	42,8	29,35
13 :45	45,25	44,49	57,97	43,95	30,07
14 :00	45,02	44,17	62,68	43,92	30,16
14 :15	45,66	44,86	71,72	44,59	30,29
14 :30	46,85	45,5	64,32	44,92	30,5
14 :45	47,95	46,45	73,67	45,54	30,36
15 :00	49,04	47,2	71,72	45,35	31,55
15 :15	49,29	47,55	71,19	46,15	31,37

La figure ci-dessous reprend le tracé des courbes de températures mesurées en fonction du temps.

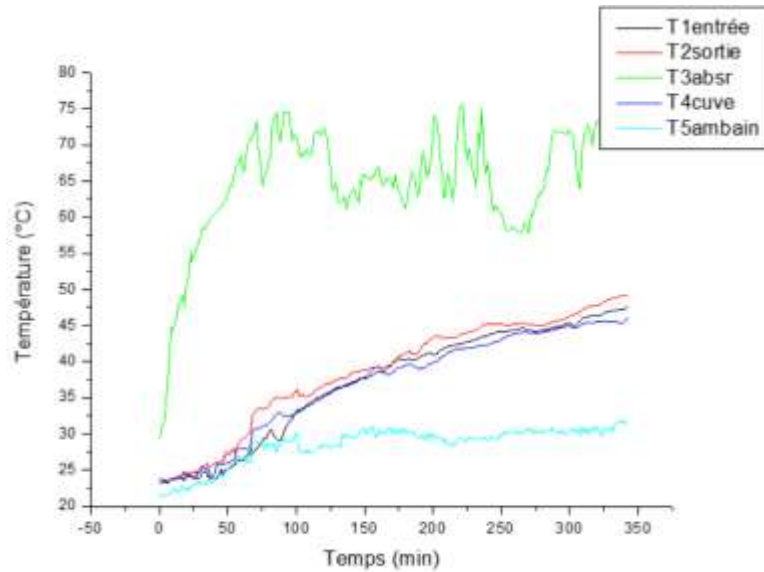


Figure 6.8 : Courbes des températures au cours du 1^{er} test

➤ Cycle Décharge de l'énergie thermique

Lorsque l'ombre atteint le capteur solaire, nous remplaçons l'eau chaude à l'intérieur du réservoir par de l'eau à température modérée pour commencer le processus de décharge thermique.

Tableau 6.14 : Les températures obtenues au cours du 1^{er} test

Heure	$T_{2\text{sortie}} (^\circ\text{C})$	$T_{1\text{entrée}} (^\circ\text{C})$	$T_{3\text{abs}} (^\circ\text{C})$	$T_{4\text{ Cuve}} (^\circ\text{C})$	$T_{5\text{ amb}} (^\circ\text{C})$
15:30	31	27,41	57,96	26,97	30,05
15:45	31,7	30,02	52,2	29,59	29,94
16:00	32,06	31,14	44,57	30,8	29,35
16:15	32,23	31,77	39,78	31,36	28,9
16:30	32,55	32,18	37,76	31,67	28,76
16 :45	32,5	32,26	35,51	31,91	28,3
17:00	32,31	32,14	34,45	31,82	27,87
17:15	32,2	32,04	33,93	31,7	27,59

La figure ci-dessous reprend le tracé des courbes de températures mesurées en fonction du temps.

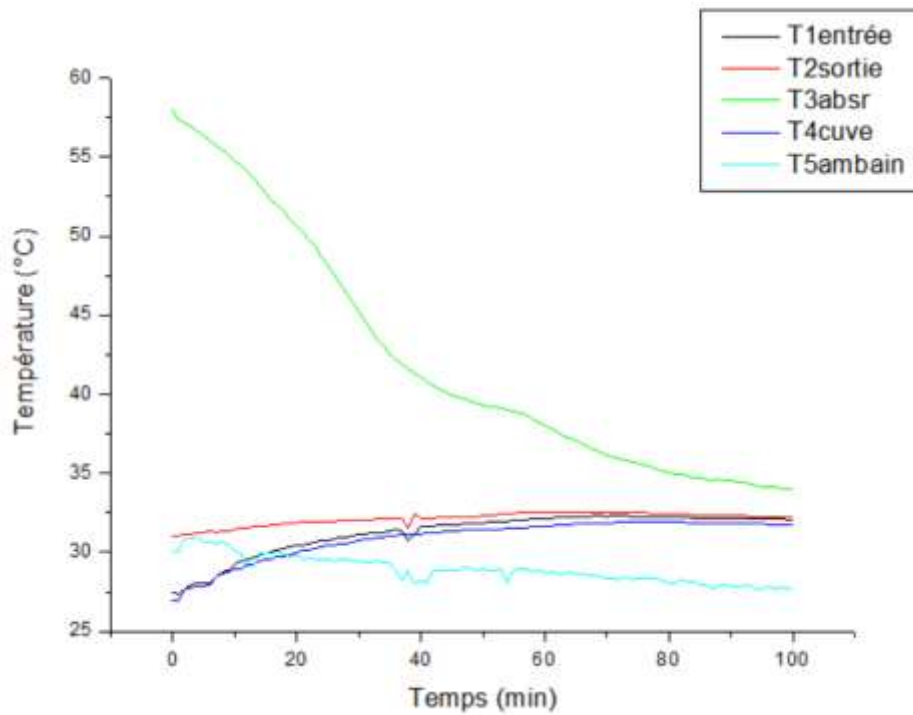


Figure 6.9 : Courbes des températures au cours du 1^{er} test

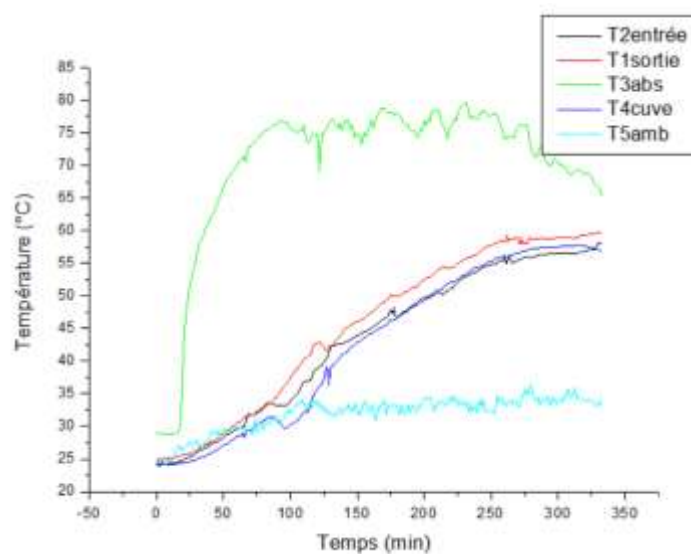
- **Deuxième test réalisé le 13/10/2024**
- **Cycle de charge**

Le temps était ensoleillé, le ciel dégagé et le vent relativement léger pour la journée du 13 /10/2024. Les valeurs obtenues sont présentées dans le tableau et la figure suivants :

Tableau 6.15 : Les températures obtenues au cours du 2^{eme} test

Heure	T_1 entrée (°C)	T_2 sortie (°C)	T_3 abs(°C)	T_4 Cuve (°C)	T_5 amb(°C)
10 :00	24,2	25	28,85	24,01	24,02
10 :15	24,43	25,14	28,78	24,24	24,85
10:30	25,66	26,14	54,37	24,78	27,42
10:45	27,49	27,85	62,89	26,17	28,87
11:00	29,45	30,32	69,53	28,21	29,9
11 :15	32,59	32,39	74,64	30,63	29,67
11:30	33,14	35,39	76,88	30,25	30,07
11 :45	35,96	39,54	75,36	31,66	33,66
12 :00	39,4	42,68	74,84	36,47	33,18
12 :15	42,7	44,01	75,73	40,74	31,92
12 :30	44,23	46,35	73,23	43,25	32,77
12:45	46,2	48,69	78,63	45,13	33,33
13 :00	47,09	50,2	77,12	47,18	33,18
13 :15	49,55	52,2	75,32	49,12	33,47
13:30	50,18	54,2	76,57	50,96	33,75
13 :45	52,6	55,32	78,82	52,98	33,43
14 :00	54,27	57,09	78,26	54,69	32,57
14 :15	55,43	58,32	75,62	56,01	34,55
14 :30	55,69	58,96	76,13	56,73	34,71
14 :45	56,33	58,88	72,53	57,39	33,9
15 :00	56,52	58,93	69,86	57,59	33,87
15 :15	56,73	59,28	69	57,69	34,17
15 :30	56,93	59,59	65,22	56,8	33,01

La figure ci-dessous reprend le tracé des courbes de températures mesurées en fonction du temps.

**Figure 6.10** : Courbes des températures au cours du 2^{eme} test

➤ Cycle Décharge de l'énergie thermique

Au coucher du soleil, nous avons inséré le capteur solaire dans le laboratoire et remplacé l'eau chaude à l'intérieur du réservoir par de l'eau à température modérée pour lancer le processus de décharge thermique.

Tableau 6.16 : Les températures obtenues au cours du 2^{ème} test

Heure	T_1 entrée (°C)	T_2 sortie (°C)	T_3 abs(°C)	T_4 Cuve (°C)	T_5 amb(°C)
15:45	29,01	30,96	56,14	32,89	33,73
16:00	28,1	31,93	51,74	31,56	33,27
16:15	27,31	33,37	45,66	32,72	33,44
16:30	27,04	33,7	38,39	33,12	33,32
16 :45	26,81	33,57	35,37	33,1	32,96
17:00	26,58	33,46	33,56	33	32,82
17:15	26,46	33,21	32,45	32,74	32,56
17 :30	26,4	32,92	31,77	32,48	32,27
17 :45	26,3	32,61	31,3	32,19	31,99
18 :00	26,11	32,33	30,93	31,92	31,71
18 :15	26,11	32,07	30,62	31,63	31,42
18 :30	26	31,73	30,27	31,31	31,1
00 :00	25,1	27,98	27,18	27,57	27,42
09:00	24,39	26,15	25,63	25,7	25,59

La figure ci-dessous reprend le tracé des courbes de températures mesurées en fonction du temps.

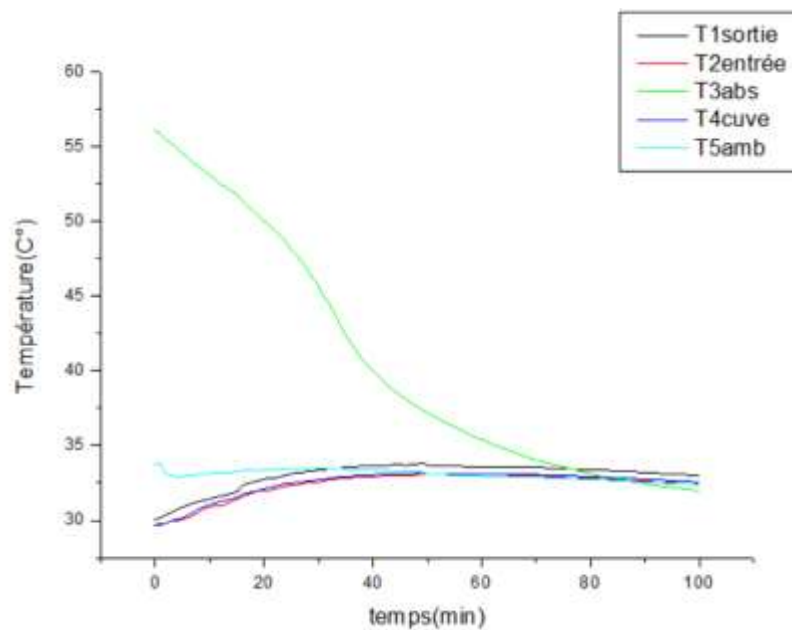


Figure 6.11 : Courbes des températures au cours du 2^{ème} test

➤ **Troisième test réalisé le 14/10/2024**

➤ **Cycle de charge**

Le temps était ensoleillé, le ciel dégagé et le vent relativement léger pour la journée du 14 /10/2024. Les valeurs obtenues sont présentées dans le tableau et la figure suivants :

Tableau 6.17 : Les températures obtenues au cours du 3^{eme} test

Heure	T_1 entrée (°C)	T_2 sortie (°C)	T_3 abs(°C)	T_4 Cuve (°C)	T_5 amb(°C)
10 :00	25,08	25,82	33,66	25,17	25,26
10 :15	25,93	27,01	50,27	25,89	27,93
10:30	26,47	28,46	59,63	27,53	29,42
10:45	26,97	29,7	69,41	28,52	33,08
11:00	32	33,89	72,55	32,04	33,14
11 :15	34,4	36,23	73,02	34,22	33,35
11:30	36,98	38,96	74,77	36,74	33,55
11 :45	39,54	41,77	76,43	39,45	34,1
12 :00	41,96	44,31	75,97	41,97	34,61
12 :15	44,35	46,73	75,54	44,21	34,72
12 :30	46,11	48,44	75,1	46,81	35,7
12:45	49,07	51,4	76,2	49,68	35,1
13 :00	51,29	53,66	77,24	51,03	35,49
13 :15	53,25	55,53	77,57	53,42	35,82
13:30	55,43	57,62	77,09	55,82	35,2
13 :45	57,08	59,07	78,02	56,7	35,71
14 :00	58,67	60,87	79,25	58	36,8
14 :15	59,01	60,66	77,05	58,4	38,71
14 :30	59,68	61,85	77,71	59,48	38,29
14 :45	61,91	64,13	77,8	61,22	35,44
15 :00	61,7	64,65	76,5	62,9	36,53
15 :15	62,53	64,68	74,84	63,45	33,94

La figure ci-dessous reprend le tracé des courbes de températures mesurées en fonction du temps.

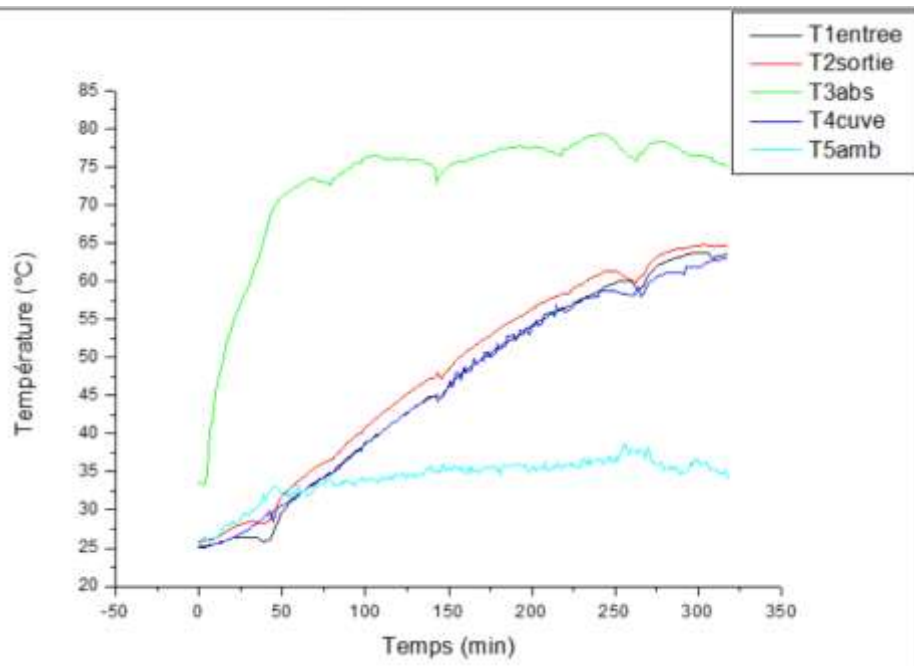


Figure 6.12 : Courbes des températures au cours du 3^{ème} test

➤ Cycle Décharge de l'énergie thermique

Au coucher du soleil, nous avons inséré le capteur solaire dans le laboratoire et remplacé l'eau chaude à l'intérieur du réservoir par de l'eau à température modérée pour lancer le processus de décharge thermique.

Tableau 6.18 : Les températures obtenues au cours du 3^{ème} test

Heure	T_1 entrée (°C)	T_2 sortie (°C)	T_3 abs(°C)	T_4 Cuve (°C)	T_5 amb(°C)
15 :30	26,69	28,06	69,01	26,11	29,71
15 :45	30,03	30,57	55,1	29,32	28,42
16 :00	31,49	31,66	49,53	30,85	27,47
16 :45	32,08	32,01	39,56	31,51	27,02
17 :00	32,2	32,05	35,43	31,72	26,76
17 :15	32,16	31,93	33,1	31,64	26,71
17 :30	32,02	31,78	31,93	31,53	26,51
17 :45	31,83	31,6	31,32	31,37	26,41
18 :00	31,68	31,44	30,98	31,22	26,25
18 :15	31,04	30,8	30,13	30,58	26,09
18 :30	30,25	30,04	29,37	29,83	25,77
00 :00	28,41	28,26	27,7	27,99	24,97
09 :00	26,88	26,7	26,42	26,43	24,57

La figure ci-dessous reprend le tracé des courbes de températures mesurées en fonction du temps.

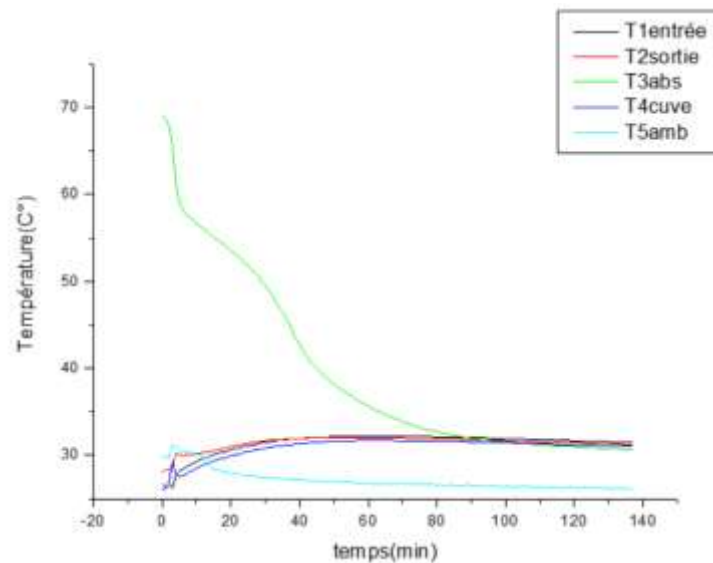


Figure 6.13 : Courbes des températures au cour du 3^{eme} test

- **Quatrième test réalisé le 16/10/2024**
- **Cycle de charge**

Le temps était modéré, le ciel était nuageux et le vent était relativement. Les valeurs obtenues sont présentées dans le tableau et la figure suivants :

Tableau 6.19 : Les températures obtenues au cours du 4^{eme} test

Heure	T_1 entrée (°C)	T_2 sortie (°C)	T_3 abs(°C)	T_4 Cuve (°C)	T_5 amb(°C)
10 :00	24,83	24,77	27,22	24,37	24,82
10 :15	24,49	24,61	34,17	24,42	25,23
10:30	26,42	27,34	51,91	25,74	27,31
10:45	26,57	31,8	69,15	29,75	28,37
11:00	30,57	34,28	68,29	31,68	28,38
11 :15	31,84	35,19	73,07	32,63	28,92
11:30	35,64	36,67	74,69	34,66	28,96
11 :45	37,67	39,13	75,59	37,25	30,65
12 :00	39,97	41,85	75,08	39,63	30,97
12 :15	42,73	44,1	75,3	42,27	31,37
12 :30	44,91	46,37	75,36	44,5	31,85
12:45	45,95	46,95	72,74	45,5	31,26
13 :00	47,06	47,75	61,1	46,79	31,42
13 :15	47,08	47,54	57,53	46,79	31,26
13:30	46,73	47,08	56,51	46,51	30,98
13 :45	46,35	46,62	55,3	46,24	30,7

La figure ci-dessous reprend le tracé des courbes de températures mesurées en fonction du temps.

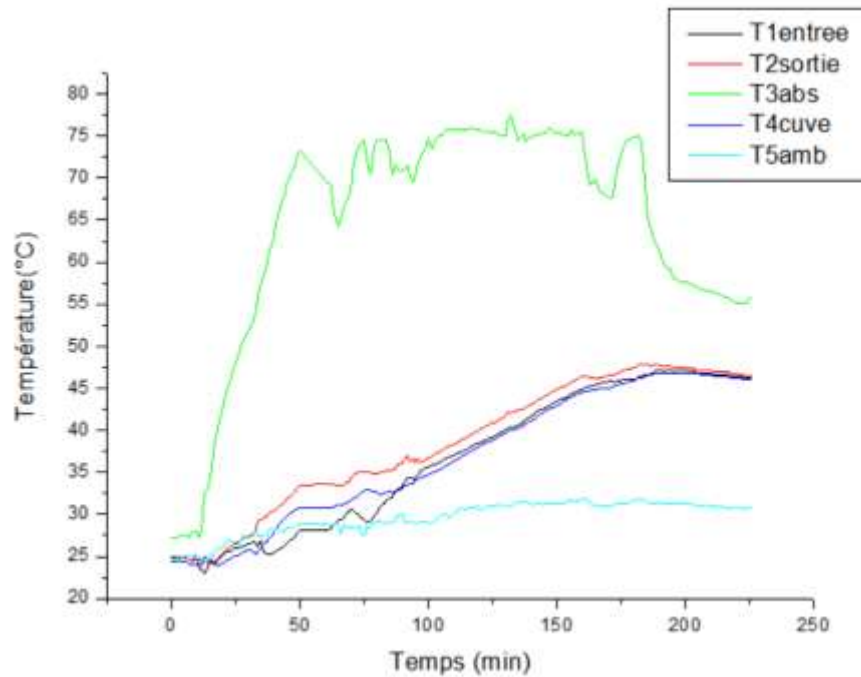


Figure 6.14 : Courbes des températures au cours du 4^{ème} test

➤ Cycle Décharge de l'énergie thermique

Au coucher du soleil, nous avons inséré le capteur solaire dans le laboratoire et remplacé l'eau chaude à l'intérieur du réservoir par de l'eau à température modérée pour lancer le processus de décharge thermique.

Tableau 6.20 : Les températures obtenues au cours du 4^{ème} test

Heure	T_1 entrée (°C)	T_2 sortie (°C)	T_3 abs(°C)	T_4 Cuve (°C)	T_5 amb(°C)
14 :15	25,29	28,39	54,82	27,8	30,36
14:30	28,92	29,74	46,33	28,41	26,42
14 :45	30,23	30,42	37,06	29,76	25,5
15:00	30,51	30,56	33,98	30,08	25,42
15:15	30,56	30,51	31,97	30,13	25,36
15 :30	30,45	30,32	30,44	30,01	25,25
15:45	30,24	30,11	29,77	29,79	25,21
16:00	30,02	29,89	29,38	29,57	25,15
16 :15	29,81	29,67	29,07	29,36	25,12
00:00	26,75	26,62	26,21	26,3	24,45
09 :00	26,15	26,05	25,68	25,66	24,24

La figure ci-dessous reprend le tracé des courbes de températures mesurées en fonction du temps.

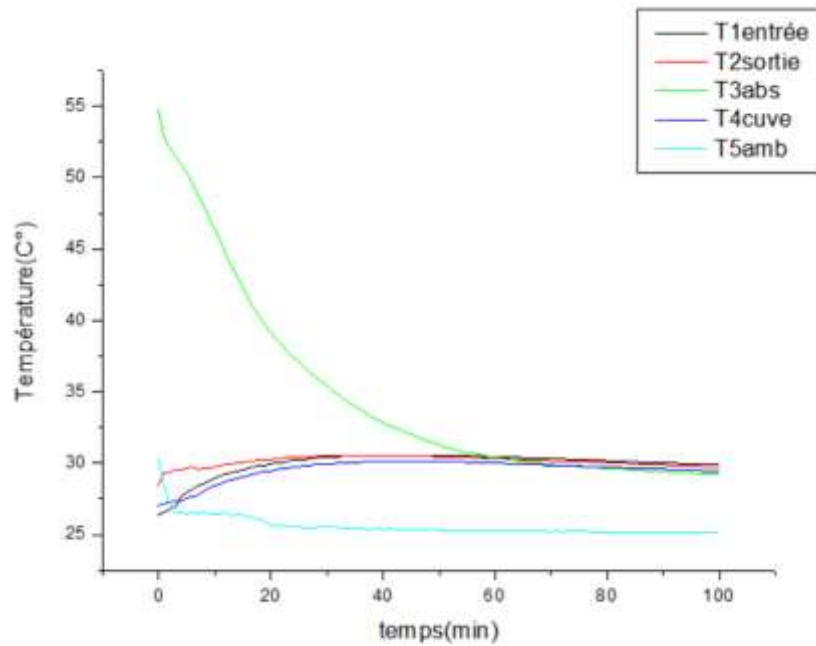


Figure 6.15 : Courbes des températures au cours du 4^{ème} test

6.2 Discussion des résultats

Les résultats montrent clairement une instabilité des températures et une augmentation progressive au fil du temps dans les deux cas (avec et sans verre). Il a été observé que l'utilisation du verre a conduit à des températures plus élevées par rapport aux expériences sans verre comme dans l'expérience du 17/09/2024 sans verre, où la température après chauffage a atteint 44,14°C, et dans l'expérience du 01/10/2024 avec verre, où la température après chauffage a atteint 60,47°C. Les températures initiales dans toutes les expériences avant le début du chauffage variaient entre 25°C et 31°C, tandis qu'après chauffage, elles se situaient entre 44°C et 64°C. Ces différences peuvent être expliquées par l'influence des conditions météorologiques, car une plus grande intensité du rayonnement solaire et un ciel dégagé contribuent directement à l'élévation des températures finales enregistrées.

L'analyse des résultats montre que les températures initiales étaient relativement proches dans toutes les expériences, indiquant une stabilité dans les conditions de départ. Au fur et à mesure que le temps passait, les températures augmentaient progressivement en raison de l'influence de la chaleur ambiante, ce qui est clairement visible dans l'évolution des données au fil du temps. Cependant, malgré cette augmentation progressive, des baisses soudaines de température ont été observées dans certains cas, dues à des changements dans le rayonnement

solaire causés par la présence de nuages ou au mouvement des thermocouples en raison du vent, affectant temporairement la précision des mesures.

Dans la dernière phase des expériences, une opération de « décharge thermique » a été réalisée, ce qui a eu un impact notable sur le comportement du système thermique. Il a été observé que la température de l'eau augmentait progressivement au cours de la première heure de l'expérience, en raison de la libération de la chaleur stockée dans la paraffine, qui agit comme un matériau efficace pour stocker la chaleur. Après l'épuisement de l'énergie thermique stockée dans la paraffine, la température s'est stabilisée pendant un court moment avant de commencer à diminuer progressivement avec le temps. Ce comportement indique que la paraffine joue un rôle crucial dans la régulation de la température, mais dépend de la quantité de chaleur qu'elle a stockée lors des premières phases de l'expérience.

6.3 Étude d'efficacité du chauffage

Nous avons choisi l'une de nos découvertes pour étudier l'efficacité du chauffage [38,41].

➤ Énergie stockée dans la paraffine Q_p

Données :

- Masse $m_p = 3,5\text{kg}$ (ou 3500 g). (Dans le Récepteur)
- Masse $m_p = 0,08\text{kg}$ (ou 80 g). (Dans la Cuve)
- Capacité calorifique spécifique solide $C_{p_s} \approx 2,14 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$.

Nous savons que la température de fusion de la paraffine est de 55 degrés Celsius, et que la température de la paraffine au début de l'expérience était de 25 degrés Celsius et a atteint 60 degrés Celsius à la fin.

1. L'énergie pour chauffer la paraffine de 25°C à 55°C :

Cette étape, la paraffine est toujours sous forme solide, donc on utilise l'équation classique pour calculer l'énergie thermique (sans tenir compte de la fusion) :

- La paraffine solide est chauffée de 25 °C à 55°C (point de fusion)

$$\Delta T_{p_s} = 55 - 25 = 30 \text{ °C}$$

Calcul de la chaleur sensible de la paraffine solide contenue dans les cannettes du récepteur

$$Q_{P_s} = m_p \times C_{p_{P_s}} \times \Delta T_{P_s}$$

Dans le récepteur $Q_{P_s \text{ réc}} = 3,5 \times 2,14 \times 30 = 224,7 \text{ kJ}$

Calcul de la chaleur sensible de la paraffine solide contenue dans les cannettes du réservoir

Dans la Cuve $Q_{P_s \text{ cuve}} = 0,08 \times 2,14 \times 30 \approx 5,136 \text{ kJ}$

Au total $Q_{P_s \text{ tot}} = 224,7 + 5,136 = 229,836 \text{ kJ}$

2. L'énergie nécessaire pour faire fondre la paraffine à la température de fusion (55°C) :

$$Q_F = m_p \times L_T$$

- L_T est la chaleur latente de fusion du paraffine (environ 210 kJ/kg).

Dans le récepteur $Q_{F \text{ réc}} = 3,5 \times 210 = 735 \text{ kJ}$

Dans la Cuve $Q_{F \text{ cuve}} = 0,08 \times 210 \approx 16,8 \text{ kJ}$

Au total $Q_{F \text{ tot}} = 735 + 16,8 = 751,8 \text{ kJ}$

3. L'énergie pour chauffer la paraffine de 55°C à 60°C :

Une fois que la paraffine a fondu, nous devons calculer l'énergie nécessaire pour chauffer le liquide (paraffine fondue) de 55°C à 60°C en utilisant la même équation :

- $\Delta T_{P_l} = 60 - 55 = 5 \text{ °C}$

Chaleur sensible nécessaire pour chauffer la paraffine liquide de 55°C à 60°C

$$Q_{P_l} = m_p \times C_{p_{P_l}} \times \Delta T_{P_l}$$

C_p est la capacité calorifique spécifique du paraffine liquide $C_{p_{P_l}} \approx 2,1 \text{ kJ/kg. K}$.

Dans le récepteur $Q_{P_l \text{ réc}} = 3,5 \times 2,1 \times 5 = 36,75 \text{ kJ}$

Dans la Cuve $Q_{P_l \text{ Cuve}} = 0,08 \times 2,1 \times 5 \approx 0,84 \text{ kJ}$

Au total $Q_{P_l \text{ tot}} = 36,75 + 0,84 = 37,59 \text{ kJ}$

4. L'énergie totale stockée dans la paraffine :

Maintenant, nous pouvons calculer l'énergie totale stockée dans la paraffine pendant l'expérience, en additionnant l'énergie de chaque étape :

$$Q_{P \text{ tot}} = Q_{P s} + Q_F + Q_{P l}$$

$$Q_{P \text{ tot}} = 229,839 + 751,8 + 37,59 = 1019,23 \text{ kJ}$$

Si tout la paraffine avait fondu, l'énergie totale stockée dans la paraffine serait de **1019.23kJ**

➤ Énergie stockée dans l'eau Q_e

Données :

- Masse $m_e = 40\text{L}$ (1 litre = 1 kg, donc 40 kg)
- Capacité calorifique spécifique $\approx 4,18 \text{ kJ/kg. K}$.
- Variation de température $\Delta T_e = 60 - 25 = 35^\circ\text{C}$.
- **Apport nécessaire de chaleur pour chauffer une masse d'eau ΔT_e**

$$Q_e = m_e \times C_{p_e} \times \Delta T_e$$

$$Q_e \approx 40 \times 4,18 \times 35 \approx 5852 \text{ kJ}$$

➤ Analyse de l'énergie totale

Pour obtenir l'énergie totale, vous pouvez additionner les énergies :

$$Q_{\text{tot}} = Q_e + Q_p \approx 5852 + 1019,23 = 6871,23 \text{ kJ}$$

6.4 Problèmes rencontrés

Dans cette étude, les problèmes rencontrés lors de la mise en œuvre de l'expérimentation de chauffage de l'eau domestique sont :

- Rayonnement solaire insuffisant pour élever les températures, sachant que l'expérience a été réalisée pendant la période automnale où le ciel est souvent couvert de nuages.
- Le vent est présent toute la journée.
- Thermocouples qui se séparent pendant l'expérience
- Fuite de MCP des tubes récepteurs

6.5 Conclusion :

Les résultats confirment que le collecteur solaire cylindro-parabolique peut être un système efficace pour la collecte de l'énergie solaire dans la région de Tizi-Ouzou, avec des possibilités d'amélioration des performances grâce à des modifications simples du design, telles que l'utilisation de verre et l'augmentation de l'angle d'inclinaison. Ces expériences fournissent une base solide pour des recherches futures dans ce domaine, contribuant ainsi au développement de solutions énergétiques durables et efficaces.

Chapitre 7 :

Présentation du projet startup

Dans ce chapitre, nous présentons un projet de fabrication d'un collecteur solaire cylindro-parabolique pour le chauffage de l'eau domestique, visant à fournir une solution innovante et durable qui repose sur l'énergie solaire pour réduire la consommation d'énergie traditionnelle dans les foyers, ce qui contribue à diminuer les coûts énergétiques et à réduire l'impact environnemental. Ce chapitre aborde plusieurs axes essentiels, notamment : la présentation de l'idée du projet et des valeurs ajoutées, les aspects innovants, l'analyse du marché, le plan de production et d'organisation, ainsi que le plan financier. À travers ce projet, nous visons à offrir une meilleure compréhension de notre plan pour créer une entreprise émergente dans le domaine de l'énergie solaire et à contribuer à la transition vers un avenir plus vert.

7.1 Premier axe : Présentation du projet

7.1.1 Idée de projet (solution proposée)

L'idée du projet de création d'une start-up dans le secteur de l'énergie solaire est née d'une étude qui a révélé que de nombreuses familles dépendent de sources d'énergie traditionnelles pour chauffer l'eau, ce qui entraîne des coûts énergétiques plus élevés et des émissions de carbone accrues. L'énergie solaire peut apporter une solution durable et efficace pour répondre aux besoins d'eau chaude. L'idée s'est développée en s'approchant de l'incubateur de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, où je prépare mon mémoire de master dans le domaine de l'énergie, au sein de l'établissement. Le cadre de la Résolution Ministérielle n°1275 du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique relative à l'établissement du certificat de brevet/startup. Sur la base de ces données, il a été proposé de développer un capteur solaire cylindro parabolique pour la production d'eau chaude, intégrant un système de stockage basé sur des matériaux à changement de phase (MCP) pour améliorer l'efficacité. Une unité de production sera créée sur la base de technologies avancées, garantissant des performances élevées et la durabilité du système.

7.1.2 Valeurs proposées pour le projet de capteur solaire cylindro-parabolique

Le projet de capteur solaire cylindro-parabolique propose une solution innovante de chauffage de l'eau utilisant une nouvelle technologie qui n'existait pas auparavant sur le marché. Le système est basé sur une conception cylindro parabolique innovante qui contribue à améliorer l'efficacité de la collecte de l'énergie solaire, avec un système de stockage

thermique avancé utilisant des matériaux à changement de phase (MCP) tels que la paraffine, permettant de stocker la chaleur pour une utilisation ultérieure, même en l'absence de l'énergie solaire.

Le projet vise à réduire les coûts d'exploitation grâce à l'utilisation de l'énergie solaire gratuite, ce qui réduit les coûts mensuels pour les consommateurs. Elle contribue également à réduire l'impact environnemental en utilisant des matériaux recyclés, tels que des canettes de soda en aluminium, ce qui améliore la durabilité.

La conception innovante comprend également une conductivité thermique améliorée grâce à des ailettes en aluminium, ainsi qu'un panneau de verre qui réduit les pertes de chaleur. Le réservoir d'eau est également conçu pour être isolé à l'aide de polystyrène, ce qui évite les pertes de chaleur et améliore les performances du système.

7.1.3 L'équipe du projet est composée des membres suivants :

M. MAKHLOUF Said

Professeur en Energétique à l'UMMTO, Directeur du Laboratoire de Mécanique, Structures et Energétiques.

Mme DJEFEL Dihia

Docteur en Energétique à l'UMMTO

LOUAGUENOUNI Radouane

Étudiant en fin de cycle, Master 2 Energétique à la faculté du Génie de la Construction de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

SELLAMI Brahim

Étudiant en fin de cycle, Master 2 Energétique à la faculté du Génie de la Construction de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

7.1.4 Notre objectif

Est de devenir le premier fabricant de capteur solaire cylindro-parabolique pour le chauffage solaire de l'eau en Algérie dans les cinq prochaines années. Nous nous concentrons sur l'amélioration de l'efficacité énergétique et la réduction des coûts, ce qui améliore l'utilisation des énergies renouvelables dans les maisons et reflète notre engagement en faveur

d'un environnement plus durable. Nous pensons que cette innovation contribuera à fournir des solutions efficaces et durables aux consommateurs, ce qui contribuera à la protection de l'environnement et à la réalisation du développement durable.

7.1.5 Calendrier d'achèvement du projet

➤ Déterminez le temps requis pour chaque tâche :

Tâche	Durée (en semaines)	Principaux résultats
1. Recherche et développement	4	Un rapport complet sur les besoins du marché et les technologies d'énergie solaire disponibles.
2. Conception du système	4	Conception préliminaire du capteur solaire, clarifiant les dessins techniques et les spécifications
3. Sélection des matériaux	2	Liste des matériaux à changement de phase (PCM) et autres matériaux utilisés
4. Construire le prototype	2	Prototype prêt à tester, avec tous les composants nécessaires
5. Tests de performances	4	Un rapport complet sur l'efficacité des performances et les résultats des tests.

7.2 Deuxième axe : Aspects innovants

7.2.1 Nature des innovations

Il s'agit du premier projet en Algérie qui s'appuie sur la technologie solaire avancée grâce à l'utilisation d'un capteur solaire cylindro-parabolique, qui améliore l'efficacité de la conversion de l'énergie solaire en énergie thermique.

Les tubes en cuivre sont conçus en forme de serpent, ce qui réduit l'espace utilisé et augmente la vitesse de circulation du liquide, améliorant ainsi l'efficacité du transfert de chaleur.

Incorporation de paraffine comme matériau à changement de phase, qui contribue à améliorer l'efficacité du stockage thermique et permet de stocker la chaleur pendant de longues périodes, même en l'absence de soleil, ce qui augmente l'efficacité du système.

7.3 Troisième axe : Analyse stratégique du marché

7.3.1 Le segment du marché

Marché potentiel : Tout individu ou organisation recherchant des solutions pour chauffer l'eau de manière durable et efficace.

Les acheteurs comprennent des familles intéressées à réduire leurs factures d'énergie, des entreprises cherchant à se conformer aux normes environnementales, ainsi que des institutions gouvernementales et de nouveaux projets de construction.

Le marché est situé dans les zones urbaines et rurales d'Algérie, où les besoins en chauffage de l'eau sont importants, comme les zones ensoleillées.

7.3.2 Mesurer l'intensité concurrentielle

➤ Concurrents directs :

Entreprises qui fabriquent des systèmes de chauffe-eau solaires

➤ Concurrents indirects :

Entreprises énergétiques traditionnelles qui fournissent des services de chauffage de l'eau.

Les entreprises proposent des technologies alternatives telles que des systèmes de chauffage électrique.

➤ Points forts :

Infrastructure bien établie et ressources financières solides.

Forte réputation sur le marché.

➤ Faiblesses :

Coûts élevés par rapport aux alternatives.

Manque de service après-vente.

Préoccupation accrue concernant l'impact environnemental.

7.3.3 Stratégie marketing

Créez une application numérique pour distribuer les produits et gérer les commandes, facilitant ainsi l'achat des clients. L'application permet également d'enregistrer les griefs et les plaintes des clients, car nous veillons à ce qu'ils reçoivent une réponse rapide et efficace, ce qui améliore l'expérience client et soutient leur fidélité à la marque.

Utilisez les médias sociaux (tels que Facebook et Instagram) pour promouvoir les solutions de chauffe-eau solaires.

Créez du contenu éducatif sur les avantages de l'énergie solaire et le fonctionnement d'un système de capteurs solaires cylindro paraboliques, améliorant ainsi la notoriété du produit.

Participez à des salons locaux et internationaux sur les énergies renouvelables pour communiquer directement avec des clients potentiels et effectuer des démonstrations.

7.4 Quatrième axe : Plan de production et organisation

7.4.1 Processus de production

Les matériaux nécessaires tels que l'aluminium, le cuivre et la paraffine sont achetés sous forme de matériaux à changement de phase. Les fournisseurs sont soigneusement sélectionnés pour garantir des matériaux de haute qualité et des prix compétitifs.

Cette étape comprend l'assemblage minutieux des composants du capteur solaire pour garantir des performances optimales.

Une fois le processus de fabrication terminé, chaque composant est soigneusement emballé pour le protéger des dommages pendant le transport. Des matériaux d'emballage respectueux de l'environnement sont utilisés qui reflètent notre engagement en faveur du développement durable.

Les produits finis sont emballés dans des boîtes spécialement conçues, avec des informations détaillées sur le produit fourni.

7.4.2 La main d'œuvre

Déterminer le nombre de postes que le projet peut créer en fonction du volume de production attendu et des besoins du processus opérationnel.

Déterminer la nature et le type de travailleurs dont nous avons besoin ainsi que leurs emplacements.

- Ouvriers, chargés de faire fonctionner les machines de fabrication et d'assembler les pièces.
- Ouvriers, spécialistes de l'entretien des équipements et du bon fonctionnement.
- Personne responsable de la coordination de tous les processus administratifs et opérationnels.
- Personne responsable des stratégies marketing et des relations clients.
- Personne responsable des questions financières et comptables.
- Ouvriers, responsables de la gestion des stocks et de la distribution du matériel.
- Ouvriers, chargés de l'emballage des produits finis.

7.4.3 Partenaires clés

- Des fournisseurs de matières premières qui garantissent des matériaux de haute qualité et à des prix compétitifs.
- Entreprises qui fournissent les machines et équipements nécessaires aux opérations de fabrication,
- Collaborer avec les communautés locales pour sensibiliser aux avantages de l'énergie solaire, qui contribue à commercialiser les produits et à créer une clientèle durable.

7.5 Cinquième axe : Plan financier

7.5.1 Coûts et frais

Les principaux coûts incluent l'achat de matériaux (D.A)

- Aluminium : 300.000

-tubes Cuivre : 3500.000

-Coude de cuivre : 800.000

- Paraffine : 2500.000

-la colle : 3000.000

-Adhésif aluminium :270.000

-Peinture : 250.000

Le financement peut provenir de sources variées : subventions gouvernementales, prêts bancaires, partenariats industriels ou investisseurs privés.

7.5.2 Le Chiffre d'affaires

Le chiffre d'affaires de notre projet sera constitué par la vente de nos collecteurs solaires cylindro_ parabolique. Selon les prévisions de ventes, on envisage deux possibilités :

Scenario positif : Si la demande surpasse les prévisions, grâce à une adoption rapide des technologies solaires par les clients domestiques et professionnels, le chiffre d'affaires pourrait grimper significativement, permettant de couvrir promptement les dépenses initiales.

Scénario défavorable : Si la mise en place est retardée, si le marché résiste ou si des coûts inattendus surviennent, le chiffre d'affaires diminuera et des ajustements seront indispensables pour préserver la rentabilité.

Conclusion générale

Grâce à une étude approfondie d'un système de concentrateur solaire cylindro-parabolique avec stockage d'énergie utilisant des matériaux à changement de phase (MCP) pour la production d'eau chaude sanitaire, nous avons pu comprendre le fonctionnement de ce type de système et identifier les principaux facteurs affectant son amélioration de l'efficacité et sa prestation.

Ces systèmes représentent une technologie innovante dans la collecte de l'énergie solaire, en particulier dans les zones à fort rayonnement solaire, comme l'Algérie.

Dans la conception du capteur solaire innovant, une nouvelle technologie a été adoptée, qui diffère des capteurs traditionnels qui reposent sur « une entrée, une sortie », une conception qui nécessite un grand espace. En revanche, notre capteur est basé sur « 4 entrées et 4 sorties », qui sont reliées par des tubes en cuivre, tout en conservant l'idée de base des capteurs traditionnels (1 entrée, 1 sortie). Cette nouvelle technologie permet une efficacité accrue sans nécessiter un grand espace.

De plus, le système comporte un tube récepteur solaire en forme de zigzag pour le passage de l'eau, une conception qui épouse parfaitement la forme du capteur, améliorant ainsi l'efficacité du transfert de chaleur. Cette forme en zigzag améliore l'interaction entre le fluide thermique et les surfaces rayonnantes, augmentant ainsi la capacité du système à absorber et à stocker plus efficacement l'énergie solaire.

Grâce à cette conception innovante, non seulement les performances du système sont améliorées, mais l'espace requis est également réduit, ce qui contribue à réduire les coûts. Cela en fait une solution idéale pour les petits projets ou les applications limitées à des espaces limités. Dans l'ensemble, cette conception constitue une étape importante vers le développement de systèmes solaires plus efficaces et plus durables pour collecter et stocker l'énergie solaire, tout en améliorant l'utilisation pratique et efficace de l'espace.

Nous sommes parvenus à un ensemble de conclusions importantes qui peuvent contribuer de manière significative à l'amélioration de la conception et du fonctionnement de ces systèmes à l'avenir.

L'emplacement est l'un des facteurs les plus importants qui affectent directement les performances d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique. Le choix correct de

l'emplacement est essentiel pour obtenir une efficacité maximale du système. Les performances optimales d'un capteur solaire dépendent de nombreux facteurs climatiques et géographiques tels que le rayonnement solaire direct, la vitesse du vent, la température et la latitude. En Algérie, par exemple, le sud bénéficie d'un rayonnement solaire abondant, ce qui en fait un endroit idéal pour installer des centrales solaires à concentration. Dans ce contexte, des données climatiques précises sont essentielles pour estimer la quantité d'énergie qu'un système solaire peut produire dans certaines régions. Cette connaissance des détails du climat local peut aider à personnaliser les systèmes pour répondre aux exigences locales et ainsi améliorer considérablement les performances.

Grâce à l'étude, il a été constaté qu'il existe plusieurs facteurs de conception importants qui affectent l'efficacité thermique du système, qui doivent être pris en compte pour développer le système et atteindre des performances idéales :

Surface réfléchissante : Il a été démontré que la sélection des matériaux utilisés dans la surface réfléchissante joue un rôle essentiel dans l'amélioration de l'efficacité. En utilisant des matériaux tels que des miroirs ou des feuilles d'aluminium traitées au lieu de matériaux moins réfléchissants, la quantité de rayonnement solaire réfléchi dans les tubes récepteurs peut être augmentée et donc la température qui en résulte. L'optimisation de la surface du réflecteur est une étape clé pour obtenir des performances plus élevées.

Tube récepteur : L'utilisation de tubes récepteurs appropriés est tout aussi importante que la surface réfléchissante. L'étude a montré que l'utilisation de canettes de soda en aluminium est une option rentable et permet d'obtenir des résultats satisfaisants en termes de performances thermiques. Cependant, le principal problème qui s'est posé était la fuite de la paraffine utilisée pour stocker la chaleur, suite à l'utilisation de colle adhésive lors de l'installation des bidons. Pour éviter ce problème, il est recommandé d'utiliser la soudure de l'aluminium pour fixer les canettes de manière plus ferme et sécurisée, ce qui contribue à réduire les fuites et à assurer une rétention de chaleur plus efficace. De plus, les performances peuvent être encore améliorées en utilisant des tubes longs et bien isolés ou en utilisant des technologies avancées telles que des nanotubes ou des tubes de verre isolés qui garantissent la meilleure isolation thermique et des performances à long terme sans perte d'énergie.

Système thermique et matériaux à changement de phase (MCP) : Le stockage de chaleur utilisant des matériaux à changement de phase (MCP) constitue un avantage important dans les

systèmes solaires à concentrateur. Ces matériaux ont la capacité d'absorber et de stocker la chaleur pendant la journée et de la convertir en énergie thermique qui peut être utilisée plus tard, même au coucher du soleil ou les jours où le soleil est nuageux. L'amélioration des propriétés des matériaux MCP, telles que leur capacité à absorber plus de chaleur et leur capacité à fonctionner sur plusieurs cycles thermiques, sont des priorités futures pour le développement de systèmes solaires durables.

Une autre conclusion importante qui a émergé au cours de l'étude est l'importance d'inclure des systèmes de surveillance intelligents dans la conception du concentrateur solaire. Ces systèmes peuvent aider à suivre les performances du système sur une base continue, permettant une détection précoce de tout dysfonctionnement du système et garantissant une utilisation maximale de l'énergie générée. Les systèmes de surveillance avancés permettent de surveiller de nombreux facteurs tels que la température, le rayonnement solaire et le flux d'énergie, améliorant ainsi la gestion de l'énergie.

L'Algérie est considérée comme l'un des pays qui possède un grand potentiel dans le domaine de l'énergie solaire, notamment dans son sud, qui est considéré comme un immense réservoir d'énergie solaire inexploité. Avec un rayonnement solaire élevé disponible tout au long de l'année, ces zones offrent de grandes opportunités pour l'installation de systèmes d'énergie solaire concentrée, notamment des concentrateurs solaires cylindro_ paraboliques. Mais pour tirer le meilleur parti de ces opportunités, il faut travailler à développer des techniques de conception de systèmes nouvelles et innovantes et à améliorer les stratégies de stockage thermique afin de répondre aux besoins énergétiques locaux de l'Algérie de manière durable et efficace.

Notre étude a montré que les systèmes de concentrateurs solaires cylindriques paraboliques avec stockage d'énergie par des matériaux à changement de phase sont une option prometteuse pour améliorer l'efficacité de l'énergie solaire dans les régions ensoleillées comme l'Algérie. Compte tenu des grandes opportunités qu'offre l'Algérie dans ce domaine, outre les défis identifiés, l'amélioration de la conception des systèmes, l'amélioration de la sélection des matériaux, l'introduction de systèmes de surveillance intelligents, en plus de l'évaluation continue des données climatiques, peuvent avoir un impact significatif sur l'avenir de l'énergie solaire en Algérie et dans les régions similaires.

En adoptant ces solutions techniques bien étudiées, des retombées économiques et environnementales notables peuvent être obtenues qui font de l'Algérie l'un des pays leaders dans le domaine de l'énergie solaire concentrée aux niveaux régional et international.

Références

- [1] Kassewa A., Tchapo.Singo, (2006), « Système d'alimentation photovoltaïque avec, stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome. », Thèse de Doctorat de l'Université, Henri. Poincaré, Nancy-I.
- [2] L'énergie solaire, lien : <http://herve.silve.pagesperso-orange.fr/solaire>, Consulté en Juin 2024
- [3] Cooper P., (1969), « The absorption of solar radiation in solar stills », Solar Energy, 12 (3), 333-346.
- [4] Duffie, John A. and William A., (2010), « Solar energy thermal processes», University of Madison, USA, WI
- [5] Bernard J, (2004), « Energie solaire calculs et optimisation », Ellipse Edition Marketing
- [6] Iqbal M, (1983), « An introduction to solar radiation », Academic press, New York.
- [7] M, Capderou. Atlas solaire de l'Algérie, O.P.U, Alger. (1986)
- [8] Brochure, (2000), « Dimensionnement et installation des systèmes Solaires PV pour l'éclairage domestique », Centre de Développement des Energies Renouvelables Royaume du Maroc Marrakech édition l'UNESCO et l'IEPF Marrakech 29 juillet 2000.
- [9] <http://www.aros-solar.com/fr/le-rayonnement-solaire>
- [10] <https://www.semanticscholar.org/paper/Une-m%C3%A9thoded%27estimation-du-rayonnement-solaire-par-Tadili-Bargach>
- [11] Mémoire de fin d'études faculté génie de la construction département de génie mécanique université Mouloud Mammeri Tizi-ouzo : Bilan thermique d'un chauffe-eau solaire réalisé par DRIF idir (2012/2013).
- [12] <https://www.guide-panneaux-photovoltaïques.be/technologies/lepanneau-solaire-thermique>
- [13] Les centrales à tour : laboratoire énergie solaire économie d'énergie juin (2009) par YAMEGUEU NGUEW DANIEL.
- [14] Sylvain Quoilin, les centrales solaires à concentration. Faculté des sciences Appliquées, Université de Liège (Mai 2007).
- [15] Bourgueba djaoued, BEKKOUCHE Ismail, « Simulation Numérique du stockage de l'énergie par Chaleur Latente », Université Abou Baker Belkaid-Tlemcen, 2013-2014, p. 27-27-29-30.

- [16] https://www.researchgate.net/figure/Les-differentes-manieres-physiques-de-stocker-lenergie-thermique-22-23_fig1_322885954
- [17] Amina Akrouche. Mémoire De Master. Etude du stockage et déstockage d'énergie dans matériau à changement de phase. Ecole Des Mines de Nantes. 29 Octobre 2011.
- [18] Brousseau. P., Lacroix. M. "Numerical simulation of a compact multi-layer phase change material energy storage system". Fundamentals of phase change: Sublimation Solidification. conf. organised by ASME. Chicago, Nov. 13- 18. 1994.
- [19] Abhat (1983) Low Temperature Latent Heat Thermal Energy Storage: Heat Storage Materials. Solar Energy, Vol. 30, No. 4, pp. 313-332
- [20] Serge Blaise EKOMY ANGO « Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment : développement d'un système actif à matériaux à changement de phase ». L'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2011
- [21] <http://dspace.univtiaret.dz/bitstream/123456789/11942/2/Chapitre%2002%20le%20stockage%20thermique.pdf>
- [22] Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). Thermodynamics: An Engineering Approach. McGraw-Hill.
- [23] Salwa BOUADILA et al. Experimental study of latent heat storage in a vacuum solar collector. Récents Progrès en Génie des Procédés, Numéro 101 - 2011 ISSN 1775-335X - ISBN 2-910239-75-6, Ed. SFGP, Paris, France.
- [24] Z.Belkacem, « Etude comparative de différentes configurations de capteur solaire plan à air », Université d'Adrar, Faculté des sciences et de la technologie, Mémoire Master, 2013/2014, p.33-59.
- [25] A. Valan Arasu et Arun S. Mujumdar, Numerical study on melting of paraffin wax with Al₂O₃ in a square enclosure. Int. Comm. in Heat and Mass Transfer, Vol. 39, pp. 8–16 (2012)
- [26] A.Degla.R.Sioud, « séchage solaire des dattes deglet-nour : simulation numérique », mémoire master académique, domaines sciences thermiques, 6/6/2015, p.3-16.
- [27] <https://www.techno-science.net/definition/3335.html>
- [28] <https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/12075/surfusion>
- [29] Houhou Hatem, « Etude Théorique Et Expérimentale Du Séchage Solaire De Certains Produits Agro-alimentaires », Mémoire De Magister En Génie Mécanique, Université De Biskra, p 9-35-39.
- [30] Srinivasan M, L.V Kulkarni.L.V and Pasupathy C S: a simple technique of fabrication of paraboloidal concentrators 1978
- [31] N.Kherous, J.Hamzaoui, étude et réalisation d'un concentrateur parabolique UMMTO.

[32] Dan dye, Byard Wood: non-imaging devices for uniform irradiation on planar surface for parabolic concentrators. Nevada August2002-April2003

[33] ZEGHIB Ilham, étude et réalisation d'un concentrateur solaire parabolique UM Constantine.

[34] Edwards D.K/ traduit par Lucien Marlot Capteurs solaires Editions 1979

[35] Handbook of optics: devices, measurements & properties volume II sponsored by the optical society of America

[36] <http://www.absolusystem.com/public/spec/upload/Guide-couleur-en-exterieur.4056.pdf>

[37] Mémoire de fin d'étude faculté de technologie Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen : Etude expérimentale et conception d'un concentrateur cylindro-parabolique réalisées Par : MEDJAOUI Fatima-Zohra (2018)

[38] A. Mwesigye, Z. Huan, J.P. Meyer, Thermodynamic optimisation of the performance of a parabolic trough receiver using synthetic oil–Al₂O₃ nanofluid, Appl. Energy 156 (2015) 398–412.

[39] Development of a solar concentrator with tracking system : Flávia V. Barbosa¹, João L. Afonso², Filipe B. Rodrigues², and José C. F. Teixeira¹

[40] SHARMA A TYGI V chen C R BUDDHI D 2009 Review on thermal energy storage with phase change Materials and Applications. Renewable and sustainable energy Reviews

[41] <https://www.lachainemeteo.com/meteo-algerie/ville-4119/previsions-meteo-alger-heure-par-heure>

[42] H. K. M. K. N. et al. "Thermal Properties of Paraffin Wax for Solar Thermal Energy Storage," Journal of Solar Energy Engineering, vol. 138, no. 4, 2016.