



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l' Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE de TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT de GENIE MECANIQUE

PROJET de FIN de CYCLE de MASTER

Présenté par : - REMILAT KOUIDER
- BOUDOU DA YAHIA

DOMAINE : SCIENCES et TECHNOLOGIES.

FILIERE : GENIE MECANIQUE

OPTION : Energies Renouvelables

Thème

**Etude comparative des performances d'un collecteur solaire
cylindro- parabolique dans des conditions aléatoires**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
H. AISSA	Pr	Président
B.LAHCENE	Dr	Examineur
B.BOUALI	Dr	Encadreur

Promotion : Juillet 2025

Dédicace

Nous dédions ce modeste travail : à nos parents.

A nos frères et sœurs.

Pour nos familles et chers amis.

Remerciements

D'abord nous tenons à remercier, le dieu de nous avoir donné la force, le courage et la volonté pour réaliser et accomplir ce modeste travail.

Nous exprimons nos sincères remerciements et notre gratitude à Monsieur **BELKACEM BOUALI** pour ses conseils et son assistance lors de l'élaboration de ce travail.

Nous exprimons nos sincères remerciements et notre gratitude à..... pour ses conseils et son aide lors de l'élaboration de ce travail.

Je tiens à remercier spécialement :

La famille Boudoudat et Remilat et ainsi que nos amis sont tous et les enseignants du département de mécanique de l'université de LAGHOUAT.

Enfin, à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce travail qu'elles veuillent bien accepter l'expression de ma gratitude.

Résumé

Face à l'épuisement progressif des énergies fossiles et aux préoccupations environnementales croissantes, les énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire, représentent une alternative durable et prometteuse. L'exploitation de cette ressource abondante, propre et gratuite est devenue une priorité stratégique dans plusieurs pays, notamment ceux bénéficiant d'un fort ensoleillement comme l'Algérie.

Parmi les technologies solaires thermiques, les collecteurs à concentration, et plus précisément les **collecteurs cylindro-paraboliques (CCP)**, se distinguent par leur capacité à atteindre des températures élevées et à offrir un bon rendement pour diverses applications, notamment la production d'eau chaude, le chauffage ou encore la génération d'électricité à petite échelle.

Cependant, la performance de ces systèmes dépend fortement des **conditions météorologiques locales**, telles que l'irradiation solaire, la température ambiante et la vitesse du vent. En réalité, ces conditions sont rarement constantes et peuvent varier d'une heure à l'autre ou d'un jour à l'autre. Il est donc essentiel d'étudier le comportement réel des CCP **sous des conditions climatiques aléatoires**, afin d'évaluer leur efficacité dans un contexte pratique, et non seulement théorique.

Le présent travail vise ainsi à **analyser et comparer les performances thermiques** d'un collecteur cylindro-parabolique dans deux situations différentes :

- une situation **idéale**, avec des conditions climatiques constantes ;
- une situation **réaliste**, caractérisée par des variations naturelles du rayonnement solaire et de la température ambiante.

Pour cela, une modélisation numérique est réalisée à l'aide d'outils de simulation spécialisés tels que **SolTrace** pour la modélisation optique du collecteur, et **ANSYS Fluent** pour l'analyse thermique et fluidique. La région de **Laghouat (Algérie)** a été choisie comme site d'étude, en raison de son fort potentiel solaire.

À travers cette étude, nous cherchons à mieux comprendre l'impact des perturbations climatiques sur le rendement global d'un CCP, et à proposer des recommandations pour une conception plus robuste et efficace de ce type de système dans un contexte réel.

Abstract

Due to the gradual depletion of fossil energy sources and growing environmental concerns, **renewable energies**, especially **solar energy**, have become a sustainable and promising alternative. The exploitation of this abundant, clean, and free resource has become a strategic priority in many countries, particularly those with high solar irradiance, such as **Algeria**.

Among solar thermal technologies, **concentrated solar collectors**, and more specifically **parabolic trough collectors (CCP)**, stand out for their ability to reach high temperatures and their good efficiency in various applications, such as water heating, space heating, or even small-scale electricity production.

However, the performance of these systems is highly dependent on **local weather conditions**, including **solar radiation**, **ambient temperature**, and **wind speed**. In reality, these conditions are rarely constant and tend to fluctuate throughout the day. Therefore, it is essential to study the real behavior of CCPs under **variable or random climatic conditions**, in order to evaluate their practical efficiency — not just theoretical.

This work aims to **analyze and compare the thermal performance of a parabolic trough solar collector** under two different scenarios:

- an **ideal case**, with stable weather conditions;
- and a **realistic case**, characterized by natural variations in solar radiation and temperature.

To achieve this, a **numerical simulation** is carried out using specialized tools such as **SolTrace** for optical modeling, and **ANSYS Fluent** for thermal and fluid flow analysis. The city of **Laghouat (Algeria)** is chosen as the study site due to its high solar energy potential.

Through this study, we aim to gain a **better understanding of how climatic fluctuations affect the overall thermal efficiency** of a CCP system and to propose recommendations for a more robust and effective design under real-world operating conditions.

ملخص

بسبب الانخفاض التدريجي في مصادر الوقود الأحفوري وتزايد المخاوف البيئية، أصبحت الطاقات المتجددة، وعلى رأسها الطاقة الشمسية، تمثل بدياً مستداماً وواعداً. إن استغلال هذه الطاقة المتوفرة بكثرة، والنظيفة، والمجانية، أصبح أولوية استراتيجية في العديد من الدول، لا سيما تلك التي تتمتع بمعدلات إشعاع شمسي مرتفعة، مثل الجزائر.

من بين تقنيات الطاقة الشمسية الحرارية، تبرز اللاقطات الشمسية ذات التركيز، وخصوصاً اللاقطات الأسطوانية المكافئة لقدرتها على بلوغ درجات حرارة عالية، وكفاءتها الجيدة في عدة تطبيقات مثل تسخين المياه، التدفئة، أو حتى إنتاج الكهرباء على نطاق صغير.

غير أن أداء هذه الأنظمة يتأثر بشكل كبير بالظروف المناخية المحلية، مثل الإشعاع الشمسي، ودرجة حرارة الجو، وسرعة وفي الواقع، فإن هذه الظروف نادراً ما تكون ثابتة، بل تعرف تقلبات مستمرة على مدار اليوم. لذا، فإن دراسة السلوك الفعلي لهذه اللاقطات تحت ظروف مناخية متغيرة أو عشوائية أصبح أمراً ضرورياً لتقييم فعاليتها بشكل عملي، وليس فقط نظري.

يهدف هذا العمل إلى تحليل ومقارنة الأداء الحراري للاقط شمسي أسطوانية مكافئة في حالتين مختلفتين

- حالة مثالية، تكون فيها الظروف المناخية ثابتة؛
- وحالة واقعية، تتسم بتغير طبيعي في الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة.

لنمذجة النظام البصري، SolTrace لتحقيق ذلك، تم إجراء نمذجة رقمية باستخدام أدوات محاكاة متخصصة مثل برنامج

ANSYS Fluent

لتحليل نقل الحرارة وحركة الموائع. وتم اختيار مدينة الأغواط (الجزائر) كموقع للدراسة، نظراً لما تتميز به من إمكانيات شمسية كبيرة

من خلال هذه الدراسة، نسعى إلى فهم أفضل لتأثير التقلبات المناخية على المردود الحراري العام للاقط الشمسي، وتقديم توصيات لتحسين تصميمه وجعله أكثر كفاءة وموثوقية في ظروف التشغيل الحقيقية

SOMMAIRE

INTRODUCTION	01
---------------------------	-----------

CHAPITRE I

Energie renouvelable

I-1- Énergies renouvelable.....	04
Introduction	04
I-1-1 Types des énergies renouvelables.....	04
I-1-1-1- Énergie hydraulique.....	04
I-1-1-2- L'éolienne	05
I-1-1-3- La biomasse	06
I-1-1-4- Géothermie.....	07
I-1-1-5- L'énergie solaire	07
I-1-1-6- Le rayonnement solaire.....	09
I-1-1-6- a- Le rayonnement solaire direct	11
I-1-1-6- b- Le rayonnement solaire diffus.....	12
I-1-1-6- c- Le rayonnement global	12
I-1-1-6- d- Calcul de la position du soleil.....	12
I-1-1-6- d-1- Les paramètres de position	12
I-1-1-6- d-1- a- Les coordonnées géographiques	12
I-1-1-6- d-1- b Les coordonnées célestes horizontale	13
I-1-1-6- d-1- c- Les coordonnées célestes horaires.....	14
d-2- Les paramètres de temps... ..	1
II : Etude descriptive du Concentrateur Solaire Thermique	

II.1. Introduction	15
---------------------------------	-----------

II.2. Description de la concentration.....	15
II.2.1. Concentrateur solaire.....	15,16
II.2.2. Le plan focal	16
II.3. Les Caractéristiques d'un concentrateur cylindro-parabolique (CCP).....	16,17
II.4. Description et principe de fonctionnement du concentrateur	18
II.4.1. Le collecteur	19
II.4.2. La couverture transparente (le verre).....	19
II.4.3. Le fluide caloporteur	19
II.4.4. Le réflecteur	19
II.4.5. Le récepteur (absorbeur).....	21
II.5. Le système de poursuite.....	21
II.5.1. Mécanisme de poursuite	21,22,23
II.5.2. Choix de l'orientation.....	24
II.5.3. Effet de l'inclinaison d'une surface sur l'énergie incidente.....	24

Chapitre III: Modélisation et résolution numérique

III.1.Introduction.....	Error! Bookmark not defined.
III.2. Rayonnement solaire en Algérie	Error! Bookmark not defined.
III.2.1. Logiciel PVsyst.....	Error! Bookmark not defined.
III.2.2. Données météorologiques.....	29
III.3. Géométrie du collecteur	29
III 3 1La surface du miroir et la surface d'ouverture	29
III3 2 La concentration.....	30
III.3.3 Les paramètres géométriques	31
III.3.4 Les L'angle d'ouverture (ψ)	33
III.4.1 Tube absorbeur	35
III.4.2 Fluides caloporteurs	35
III.4.3 On distingue comme fluides	36
III.4.4 Le bilan thermique.....	36
III.4.5 Entre l'absorbeur et le fluide caloporteur.....	37

III.4.6	Entre l'absorbeur et l'enveloppe en verre	38
III.4.7	Entre l'enveloppe du verre et l'environnement	38
III.5	Présentation de Logiciel SolTarce.....	39
III.5.1	Définition de la source solaire dans SolTrace.....	39
III.5.2	Tracé des rayons solaires à l'intérieur du collecteur	40
III.5.3	Cartographie du flux lumineux sur le récepteur	41
III.5.4	Méthode de Monte-Carlo (ray tracing) (MCRT)	42
III.6	III.7. Présentation du logiciel ANSYS Fluent.....	42
III.6.1	Mise en place de la simulation CFD sous ANSYS Fluent.....	43
III.6.2	Description de la géométrie dans ANSYS DesignModeler... ..	46
III.6.4	<i>Description et analyse technique</i>	46
III.6.5	Définition des conditions aux limites dans ANSYS Fluent	48
III.6.6	Méthode d'insertion du fichier HF	48
III.7	Conditions aux limites	50
III.7.1	Les équations gouvernantes.....	51
III.7.2	Propriétés des matériaux.....	52
III.8	Paramètres de simulation dans ANSYS Fluent.....	53

Chapitre IV : Résultats et Discussions

IV.1.	Introduction	55
1. IV.2.	METHODOLOGIE	
		55
IV.2.1.	1Génération du flux solaire de référence (Pvsyst).....	58
	2Détermination de la distribution du flux solaire concentré sur le tube absorbeur (SolTrace)	

.....	58
IV. 2.3 Génération des flux aléatoires (Matlab)	59
IV. 2.4 Implémentation des distributions obtenues dans Ansys-Fluent	59
IV. 2.5 Résolution CFD (Calcul de la température du fluide caloporteur)	59
IV.6... 2.6 Calcul des performances du système (Gain d'énergie thermique et efficacité)	59
IV. 2.7 Comparaison des performances obtenues par rapport au cas de référence	59
1. IV. 3 DISTRIBUTION DU FLUX SOLAIRE	
.....	60
1.1 IV. 3.1 Flux de référence	
.....	60
1.2 IV. 3.2 Flux aléatoires	
.....	61
1.3 IV. 3.3 Programme Matlab pour la génération des flux aléatoires	
.....	61

IV. 4. PERFORMANCES DU SYSTEME DE REFERENCE

.....62

1.1 IV. 4.1 Distribution de la température autour du tube absorbeur

.....62

1.2 IV. 4.2 Température du fluide caloporteur à la sortie du tube absorbeur

.....63

1.3 IV. 4.3 Gain d'énergie thermique (Energie utile)

.....63

1.4 IV. 4.4 Efficacité thermique du système

.....64

1. IV. 5 Analyse des performances dans des conditions aléatoires

.....65

1.1 IV. 5.1 Distribution de la température autour du tube absorbeur

.....65

1.2 IV. 5.2 Programme Matlab pour tracer et comparer les performances

.....66

1.3 IV. 5.3 Température du fluide caloporteur à la sortie du tube absorbeur

.....68

1.4 IV. 5.4 Gain d'énergie thermique (Energie utile)

.....69

1.5 IV. 5.5 Efficacité Thermique

.....70

CONCLUSION GENERALE.....

LISTE DES FIGURES

Figure I-1: Exemple sur l'énergie hydraulique 5

Figure I-2: Exemple sur l'énergie éolienne6

Figure I-3: Exemple sur l'énergie solaire photovoltaïque	9
Figure I-4: les coordonnées célestes horisotales	13
Figure I-5 : variation annuelle de la déclinaison solaire	14
Figure . II.1 : Schéma d'un concentrateur solaire	15
Figure. II .2 : schéma d'un plan focal dans un concentrateur cylindrique.....	16
Figure .II.I. 3: Principe de captation du rayonnement du cylindre-parabolique	17
Figure .II.1 : Schéma d'un concentrateur solaire	15
Figure.II.2 : schéma d'un plan focal dans un concentrateur cylindrique.....	16
Figure.II.3: Principe de captation du rayonnement du cylindre-parabolique.....	17
Figure.II.4: Composants d'un concentrateur cylindro-parabolique	18
Figure.II.5: Dimensions du réflecteur	20
Figure.II.6: Dimensions du réflecteur Structure de l'absorbeur.....	21
Figure.II.7: Les modes de poursuite solaire d'un CCP.....	23
 Figure III 1: <i>Carte de l'Algérie</i>	27
Figure III 2: Etapes du fichier de données météorologiques dans PVsyst -----	28
Figure III 3: Surface d'ouverture du collecteur et Surface d'ouverture du récepteur---	30
Figure III 4: Les paramètres géométriques] -----	40
Figure III 5: Chemin des rayons parallèles dans un miroir parabolique-----	41
Figure III 6 : Relation entre l'angle d'ouverture et la valeur a/f -----	42
Figure III 7: Relation entre la focale et l'angle d'ouverture pour une ouverture constante.	45
Figure III 8: Bilan thermique d'un élément de surface du concentrateur cylindro parabolique	46
Figure III 9: Flux de chaleur échangés dans le CCP	37
 Figure III 10 : Interface de Soltrace -----	40
Figure III 11: Schéma de CCP avec le logiciel SolTrace	41

Figure III 12: Distribution du flux solaire concentré – SolTrace-----	42
Figure III 13: Interface du logiciel ANSYS Workbench – Projet Fluid Flow (Fluent) -----	45
Figure III 14: Modélisation géométrique d’un tube dans ANSYS Design Modeler -----	46
Figure III 15: Maillage structuré d’un conduit cylindrique – ANSYS Workbench R19.2 -----	47
Figure III 16: Définition des Conditions aux Limites dans ANSYS Fluent -----	48
Figure III 17: illustration des conditions aux limites appliquées sur le tube absorbeur avec de l'eau comme fluide de travail.....	50
Figure. IV 1: Illustration de la méthodologie de simulation d’un concentrateur solaire cylindro-parabolique -----	57
Figure. IV 2: Contour des températures autour du tube absorbeur à 13h.00 -----	60
Figure. IV 3: 3 Variation de la température du fluide caloporteur à la sortie du tube absorbeur	60
Figure. IV 4: Evolution de l’énergie thermique captée par le système au cours de la journée	61
Figure. IV 5: Variations de l’Efficacité du système au cours de la journée -----	62
Figure. IV 6: Distribution de température sur la surface extérieure du tube absorbeur pour les différents flux solaires générés. -----	63
Figure. IV 7: Evolution de la température du fluide caloporteur pour différentes conditions de flux solaires -----	Error! Bookmark not defined.
Figure. IV 8: Energie utile en fonction du temps pour différentes conditions de flux solaire	67
Figure. IV 9: Evolution de l’efficacité du système au cours de la journée pour différentes conditions de flux solaires... ..	68

Liste de tableau

Tableau I.1 La répartition de l'énergie solaire dans les bandes du spectre du rayonnement thermique10

Tableau I.2.Valeurs des coefficients du trouble atmosphérique 11

Tableau I.3.Variation de la pression atmosphérique avec l'altitude...11

Tableau (III 2). **Situation géographique de Laghouat (ALGERIE)** 28

Tableau (III 3). Données météo horaires des valeurs de densité de flux solaire pour une journée au mois de juin 2024..... 29

Tableau III 4: Paramètres géométrique et optique du collecteur et de tube absorbeur39

Tableau III 4: Propriétés thermo-physiques du fluide caloporteur et tube absorbeur.....52

[Tableau III 5: Etapes nécessaires pour une simulation dans ANSYS \(Workbench\)](#) 45

[Tableau III 6: Propriétés thermo-physiques du fluide caloporteur et tube absorbeur](#) 52

[Tableau III 6: Mise en données en Fluent](#) 53

Tableau 4.1 Densité de flux solaires et flux concentré sur le tube absorbeur durant la journée du 21 Juin 2024..... 58

Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
A	Azimut du soleil	[degré]
A _a	Surface de l'absorbeur	[m ²]
A _c	Surface d'ouverture du concentrateur	[m ²]
C	Facteur de concentration	[-]
C _p	Capacité calorifique	[J/kg.K]
D _c	Rayonnement diffus sur un plan incliné	[W/m ²]
D _h	Rayonnement diffus sur un plan horizontal	[W/m ²]
D _j	Durée du jour	[heure]
D _{a,e}	Diamètre extérieur de l'absorbeur	[m]
D _{a,i}	Diamètre interne de l'absorbeur	[m]

$D_{v,e}$	Diamètre externe pour la vitre	[m]
$D_{v,i}$	Diamètre interne pour la vitre	[m]
F	Distance focale	[m]
EF	Facteur des pertes	[-]
H	Hauteur du soleil	[degré]
h_h	Coefficient d'échange par convection du fluide caloporteur	[W/m ² .K]
h_v	Coefficient d'échange par convection à l'extérieur	[W/m ² .K]
I	Rayonnement direct	[W/m ²]
I_h	Rayonnement direct sur un plan horizontal	[W/m ²]
G	Rayonnement global sur un plan horizontal	[W/m ²]
G_i	Rayonnement global sur un plan incliné	[W/m ²]
W	Ouverture du concentrateur	[m]
R	Rayon de la parabole	[m]
R	Rayon d'ouverture	[m]
ϕ_r	Angle d'ouverture	[degré]
Φ	Angle de parabole	[degré]

k_{air}	Conductivité thermique de l'air	[W/m.K]
$k_{\text{eff,air}}$	Conductivité thermique équivalente de l'air	[W/m.K]
l	Longitude du lieu	[degré]
L	Longueur de l'absorbeur	[m]
Z	Altitude	[m]
$\dot{m}_f$	Débit massique	[kg/s]
$q_{\text{absorbé}}$	Quantité de chaleur absorbée au niveau de l'absorbeur	[W/m]
$q_{\text{entrée}}$	Quantité de chaleur à l'entrée d'un élément de l'absorbeur	[W/m]
$q_{\text{entrée}}$	Quantité de chaleur externe	[W/m]
q_{interne}	Quantité de chaleur interne	[W/m]
q_{sortie}	Quantité de chaleur à la sortie d'un élément de l'absorbeur	[W/m]
q_{utile}	Quantité de chaleur échangée par convection	[W/m]
R_d	Rayonnement direct sur un plan incliné	[W/m ²]
R_b	Facteur d'inclinaison	[-]
P_u	Puissance utile	[W]
p_{ab}	Puissance solaire absorbée par l'absorbeur	[W]
P_p	Puissance correspondant aux pertes thermiques	[W]
p_c	Puissance reçue à l'ouverture de parabole	[W/m ²]
S	Section	[m ²]
t	Temps	[s]
T	Température	[K]
V_{vent}	Vitesse du vent	[m/s]
$T_{\text{moy, annulaire}}$	Température moyenne de la lame d'air dans l'espace annulaire	[K]
TSV	Temps solaire vrai	[heure]

Lettres grecques

ρ_s	Albédo du sol	[-]
ω	Angle horaire	[degré]
θ	Angle incidence	[degré]
i	Angle d'inclinaison	[degré]
ζ	Constante de Stefan-Boltzmann : $\zeta = 5,67 \times 10^{-8}$	[W/m ² .K ⁴]
δ	Déclinaison solaire	[degré]
α	Diffusivité thermique	[m ² /s]
ε	Emissivité	[-]

η	Transmittivité de l'enveloppe du verre	[-]
ΔQ	Energie	[J]
ρ_m	Facteur de réflectance du miroir	[-]
ζ	Fraction d'insolation	[-]
θ	Latitude du lieu	[degré]
ρ	Masse volumique	[kg/m ³]
ν	Viscosité cinématique	[m ² /s]
μ	Viscosité dynamique	[kg/s.m]

Nombres adimensionnels

Nu	Nombre de Nusselt	[-]
Pr	Nombre de Prandtl	[-]
Ra	Nombre de Rayleigh	[-]
Re	Nombre de Reynolds	[-]

Indices

a	Absorbeur
f	Fluide
i	Vitre
amb	
	Ambi
ante air	Air
ciel	Ciel
eff	
	Effectiv
e max	
	Maximu
m. Min	
Minimum. U	
	Utile.
j	Espace
k	Temps

Abréviation

CCP	Concentrateur Cylindro Parabolique
PTR	Parabolic Through Receiver
HR	Réflecteur à Homogénéisation
MCRT	Monte Carlo Ray Tracing
CSP	Concentrating Solar Power Plant
PSA	Plataforma Solar de Almería-Espagne
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
SEGS	Solar Electric Generating System

Introduction générale

INTRODUCTION

Dans le cadre de l'exploitation des énergies renouvelables, l'énergie solaire se présente comme une ressource stratégique, particulièrement en Algérie, où les conditions climatiques sont idéales pour son utilisation. Le pays, avec son ensoleillement abondant, surtout dans les régions sahariennes, dispose d'un potentiel exceptionnel pour le développement des systèmes solaires thermohydraulique. Parmi ces systèmes, les concentrateurs solaires cylindro-paraboliques (CCP) sont l'une des technologies les plus prometteuses. Ils permettent de concentrer le rayonnement solaire sur un récepteur pour produire de la chaleur à haute température, utilisée dans diverses applications industrielles et pour la production d'électricité.

Cependant, pour maximiser l'efficacité de ces concentrateurs solaires, il est essentiel de modéliser et de simuler leur comportement sous des conditions d'ensoleillement variées. La performance de ces systèmes est influencée par plusieurs facteurs : la conception géométrique du concentrateur, le choix du fluide caloporteur, l'efficacité du système de poursuite solaire, et bien sûr, les variations naturelles du rayonnement solaire en fonction du temps et des conditions climatiques locales. Dans ce contexte, la modélisation numérique devient un outil indispensable pour évaluer les performances de ces systèmes avant leur mise en œuvre.

Une partie essentielle de ce travail consiste à générer des flux solaires aléatoires à l'aide du logiciel Matlab. Ce procédé permet de simuler des conditions d'ensoleillement variables et de comparer les performances du système sous des flux réels avec celles obtenues dans des conditions idéales, comme un ciel clair. Cette analyse permet ainsi de mieux comprendre l'impact des variations du rayonnement solaire sur l'efficacité du concentrateur et d'optimiser son design pour des conditions réelles.

Le mémoire se divise en quatre chapitres : le premier chapitre présente les énergies renouvelables, avec un focus particulier sur l'énergie solaire et son contexte en Algérie. Le deuxième chapitre explore en détail la technologie du concentrateur solaire cylindro-parabolique, sa géométrie et son fonctionnement. Le troisième chapitre s'intéresse à la modélisation numérique du système, en utilisant des outils tels que SolTrace et ANSYS Fluent pour analyser ses performances optiques et thermiques. Enfin, le quatrième chapitre expose les résultats des simulations réalisées, les interprète et discute des perspectives d'amélioration et d'optimisation du système en fonction des résultats obtenus.

Ce mémoire permet ainsi d'approfondir la compréhension des concentrateurs cylindro-paraboliques, en intégrant à la fois une analyse théorique, des simulations numériques et une étude pratique basée sur des données de flux solaires aléatoires, pour une meilleure évaluation de leur efficacité dans un contexte réel.

Chapitre 1

Energie Renouvelable

Introduction:

Les énérgies renouvelables, également appelées énérgies vertes, sont issues de phénomènes naturels continuellement disponibles et capables de se régénérer à travers des processus autonomes, indépendamment de l'intervention humaine. Parmi les principales sources figurent le rayonnement solaire et la chaleur interne de la Terre.

La notion de "renouvelable" ne dépend pas uniquement de l'origine naturelle d'une ressource, mais également de la vitesse à laquelle elle est exploitée par rapport à sa capacité de régénération. Par exemple, le bois peut être considéré comme renouvelable tant que le nombre d'arbres replantés compense le nombre d'arbres abattus. Il ne suffit donc pas de recourir à des énérgies vertes, il faut également maîtriser leur consommation pour garantir leur durabilité. [1]

I-1-1 Types des énérgies renouvelables:***I-1-1-1- Énérgie hydraulique :***

Depuis l'Antiquité, l'eau constitue une source d'énergie exploitée par l'homme. Aujourd'hui encore, environ 23 % de la production mondiale d'énergie renouvelable provient de l'hydroélectricité. Cette énergie est produite par la force des rivières, marées et courants marins, dont la densité énergétique permet une conversion rentable en électricité.

Cependant, les installations hydroélectriques nécessitent des investissements considérables et peuvent avoir un impact significatif sur les écosystèmes locaux, notamment lorsqu'elles impliquent la construction de barrages ou de digues.

Malgré ces limites, l'énergie hydraulique demeure une solution propre, sans émissions de gaz à effet de serre ni production de déchets toxiques. Toutefois, son taux de croissance est resté relativement stable ces dernières années, contrairement aux énérgies solaire et éolienne qui connaissent un développement accéléré.

[9]



Figure I-1: Exemple sur l'énergie hydraulique [4]

I-1-1-2- L'éolienne :

L'énergie éolienne repose sur l'exploitation du vent, une ressource naturelle intermittente car la vitesse du vent varie constamment et n'est pas toujours suffisante pour produire de l'électricité de manière optimale. En moyenne, les éoliennes captent entre 15 % et 40 % de leur puissance nominale, en fonction des conditions météorologiques locales.

La production d'électricité via les éoliennes, en particulier les installations connectées au réseau électrique, constitue une composante essentielle du mix énergétique renouvelable. À l'instar de l'énergie hydraulique ou marémotrice, l'éolien ne génère ni pollution atmosphérique ni émissions notables de gaz à effet de serre, ce qui en fait une solution respectueuse de l'environnement.

Cependant, un inconvénient souvent évoqué est le bruit généré par la rotation des pales. Grâce aux avancées technologiques récentes, notamment l'utilisation de matériaux composites légers et la réduction des vitesses de rotation (généralement entre 15 et 25 tr/min), le niveau sonore a fortement diminué. Aujourd'hui, à une distance de 250 mètres, le bruit produit par une éolienne peut être aussi bas que 42 à 43 décibels, soit un niveau inférieur à celui du bruit ambiant moyen dans les zones résidentielles urbaines.

L'énergie éolienne, bien qu'intermittente, complète efficacement d'autres sources renouvelables comme l'énergie solaire, et son intégration intelligente dans les systèmes hybrides permet d'en améliorer la stabilité de production, surtout dans un contexte de variabilité climatique. [9]



Figure I-2: Exemple sur l'énergie éolienne [4]

I-1-1-3- La biomasse :

Le terme « biomasse » désigne l'ensemble des matières organiques d'origine végétale ou animale pouvant être utilisées à des fins énergétiques. Cela inclut notamment les plantes, les arbres, les résidus agricoles (comme les tiges de maïs, la paille de blé), les déchets organiques municipaux, ainsi que les résidus forestiers tels que la sciure de bois et les restes d'exploitation forestière.

Il existe plusieurs technologies de conversion de la biomasse en énergie thermique ou électrique, parmi lesquelles :

- La combustion directe,
- La digestion anaérobie,
- La co-combustion,
- La pyrolyse,
- Et la gazéification.

L'un des atouts majeurs de la biomasse réside dans son bilan carbone neutre. En effet, la quantité de CO₂ émise lors de sa combustion est équivalente à celle absorbée durant sa phase de croissance, ce qui en fait une énergie respectueuse du climat, dans la mesure où son exploitation reste durable.

Parmi les méthodes avancées, la gazéification (forme évoluée de la pyrolyse) consiste à chauffer la biomasse en présence d'une quantité limitée d'air. Elle produit un gaz de synthèse ou gaz de gazogène, composé principalement de monoxyde de carbone, d'hydrogène, de méthane, avec des traces de CO₂ et d'azote. Ce gaz peut ensuite être brûlé pour générer de la vapeur ou alimenter des turbines à gaz pour produire de l'électricité. [11]

I-1-1-4- Géothermie :

L'énergie géothermique est une forme d'énergie renouvelable qui exploite la chaleur naturellement présente dans les couches profondes ou peu profondes de la croûte terrestre. Les systèmes géothermiques captent cette chaleur pour chauffer l'air ou l'eau, généralement à travers des échangeurs thermiques enterrés ou à partir de sources hydrothermales profondes.

L'un des avantages majeurs de cette technologie est qu'elle ne génère aucune émission nocive directe et qu'elle offre un fonctionnement stable et continu, contrairement aux sources intermittentes comme le vent ou le rayonnement solaire. De plus, les coûts d'exploitation sont relativement faibles, bien qu'ils dépendent de la source d'électricité utilisée pour alimenter les pompes et les compresseurs.

Cependant, les coûts d'installation initiaux restent encore élevés par rapport aux systèmes classiques de chauffage ou de climatisation. Par ailleurs, certaines pratiques, comme le non-retour de l'eau extraite vers les aquifères ou le rejet direct dans les égouts, ont dans certaines régions causé une baisse du niveau des nappes phréatiques.

En ce qui concerne la géothermie profonde, où l'eau est extraite à haute température à partir de fissures rocheuses profondes pour produire de l'électricité, des risques environnementaux peuvent survenir. L'eau géothermale peut contenir des substances chimiques naturelles comme la silice, les sulfates, les carbonates et les halogénures, susceptibles de corroder les équipements et de nuire aux écosystèmes en cas de rejet non contrôlé. Ainsi, les exploitants modernes s'orientent de plus en plus vers des systèmes fermés, qui permettent de réinjecter l'eau dans les réservoirs souterrains et de limiter l'impact environnemental. [9]

I-1-1-5- L'énergie solaire :

Le soleil constitue l'une des sources d'énergie renouvelables les plus abondantes, fiables et écologiques. Grâce aux progrès technologiques, l'énergie solaire est aujourd'hui exploitée pour chauffer les bâtiments, produire de l'eau chaude sanitaire et générer de l'électricité, à travers trois approches principales :

L'énergie solaire passive,

L'énergie solaire active,

Et l'énergie photovoltaïque.

a) Énergie solaire passive

L'énergie solaire passive repose sur l'optimisation architecturale des bâtiments pour capter et stocker la chaleur solaire sans recours à des équipements mécaniques. Elle fait appel à :

l'orientation du bâtiment par rapport au soleil,

l'utilisation stratégique de vitrages, et des matériaux à forte inertie thermique.

Cette technique permet de réduire la consommation énergétique des bâtiments tout en améliorant le confort thermique intérieur.

b) Énérgie solaire active

Contrairement au système passif, l'énergie solaire active utilise des capteurs thermiques (souvent appelés collecteurs solaires) pour capter le rayonnement solaire. L'énergie collectée sert ensuite à :

Chauffer un fluide (eau ou air),

Alimenter des pompes ou ventilateurs,

Ou produire de l'électricité via un circuit thermique.

Ce système est couramment utilisé pour le chauffage résidentiel et industriel, ainsi que pour des applications de plus grande échelle.

c) Énérgie photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques transforment directement le rayonnement solaire en électricité par effet photoélectrique. Bien que cette technologie n'émette aucun gaz à effet de serre pendant le fonctionnement, il est important de noter que des émissions indirectes peuvent être générées lors de la fabrication, du transport et du recyclage des panneaux.

Avantages et limites

Malgré le coût initial élevé de certaines installations solaires (surtout pour les systèmes à concentration ou hybrides), ces investissements sont généralement amortis sur le long terme, grâce à la réduction des factures énergétiques et aux incitations gouvernementales. [5]



Figure I-3: Exemple d'énergie solaire photovoltaïque [4]

Le procédé photovoltaïque permet de convertir directement l'énergie du rayonnement solaire en courant électrique continu à l'aide de panneaux solaires constitués de cellules photovoltaïques. Ce phénomène physique, appelé effet photovoltaïque, a été découvert en 1839 par le physicien français Edmond Becquerel. Toutefois, ce n'est qu'à partir du milieu du XX^e siècle, notamment dans les années 1950, que les premières cellules photovoltaïques exploitables ont été développées et commercialisées. [4]

Bien que cette source d'énergie ne représente encore qu'environ 0,8 % de la production mondiale des énergies renouvelables, elle connaît depuis quelques années une croissance exponentielle. En effet, le taux d'augmentation annuel dépasse aujourd'hui les 40 %, traduisant une dynamique forte portée par :

- La réduction progressive des coûts de fabrication,
- Les innovations technologiques dans les matériaux et procédés,
- Et les politiques de transition énergétique adoptées à l'échelle mondiale.

Ainsi, la production mondiale de cellules photovoltaïques est passée de 125,8 MWc en 1997 à plusieurs gigawatts une décennie plus tard, marquant l'entrée de cette technologie dans une phase de développement massif et durable.

I-1-1-6- Le rayonnement solaire :

Les réactions thermonucléaires produites au cœur du soleil génèrent des rayonnements corpusculaires et électromagnétiques se propageant dans toutes les directions du vide intersidéral avec une vitesse de $3 \cdot 10^8$ m/s et couvrant toutes les longueurs d'ondes depuis

les rayons X et gamma jusqu'à l'I.R lointain. Cependant 99.9% de l'énergie se situe entre 0.2 et 8 μ m [5].

On pourra supposer avec une approximation acceptable que le soleil rayonne comme

un corps noir porté à une température de 5762 K dite température du soleil ne correspondant pas à la réalité physique [6].

La répartition de l'énergie solaire dans les bandes du spectre du rayonnement

thermique est donnée dans le tableau I.1

Longueur d'onde (μ m)	0-0.38	0.38-0.78	0.78
Pourcentage (%)	6.4	48	45.6
Energie (W/m	87	656	623

Tableau I.1. Répartition spectrale du rayonnement thermique [7]

* La constante solaire C^*

C'est la quantité d'énergie totale envoyée par le soleil à la limite de l'atmosphère terrestre sur une surface unité perpendiculaire au rayonnement solaire [8]. La variation de la constante solaire suit la relation suivante [7]:

$$C^* = C^*_0 + 0.033 \times \cos(0.948 \times n) \quad (\text{I-1})$$

C^* : la constante solaire

$C^*_0 = 1353 \text{ W/m}^2$ est la valeur moyenne de la constante solaire actuellement retenue [7]. n: le numéro du jour de l'année.

a) Le rayonnement solaire direct

Le rayonnement direct est le rayonnement incident sur un plan donné en provenance d'un petit angle solide centré sur le disque solaire, il parvient en ligne droite et par temps clair [9].

L'état du ciel est défini par deux coefficients, a et b qui symbolisent le trouble atmosphérique du lieu où se trouve le capteur solaire (tableau I.2). La transmissivité totale de l'atmosphère pour le flux solaire incident direct est donnée par [10].

$$1000 \times \sin h \quad \tau_{\text{dir}} = a \times \exp \frac{-p \times b}{1000} \quad (\text{I-2})$$

Où:

a, b : coefficients traduisant les troubles atmosphériques.

h: hauteur du soleil.

P : pression atmosphérique du lieu.

	Ciel pur	Conditions normales	Zones industrielles
a	0.87	0.88	0.91
b	0.17	0.26	0.43

Tableau I.2. Valeurs des coefficients du trouble atmosphérique [8]

Le tableau I.3 donne la variation de la pression atmosphérique avec l'altitude :

Altitude (m)	0	500	1000	1500	2000	5000
P (mbar)	1000	950	900	850	800	500

Tableau I.3. Variation de la pression atmosphérique avec l'altitude [8]

Le rayonnement direct reçu sur un plan horizontal est donné par [6] :

$$G_{\text{dirh}} = C^* \times \tau_{\text{dir}} \quad (\text{I-3})$$

Gdirh : éclaírement énérgétique dírect reçu sur un plan horizontal.

L'éclaírement énérgétique Gdir reçu sur un plan incliné est donné par [10]:

$$G_{dir} = G_{dirh} \times \cos \theta \quad (I-4)$$

θ : angle d'íncidence des rayons solaires.

b) *Le rayonnement solaire díffus*

Le rayonnement díffus résulte de la díffraction de la lumière par les molécules atmosphériques, et de sa réfraction par le sol, il parvient de toute la voute céleste [9].

La relation entre le coefficient de transmission du flux dírect et díffus est [10]:

$$\tau_{dif} = 0.271 - 0.2939 \times \tau_{dir} \quad (I-5)$$

Le flux díffus reçu sur un plan horizontal est dífini par [10]:

$$G_{difh} = C^* \times \sin(h) \times \tau_{dif} \quad (I-6)$$

Le flux díffus reçu sur un plan incliné est dífini par [10]:

$$G_{dif} = G_{dif1} + G_{dif2} \quad (I-7)$$

$$G_{dif1} = G_{difh} \times \frac{1 + \cos(i)}{2} \quad (I-8)$$

$$G_{dif2} = alb \times \frac{1 + \cos(i)}{2} \times (G_{difh} \times \sin(h) + G_{difh}) \quad (I-9)$$

Gdif1, Gdif2: rayonnements díffusés par le ciel et par le sol respectivement.

Alb : albédo du sol.

i: angle d'íncílnaison du plan du capteur par rapport à l'horizontale.

c) *Le rayonnement global*

Le rayonnement global (G) est la somme des rayonnements díffus et dírect [9]:

$$G = G_{dir} + G_{dif} \quad (I-10)$$

d) *Calcul de la position du soleil*

d.1. Les paramètres de position

d.1. a. Les coordonnées géographiques

Tout point de la surface de la terre est repéré par ses coordonnées géographiques [6], [11], [12]:

- La longitude (λ) est l'angle entre le plan méridien passant par ce lieu avec le méridien origine de Greenwich, elle varie de -180° à $+180^\circ$ de l'ouest à l'est.
- La latitude (L) est l'angle avec le plan équatorial que fait le rayon joignant le centre de la terre à ce lieu, elle varie entre $+90^\circ$ au pôle Nord et -90° au pôle Sud.
- L'altitude (Z) correspond à la distance verticale entre ce point et une surface de référence, le géoïde, figurant le niveau moyen de la mer. La détermination de la direction du soleil sur la sphère céleste se fait par des coordonnées célestes du soleil qui sont :

d.1. b Les coordonnées célestes horizontales

Le repérage du soleil se fait par l'intermédiaire de deux angles qui sont [6], [12]:

- L'azimut (a) est l'angle compris entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil (figure I.4). Il est donné par la relation suivante :

$$\sin(h) = \cos(d) \times \frac{\sin(\omega)}{\sin(a)} \quad (\text{I-11})$$

- La hauteur du soleil (h) est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur un plan horizontal (figure I.4), elle est donnée par la formule [6], [12]:

$$\sin(h) = \sin(L) \times \sin(d) + \cos(L) \times \cos(d) \times \cos(\omega) \quad (\text{I-12})$$

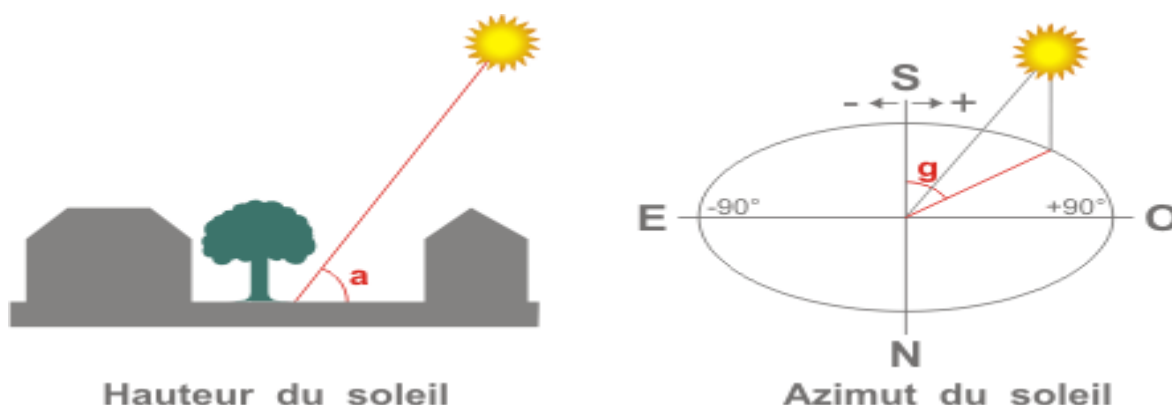


Figure I.4. Les coordonnées célestes horizontales

d.1. c) Les coordonnées célestes horaires

- L'angle horaire (ω) est l'arc de la trajectoire solaire compris entre le soleil et le plan méridien du lieu, il augmente de 15° par heure [13], [6], [9].
- La déclinaison (d) est l'angle entre le plan de l'équateur terrestre avec la direction terre-soleil. elle varie suivant l'équation de Cooper (figure I.5) [7] :

$$d = 23.45 \times \sin\left(\frac{360}{\text{___}} \times (n - 81)\right) \quad (\text{I-13})$$

365

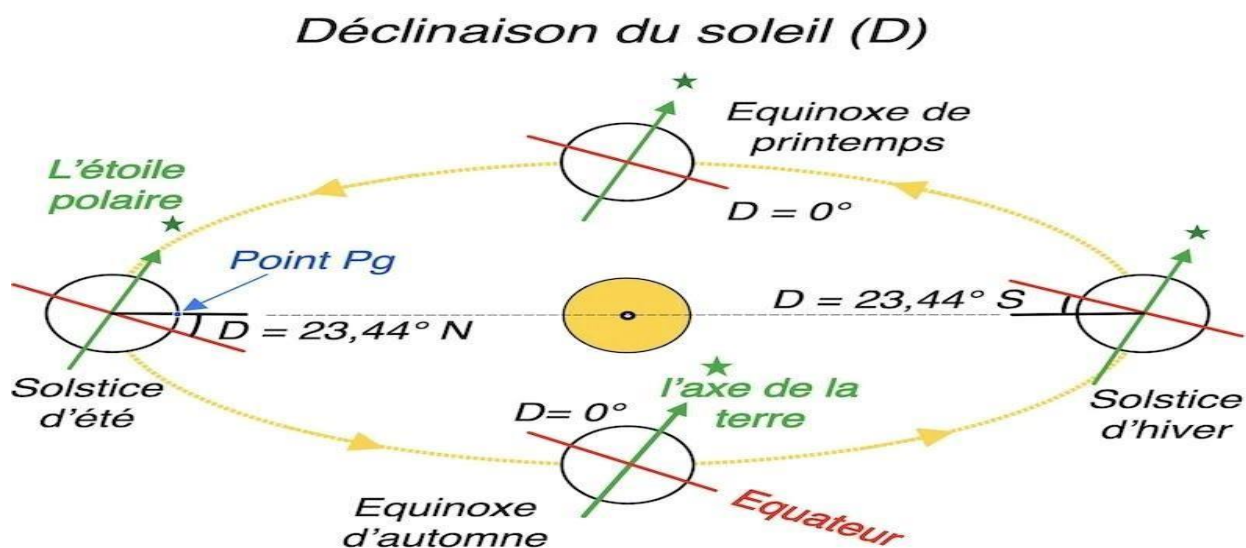


Figure I.5. Variation annuelle de la déclinaison solaire

d.2. Les paramètres de temps

On distingue :

- Le temps solaire vrai (TSV) est l'angle horaire entre le plan méridien passant par le centre du soleil et le méridien du lieu considéré, il est donné par l'expression:

$$\omega \quad \text{TSV} = 12 + \text{___} \quad (\text{I-14})$$

12

- Le temps solaire moyen (TSM) est donné par [13]:

$$TSV - TSM = ET \quad (\text{I-15})$$

ET est l'équation du temps qui corrige le TSV par rapport au TSM [13]:

$$ET = 9.87 \times \sin(2 \times N') - 7.53 \times \cos(N') - 1.5 \times \sin(N') \quad (\text{I-16})$$

Ou:

$$N' = (n - 81) \times \frac{360}{365} \quad (\text{I-17})$$

- Le temps universel (TU) est le temps moyen de Greenwich [13]:

$$TU = TSM - \frac{\lambda}{15} \quad (\text{I-18})$$

- Le temps légal (TL) est le temps officiel d'un état, il est donné par :

$$TL = TU + \Delta H \quad (\text{I-19})$$

ΔH : le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré.

Chapitre II
Etude descriptive
du Concentrateur
Solaire Thermique

II.1. Introduction

La parabole apparaît dans de nombreuses configurations du monde physique. En trois dimensions, une parabole génère une forme appelée parabolôïde lorsqu'elle est étendue le long d'un axe perpendiculaire à son plan. Les dispositifs solaires utilisant des surfaces réfléchissantes basées sur ces géométries sont désignés sous les noms de concentrateurs paraboliques et cylindro-paraboliques, respectivement. Lorsqu'un récepteur est placé au foyer d'un réflecteur parabolique, la lumière réfléchiée est captée et transformée en une forme d'énergie exploitable. Le regroupement des rayons en un point focal ou leur absorption par un récepteur représente le principe fondamental d'un collecteur à concentration parabolique. [14, 2,3].

Le CSP est généralement doté d'une poursuite solaire pour adapter l'inclinaison du concentrateur de manière à ce que la radiation solaire incidente soit toujours perpendiculaire au plan d'ouverture du concentrateur [15].

II.2. Description de la concentration :

II.2.1 Concentrateur solaire :

On détermine les différentes dimensions géométriques présentes dans la représentation des capteurs à concentration.

II.2.1 . [5]

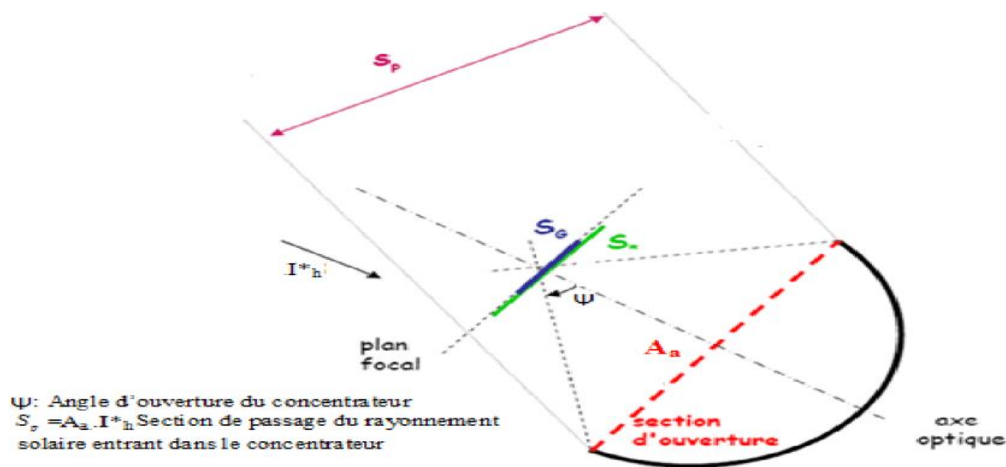


Figure . II.1 : Schéma d'un concentrateur solaire

- θ angle d'ouverture du concentrateur . I^* éclairement solaire

- S^* : éclairement direct dans la section d'ouverture du concentrateur,
- S_0 : section d'ouverture du concentrateur caractérisée par l'angle θ ,
- S_p : section de passage du rayonnement solaire entrant dans le concentrateur. S_p se confond avec S_0 quand l'axe optique du concentrateur est dirigé vers le soleil,
- SG : surface de l'image de Gauss du soleil; c'est l'image nette du soleil dans le plan focal donnée par des rayons paraxiaux, c'est-à-dire des rayons proches de l'axe optique.
- S^* : surface de l'image réelle du soleil dans le plan focal.

II.2.2. le plan focal : On détermine un réflecteur à 2 dimensions c'est un cylindre, de longueur

infinie.

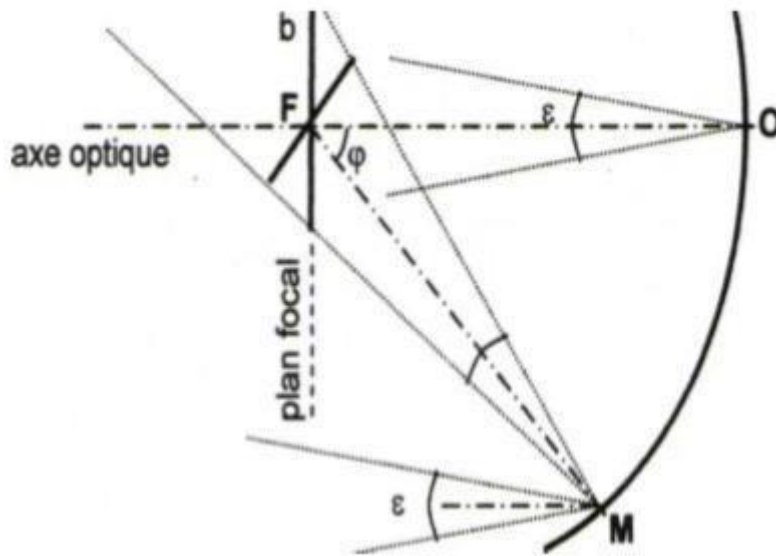


Figure. II .2 : schéma d'un plan focal dans un concentrateur cylindrique.

II.3 Les Caractéristiques d'un concentrateur cylindro-parabolique (CCP)

Le concentrateur à géométrie cylindre-parabolique (CCP) se caractérise par sa conception simple et par un coût d'investissement relativement modeste. Il se distingue également par son efficacité dans la génération de températures élevées, notamment dans les applications telles que la production de vapeur et d'eau chaude. Ce type de collecteur est parmi les plus utilisés pour la production de vapeur à haute température, sans compromettre le rendement énergétique.

Le système se présente sous forme d'un module équipé d'un réflecteur (miroir ou matériau réfléchissant) de forme cylindro-parabolique. Cette configuration permet de concentrer le rayonnement solaire incident le long d'une ligne focale, où est positionné un tube absorbeur traversé par un fluide caloporteur.

Pour améliorer l'absorption de l'énergie solaire ainsi que le transfert thermique, des revêtements sélectifs sont souvent appliqués sur la surface du tube. Celui-ci est généralement enveloppé dans un cylindre en verre transparent, servant à limiter les pertes thermiques dues à la conduction, la convection et le rayonnement vers l'extérieur.

Le concentrateur CCP est généralement équipé d'un mécanisme de suivi solaire à un seul axe, orientable selon un axe Est-Ouest ou plein Sud en fonction de la latitude du site. La (Figure II.3) illustre le principe de captation d'un tel concentrateur. [22]

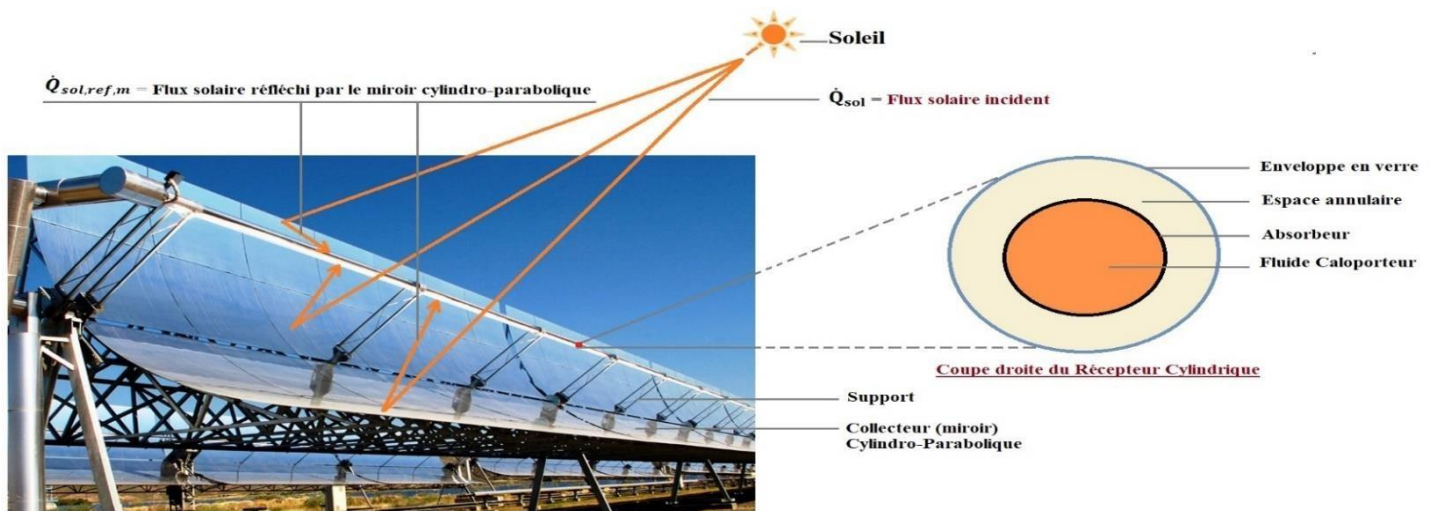


Figure . II .3: Principe de captation du rayonnement du cylindre-parabolique

II.4. Description et principe de fonctionnement du concentrateur

Le concentrateur décrit (Figure II.4) se compose d'un miroir en aluminium incurvé de grande longueur, destiné à focaliser le rayonnement solaire sur un absorbeur en cuivre situé le long de la ligne focale. Une enveloppe transparente est positionnée au-dessus de cet absorbeur.

Les rayons solaires, après avoir été réfléchis par la surface miroir, traversent cette enveloppe transparente pour se concentrer sur le tube absorbeur. Toutefois, l'énergie captée n'est pas entièrement transmise au fluide caloporteur : une partie de cette énergie est dissipée. En effet, l'absorbeur cède une fraction de la chaleur par rayonnement et convection à l'enveloppe en verre. Celle-ci, à son tour, transfère cette chaleur à l'environnement ambiant par convection et émet également un rayonnement vers le ciel. [23]

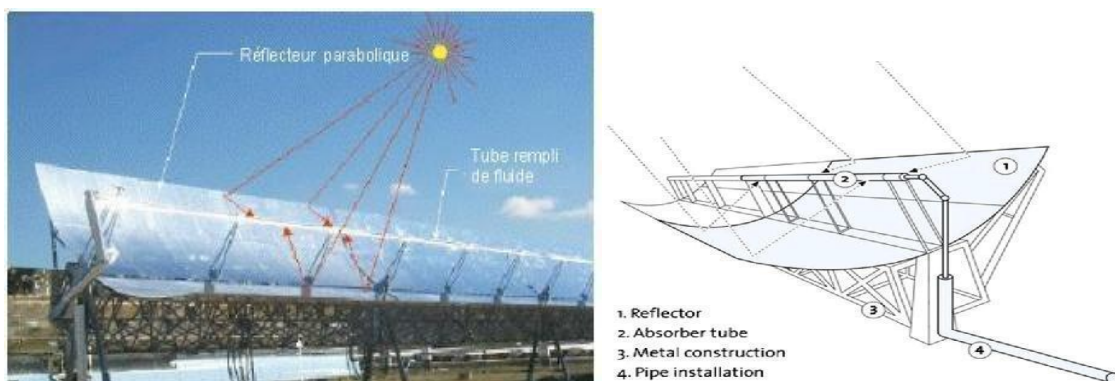


Figure. II .4: Composants d'un concentrateur cylindro-parabolique

II.4.1. Le collecteur :

Le collecteur constitue l'élément fondamental du champ solaire. Il se compose principalement d'un réflecteur cylindro-parabolique (souvent un miroir), d'une structure métallique en acier, d'un tube récepteur ainsi que d'un mécanisme de suivi solaire. La structure métallique doit présenter une robustesse suffisante pour supporter les fortes sollicitations mécaniques, notamment celles induites par la force du vent.

II.4.2. La couverture transparente (le verre) :

Une couverture transparente est utilisée dans ce type de collecteurs solaires, en raison de sa transparence au rayonnement solaire visible et pour permettre la réalisation de l'effet de serre.

Le type de verre utilisé est à faible teneur en oxyde de fer.

II.4.3. Le fluide caloporteur :

Un fluide caloporteur est chargé de transporter la chaleur entre deux ou plusieurs sources de température. Il accumule l'énergie captée au niveau du tube.

Une variété d'huiles est généralement utilisée, permettant d'atteindre des températures de l'ordre de 400 °C.

II.4.4. Le réflecteur :

Les réflecteurs d'un CSP sont généralement constitués de miroirs ou d'autres métaux réfléchissants. Les miroirs sont faits de verre à faible teneur en fer, recouvert sur leur face inférieure d'une pellicule d'argent, protégée par un enduit spécial.

Le matériau le plus approprié pour la réflexion est l'aluminium pur. L'acier inoxydable a été testé, mais il n'est pas recommandé en raison de son pouvoir de réflexion insuffisant.

Pour choisir un réflecteur cylindro-parabolique, il est toujours préférable d'adopter une géométrie idéale afin d'obtenir une bonne concentration géométrique (voir Figure II.5). Un réflecteur de bonne qualité peut réfléchir jusqu'à 97 % du rayonnement incident. [23]

L'équation générale du réflecteur, en coordonnées cartésiennes et polaires respectivement [17], s'écrit :

$$(II.1) \quad Y = \frac{x^2}{4F}$$

$$r = \frac{F}{\cos^2 \phi} \quad (II.2)$$

avec

$$\phi_r = \tan^{-1} \left[\frac{8F}{W} \right] \quad (II.3)$$

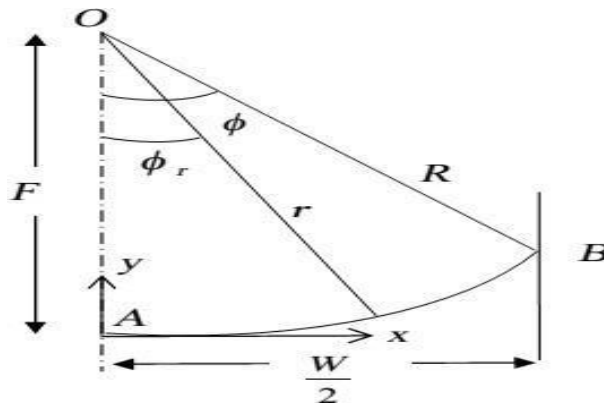


Figure. II.5: Dimensions du réflecteur

r : Rayon de la parabole

F : Distance focale

R : Rayon d'ouverture

W :Ouverture du concentrateur

ϕ_r : Angle d'ouverture

ϕ : Angle de parabole

La structure métallique du réflecteur doit être suffisamment robuste pour résister aux fortes contraintes mécaniques engendrées par le vent. Elle doit également être dotée d'extrémités permettant de compenser les dilatations thermiques inégales de l'acier.

II.5 Le récepteur (absorbeur) :

Le récepteur a pour rôle d'absorber le maximum de flux solaire concentré et de le convertir en énergie thermique, qui sera ensuite transférée à un fluide caloporteur (le plus souvent de l'huile).

Il est essentiel que le récepteur soit métallique, car seuls les métaux présentent de bons coefficients de conduction thermique : cuivre ($389 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), aluminium ($200 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), acier ($60 \text{ W/m}\cdot\text{K}$).

II.5.1 Les caractéristiques requises de la surface du récepteur :

- Une excellente conductivité et diffusion thermique.
- Un facteur d'absorption aussi proche que possible de l'unité.
- Une bonne résistance chimique face au fluide utilisé.

À noter que plus le coefficient de conduction thermique est faible, plus l'absorbeur doit être épais. Cela entraîne une augmentation de son inertie thermique ainsi que de son coût. [24]

Plus le coefficient de conduction est faible et plus l'absorbeur doit être épais, ce qui augmente l'inertie de l'absorbeur et le prix.

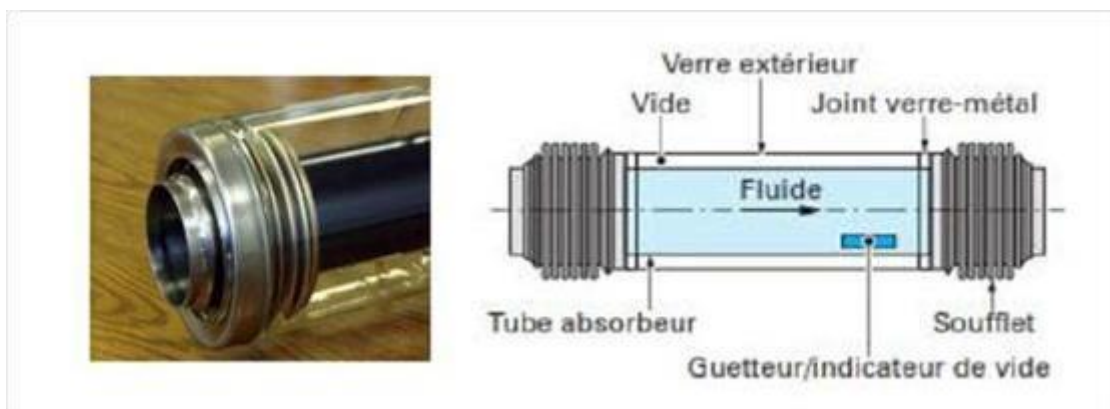


Figure. II.6: Dimensions du réflecteur Structure de l'absorbeur

II.6 Le système de poursuite :

L'installation de ces concentrateurs ne se fait pas de manière aléatoire.

Pour optimiser la captation du rayonnement solaire, il est essentiel de bien choisir l'orientation et l'inclinaison du système, ainsi que de l'équiper d'un mécanisme de suivi solaire.

II.6.1 Mécanisme de poursuite :

La poursuite solaire est indispensable, car peu de collecteurs conservent leur surface orientée vers le soleil tout au long de la journée.

L'objectif du système de poursuite est de maintenir l'ouverture du collecteur alignée dans la direction optimale, afin de minimiser l'angle d'incidence du rayonnement solaire.

Un mécanisme de suivi doit être fiable, capable de suivre le soleil avec un certain degré de précision, et rendre le collecteur à sa position initiale en fin de journée ou pendant la nuit.

Divers mécanismes de poursuite, allant des plus complexes aux plus simples, ont été proposés. Ils se répartissent en deux grandes catégories : mécaniques et électriques/électroniques [17].

Les systèmes électriques/électroniques offrent généralement une meilleure précision et une fiabilité accrue. On peut les subdiviser en deux types :

- Des mécanismes motorisés à contrôle électronique, utilisant des capteurs capables de détecter l'intensité du rayonnement solaire.
- Des mécanismes équipés de moteurs pilotés par ordinateur, avec un système d'asservissement basé sur des capteurs mesurant le flux solaire reçu par le récepteur.

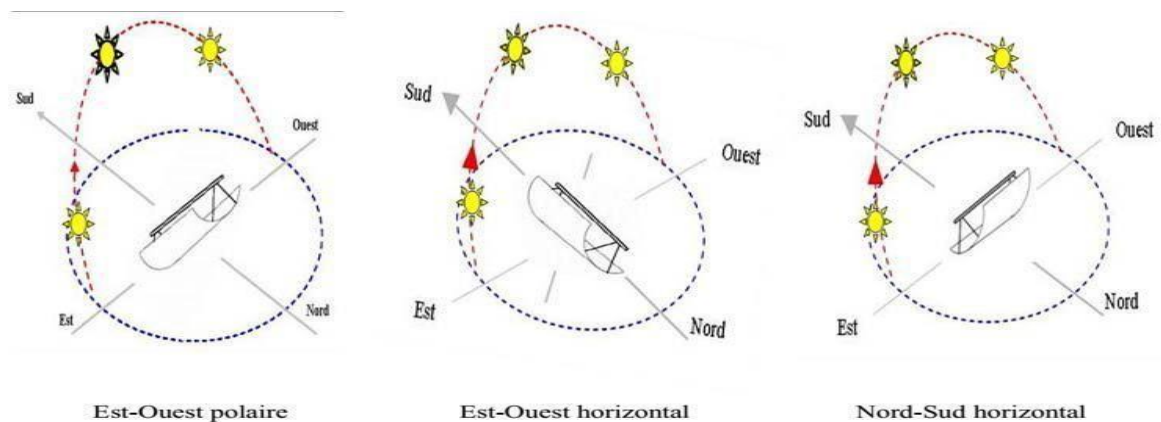


Figure. II.7: Les modes de poursuite solaire d'un CCP

Pour un (CCP) l'équation générale, en coordonnées cartésiennes, s'écrit :

$$X^2 = 4 \cdot F \cdot \tan(\varnothing) \quad (\text{II.4})$$

Voir la (figure III.5) est donnée par l'équation :

$$w = 2r \cdot \sin(\varnothing) = 4 \cdot \tan(\varnothing) \quad (\text{II.5})$$

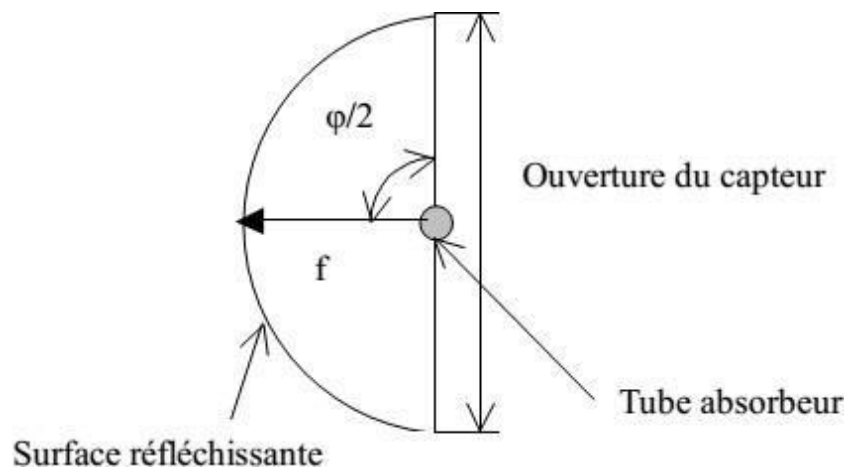


Figure. II.8: Dimensions relatives à un concentrateur cylindre-parabolique

II.6.1.1 Choix de l'orientation :

Le champ nord-sud collecte beaucoup plus d'énergie en été qu'en hiver, à l'opposé de l'orientation est-ouest qui collecte plus d'énergie en hiver que le nord-sud et moins en été

L'orientation nord-sud horizontale collecte, légèrement plus d'énergie que l'orientation est-ouest horizontale. Aussi le choix de l'orientation dépendra de l'application et des besoins selon la période [17].

II.6.1.2 Effet de l'inclinaison d'une surface sur l'énergie incidente :

Selon la méthode de calcul de Liu [26], on remarque que l'énergie incidente est favorable pour tous les mois de l'année lorsque l'inclinaison égale la latitude du lieu, [18], mais son exploitation sera meilleure avec un système de poursuite solaire.

Chapitre III: Modélisation et Résolution Numérique

II.1. Introduction :

Les concentrateurs cylindro-paraboliques (CCP) constituent l'une des technologies les plus utilisées dans le domaine des centrales solaires thermodynamiques, en raison de leur capacité à concentrer efficacement le rayonnement solaire sur un tube récepteur linéaire. Le miroir a une forme cylindrique avec une section transversale parabolique, ce qui permet une focalisation unidirectionnelle de la lumière incidente.

Dans ce travail, nous nous intéressons à l'étude **optique et thermique** d'un CCP soumis à des **conditions d'ensoleillement aléatoires**, telles que l'on peut les rencontrer dans un environnement réel. Le fluide caloporteur (eau ou huile thermique) circulant à l'intérieur du tube récepteur peut atteindre des températures allant jusqu'à **450 °C**, selon l'intensité du flux solaire reçu.

Ce chapitre est consacré à l'analyse des **caractéristiques géométriques**, des **propriétés de réflexion** du miroir, ainsi qu'à la **modélisation mathématique du tube absorbeur** positionné sur la ligne focale. Une **simulation optique** est ensuite réalisée à l'aide du logiciel **SolTrace**, permettant de visualiser la **distribution spatiotemporelle du flux solaire** sur le récepteur, tenant compte de la variabilité de l'irradiation au cours du temps.

Cette approche est essentielle pour quantifier précisément les **pertes optiques**, évaluer les performances du collecteur dans des **conditions dynamiques**, et alimenter ensuite une **analyse CFD** thermique transitoire dans ANSYS Fluent

II.2. Rayonnement solaire en Algérie :

L'Algérie est un pays situé au nord de l'Afrique, bordant la mer Méditerranée, avec une superficie totale de 2 381 741 kilomètres carrés. Classée comme le dixième plus grand pays au monde, elle est également la plus vaste nation d'Afrique et de la région méditerranéenne.

Géographiquement, l'Algérie est limitée au nord-est par la Tunisie, à l'est par la Libye, à l'ouest par le Maroc, au sud-ouest par le Sahara occidental, la Mauritanie et le Mali, au sud-est par le Niger, et au nord par la mer Méditerranée, comme illustré dans la figure (III.1).

Le territoire algérien se divise en trois grandes zones topographiques qui s'étendent principalement d'est en ouest. La première est le Tell, correspondant à la zone côtière méditerranéenne. La deuxième région, les Hauts Plateaux, s'étend plus à l'intérieur des terres et présente un relief relativement uniforme. Enfin, la troisième et plus vaste région est le Sahara, couvrant près de 80 % de la superficie nationale. Voir figure (III.1). [25]



Figure III.1: Carte de l'Algérie.

L'Algérie bénéficie d'un important potentiel solaire, en raison notamment de son climat favorable. La puissance solaire maximale atteinte en tout point du pays est d'environ 1 kW/m^2 . L'énergie solaire maximale quotidienne moyenne, durant un ciel clair au mois de juillet, dépasse 6 kW/m^2 , tandis que l'énergie solaire maximale annuelle en Algérie est d'environ 2500 kW/m^2 .

L'ensoleillement annuel reçu dans les différentes régions climatiques du pays est présenté dans le tableau (II.1), selon les données du Ministère de l'Énergie et des Mines. [26]

Régions	Littorale	Hauts plateaux	Sahara
Surface %	4	10	86
Ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energ, Moyenne reçue ($\text{KWh/m}^2/\text{an}$)	1700	1900	1900

Tableau III.1: L'ensoleillement reçu annuellement en Algérie. [27]

II.2.1. Rayonnement solaire:

II.2.1.1. Logiciel PVsyst :

PVsyst a été choisi comme logiciel de simulation en raison de sa puissance et de sa fiabilité pour l'étude, le dimensionnement et l'analyse des systèmes photovoltaïques. Il intègre des bases de données météorologiques ainsi que des catalogues de composants photovoltaïques provenant de plusieurs fabricants. Pour cette étude, la version 6.77 a été utilisée.

La figure (III.2) illustre les différentes étapes du traitement des données météorologiques et de la simulation réalisées avec PVsyst. [28]

Figure III 2.: Etapes du fichier de données météorologiques dans PVsyst.

La situation géographique est indiquée dans le tableau (III.2). Ces coordonnées ont été utilisées pour toutes les données météorologiques ainsi que pour les données spécifiques au site tout au long de l'étude.

Tableau III.2 : Situation géographique de Laghouat (ALGERIE)

Ville	Latitude	Longitude	Altitude
Laghouat	33°46	2° 56	750m

II.2.1.2. Données météorologiques :

Les valeurs de densité de flux solaire pour la **journée du 21 juin 2024** à différentes saisons sont répertoriées dans le tableau (III.3).

Tableau III.3: Données météo horaires des valeurs de densité de flux solaire pour une journée 21 juin 2024

Temps (h)	Flux
5h.00	0
6h.00	24
7h.00	225
8h.00	441
9h.00	642
10h.00	812
11h.00	940
12h.00	1018
13h.00	1038
14h.00	1001
15h.00	909
16h.00	768
17h.00	587
18h.00	381
19h.00	164
20h.00	0

II.3. Géométrie du collecteur :

II.3.1. La surface du miroir et la surface d'ouverture :

Pour un DNI (rayonnement normal direct) et une position solaire données, la surface d'ouverture du miroir est calculée comme le produit de la largeur de l'ouverture α et de l la longueur du collecteur (voir Figure III.3). [29]

$$A_a = a \cdot l \quad (\text{III.1})$$

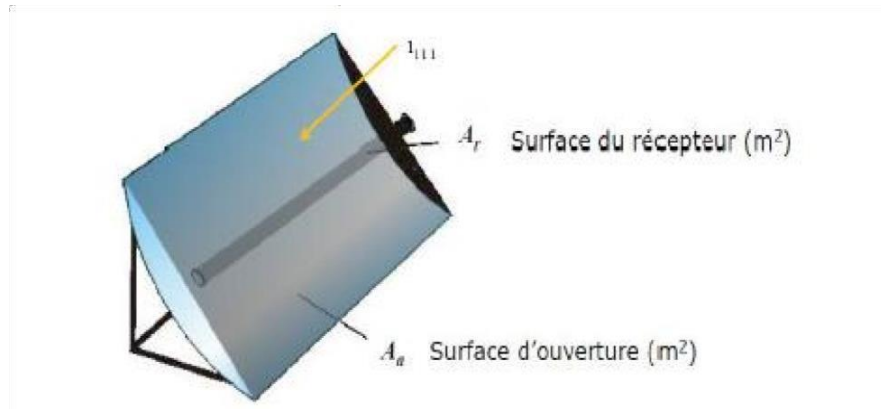


Figure III.3: Surface d'ouverture du collecteur et Surface d'ouverture du récepteur

La surface d'un cylindre-parabolique est un paramètre important pour estimer la quantité de matériau nécessaire à sa fabrication.

La surface se calcule comme suit :

$$A = \left(\frac{a}{2} \sqrt{1 + \frac{a^2}{16f^2}} + 2 \cdot f \cdot \ln \left(\frac{a}{4f} + \sqrt{1 + \frac{a^2}{16f^2}} \right) \right) \cdot l \quad (\text{III.2})$$

II.3.2. La concentration :

Le taux de concentration est l'un des paramètres principaux du collecteur ; il détermine les températures de fonctionnement possibles de la centrale cylindro-parabolique.

Le rapport de concentration C est défini comme le rapport entre la densité de flux radiant à la ligne focale G_{lm} et l'éclairement direct à l'ouverture du collecteur G_a

$$C = \frac{G_{lm}}{G_a} \quad (\text{III.3})$$

De plus, il existe une méthode simple pour déterminer le taux de concentration sans mesure directe, appelée **concentration géométrique**.

Elle est définie comme le rapport entre la surface du collecteur et la surface du récepteur :

$$C_G = \frac{A_a}{A_r} \quad (\text{III.4})$$

Comme illustré sur la figure précédente, la surface du collecteur est plus grande que celle du récepteur. Dans de nombreux cas, c'est la surface projetée du tube absorbeur qui est retenue. Dans ce cas, la surface d'ouverture du récepteur est un rectangle de dimensions d. l .

Alors, la concentration géométrique est donné par :

$$(III.5) \quad C_G = \frac{a \cdot l}{d \cdot l} = \frac{a}{d}$$

Dans les concertateurs cylindro paraboliques réels ; on prend la surface d'ouverture de récepteur c'est la surface du tube absorbeur :

$$(III.6) \quad C_G = \frac{a \cdot l}{\pi \cdot d \cdot l} = \frac{a}{\pi \cdot d}$$

Cette définition conduit à un faible taux de concentration géométrique.

Par conséquent, le taux de concentration basé sur la surface projetée du tube absorbeur est celui qui est pratiquement le plus utilisé. [30]

II.3.3. Les paramètres géométriques :

Quatre paramètres sont utilisés pour caractériser la forme et les dimensions d'un cylindre-parabolique : la longueur du cylindre-parabolique, la distance focale, la largeur d'ouverture et l'angle d'ouverture (voir Figure III.4). [29]

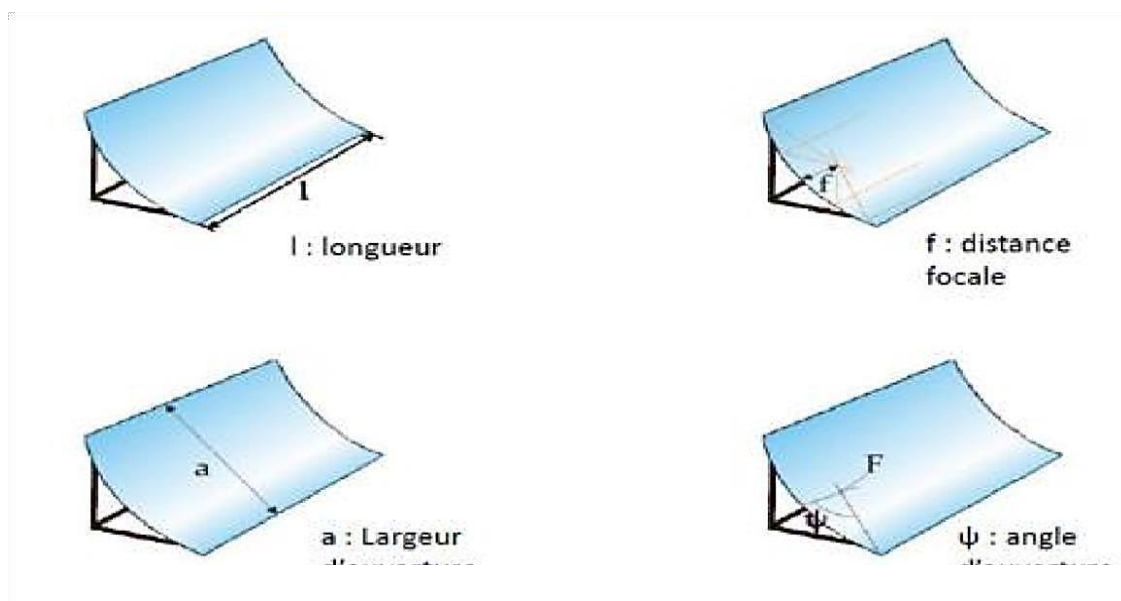


Figure III.4 Les paramètres géométriques

III.3.3.1 La longueur du cylindre-parabolique : c'est la longueur du miroir, qui peut atteindre ...

III.3.3.2 La distance focale : c'est la distance entre le point focal et la courbe de la parabole. La focale de la parabole (f ou F) est le paramètre qui décrit la forme de la parabole (voir Figure III.5).

L'équation de la parabole est :

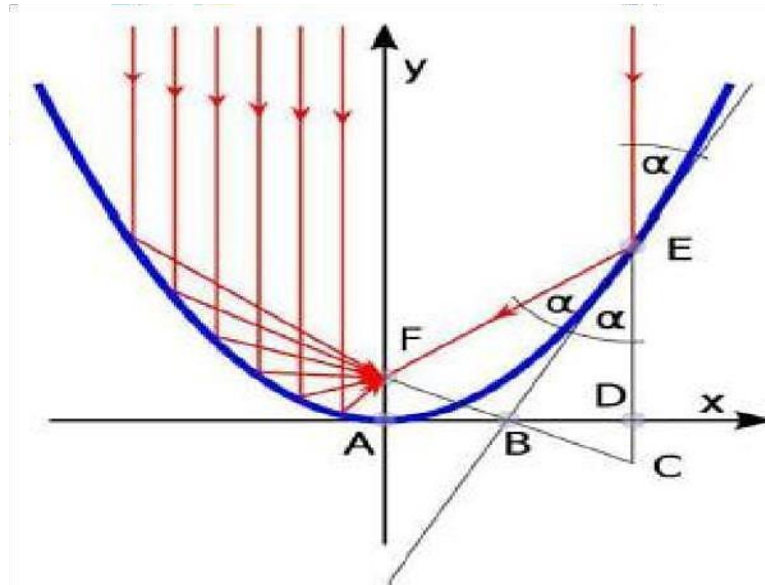


Figure III.5 :Chemin des rayons parallèles dans un miroir parabolique.

Une preuve de l'existence d'un point focal est présentée à la Figure (III.5).

Une représentation analytique appropriée d'une parabole est donnée par :

où f est la distance focale, c'est-à-dire la distance entre le sommet de la parabole et le point focal. [30]

III.3.4. Les L'angle d'ouverture (ψ) :

C'est l'angle au point focal compris entre l'axe optique (Y) et le segment reliant ce point au bord du miroir. Deux des trois paramètres — l'angle d'ouverture, la largeur d'ouverture, et la distance focale — suffisent à définir complètement la section transversale d'un cylindre-parabolique, c'est-à-dire sa forme et ses dimensions. Cela signifie également que la connaissance de deux de ces paramètres permet de déterminer le troisième. L'angle ψ peut être exprimé en fonction du rapport entre la largeur d'ouverture et la distance focale :

$$\tan \psi = \frac{\frac{a}{f}}{2\frac{1}{8}\left(\frac{a}{f}\right)^2} \quad (\text{III.7})$$

Aussi le rapport de la largeur de l'ouverture à la focale peut être exprimé en fonction de l'angle d'ouverture :

$$\frac{a}{f} = -\frac{4}{\tan \psi} + \sqrt{\frac{16}{\tan^2 \psi} + 16} \quad (\text{III.8})$$

Le diagramme suivant représente le rapport a/f en fonction de l'angle d'ouverture :

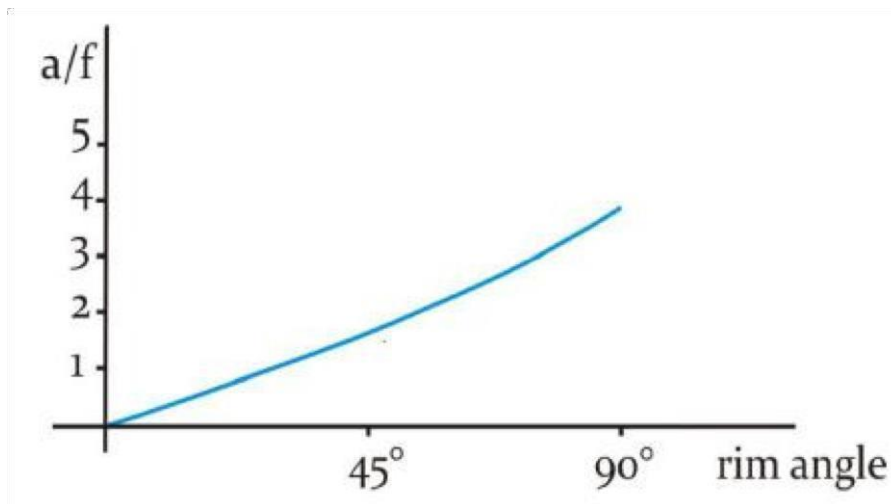


Figure III.6 : Relation entre l'angle d'ouverture et la valeur a/f .

L'angle d'ouverture est lié à la distance entre les différentes parties du miroir parabolique et la ligne focale.

En considérant une largeur d'ouverture fixe, la Figure III.6 illustre cette relation géométrique.

Il existe un angle d'ouverture optimal, qui résulte d'un compromis entre la performance optique et le coût du miroir, ce dernier étant proportionnel à sa surface.

Dans les systèmes cylindro-paraboliques réels, l'angle d'ouverture est généralement d'environ 80°.[30]

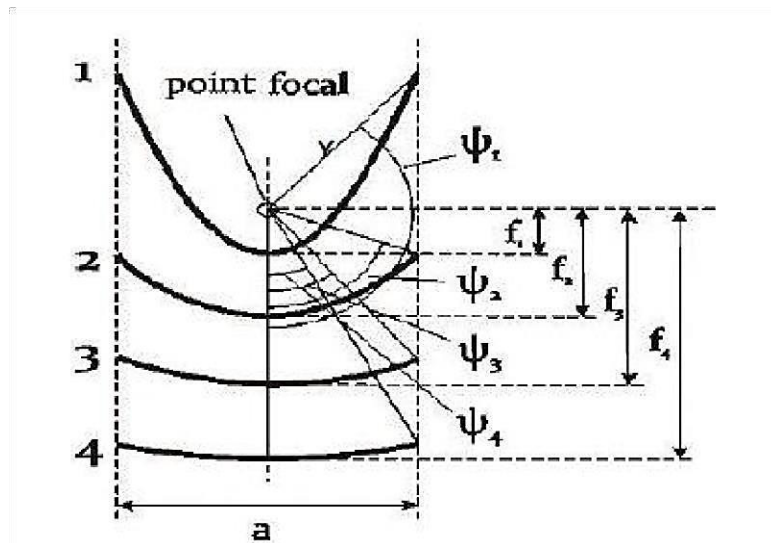


Figure III.7 : Relation entre la focale et l'angle d'ouverture pour une ouverture constante

II.3.5. Tube absorbeur :

Le **tube collecteur** doit présenter un certain nombre de caractéristiques essentielles, notamment :

- Une bonne absorption du rayonnement solaire : son coefficient d'absorption doit être aussi élevé que possible, afin de minimiser la réflexion du rayonnement incident et maximiser la quantité d'énergie captée.

II.3.6. Fluides caloporteurs :

Le choix du fluide caloporteur dépend principalement de ses propriétés physiques et chimiques, telles que :

- La viscosité,
- La capacité thermique volumique,
- La conductivité thermique,
- La stabilité à haute température,
- Ainsi que ses caractéristiques oxydantes.

Le coût constitue également un critère déterminant dans la sélection du fluide le plus approprié.

Par ailleurs, il est fortement recommandé d'éviter les fluides nocifs pour la couche d'ozone ou ayant un fort potentiel de réchauffement climatique. De même, les fluides présentant des risques de toxicité ou d'inflammabilité doivent être exclus ou manipulés avec précaution dans des systèmes spécialement conçus [30]

On distingue comme fluides :

- **Les huiles thermiques** : Ce sont les fluides les plus utilisés dans les centrales cylindro-paraboliques en raison de leur bon coefficient d'échange thermique.
- **Les sels fondus** : Il s'agit de mélanges binaires ou ternaires à base de nitrates de sodium et de potassium. Ils possèdent une densité élevée et sont d'excellents fluides pour le stockage thermique.
- **Les fluides organiques** (comme le butane, le propane, etc.) : Grâce à leur faible température d'évaporation, ils sont utilisés comme fluides thermodynamiques dans les cycles de Rankine à basse température.
- **L'eau liquide** : Fluide de transfert idéal, elle présente un excellent coefficient d'échange thermique et une capacité calorifique élevée. Elle est souvent utilisée directement comme fluide thermodynamique dans un cycle de Rankine.
- **Les gaz légers** (tels que l'hydrogène ou l'hélium) : Ils sont employés comme fluides thermodynamiques pour entraîner les moteurs Stirling associés aux collecteurs paraboliques.
- **L'air** : Il est couramment utilisé comme fluide de travail, notamment dans les systèmes à concentration à air. [30]

II.4. Le bilan thermique :

Pour le calcul du bilan énergétique, les hypothèses suivantes sont prises en compte :

1. La conduction thermique transversale dans le tube absorbeur et l'enveloppe en verre est négligeable.
2. Les pertes thermiques par conduction aux extrémités du tube sont négligeables.
3. La conductivité thermique du tube absorbeur et de l'enveloppe en verre est considérée constante.
4. Le fluide caloporteur est supposé incompressible, avec un écoulement unidimensionnel.
5. Un vide est maintenu entre le tube absorbeur et l'enveloppe en verre afin de limiter les pertes thermiques.
6. Le rayonnement solaire est réparti de manière uniforme sur la surface de l'absorbeur, comme illustré dans les figures III.8 et III.9. [30]

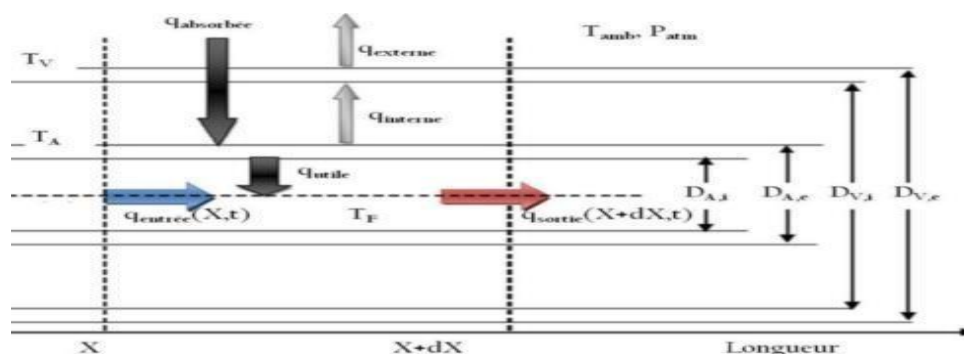


Figure III.8 : Bilan thermique d'un élément de surface du concentrateur cylindro parabolique.

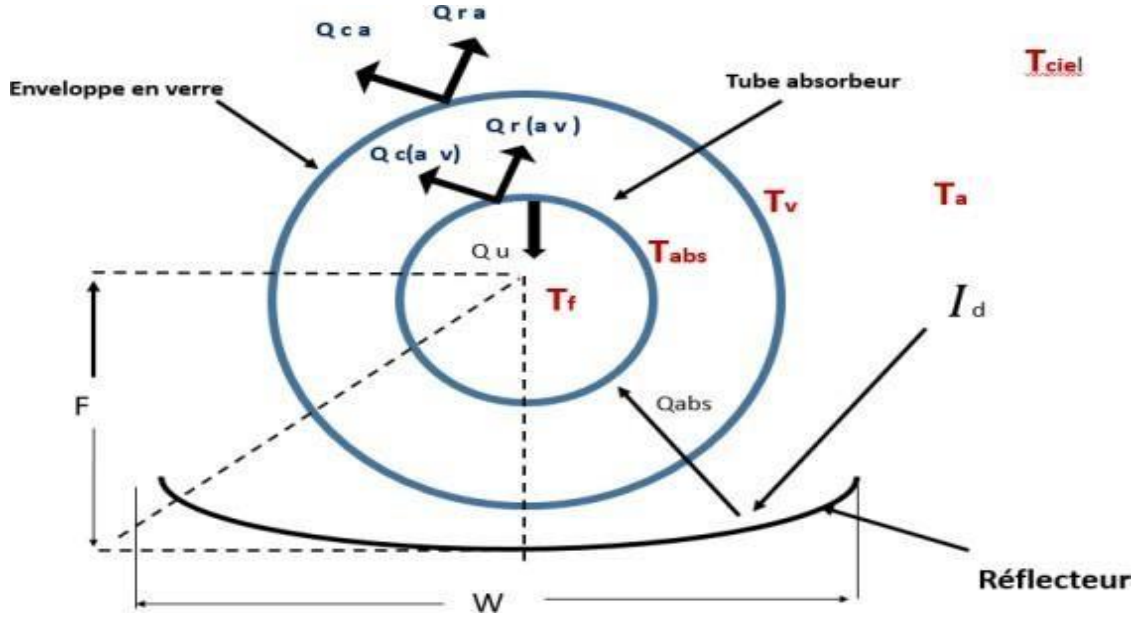


Figure III.9 : Flux de chaleur échangés dans le CCP

II.4.1. Entre l'absorbeur et le fluide caloporteur :

Augmentation de l'énergie interne + la chaleur convertie par le mouvement du fluide = diffusion thermique + l'énergie utile. [30]

$$m_f C_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + Q_f = Q_{\text{diffus}} + Q_{\text{utile}}$$

$$Q_{\text{diffus}} = A_f K_f \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2}$$

$$A_f = \frac{\pi (D_{\text{abs(int)}}^2)}{4}$$

$$Q_f = \dot{m}_f C_{pf} \frac{\partial T_f}{\partial x} \quad , \quad \dot{m}_f = A_f \rho_f u_f$$

(III.9)

Les quantités d'énergies absorbées par l'enveloppe du verre et le tube absorbeur est Calculer par les relations suivantes

$$Q_{\text{absorbée}} = A_0 I_0 \cdot \rho_0 \cdot \alpha_0 \cdot \gamma \cdot K \quad , \quad A_0 = W \cdot L \quad (\text{II.11})$$

$$Q_{\text{absorbée (v)}} = A_0 I_0 \cdot \rho_0 \cdot \alpha_v \cdot \gamma \cdot K \quad (\text{II.12})$$

α_0 est le coefficient de transmission-absorption.

La quantité d'énergie absorbée par le tube absorbeur et transmise au fluide caloporteur dépend de deux coefficients principaux : la transmittance de l'enveloppe en verre et le coefficient d'absorption du tube absorbeur. [30]

II.4.2. Entre l'absorbeur et l'enveloppe en verre :

Augmentation de l'énergie interne = l'énergie solaire absorbée + diffusion thermique perte interne – l'énergie utile. [30]

$$m_a C_a \frac{\partial T_a(x,t)}{\partial t} = Q_{\text{absorbée}} + Q_{\text{diffus}} + Q_{\text{interieur}} - Q_{\text{utile}}$$

$$Q_{\text{diffus}} = A_{\text{abs}} K_{\text{abs}} \frac{\partial^2 T_{\text{abs}}}{\partial x^2}$$

$$A_{\text{abs}} = \frac{\pi(D_{\text{abs(ext)}}^2 - D_{\text{abs(int)}}^2)}{4} \quad (\text{III.13})$$

II.4.3. Entre l'enveloppe du verre et l'environnement :

Augmentation de l'énergie interne = l'énergie solaire absorbée + diffusion thermique + Perte interne - perte externe. [30]

$$m_v C_v \frac{\partial T_v(x,t)}{\partial t} = Q_{\text{absorbée(v)}} + Q_{\text{diffus}} + Q_{\text{interieur}} - Q_{\text{extérieur}}$$

$$Q_{\text{diffus}} = A_v K_v \frac{\partial^2 T_v}{\partial x^2}$$

$$A_v = \frac{\pi(D_{v(\text{ext})}^2 - D_{v(\text{int})}^2)}{4} \quad (\text{III.14})$$

Tableau III 4: Paramètres géométrique et optique du collecteur et de tube absorbeur

Collecteur cylindro parabolique et tube absorbeur	Valeurs
➤ Collecteur	
Ouverture (1 ^{er} réflecteur)	1 (m)
Ouverture (2 nd réflecteur)	0,1 (m)
Longueur	1 (m)
Largeur	1 (m)
➤ Tube :	
Diamètre extérieur	10 (mm)
Diamètre intérieur	8 (mm)
Longueur	1 (m)

III.5. Présentation de Logiciel SolTrace

SolTrace est un logiciel développé par le National Renewable Energy Laboratory (NREL) pour la modélisation des systèmes solaires à concentration (CSP) et l'analyse de leurs performances optiques (voir figure III.10).

Il repose sur la méthode statistique dite de Monte Carlo, dans laquelle l'utilisateur définit le nombre de rayons solaires à émettre. Le programme génère alors ces rayons de manière aléatoire. [16]

Le principe fondamental consiste à suivre la trajectoire de chaque rayon afin d'observer ses interactions avec les différents éléments du système. Cela permet d'évaluer combien de rayons atteignent chaque surface du collecteur.

À chaque interaction, **SolTrace** calcule l'angle de réflexion en fonction du point d'impact, de l'angle d'incidence et de la géométrie locale de la surface.

Cette méthode permet de simuler avec précision le comportement réel des photons dans le système. Grâce à l'utilisation d'un grand nombre de rayons, elle fournit des résultats fiables même pour des configurations optiques complexes.

III.5.1 Définition de la source solaire dans SolTrace

Dans la **Figure III 10** ci-dessous illustre la configuration du profil solaire dans l'environnement SolTrace. Dans cette simulation, la source solaire est définie comme une source ponctuelle située à une distance finie. L'option de profil solaire choisie est de type Gaussien, ce qui reflète plus fidèlement la répartition réelle de l'intensité lumineuse du soleil par rapport à l'axe central.

Les paramètres utilisés sont :

- Largeur angulaire (mrad) : **2,7300**
- Demi-largeur à mi-hauteur (HWHM) : **4,6500**

Le graphe à droite montre la répartition angulaire de l'intensité, centrée autour de 0 mrad, avec une décroissance symétrique de part et d'autre, ce qui est typique d'un profil Gaussien. Ce paramétrage est crucial pour obtenir des résultats réalistes lors de la simulation du comportement optique du collecteur.

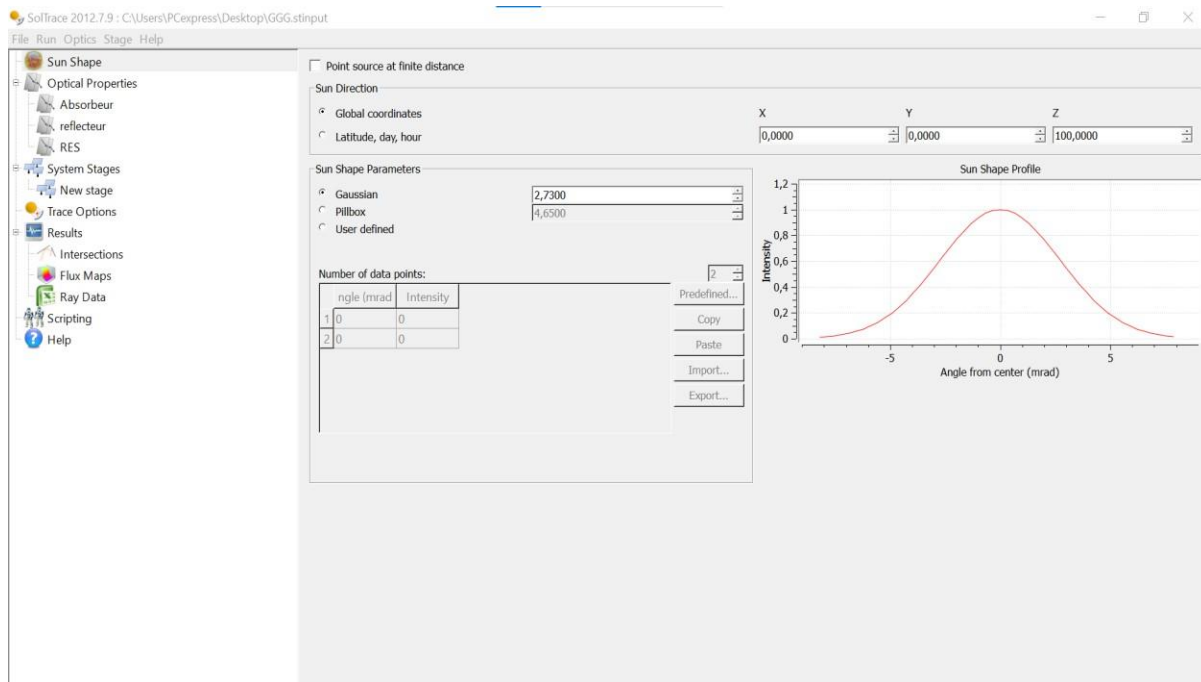


Figure III 10: Interface de Soltrace [16]

III.5.2 Tracé des rayons solaires à l'intérieur du collecteur

Dans la **Figure III11** montre la simulation optique d'un collecteur solaire cylindro-parabolique à l'aide de SolTrace. Les rayons solaires incidents (lignes jaunes) sont réfléchis par la surface du réflecteur vers le tube récepteur (zone verte centrale) situé le long de la ligne focale du parabole.

Le comportement des rayons confirme une bonne focalisation, avec une majorité des rayons concentrés sur une région étroite, ce qui reflète une conception optique efficace. Ce type d'analyse permet de :

- Évaluer la qualité de la focalisation.
- Vérifier les pertes dues aux erreurs géométriques ou optiques.
- Estimer la répartition du flux incident sur le récepteur, à utiliser ensuite comme condition dans une simulation thermique CFD.

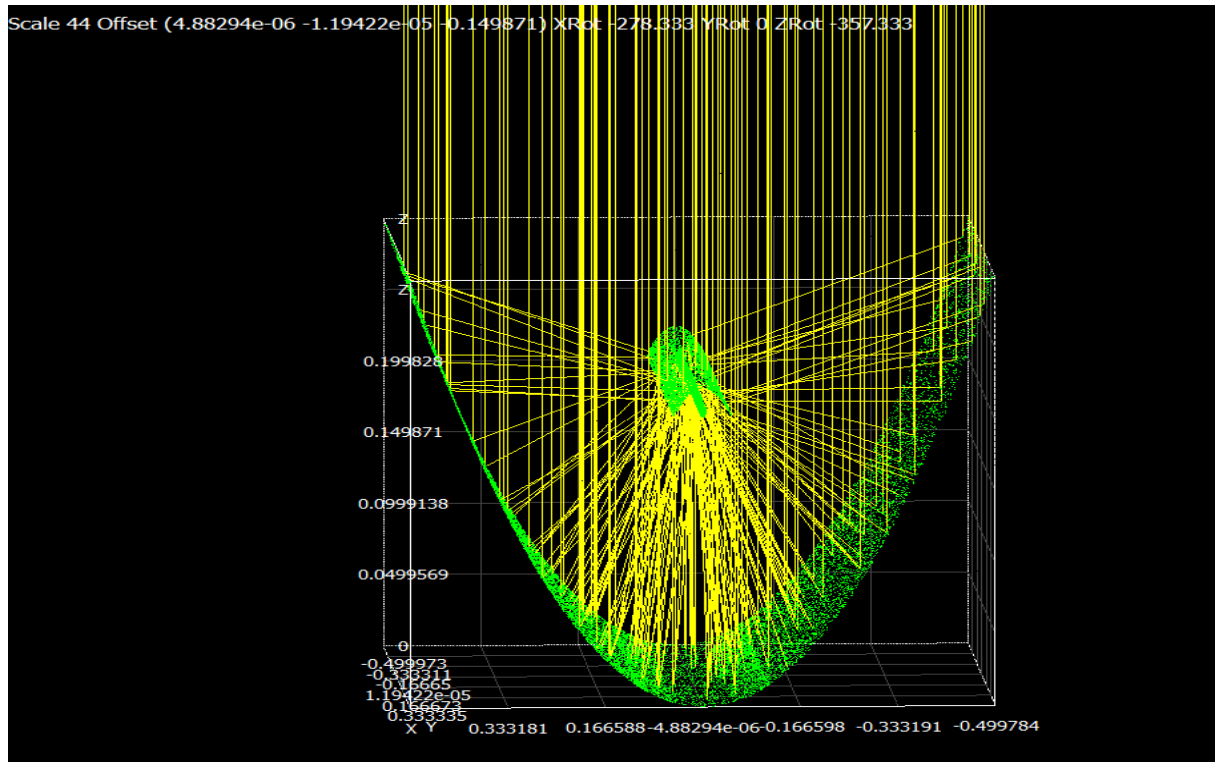


Figure III11: Schéma de concentrateur cylindro-parabolique avec le logiciel SolTrace

III.5.3 Cartographie du flux lumineux sur le récepteur

Dans la Figure III 12 ci-dessous représente la carte de distribution du flux solaire concentré sur la surface externe du tube absorbeur, obtenue à partir du module Flux Maps du logiciel *SolTrace*.

L'échelle de couleurs à droite indique l'intensité du flux en W/m^2 , avec :

- Des zones rouges représentant les flux les plus élevés, atteignant un pic de $54\,468,8 \text{ W/m}^2$,
- Et des zones bleues à noires représentant les flux faibles ou nuls.

La simulation a été réalisée avec un total de 19 880 rayons solaires, chacun portant une puissance de $0,100604 \text{ W}$. Le maillage de la surface a été divisé en 20 segments horizontaux (axe X) et 5 segments verticaux (axe Y), permettant une lecture plus précise de la répartition.

Les **valeurs statistiques obtenues** sont les suivantes :

- Flux moyen : **$20\,784,6 \text{ W/m}^2$**
- Flux minimal : **0 W/m^2**
- Écart-type : **$18\,438,3 \text{ W/m}^2$**
- Incertitude sur le flux de crête : **$\pm 7,66 \%$**

On observe clairement une concentration du flux au centre du tube absorbeur, ce qui est caractéristique des collecteurs solaires à concentration cylindro-parabolique. Cette distribution est essentielle pour l'analyse thermique ultérieure via la simulation CFD.

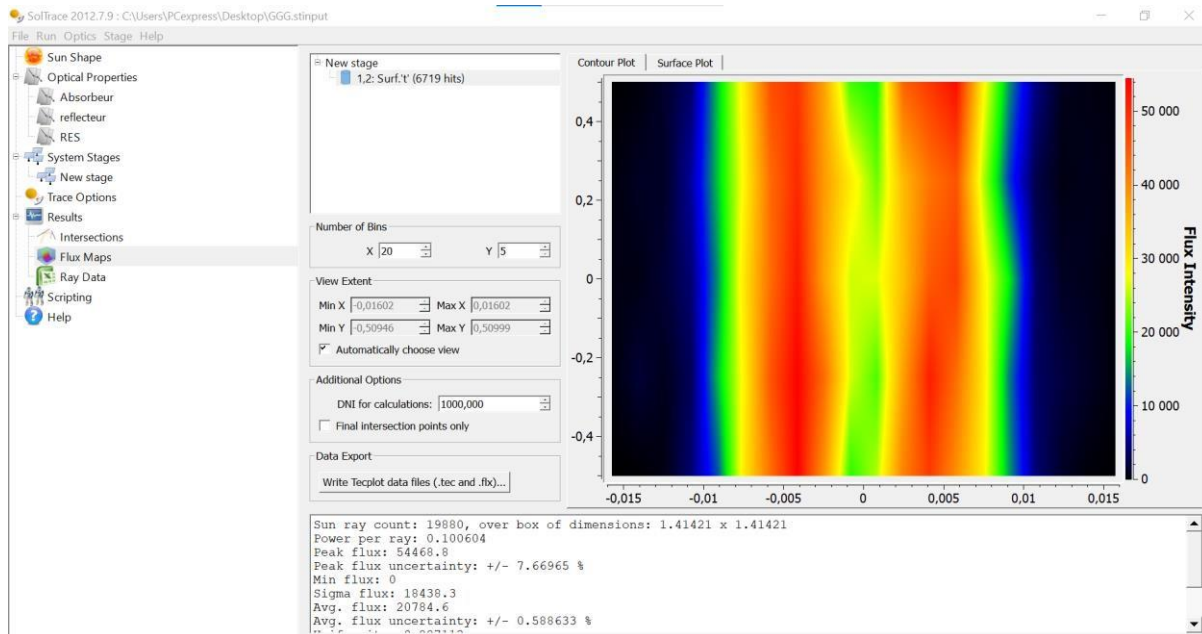


Figure III 12 Distribution du flux solaire concentré – SolTrace

III.6. Méthode de Monte-Carlo (ray tracing) (MCRT)

La méthode Monte Carlo Ray Tracing (MCRT) est une technique probabiliste largement employée dans divers domaines tels que le traitement d'images, les énergies renouvelables et en particulier dans l'analyse des phénomènes de transfert radiatif.

Elle consiste à simuler l'émission d'un grand nombre de rayons ou photons issus d'une source lumineuse (comme le soleil), chaque particule véhiculant une quantité spécifique d'énergie. La trajectoire de chaque particule est ensuite suivie à travers l'environnement simulé.

Cette méthode se distingue par sa capacité à modéliser efficacement des configurations géométriques complexes, en tenant compte des phénomènes de réflexion, de réfraction et de transmission. Toutefois, pour obtenir des résultats fiables, un nombre très élevé de rayons doit être généré.

Plusieurs logiciels utilisent aujourd'hui cette approche, à l'instar de SolTrace, qui permet de simuler le comportement optique des systèmes de concentration solaire, notamment les collecteurs cylindro-paraboliques.

III.7. Présentation de ANSYS Fluent

ANSYS Fluent est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des volumes finis (FVM), une technique largement utilisée pour la résolution des équations de conservation (masse, quantité de mouvement, énergie) en mécanique des fluides et en transfert thermique. Cette méthode repose sur l'intégration des équations sous forme intégrale dans des volumes de contrôle répartis sur tout le domaine géométrique.

Dans cette étude, ANSYS Fluent a été employé pour simuler le transfert de chaleur et l'écoulement du fluide caloporteur à l'intérieur du tube absorbeur d'un collecteur solaire cylindro-parabolique. Le processus a été réalisé via la plateforme ANSYS Workbench, qui permet une intégration cohérente entre la modélisation géométrique, le maillage et la résolution numérique.

- **Le maillage (Meshing)** : la géométrie interne du tube absorbeur a été discrétisée en un ensemble de volumes de contrôle à l'aide d'**ANSYS Meshing**, permettant une précision locale dans les zones critiques.
- **La résolution (Setup & Solution)** : les équations gouvernantes ont été discrétisées et résolues dans chaque volume via **ANSYS Fluent**, fournissant des champs de température et de vitesse du fluide selon les conditions aux limites imposées.

Cette approche permet de reproduire avec précision le comportement thermique du collecteur et d'évaluer ses performances sous diverses conditions de fonctionnement. [31]

III.7.1 Mise en place de la simulation CFD sous ANSYS Fluent

La simulation CFD (Computational Fluid Dynamics) est une étape cruciale dans l'analyse thermique du collecteur cylindro-parabolique. Elle permet de modéliser l'écoulement du fluide caloporteur dans le tube récepteur, et d'évaluer le transfert thermique généré par le flux solaire concentré. Ci-dessous, les étapes détaillées de la chaîne de simulation :

1. Sélection du module : Fluid Flow (Fluent)

Le module Fluent d'ANSYS est choisi car il est l'un des plus puissants pour résoudre les problèmes :

- D'écoulement interne (fluides compressibles ou incompressibles),
- De transfert thermique couplé à la convection,
- Avec modélisation précise de la turbulence, radiation, ou changement de phase.

2. Géométrie (Geometry)

Dans cette étape, on modélise le domaine physique où se déroule l'écoulement :

- C'est généralement un tube cylindrique représentant le récepteur.
- Dans certains cas, la géométrie est simplifiée en 2D axiale pour réduire le coût de calcul, surtout si la symétrie le permet.
- Le domaine peut être subdivisé en plusieurs zones (fluide, paroi, isolant...).

3. Maillage (Mesh)

Le maillage transforme la géométrie en un ensemble de petits volumes finis :

- On utilise un maillage structuré ou non structuré, souvent de type quadrilatéral (2D) ou hexaédrique (3D).
- Un raffinement local est appliqué près des parois pour capter les gradients thermiques et de vitesse.
- La qualité du maillage est essentielle : un mesh trop grossier mène à des erreurs, un mesh très fin augmente le temps de calcul.

Critères de qualité :

- Orthogonalité > 0.1
- Skewness < 0.9
- Nombre de cellules adapté (ex. : 50 000 à 500 000)

4. Setup (Paramétrage du solveur)

C'est ici qu'on définit les modèles physiques et les conditions aux limites :

a. Modèle physique :

- Écoulement laminaire ou turbulent (modèle k- ϵ ou k- ω)
- Heat Transfer Enabled : activation du transfert thermique
- Fluide : eau, huile thermique, ou fluide spécifique

b. Conditions aux limites :

- **Inlet** : Mass flow rate (0.0015 Kg/s)
- **Outlet** : Pression = 0 Pa (pression ambiante)
- **Parois** :
 - Température constante (293.3 K)
 - Ou flux thermique imposé, dérivé du Flux Map de SolTrace

c. Autres réglages :

- Résolution : 1st-order ou 2nd-order accuracy
- Radiation si nécessaire (modèle P1 ou DO)

5. Solution (Calcul)

On lance l'itération :

- Méthode implicite ou explicite
- Critère de convergence typique : les résidus doivent être $< 10^{-5}$
- Suivi de l'évolution des variables : température, vitesse, énergie

6. Résultats (Post-traitement)

Visualisation des résultats sous forme de :

- Contours de température → pour évaluer le chauffage du fluide
- Lignes de courant (Streamlines) → pour observer le comportement de l'écoulement
- Profils de vitesse et perte de charge

Les résultats permettent d'évaluer :

- Le rendement thermique du système
- La distribution de la température le long du tube
- Les zones mortes (faible écoulement ou transfert faible)

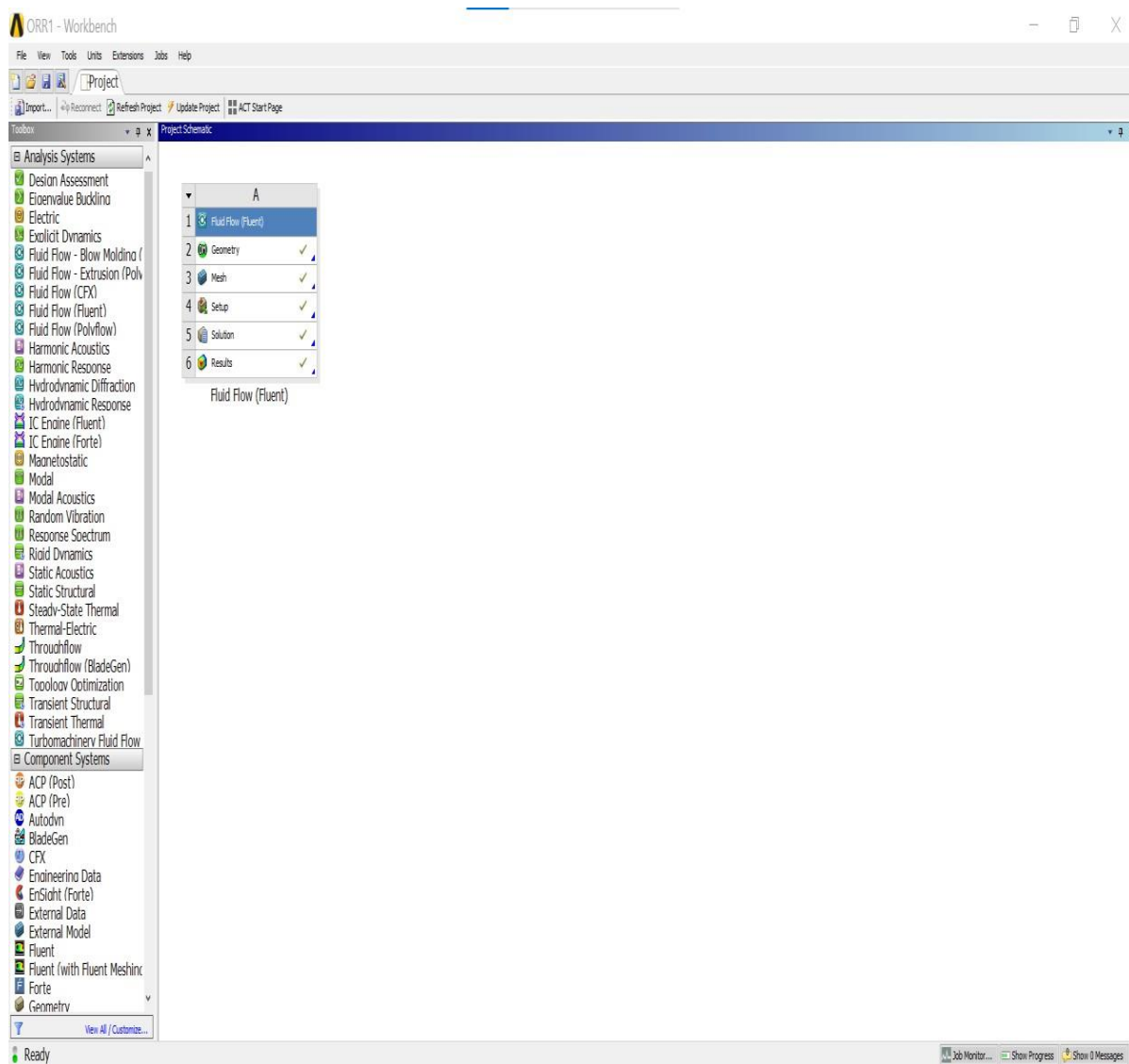


Figure III13: Interface du logiciel ANSYS Workbench – Projet Fluid Flow (Fluent)

➤ **Tableau III 5:** Etapes nécessaires pour une simulation dans ANSYS (Workbench)

➤

2	Geometry	CAO – création de la géométrie	ANSYS DesignModeler
3	Mesh	Maillage	ANSYS Meshing
4	Setup	Mise en données et simulation	ANSYS Fluent
5	Solution	Résultats CFD	
6	Results	Post-traitement	CFDPost

III.7.2 Description de la géométrie dans ANSYS DesignModeler

La phase de "Geometry" dans ANSYS Workbench est une étape essentielle qui permet de créer ou d'importer la forme physique du modèle à analyser. Dans cette étape, l'utilisateur définit les dimensions, la structure, ainsi que la configuration des différentes parties du modèle.

III.7.2.1 Modélisation géométrique dans ANSYS DesignModeler :

Dans la **Figure III 14** montre la géométrie d'un tube réalisée dans ANSYS R19.2 en utilisant le module DesignModeler.

La géométrie est constituée de 9 corps solides (Bodies) créés par des opérations d'extrusion (Extrude).

Le modèle est orienté dans l'espace selon les axes X, Y et Z.

Le tableau des détails montre que la géométrie contient 54 faces, 108 arêtes (Edges) et 72 sommets (Vertices). Cette modélisation sert de base pour les étapes suivantes, notamment la génération du maillage, la définition des conditions aux limites, et la simulation numérique dans Fluent.

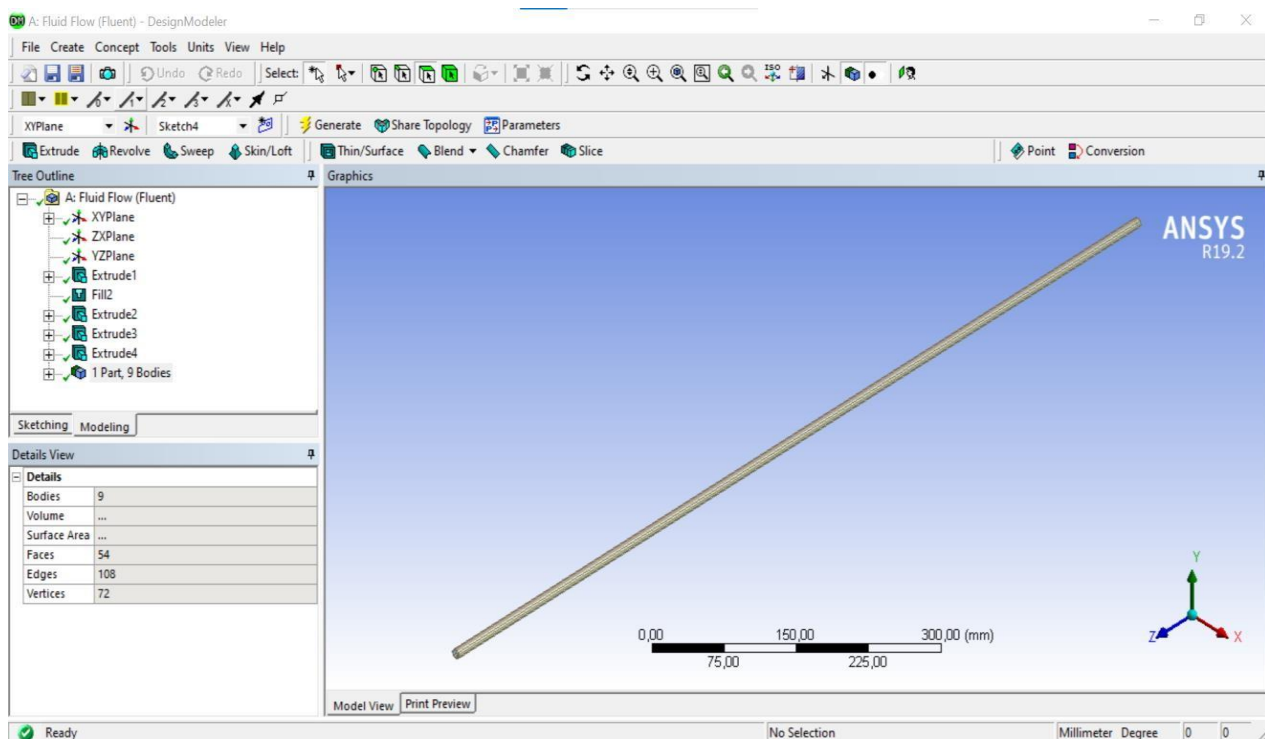


Figure III 14: Modélisation géométrique d'un tube dans ANSYS Design Modeler

III.7.3 Description et analyse technique :

Dans la **Figure III 15**, on observe le maillage d'un conduit cylindrique généré dans ANSYS Workbench – module Fluent. Le maillage est structuré, comme on peut le constater à travers la disposition régulière et ordonnée des cellules.

Au centre du cylindre, on remarque une transition nette avec des cellules carrées ou rectangulaires, ce qui suggère l'utilisation d'un maillage hexaédrique (Hexa Mesh). Ces éléments sont plus efficaces pour simuler les écoulements internes dans des conduits en raison de leur meilleure précision numérique et leur moindre diffusion numérique.

Les cellules sont plus fines au centre et près des parois, ce qui indique un raffinement local (refinement) pour capturer plus précisément le gradient de vitesse et les effets de couche limite.

Paramètres de maillage visibles :

- **Type de cellules :** Mailles hexaédriques (Hexahedral cells)
- **Type de maillage :** Structuré (Maillage quadrangulaire ou hexaédrique uniforme)
- **Préférence physique :** CFD (Computational Fluid Dynamics)
- **Préférence de solveur :** Fluent
- **Ordre des éléments :** Linéaire (éléments linéaires)
- **Taille des éléments :** Valeur par défaut (non précisée ici, mais modifiable dans les options avancées)

Mise en place des conditions aux limites

- Création des éléments conditions aux limites.
- Définition du type de conditions limites : Cette étape est la dernière avant le calcul et l'étude avec un autre logiciel ayant un solveur. Il faut définir chaque condition au limite. Ainsi, pour chaque élément, il faut faire 'Create New' et choisir le type de condition limite

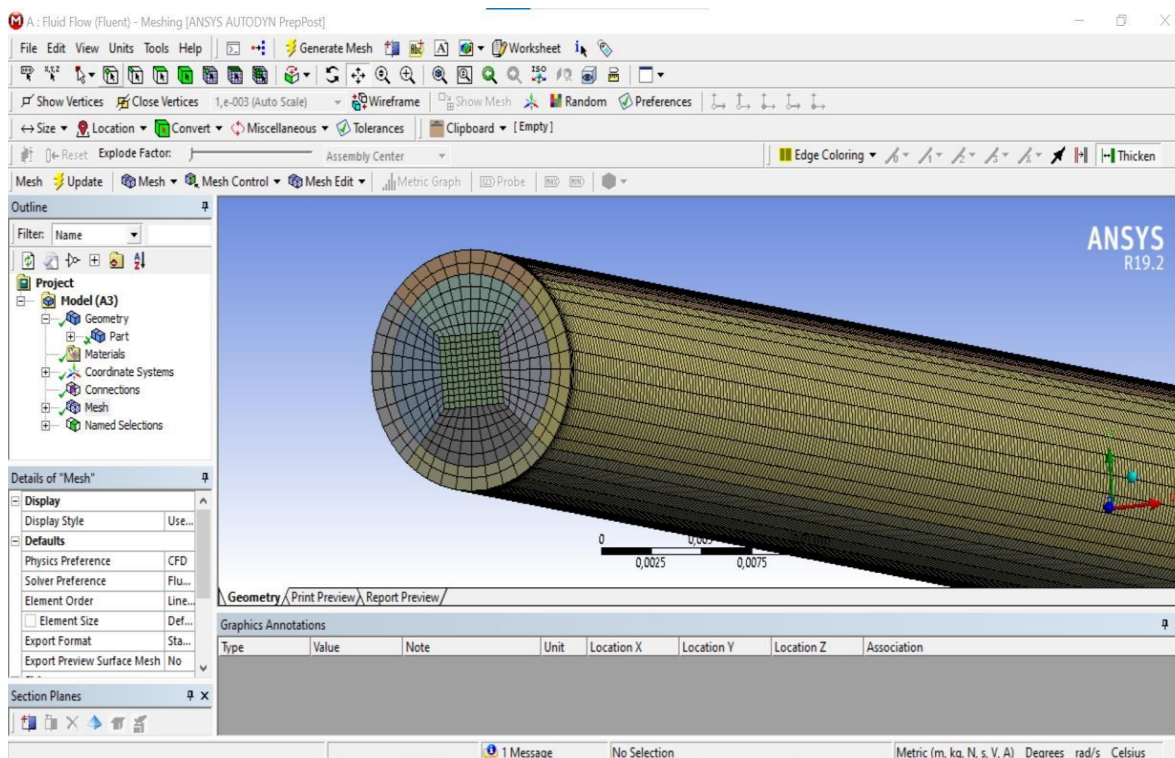


Figure III 15: Maillage structuré d'un conduit cylindrique – ANSYS Workbench R19.2

III.7.3 Définition des conditions aux limites dans ANSYS Fluent

. Dans la **Figure III 16** L'étape Setup dans ANSYS Fluent est cruciale car elle permet de définir le modèle physique utilisé dans la simulation, les matériaux, les conditions aux limites, et les paramètres de solution. C'est ici que l'on traduit le problème physique réel en une formulation numérique.

III.7.3.1 Conditions aux limites (Boundary Conditions)

Dans cette configuration, on définit les conditions aux limites essentielles pour la simulation thermique et d'écoulement :

- **Inlet (mass-flow-inlet) :**
Un **débit massique** est imposé à l'entrée avec une valeur de **0.0015 kg/s**. Ce type de condition est couramment utilisé pour des écoulements internes où le débit est contrôlé.
- **Outlet (mass-flow-outlet) :**
Une sortie est définie également avec un contrôle sur le débit massique, ce qui assure la stabilité de la simulation pour des régimes transitoires.
- **Wall (surface) :**
Une condition thermique de type "Heat Flux" est appliquée la paroi (surface). Le flux thermique n'est pas une constante mais est défini à partir d'un fichier externe (HF hflux).
Cela signifie que le flux appliqué varie selon une loi ou un profil défini par l'utilisateur.

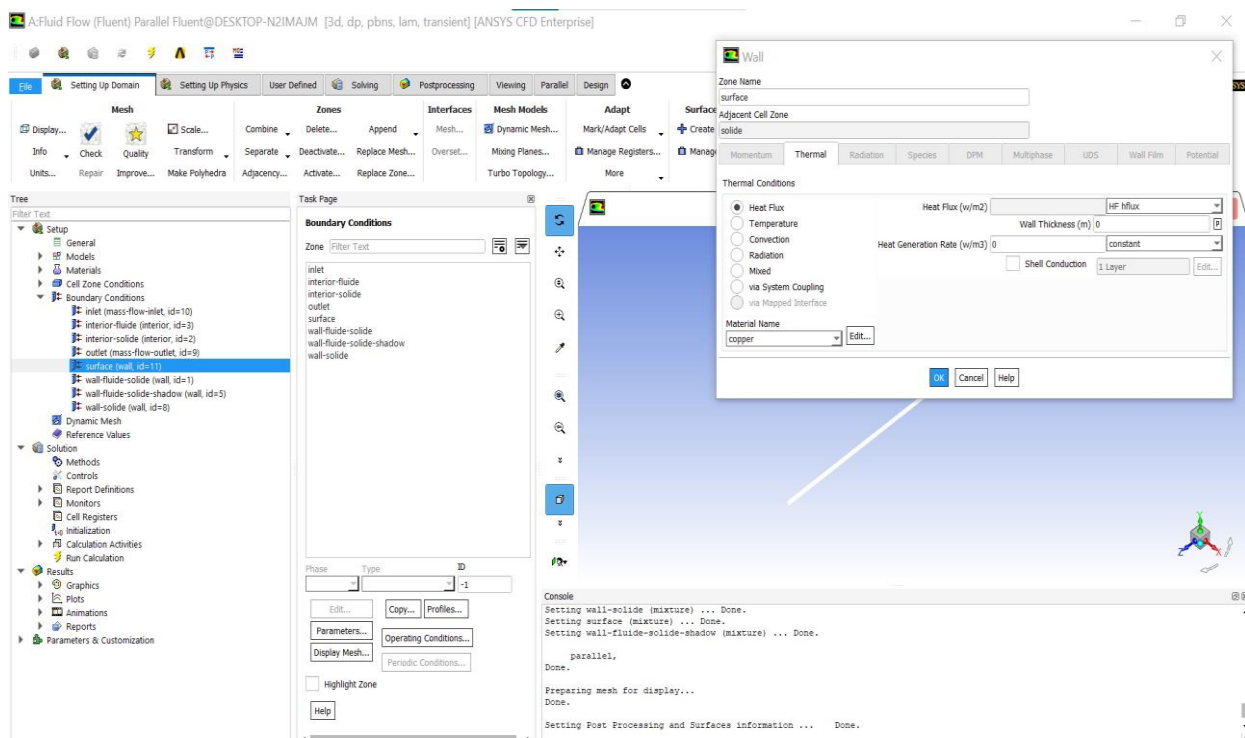


Figure III 16 Définition des Conditions aux Limites dans ANSYS Fluent

III.7.3.2 Méthode d'insertion du fichier HF :

Dans l'onglet *Thermal*, l'option "Heat Flux" est activée, et dans le champ correspondant une table HF nommée hflux est sélectionnée. Cette table a été importée via la commande dans la console ou le gestionnaire de fichiers internes ANSYS.

L'unité utilisée W/m^2 et le matériau de la paroi est le cuivre (copper).

Étape Setup dans ANSYS Fluent – Définition des conditions aux limites et importation d'un profil thermique

Dans cette étape, j'ai configuré l'ensemble des paramètres physiques nécessaires pour la simulation, notamment le type d'écoulement, les conditions aux limites et les propriétés des parois. J'ai choisi un

écoulement transitoire (Transient) car le flux thermique appliqué varie avec le temps.

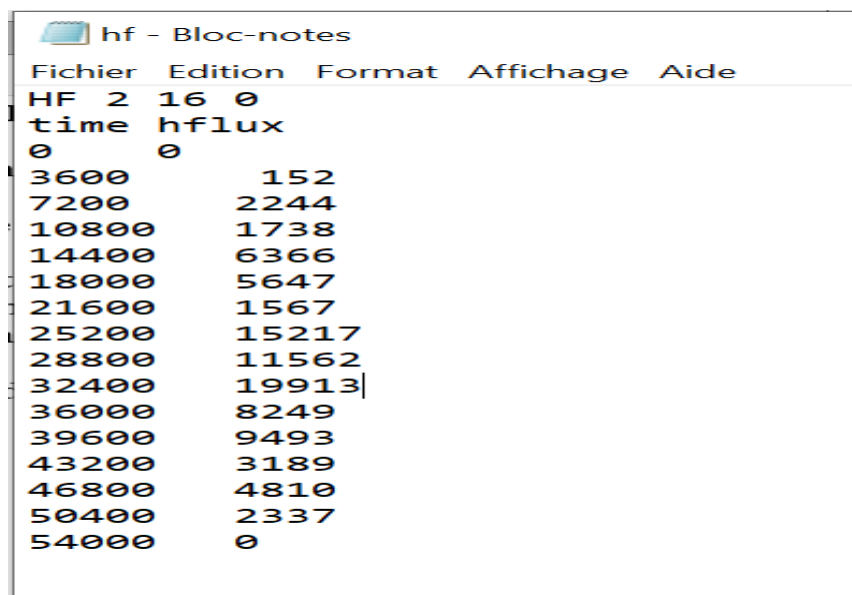
Pour l'entrée, j'ai défini une condition de type *mass-flow-inlet* avec un débit massique de **0.0015 kg/s**. La sortie, quant à elle, est définie comme *mass-flow-outlet*. Ces conditions assurent un écoulement réaliste dans le canal.

Ce qui distingue cette simulation, c'est que je n'ai pas appliqué un flux thermique constant sur la paroi, mais plutôt un **profil thermique transitoire** que j'ai créé sous forme d'un fichier .prof, contenant **16 points** représentant le flux thermique en fonction du temps. Ce fichier est nommé **HF hflux**.

III.3.2.1 Définition des conditions aux limites thermiques via un profil transitoire (HF hflux)

Dans cette simulation, j'ai appliqué un flux thermique variable dans le temps sur une paroi spécifique à l'aide d'un **fichier de profil transitoire** nommé HF hflux. Ce fichier, créé au format .txt compatible avec ANSYS Fluent, contient une table de 16 points définissant l'évolution du flux thermique (en W/m²) en fonction du temps (en secondes). Le but est de simuler un scénario réaliste où le flux thermique appliqué change au cours de la journée.

Contenu du fichier transient_HF.txt :



time	hflux
0	0
3600	152
7200	2244
10800	1738
14400	6366
18000	5647
21600	1567
25200	15217
28800	11562
32400	19913
36000	8249
39600	9493
43200	3189
46800	4810
50400	2337
54000	0

Procédure d'importation dans Fluent :

Je l'ai importé dans Fluent à l'aide de la ligne de commande, ce qui a généré le message suivant :

```
Reading profile file...
16 "HF" transient-profile points, time, hflux.
```

Puis j'ai renseigné le nom du fichier transient_HF.txt. Une fois importé, ce profil est devenu disponible dans les conditions aux limites thermiques.

Ensuite, j'ai sélectionné la paroi concernée (nommée surface dans le maillage), puis dans l'onglet **Thermal**, j'ai coché l'option **Heat Flux (W/m²)** et choisi le profil HF hflux dans le menu déroulant.

Enfin, j'ai attribué à cette paroi le matériau **cuivre (copper)** en raison de sa conductivité thermique élevée, ce qui a un impact significatif sur le transfert de chaleur. Cette configuration permet de simuler un échauffement progressif et réaliste du système.

Thermal → Heat Flux (W/m²) → HF hflux

III.8. Conditions aux limites

Pour résoudre un problème transitoire nous devons introduire la solution à l'instant initial ($t = 0$) pour pouvoir démarrer le processus de résolution en temps. Dans notre cas, le domaine solide-fluide est initialisé comme suit : Au temps $t=0s$, on considère que le fluide et le solide sont à la même température T_0 ; la vitesse et la pression du fluide sont mises à zéro. Pour résoudre le problème dans l'espace, les conditions aux limites doivent être spécifiées. La figure III 7 illustre les conditions aux limites appliquées au tube absorbant.

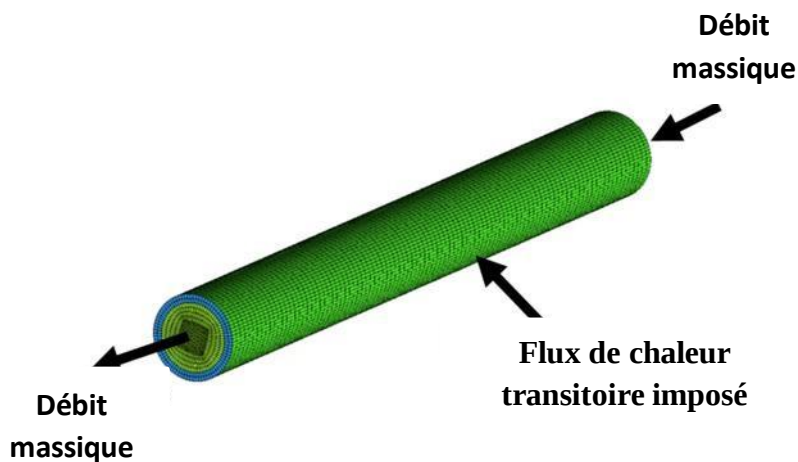


Figure III 7 : illustration des conditions aux limites appliquées sur le tube absorbant avec de l'eau comme fluide de travail

A l'entrée du tube, un débit massique est imposé. A la sortie du tube, le même débit massique est imposé. Le débit massique est choisi afin d'assurer un écoulement laminaire à l'intérieur du tube. Un flux laminaire est déterminé par la condition ($Re < 2000$), où Re est le nombre de Reynolds,

Sur la surface latérale du tube, un flux thermique transitoire est imposé en permanence. Cette quantité variant dans le temps, nous avons utilisé des fonctions d'interpolation temporelle (fonctions gaussiennes). Ces fonctions sont implémentées dans le solveur sous forme d'expressions en utilisant le langage FEL.

Une interface de domaine doit être spécifiée à l'interface solide-fluide.

En plus des conditions initiales et des conditions aux limites, certaines configurations du solveur sont nécessaires. Le modèle laminaire est sélectionné pour résoudre l'écoulement de fluide et le modèle d'énergie thermique est sélectionné pour résoudre le transfert de chaleur conjugué. Le pas de temps choisi est de 5 min, tandis que le temps total de simulation est de plus que 8 heures. La précision du calcul est définie sur 10^{-4} en termes d'erreur quadratique moyenne (RMSE) pour toutes les variables. Le schéma d'advection est défini sur Haute résolution et la méthode d'Euler vers l'arrière du second ordre est sélectionnée pour le schéma transitoire.

Dans ces conditions, le solveur Fluent résout le système d'équations (3)-(5). Le résultat visé est évidemment la température de l'eau, à la sortie du tube récepteur, en fonction du temps. Les conditions aux limites du flux de chaleur sont implémentées dans le solveur Fluent en utilisant le langage d'expression Fluent (FEL).

III.9. Les équations gouvernantes :

➤ L'équation Continuité :

L'équation de continuité : est simplement une expression mathématique du principe de conservation de la masse. Une équation de continuité générale peut également être écrite sous une forme différentielle. Génie thermique

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho U) = 0 \quad \text{III. (1)}$$

➤ L'équation quantité de mouvement :

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \mu \nabla \cdot \nabla U \quad \text{III. (2)}$$

➤ L'équation d'énergie :

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad \text{III. (3)}$$

Où, U est le vecteur vitesse, p est la pression du fluide, T est la température et h est l'enthalpie.

Notez que l'équation (5) est appliquée pour les deux domaines fluide et solide.

L'énergie utile gagnée par le tube absorbeur s'exprime comme suit :

$$\dot{Q}_u = \dot{m} C_p (T_{out} - T_{in}) \quad \text{III. (4)}$$

Le rendement instantané de CCP est défini comme suit :

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{IA_a} \frac{C_p m (T_{out} - T_{in})}{IA_a} \quad \text{III. (5)}$$

Aa est l'aire d'ouverture du miroir parabolique ; I_b est l'intensité du rayonnement solaire, m est le débit massique de fluide à travers le tube, et T_{in} et T_{out} sont les températures successivement à l'entrée et à la sortie du tube. Les équations régissant l'écoulement du fluide et le transfert de chaleur conjugué dans le tube absorbant sont données comme suit [20] :

III.10. Propriétés des matériaux

Les propriétés thermo-physiques du fluide caloporteur et de tube absorbeurs utilisés sont présentées dans le tableau (III.4). [21]

Tableau III 6: Propriétés thermo-physiques du fluide caloporteur et tube absorbeur.

Tube Absorbeur			
Propriétés	Cuivre	Eau	
densité (kg/m ³)	8978	998.2	
chaleur spécifique (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	381	4182	-
viscosité (10 ⁻⁶ Pa.s)	-	-	-
Conductivité thermique(W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	401	0.6	
Coefficientdilatationthermique(10 ⁻⁶ .K ⁻¹)	270	533	-

•

Tableau III 7: Mise en données en Fluent

Paramètres de simulation dans ANSYS Fluent

Catégorie	Paramètres choisis
Type de solveur	- Espace : 3D - Temps : Transitoire (Unsteady) - Méthode implicite d'ordre 1 - Modèle d'écoulement : Laminaire - Transfert thermique : Activé - Solidification et fusion : Activées
Matériaux utilisés	Les matériaux ont été choisis à partir de la base de données : - Fluide : air (ou fluide équivalent) - Solide : cuivre (forte conductivité thermique)
Conditions aux limites	- Entrée : Débit massique = 0.0015 kg/s - Sortie : pression ambiante - Paroi : flux thermique variable (HF hflux) importé via fichier `.prof`
Application du fichier HF hflux	- Fichier contenant 16 points (temps, flux W/m²) - Importation via `file > read-transient-table` - Assigné à la paroi : `Thermal > Heat Flux > HF hflux`
Contrôle du solveur	- Équations : Mouvement et Énergie - Pas de temps : 300 s (5 min) - Max itérations par pas : 10
Facteurs de sous-relaxation	- Pression : 0.75 - Densité : 1.0 - Forces : 1.0 - Mouvement : 0.7 - Mise à jour fraction liquide : 0.9 - Énergie : 1.0
Couplage pression-vitesse	Méthode : SIMPLE
Schémas de discrétisation	- Pression : PRESTO - Mouvement : Second Order Upwind - Énergie : Second Order Upwind

Chapitre IV.
Résultats et discussions

Chapitre IV. Résultats et discussions

2. INTRODUCTION

Ce chapitre présente les résultats obtenus à partir de l'analyse des performances optiques et thermiques d'un collecteur solaire cylindro-parabolique. L'objectif principal de cette étude est d'évaluer le comportement du système sous des conditions réelles, en comparant les performances du collecteur solaire en fonction de différents flux solaires simulés. Pour ce faire, un flux solaire de référence a d'abord été généré à l'aide du logiciel PVSyst pour un ciel clair durant la journée du 21 juin 2024, date à laquelle le rayonnement solaire atteint des valeurs optimales dans notre région (ville de Laghouat). Ensuite, en utilisant le logiciel Matlab, quatre séries de flux solaires aléatoires ont été simulées, basées sur les valeurs du flux solaire de référence.

Cette approche permet de créer des scénarios variés, en tenant compte de la variabilité du rayonnement solaire dans des conditions réelles. L'analyse comparative de ces différents scénarios permet de mieux comprendre l'impact de cette variabilité sur les performances thermiques et optiques du collecteur. Les résultats obtenus fourniront des informations cruciales pour évaluer l'efficacité du système dans des conditions réelles d'exploitation, et ouvriront la voie à une meilleure gestion de l'énergie solaire pour des applications pratiques. Ce chapitre est structuré en deux parties principales : la présentation de la méthodologie des simulations, suivie d'une discussion détaillée des effets de la variabilité du flux solaire sur les performances du collecteur, en mettant l'accent sur les différences observées entre les simulations et les conditions idéales.

3. METHODOLOGIE

La méthodologie adoptée dans cette étude suit plusieurs étapes successives afin d'analyser les performances optiques et thermiques d'un collecteur solaire cylindro-parabolique. Ces étapes sont illustrées par l'organigramme présenté dans la Figure 4.1. Chaque étape permet de simuler, de calculer, puis de comparer les performances du système sous différentes conditions de flux solaire. Les étapes clés sont détaillées ci-dessous :

→ **Génération du flux solaire de référence (Pvsyst) :**

La première étape consiste à générer un flux solaire de référence, représentant des conditions idéales pour un ciel clair. Ce flux est calculé à l'aide du logiciel PVSyst, qui est utilisé pour simuler les conditions de rayonnement solaire pour la journée du 21 juin 2024, un jour marqué par une forte intensité solaire. Cette référence servira de base pour la comparaison avec d'autres scénarios de flux solaires générés aléatoirement.

→ **Détermination de la distribution du flux solaire concentré sur le tube absorbeur (SolTrace) :**

La distribution du flux solaire (de référence) concentré sur le tube absorbeur est déterminée à l'aide du logiciel

SolTrace. Ce dernier permet de modéliser le trajet du rayonnement solaire et de simuler la concentration du flux sur la surface du tube absorbeur. Cette étape est cruciale, car elle fournit les informations nécessaires pour déterminer les conditions thermiques à imposer dans les simulations CFD (Computational Fluid Dynamics).

→ **Génération des flux aléatoires (Matlab) :**

Une fois que la distribution du flux solaire de référence est obtenue, des simulations sont réalisées dans Matlab pour générer trois distributions de flux solaires aléatoires. Ces flux sont dérivés à partir des valeurs du flux de référence et modifiés pour refléter des conditions réalistes et variées, telles que les variations de l'intensité du rayonnement solaire au cours de la journée. Ces scénarios de flux solaires aléatoires permettent d'étudier le comportement du système dans des conditions non idéales.

→ **Implémentation des distributions obtenues dans Ansys-Fluent :**

Les distributions du flux solaire concentré obtenues par SolTrace sont ensuite intégrées dans Ansys-Fluent. Ces distributions sont appliquées comme conditions aux limites thermiques dans le solveur, permettant de modéliser les effets thermiques du flux concentré sur le fluide caloporteur circulant à l'intérieur du tube absorbeur.

→ **Résolution CFD (Calcul de la température du fluide caloporteur) :**

Après avoir implémenté les conditions aux limites dans Ansys-Fluent, la simulation CFD est lancée. Cette étape permet de résoudre les équations de transfert thermique et de calculer la température du fluide caloporteur à la sortie du tube absorbeur pour chaque scénario (flux solaire de référence et flux solaires aléatoires). Les résultats obtenus permettent d'analyser l'évolution thermique du fluide en fonction des conditions de flux solaire.

→ **Calcul des performances du système (Gain d'énergie thermique et efficacité) :**

Une fois la température du fluide caloporteur déterminée, les performances du système sont évaluées. Le gain d'énergie thermique et l'efficacité du collecteur solaire sont calculés pour chaque cas de simulation. Ces paramètres permettent d'évaluer l'efficacité du collecteur sous différents scénarios de flux solaire et d'analyser l'impact des variations de flux sur les performances thermiques du système.

→ **Comparaison des performances obtenues par rapport au cas de référence :**

La dernière étape consiste à comparer les résultats obtenus pour les flux solaires aléatoires avec les performances obtenues pour le flux de référence. Cette comparaison permet d'évaluer l'impact des fluctuations du rayonnement solaire sur les performances du système, et d'identifier les scénarios où le collecteur solaire atteint ses performances optimales. Les résultats de cette analyse sont discutés afin d'en tirer des conclusions sur la performance réelle du collecteur solaire cylindro-parabolique dans des conditions variées.

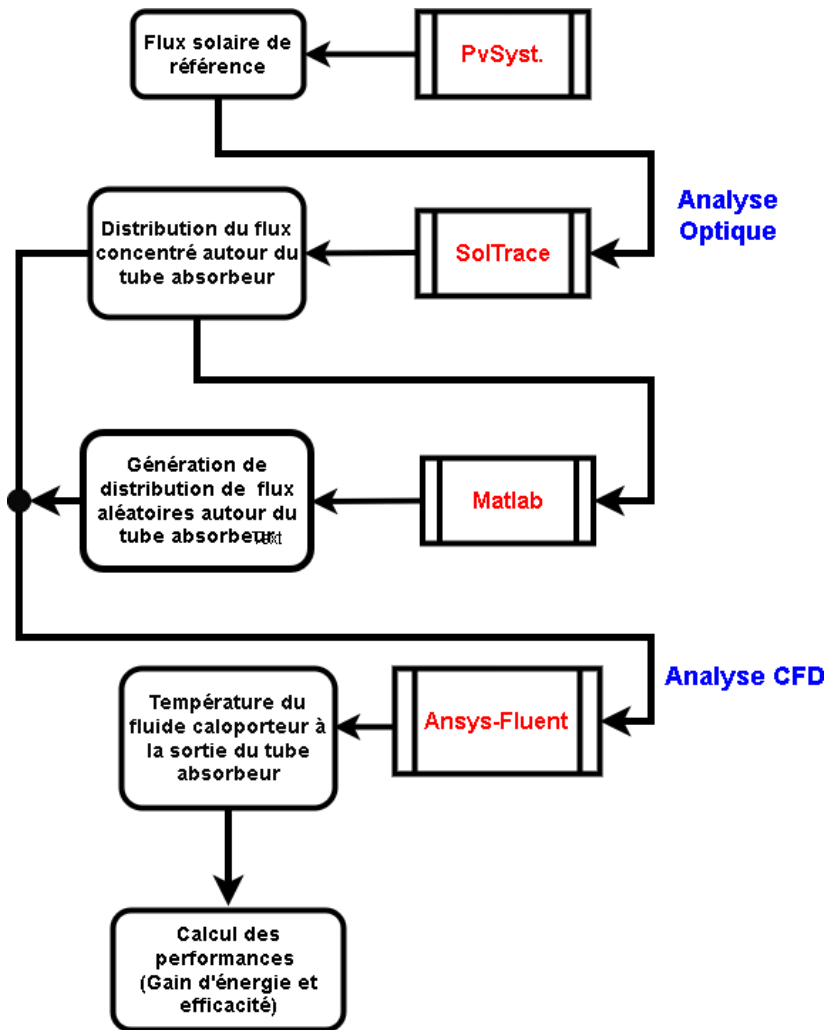


Figure 4.1 Illustration de la méthodologie de simulation d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique.

4. DISTRIBUTION DU FLUX SOLAIRE

Dans cette étude, l'analyse des performances thermiques et optiques du collecteur solaire cylindro-parabolique a été réalisée en prenant en compte différents scénarios de flux solaire. Deux types de distribution du flux solaires concentré sur le tube absorbeur ont été considérés : la distribution du flux de référence et les flux solaires aléatoires.

4.1 Flux de référence

La densité de flux solaire de référence a été générée à l'aide du logiciel PVSyst. Ce dernier a permis de simuler les conditions idéales d'ensoleillement pour la journée du 21 juin 2024, qui est un jour avec un rayonnement solaire maximal en raison de la position optimale du soleil au solstice d'été. Ce flux de référence représente un ciel clair, sans nuages, où l'intensité du rayonnement solaire est maximale. Il sert de base pour les simulations de performance sous des conditions idéales et sera comparé avec les résultats obtenus à partir des flux aléatoires.

A l'aide du code SolTrace, les variations du flux concentré sur le tube absorbeur sont obtenues le long de

toute la journée du 21 Juin 2024. Le tableau 4.1 regroupe les valeurs de la densité de flux solaire de référence et des flux aléatoires concentrés sur le tube durant la période de 5h.00 à 20h.00.

4.2 Flux aléatoires

Pour prendre en compte les variations réelles du rayonnement solaire, trois flux solaires concentrés aléatoires ont été générés à partir des valeurs du flux concentré de référence. Ces flux ont été simulés à l'aide du programme Matlab. Le processus utilisé pour générer ces flux aléatoires repose sur l'introduction de perturbations sur les valeurs du flux solaire de référence afin de simuler des conditions de ciel partiellement nuageux ou des variations dans l'intensité du rayonnement solaire au cours de la journée. Ces flux aléatoires permettent d'évaluer le comportement du collecteur solaire dans des conditions plus réalistes.

4.3 Programme Matlab pour la génération des flux aléatoires

Le programme Matlab suivant a été utilisé pour générer trois séries de flux solaires aléatoires à partir du flux solaire de référence :

```

tableau = [0, 489.731, 4591.23, 8998.81
,13100.3,16569.2,19181.1,20772.8,21180.9,20425.9,18548.6,15671.4,11978,7774.48,3346.5
0];
tableau_aleat = generer_tableau_aleatoire(tableau);
%disp(tableau_aleat);
T='tableau_aleat';

function tableau_aleat = generer_tableau_aleatoire(tableau)
% Vérifier que le tableau commence et se termine par zéro
if tableau(1) ~= 0 || tableau(end) ~= 0
    error('Le tableau doit commencer et se terminer par zéro.');
```

```

end

% Initialiser le générateur de nombres aléatoires pour la reproductibilité
rng('shuffle');
```

```

% Générer le tableau de valeurs aléatoires
tableau_aleat = arrayfun(@(x) x * rand(), tableau);
end
```

Les valeurs des flux solaires aléatoires concentrés sur le tube absorbeur, générées par l'exécution de ce programme, sont présentées dans le tableau 4.1. Toutefois, il convient de souligner que l'exécution répétée de ce programme ne produira pas nécessairement les mêmes résultats que ceux affichés dans le tableau 4.1, en raison de la nature aléatoire des flux générés.

Tableau 4.1 Densité de flux solaires et flux concentré sur le tube absorbeur durant la journée du 21 Juin 2024.

Temps (Heure)	flux solaire (W/m ² K)	Flux concentré de référence (W/m ² K)	Flux aléatoire FA- 01 (W/m ² K)	Flux aléatoire FA- 02 (W/m ² K)	Flux aléatoire FA- 03 (W/m ² K)
5h.00	0	0	0	0	0
6h.00	24	489.731	473	328	152

7h.00	225	4591.23	4074	3267	2244
8h.00	441	8998.81	852	4430	1738
9h.00	642	13100.3	1096	7586	6366
10h.00	812	16569.2	9627	1477	5647
11h.00	940	19181.1	6152	15709	1567
12h.00	1018	20772.8	1491	16737	15217
13h.00	1038	21180.9	6480	15005	11562
14h.00	1001	20425.9	7867	16539	19913
15h.00	909	18548.6	9561	13984	8249
16h.00	768	15671.4	14947	4114	9493
17h.00	587	11978.0	4919	6210	3189
18h.00	381	7774.48	3884	464	4810
19h.00	164	3346.5	3129	1826	2337
20h.00	0	0	0	0	0

5. PERFORMANCES DU SYSTEME DE REFERENCE

Dans cette section, les performances thermiques du système de collecte solaire cylindro-parabolique de référence sont analysées en se concentrant sur la température du fluide caloporteur à la sortie du tube absorbeur. Cette température est un paramètre clé pour évaluer l'efficacité thermique du système, car elle reflète la capacité du collecteur à convertir l'énergie solaire reçue en chaleur utile pour les applications de chauffage ou de production d'électricité.

5.1 Distribution de la température autour du tube absorbeur

Dans la figure 4.2, la distribution de la température correspond à la surface extérieure du tube absorbeur à 13h00, avec l'entrée du fluide caloporteur située à droite. À cette position, la température de la surface métallique est relativement plus basse, avec une valeur d'environ 300 K, car le fluide caloporteur est encore froid à son entrée dans le tube. À mesure que le fluide se déplace à travers le tube, il se réchauffe progressivement, ce qui entraîne une augmentation de la température de la surface du tube. Cette température atteint un maximum d'environ 475 K à l'extrémité gauche du tube, indiquant que le fluide a absorbé une grande quantité de chaleur solaire. Le gradient thermique observé est de 175 K (475 K - 300 K), ce qui témoigne de l'efficacité du transfert de chaleur du tube vers le fluide caloporteur. La température moyenne sur la surface du tube, prenant en compte l'ensemble du profil thermique, est d'environ 387,5 K. Ce phénomène montre que la chaleur est absorbée efficacement par la surface du tube, qui transmet l'énergie au fluide caloporteur.

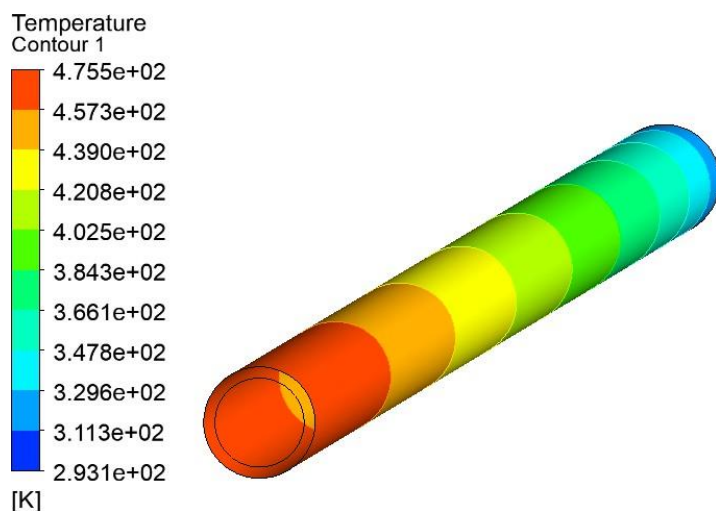


Figure 4.2 Contour des températures autour du tube absorbeur à 13h.00.

5.2 Température du fluide caloporteur à la sortie du tube absorbeur

Les variations de la température du fluide caloporteur à la sortie du tube absorbeur sont présentées dans la Figure 4.3, montrant l'évolution de cette température en fonction de l'heure de la journée.

Cette évolution de la température du fluide caloporteur illustre comment le collecteur solaire réagit aux variations de l'intensité du flux solaire au cours de la journée. Les heures de forte irradiation solaire (entre 10h et 16h) correspondent aux températures les plus élevées, ce qui démontre l'efficacité du système pendant ces périodes. La température maximale enregistrée est de 350 K à 13h.00.

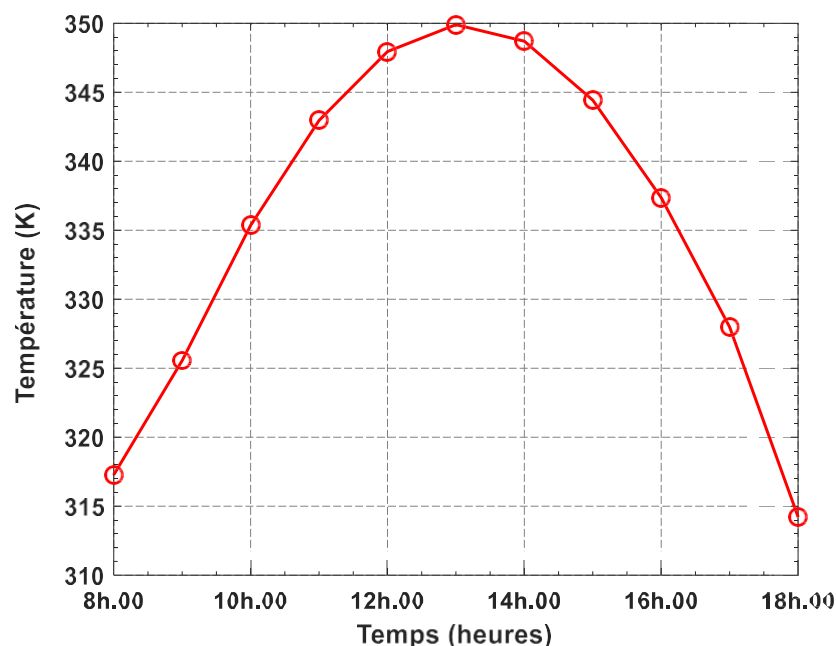


Figure 4.3 Variation de la température du fluide caloporteur à la sortie du tube absorbeur.

5.3 Gain d'énergie thermique (Energie utile)

La Figure 4.4 montre l'évolution de l'énergie utile (gain thermique) générée au cours de la journée. A 8h00 et 18h00, l'énergie utile est relativement faible, autour de 150 W, en raison de l'angle d'incidence plus faible des rayons du soleil. À 13h.00, l'énergie utile atteint son maximum, avoisinant les 350 W, lorsque l'ensoleillement est optimal. La courbe présente une variation symétrique, avec un pic autour de 13h00, indiquant que l'énergie utile augmente de 200 W entre 8h00 et 12h00, puis redescend de manière similaire entre 14h00 et 18h00, avec une diminution de 200 W. Cette évolution illustre l'impact de la position du soleil sur la captation thermique, montrant une efficacité maximale autour de 13h.00 et une baisse en fin de journée.

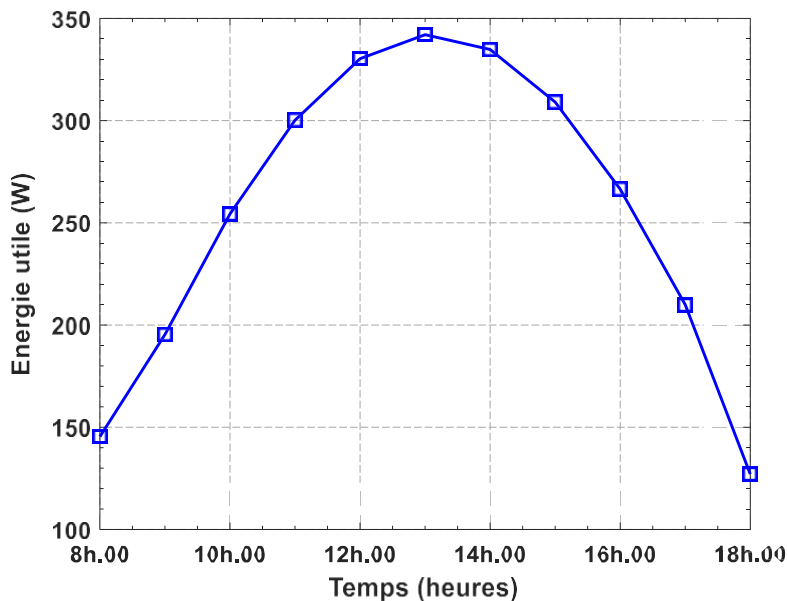


Figure 4.4 Evolution de l'énergie thermique captée par le système au cours de la journée.

5.4 Efficacité thermique du système

L'efficacité thermique du système suit une tendance évolutive tout au long de la journée (voir Figure 4.5). Les observations principales sont les suivantes :

- Efficacité maximale : L'efficacité thermique atteint un pic de 0.3576 à 17h00, indiquant une performance optimale du système à cette heure. Cela suggère que, à cette période, les conditions d'ensoleillement et de fonctionnement du système sont idéales pour maximiser l'absorption thermique.
- Efficacité minimale : À 9h00, l'efficacité est la plus basse à 0.3043, ce qui pourrait être dû à des facteurs tels que l'angle d'incidence du soleil ou la température ambiante plus basse, réduisant ainsi l'efficacité du système à cette heure matinale.
- Tendance générale : Il y a une augmentation progressive de l'efficacité entre 9h00 et 17h00, passant de 0.3043 à 0.3576. Cette hausse suggère que le collecteur fonctionne de manière plus efficace à mesure que la température et l'intensité du rayonnement solaire augmentent au cours de la journée.

→ Efficacité moyenne : L'efficacité moyenne est de 0.3303, ce qui donne un bon aperçu de la performance générale du système sur toute la journée. Cela indique que le système est plutôt stable en termes de rendement thermique, bien que les variations pendant la journée soient notables.

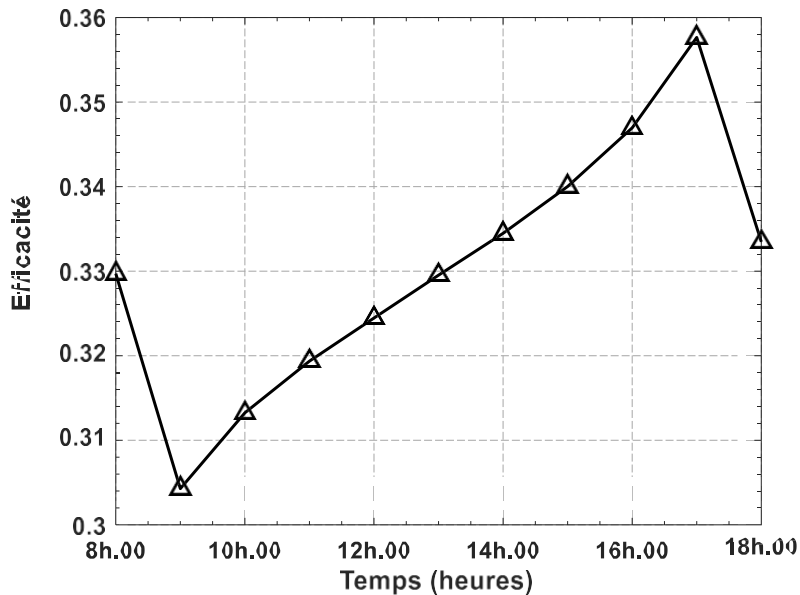


Figure 4.5 Variations de l'Efficacité du système au cours de la journée.

6. Analyse des performances dans des conditions aléatoires

Dans cette section, nous analysons les performances thermiques du collecteur solaire cylindro-parabolique sous des conditions de flux solaire aléatoires, telles qu'elles ont été simulées par le programme Matlab. Ces flux solaires aléatoires, générés à partir du flux de référence, reflètent des scénarios plus proches des conditions réelles d'ensoleillement, qui peuvent varier au cours de la journée en raison des nuages, des fluctuations atmosphériques et d'autres facteurs environnementaux.

L'objectif de cette analyse est de comparer les performances thermiques du collecteur solaire sous ces conditions variables avec celles obtenues dans le cas idéal du flux solaire de référence. En particulier, nous examinerons la variation de la température du fluide caloporteur à la sortie du tube absorbeur pour chaque scénario de flux solaire aléatoire, et nous évaluerons l'impact de cette variabilité sur l'efficacité du système. Cette comparaison permettra de mieux comprendre la capacité du collecteur à fonctionner de manière optimale dans des conditions réelles, où l'intensité du rayonnement solaire est souvent fluctuante.

6.1 Distribution de la température autour du tube absorbeur

La figure 4.6 montre les contours de température autour du tube absorbeur, à 13h.00, pour le système de référence et les trois systèmes où des flux solaires aléatoires (FA-01, FA-02 et FA-03) ont été générés. Le système de référence présente un profil thermique relativement uniforme, avec une distribution progressive des températures allant de 293,1K à 475,5 K, ce qui suggère des conditions idéales sans perturbation et un flux

solaire parfait. En revanche, pour FA-01, les températures sont légèrement inférieures à celles du système de référence, allant de 293,1 K à 348,5 K, ce qui indique une perturbation modérée dans le flux solaire, mais qui n'affecte pas considérablement l'efficacité thermique. Pour FA-02, la température maximale est de 423,0 K, tandis que la température minimale atteint 293,0 K. Ce résultat montre une perturbation plus significative du flux solaire, entraînant une baisse de l'efficacité thermique par rapport au système de référence. Enfin, dans FA-03, les températures varient entre 293,1K et 393,3K, avec des températures plus basses comparées à la référence, ce qui suggère une perturbation encore plus importante du flux solaire. Ces résultats montrent que les perturbations dans le flux solaire, comme celles observées dans FA-02 et FA-03, réduisent l'efficacité thermique du système, ce qui doit être pris en compte dans l'optimisation des collecteurs solaires pour des conditions réelles.

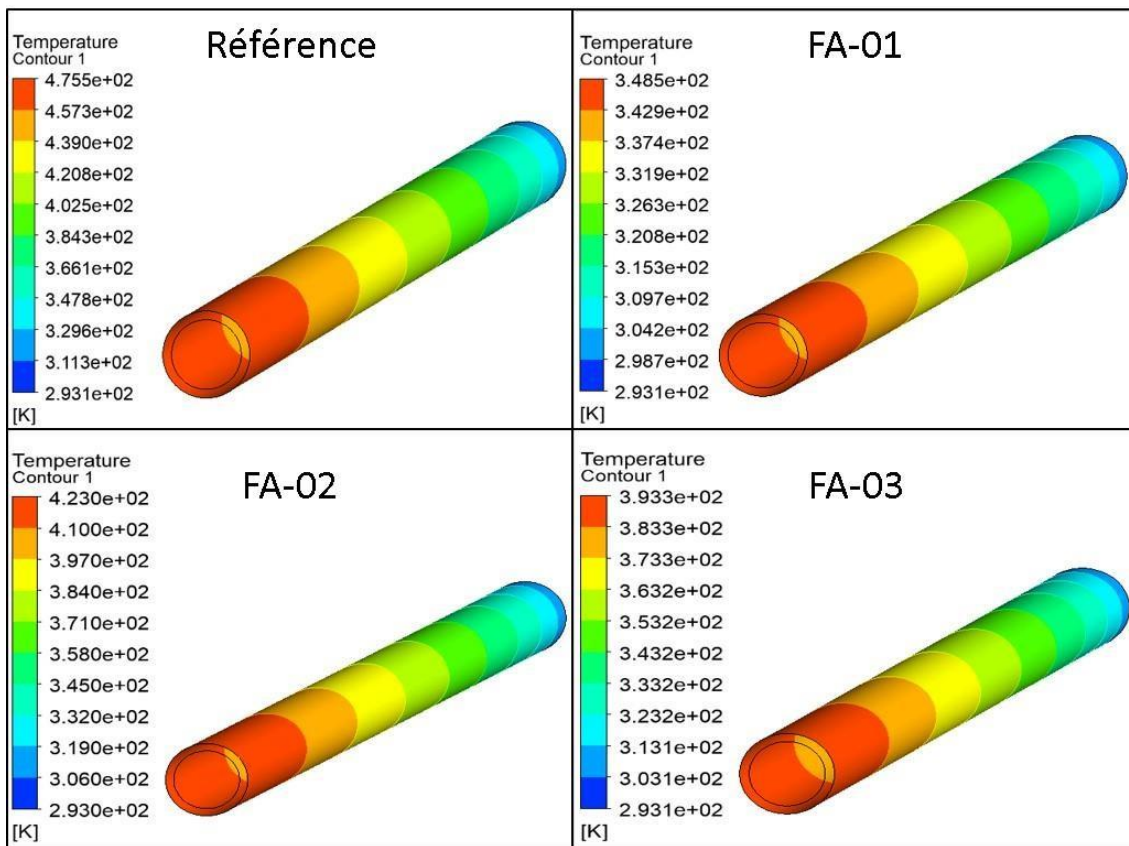


Figure 4.6 Distribution de température sur la surface extérieure du tube absorbeur pour les différents flux solaires générés.

6.2 Programme Matlab pour tracer et comparer les performances

Le programme Matlab suivant lit les tableaux des résultats de la température du fluide caloporteur à la sortie du tube absorbeur, calcul le gain d'énergie et l'efficacité et trace les courbes de comparaison :

```
% Constantes
M = 0.0015;
Cp = 4018;
T0 = 293.15;
A = 1;
```

```

% Noms fichiers CSV
files = {'courbe1.csv', 'courbe2.csv', 'courbe3.csv', 'courbe4.csv'};
file5 = 'courbe5.csv'; % Le cinquième tableau avec I

% Charger 4 premiers tableaux
x_sec = [];
T_mat = [];

for k = 1:length(files)
    Ttable = readtable(files{k});
    if k == 1
        x_sec = Ttable{:,1};
    end
    T_col = Ttable{:,2};
    T_mat(:,k) = T_col;
end

% Charger 5e tableau (I)
Itable = readtable(file5);
x5_sec = Itable{:,1};
I = Itable{:,2};

% Convertir temps en heures + décalage 5h
x_hours = x_sec/3600 + 5;

% Limiter à 8h-18h
idx = (x_hours >= 8) & (x_hours <= 18);
x_valid = x_hours(idx);
T_valid = T_mat(idx, :);
I_valid = I(idx);

% --- Graphe 1 : T_i vs temps ---
figure;
hold on;
colors = lines(size(T_valid,2));
for k = 1:size(T_valid,2)
    plot(x_valid, T_valid(:,k), 'LineWidth', 1.5, 'Color', colors(k,:));
end
xlabel('Temps (heures)');
ylabel('Température T_i');
title('Température T_i en fonction du temps');
xticks_vals = 8 : 2 : 18;
xticks(xticks_vals);
xticklabels_labels = arrayfun(@(h) sprintf('%dh.00', h), xticks_vals, 'UniformOutput',
false);
xticklabels(xticklabels_labels);
xlim([8 18]);
grid on;
hold off;
legend(files, 'Interpreter', 'none');

% --- Calcul Q et E ---
Q = M * Cp * (T_valid - T0); % Calcul de Q
I_valid_nzero = I_valid;
I_valid_nzero(I_valid_nzero == 0) = NaN; % éviter division par zéro
E = Q ./ (I_valid_nzero * A);

% --- Graphe 2 : E_i vs temps ---
figure;

```

```

hold on;
for k = 1:size(E,2)
    plot(x_valid, E(:,k), 'LineWidth', 1.5, 'Color', colors(k,:));
end
xlabel('Temps (heures)');
ylabel('E_i');
title('Calcul de E_i en fonction du temps');
xticks(xticks_vals);
xticklabels(xticklabels_labels);
xlim([8 18]);
grid on;
hold off;
legend(files, 'Interpreter', 'none');

% --- Graphe 3 : Q vs temps ---
figure;
hold on;
for k = 1:size(Q,2)
    plot(x_valid, Q(:,k), 'LineWidth', 1.5, 'Color', colors(k,:));
end
xlabel('Temps (heures)');
ylabel('Q');
title('Calcul de Q en fonction du temps');
xticks(xticks_vals);
xticklabels(xticklabels_labels);
xlim([8 18]);
grid on;
hold off;
legend(files, 'Interpreter', 'none');

```

6.3 Température du fluide caloporteur à la sortie du tube absorbeur

La figure 4.7 montre les variations de la température du fluide caloporteur à la sortie du tube absorbeur en fonction du temps au cours de la journée. Les courbes correspondent à différents scénarios de flux solaire, avec le système de référence et les trois flux solaires aléatoires (FA-01, FA-02, FA-03).

Le système de référence présente une température relativement prévisible, atteignant un pic autour de 13h00, avec une température proche de 350 K, puis diminue progressivement en fin de journée. Ce comportement est caractéristique d'un flux solaire constant et optimal, où le collecteur fonctionne à son rendement maximal pendant les heures les plus ensoleillées.

Les courbes pour les flux solaires aléatoires (FA-01, FA-02, FA-03) montrent des variations beaucoup plus erratiques par rapport à la courbe de référence. Ces fluctuations reflètent l'influence de l'irradiation solaire variable, avec des pics et des creux dans la température du fluide caloporteur à différents moments de la journée. Par exemple, le flux FA-01 présente des variations marquées, avec un pic à 10h puis une chute de température à 14h. FA-02 et FA-03 montrent des comportements similaires, mais avec des différences dans l'intensité des pics et des déclins de température.

Les résultats indiquent que les collecteurs solaires ne peuvent pas maintenir des températures optimales lorsque l'irradiation solaire varie tout au long de la journée. Les courbes des flux solaires aléatoires montrent que le rendement du collecteur solaire baisse lorsque le flux solaire n'est pas constant, ce qui est typique dans

des conditions météorologiques variables (ciel partiellement nuageux, variations des nuages, etc.). Le système de référence (ciel clair) donne des résultats plus stables et plus élevés en température, reflétant l'efficacité maximale du collecteur solaire sous des conditions idéales. Les flux solaires aléatoires montrent une sensibilité aux variations de l'irradiation solaire, et le collecteur devient moins efficace en présence de flux solaires irréguliers.

Les pics et creux dans les courbes des flux solaires FA-01, FA-02, et FA-03 montrent la réponse dynamique du collecteur à l'irradiation solaire fluctuante. Cela indique qu'en présence de variations du ciel ou de conditions nuageuses, les collecteurs solaires perdent une partie de leur capacité à capter l'énergie solaire de manière constante.

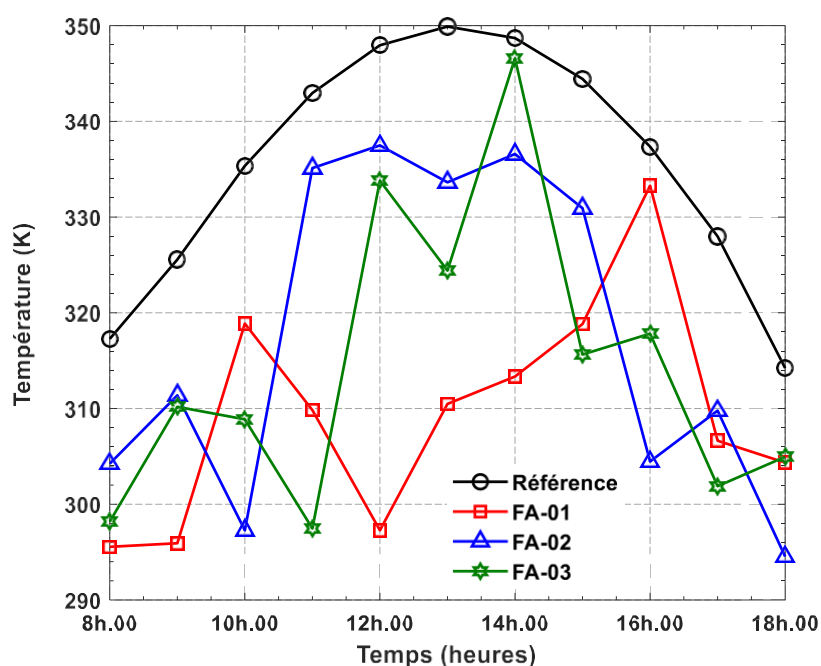


Figure 4.7 Evolution de la température du fluide caloporteur pour différentes conditions de flux solaires.

6.4 Gain d'énergie thermique (Energie utile)

Comme indiqué dans le chapitre précédent, le gain d'énergie thermique est directement lié à la différence de température du fluide caloporteur entre l'entrée et la sortie du tube absorbeur. Ainsi, cette énergie varie de manière similaire à la température du fluide à la sortie du tube, comme l'illustre la figure 4.8.

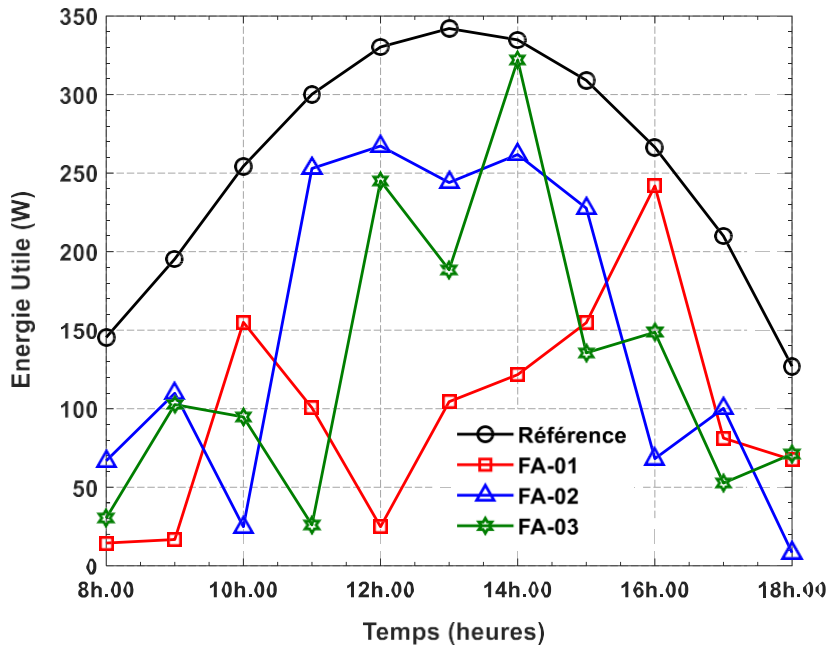


Figure 4.8 Energie utile en fonction du temps pour différentes conditions de flux solaire.

6.5 Efficacité Thermique

L'analyse de l'efficacité thermique du fluide caloporteur à la sortie du tube absorbeur révèle des résultats intéressants (voir Figure 4.9), notamment en comparaison entre le système de référence et les flux solaires aléatoires (FA-01, FA-02, FA-03). Le système de référence, soumis à des conditions idéales avec un ciel clair, présente une efficacité thermique stable au cours de la journée. Les valeurs d'efficacité varient entre 0.3043 pour la valeur minimale, 0.3576 pour la maximale et 0.3303 pour la valeur moyenne, indiquant un rendement proche de 33%. En comparaison, les flux aléatoires montrent des variations beaucoup plus importantes, reflétant l'impact des conditions de ciel variable. Pour le flux FA-01, l'efficacité thermique varie de 0.0244 à 0.3149, avec une moyenne de 0.1277, ce qui est nettement inférieur au système de référence. Ce phénomène suggère que l'efficacité du système est fortement influencée par les fluctuations du flux solaire. Le flux FA-02 présente également des valeurs d'efficacité qui varient entre 0.0219 et 0.2691, avec une moyenne de 0.1739, indiquant un rendement encore plus faible que celui du système de référence, bien qu'il soit légèrement plus élevé que pour FA-01. Enfin, pour le flux FA-03, les valeurs oscillent entre 0.0277 et 0.3217, avec une moyenne de 0.1578, des performances proches de celles de FA-02. Bien que la valeur maximale de FA-03 soit comparable à celle du système de référence, la moyenne reste inférieure, ce qui reflète une variation importante des conditions solaires. Ces résultats montrent que les flux solaires aléatoires entraînent une grande variabilité des performances thermiques par rapport au système de référence, qui demeure stable dans des conditions idéales. L'impact des conditions solaires changeantes est donc déterminant pour l'efficacité d'un collecteur solaire, soulignant la nécessité d'optimiser ces systèmes pour des conditions moins prévisibles. Les flux solaires aléatoires affichent une efficacité moyenne bien inférieure à celle du système de référence, ce qui illustre la

différence entre des conditions idéales et réelles pour le fonctionnement des collecteurs solaires.

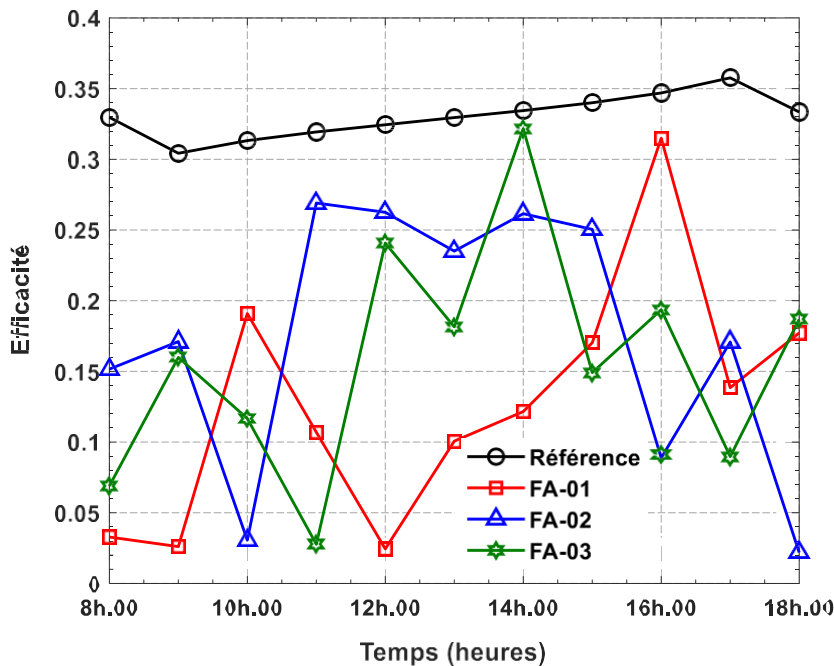


Figure 4.9 Evolution de l'efficacité du système au cours de la journée pour différentes conditions de flux solaires

7. CONCLUSION

Ce chapitre présente une analyse approfondie des performances d'un collecteur solaire cylindro-parabolique sous des conditions de flux solaires variables. Il est structuré en deux sections principales : la méthodologie des simulations et la discussion des résultats obtenus pour différentes conditions de flux solaire.

La première partie du chapitre détaille la méthodologie utilisée, qui comprend plusieurs étapes : la génération du flux solaire de référence à l'aide du logiciel PVSyst pour une journée idéale, la détermination de la distribution du flux concentré sur le tube absorbeur avec SolTrace, et la simulation de flux solaires aléatoires à l'aide de Matlab. Ces flux aléatoires ont été intégrés dans des simulations thermiques réalisées dans Ansys-Fluent, afin d'évaluer les performances du collecteur sous différentes conditions de flux.

La deuxième partie présente l'analyse des résultats obtenus pour les performances thermiques et optiques du collecteur solaire. Les performances étudiées incluent la température du fluide caloporteur à la sortie du tube absorbeur, le gain d'énergie thermique, et l'efficacité thermique du système. Les résultats montrent que, sous des conditions idéales (flux solaire de référence), le collecteur solaire atteint une température élevée du fluide caloporteur, avec une efficacité thermique stable et maximale en milieu de journée. En revanche, sous des conditions réelles de flux solaires aléatoires, la performance du collecteur varie considérablement. Les flux solaires aléatoires entraînent une baisse de la température du fluide et de l'efficacité thermique, ce qui illustre

l'impact des fluctuations du rayonnement solaire sur le rendement du système.

L'étude met en évidence que, bien que le collecteur fonctionne de manière optimale en conditions idéales, sa performance est fortement influencée par les variations du flux solaire dues à des facteurs externes tels que les nuages ou les changements d'irradiation. En conclusion, ce chapitre souligne l'importance d'optimiser les collecteurs solaires pour les rendre plus robustes face aux conditions environnementales variables, afin d'assurer leur efficacité dans des situations réelles de fonctionnement.

Conclusion générale

Ce travail visait à analyser les performances d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique sous des conditions réelles d'ensoleillement, en utilisant des flux solaires aléatoires générés à partir d'un flux de référence. L'objectif était de comparer les performances du système sous ces flux réels avec celles obtenues sous des conditions idéales, à savoir un ciel clair.

La méthodologie a consisté à générer un flux solaire de référence pour un jour idéal (21 juin 2024), puis à simuler trois scénarios de flux solaires aléatoires à l'aide de Matlab. Ces flux ont été intégrés dans des simulations thermiques avec le logiciel ANSYS Fluent, permettant d'évaluer la température du fluide caloporteur et l'efficacité thermique du système dans des conditions variables. Les trois scénarios aléatoires (FA-01, FA-02, FA-03) ont montré une grande variabilité des performances par rapport au système de référence, qui fonctionnait dans des conditions idéales.

Les résultats ont révélé que, sous des conditions idéales, la température du fluide caloporteur atteignait une température maximale d'environ 350 K en milieu de journée, tandis que pour les flux solaires aléatoires, les températures étaient plus variables, avec des pics et des chutes marquées tout au long de la journée. Par exemple, pour FA-01, la température variait entre 293,1 K et 393,3 K, et pour FA-02, elle oscillait entre 293,1 K et 423,0 K, ce qui montre une perturbation notable du flux solaire.

Concernant l'efficacité thermique du collecteur, elle était stable et atteignait des valeurs maximales autour de 33 %, avec une variation entre 0.3043 et 0.3576. En revanche, les flux solaires aléatoires ont montré des rendements beaucoup plus faibles. Par exemple, sous le flux FA-01, l'efficacité thermique variait de 0.0244 à 0.3149, avec une moyenne de 0.1277. Pour le flux FA-02, les valeurs d'efficacité variaient entre 0.0219 et 0.2691, avec une moyenne de 0.1739, et enfin, pour FA-03, les valeurs oscillaient entre 0.0277 et 0.3217, avec une moyenne de 0.1578.

Ces résultats montrent que les fluctuations du rayonnement solaire, comme celles observées dans ces scénarios, réduisent considérablement les performances du système comparées à celles obtenues sous des conditions idéales.

Les résultats obtenus soulignent l'importance d'optimiser les concentrateurs solaires pour mieux gérer les variations du rayonnement solaire et maximiser leur efficacité dans des conditions réelles. Les perspectives pour de futures recherches incluent la validation expérimentale de ces simulations sur le terrain, l'exploration de nouveaux matériaux, l'intégration de matériaux à changement de phase et l'addition de nanoparticules au fluide caloporteur pour améliorer l'efficacité thermique.

Références bibliographiques

- [1]Énergies du XXIe SIÈCLE, Livret thématique n°19 de la collection CEA Jeunes.
- [2]Z. jagoo, tracking solar concentrators a mow budget solution,(2013).
- [3]F.muhammad-sukki, R. ramirez-iniguez, S.G. mc meekin, B.G. stewart & B. clive,
- [4]: L'abe des technologies de l'énergie rnouvelable , septembre 2003, www.pollutionprobe.org
- [5]A, Sfeir ; G, Guarracino. Ingénierie des systèmes solaires, Technique et Documentation, Paris. (1981).
- [6]Ch, Perrin de Brichambaut; C, Vauge. Le gisement solaire, Technique et Documentation, Paris. (1982).
- [7]J, A, Duffie; W, A, Beckman. Solar engineering of thermal processes, John Wiley and Sons. (1980).
- [8]O, Sotehi. Etude des caractéristiques de fonctionnement et de la performance d'un distillateur solaire; thèse de magistère, Université de Constantine. (2009).
- [9]P, H, Communay. Héliothermique : le gisement solaire, méthodes et calculs, Groupe de Recherche et d'Edition, France. (2002).
- [10]N, Bellel. Contribution à la réalisation et simulation d'un capteur plan à eau type collecteur; thèse de magistère, Université de Constantine. (1989).
- [11]J, Bonal; P, Rossetti. Les énergies alternatives, Omniscience. (2007).
- [12]U, Eiker. Solar technologies for buildings, John Wiley sans Sons, England. (2001).
- [13]J, Bernard. Energie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing. (2004).
- [14]Arirabl, active solar collectors and their applications, New York Oxford university press, (1985). solar concentrator, international journal of applied Sciences (IJAS).
- [15]Marif.Y, Benmoussa. H, Bouguettaia. H, Bechki. D, Belhadj. M. M, Boughali. S, 2010. Concentrateur cylindro-parabolique et ses applications dans le sud algérien.
- [16] NERL, **“Concentrating solar power research – SolTrace”**. 2012
- [17]. S, A, Kalogirou. Solar thermal collectors and applications, Progress in Energy and Combustion Science N° 30 , pp. 231-295 , (2004).
- [18]Z, Haddad. Etude du couplage d'un distillateur solaire avec un capteur plan, thèse
- [19]J, Bernard. Energie solaire, calculs et optimisation. Ellipse Edition Marketing. Paris. (2004).
- [20] **ANSYS_CFXTheory Guide. (2019), ANSYS Inc.: ANSYS Inc .**
- [21] Sadia REMILI. **“Optimisation des méthodes de modélisation de la pollution du trafic automobile”**. Thèse de Magister 2010 de l'Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf Oran.
- [22] **International Energy Agency – SolarPACES. Parabolic Trough Collector Technology.**
- [23] **INES. Capteurs solaires thermiques à concentration**, Institut National de l'Énergie Solaire
- [24] **INES. Technologie des capteurs solaires à concentration, Institut National de l'Énergie Solaire,**
- [25] **Office National des Statistiques (ONS). Données géographiques sur l'Algérie**
- [26]**M inistère de l'Énergie et des Mines. Potentiel solaire de l'Algérie – données statistiques, Algérie**

- [27] APRUE (Agence de Promotion pour la Rationalisation de l'Utilisation de l'Énergie)

[28] PVsyst SA. *PVsyst – Software for PV System Design and Analysis*

[29] INES. *Technologie et dimensionnement des capteurs cylindro-paraboliques*, Institut National de l'Énergie Solaire.

[30] Duffie, J.A. & Beckman, W.A. *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4e éd., John Wiley & Sons, 2013.

[31] *ANSYS Fluent Theory Guide*, Release 2023 R1, ANSYS Inc., Canonsburg, PA, USA.

