



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 : \* LAHAG Abdenour \* MILOUDI Med Salaheddine

**DOMAINE : SCIENCES et TECHNOLOGIES.**

**FILIERE : GENIE MECANIQUE**

**OPTION : Energies Renouvelables**

**Thème**

**L'effet De L' Ajout Des Ailettes A l' intérieur Du Tube  
Absorbeur Sur Les Performances Thermiques De  
Concentrateur Solaire CCP**

**Jury de soutenance :**

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
Pr. B.Ghernaout	Pr	Président
Dr. L.Benhouia	MCB	Examineur
Dr.H.REGUE	MCB	Encadreur

**Année Universities: 2023/2024**

# Remerciements

*NOUS AVONS L'HONNEUR D'EXPRIMER NOTRE PROFONDE GRATITUDE ET NOTRE RECONNAISSANCE À TOUS CEUX QUI ONT CONTRIBUÉ À LA RÉALISATION DE CETTE THÈSE, TANT SUR LE PLAN ACADÉMIQUE QUE PERSONNEL.*

*NOUS SOUHAITONS EXPRIMER NOTRE SINCÈRE GRATITUDE À NOTRE SUPERVISEURE, MADAME REGUE HANANE MARIA QUI N'A PAS HÉSITÉ À NOUS PRODIGUER SES CONSEILS AVISÉS ET SON SOUTIEN CONTINU TOUT AU LONG DE LA PRÉPARATION DE CETTE THÈSE. SES ORIENTATIONS ET SES PRÉCIEUX CONSEILS ONT ÉTÉ UNE SOURCE D'INSPIRATION POUR NOUS ET ONT GRANDEMENT CONTRIBUÉ AU DÉVELOPPEMENT DE CE TRAVAIL.*

*NOUS TENONS ÉGALEMENT À REMERCIER LE CHEF DU DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE, LE DOCTEUR EL HADJ AÏSSA AÏSSA , AINSI QUE TOUS NOS ESTIMÉS PROFESSEURS DU DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE DE L'UNIVERSITÉ AMAR TELIDJI DE LAGHOUAT, POUR LEUR SAVOIR ET LEUR EXPERTISE, ET POUR LEURS EFFORTS DÉPLOYÉS AFIN DE SURMONTER LES DIFFICULTÉS ET DE FOURNIR UN ENVIRONNEMENT ÉDUCATIF STIMULANT.*

*NOUS N'OUBLIONS PAS NOTRE ONCLE CHÉRIF, QUI EST TOUJOURS PRÊT À OFFRIR SON AIDE ET SON SOUTIEN. ENFIN, NOUS EXPRIMONS NOTRE PROFONDE GRATITUDE À NOS COLLÈGUES DE CLASSE, QUI ONT ÉTÉ UN SOUTIEN CONSTANT TOUT AU LONG DE CE VOYAGE ACADÉMIQUE, PAR LEURS ENCOURAGEMENTS ET LEUR SOUTIEN CONTINU. EN DERNIER LIEU, NOUS ADRESSONS NOS PLUS SINCÈRES REMERCIEMENTS À NOTRE FAMILLE BIEN-AIMÉE, POUR LE SOUTIEN MORAL ET MATÉRIEL QU'ELLE NOUS A APPORTÉ.*

*PUISSIEZ-VOUS TOUS DEMEURER UN PILIER ET UN SOUTIEN POUR CHAQUE ÉTUDIANT ET CHERCHEUR AMBITIEUX.*

# *Dédicace*

## **À mon père cher,**

Toute l'encre du monde ne pourrait suffire pour exprimer mes sentiments envers un être très cher. Vous avez toujours été mon école de patience, de confiance et surtout d'espoir et d'amour. Vous êtes et vous resterez pour moi ma référence, la lumière qui illumine mon chemin. Ce travail est le résultat de l'esprit de sacrifice dont vous avez fait preuve, de l'encouragement et le soutien que vous ne cessez de manifester. J'espère que vous y trouverez les fruits de votre semence et le témoignage de ma grande fierté de vous avoir comme père. Que Dieu, le Tout-Puissant, vous accorde une bonne santé, une longue vie et beaucoup de bonheur.

## **À ma chère mère**

Aucune dédicace, chère maman, ne pourrait exprimer la profondeur des sentiments que j'éprouve pour vous. Vos sacrifices innombrables et votre dévouement ont été pour moi un encouragement constant. Vous avez veillé sur mes pas et m'avez couvé de tendresse. Votre prière et votre bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Vous m'avez aidé et soutenu pendant de nombreuses années avec une attention renouvelée à chaque fois. Puisse Dieu, le Tout-Puissant, vous combler de santé, de bonheur et vous procurer une longue vie.

## **À mes frères**

Ces quelques lignes ne sauraient traduire le profond amour que je vous porte. Votre bonté, votre précieux soutien, et votre encouragement tout au long de mes années d'études, ainsi que votre amour et votre affection, ont été pour moi des exemples de persévérance. Je trouve en vous le conseil du frère et le soutien de l'ami. Que ce travail soit l'expression de mon estime pour vous, et que Dieu vous protège, vous accorde santé, succès et plein de bonheur dans vos vies.

## **À ma famille**

Je vous dédie cet accomplissement, le fruit de mon succès que j'ai tant souhaité réaliser.

## **À mon équipe au travail**

Qui ont fait preuve de patience et de dévouement en mon absence,

## **À tous mes amis et proches.**

Aujourd'hui, j'ai achevé et accompli la première de ses réalisations grâce à Dieu, le Tout-Puissant.

**LAHAG ABDENOUR**

# Dédicace

*Au nom d'Allah le clément et miséricordieux qui m'a tout donné qui m'a entouré de bénédictions.*

*Je dédie ce travail à moi-même, à tous ceux qui m'ont aidé et soutenu.*

***A toi mon père** tu es pour moi une bénédiction, toi qui a fait tout pour que je sois ce que je suis aujourd'hui, tu m'as appris le savoir vivre, le savoir être, et le savoir-faire.*

*Qu'Allah te garde parmi nous le plus longtemps que possible.*

***A ma mère**, il est impossible d'exprimer ma reconnaissance, tu étais présente pendant ce long processus, ce travail est l'œuvre de tes conseils, tu m'as supporté soutenu dans les moments de difficultés comme dans les moments de joies.*

*Qu'Allah t'accorde grâce sur grâce.*

***A mes chers frères et sœurs***

*Vous êtes le grand apport pour moi pendant le long de ce travail, merci pour votre soutien sans faille.*

***A ma chère***

*Toi qui est ma perle rare, je veux passer le reste de ma vie à tes côtés, je vois mon avenir mes réussites avec toi.*

*J'ai envie de créer une famille avec toi, quoi de plus merveilleux que de t'avoir mon épouse.*

***A mes amis***

*Enfin, je dédie avec l'expression de ma reconnaissance, ce modeste travail à mes amis qui sont mes frères qui ont le plaisir de partager ma joie en ce jour béni.*

*A tous ceux dont les noms ne sont pas mentionnés par omission d'esprit et non de fait exprès merci pour tout.*

**MILOUDI MOHAMMED SALAH EDDINE**

## Résumé :

Ce mémoire est consacré à l'analyse des performances thermiques d'un capteur solaire cylindro-parabolique. L'objectif principale est d'étudier l'effet de la disposition d'ailettes à l'intérieure du tube absorbeur. L'analyse consiste à faire une comparaison entre différents cas (avec et sans ailettes), L'étude est organisée en deux parties, la première concerne l'utilisation du logiciel PVSYST pour acquérir les valeurs numériques temporelles du flux de chaleur solaire pour la ville de Laghouat (ALGÉRIE), les valeurs de densité de flux solaire pour quatre jours (21 juin ,21septembre ,21 décembre ,21 mars ) ont été calculées, le code de traçage des rayons Sol-Trace basé sur la méthode de Monte Carlo (MCM) est utilisé pour déterminer la répartition du flux thermique sur la surface latérale du tube récepteur. Dans la deuxième partie, le logiciel ANSYS-FLUENT est utilisé pour simuler le transfert de chaleur conjugué dans le tube absorbeur. Avec l'utilisation de l'eau comme un fluide caloporteur. La simulation a été faites pour un cas ou quatre ailettes ont été ajoutées à l'intérieure du tube absorbeur ainsi que la disposition d'un réflecteur secondaire. Les résultats de la simulation pour le premier cas (tube simple ) montrent que les températures maximales du fluide et l'efficacité du système sont atteintes au cours du mois de juin ( 73 °C, 40%) alors que les valeurs minimales sont obtenues au mois de décembre (45°C, 32%), Cependant, pour les mois de septembre et mars (58 °C, 32%) de plus, pour le deuxième cas on enregistre des valeurs supérieure pendant le mois de juin soit une températures maximales ( 86.8 °C, 49%), des valeurs minimales pour le mois de décembre (50.5 °C, 39% ) et pour les mois de septembre et mars (77 °C, 48%), En outre, les performances du système peuvent être amélioré en utilisant des ailettes à l'intérieur du tube avec un rapport d'environ 1.49à 1.21

**Mots clés :** Concentrateur cylindro-parabolique ; Tube Absorbeur ; Réflecteur secondaire ; Ailettes ; Monte Carlo

## ملخص:

### الكلمات المفتاحية:

يهدف هذا المذكرة إلى تحليل الأداء الحراري لجهاز الاستقطاب الشمسي الأسطوانى-القطري. الهدف الرئيسي هو دراسة تأثير توجيه الزعانف داخل أنبوب الامتصاص. يتضمن التحليل مقارنة بين حالات مختلفة (مع وبدون زعانف). تم تنظيم الدراسة إلى جزئين، الجزء الأول يتعلق باستخدام برنامج PVSYST للحصول على القيم الرقمية الزمنية لتدفق الحرارة الشمسية لمدينة الأغواط (الجزائر)، تم حساب قيم كثافة تدفق الطاقة الشمسية لأربعة أيام (21 يونيو، 21 سبتمبر، 21 ديسمبر، 21 مارس). تم استخدام برنامج SolTrace لتحديد توزيع التدفق الحراري على السطح الجانبي لأنبوب الاستقبال بناءً على طريقة مونتني كارلو. في الجزء الثاني، تم استخدام برنامج ANSYS-FLUENT لمحاكاة نقل الحرارة المتضمن داخل أنبوب الامتصاص. تمت المحاكاة لحالة حيث تمت إضافة أربع زعانف داخل أنبوب الامتصاص بالإضافة إلى توجيه مرايا عاكسة ثانوية. أظهرت نتائج المحاكاة للحالة الأولى (أنبوب بسيط) أن درجات الحرارة القصوى للسائل وكفاءة النظام تحقق في شهر يونيو (73 درجة مئوية، 40٪) بينما تتحقق القيم الدنيا في ديسمبر (45 درجة مئوية، 32٪). ومع ذلك، لشهر سبتمبر ومارس (58 درجة مئوية، 32٪). بالإضافة إلى ذلك، يتم تحسين أداء النظام من خلال استخدام الزعانف داخل الأنبوب بنسبة تتراوح بين 1.49 إلى 1.21..

**كلمات مفتاحية:** مجمع شمسي أسطوانى; قطعة-قطبية ; أنبوب امتصاص ; مرآة توجيهية ثانوية ; أجنحة ; مونتني كارلو

## **Abstract:**

---

This thesis is dedicated to the thermal performance analysis of a cylindrical-parabolic Solar collector. The main objective is to study the effect of fin arrangement inside the absorber tube. The analysis involves comparing different cases (with and without fins). The study is organized into two parts. The first part involves using PVSYST software to acquire the temporal numerical values of solar heat flux for the city of Laghouat (ALGERIA). Solar flux density values for four days (June 21, September 21, December 21, March 21) have been calculated. SolTrace ray tracing code based on the Monte Carlo method is used to determine the distribution of thermal flux on the lateral surface of the receiver tube.

In the second part, ANSYS-FLUENT software is used to simulate conjugate Heat transfer in the absorber tube, using water as a heat transfer fluid. The simulation was conducted for a case where four fins were added inside the absorber tube along with the arrangement of a secondary reflector. The simulation results for the first case (simple tube) show that the maximum fluid temperatures and system efficiency are achieved during June (73°C, 40%), while the minimum values are obtained in December (45°C, 32%). However, for September and March (58°C, 32%), there are additional improvements. Furthermore, for the second case, higher values are recorded during June, with maximum temperatures (86.8°C, 49%), minimum values for December (50.5°C, 39%), and for September and March (77°C, 48%). Additionally, the system performance can be enhanced by using fins inside the tube with a ratio of approximately 1.49 to 1.21.

**Key words:** Cylindrical-parabolic concentrator; Absorber tube; Secondary reflector; Fins; Monte Carlo.

# TABLE DES MATIERES

Remerciements .....	1
Résumé :.....	4
<i>TABLE DES MATIERES</i> .....	6
<i>LISTE DES FIGURES</i> .....	8
<i>LISTE DES TABLEAUX</i> .....	10
NOMENCLATURE .....	11
Introduction générale.....	13
Chapitre I :.....	18
Le rayonnement et l'énergie solaire.....	18
I. 1 Introduction : .....	18
I.2. Le soleil : .....	18
I.2.1. L'origine de l'énergie solaire : .....	18
I. 2.2 Carte d'identité du soleil .....	19
I. 2.3 L'histoire de l'énergie solaire : .....	20
I. 3 Construction physique du soleil : .....	21
I. 3.1 L'intérieur : .....	21
I. 3.2 La photosphère : .....	22
I. 4 La couronne : .....	23
I. 4 Constante solaire : .....	23
I. 5 Le rayonnement solaire : .....	24
I. 5.1 Corps noir : .....	24
I. 5.2 Corps gris : .....	24
I. 6.1 Rayonnement solaire direct : .....	25
I. 6.2 I.5.2 Rayonnement diffus : .....	25
I. 6.3 Rayonnement réfléchi (albédo) :.....	25
I. 6.4 I.5.4. Rayonnement global : .....	26
I. 7 Le gisement solaire en Algérie : .....	27
I. 8 Différents types d'utilisation d'énergie solaire : .....	28
I. 8.1 L'énergie passive : .....	29
I. 8.2 L'énergie thermique : .....	29
I. 8.4 L'énergie thermodynamique : .....	29
➤ Les centrales solaires à miroir de Fresnel : .....	32
I. 8.5 L'énergie photovoltaïque : .....	34
I. 9 Types d'énergies renouvelables : .....	34
I. 9.1 Énergie éolienne : .....	34
I. 9.2 Énergie hydraulique : .....	35
I. 9.3 Énergie géothermique : .....	37

I.9.4	Énergie Biomasse :	38
I.9.5	Énergie solaire :	39
I.10	Conclusion :	39
<b>Chapitre II : étude géométrique et thermique du CCP</b>		<b>40</b>
II.1.	Introduction :	41
II.2	Le concentrateur cylindro parabolique :	41
II. 2.1	Le réflecteur parabolique :	41
II. 2.2	Le tube absorbeur :	41
II. 3	Les fluides caloporteurs : [27]	42
II. 3	La géométrie et l'optique des concentrateurs cylindro-parabolique :	43
II. 3.1	Les paramètres géométriques :[27]	43
II. 3.2	Les paramètres Optiques :	46
II.4	Le système de suivi solaire :	47
II. 5	Le Bilan thermique du tube absorbeur :[32]	49
II. 5.1	Le bilan thermique du fluide :	50
II. 5.2	Le bilan thermique de tube absorbeur :	51
II. 5.3	Le bilan thermique de l'enveloppe en verre :	53
<b>Chapitre III : Modélisation et résolution numérique</b>		<b>59</b>
III.2	Collecteur à cylindre parabolique contrôlé avec réflecteur secondaire	60
III.2.1	Matériels et méthodes :	60
III.3	Représentation schématique :	61
III. 4	Présentation de Logiciel parabola Calculatoire 2.0 :	62
III. 6	Présentation de Logiciel SolTrace :[45]	66
III.7	Présentation de Logiciel matlab [46]:	69
III. 8	Présentation du logiciel ANSYS [47] :	71
III. 8.6	Les équations gouvernantes :	78
III. 9	Conclusion :	80
<b>Chapitre IV : Résultats et discussion</b>		<b>81</b>
IV. 1	Introduction :	82
IV.2	Modélisation optique de différentes géométries de réflecteur secondaire :	82
IV. 3	Présentation et interprétation des résultats :	84
IV. 4	Résultats de la simulation du modèle sur SolTrace :	87
IV.5	Présentation et interprétation des résultats ANSYS :	88
IV.5.1	Étude Comparative de la performance d'un CCP avec deux cas sans et avec ailettes :	88
IV.5.1.1	Cas du tube absorbeur simple :	88
VI.5.1.3	Le comparution entre deux cas (tube simple et tube avec ailettes):	94
•	Température de sortie :	94
IV.6	Conclusion :	99
Conclusion general		102

# LISTE DES FIGURES

## Chapitre I : le rayonnement et l'énergie solaire

FIGURE I. 1 : CARTE D'IDENTITE DU SOLEIL .....	19
FIGURE I. 2 : LA PHOTOSPHERE SOLAIRE .....	22
FIGURE I. 3: <i>COURONNE SOLAIRE VISIBLE EN FRANCE LORS DE L'ECLIPSE SOLAIRE DU 11 AOUT 1999</i> .....	23
FIGURE I. 4 : STRUCTURE DU SOLEIL EN COUP .....	23
FIGURE I. 5 : ANALYSE SPECTRALE DU RAYONNEMENT SOLAIRE .....	25
FIGURE I. 6 : COMPOSANTES DU RAYONNEMENT SOLAIRE AU SOL .....	26
FIGURE I. 7 : L'ENERGIE SOLAIRE DANS LE MONDE .....	27
FIGURE I. 8 : POTENTIEL D'ENERGIE SOLAIRE EN ALGERIE.....	28
FIGURE I. 9 : PRINCIPALES TECHNOLOGIES DE CONCENTRATION SOLAIRE [21].....	30
FIGURE I. 10 : LES CENTRALES A TOUR [22] [11] .....	31
FIGURE I. 11 : LES CENTRALES A CAPTEURS PARABOLIQUES [23][12].....	32
FIGURE I. 12 : LES CENTRALES SOLAIRES A MIROIR DE FRESNEL [24][13].....	32
FIGURE I. 13: LES CENTRALES A COLLECTEURS CYLINDRE-PARABOLIQUES [24] [13] .....	33
FIGURE I. 14: UN CHAMP D'EOLIENNES.....	35
FIGURE I. 15 : SCHEMA DE PRODUCTION D'ELECTRICITE PAR L'HYDRAULIQUE .....	36
FIGURE I. 16 : LA REPARTITION DE LA TEMPERATURE DANS LE GLOBE TERRESTRE.....	37
FIGURE I. 17 : UN SCHEMA ILLUSTRANT LA BIOMASSE.....	38

## Chapitre II : Etude géométrique et thermique du CCP

FIGURE II. 1 : STRUCTURE DE TUBE ABSORBEUR.....	42
FIGURE II. 2 : LES PARAMETRES GEOMETRIQUES D'UN CYLINDRO PARABOLIQUE [27] .....	43
FIGURE II. 3: CHEMIN DES RAYONS PARALLELES DANS UN MIROIR PARABOLIQUE [27].....	44
FIGURE II.4 : RELATION ENTRE L'ANGLE D'OUVERTURE ET LA VALEUR A/F [27].....	45
FIGURE II. 5 : RELATION ENTRE LA FOCAL ET L'ANGLE D'OUVERTURE POUR UNE OUVERTURE CONSTANTE [27] .....	45
FIGURE II. 6: SURFACE D'OUVERTURE DU COLLECTEUR ET SURFACE D'OUVERTURE DU RECEPTEUR [28].....	46
FIGURE II. 7: LE CONCENTRATEUR CYLINDRO PARABOLIQUE EN POSITION DE SUIVI [30].....	47
FIGURE II. 8: ORIENTATION DE CONCENTRATEURS CYLINDRO PARABOLIQUE [31].....	48
FIGURE II. 9: SIMULATION DE L'INFLUENCE DE L'ORIENTATION A PSA DU COLLECTEUR ET-100 .....	49
FIGURE II. 10: SCHEMA DU BILAN ENERGETIQUE D'UN ELEMENT X DU COLLECTEUR CCP.....	50
FIGURE II. 11 : VALEURS DES VITESSES DE FLUIDE SUR UNE SECTION TRANSVERSALE DU TUBE ABSORBEUR POUR DIFFERENTS T .....	55
FIGURE II. 12 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES GEOMETRIES CONSIDEREES AVEC DIFFERENTS (A) NOMBRES D'AILETTES INSEREES ET (B) ZONES DE SECTION TRANSVERSALE DES AILETTES INSEREES.....	56
FIGURE II. 13 : AILETTES LONGITUDINALES INTERIEUREMENT RECTANGULAIRES AVEC FORME DE BORD ARRONDI (MODELE ACTUEL).....	57
FIGURE II. 14 : DIAGRAMME SCHEMATIQUE DU PTC EXAMINE, (B) VUE LATERALE DU PTC ET (C) TUBE RECEPTEUR.....	58

## Chapitre III : Modélisation et résolution numérique

FIGURE III. 1 : MODULE CCP AVEC REFLECTEUR SECONDAIRE .....	60
FIGURE III.2: SCHEMA D'UN TUBE ABSORBEUR.....	61
FIGURE III. 3: SCHEMA D'UN CCP AVEC REFLECTEUR SECONDAIRE .....	62
FIGURE III.4: SURFACE LOGICIEL PARABOLA .....	63
FIGURE III. 5: SURFACE LOGICIEL PV SYST .....	64
FIGURE III. 6:ETAPES DU FICHER DE DONNEES METEOROLOGIQUES DANS PVSYST.....	64
FIGURE III. 7 :SCHEMA DE RECEPTEUR ET REFLECTEUR ET DU DEUXIEME REFLECTEUR AVEC LE LOGICIEL SOLTRACE. ....	67
FIGURE III. 8:SCHEMA DE CONCENTRATEUR CYLINDRO-PARABOLIQUE AVEC LE LOGICIEL SOLTRACE. ....	67
FIGURE III. 9 : DISTRIBUTION MOYENNE DU FLUX THERMIQUE AU NIVEAU DE L'ABSORBEUR AVEC IND=1000 [W/M2] EN 3D .....	68
FIGURE III. 10: L'INTERFACE DE WORKBENCH.....	71
FIGURE III. 11: LA GEOMETRIE AVEC DESIGN MODELER.....	72
FIGURE III. 12 : LA GEOMETRIE DU TUBE ABSORBEUR .....	72
FIGURE III. 13: INTERFACE DE SOLVEUR FLUENT .....	73

FIGUREIII. 14: FLUENT CALCUL DES RESIDUS.....	74
FIGUREIII. 15: ANSYS WORKBENCH DESIGN MODELER CAS DU TUBE AVEC 4 AILETTES .....	76
FIGUREIII. 16: ANSYS WORKBENCH DESIGN MODELER CAS D'UN TUBE SIMPLE.....	76
FIGUREIII. 17: ANSYS FLUENT MAILLAGE CAS AVEC AILLET .....	77
FIGUREIII. 18: ANSYS FLUENT MAILLAGE CAS SIMPLE.....	77
FIGUREIII. 19 : GEOMETRIE DU TUBE ABSORBEUR, MAILLAGE CONDITIONS AUX LIMITES .....	79

## Chapitre IV : Résultats et discussion

FIGURE IV. 1 : ORGANIGRAMME DES ETAPES PRINCIPALES DE LA SIMULATION.....	82
FIGURE IV. 2: SCHEMA DE CONCENTRATEUR CYLINDRO-PARABOLIQUE AVEC REFLECTEUR SECONDAIRE (PARABOLIQUE) SUR SOLTRACE .....	83
FIGURE IV. 3: LE FLUX SOLAIRE EXPERIMENTAL EN FONCTION DU TEMPS POUR LA JOURNEE 05/03/2018 .....	86
FIGURE IV. 4: TEMPERATURE DE SORTIE DU FLUIDE EN FONCTION DU TEMPS.....	86
FIGURE IV. 5: VARIATION DE L'EFFICACITE THERMIQUE INSTANTANE EN FONCTION DU TEMPS (COMPARAISON ENTRE LES DONNEES EXPERIMENTALES ET LES RESULTATS DE SIMULATION).....	87
FIGURE IV. 6: LE RAYONNEMENT SOLAIRE EN FONCTION DU TEMPS (21 JUIN, SEPTEMBRE, MARS, DECEMBRE).....	87
FIGURE IV. 7: TRAÇAGE DES RAYONS DANS LE CCP AVEC REFLECTEUR SECONDAIRE EN SOLTRACE .....	88
FIGURE IV. 8: LA CARTE TRIDIMENSIONNELLE DES REPARTITIONS DE FLUX DE CHALEUR DU CAS CCP AVEC REFLECTEUR SECONDAIRE DE SOLTRACE .....	88
FIGURE IV. 9: DISTRIBUTION DE FLUX DE CHALEUR PAR RAYONNEMENT SOLAIRE CONCENTRE SUR LA SURFACE EXTERIEUR DU TUBE ABSORBEUR A 13AM POUR LE 21 JUIN ET 21DECEMBRE .....	89
FIGURE IV. 10: TEMPERATURE DE SORTIE DU FLUIDE (SANS AILETTE).....	89
FIGURE IV. 11: VARIATION DE L'ENERGIE COLLECTEE PAR RAPPORT AU TEMPS. ....	90
FIGURE IV. 12: VARIATION DE L'EFFICACITE THERMIQUE INSTANTANEE EN FONCTION DU TEMPS AVEC L'UTILISATION DU L'EAU COMME FLUIDE COLPORTEUR.....	91
FIGURE IV. 13: LE CONTOUR DE LA TEMPERATURE A LA SORTIE DU TUBE ABSORBEUR DANS LA JOURNEE DE 21 DECEMBRE (9H, 13H,16H).....	92
FIGURE IV. 14: LE CONTOUR DE LA TEMPERATURE A LA SORTIE DU TUBE POUR LA JOURNEE DE 21 JUIN (9H, 13H,16H) .....	92
FIGURE IV. 15: VARIATION DE LA TEMPERATURE DU FLUIDE CAS D'AJOUT DE QUATRE AILLET DE LA SORTIE EN FONCTION DU TEMPS JOURNEE 21 DECEMBRE (9H ,13H,16H).....	92
FIGURE IV. 16 : VARIATION DE L'ENERGIE THERMIQUE UTILE PAR RAPPORT AU TEMPS.....	93
FIGURE IV. 17: VARIATION DE L'EFFICACITE THERMIQUE INSTANTANE EN FONCTION DU TEMP .....	94
FIGURE IV. 18: VARIATION DE TEMPERATURE AU FONCTION DE TEMP POUR LES DEUX CAS TUBE SIMPLE ET AVEC INSERTION DES QUATRE AILETTE POUR LES 4 JOURNEE (21 JUIN DECEMBRE SEPTEMBRE MARS ) .....	95
FIGURE IV. 19 : VARIATION D'EFFICACITE THERMIQUE AUX FONCTIONS DE TEMP POUR LES DEUX CAS TUBE SIMPLE ET AVEC INSERTION DES QUATRE AILETTES POUR LES 4 JOURNEE (21 JUIN DECEMBRE SEPTEMBRE MARS).....	95
FIGURE IV. 20: EVOLUTION TEMPORELLE DE LA TEMPERATURE DU FLUIDE A LA SORTIE DU TUBE .....	96
FIGURE IV. 21 : EFFICACITE THERMIQUE POUR DIFFERENTS DEBITS AVEC L'UTILISATION DE L'EAU COMME FLUIDE CALOPORTEUR .....	96
FIGURE IV. 22 : LES VARIATIONS DE LA TEMPERATURE DU FLUIDE CALOPORTEUR A LA SORTIE DU TUBE ABSORBEUR 21 JUIN .....	97
FIGURE IV. 23 : LE CONTOUR DE LA TEMPERATURE A LA SORTIE DU TUBE POUR LA JOURNEE DE 21 JUIN (13H).....	98
FIGURE IV. 24: LES VARIATIONS DE L'EFFICACITE THERMIQUE DU CCP EN FONCTION DU TEMPS .....	99

# ***LISTE DES TABLEAUX***

TABLEAU I. 1 : ALBEDO SOLAIRE DE DIFFERENTES SURFACES .....	26
TABLEAU III. 1: ETAPES DU FICHER DE DONNEES METEOROLOGIQUES DANS PVSYST. ....	65
TABLEAU III. 2: DONNEES METEO HORAIRES DES VALEURS DE DENSITE DE FLUX SOLAIRE POUR UNE JOURNEE 21(JUIN MARS SPET DEC )	65
TABLEAU III. 3: LES PARAMETRES GEOMETRIQUES DU COLLECTEUR. ....	69
TABLEAU III. 4: LES COEFFICIENTS AI, BI, CI 21 JUIN .....	70
TABLEAU III. 5: LES COEFFICIENTS AI, BI, CI 21 SEPTEMBRE.....	70
TABLEAU III. 6: LES COEFFICIENTS AI, BI, CI 21 MARS .....	71
TABLEAU III. 7 : LES COEFFICIENTS AI, BI, CI 21 DECEMBRE .....	71
TABLEAU IV. 1: LES VALEURS OBTENUES SUR SOLTRACE.....	84
TABLEAU IV. 2: DONNEES EXPERIMENTALES POUR CCP AVEC REFLECTEUR SECONDAIRE PARABOLIQUE [49].....	85
TABLEAU IV. 3: LES VALEURS MOYENNES D'EFFICACITE OBTENUES POUR DIFFERENTS NOMBRES D'AILETTES INSEREES. ....	99

## NOMENCLATURE

Symbole	Signification	Unité
$A$	Largueur d'ouverture	$M$
$A$	Surface d'un cylindre parabolique	$m^2$
$Aa$	Surface d'ouverture du miroir	$m^2$
$Ar$	Surface du récepteur	$m^2$
$C$	Rapport de concentration	
$c_G$	Concentration idéal	
$D$	Diamètre de récepteur	$M$
$F$	Distance focale	$M$
$G_{im}$	Densité de flux radiant à la ligne focale	$W\ m^{-2}$
$G_a$	Éclairement direct à l'ouverture du collecteur	$W\ m^{-2}$
$H$	Coefficient de transfert de chaleur par convection	$W\ m^{-2}K^{-1}$
$I$	Eclairement solaire direct	$W\ m^{-2}$
$L$	Longueur	$M$
$Q_1$	Puissance gagnée par le fluide	$W$
$Q_2$	Puissance absorbée par l'absorbeur	$W$
$Q_{absorbée}$	Quantité d'énergie solaire absorbée	$W / m$
$Q_{intérieur}$	Quantité d'énergie qui indique le transfert thermique par convection et par rayonnement entre le tube Absorbeur l'enveloppe du verre	$W / m^2$
$Q_{extérieur}$	Quantité d'énergie qui indique le transfert thermique entre L'enveloppe du verre et l'environnement	$W / m^2$
$T$	Température	$K$
$V$	Vitesse d'écoulement	$m / s^{-1}$
$X$	Cordonne cartésiennes	
$Y$	Cordonnées cartésiennes	

## Caractères grecs

$\Psi$	Angle d'ouverture	
$\rho$	Masse Volumique	$Kg .m^{-3}$
$\Gamma$	Facteur optique du collecteur (Interception)	
$T$	Facteur de transmission du miroir	
$\rho$	Facteur de réflexion du miroir de concentrateur	
$\lambda$	Conductivité thermique	$W m^{-1}K^{-1}$
$\mu$	Viscosité dynamique	$Pa . S$
$\delta$	Constant de Stefan-Boltzmann	$W m^{-2}K^{-4}$
$\epsilon$	Emissivité	

## Nombres sans dimensions

<b>Nu</b>	Le nombre de Nusselt
<b>Pr</b>	Le nombre de Prandtl
<b>Re</b>	Le nombre de Reynolds

## Abréviation

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

---

# **Introduction générale**

---

La consommation énergétique a augmenté ces dernières années avec la croissance rapide dans les secteurs résidentiel, commercial et industriel. Pour le moment, la demande énergétique en Algérie est assurée par les grands gisements de pétrole et surtout de gaz [1]. L'Algérie avec sa situation géographique, occupe une position privilégiée dans l'exploitation d'énergie solaire avec une durée d'ensoleillement qui varie de 2650 heures /an dans le nord à 3500 heures/an dans le sud, l'une des plus élevées au monde. [2]

Les énergies renouvelables peuvent être des solutions en raison de leur abondance. Une énergie renouvelable est une source d'énergie considérée comme inépuisable à l'échelle de temps humain. [3, 4,5]

La filière thermodynamique à concentration semble aujourd'hui être une alternative plausible pour répondre à la problématique mondiale de production d'énergie. Elle n'émet pas de gaz à effet de serre [6].

IL existe quatre principaux types des concentrateurs solaires, les concentrateurs cylindro-paraboliques, les miroirs de Fresnel, les tours solaires et les concentrateurs paraboliques. La technologie des concentrateurs Cylindro-Parabolique (CCP) est actuellement la plus éprouvée des techniques de concentration solaire, ils offrent un bon rendement thermique jusqu'à des températures supérieures au 400°C.

Les capteurs "cylindro-paraboliques" sont composés de miroirs paraboliques disposés à l'arrière d'un capteur en forme de tube. La forme parabolique des miroirs permet de concentrer les rayons du soleil tout au long du tube. En faisant circuler le fluide caloporteur au centre de ce tube, le fluide étant chauffée et conduit la chaleur vers le récipient avec un débit déterminé. Le tube absorbeur c'est la partie essentielle du concentrateur, il représente généralement 30% du coût de la construction [7]

Afin de rendre ce type de concentrateurs solaires compétitif, les chercheurs ont toujours tenté d'augmenter leur rendement et leur efficacité. De plus, l'augmentation du rendement thermique conduit à une haute température du tube absorbeur, ainsi qu'à des gradients de température plus importants sur celui-ci. L'amélioration ou l'intensification du transfert thermique entre le fluide caloporteur et la paroi du tube absorbeur est considérée parmi les moyens les plus efficaces permettant l'augmentation du rendement des installations de production d'électricité solaire. Deux techniques sont généralement suggérées par les chercheurs pour l'amélioration du transfert de chaleur dans les conduites, à savoir les techniques passives et les techniques actives. Les méthodes passives ne nécessitent pas d'apports d'énergie supplémen-

taire, et utilisent souvent des modifications géométriques au sein des conduites ou en amont dans l'écoulement. Les méthodes actives au contraire nécessitent de l'énergie pour fonctionner.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'effet de l'ajout des ailettes sur l'absorbeur d'un concentrateur cylindro parabolique sur l'efficacité d'absorption de ce dernier. Plus spécifiquement, nous cherchons à déterminer comment la présence d'ailettes contribue à améliorer ou à altérer l'absorption de l'énergie solaire par le système. En réalisant une comparaison des performances du concentrateur avec et sans ailettes, nous pourrions évaluer si l'ajout d'ailettes peut augmenter le rendement global du système. Les résultats obtenus permettront de mieux comprendre l'interaction entre les ailettes et le processus d'absorption de l'énergie solaire. Dans un premier temps, l'obtention des données solaires de la région de LAGHOUAT sont obtenues par l'utilisation du logiciel PVSYST qui fournit des valeurs temporelles numériques du flux de chaleur solaire pour quatre jours (21 juin ,21 septembre,21 décembre, 21mars 2022) (analysé uniquement par simulation numérique). L'étape suivante concerne l'étude numérique des performances optiques et géométriques du système à l'aide du logiciel SolTrace. Cette analyse permet d'obtenir la répartition du flux du rayonnement solaire concentré sur le tube absorbeur, suivie d'une analyse CFD du flux de fluide dans le tube et du transfert de chaleur conjugué associé. Pour ce faire, le solveur ANSYS-FLUENT est utilisé pour modéliser et résoudre le couplage des différentes équations qui régissent les phénomènes de transport (transfert de chaleur et écoulement) qui se produisent au niveau de l'absorbeur conduit a des simulations numériques réalisées pour deux cas : Concentrateur avec tube absorbeur simple et l'autre avec l'insertion de 4 ailettes au tube absorbeur . Notez que les données de distribution d'écoulement, obtenues à l'étape précédente, sont introduites dans le solveur en tant que conditions aux limites variables sur la surface latérale du tube absorbant. Cette simulation décrira ainsi les performances de ce système sur une période d'une journée de 9h00 à 16h00. Pendant une journée.

**La présentation de ce travail s'articule autour de quatre chapitres :**

**Le Chapitre I** le premier est consacré au rayonnement et énergie solaire en générale et concentrer sur les capteurs a concentration

**Le chapitre II** est consacré à la présentation de concentrateur (CCP) avec le 2<sup>eme</sup> réflecteur : Ses paramètres géométriques, optique et la formulation analytique de l'équation de chaleur tout en décrivant la théorie et les définitions relatives aux différents modes de transfert de

chaleur dans un concentrateur cylindrique parabolique avec ses paramètres géométriques. Le système d'équations régissant ce transfert de chaleur conjugué (solide-fluide) et l'écoulement du fluide au sein du tube absorbeur sera présenté sous sa forme adaptée (par rapport au système considéré et sous les hypothèses appropriées).

**Le chapitre III** présente la modélisation numérique du transfert de chaleur conjugué et de l'écoulement du fluide à l'intérieur du tube absorbeur. Cette modélisation est réalisée en deux étapes : une modélisation optique établie avec le logiciel SolTrace, qui calcule le flux solaire concentré reçu à l'absorbeur. Modélisation CFD de l'absorbeur pour les deux cas simples et avec l'insertion des 4 ailettes longitudinales placées autour du tube absorbeur où le flux solaire est concentré, avec le logiciel ANSYS-FLUENT pour les deux cas qui permet de déterminer la répartition de la température et par conséquent l'énergie absorbée par le tube

**Le Chapitre IV** : est consacré à la présentation et à l'interprétation des différents résultats optique et thermique obtenus à l'aide des codes de calcul.

Enfin, ce travail se termine par une conclusion générale présentant une synthèse des résultats de simulation obtenus et par des perspectives dans le domaine de la fabrication des tubes absorbeur pour les concentrateurs cylindro-parabolique.

---

# **Chapitre I :**

# **Le rayonnement et**

# **l'énergie solaire**

---

## **I.1 Introduction :**

Dans ce chapitre nous allons est Le soleil est à l'origine de la vie sur terre et la perpétue par son rapport incessant d'énergie. Cette énergie nous arrive sous forme d'un rayonnement électromagnétique après avoir parcouru des millions de kilomètres. Notre Etoile, véritable boule de feu, nous envoie à travers l'espace, une énergie considérable qui nous éclaire, nous réchauffe, fait croître les plantes

(Photosynthèse des plantes), l'origine du cycle de l'eau, et des vents. Les énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon) que nous utilisons abondamment ont également pour origine l'énergie de photosynthèse accumulée durant des millions d'années.

Depuis les temps les plus reculés l'homme a perçu l'importance du soleil et l'a affublé de pouvoirs divins. Devenu " Œil de ciel " en Australie, adoré chez les Egyptiens (dieu Ré ou Râ), appelé le nourrisseur dans les textes hindous, symbolise la puissance royale du Japon... Toute forme de vie sur terre dépend directement ou indirectement du soleil. Il est évident que, dans ces conditions l'énergie solaire pourrait satisfaire pleinement les besoins en énergie de l'humanité, surtout si l'on tient compte du fait que cette forme d'énergie rayonnante peut se transformer sous deux autres formes couramment utilisées par l'homme : l'énergie thermique Et l'énergie électrique

## **I.2. Le soleil :**

### **I.2.1. L'origine de l'énergie solaire :**

L'astre solaire est une étoile de 1397 000 km de diamètre (110 fois celui de la terre) au sein duquel se produit une réaction de fusion (fusion d'hydrogène en hélium) générant d'énormes quantités d'énergies. Une toute petite partie de cette énergie arrive sur terre, par rayonnement électromagnétique.

Globalement, l'énergie reçue est néanmoins considérable (1 million de Téra wattheures). Elle est de l'ordre de 10000 fois la consommation énergétique annuelle de la population mondiale. La puissance maximale moyenne délivrée sur terre par mètre carré d'environ 1000 Watts [8].

## I. 2.2 Carte d'identité du soleil :

- **Âge** : estimé à 4,7 milliards d'années
- **Durée de vie** : estimée à 10 milliards d'années
- **Diamètre** : 1 397 000 km (110 fois celui de la Terre, 12 700 km)
- **Circonférence** : 4 372 544 km
- **Masse** :  $2 \times 10^{30}$  Kg (1 300 000 fois celle de la Terre)
- **Distance Terre-Soleil** : 149 598 000 km
- **Temps de transfert de la lumière** : 8 mn 20 s.
- **Composition (éléments /pourcentages)** : environ 73,46 % H<sub>2</sub>, 24 ,85 % H<sub>e</sub> et traces d'autres éléments (O, C, Fe, Ne, N, Si, Mg, S etc.)
- **Température** :
  - À la surface : environ 5 800°C ;
  - Au centre : 15 millions de degrés



Figure I. 1 : Carte d'identité du soleil

**I. 2.3 L'histoire de l'énergie solaire :**

Il semble que ce soient les Egyptiens qui aient découvert l'effet de serre. Archimède, au 3<sup>ème</sup> siècle avant J-C, incendie la flotte romaine à Syracuse avec des miroirs plans (ou des boucliers polis). Vers 100 ans après J-C, Héron d'Alexandrie construit un dispositif de pompage de l'eau. En 1615, Salomon de Caus construit une pompe dont la force motrice est fournie par l'air chauffé par le soleil. Au 18<sup>ème</sup> siècle, Buffon utilise des miroirs concaves à facettes. En 1774, Joseph Priestley concentre les rayons solaires sur de l'oxyde de mercure, et recueille le gaz produit dont la propriété est de faire brûler une bougie plus vivement que l'air : il découvre ainsi l'oxygène, ce qui permet à Lavoisier d'établir la théorie complète de la combustion due à la combinaison d'un corps avec l'oxygène de l'air. Lavoisier lui-même construit un four solaire à l'aide d'une lentille liquide, et réussit à fondre le platine. A la fin du 18<sup>ème</sup> siècle, le suisse H.B. de Saussure crée des machines solaires (deux vitres planes sur un collecteur orienté vers le soleil). En 1872, dans le désert d'Atacama, au Chili, on construit un distillateur solaire de 5000 m<sup>2</sup> pour fournir de l'eau à une mine de nitrate de sodium [8].

En 1878, A. Mouchot, professeur au lycée de Tours, invente une machine à vapeur fonctionnant sous 3,5 atmosphères à l'aide d'un grand miroir conique et servant à actionner l'imprimerie de l'Exposition Universelle : sa puissance est de deux chevaux pour une surface de collecteurs de 20 m<sup>2</sup>. De 1902 à 1908, Willsie et Boyle construisent à Saint-Louis et à Needles, en Californie, des engins de 6 à 20 chevaux fonctionnant à l'eau et au gaz sulfureux. A la même époque, Shuman développe des machines solaires de plusieurs chevaux pour pomper de l'eau. En 1913, avec Boys, il installe près du Caire, une grosse machine de 50 chevaux, avec de longs cylindres paraboliques qui concentrent les radiations solaires sur une canalisation centrale avec un facteur de concentration de 4,5 pour pomper de l'eau du Nil à des fins d'irrigation.

A l'exception de G. Abbotqui, à la conférence internationale de l'énergie en 1936, présente une machine à vapeur d'un demi-cheval, et en 1938 en Floride une machine de 1/5 de cheval avec un bouilleur flash, il n'y a aucun autre développement de l'énergie solaire dans les années suivantes. Ce n'est qu'à partir de 1950 que les applications de l'énergie solaire commencent timidement à se développer [9].

Pendant l'année 1954, trois chercheurs américains (Chapin, Pearson et Prince) mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement (9 %) et les Laboratoires Bell construisent le premier panneau solaire mais il était trop coûteux pour être produit en série. En 1958 a lieu le premier lancement d'un satellite fonctionnant à l'énergie photovoltaïque. L'industrie

spatiale investira beaucoup de fonds dans le développement des panneaux solaires. Pendant les années 1970 et 1980, des efforts sont faits pour réduire les coûts de sorte que l'énergie photovoltaïque soit également utilisable pour des applications terrestres. L'énergie solaire connaîtra un second élan au cours du premier choc pétrolier dans les années 1970. Alors que le prix du pétrole augmente de façon spectaculaire, les panneaux solaires photovoltaïques commencent à être utilisés pour la première fois dans les maisons. En effet, en 1973, la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université du Delaware et en 1983, la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000km en Australie. Depuis les panneaux solaires se sont développés lentement. Des centrales solaires sont en cours de construction dans le monde entier. Les entreprises d'électricité et les gouvernements ont offert des subventions et des réductions pour encourager les propriétaires à investir dans l'énergie solaire pour leur maison. En effet, en 1995, des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001.

### **I. 3 Construction physique du soleil :**

Le soleil est situé au centre d'un système dit « système solaire » dont la terre fait partie avec d'autres planètes. C'est une sphère non homogène dans laquelle on peut distinguer trois zones principales : l'intérieur, la photosphère, la chromosphère et la couronne solaire [9].

#### **I. 3.1 L'intérieur :**

C'est la source d'énergie du soleil, crée par réaction thermonucléaire. La température atteint plusieurs millions de degrés et la pression un milliard d'atmosphère ; cette comprend trois régions essentielles :

##### **I. 3.1.1 Le noyau (ou cœur) :**

Il s'étend du centre à environ 0,2 du rayon solaire. Sa masse volumique est supérieure à  $76000 \text{ kg/m}^3$ , la densité est très élevée ( $\approx 10^5 \text{ kg/m}^3$ ) ainsi que la température (15 millions de degrés Kelvin) et sa pression (2. 10<sup>11</sup> bars). C'est dans le noyau que se produisent les réactions nucléaires de fusion libérant une énergie considérable.

##### **I. 3.1.2 La zone radiative :**

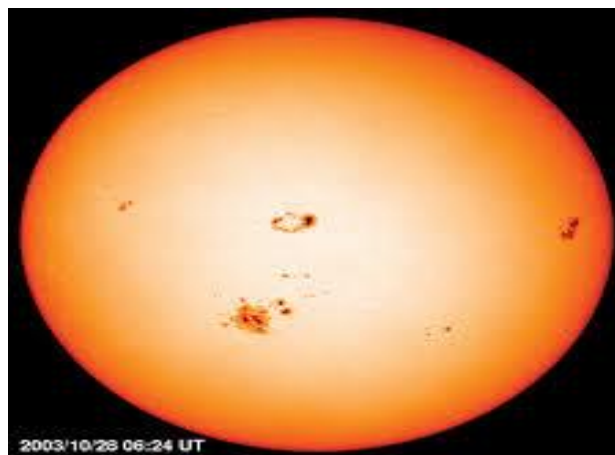
Elle s'étend de 0,2 à 0,7 du rayon solaire environ. Sa température est bien plus basse que celle du noyau, mais sa densité reste très forte. Cette zone joue un rôle important dans les transferts et le filtrage de l'énergie, du cœur vers la surface du Soleil.

**I. 3.1.3 La zone de convection :**

Elle s'étend de 0,7 du rayon solaire à 400 km de la surface du soleil environ. Elle permet les échanges d'énergie entre la zone radiative et la photosphère. En raison de sa faible densité, les échanges dans cette zone se font par convection : les gaz chauds remontent à la surface, se refroidissent, puis redescendent, se réchauffent, remontent, et ainsi de suite

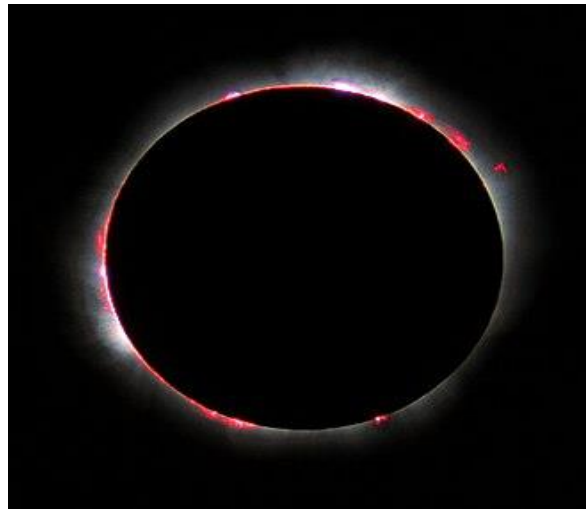
**I. 3.2 La photosphère :**

C'est une couche d'environ 300 km d'épaisseur avec une température de 5770 K. Elle donne l'image visible du soleil. Elle est composée de gaz moins denses que les autres couches du soleil, sa surface apparaît granuleuse à cause de cellules de convection, la photosphère apparaît donc comme une surface bouillonnante. On y observe aussi des taches consistent l'aspect le plus évident de l'activité solaire, elle correspond à une température moindre ce qui les fait apparaître de couleur sombre.



**Figure I. 2 : La photosphère solaire**

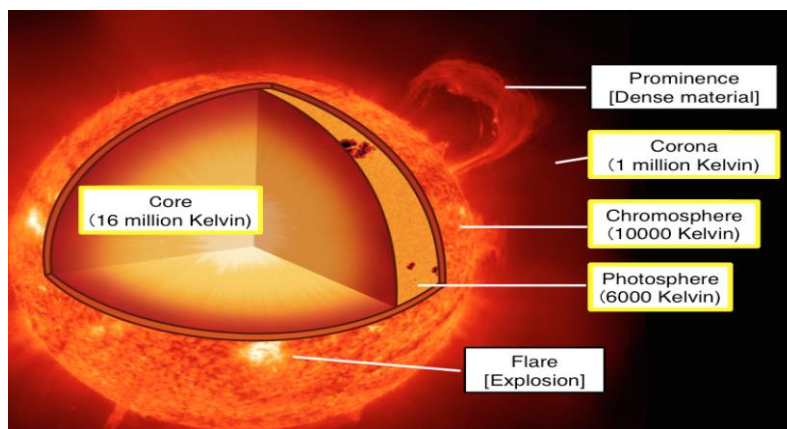
Elle surmonte la photosphère. C'est une couche gazeuse qu'on assimile à l'atmosphère solaire dont l'épaisseur ne dépasse pas 800km et sa température est de 10 K. C'est une région à faible densité où la matière est très diluée, fait qui explique l'élévation de la température. La matière est très agitée : formation de jets au sein de la chromosphère ou de grands jets dans la couronne.



**Figure I. 3:** Couronne solaire visible en France lors de l'éclipse solaire du 11 août 1999

#### I. 4 La couronne :

La couronne est le prolongement de la photosphère. C'est une auréole blanche irrégulière, sans limite définies, formée de gaz peu denses, son épaisseur est d'environ 8000 km et une température qui dépasse le million de degrés. Invisible depuis la Terre, car son éclat se confond avec celui du ciel bleu, elle ne peut être observée que pendant une éclipse solaire [10].



**Figure I. 4 :** Structure du soleil en coup

#### I. 4 Constante solaire :

Une surface plane d'un mètre carré perpendiculaire au rayonnement solaire et située à la limite de l'atmosphère terrestre reçoit une puissance rayonnée fonction de la distance Soleil Terre. Cette distance variant quelque peu au cours de l'année, néanmoins le flux solaire varie peu au cours de temps. Aussi appelle-t-on constante solaire, notée  $C^*$ , la valeur reçue à la limite de l'atmosphère terrestre. Un grand nombre de données ont été recueillies lors de

mission spéciale par des satellites d'observation. La communauté internationale a choisi en l'an 2000 la valeur :

$$C^* = 1366 \text{ W/m}^2.$$

## **I. 5 Le rayonnement solaire :**

Le rayonnement solaire traverse l'atmosphère pour atteindre la surface de la terre, ce rayonnement est reçu par un corps, la nature de ce dernier est caractérisée par son taux d'absorption ou d'émission du rayonnement, on distingue :

### **I. 5.1 Corps noir :**

C'est un corps qui absorbe toutes les radiations indépendamment de son épaisseur, de sa température, de l'angle d'incidence et de la longueur d'onde du rayonnement incident, c'est-à-dire qui a un facteur d'absorption égal à 1 pour toutes les radiations  $\alpha T \lambda = 1$ .

Les propriétés du corps noir sont :

- Tous les corps noirs rayonnent de la même manière.
- Le corps noir rayonne plus que le corps non noir à la même température.

### **I. 5.2 Corps gris :**

C'est un corps dont le pouvoir d'absorption  $\alpha \lambda T$  est indépendant de la longueur d'onde  $\lambda$  du rayonnement qu'il reçoit. Il est défini :  $\alpha T = \alpha$

Le rayonnement ou spectre solaire est comparable à celui d'un corps noir à une température de 5800 K, il est compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10  $\mu\text{m}$  et se décompose approximativement sur 3 bandes :

- 9% dans la bande des Ultraviolets ( $< 0,4 \mu\text{m}$ )
- 47% dans la bande visible (0,4 à 0,8  $\mu\text{m}$ )
- 44% dans la bande des infrarouges ( $> 0,8 \mu\text{m}$ )

L'énergie solaire reçue sur terre en dehors de l'atmosphère est estimée à 1370  $\text{W/m}^2$  cependant elle s'atténue et perd son intensité en traversant l'atmosphère ne dépassant pas les 1000  $\text{W/m}^2$  à la surface de la terre en raison de l'absorption dans ce dernier, ce chiffre variera par la suite en fonction de la localisation géographique du site (latitude), la saison, l'heure, les conditions météorologiques (nébulosité, poussière, humidité...), et l'altitude du lieu [11].

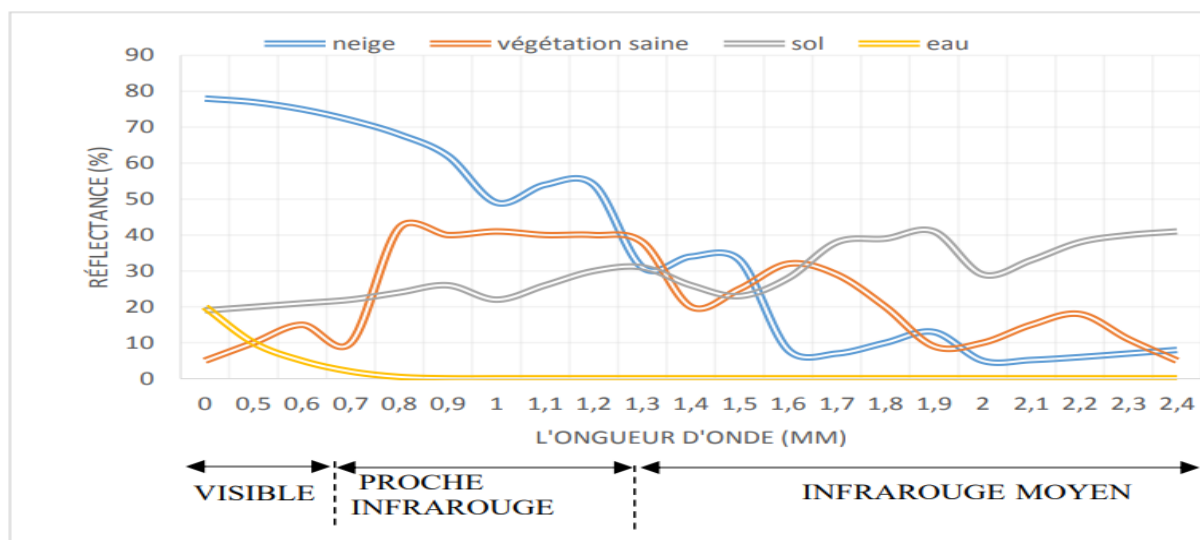


Figure I. 5 : Analyse spectrale du rayonnement solaire

L'éclairement correspond à la puissance solaire reçue par une surface plane élémentaire, appelée capteur. On distingue l'éclairement dû aux rayons solaire directs et celui dû au rayonnement solaire diffusé par le ciel ou réfléchi par une surface (le sol, un mur ...) [12].

### I. 6.1 Rayonnement solaire direct :

Le rayonnement direct est le rayonnement provenant directement du soleil sans avoir été dissipé par l'atmosphère. Il peut être mesuré par un pyrhéliomètre qui est un instrument destiné à la mesure de l'intensité du rayonnement solaire direct. Ce type de rayonnement est nul lorsque le soleil est complètement couvert par les nuages.

### I. 6.2 I.5.2 Rayonnement diffus :

Le rayonnement diffus est le rayonnement reçu par toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère (déviations de la lumière par les nuages et les molécules diverses). Les couches atmosphériques, modifient la distribution spectrale du rayonnement solaire. Il subit une atténuation à cause des phénomènes d'absorption et de diffusion par les poussières et les aérosols. Ainsi par exemple, la couche d'ozone absorbe la majeure partie du rayonnement ultraviolet, la vapeur d'eau absorbe le rayonnement infrarouge. Il peut être mesuré par un pyranomètre avec écran masquant le soleil. Donc, ce rayonnement est nul que la nuit.

### I. 6.3 Rayonnement réfléchi (albédo) :

L'albédo du sol est le rayonnement qui est réfléchi par une surface (sol, des objets...). Cet albédo peut être important lorsque le sol est plutôt réfléchissant (à cause de l'eau, la neige). En toute rigueur la notion d'albédo dépend de la longueur d'onde et de la direction du

rayonnement incident ainsi que de la température. L'albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

$$\text{Albédo} = \frac{\text{énergie réfléchie}}{\text{énergie reçue}} \quad (I.1)$$

On représente quelque valeur de L'albédo selon la surface du sol :

TABLEAU I. 1 : albédo solaire de différentes surfaces

Surface	Albédo solaire
Mer chaude	0,05
Lune	0,07
Forêt tropicale	0,12
Mer froide	0,15
Pierre, ciment, sol cultivé	0,15 à 0,25
Herbe verte	0,25
Sable clair	0,37

**I. 6.4 I.5.4. Rayonnement global :**

Le rayonnement global est la somme de tous les rayonnements reçus, il est mesuré par un pyromètre ou un polarimètre sans écran

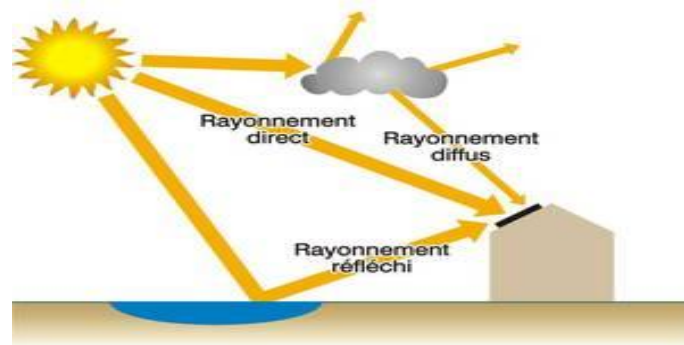
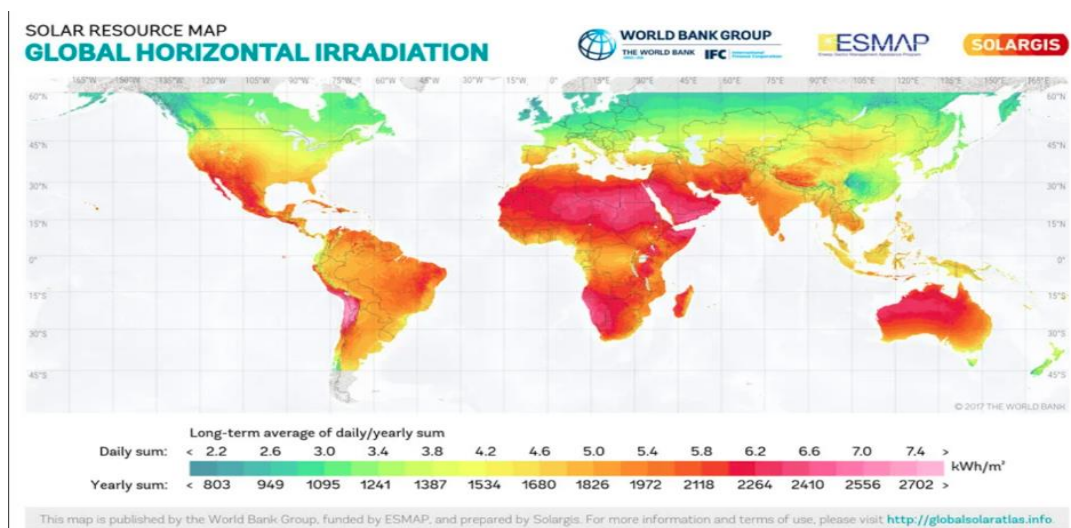


Figure I. 6 : Composantes du rayonnement solaire au sol

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible dans un lieu au cours d'une période donnée grâce aux stations météorologiques, son évolution peut se faire à partir des données de l'irradiation solaire globale. Elle est utilisée pour simuler le fonctionnement probable d'un système énergétique solaire et donc d'effectuer son dimensionnement le plus exact possible compte tenu des demandes en énergie à satisfaire. Le gisement solaire est utilisé dans des domaines aussi variés que l'agriculture, la météorologie, les applications énergétiques et la sécurité publique [13].

L'énergie solaire s'est d'abord développée pour satisfaire des besoins électriques en sites isolés, tels que les régions de montagnes, les îles et les zones rurales des pays en développement, particulièrement en Afrique et en Asie. Depuis le début des années 2000, le développement de l'énergie solaire a pris une tout autre dimension, à l'échelle mondiale, suite à la prise de conscience de l'enjeu environnemental lié au réchauffement climatique et à la nécessité de développer des énergies renouvelables, non émettrices de  $CO_2$ .

Les principaux pays producteurs de l'énergie solaire sont la Chine, les Etats-Unis, le Japon et l'Allemagne. La puissance installée dans le monde est passée de quelques Méga Watts au début des années 2000 à 102 Giga Watts à la fin 2012 puis 227 Giga Watts en 2015 et 300 Giga Watts la fin 2016. Le rythme d'installation de puissance solaire photovoltaïque est actuellement de plus de 70 Giga Watts par an. C'est en Asie, notamment en Chine et en Inde, que plus de la moitié des installations solaires sont réalisées [14].



**Figure I. 7 : L'énergie solaire dans le monde**

### I. 7 Le gisement solaire en Algérie :

Par sa position privilégiée, l'Algérie est un pays potentiellement intéressant pour l'exploitation de l'énergie solaire, par sa situation géographique il dispose d'un gisement solaire très important sur le bassin méditerranéen et compte tenu des valeurs de la durée d'insolation enregistrée sur la quasi-totalité du territoire national dépassant les 2000 heures annuellement et pouvant atteindre les 3900 heures sur les hauts plateaux du Sahara. Par conséquent, la quantité d'énergie reçue au sol quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5 KW/h sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 KWh/m<sup>2</sup> au nord et 2263 KWh/m<sup>2</sup> au sud du pays.

L'estimation du gisement solaire est réalisée par l'Atlas Solaire de l'Algérie (A.S.A.), modèle élaboré par Capderou, sert de référence aux concepteurs de systèmes énergétiques solaires. Bien qu'il existe un réseau de stations d'évaluation du gisement solaire, le nombre de ces stations est très limité. En Algérie, seules sept stations assurent depuis 1970 la mesure de la composante globale et diffuse du rayonnement solaire. Les différentes composantes du rayonnement solaire sont déterminées sur l'ensemble du territoire algérien et une représentation cartographique à grande échelle y est présentée. Toutefois, d'une part l'Atlas Solaire n'a fait jusqu'à présent l'objet d'aucune validation et d'autre part les modèles utilisés sont relativement complexes et leur utilisation est peu répandue [15][9].

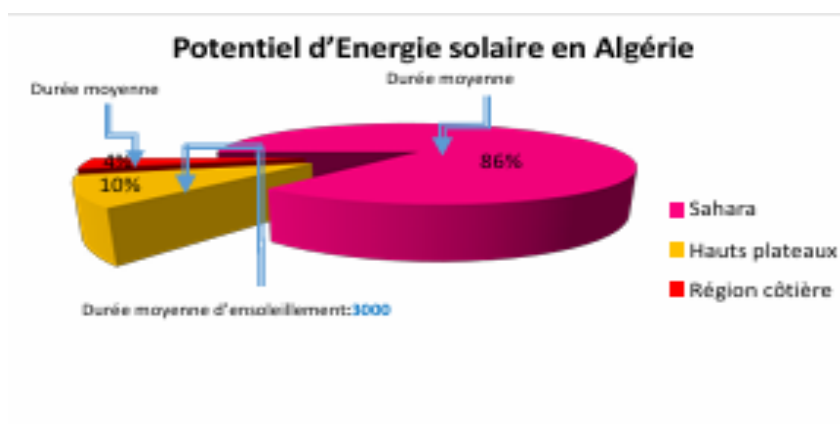


Figure I. 8 : Potentiel d'Énergie solaire en Algérie

### I. 8 Différents types d'utilisation d'énergie solaire :

La première et plus répandue des utilisations de l'énergie solaire est sa transformation en énergie thermique. Nous effectuons cette transformation naturellement : il suffit de se mettre au soleil pour ressentir de la chaleur. Notre corps transforme l'énergie solaire en énergie thermique. Avec une architecture appropriée, un bâtiment est aussi capable de transformer cette énergie en énergie thermique. L'utilisation la plus connue actuellement est le chauffage « solaire » :

L'eau pour les robinets ou les radiateurs est chauffé par des panneaux solaires. Une autre utilisation de cette transformation est l'usage de fours solaires. Les petits fours solaires « domestiques » peuvent chauffer facilement jusqu'à 150°C et les fours industriels ou pour la recherche peuvent atteindre jusqu'à 3000°C en quelques secondes. Sur Terre, il existe différents types d'énergies solaires tout d'abord nous allons les citer et ensuite les expliquer : [16]

- **L'énergie passive.**
- **L'énergie thermique.**
- **L'énergie photovoltaïque.**
- **L'énergie thermodynamique.**

### **I. 8.1 L'énergie passive :**

C'est une énergie non polluante et qui est disponible en grande quantité. Ce type d'énergie va être utilisé pour le chauffage, pour l'éclairage naturel et la climatisation des locaux. Son fonctionnement : l'énergie lumineuse du soleil qui pénètre à l'intérieur des pièces par les fenêtres et qui est absorbée par les murs mais aussi par les meubles, par les planches, est rejetée sous forme de chaleur [17].

### **I. 8.2 L'énergie thermique :**

Cette énergie est la transformation des rayons du soleil en énergie thermique c'est-à-dire en chaleur. Cette énergie peut être utilisée directement soit pour le chauffage mais aussi pour obtenir de l'eau chaude. Le principe général est de concentrer les rayons solaires en un seul endroit. Ceux-ci sont alors piégés par des capteurs solaires thermiques vitrés qui transmettent l'énergie solaire à des absorbeurs métalliques. Ces mêmes absorbeurs réchauffent alors un réseau de tuyaux où circule un fluide caloporteur (c'est-à-dire un fluide qui reçoit de la chaleur en un point de son circuit et qui la cède en un autre point). Cet échangeur va ensuite chauffer à son tour de l'eau stockée dans un cumulus, cette même eau ira alimenter chauffe-eau (pour l'eau sanitaire) et systèmes de chauffages solaires [18].

Les technologies thermiques concentratrices solaires ; que ça soit les capteurs solaires plats, paraboliques ou cylindro-paraboliques, sont l'une des sources d'énergie renouvelables largement utilisées pour fournir une énergie non polluante et permanente. Dans ce mémoire, l'accent sera mis sur la technologie solaire cylindro-parabolique, qui est la technologie la plus établie et éprouvée disponible aujourd'hui pour la collecte de l'énergie solaire. [19]

### **I. 8.4 L'énergie thermodynamique :**

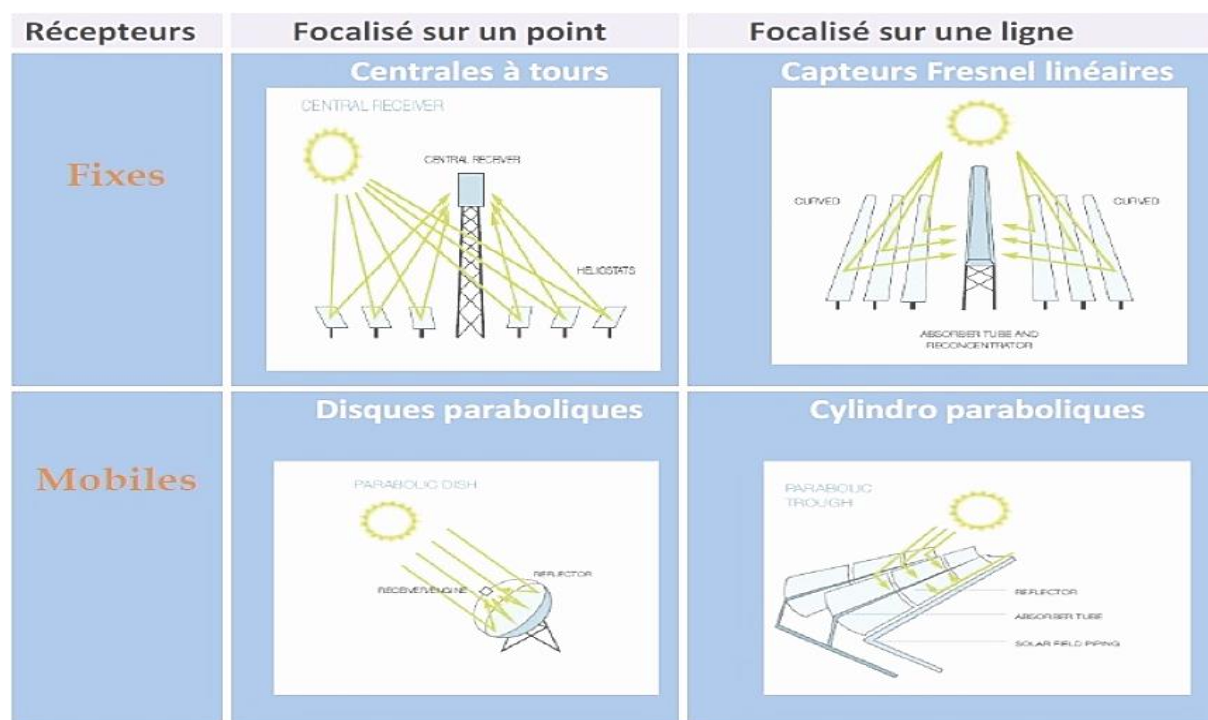
L'énergie solaire thermodynamique est un moyen de produire de l'électricité et d'accumuler l'énergie thermique nécessaire à cette production pendant plusieurs heures après le coucher du soleil, dans des centrales solaires à concentration. Le principe est de concentrer la chaleur du soleil par des miroirs pour chauffer un fluide haute température (plusieurs centaines de degrés) afin de générer de la vapeur par échange thermique pour ensuite produire de l'électricité au moyen d'une turbine. Le fluide utilisé peut conserver sa chaleur pendant plusieurs heures après [20].

**I. 8.4.1 Les types de concentrateurs solaires :**

Le rayonnement est concentré en un point ou en une ligne, où l'énergie thermique est transmise au fluide caloporteur. L'intensité de la concentration est définie par le facteur de concentration.

Plus celui-ci est élevé, plus la température atteinte sera importante.

Figure I.1 montre les 4 principaux systèmes de concentration. Les systèmes à concentration en ligne ont généralement un facteur de concentration inférieur à ceux des concentrateurs ponctuels.[21]



(Source: Feuille de route solaire thermodynamique, Agence Internationale de l'Energie - AIE)

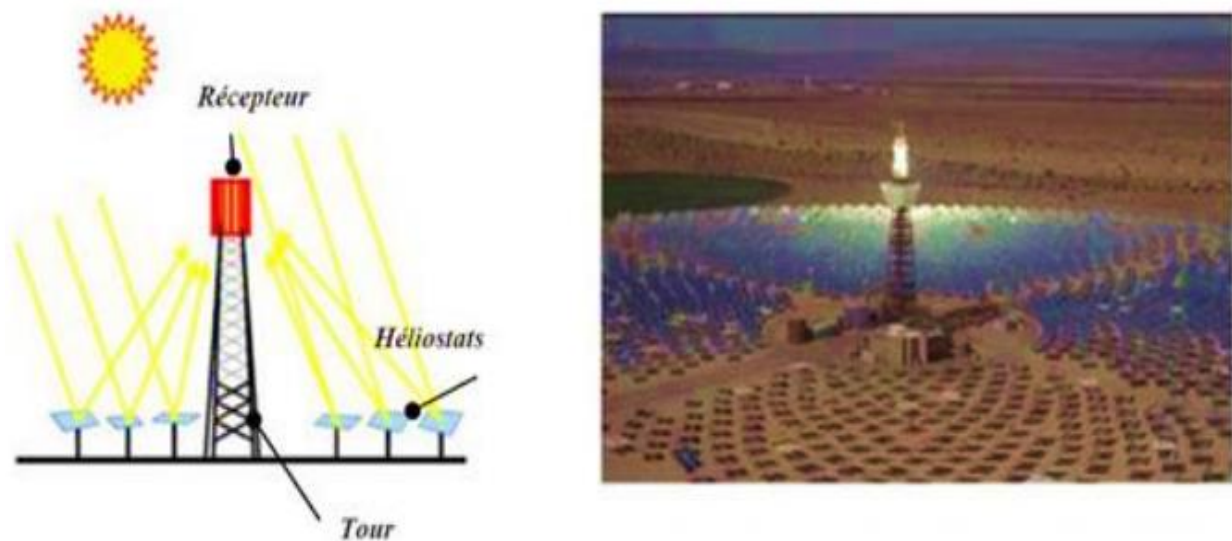
**Figure I. 9 :** Principales technologies de concentration solaire [21]

**I. 8.4.1.1 Les centrales solaires à tour :**

Les centrales solaires à tour sont constituées de nombreux miroirs concentrent les rayons solaires vers une chaudière située au sommet d'une tour. Les miroirs uniformément répartis sont appelés héliostats. Chaque héliostat est orientable, et suit le soleil individuellement et le réfléchit précisément en direction du receveur au sommet de la tour solaire.

Le facteur de concentration peut dépasser 1000, ce qui permet d'atteindre des températures importantes, de 600 °C à 1000 °C [22] L'énergie concentrée sur le receveur est ensuite soit directement transférée vers le fluide thermodynamique (génération directe de vapeur entraînant une turbine ou chauffage d'air alimentant une turbine à gaz), soit utilisée

pour chauffer un fluide caloporteur intermédiaire. Ce liquide caloporteur est ensuite envoyé dans une chaudière et la vapeur générée actionne des turbines. Dans tous les cas, les turbines entraînent des alternateurs produisant de l'électricité. (Voir la figure I.2)



**Figure I. 10 :** Les centrales à tour [22]

#### **I. 8.4.1.2 Les centrales solaires à collecteurs paraboliques :**

Ayant la même forme que les paraboles de réception satellite, les capteurs paraboliques fonctionnent d'une manière autonome. Ils s'orientent automatiquement et suivent le soleil sur deux axes afin de réfléchir et de concentrer les rayons du soleil vers un point de convergence appelé foyer. Ce foyer est le récepteur du système. Il s'agit le plus souvent d'une enceinte fermée contenant du gaz qui est monté en température sous l'effet de la concentration. Cela entraîne un moteur Stirling qui convertit l'énergie solaire thermique en énergie mécanique puis en électricité. Le rapport de concentration de ce système est souvent supérieur à 2000 et le récepteur peut atteindre une température de 1000 °C [23]. Un de leurs principaux avantages est la modularité : ils peuvent en effet être installés dans des endroits isolés, non raccordés au réseau électrique. Pour ce type de système, le stockage n'est pas possible. (Voir la figure .3)

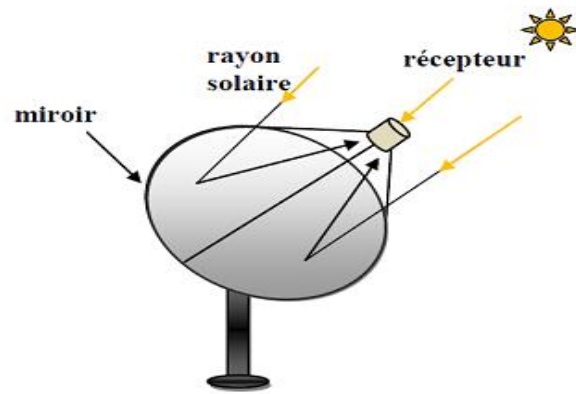


Figure I. 11 : Les centrales à capteurs paraboliques [23]

➤ **Les centrales solaires à miroir de Fresnel :**

Un facteur de coût important dans la technologie des collecteurs cylindro-paraboliques repose sur la mise en forme du verre pour obtenir sa forme parabolique. Une alternative possible consiste à approximer la forme parabolique du collecteur par une succession de miroirs plans.

C'est le principe du concentrateur de Fresnel. Chacun des miroirs peut pivoter en suivant la course du soleil pour rediriger et concentrer en permanence les rayons solaires vers un tube ou un ensemble de tubes récepteurs linéaires fixes. En circulant dans ce récepteur horizontal, le fluide thermodynamique peut être vaporisé puis surchauffé jusqu'à 500 °C [24]. La vapeur alors produite actionne une turbine qui produit de l'électricité. Le cycle thermodynamique est généralement direct, ce qui permet d'éviter les échangeurs de chaleur... (voir la figure I.4)

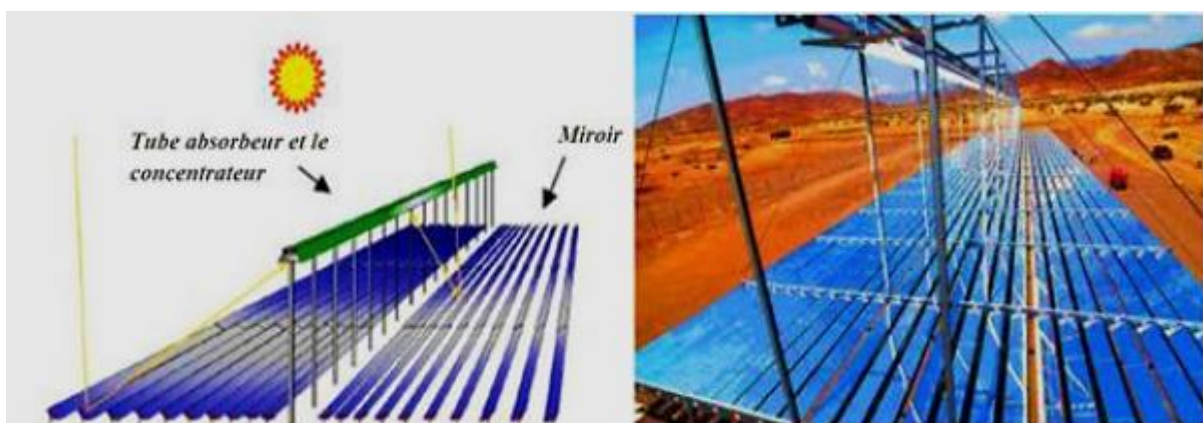


Figure I. 12 : Les centrales solaires à miroir de Fresnel [24]

### I. 8.4.1.3 Les centrales à collecteurs cylindre-paraboliques :

Ce type de centrale se compose de rangées parallèles de longs miroirs cylindro-paraboliques qui tournent autour d'un axe horizontal pour suivre la course du soleil. Les rayons solaires sont concentrés sur un tube récepteur horizontal, dans lequel circule un fluide caloporteur dont la température atteint en général 400 °C [24]. Ce fluide est ensuite pompé à travers des échangeurs afin de produire de la vapeur surchauffée qui actionne une turbine ou un générateur électrique... (voir la figure I .5)



**Figure I. 13:** Les centrales à collecteurs cylindre-paraboliques [24]

### I. 8.4.1.4 Structure générale de système de concentration cylindre-parabolique :

Les centrales solaires utilisent des technologies relativement récentes, possédant un important potentiel de développement. Elles offrent une opportunité aux pays ensoleillés comparable à celle des fermes éoliennes pour les pays côtiers.

Les endroits les plus prometteurs pour l'implantation de ces technologies sont ceux du sud-ouest des États Unis, l'Amérique du Sud, une grande partie de l'Afrique, les pays méditerranéens et du Moyen Orient, les plaines désertiques d'Inde et du Pakistan, la Chine, l'Australie, etc.

Dans beaucoup de régions du monde, un kilomètre carré de terrain suffirait à générer jusqu'à 120 Gwh d'électricité par an, grâce à la technologie des centrales solaire. Cette énergie est équivalente à la production annuelle d'une centrale classique de 50 MW. La production d'électricité à partir du rayonnement solaire est un processus direct. L'énergie solaire étant peu dense, il est nécessaire de la concentrer pour obtenir des températures exploitables pour la production d'électricité.

En raison de l'augmentation du niveau d'émissions de dioxyde de Carbone (CO<sub>2</sub>) et de la consommation d'énergie, la puissance thermique solaire a été largement appliquée. Les CCP peuvent être intégrés aux centrales thermiques solaires de deux façons :

- Premièrement, faire fonctionner une turbine à vapeur par la vapeur générée directement à partir du CCP qui est connu sous le nom de technologie DSG, la figure I.6 montre le schéma typique d'une installation DSG
- D'autre part, réchauffer un fluide de transfert de chaleur (FTC) dans le champ solaire, puis l'utiliser dans un échangeur de chaleur pour générer de la vapeur qui entraînera une turbine à vapeur.

### **I. 8.5 L'énergie photovoltaïque :**

Cet effet photovoltaïque a été découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839. Cette forme d'énergie reste aujourd'hui quantitativement négligeable mais on lui prédit un grand avenir, son coût baissera fortement dans les années à venir. Cette énergie sera durable et ne devra nécessiter aucun entretien. Elle peut répondre aux besoins en énergie électrique d'une maison, contrairement aux autres formes d'énergies solaires qui ne produisent que de la chaleur grâce aux capteurs du panneau qui transforment les rayonnements du soleil en cellule photovoltaïque. Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui exposé à la lumière, génère une tension électrique, ces cellules se présentent sous la forme de deux fines plaques. Le courant qui en ressort est continu donc cette énergie produit de l'électricité [24].

### **I. 9 Types d'énergies renouvelables :**

L'expression « énergie renouvelable » est la forme courte et usuelle des expressions « sources d'énergie renouvelables » ou « énergies d'origine renouvelable » qui sont plus correctes d'un point de vue physique. Énergies renouvelables un ensemble de filières diversifiées dont la mise en œuvre n'entraîne en aucune façon l'extinction de la ressource initiale et est renouvelable à l'échelle humaine [25].

#### **I. 9.1 Énergie éolienne :**

L'énergie éolienne pourra jouer un rôle non négligeable dans le mix énergétique de demain. Les projections du scénario énergétique tendanciel à 2030 pour la France indiquent une production éolienne de 43 GWh.

L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire :

Les rayons solaires absorbés dans l'atmosphère entraînent des différences de température et de pression. De ce fait les masses d'air se mettent en mouvement et accumulent de l'énergie cinétique. Celle-ci peut être transformée et utilisée à plusieurs fins :

- **La transformation en énergie mécanique :**

Le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (voilier ou char à voile), pour pomper de l'eau (éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin.

- **La production d'énergie électrique :**

L'éolienne est couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système « autonome » avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène), un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie. Une éolienne est parfois qualifiée d'aérogénérateur dès lors qu'elle produit de l'électricité.

Les concepts d'éoliennes éoliennes sont étudiés pour apporter des vents plus forts, plus réguliers et plus forts : Magin et Skywindpur conçus pour grimper à 300m, 1200 m ou 5000 m avec l'espoir de produire jusqu'à 100 fois plus d'électricité que les éoliennes actuelles.



**Figure I. 14:** Un champ d'éoliennes

### **I. 9.2 Énergie hydraulique :**

L'énergie hydraulique est connue depuis longtemps. C'était celle des moulins à eau, entre autres, qui fournissaient de l'énergie mécanique pour moudre le grain, fabriquer du papier ou puiser de l'eau pour irriguer les champs par exemple.

À l'instar de l'énergie éolienne, l'hydroélectricité (hors énergie marémotrice) trouve son orin principal dans les phénomènes météorologiques et donc dans l'énergie solaire. Le soleil provoque l'évaporation de l'eau, en particulier dans les océans, et certains d'entre eux sont libérés sur les continents à différentes altitudes. Nous parlons du cycle de l'eau pour décrire ces mouvements. L'eau (en fait, la vapeur d'eau) a, en altitude, l'énergie potentielle de la gravité. Cette énergie peut être captée et convertie en barrages hydroélectriques, lorsque l'eau retourne dans l'océan. Avant l'avènement de l'électricité, les centrales hydrauliques ont pu capter cette énergie mécanique pour entraîner des machines ou des outils (machines textiles, moulins à meuler le blé ...)

Depuis l'invention de l'électricité, cette énergie mécanique a été convertie en énergie électrique. Après la biomasse, l'hydroélectricité est la deuxième source d'énergie renouvelable : selon l'Agence internationale de l'énergie, elle fournit 2,3% de l'énergie primaire mondiale produite en 2011, sur 13,3% d'énergie renouvelable.

Il existe d'autres capacités hydroélectriques et proviennent généralement de sources marines :

- **L'énergie des vagues** : produit par le mouvement des vagues et peut être capturé par des dispositifs tels que Bellamis, un type de ver métallique articulé, et sa force provient de petites éoliennes.
- **Énergie marémotrice** : produite par le mouvement des eaux de marée (changements dans le niveau de la mer, les courants de marée).
- **Énergie éolienne** : elle provient de l'utilisation de courants sous-marins.
- **Énergie thermique de la mer** : produite en exploitant la différence entre la température entre les eaux de surface et les eaux profondes des océans,
- **L'énergie osmotique** : est le résultat de la propagation ionique lors de l'arrivée et du mélange d'eau douce dans l'eau de mer. L'idée remonte aux années 1970, à savoir l'osmose, qui se produit en mélangeant de l'eau salée. La première usine d'osmose a été ouverte en 2009 à Horm (Norvège) par Statkraft à l'embouchure du détroit d'Oslo en mer du Nord. Un prototype de 3 kW est toujours conçu pour tester la fiabilité du procédé et améliorer ses performances, mais l'objectif est d'atteindre 25 MW d'ici 2015.

Depuis lors, une usine a été construite au Japon et une autre en construction aux États-Unis. Selon Statkraft, le potentiel technique mondial pour l'énergie osmotique sera de 1 600 tep par an, soit 50% de la production d'électricité dans l'UE [25].

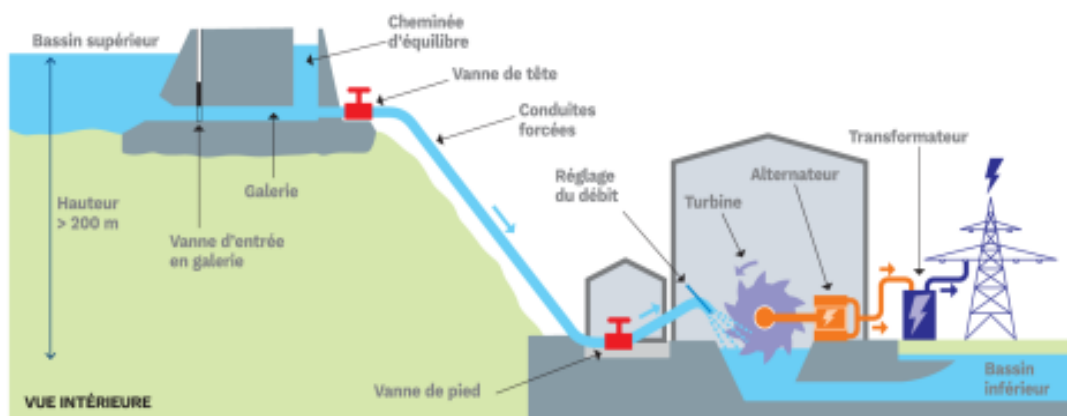


Figure I. 15 : Schéma de production d'électricité par l'hydraulique

### I. 9.3 Énergie géothermique :

Si nous voulons revenir en l'année 2000 avant Jésus-Christ, dans les îles Lipari (Italie) l'exploitation d'eau naturellement chaude pour les bains thermaux. Le principe est d'extraire de la terre l'énergie géothermique à utiliser pour le chauffage et la convertir en électricité, la chaleur de la Terre est produite par la radioactivité naturelle des roches du noyau et de la croûte terrestre nous avons aussi l'énergie nucléaire qui produite par la désintégration de l'uranium, du thorium et du potassium. Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie profonde ne dépend pas des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent).

Les trois premiers producteurs en 2012 sont les États-Unis (27,9 %), les Philippines (14,6 %) et l'Indonésie (11,2 %) et quatre autres pays : la Nouvelle-Zélande, le Mexique, l'Italie et l'Islande ont une production importante et le pays qui possède le plus grand potentiel (27 gigawatts, soit 40 % des réserves mondiales) C'est L'Indonésie.

La géothermie très basse énergie exploite la chaleur de la couche superficielle du sol qui provient du soleil et du ruissellement de l'eau de pluie ; elle est utilisée pour :

- La climatisation passive par exemple le système du puits provençal, le puits canadien. Le chauffage et la climatisation avec la pompe à chaleur géothermique ; ces pompes à chaleur sont considérées comme exploitant une énergie partiellement renouvelable car une grande partie de l'énergie qu'elles fournissent provient de l'énergie solaire emmagasinée chaque été dans la terre par le soleil, et considérées aussi comme des systèmes efficaces de production de chaleur car elles assurent une production d'énergie thermique très supérieure à l'énergie électrique consommée.

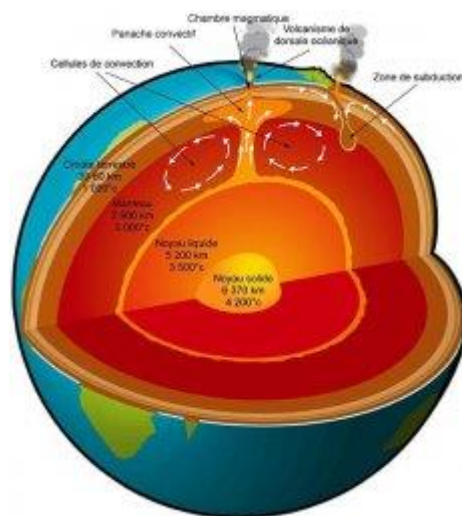


Figure I. 16 : La répartition de la température dans le globe terrestre

### I.9.4 Énergie Biomasse :

La biomasse a été le principal fournisseur d'énergie utilisé par les humains, en particulier sous la forme de bois ; Il est encore utilisé d'aujourd'hui, et de loin : C'est une énergie solaire stockée résultant à partir de la photosynthèse. Elle est exploitée par combustion ou métabolisation. Cette énergie est renouvelable, à condition que les quantités brûlées ne dépassent pas les quantités produites, condition qui n'est pas toujours disponible. On peut citer notamment le bois et les biocarburants. La biomasse et les déchets fournissent 10 % de l'énergie primaire produite dans le monde, sur 13,3 % d'énergies renouvelables.

Mais cette ressource produit de nombreux polluants et reste le principal défaut qu'elle nécessite de grandes zones de production.

Les cyanobactéries modifiées peuvent convertir l'énergie solaire en carburant avec la consommation de  $CO_2$ . Par génie génétique, une entreprise a créé et améliore peu à peu cette technique.

Une équipe de recherche de l'université Stanford a montré que la production d'électricité à partir de la biomasse serait plus rentable économiquement et écologiquement que leur transformation et leur utilisation dans les transports en tant que biocarburant. Pour ce faire, Elliott Campbell et ses collègues ont comparé l'impact et le rendement de la production de l'électricité et de l'éthanol, de leur utilisation mais aussi du cycle de vie des voitures électriques et à moteur thermique. D'après eux, l'option électrique émet deux fois moins de  $CO_2$  que l'option bio carburant et 1 hectare de culture permet de parcourir 52 000 km à l'électricité contre 31 000 km à l'éthanol. Pourtant ce constat ne rassure en rien sur les problèmes d'utilisation des sols et d'alimentation mondiale.

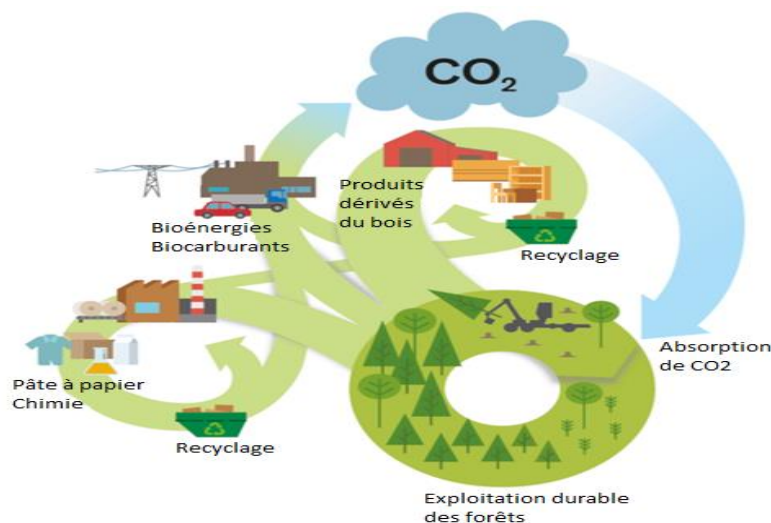


Figure I. 17 : Un schéma Illustrant la biomasse

**I.9.5 Énergie solaire :**

Est une énergie renouvelable et écologique, en peut exploitée pratiquement partout sur la planète, contrairement aux combustibles fossiles Elle est polyvalente, et produit de la chaleur, la lumière, l'énergie mécanique et l'électricité. L'énergie solaire est l'énergie radiante produit par le soleil et par réactions nucléaires de fusion qu'arrive à la Terre à travers de l'espace en quant d'énergie (Photons).

Mais l'intensité de l'énergie réellement disponible dans la surface terrestre est plus faible que celle qui arrive à l'extérieur de l'atmosphère, par l'absorption et la dispersion produit par l'interaction entre photons et l'atmosphère.

L'énergies qu'un consommera pendant une année est moins de quatre mille fois que l'énergie émettre par le soleil sur la surface terrestre pendant cette année, Pour l'énergie solaire il faut profiter de la radiation pour l'obtention d'énergie directe sous forme de chaleur, ou par conversion en électricité, pour utiliser dans la production d'eau chaude et dans la consommation domestique ou industrielle, climatisation des piscines, chauffage des maisons, hôtels, écoles, usines, etc.

**I.2 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'importance du soleil dans la vie humaine, ses bienfaits et ses domaines, et le développement du domaine de la recherche depuis sa découverte, où l'homme cherche à profiter de tout ce qu'il offre, qui est à la base de toutes les énergies à la surface de la Terre, pour qu'il reçoive des milliers de rayonnement solaire, que nous exploitons et consommons sur la base d'énergies de trois types d'énergie dynamique, l'énergie thermique et aperçu général sur les concentrateurs solaires cylindro-parabolique, les types des centrales, Caractéristiques, Structure générale de système de concentration et l'énergie photovoltaïque, les avantages les plus importants sont la production de chaleur et la production d'électricités .

---

## **Chapitre II :**

# **Étude géométrique et thermique du CCP**

---

## **II.1. Introduction :**

Avec les problèmes environnementaux et l'épuisement des ressources en énergies fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon...) Il est nécessaire de trouver une alternative naturelle et respectueuse de l'environnement et disponible dans presque tous les endroits.

Le développement dans le domaine des énergies renouvelables montre de grands progrès et la demande des pays pour cela et encourager ses utilisateurs, car nous trouvons la technologie solaire thermique plus avancée depuis sa découverte et de nombreuses applications telles que les stations de chauffage, de séchage et thermodynamiques, et les concentrés de bassin paraboliques sont les plus couramment utilisés et sur lesquels nous concentrerons. Les concentrateurs à cylindro parabolique sont la technologie la plus utilisée dans les grandes centrales solaires thermodynamiques pour la production d'électricité. Le miroir concentrateur est un cylindre à section parabolique et n'a qu'une seule direction de courbure. La concentration s'effectue sur la ligne où est placé le récepteur tubulaire dans lequel circule le fluide caloporteur (eau ou huile) qui peut être chauffé jusqu'à 450 °C. L'analyse optique et thermique de ces collecteurs est très importante pour le calcul des pertes optiques et thermiques,

Ce chapitre débute par une description du Caractéristiques géométrie réflexion lumineuse de CCP, et avoir aussi une modélisation mathématique de l'absorbeur qui est positionnée au le linge focal du CCP, et terminé par une simulation sur programme solTrace pour avoir la distribution du flux solaire autour du tube absorbeur.

## **II.2 Le concentrateur cylindro parabolique :**

### **II. 2.1 Le réflecteur parabolique :**

Les miroirs sont composés de verre pauvre en fer, dont la transmissivité atteinte 98%. Ce verre est recouvert d'une pellicule d'argent en sa partie inférieure, et d'un enduit spécial de protection. Un réflecteur de bonne qualité peut réfléchir 97% du rayonnement incident. Le facteur de concentration pour un capteur cylindro-parabolique est d'approximativement 80%.[26]

### **II. 2.2 Le tube absorbeur :**

Le tube absorbeur est souvent en cuivre recouvert d'une couche sélective, et il est entouré d'une enveloppe transparente en verre, comme il est représenté par la figure (II.3).

Il est placé le long de la ligne focale du concentrateur cylindro- parabolique. Il doit avoir les caractéristiques suivantes [26] :

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



**Figure II. 1** : structure de tube absorbeur

### II. 3 Les fluides caloporteurs : [27]

Le fluide caloporteur a pour rôle d'accumuler l'énergie thermique dans les collecteurs et de le transporter au bloc d'alimentation. Les Critères de sélection de fluide caloporteur doit répondre à certaines exigences :

- Température élevée d'évaporation et température faible de solidification
- Stabilité thermique, faible explosivité et inflammabilité, non polluant.
- Capacité calorifique importante, forte conductivité thermique, faible viscosité.
- Prix d'achat faible et bonne disponibilité.

Les types de fluides caloporteurs utilisés dans cette technologie sont :

- Huile thermique
  - Caloria (SEGS I et II, 290°C)
  - Therminol VP-1 (393°C)
  - Syltherm, Dow A (Dow Chemical, @400°C)

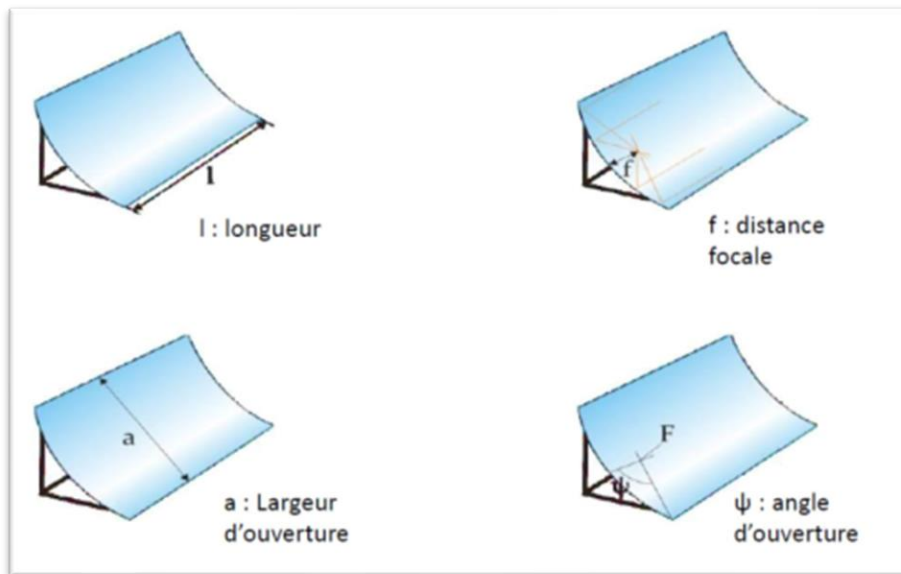
- Eau / Vapeur
  - Eau chaude pressurisée
  - Génération directe de vapeur (@500°C, projet DISS)
- Sels Fondus
- Gaz pressurisé

### II. 3 La géométrie et l'optique des concentrateurs cylindro-parabolique :

Pour pouvoir choisir un réflecteur cylindro-parabolique, Le concentrateur cylindro-parabolique est caractérisé par deux paramètres principaux. Les paramètres géométriques et les paramètres optiques [28]

#### II. 3.1 Les paramètres géométriques :[27]

Les quatre paramètres suivants sont utilisés pour caractériser la forme et la taille d'un cylindro parabolique : la longueur de cylindro-parabolique, la distance focale, la largeur de l'ouverture et l'angle d'ouverture. Figure (II.2)



**Figure II. 2 :** les paramètres géométriques d'un cylindro parabolique [27]

##### II. 3.1.1 La longueur de cylindro parabolique :

C'est la longueur du miroir, elle peut atteindre les 4.06 m.

##### II. 3.1.2 La distance focale :

C'est la distance entre le point focale et la courbe de la parabole. La focale de la parabole (f ou F) est le paramètre qui décrit la forme de la parabole. Figure ((II.3).

L'équation de parabole est :

$$y = \frac{1}{4f} x^2 \quad (\text{II. 1})$$

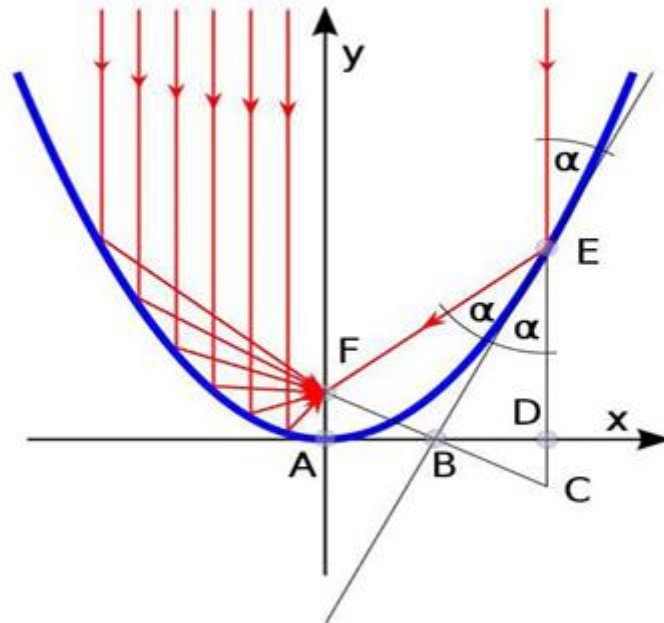


Figure II. 3: Chemin des rayons parallèles dans un miroir parabolique [27]

### II. 3.1.3 L'angle d'ouverture ( $\psi$ ) :

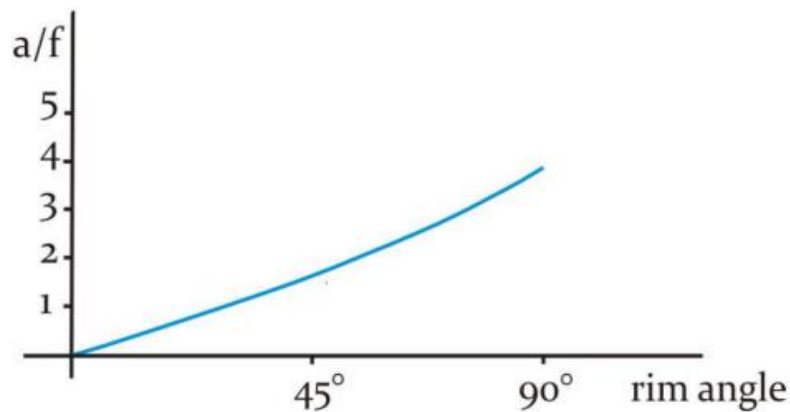
C'est l'angle au point focal entre l'axe optique (Y) et le segment reliant le point focal au bord du miroir. Deux des trois paramètres de l'angle d'ouverture, de la largeur d'ouverture et de la distance focale sont suffisants pour déterminer complètement la section transversale d'un cylindro-parabolique, c'est-à-dire la forme et la taille. Cela signifie également que deux d'entre eux sont suffisants pour calculer le troisième.  $\psi$  Peut être exprimée en fonction du rapport entre la largeur d'ouverture et la distance focale:

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

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

$$\frac{a}{f} = -\frac{4}{\tan \psi} + \sqrt{\frac{16}{\tan^2 \psi} + 16} \quad (\text{II. 3})$$

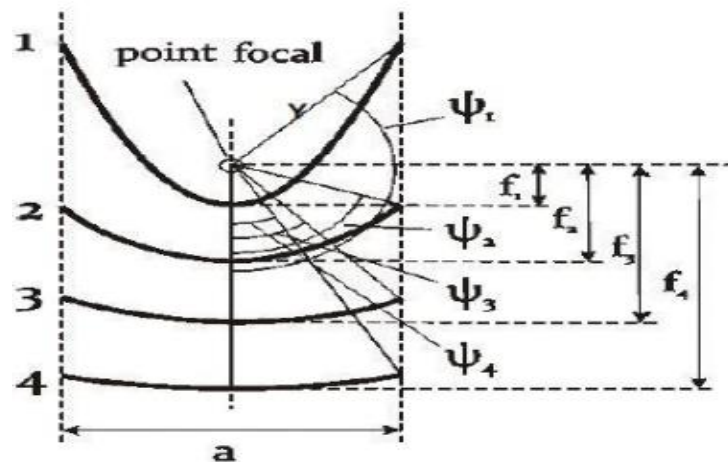
Le diagramme suivant représente le rapport  $a/f$  en fonction de l'angle d'ouverture :



**Figure II.4 :** Relation entre l'angle d'ouverture et la valeur  $a/f$  [27]

L'angle d'ouverture est lié à la distance entre les différentes parties des miroirs et la ligne focale. En prenant une largeur d'ouverture fixe, la figure (II.5) représente cette relation.

Il existe un angle d'ouverture optimal qui prend en compte aussi le prix du miroir proportionnel à sa surface. L'angle d'ouverture des cylindro paraboliques réelles est d'environ  $80^\circ$



**Figure II. 5 :** Relation entre la focale et l'angle d'ouverture pour une ouverture constante [27]

### II. 3.1.4 La largeur de l'ouverture $a$ :

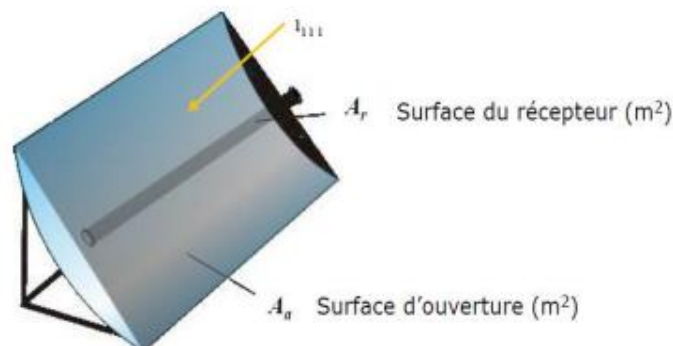
La plupart des collecteurs réels sont d'une largeur d'ouverture d'environ 6 m, la distance focale est (approximativement à l'angle d'ouverture et à la largeur d'ouverture) d'environ 1,75 m et la longueur du module est comprise entre 12 et 14 m. Il existe des collecteurs qui ont des largeurs d'ouverture plus petites (Solarlite) ou plus grandes (Skyfuel, Heliotric) avec différentes longueurs focales correspondantes.

## II. 3.2 Les paramètres Optiques :

### II. 3.2.1 La surface du miroir et la surface d'ouverture :

Pour un DNI (rayonnement normal direct) et position solaire données ; la surface d'ouverture de miroir est calculée comme le produit de la largeur de l'ouverture  $a$  et de la longueur du collecteur  $l$ . Figure (II.6)

$$A_a = a.l \quad (II.4)$$



**Figure II. 6:** Surface d'ouverture du collecteur et Surface d'ouverture du récepteur [28]

La surface d'un cylindro parabolique peut être importante pour déterminer le besoin de matière pour la fabrication. La surface est calculée comme suite :

$$A = \left( \frac{a}{2} \sqrt{1 + \frac{a^2}{16f^2}} + 2.f \cdot \ln \left( \frac{a}{4.f} + \sqrt{1 + \frac{a^2}{16f^2}} \right) \right) . l \quad (II - 5)$$

### II. 3.2.2 La concentration :

Le taux de concentration est l'un des paramètres principaux du collecteur, il est décisif pour les températures de fonctionnement possible de la centrale cylindro parabolique. Le rapport de concentration est  $C$  défini comme le rapport de la densité de flux radiant à la ligne focale  $G_{im}$ , à l'éclairement direct à l'ouverture du collecteur,  $G_a$  :

$$C = \frac{G_{im}}{G_a} \quad (II - 6)$$

Aussi, Il existe un moyen simple de spécifier le taux de concentration sans le mesurer qui est **la concertation géométrique**. Elle est définie comme le rapport de la surface de collecteur sur la surface du récepteur :

$$C_G = \frac{A_a}{A_r} \quad (\text{II. 7})$$

Comme il est illustré sur la figure précédente, concernant la surface du collecteur, elle est plus clair à compter que la surface du récepteur. Dans de nombreux cas, la surface projetée du tube absorbeur est choisie. Dans ce cas, la surface d'ouverture du récepteur est un rectangle avec de surface ,  $l$  .

Alors, la concentration géométrique est donné par :

$$C_G = \frac{a.l}{d.l} = \frac{a}{d} \quad (\text{II. 8})$$

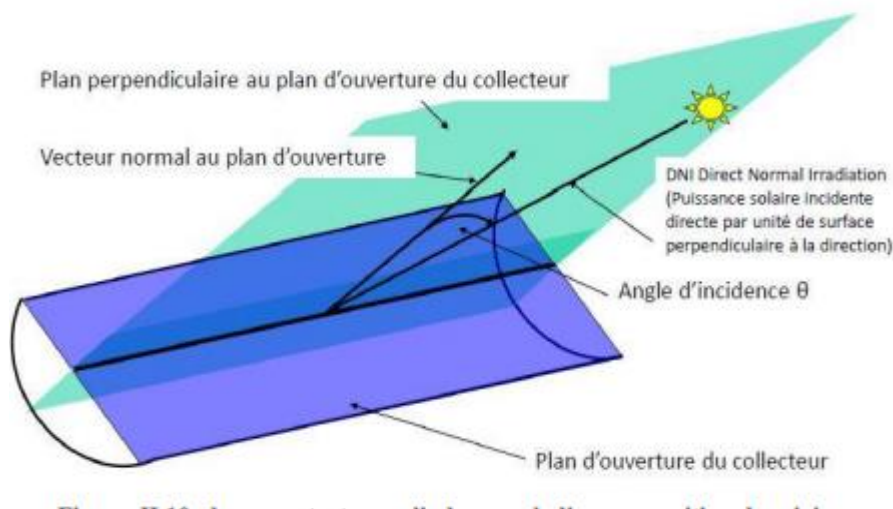
Dans les concertateurs cylindro paraboliques réels ; on prend la surface d'ouverture de récepteur c'est là sur face du tube absorbeur :

$$C_G = \frac{a.l}{\pi.d.l} = \frac{a}{\pi.d} \quad (\text{II. 9})$$

Cette définition mène à un taux de concentration géométrique faible. Donc, le taux de concentration selon la surface projetée du tube absorbeur est pratiquement le plus utilisé.

#### II.4 Le système de suivi solaire :

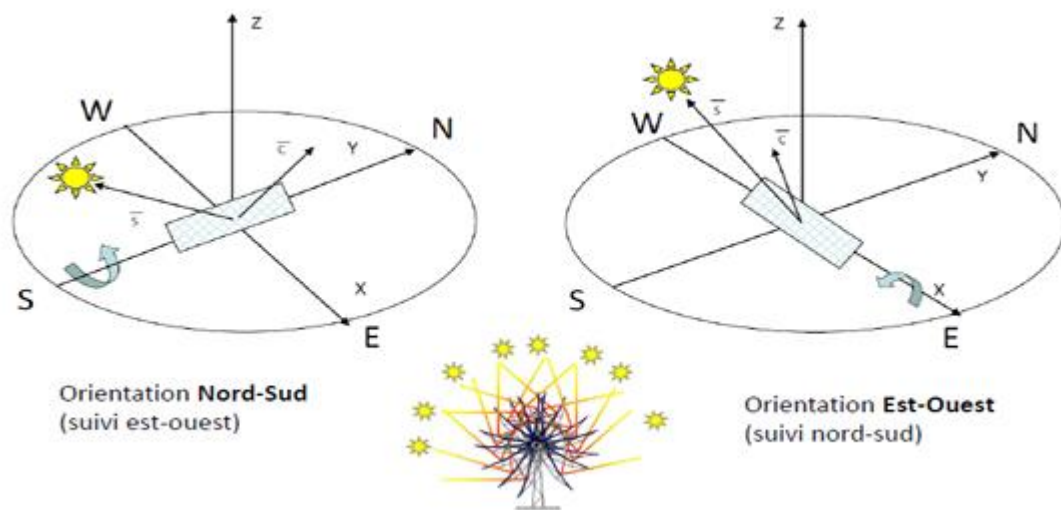
Comme tout collecteur d'un system CSP (Concentrating Solar Power Plant), les concentrateurs cylindro parabolique sont également équipés d'un mécanisme de poursuite figure (II-7). C'est le système qui permet de suivre le rayonnement solaire : il adapte en permanence le capteur solaire de façon à ce que le rayonnement reçu soit toujours perpendiculaire au réflecteur. Ainsi, le rayonnement est réfléchi au foyer de la parabole formé par les miroirs, et concentré dans un tube collecteur.



**Figure II. 7:** le concentrateur cylindro parabolique en position de suivi [30]

La poursuite solaire peut être sur un seul axe ou autour de deux axes. Dans le premier cas le mouvement peut être de trois manières :

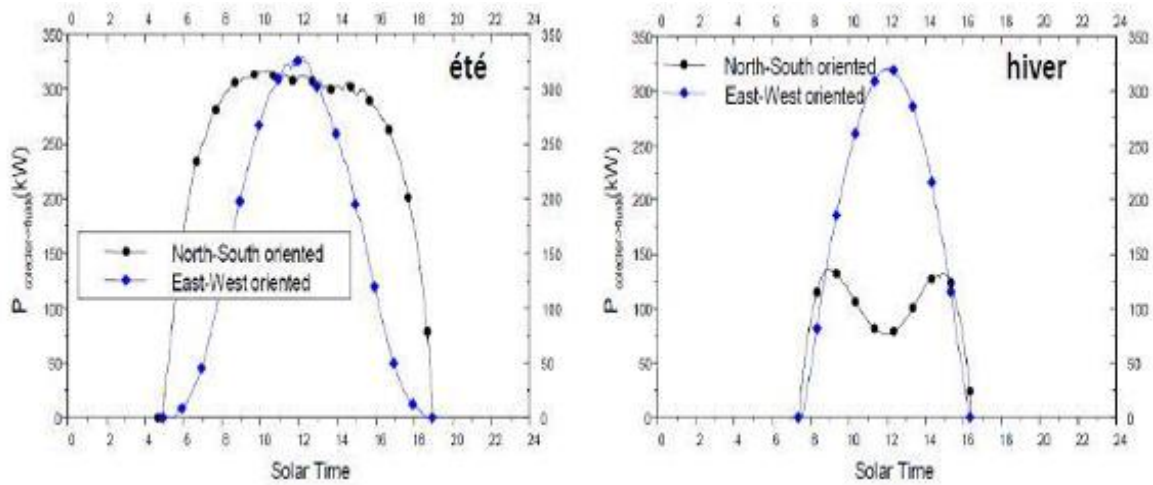
- Est-Ouest horizontal, le tube récepteur du concentrateur est parallèle à l'axe Nord-Sud.
- Nord-Sud horizontal, le tube récepteur du concentrateur est parallèle à l'axe Est-Ouest.
- Est-Ouest polaire, le mouvement doit être suivant l'axe de la terre avec une inclinaison égale à la latitude du lieu.



**Figure II. 8:** Orientation de concentrateurs cylindro parabolique [31]

L'orientation Nord -Sud est préférée car elle permet une grande variabilité de l'énergie thermique récupérée durant l'année, une quantité de chaleur collectée pour une orientation NS est plus importante que pour EW et elle offre un bon fonctionnement dans la gamme de température entre 150-350°C.

Et dans les deux graphiques qui suivent figure (II-9), la comparaison des simulations de la Puissance récupérée par un fluide caloporteur dans les deux cas d'orientation faite à PSA (The Plateforme Solar de Almería-Espagne) du collecteur ET-100.



**Figure II. 9:** simulation de l'influence de l'orientation à PSA du collecteur ET-100

## II. 5 Le Bilan thermique du tube absorbeur :[32]

Ils existent plusieurs méthodes pour établir un bilan énergétique du tube récepteur pour la modélisation on cite :

- La méthode des résistances thermiques et l'analogie électrique
- La méthode de calcul de la température de chaque élément du collecteur par une discrétisation unidimensionnelle.

La figure suivante illustre les flux d'énergie sur un récepteur.

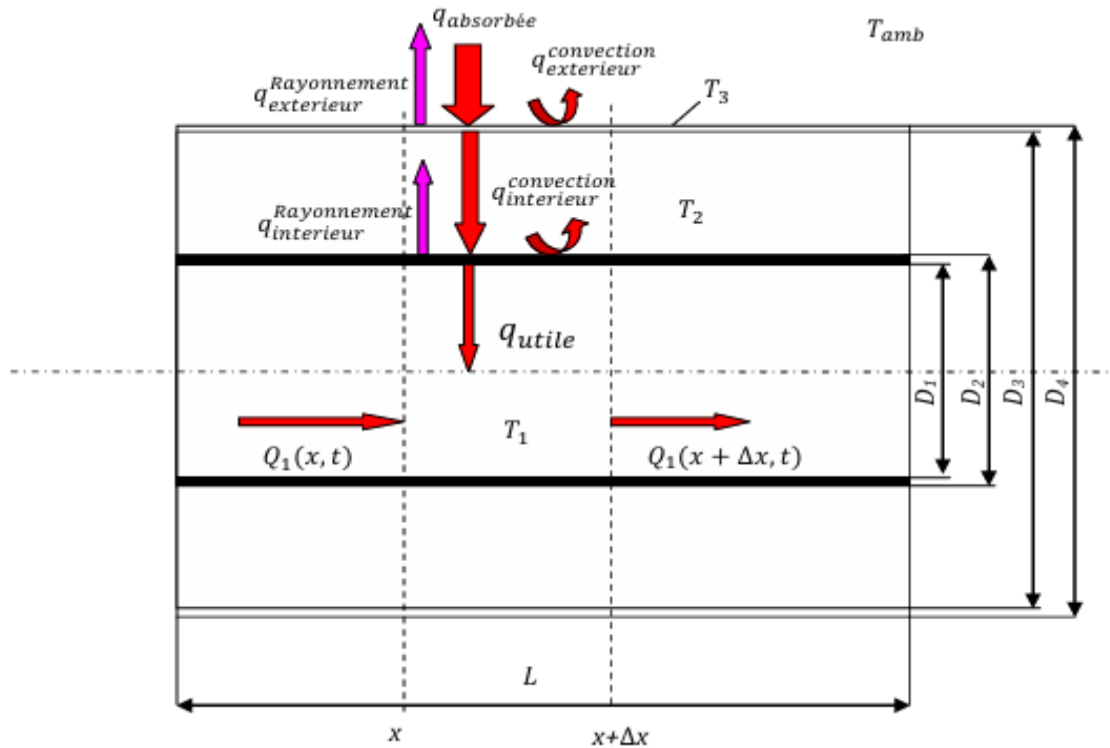


Figure II. 10: schéma du bilan énergétique d'un élément x du collecteur CCP

### II. 5.1 Le bilan thermique du fluide :

Le bilan thermique du fluide est représenté par l'équation suivante :

$$\Delta Q_1(x, t) = \rho_1 C_{p1} A_1 \Delta x T_1(x, t) \quad (\text{II. 10})$$

$$Q_1 = \rho_1 C_{p1} V T_1(x, t) \quad (\text{II. 11})$$

$$\rho_1 C_{p1} A_1 \Delta x \frac{dT_1}{dt} = Q_1(x, t) - Q_1(x + \Delta x, t) + q_{utile}(x, t) \quad (\text{II. 12})$$

La simplification de l'équation donne :

$$\frac{dT_1(x,t)}{dt} + \vartheta \frac{dT_1(x,t)}{dx} = \frac{q_{utile}(x,t)}{\rho_1 C_{p1} A_1} \quad (\text{II. 13})$$

$\vartheta$  : La vitesse d'écoulement

$A_1$  : La section transversale de tube  $A_1 = \frac{\pi}{4} D_1^2$

$q_{utile}$  : La puissance reçue par unité de longueur

$$q_{utile} : h_1 A \Delta T = h_1 \pi D_1 (T_2 - T_1) \quad (\text{II. 14})$$

$h_1$  : Le coefficient de transfert de chaleur par convection

**A : La surface interne du tube**  $A = \pi D_1 L$

**$T_2$  : La température de la surface de l'absorbeur**

**$T_1$  : La température de fluide**

Pour introduire  $h_1$  :

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

$$N_u = 0,0023 R_{e1}^{0,8} P_{r1}^{0,4} = \frac{h_1 D_1}{\lambda_1} \quad (\text{II. 15})$$

$$R_e = 4 \frac{\rho_1 V_1}{\pi D_1 \mu_1} \quad (\text{II. 16})$$

**$\lambda_1$  : La conduction thermique du fluide**

**$\mu_1$  : La viscosité dynamique du fluide**  $\mu_1 = \vartheta_1 \rho_1$

**$\vartheta_1$  : La viscosité cinématique du fluide**

**Le nombre de Prandtl est donné par :**

$$P_{r1} = \frac{\mu_1 C_{p1}}{\lambda_1} \quad (\text{II. 17})$$

Les propriétés du fluide caloporteur  $C_{p1}$ ,  $\lambda_1$ ,  $\mu_1$  et  $\rho_1$  sont en fonction de la température  $T_2$ .

## II. 5.2 Le bilan thermique de tube absorbeur :

Pour le tube absorbeur le bilan thermique s'écrit :

$$\Delta Q_2(x, t) = \rho_2 C_{p2} A_2 \Delta x T_2(x, t) \quad (\text{II. 4})$$

$$\frac{d\Delta Q_2(x, t)}{dt} = (q_{absorbée}(t) - q_{interieur}(x, t) - q_{utile}(x, t)) \Delta x \quad (\text{II. 19})$$

La simplification de l'équation donne :

$$\frac{dT_2(x, t)}{dt} = \frac{1}{\rho_2 C_{p2} A_2} (q_{absorbée}(t) - q_{interieur}(x, t) - q_{utile}(x, t)) \quad (\text{II. 20})$$

$q_{absorbée}$  : La quantité d'énergie solaire absorbée de la thermodynamique. La puissance absorbée par unité de surface d'ouverture peut être écrit comme suit :

$$q_{absorbée} = I \cdot \rho \cdot \gamma \cdot \tau \cdot C_G \quad (\text{II. 21})$$

$q_{interieur}$  : La quantité d'énergie qui indique le transfert thermique par convection et par rayonnement entre le tube absorbeur et l'enveloppe du verre

$$q_{interieur} = q_{interieur}^{convection} + q_{interieur}^{rayonnement} \quad (\text{II. 22})$$

La convection dans l'espace annulaire entre le tube absorbeur et l'enveloppe du verre est estimée par des relations de la convection naturelle entre deux cylindres horizontaux et concentriques [8], cependant l'enveloppe du verre est usuellement plus froide que le tube absorbeur ( $T_2 > T_3$ ) :

$$q_{interieur}^{convection} = \frac{2 \pi \lambda_{eff}}{\ln \frac{D_3}{D_2}} (T_2 - T_3) \quad (\text{II. 23})$$

$\lambda_{eff}$  : La conductivité thermique effective.

$\lambda_{eff}$  : La conductivité thermique effectuée de l'air, elle représente la conductivité thermique que l'air stationnaire devrait avoir pour transférer la même quantité de chaleur que l'air mobile, elle est donnée par [17] :

$$\frac{\lambda_{eff}}{\lambda_{air}} = 0,386 \left( \frac{p_r^{air}}{0,861 + p_r^{air}} \right)^{\frac{1}{4}} (F_{cyl} R_{aL})^{\frac{1}{4}} \quad (\text{II. 24})$$

$F_{cyl}$  : Le facteur géométrique pour les cylindres concentrique.

$R_{aL}$  : Le nombre de Rayleigh.

$$F_{cyl} = \frac{(\ln \frac{D_3}{D_2})^4}{L^3 (D_2^{-\frac{1}{5}} + D_3^{-\frac{3}{5}})^5} \quad (\text{II. 22}) \quad R_{aL} = \frac{g \beta_{air} (T_2 - T_3)}{\vartheta_{air} \alpha_{air}} L^3 \quad (\text{II. 25})$$

L : La longueur effective de l'absorbeur  $L = \frac{D_3 - D_2}{2}$  (II. 5)

$\beta_{air}$  : Facteur de dilatation volumique du fluide

$\alpha_{air}$  : Absorptivité

Les propriétés physiques de l'air sont évaluées  $T_{moy} = \frac{T_2 + T_3}{2}$  (II. 26)

Le transfert thermique par rayonnement  $q_{interieur}^{convection}$  entre deux cylindres concentriques et horizontaux entre le tube absorbeur et l'enveloppe du verre peut être exprimé par la relation suivante [18] :

$$q_{interieur}^{rayonnement} = \frac{\pi D_2 \sigma (T_2^4 - T_3^4)}{\frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_3} \left(\frac{D_2}{D_3}\right)} \quad (\text{II. 27})$$

$\varepsilon_2, \varepsilon_3$  : Emissivité de l'absorbeur et l'enveloppe

: Constant de Stefan-Boltzmann

Alors :

$$q_{interieur} = \frac{2 \pi \lambda_{eff}}{\ln \frac{D_3}{D_2}} (T_2 - T_3) + \frac{\pi D_2 \sigma (T_2^4 - T_3^4)}{\frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_3} \left(\frac{D_2}{D_3}\right)} \quad (\text{II. 28})$$

### II. 5.3 Le bilan thermique de l'enveloppe en verre :

Pour l'enveloppe en verre le bilan thermique s'écrit :

$$\Delta Q_3(x, t) = \rho_3 C_{p_3} A_3 \Delta x \Delta T_3(x, t)$$

$$\frac{dT_3(x, t)}{dt} = \frac{1}{\rho_3 C_{p_3} A_3} (q_{absorbée}(t) - q_{exterieur}(x, t)) \quad (\text{II. 29})$$

$\rho_3, C_{p_3}, Pr_3$  Est les propriétés physiques du verre à la température ambiante.

$$q_{exterieur} = q_{exterieur}^{convection} + q_{exterieur}^{rayonnement} \quad (\text{II. 30})$$

$$q_{exterieur}^{convection} = h_3 \pi D_4 (T_3 - T_{amb}) \quad (\text{II. 31})$$

Pour introduire  $h_3$  :

$$Nu_3 = \frac{h_3 D_3}{\lambda_3} \quad (\text{II. 32})$$

$$Nu_3 = 0,3 + \frac{0,62 Re_3^{\frac{1}{2}} Pr_3^{\frac{1}{3}}}{[1 + (\frac{0,4}{Pr_3})^{\frac{2}{4}}]^{\frac{1}{4}}} \left[ 1 + \left( \frac{Re_3}{282000} \right)^{\frac{5}{8}} \right]^{\frac{4}{5}} \quad (\text{II - 33})$$

$$Re_3 = \frac{\rho_{air\ amb} V_{vent} D_4}{\mu_{air\ amb}} \quad (\text{II - 34})$$

$$q_{exterieur}^{Rayonnement} = \varepsilon_3 \sigma \pi D_4 (T_3^4 - T_{amb}^4) \quad (\text{II - 35})$$

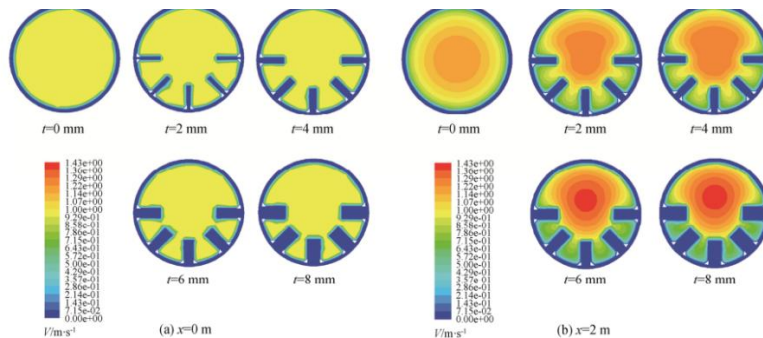
$q_{exterieur}$  : La quantité d'énergie qui indique le transfert thermique entre l'enveloppe du verre et l'environnement.

L'amélioration des échanges thermiques entre le fluide caloporteur et la paroi du tube récepteur d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique permet l'augmentation de son efficacité thermique et, par conséquent, l'amélioration du rendement des installations de production d'électricité par énergie solaire. Ces dernières années, de nombreuses recherches scientifiques ont été concentrées sur les techniques d'amélioration ou d'intensification du transfert de chaleur dans les tubes et les conduites. Cette partie est dédiée à l'état de l'art des différentes techniques utilisées pour l'augmentation et l'amélioration des échanges de chaleurs dans les conduites.

L'intégration de tubes absorbants à ailettes internes dans des capteurs solaires à auge parabolique a un impact significatif sur leur efficacité. Les recherches indiquent que l'ajout d'ailettes longitudinales internes, ainsi que l'utilisation de nanofluides, améliorent les performances thermiques en réduisant les pertes thermiques et en améliorant le transfert de chaleur dans le collecteur[33][34] Des études comparant différents revêtements de tubes absorbants, y compris des revêtements mats et des nano-revêtements avec des nanoparticules, ont montré une efficacité thermique et optique améliorée, entraînant une meilleure absorption des rayonnements et des performances globales du collecteur [35] En outre, des études sur les caractéristiques de transfert de chaleur des tubes absorbants dotés d'ailettes longitudinales internes ont démontré que les ailettes à bords arrondis sont plus performantes que celles à arêtes vives, ce qui entraîne des nombres de Nusselt plus élevés et des pertes de pression plus faibles, contribuant ainsi à une efficacité accrue du système de capteurs solaires[36]. En outre, des expériences portant sur différents modèles de tubes absorbants, tels que des tubes absorbants à double vide à plaques plates, ont montré des performances thermiques supérieures à celles des tubes traditionnels, soulignant l'importance d'éléments de conception innovants pour améliorer l'efficacité des capteurs [37].

laaraba adel1\*, mebaraki ghazali2 (2020) [38] ont étudié Le transfert de chaleur dans un absorbeur à ailettes d'un collecteur parabolique pour l'amélioration de ses performances thermiques. Les valeurs de la longueur des ailettes variaient de 0 à 20 mm ; leurs épaisseurs variaient de 0 à 8 mm et leur nombre était de 5. Les paramètres utilisés sont : le champ thermique et dynamique, le coefficient de frottement, le nombre de Nusselt, l'efficacité thermique et l'indice d'amélioration thermique.

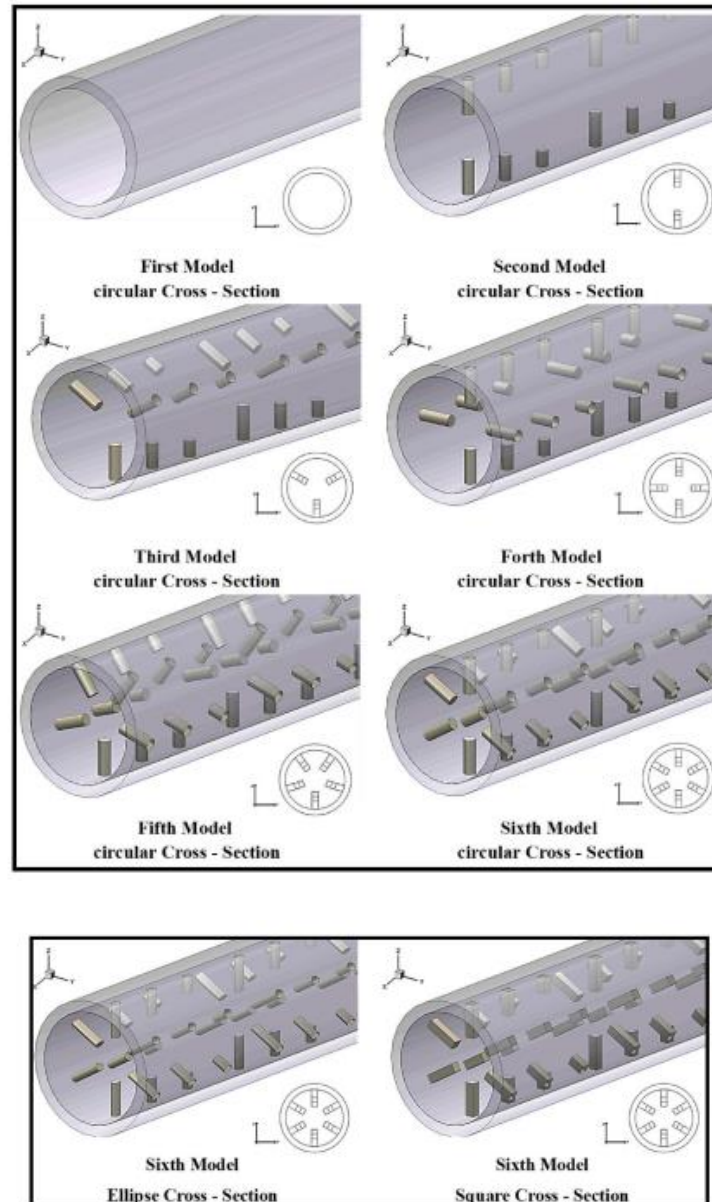
Les résultats obtenus montrent que l'utilisation d'ailettes dans la moitié inférieure du tube absorbeur peut améliorer le transfert de chaleur entre le tube absorbeur et le fluide caloporteur.



**Figure II. 11 :** Valeurs des vitesses de fluide sur une section transversale du tube absorbeur pour différents  $t$

Waleed Al-Aloosi a, Yaser Alaiwi a, Hudhaifa Hamzah b,(2023)[39] l'objectif de ce travail est d'améliorer l'efficacité du processus de transfert de chaleur. Ils ont réalisé une simulation numérique de l'écoulement turbulent dans un bassin solaire parabolique modifié. Le collecteur a été mis en œuvre avec une nouvelle conception d'ailettes insérées le long du tube absorbeur

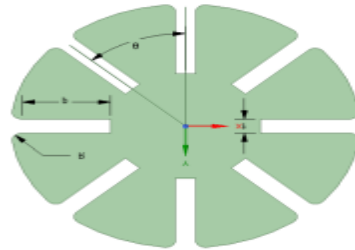
Ces ailettes sont répertoriées comme des ensembles répétitifs, et chaque ensemble a une hauteur croissante de Palmes. Des simulations 3D ont été réalisées sur la base de l'approche volumes finis à l'aide d'ANSYS Programme courant. Les données obtenues sont présentées dans deux sections différentes. Les résultats montre Les performances thermiques de tous les modèles modifiés se situent dans la plage testée de  $Re$  supérieure à C'est le modèle de référence. De plus, le 6ème modèle à six ailettes a une chaleur maximale Performances.



**Figure II. 12 :** Représentation schématique des géométries considérées avec différents (a) nombres d'ailettes insérées et (b) zones de section transversale des ailettes insérées.

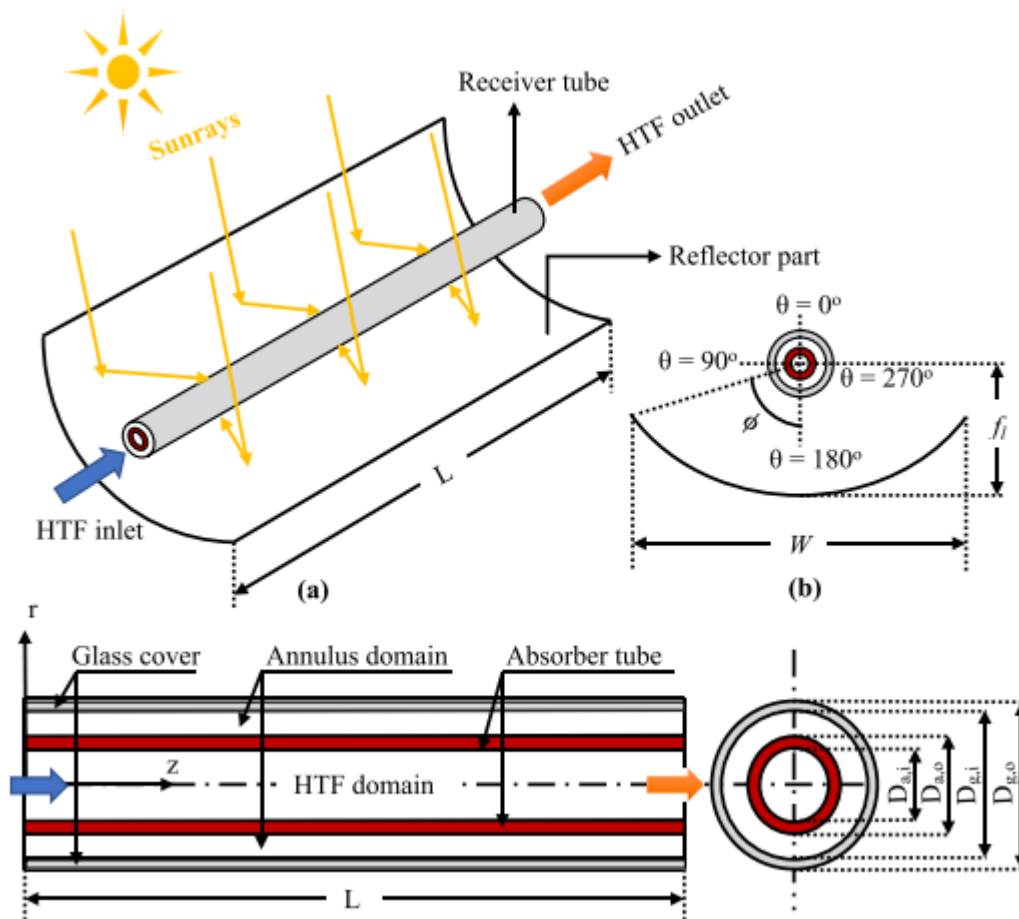
**Nourhan B. Saada , Antar M M Abdalaa , M. Fatouha, b (2022)[40]** Dans cette recherche, ils ont étudié les caractéristiques de transfert thermique d'un tube d'absorption avec une unité Un complexe de creux paraboliques LS-2 avec des ailettes longitudinales internes de section rectangulaire a été étudié en utilisant ANSYS CFD et l'huile de type syltherm 800 La simulation a été réalisée à l'aide des ailettes longitudinales internes largement arrondi pour l'entrée du fluide caloporteur Température débit (9 :27m<sup>3</sup>)/h et rayonnement naturel direct (800 : 1 100 W/m<sup>2</sup>) Pour épaisseur d'ailettes 4 mm, longueur d'ailettes 25 mm, rayon de bord arrondi 4 mm et l'angle entre les ailettes est de 45 degrés.

Efficacité thermique, nombre de Nusselt, Les pertes de charge et l'indice d'amélioration thermique sont calculés à différents niveaux de fonctionnement conditions. Les résultats ont montré que les caractéristiques de transfert de chaleur des ailettes rectangulaires Un bord arrondi vaut mieux pour améliorer la performance thermique.



**Figure II. 13 :** Ailettes longitudinales intérieurement rectangulaires avec forme de bord arrondi (modèle actuel)

Sumeet Anand, sumit Kumar (2024) [41], L'étude a montré l'impact de divers tubes absorbants à ailettes longitudinales utilisant des fluides caloporteur gazeux sur la performance des collecteurs solaires à concentration parabolique. Les fluides caloporteurs traditionnels comme l'eau, les huiles thermiques et les sels fondus sont inadéquats pour les opérations à haute température, ce qui rend les gaz une alternative viable. Cependant, les gaz ont des coefficients de transfert de chaleur inférieurs par rapport aux fluides conventionnels, nécessitant l'utilisation d'ailettes pour améliorer la performance thermique. L'étude a examiné sept gaz - air, dioxyde de carbone, hélium, azote, oxygène, méthane et néon - et six profils d'ailettes - rectangulaire, triangulaire, trapézoïdale, en forme de T et en forme de Y - pour identifier le gaz et la structure d'ailettes optimaux. En utilisant ANSYS Fluent 2020 R2 pour la simulation et en validant les résultats avec des données expérimentales et numériques existantes, le méthane s'est révélé être le gaz le plus approprié basé sur les techniques d'optimisation multi-objectifs et l'indice de facteur d'amélioration de la performance.



**Figure II. 14 :** Diagramme schématique du PTC examiné, (b) vue latérale du PTC et (c) tube récepteur

**Conclusion :**

Le transfert de chaleur dans l'absorbeur joue un rôle crucial dans le fonctionnement global du concentrateur solaire cylindro-parabolique. Il permet de convertir le rayonnement solaire en chaleur utilisable, ce qui permet d'alimenter de nombreux processus et systèmes. Une bonne compréhension du transfert de chaleur dans l'absorbeur est essentielle pour optimiser son efficacité et ses performances. Comme il ressort clairement de la revue bibliographique précédente, de nombreuses études ont été orientées vers la recherche des moyens optimaux pour améliorer les performances thermiques des concentrateurs solaires cylindro-parabolique. L'utilisation d'ailettes internes se trouve parmi les techniques d'amélioration du transfert thermique les plus efficaces. Dans ce contexte, diverses formes géométriques d'ailettes ont été testées dans la littérature.

---

**Chapitre III :**

**Modélisation et résolution**

**numérique**

---

### III.1 Introduction :

Dans ce chapitre représente Une simulation du transfert de chaleur et de l'écoulement de fluide couplés dans le tube absorbant d'un prototype de CCP. Le CCP est testé dans les conditions climatiques de Laghouat (Algérie). L'étude a été réalisée en utilisant le réflecteur secondaire pour augmenter le rapport de concentration géométrique. Le réflecteur secondaire aide à répartir plus uniformément le flux de puissance autour du tube [42]. Cette distribution uniforme peut aider à réduire la réflexion et les pertes par rayonnement. L'analyse des récepteurs CCP a été réalisée en utilisant des distributions uniformes sur la surface du tube absorbant. La méthode de lancer de rayons (Monte Carlo) est utilisée dans le logiciel **SolTrace** pour calculer la distribution du flux dans chaque cas. Les équations de l'écoulement des fluides et le transfert de chaleur dans le système sont résolus à l'aide du logiciel **ANSYS-fluent CFD** avec l'utilisation de deux fluides caloporteurs dans le but de faire une étude comparative

### III.2 Collecteur à cylindre parabolique contrôlé avec réflecteur secondaire

#### III.2.1 Matériels et méthodes :

Le CCP est un système focalisé en ligne qui utilise un réflecteur parabolique pour focaliser le rayonnement solaire sur un récepteur linéaire. Le réflecteur est l'une des parties vitales du CCP car il décide quelle partie du rayonnement solaire sera collectée par le tube absorbeur. Le système considéré dans ce travail est un prototype de longueur 1m et une superficie de 1 x 1 m<sup>2</sup>. [42]

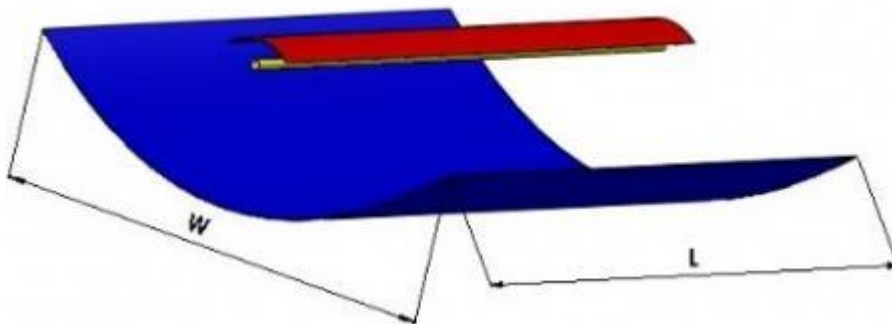


Figure III. 1 : Module CCP avec réflecteur secondaire

Nous avons introduit un réflecteur secondaire, qui a une forme cylindrique parabolique, qui a été réalisé en suivant les mêmes étapes que le réflecteur principal avec une différence de hauteur (voir Figure III.1). Le CCP dispose d'un système de suivi à axe unique, d'est en ouest et est positionné dans une direction sud-nord. L'eau est utilisée comme un fluide caloporteur. L'énergie thermique gagnée par le fluide de travail peut être utilisée dans diverses applications telles que les systèmes de chauffage et de refroidissement de l'air.

La concentration d'énergie est mesurée par un coefficient dit de concentration géométrique défini par le rapport de l'ouverture du collecteur  $A_a$  et de la surface du récepteur  $A_{abs}$  :

$$C = \frac{A_a}{A_{abs}} \quad (\text{III } 1)$$

### III.3 Représentation schématique :

La figure (III.2) montre le modèle thermique proposé d'un condenseur solaire parabolique cylindrique avec un réflecteur secondaire. Les paramètres géométriques du collecteur cylindro-parabolique et du tube absorbeur pour cette étude sont présentés dans la figure (III.2). La figure (III.2) représente le schéma d'un tube absorbeur.

#### ➤ Hypothèses simplificatrices :

Le modèle thermique proposé pour le concentrateur cylindro parabolique solaire est illustré à la Figure (III.1). Les paramètres géométriques du collecteur cylindro parabolique et du tube absorbeur pour cette étude sont illustrés dans le tableau (III.1). Pour effectuer notre étude, nous considérons les hypothèses suivantes :

- Comme il est clair sur le tableau (III.1) ; La transmissivité de l'enveloppe en verre est très proche de 1 et l'épaisseur très mince, par conséquent, l'influence de l'enveloppe en verre est minime sur les valeurs et la distribution du flux de chaleur.
- On divise le tube absorbeur en deux parties, la première partie supérieure est soumise à une répartition du flux de chaleur ( $1000 \text{ w/m}^2$ ), la deuxième partie inférieure est soumise au flux de chaleur concentré calculé à l'aide de code de calcul Soltrace.
- L'écoulement est turbulent stationnaire

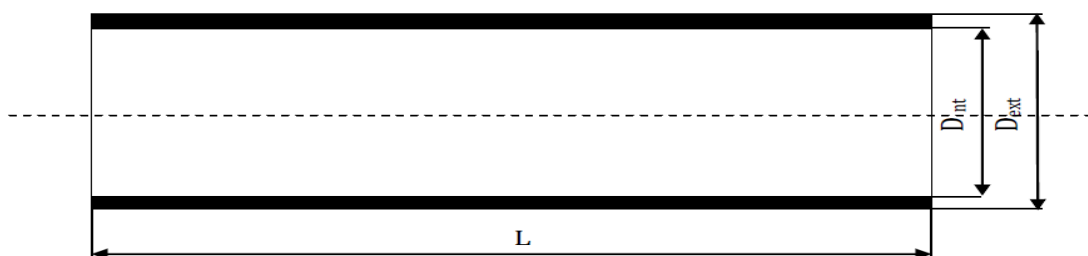


Figure III.2: Schéma d'un tube absorbeur

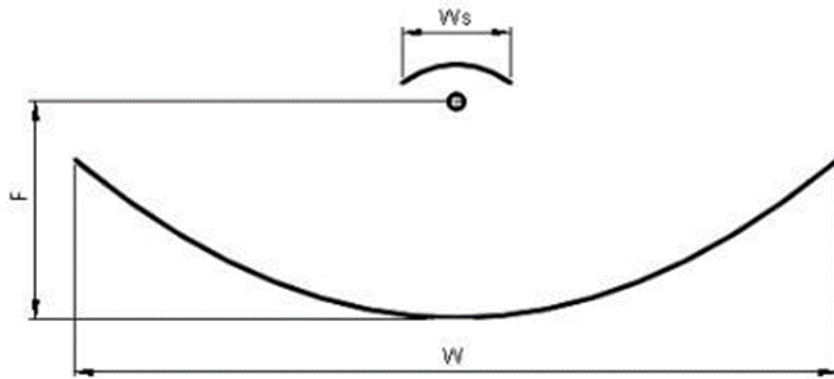


Figure III. 3: Schéma d'un CCP avec réflecteur secondaire

### III. 4 Présentation de Logiciel parabola Calculatoire 2.0 :

Parabola Calculatoire est un outil en ligne puissant et facile à utiliser qui vous permet de calculer les coordonnées des points d'une parabole et de visualiser des graphiques paraboliques dans le plan cartésien. Il est doté d'une interface simple et intuitive qui permet aux utilisateurs de saisir et de modifier facilement les valeurs des paramètres de la parabole et de s'assurer que le graphe affiché est correct. [43]

Parabola Calculateur fournit des fonctionnalités avancées pour les mathématiciens ainsi que pour les étudiants et professeurs qui étudient et enseignent les mathématiques. Il est facile à comprendre et à utiliser et offre une variété de fonctionnalités qui peuvent être utilisées pour tracer des paraboles et les étudier.

- **Fonctionnalités :**

- **Calculateur de paramètres de parabole :** Parabola Calculateur permet aux utilisateurs de saisir les paramètres de la parabole et de calculer les coordonnées des points de la parabole.
- **Graphique de parabole :** Parabola Calculatoire permet aux utilisateurs de tracer un graphique de parabole qui peut être visualisé dans le plan cartésien.
- **Éditeur de graphique :** Parabola Calculateur permet aux utilisateurs de personnaliser leur graphique de parabole en modifiant les couleurs, les tailles et les styles des points et des lignes.
- **Outils de zoom :** Parabola Calculatoire comprend des outils de zoom et de panoramique qui permettent aux utilisateurs de zoomer et de déplacer librement le graphique pour avoir une meilleure vue d'ensemble.

- Outils d'analyse : Parabola Calculatoire comprend des outils d'analyse qui permettent aux utilisateurs d'analyser plus précisément le graphique de parabole et de calculer des valeurs telles que l'équation de la parabole et le coefficient directeur.
- Exportation et impression : Parabola Calculateur permet aux utilisateurs d'exporter et d'imprimer parabole pour une analyse plus approfondie.

Parabola Calculateur est un outil pratique pour les étudiants et les professeurs qui étudient ou enseignent les mathématiques. Il est facile à utiliser et offre une variété de fonctionnalités qui peuvent être utilisées pour tracer des paraboles et les étudier. Avec Parabola Calculatoire, vous pouvez facilement tracer des graphiques de paraboles et les analyser, ce qui vous permettra de mieux comprendre la structure des paraboles et de calculer plus facilement leurs propriétés.

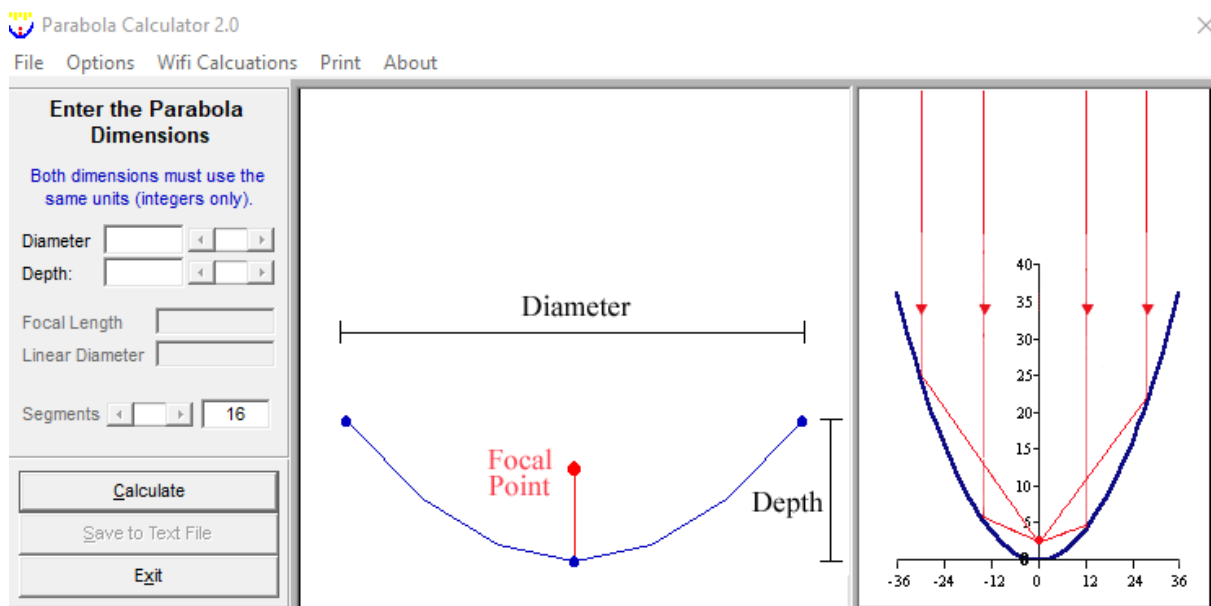


Figure III.4: surface logiciel parabola

### III. 5 Présentation de Logiciel pv syst : [44]

Pv syst est conçu pour être utilisé par les architectes, les ingénieurs et les chercheurs, mais c'est aussi un outil pédagogique très utile. Il inclut une aide contextuelle approfondie, qui explique en détail la procédure et les modèles utilisés et offre une approche ergonomique avec guide dans le développement d'un projet. PVsyst permet d'importer des données météo d'une dizaine de sources différentes ainsi que des données personnelles.



La situation géographique est indiquée dans le tableau (II 31). Ces coordonnées ont été utilisées pour toutes les données météorologiques et les données spécifiques au site tout au long de l'étude.

**Tableau III. 1:** Etapes du fichier de données météorologiques dans PVsyst.

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

**Tableau III. 2:** Données météo horaires des valeurs de densité de flux solaire pour une journée 21(juin mars sept dec )

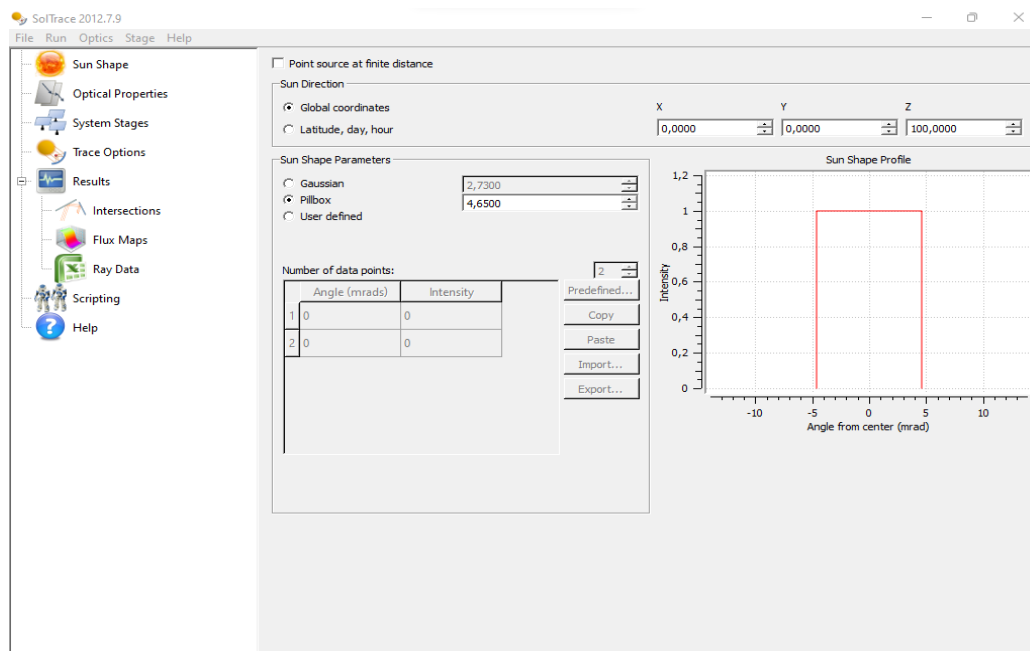
Temps (h)	21 juin	21 Mars	21 sept	21 dec
5h.00	0	0	0	0
6h.00	29	0	0	0
7h.00	232	6	45	0
8h.00	447	214	272	6
9h.00	646	441	490	182
10h.00	815	636	674	357
11h.00	942	785	808	489
12h.00	1018	877	885	566
13h.00	1037	906	898	583
14h.00	999	869	846	539
15h.00	906	770	734	437
16h.00	764	614	569	285
17h.00	584	414	363	97
18h.00	378	181	133	0
19h.00	161	0	0	0
20h.00	0	0	0	0

### III. 6 Présentation de Logiciel SolTrace :[45]

SolTrace est un logiciel développé au sein du National Renewable Energy Laboratory (NREL) pour modéliser les systèmes d'énergie solaire (CSP) et analyser leurs performances optiques (Figure III.3). Ce logiciel utilise la méthode dite de Monte Carlo. L'utilisateur choisit le nombre de rayons qu'il souhaite lancer depuis le soleil. Le logiciel produit alors de manière aléatoire une série de rayons. Le principe de base est ensuite de calculer la trajectoire de chaque rayon pour voir comment il interagit avec les différents éléments du système et de pouvoir ainsi déterminer le nombre de rayons qui impactent chaque surface.

À toutes les étapes, le logiciel détermine l'angle de réflexion de chaque rayon en fonction de son point d'impact, de son angle d'incidence et de la géométrie de la surface. Cette méthode de calcul reproduit le parcours réel des photons.

En utilisant un grand nombre de rayons, elle permet d'avoir des résultats précis même avec des systèmes optiques complexes



**Figure. III.5:** SURFACE logiciel SOLTRACE

À l'extrême gauche, des icônes pour différentes étapes de la création et de l'exécution d'une simulation de traçage des rayons :

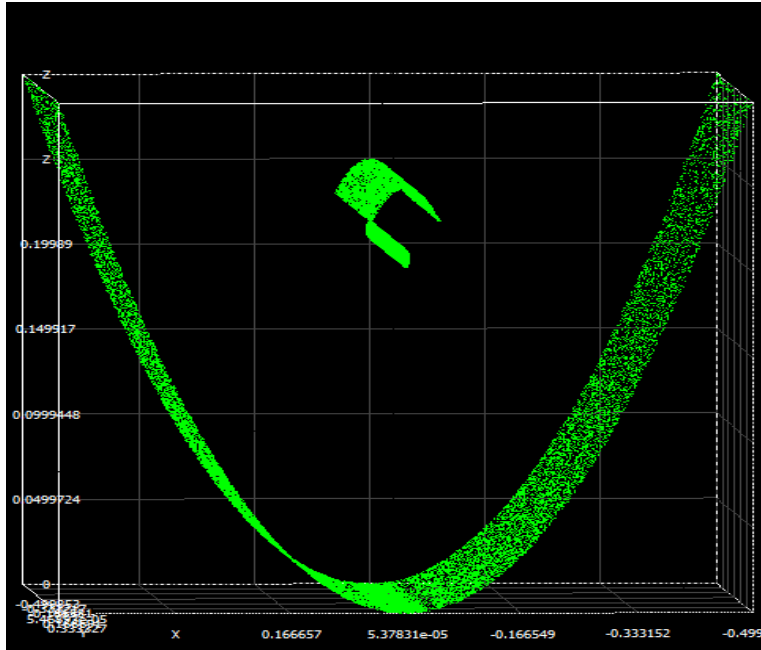
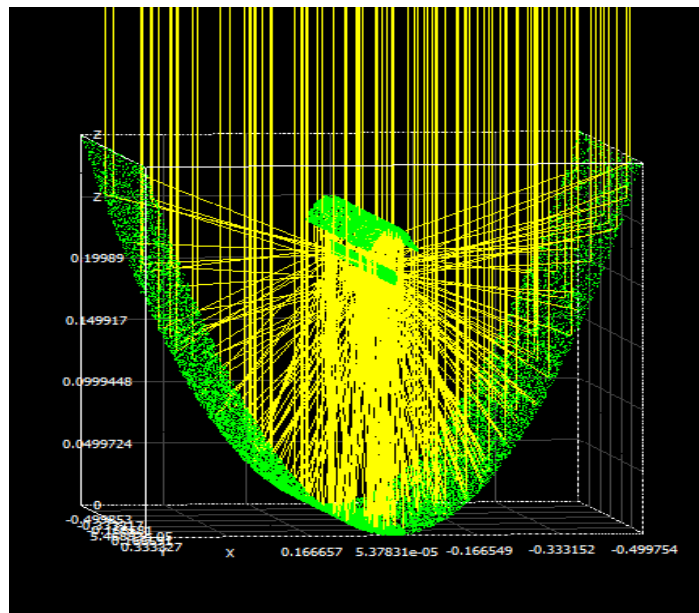
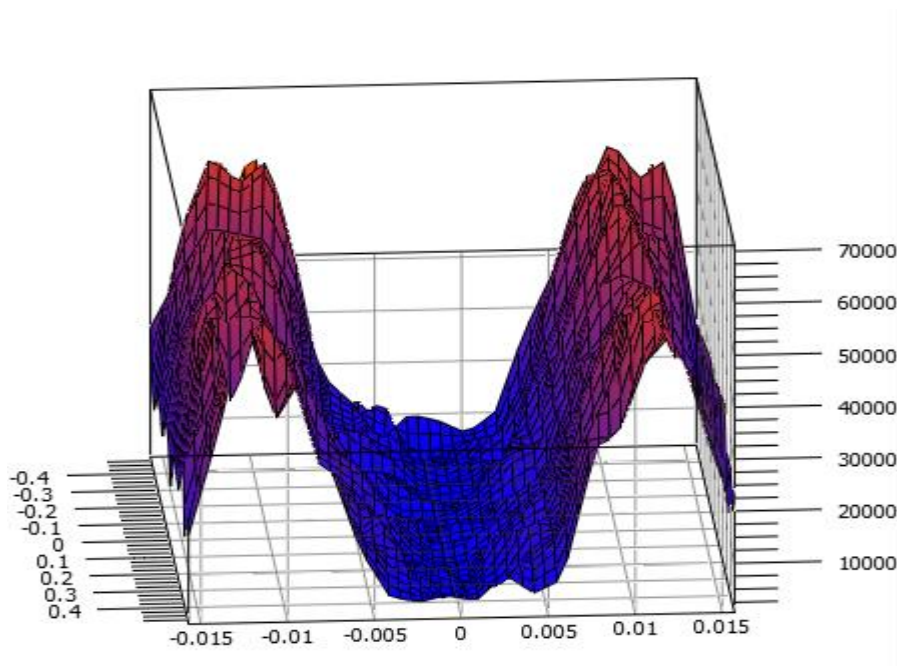


Figure III. 7 : Schéma de récepteur et réflecteur et du deuxième réflecteur avec le logiciel SolTrace.



FigureIII. 8:Schéma de concentrateur cylindro-parabolique avec le logiciel SolTrace.



**Figure III. 9 :** Distribution moyenne du flux thermique au niveau de l'absorbeur avec IND=1000 [W/m<sup>2</sup>] en 3D

### III. 6.1 La méthode de Monte Carlo (MMC) :

La méthode de (MCRT) est une méthode mathématique basée sur les probabilités, cette méthode est très utilisée dans plusieurs domaines (traitement d'image, énergies renouvelables et surtout dans les phénomènes radiatifs). C'est une technique qui consiste à lancer un nombre de rayons ou bien des photons à partir d'une source lumineuse par exemple le soleil. Chaque particule transporte une certaine quantité d'énergie. On suit la trajectoire de chacune des particules. Cette méthode est bien adaptée aux géométries très complexes, et aux phénomènes de réflexion, réfraction et transmission, seulement il est nécessaire de lancer un nombre très important de rayons pour approcher correctement les phénomènes. Aujourd'hui il existe plusieurs codes basés sur cette méthode, comme le code SOLTRACE, ces derniers sont utilisés pour la simulation optique des différents systèmes.

Par exemple : La concentration du rayonnement solaire à l'aide d'un concentrateur cylindro parabolique.

### III. 6.2 Etude Optique :

La modélisation optique a été effectuée à l'aide du logiciel SolTrace. Le système optique du concentrateur, considéré dans notre étude est composé de la surface réfléchissante du concentrateur et de l'absorbeur et réflecteur secondaire. Le tableau (III .1) présente les paramètres géométriques du collecteur.

Tableau III. 3: Les paramètres géométriques du collecteur.

Caractéristique géométrique	Valeur
Diamètre extérieur de l'absorbeur	10 mm
Diamètre intérieur de l'absorbeur	8 mm
Longueur de réflecteur	1 m
Largeur de réflecteur	1m
Longueur de réflecteur secondaire	1m
Largeur de réflecteur secondaire	1 m
Hauteur de l'absorbeur	0.2133m
Hauteur de réflecteur secondaire	0.2396m

### III.2 Présentation de Logiciel matlab [46] :

MATLAB (Matrix-Laboratory) est un programme leader en matière d'applications d'ingénierie et mathématiques produit par MathWorks.

MATLAB permet la manipulation mathématique de matrices, la représentation graphique de fonctions mathématiques, la mise en œuvre de divers algorithmes, la création d'interfaces utilisateur graphiques et la communication avec des programmes écrits dans d'autres langages, notamment C-C++, Java et Fortran.

Le programme est utilisé avec de nombreuses autres applications et utilitaires tels que Simulink.

Il s'agit d'un programme leader dans les applications d'ingénierie et mathématiques, produit par MathWorks. Le programme est utilisé avec de nombreuses autres applications et outils auxiliaires tels que Simulink. Les modules complémentaires produits par la société sont divisés en deux parties : les modules complémentaires spécifiques à MATLAB. et les add-ons spécifiques à Simulink. Les add-ons spécifiques à MATLAB sont appelés Toolbox. Ces boîtes diffèrent les unes des autres, si chaque boîte a une spécialité scientifique qu'elle aborde, elle contient en son sein des instructions de programmation qui conduisent à la résolution de problèmes scientifiques. Dans la spécialité pour laquelle l'outil a été créé, comme l'outil de traitement d'images, car il aborde la spécialité de l'analyse d'images et de l'écriture d'algorithmes pour organiser les pixels, etc. Vous pouvez apprendre MATLAB gratuitement ici [Quant aux modules complémentaires de Smulink, ils sont appelés blocs \(ensembles de blocs\). Ils appliquent des théories physiques ou mathématiques à votre modèle que vous avez créé pour vous donner une simulation de la situation de votre modèle si votre modèle est soumis à ces théories physiques ou mathématiques en réalité. Prenons l'exemple de Block. Il existe un bloc](#)

dans le programme Smulink qui simule les avions et les vaisseaux spatiaux. Les systèmes de propulsion sont appelés (Aerospace Blockset) et bénéficient de ce bloc en soumettant leurs avions à certains facteurs météorologiques. La pression atmosphérique et son effet sur la structure de l'avion par défaut, et voir les résultats de performances de leurs avions sur l'ordinateur à l'aide du programme de simulation Simulink et de ce bloc. Les médecins et les ingénieurs médicaux utilisent également ce programme pour dessiner des acides nucléiques ayant des formes complexes et qui se chevauchent. [29]

MATLAB vous permet de dessiner des formes tridimensionnelles après avoir écrit leurs équations mathématiques dans une fenêtre spécifique. Après avoir dessiné les formes, la couleur et la taille de l'objet dessiné peuvent être modifiées à l'aide d'une barre d'outils spéciale. Lors du dessin de formes complexes, certaines parties peuvent être rendues translucides afin que l'utilisateur puisse voir d'autres parties qui se trouvent derrière elles. Ce programme est également utilisé pour dessiner des graphiques bidimensionnels et résoudre des équations mathématiques difficiles.

- La variation du flux de chaleur autour du tube absorbeur au cours de la journée du 21 juin, septembre décembre mars, obtenue par SolTrace, est interpolée à l'aide de la fonction gaussienne suivante :

$$Q = a_1 \exp[-((t - b_1) / c_1)^2] + a_2 \exp[-((t - b_2) / c_2)^2] \quad \text{(III 2)}$$

Où t est le temps (s) et les coefficients ai, bi, ci sont donnés dans le Tableau 3 Coefficients de la fonction gaussienne dans l'équation (1)

**Tableau III. 4:** les coefficients ai, bi, ci 21 juin

I	1	2
ai[W/m2]	2.30 e+04	2.183 e+04
bi [s]	3.571 e+04	2.009 e+04
Ci[s]	1.177 e+04	1.136 e+04

**Tableau III. 5:** les coefficients ai, bi, ci 21 septembre

I	1	2
ai[W/m2]	1.997e+04	1.937 e+04
bi [s]	3.433 e+04	2.08 e+04
Ci[s]	9929	9706

Tableau III. 6: les coefficients ai, bi, ci 21 mars

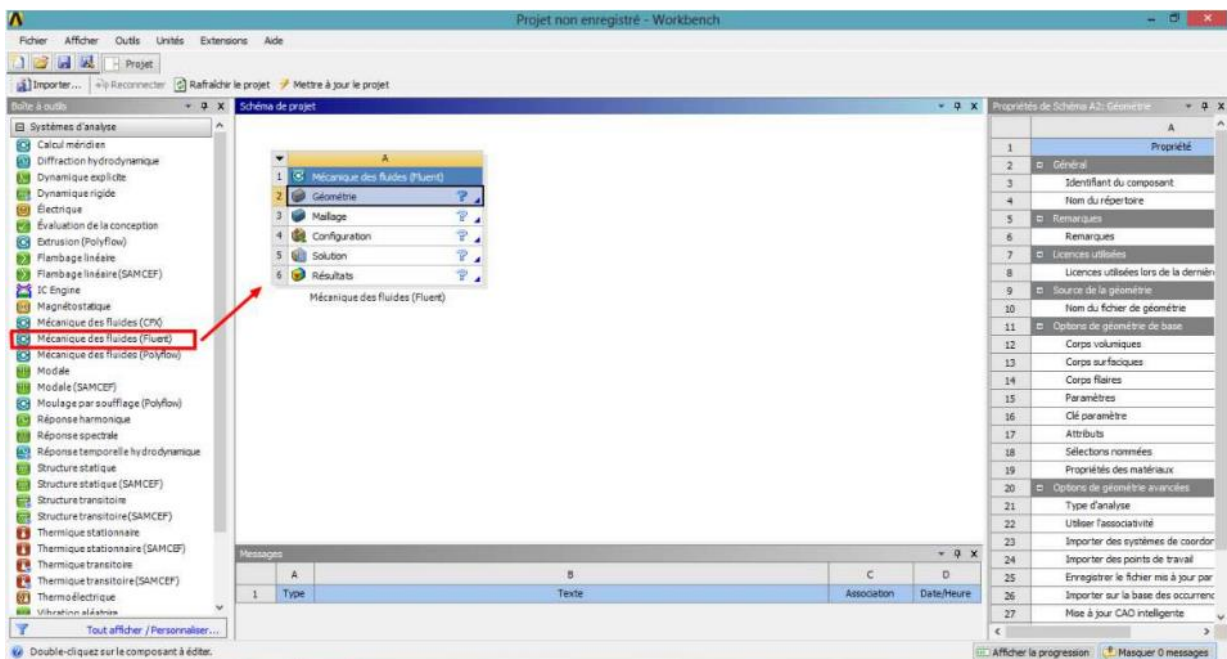
I	1	2
ai[W/m2]	2.011e+04	1.965 e+04
bi [s]	3.52 e+04	2.172 e+04
Ci[s]	9794	9646

Tableau III. 7 : les coefficients ai, bi, ci 21decembre

I	1	2
ai[W/m2]	1.123 e+04	1.009 e+04
bi [s]	3.307 e+04	2.204 e+04
Ci[s]	8218	7577

### III. 8 Présentation du logiciel ANSYS [47] :

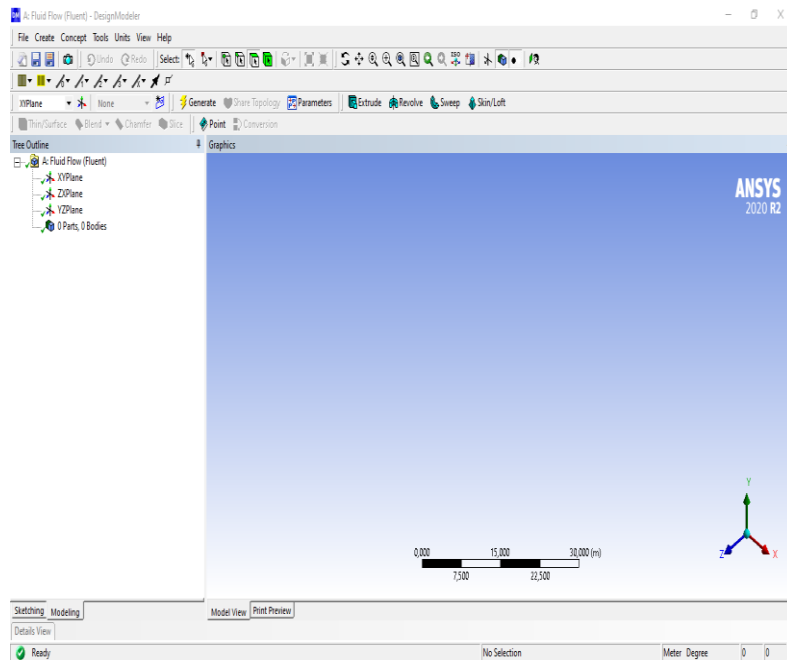
ANSYS est le premier éditeur mondial dans le domaine du calcul par éléments finis (FEA). Les solutions logicielles proposées permettent de résoudre les problèmes de validation produits de manière efficace et d'optimiser le processus de conception. L'interface Workbench est la plateforme qui encapsule les différentes applications de simulation : Mechanical, Fluent, ACP (Composite), DesignXplorer (Optimisation), SpaceClaim (Modélisation), etc. Cette plateforme s'appuie sur une vue schématique du projet de simulation pour permettre à l'utilisateur de facilement organiser et lier ses différents calculs. (Catalogue de formation ANSYS)



FigureIII. 10: L'interface de WorkBench

- La géométrie (Design Modeler)

La géométrie comprend les positions physiques de points caractéristiques définissent la zone que l'on a à mailler : coordonnées spatiales des quatre sommets d'un carré ; du point de départ et du point d'arrivée d'une ligne ; du centre et de l'ouverture angulaire d'un arc de cercle. Il faut pouvoir représenter la zone à étudier par un ensemble de figures géométriques simples raccordées les unes aux autres.



FigureIII. 11: La géométrie avec design modeler

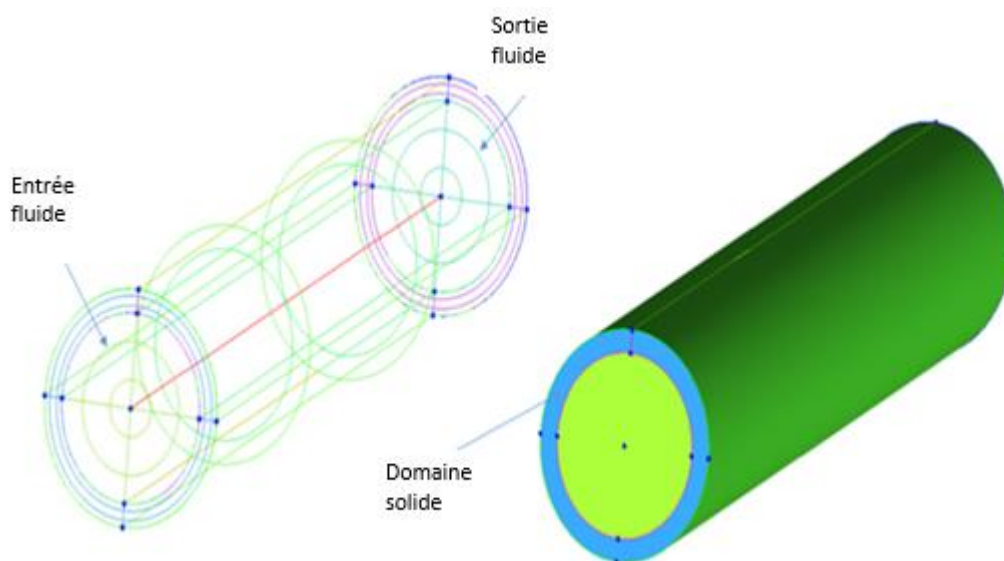


Figure III. 12 : La géométrie du tube absorbeur

Le maillage Pour des maillages structurés, on peut faire la liaison entre la géométrie et le maillage, Aussi, avant de réaliser le maillage, il faut spécifier par écrit d'une part la géométrie adoptée pour définir la zone à mailler, d'autre part les numéros des mailles correspondant aux points caractéristiques de la géométrie. Un nœud pourra alors être repéré par ces coordonnées physiques x et y ou indices I et J. Le maillage subdivise le domaine physique en petites cellules qui est en relation entre eux. Chaque cellule est définie par un nœud qui stocke les paramètres des inconnues en fo L'utilisateur doit être définir les limites de la géométrie. Inlet est l'entrée du fluide, Outlet est la sortie, ainsi en définissant, les parois de l'objet. nction des conditions aux limites.

### III. 8.1 Le solveur Fluent :

Le code de calcul Fluent est commercialisé par le groupe FLUENT. Ce groupe est actuellement l'un des pôles de compétence en mécanique des fluides numérique les plus importants. Il développe et commercialise une solution complète sous forme de logiciels de CFD (Computational Fluid Dynamics) généralistes qui simulent tous les écoulements fluides, compressibles ou incompressibles, impliquant des phénomènes physiques complexes tels que la turbulence, le transfert thermique, les réactions chimiques, les écoulements multiphasiques pour toute l'industrie. Les produits et services proposés par le groupe FLUENT aident les ingénieurs à développer leurs produits, à optimiser leur conception et à réduire leurs risques. (LIPEME KOUYI, 2004)

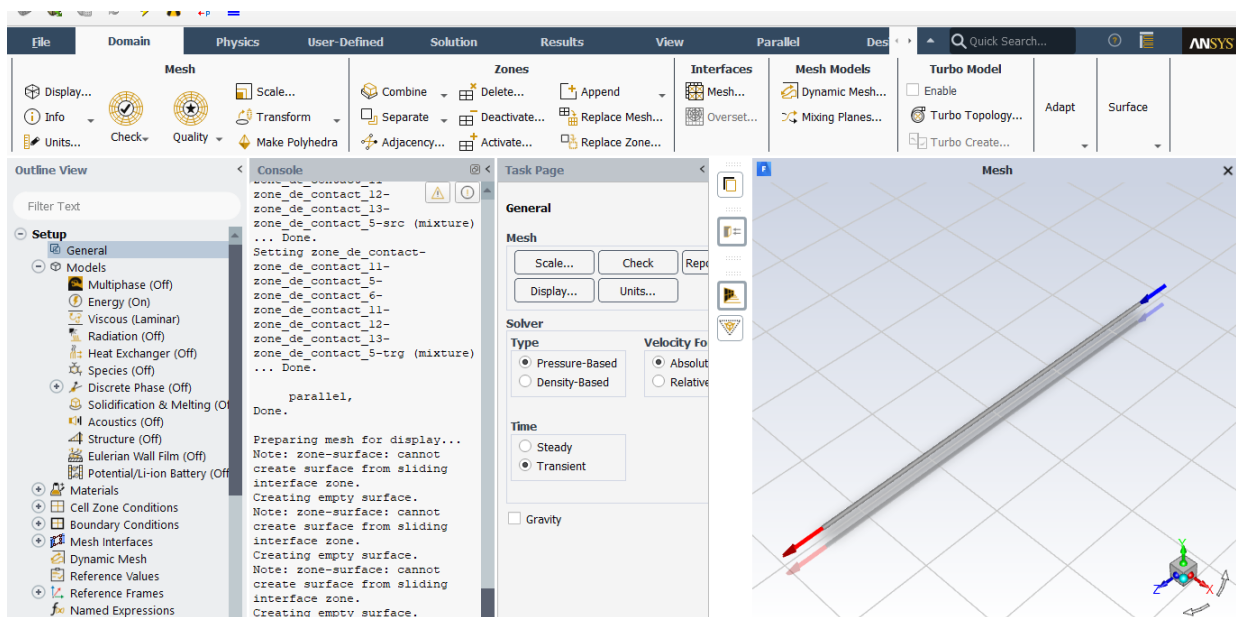
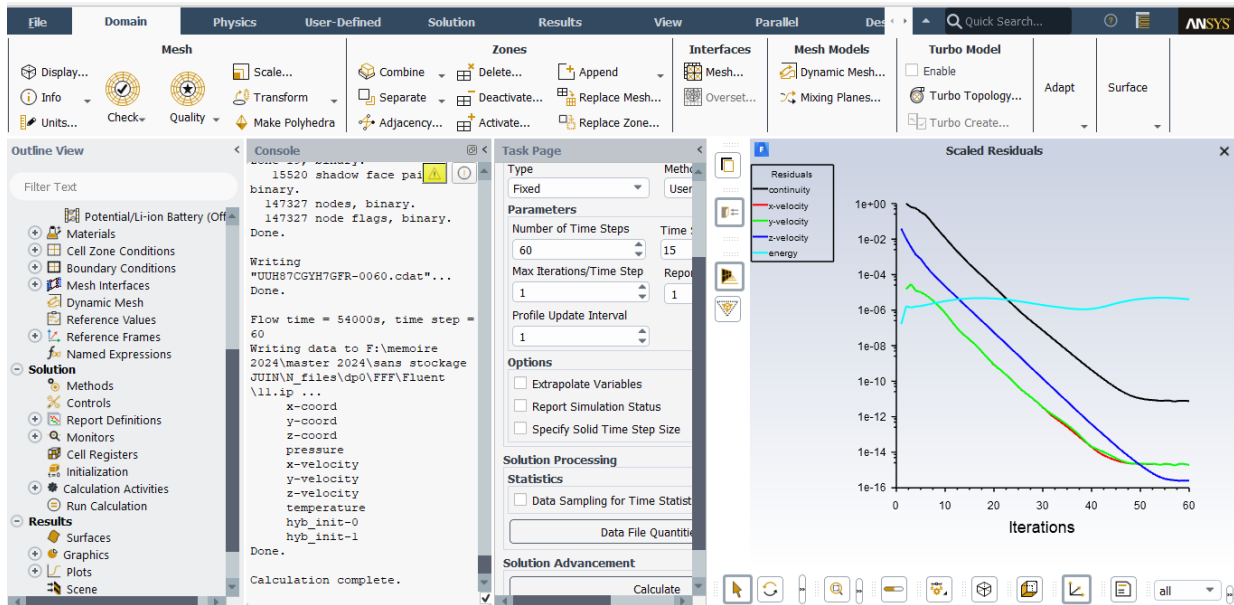


Figure III. 13: Interface de solveur fluent

ANSYS Fluent utilise la méthode des volumes finis pour la discrétisation de la géométrie en petit volumes élémentaires (quadrilatère, triangulaire, ou les deux). L'ensemble d'équation se

transforme en systèmes algébrique que le code de calcul applique pour chacune cellule. Cette étape est importante pour faire la simulation.



FigureIII. 14: Fluent calcul des résidus

### III. 8.2 Méthode des volumes finis : [47]

La méthode des Volumes Finis consiste à intégrer, sur des volumes élémentaires, les équations écrites sous forme intégrale. C'est une méthode particulièrement bien adaptée à la discrétisation spatiale des lois de conservation, contrairement aux Eléments Finis, et est ainsi très utilisée en mécanique des fluides. Sa mise en œuvre est simple si les volumes élémentaires ou "volumes de contrôle" sont des rectangles en 2D ou des parallélépipèdes en 3D. Cependant, la méthode des Volumes Finis permet d'utiliser des volumes de forme quelconque et donc de traiter des géométries complexes, contrairement aux Différences Finies. Comme la plupart des codes commercialisés tels que : PHOENICS, STAR-CD, ...etc. Le code ANSYS utilise la méthode des volumes finis pour la modélisation numérique.

#### ➤ La technique comprend deux étapes importantes :

- Le maillage : il consiste à diviser le domaine en plusieurs intervalles réguliers appelés volumes de contrôle.
- La discrétisation : lors de cette étape les équations sont intégrées dans les volumes de contrôle.

### III. 8.3 ANSYS Fluent [48] :

Le système d'analyse des écoulements fluides basé sur ANSYS Fluent dans ANSYS Workbench combine deux puissants logiciels :

- **ANSYS FLUENT** : Un logiciel de simulation de dynamique des fluides (CFD) développé par ANSYS. Il résout les équations mathématiques qui régissent le mouvement des fluides et des gaz, fournissant des résultats précis sur la vitesse, la pression, la température et d'autres propriétés importantes.
- **ANSYS Workbench** : Un environnement de travail qui permet aux utilisateurs de créer, d'organiser et de gérer des simulations d'ingénierie. Workbench offre une interface conviviale qui relie divers logiciels ANSYS, y compris FLUENT.

En utilisant le système d'analyse des écoulements fluides basé sur ANSYS FLUENT dans ANSYS Workbench :

- \* Les utilisateurs peuvent créer des modèles de flux de fluides complexes.
  - \* Définir les propriétés des fluides et les conditions de fonctionnement.
  - \* Configurer et raffiner le maillage de calcul.
  - \* Exécuter la simulation des fluides avec FLUENT.
  - \* Post-traiter les résultats pour visualiser et interpréter le comportement du fluide.
- 
- **Avantages de l'utilisation du système d'analyse des écoulements fluides basé sur ANSYS FLUENT dans ANSYS Workbench :**
    - \* **Efficacité du workflow** : Workbench offre un environnement intégré pour la configuration, l'exécution et l'analyse des simulations de fluides, ce qui permet de gagner du temps et des efforts.
    - \* **Facilité d'utilisation** : Workbench fournit une interface graphique intuitive pour la configuration et l'analyse des simulations, même pour les utilisateurs peu familiers avec la programmation CFD.
    - \* **Précision** : Le système tire parti de la puissance de FLUENT pour résoudre les équations de la dynamique des fluides avec une grande précision.
    - \* **Versatilité** : Le système permet de simuler une large gamme d'écoulements de fluides, y compris les écoulements turbulents et laminaires, la combustion et le transfert thermique.

- Le Schéma du projet montre les étapes suivantes :

- Ecoulement des fluides (Fluent) :

Il s'agit de l'étape initiale du processus de simulation et elle consiste à définir le problème d'écoulement des fluides et la géométrie du domaine.

- **Géométrie (design modeler):** Cette étape consiste à créer un modèle géométrique du domaine.

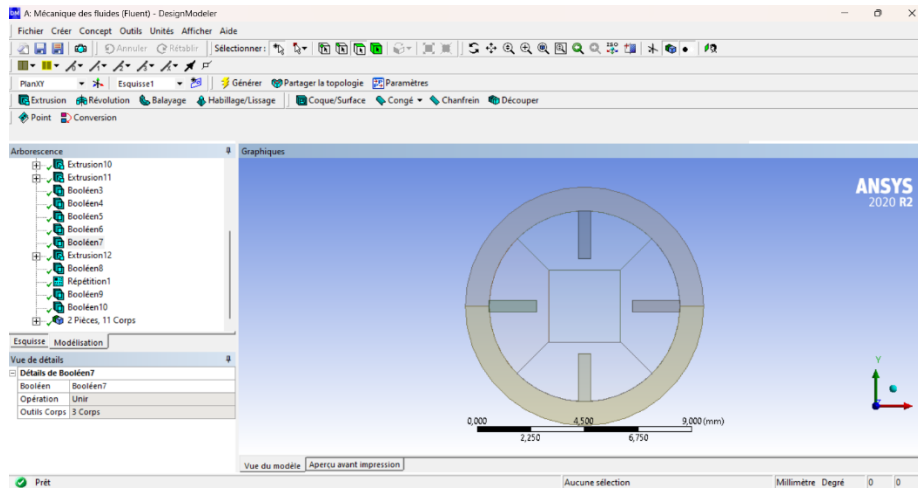


Figure III. 15: ANSYS Workbench design modeler cas du tube avec 4 ailettes

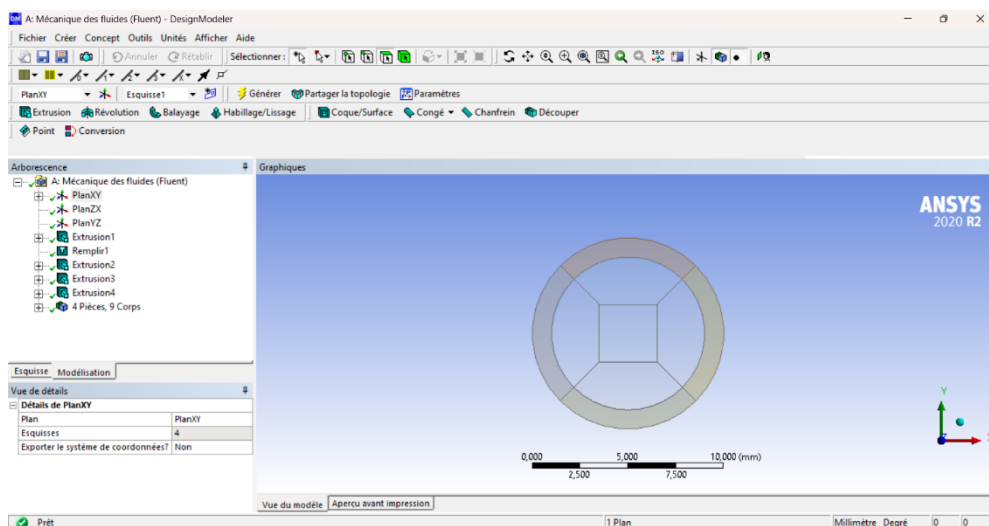


Figure III. 16: ANSYS Workbench design modeler cas d'un tube simple

- **Maillage :** Cette étape consiste à créer un maillage du domaine. Ce maillage est utilisé pour discrétiser le domaine en un grand nombre de petits éléments.

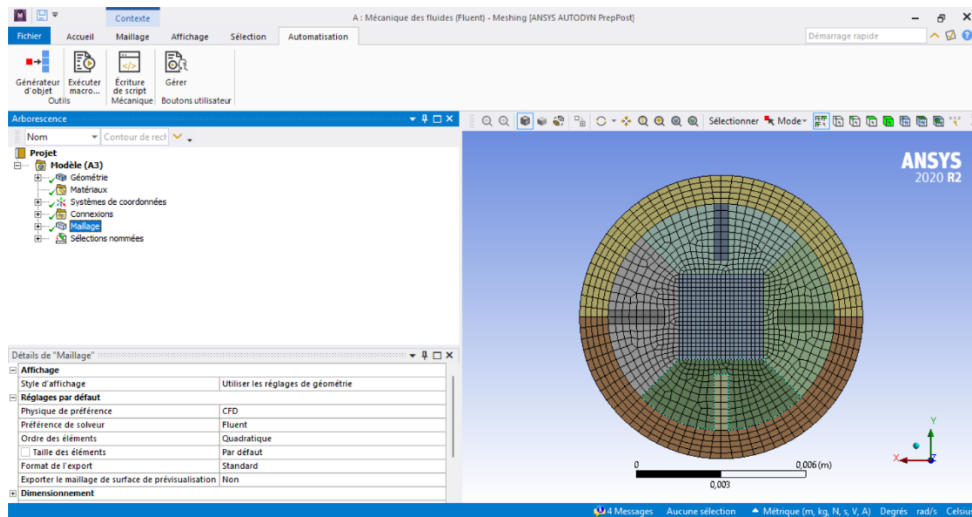


Figure III. 17: ANSYS fluent maillage cas avec aillet

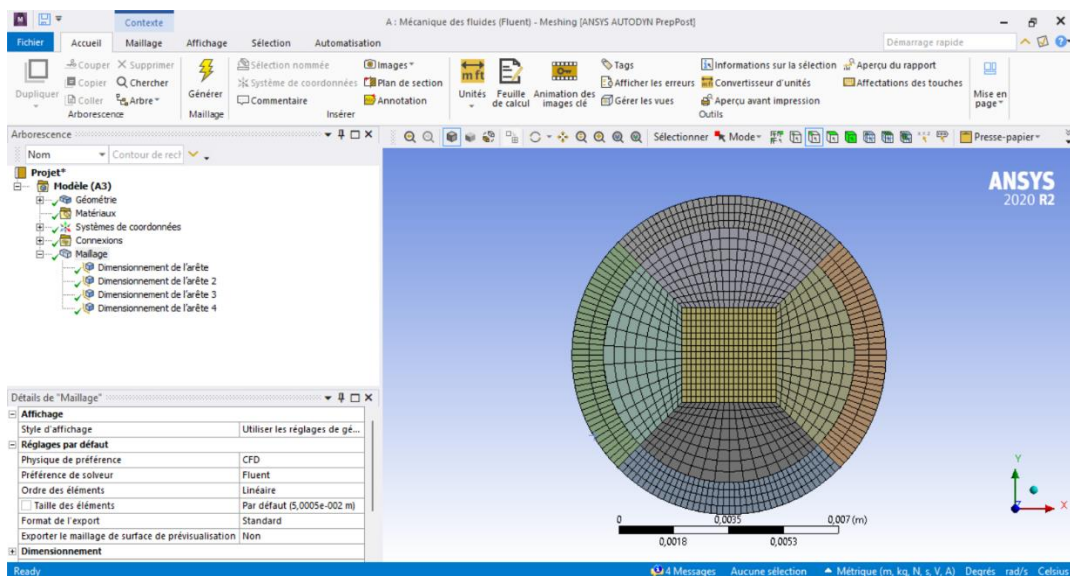


Figure III. 18: ANSYS fluent maillage cas simple

- **Configuration** : Cette étape consiste à configurer les paramètres de simulation, tels que les conditions aux limites et les conditions initiales.
- **Solution** : Cette étape consiste à résoudre les équations de simulation.
- **Écoulement des fluides (Fluent)** : Il s'agit de l'étape finale du processus de simulation et elle consiste à post-traiter les résultats de la simulation

L'objectif de l'analyse CFD est de résoudre les équations du transfert de chaleur conjugué et de l'écoulement du fluide caloporteur dans le tube absorbeur. L'écoulement du fluide et le transfert de chaleur dans les deux domaines, solide et fluide, sont décrits par un système de cinq équations à résoudre simultanément.

### III. 8.6 Les équations gouvernantes :

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

$$Q_u = mC_p(T_{out} - T_{in}) \quad (III.3)$$

Le rendement instantané de CCP est défini comme suit :

$$\eta = \frac{Q_u}{I_b A_a} = \frac{mC_p(T_{out} - T_{in})}{I_b A_a} \quad (III.4)$$

$A_a$  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 de l'écoulement du fluide et le transfert de chaleur conjugué dans le tube absorbant sont donnés comme suit :

- L'équation Continuité :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho U) = 0 \quad (III.5)$$

- L'équation quantité de mouvement :

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \mu \nabla \cdot \nabla U \quad (III.6)$$

- L'équation d'énergie :

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla(\rho U h) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (III.7)$$

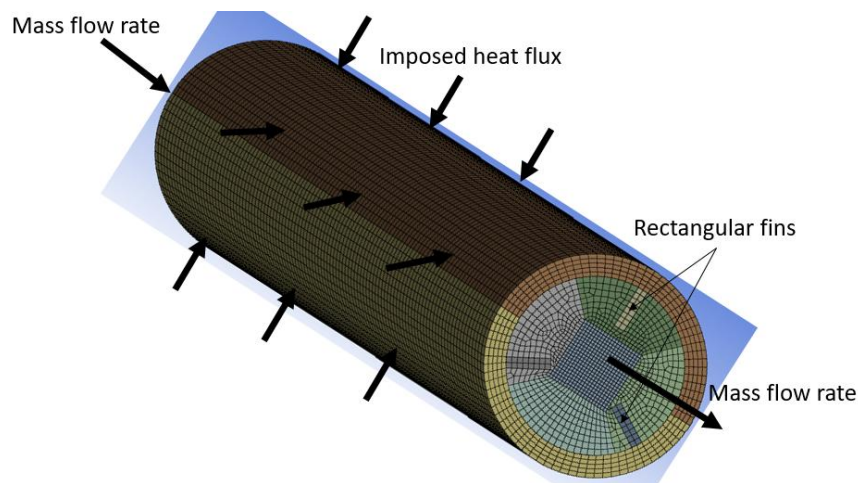
Où,  $U$  est le vecteur de vitesse,  $p$  est la pression du fluide,  $T$  est la température et  $h$  est l'enthalpie.

Notez que l'équation (III.7) est appliquée pour les deux domaines fluide et solide. Dans la présente étude, nous considérons le cuivre comme matériau du tube absorbeur et l'eau comme fluide de travail. Les propriétés physiques du cuivre et de l'eau sont prédéfinies dans le solveur FLUENT

Notez que l'équation (4) est appliquée pour les deux domaines, fluide et solide (pour la conduction dans le solide, le terme de gauche dans l'équation 4 est nul).

### III. 8.6 Méthode de résolution :

Le domaine physique est composé de deux sous-domaines : solide et fluide. Comme montré à la figure 6, deux blocs sont fusionnés. Le bloc structuré représente le domaine solide (tube et ailettes) et le bloc O-grid représente le domaine fluide. Après une étude d'indépendance du maillage, la distribution suivante des nœuds a été choisie : 110 nœuds par mètre dans la direction z ; 36 nœuds dans les directions x et y ; et 5 nœuds le long de l'épaisseur du tube.



**Figure III. 19 :** Géométrie du tube absorbeur, maillage conditions aux limites

La première étape pour résoudre le problème consiste à implémenter le flux de chaleur, exprimé par l'équation (1), dans le solveur ANSYS-FLUENT. La deuxième étape est d'initialiser le solveur et de spécifier les conditions aux limites. Le domaine est initialisé comme suit : À l'instant  $t=0s$ , on considère que le fluide et le solide sont à la même température  $T_0$  ; la vitesse et la pression du fluide sont fixées à zéro. Les conditions aux limites sont illustrées à la figure 19. Le débit massique du fluide caloporteur (HTF) à travers le tube est fixé à 0,0018 kg/s. 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, donné par l'expression suivante :

$$R_e = \frac{\rho V d_{in}}{\mu} \quad (\text{III.8})$$

Où,  $V$  est la vitesse moyenne d'écoulement à travers le tube ;  $\mu$  est la viscosité dynamique du fluide ; et  $d_{in}$  est le diamètre interne du tube absorbeur

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 du fluide et le modèle d'énergie thermique est choisi pour résoudre le transfert de chaleur conjugué. Le pas de temps choisi est de 15 minutes, tandis que le temps total de simulation est de 16 heures.

### III.9 Conclusion :

La technologie de réflecteurs cylindro-paraboliques est la plus fréquente. Actuellement, elle est utilisée par les plus puissantes centrales solaires au monde. A la fin de ce chapitre, nous pensons qu'il est utile de rappeler les principales étapes du développement de la modélisation numérique de CCP, celle-ci est réalisée en deux étapes : une modélisation optique établie avec le logiciel SolTRACE avec la méthode Monte-Carlo (MCRT) qui est une méthode mathématique basée sur les probabilités et qui permet de quantifier le flux solaire concentré reçu au niveau de l'absorbeur, sont interpolées par des fonctions gaussiennes et implémentées dans le solveur CFX comme conditions aux limites du flux de chaleur transitoire. Ensuite, la modélisation numérique du transfert de chaleur conjugué et de l'écoulement du fluide à l'intérieur du tube de l'absorbeur. Modélisation CFD de l'absorbeur avec le logiciel ANSYS FLUENT, pour déterminer la distribution de la température et l'énergie absorbée par le tube pour les deux cas sans et avec l'insertion de 4 ailettes.

---

# **Chapitre IV :**

## **Résultats et discussion**

---

## IV.1 Introduction :

Dans un premier temps nous avons utilisé un modèle optique développé avec le logiciel SolTrace afin de déterminer la géométrie et les performances du capteur solaire, permettant ainsi de quantifier la répartition du flux solaire sur le tube absorbant. Ensuite, les résultats de la simulation optique, qui détermine la répartition de l'énergie solaire sur le tube absorbant, ont été pris comme conditions limites. Nous avons utilisé les valeurs de densité de flux solaire pour une journée donnée. Le code SolTrace a été employé pour déterminer la distribution du flux de chaleur sur le tube absorbant. Les équations conjuguées de transfert de chaleur et d'écoulement des fluides dans le tube absorbant ont été résolues en utilisant le logiciel ANSYS-Fluent.

Enfin, nous avons comparé deux cas : un tube sans ailette et un tube avec l'insertion de quatre ailettes, dans le but d'atteindre une température élevée du fluide caloporteur à la sortie de l'absorbeur et d'en tirer une conclusion. La figure suivante illustre les principales étapes de notre simulation. Dans ce chapitre, nous présenterons l'ensemble des résultats issus de la simulation numérique, consultez la figure IV.1 pour plus de détails.

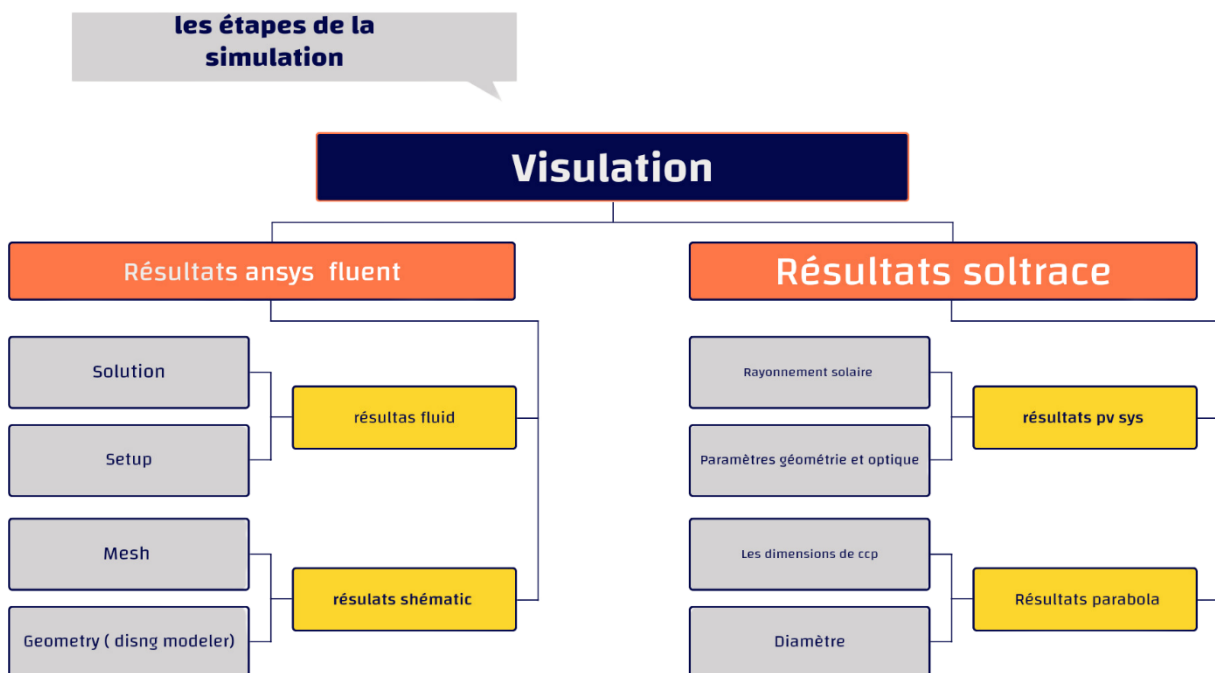
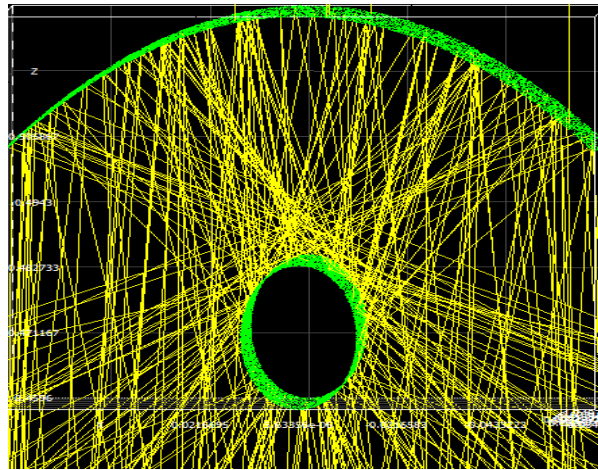


Figure IV. 1 : Organigramme des étapes principales de la simulation

## IV.2 Modélisation optique de différentes géométries de réflecteur secondaire :

L'objectif principal de la modélisation optique est de déterminer la puissance de concentration dans le tube absorbant, ainsi que l'évolution du flux thermique au niveau de

l'absorbeur en fonction d'une variation de l'angle d'incidence des rayons solaires. La figure (IV.2) illustre le trajet des rayons réfléchis par le concentrateur sur le tube absorbeur. On observe sur cette figure que le tube absorbeur du CCP (Figure IV .2) est soumis à un flux solaire concentré sur la partie inférieure, tandis que la partie supérieure est également soumise à un flux solaire concentré. Par l'ajout d'un réflecteur secondaire avec différentes géométries, les rayons solaires peuvent atteindre la partie supérieure après avoir été réfléchis par les réflecteurs paraboliques supplémentaires, comme illustré sur la figure (IV .2).



**Figure IV. 2:** Schéma de concentrateur cylindro-parabolique avec réflecteur secondaire (parabolique) sur SolTrace

Le but de la modélisation optique est de déterminer Les valeurs du flux temporel de solaire autour de l'absorbeur. Les valeurs obtenues sont indiquées dans le tableau IV.1

Tableau IV. 1: les valeurs obtenues sur SolTrace

T(h) MRS	DNI w/m <sup>2</sup>	Avg. Flux	T(h) SEP	DNI w/m <sup>2</sup>	Avg. Flux
21/0305h00	0	0	21/09 05h00	0	0
21/03 06h00	0	0	21/09 06h00	0	0
21/03 07h00	4	111.428	21/09 07h00	45	1253.57
21/03 08h00	214	5961.41	21/09 08h00	272	7577.12
21/03 09h00	441	12285	21/09 09h00	490	13650
21/03 10h00	636	17717.1	21/09 10h00	674	18775.7
21/03 11h00	785	21867.8	21/09 11h00	808	22508.5
21/03 12h00	877	24430.6	21/09 12h00	885	24653.5
21/03 13h00	906	25238.5	21/09 13h00	898	25015.6
21/03 14h00	869	24207.8	21/09 14h00	846	23567.1
21/03 15h00	770	21449.9	21/09 15h00	734	20447.1
21/03 16h00	614	17104.2	21/09 16h00	569	15850.7
21/03 17h00	414	11532.8	21/09 17h00	363	10112.1
21/03 18h00	181	5042.13	21/09 18h00	133	3704.99
21/03 19h00	0	0	21/09 19h00	0	0
T(h) DES	DNI w/m <sup>2</sup>	Avg. Flux	T(h) Juni	DNI w/m <sup>2</sup>	Avg. Flux
21/12 05h00	0	0	21/06/05h00	0	0
21/12 06h00	0	0	21/06 06h00	29	659.447
21/12 07h00	0	0	21/06 07h00	232	5291.15
21/12 08h00	6	138.298	21/06 08h00	447	11175.3
21/12 09h00	182	4195.05	21/06 09h00	646	14890.1
21/12 10h00	357	8228.76	21/06 10h00	815	18587.4
21/12 11h00	489	11271.3	21/06 11h00	942	21483.9
21/12 12h00	566	13046.2	21/06 12h00	1018	23217.2
21/12 13h00	583	13438	21/06 13h00	1037	23650.5
21/12 14h00	539	12423.8	21/06 14h00	999	22783.9
21/12 15h00	437	10072.7	21/06 15h00	906	20662.9
21/12 16h00	285	6569	21/06 16h00	764	17424.3
21/12 17h00	97	2285.82	21/06 17h00	584	13319.1
21/12 18h00	0	0	21/06 18h00	378	8620.93
21/12 19h00	0	0	21/06 19h00	161	3671.88

### IV. 3 Présentation et interprétation des résultats :

- **Validation :**

Pour pouvoir analyser les performances d'un CCP à l'aide du modèle proposé, il est important de le valider. Pour cela, le modèle est appliqué au système décrit dans la référence [49]. Il s'agit d'un CCP de petite taille équipé de deux types de seconds réflecteurs, le réflecteur triangulaire et le réflecteur parabolique. Ici, nous nous intéressons uniquement au réflecteur parabolique. Les résultats de la simulation sont comparés aux

résultats expérimentaux rapportés dans cette référence. Les résultats à comparer sont la température du fluide (eau) en sortie du tube absorbeur. Les données et les résultats des tests sont résumés dans le tableau IV.2 et la figure IV.8. Notez que ces tests ont été effectués le 05/03/2018.

Les résultats obtenus pour la température de sortie du fluide sont présentés sur la figure IV.9. Comme on peut le voir, les valeurs de la température obtenue par simulation sont approximatives par rapport aux valeurs expérimentales. On remarque une petite différence entre les deux courbes. Ceci est dû aux erreurs de calcul, aux conditions de l'expérience, ainsi qu'au stockage d'énergie. Cependant, la plage d'erreur enregistrée est d'environ 5,5 °C (écart maximal), l'erreur absolue moyenne est d'environ 2,83 °C, et l'écart type est de 1,35. Selon ces valeurs, nous pouvons conclure que le modèle actuel est en bon accord avec les données expérimentales. Par conséquent, le modèle peut être utilisé pour analyser les performances optiques et thermiques du CCP.

**Tableau IV. 2:** données expérimentales pour CCP avec réflecteur secondaire parabolique [49].

Time (h)	$I_b$ (W/m <sup>2</sup> )	$T_{in}$ (°C)	$T_{out}$ (°C)
09.00	399.1	29.5	33.5
09.30	489.2	29.6	35.1
10.00	598.7	29.6	37.8
10.30	687.4	29.8	39.9
11.00	688.3	30.1	41.8
11.30	737.4	30.2	43.1
12.00	859.8	30.9	45.7
12.30	862.6	31.5	46.6
13.00	826.0	31.8	48.4
13.30	746.2	31.9	49.2
14.00	653.5	31.6	45.6
14.30	547.3	33.3	44.5
15.00	447.4	33.4	42.1
15.30	330.1	33.0	39.8
16.00	227.0	33.2	37.5

La valeur du rayonnement solaire est obtenue chaque toutes les demi-heures (de 9h00 à 16h00), La répartition du flux thermique sur la surface latérale du tube récepteur est obtenue toutes les demi-heures, Interpolation gaussienne de la distribution de chaleur à chaque instant.

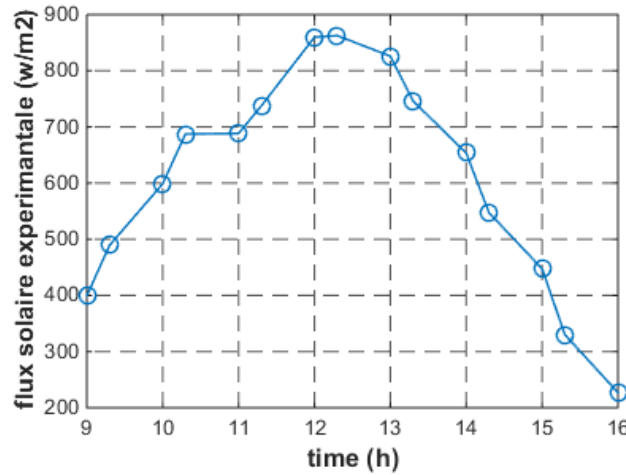


Figure IV. 3: le flux solaire expérimental en fonction du temps pour la journée 05/03/2018

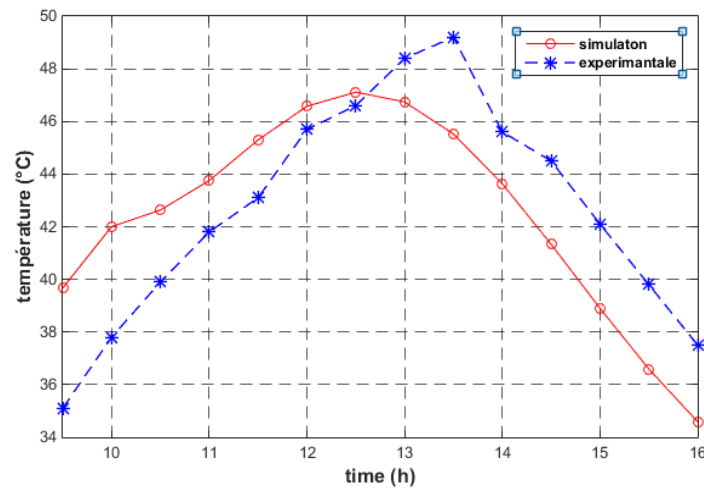
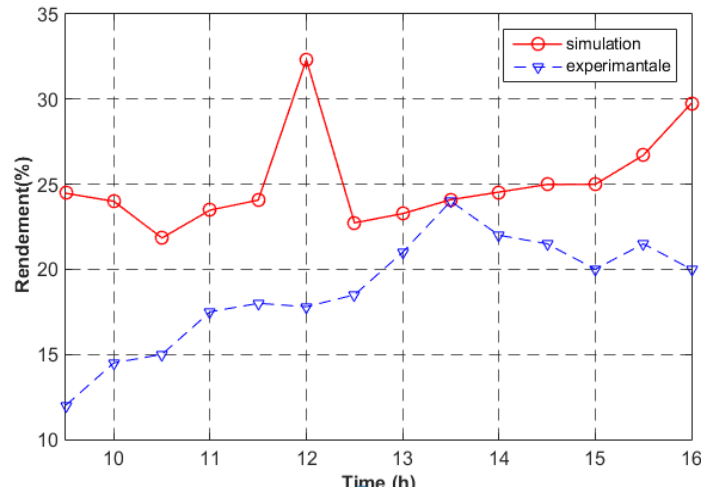


Figure IV. 4: Température de sortie du fluide en fonction du temps

L'efficacité thermique instantanée du CCP a été calculée sur la base du gain de chaleur, du rayonnement solaire et de la surface d'ouverture. En pratique, l'efficacité thermique peut être affectée par plusieurs facteurs. Les valeurs d'efficacité thermique obtenues par simulation numérique et expérimentalement sont présentées dans la Figure IV.6 Comme on peut le voir, le rendement est approximativement égal à 25% dans le cas de simulation et 20% dans le cas d'expérimentale.

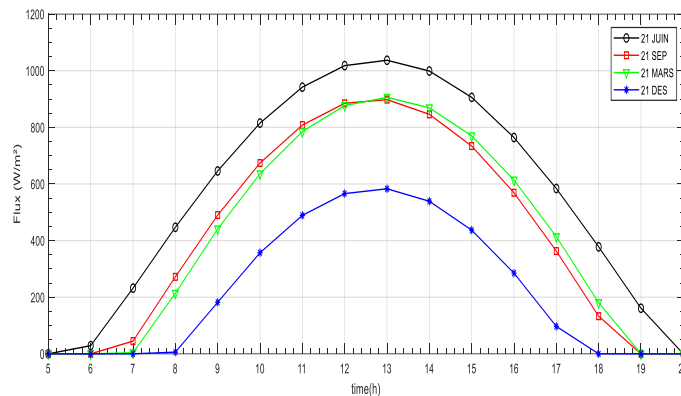


**Figure IV. 5:** Variation de l'efficacité thermique instantané en fonction du temps (Comparaison entre les données expérimentales et les résultats de simulation)

**IV. 4 Résultats de la simulation du modèle sur SolTrace :**

Figure (V.7 représente le rayonnement solaire en fonction du temps sur 4 jours pour quatre mois (21 mars, 21 juin, 21 septembre et 21 décembre). L'intensité temporelle numérique du rayonnement solaire est obtenue à l'aide du logiciel PVSYST pour une localisation (2°56 de longitude et 33°46 de latitude).

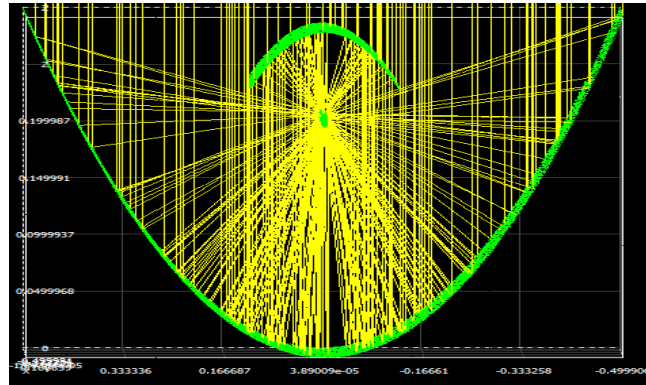
Notez que pour la journée du 21 juin, le rayonnement solaire est maximal au vrai midi solaire, pouvant atteindre 1037 W/m<sup>2</sup>. Le rayonnement solaire minimal, environ 600 W/m<sup>2</sup>, est enregistré au cours du mois de décembre.



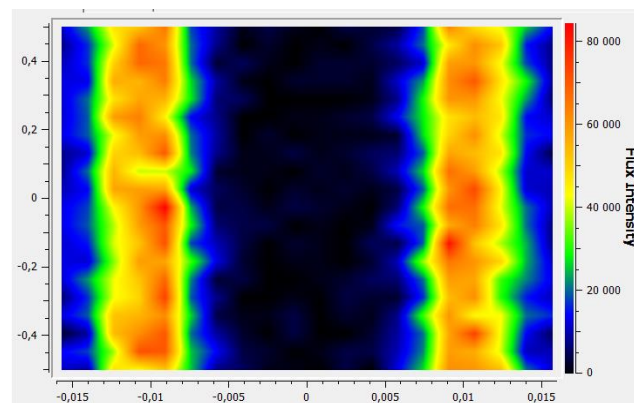
**Figure IV. 6:** le rayonnement solaire en fonction du temps (21 juin, septembre, mars, décembre)

La figure IV.8 montre la répartition du flux thermique sur la circonférence du tube absorbeur obtenue par traçage des rayons. La valeur du flux de chaleur est élevée sur tout le tube absorbeur en raison de la concentration du réflecteur primaire et du secondaire. Une distribution uniforme du flux de chaleur est observée sur l'absorbeur, ce qui conduit à un

gradient de température élevé. Le contour et le traçage des rayons et l'intensité moyenne du flux de chaleur sur la surface extérieure, la densité moyenne du flux de chaleur de l'absorbeur est de  $23200 \text{ W/m}^2$ , qui est simulée numériquement à l'aide du logiciel SolTrace (voir Figure IV.9).



**Figure IV. 7:** Traçage des rayons dans le CCP avec réflecteur secondaire en Soltrace



**Figure IV. 8:** la carte tridimensionnelle des répartitions de flux de chaleur du cas CCP avec réflecteur secondaire de SolTrace

## IV.5 Présentation et interprétation des résultats ANSYS :

### IV.5.1 Étude Comparative de la performance d'un CCP avec deux cas sans et avec ailettes :

#### IV.5.1.1 Cas du tube absorbeur simple :

- **Température du tube cas sans ailettes :**

La Figure V.12 montre le contour de température dans tout le domaine (le 21 juin à 13h00 et 21 décembre) pour un système CCP avec réflecteur secondaire. Comme on peut le voir, la température augmente progressivement le long du tube jusqu'à atteindre un maximum à la sortie (environ pour le mois de juin est de 500 k pour le mois de décembre 388k).

Cependant, elle diminue graduellement dans la direction radiale pour atteindre un minimum au centre du tube (pour 21 juin 441 environ K pour le 21 décembre 360 K).

Dans cette étude, nous considérons la température de l'eau à la sortie au centre du tube. La Figure V.13 représente l'évolution de la température de l'eau quittant le tube absorbeur pour quatre jours : le 21 juin, le 21 septembre, le 21 mars et le 21 décembre. Le profil temporel de la température est similaire à celui du flux de chaleur concentré sur la surface du tube, et le maximum est atteint à midi. Nous remarquons également que les températures maximales obtenues dans le premier cas (tube simple) pour le 21 juin est environ 73. °C et pour le mois de décembre est 50°C cependant au mois de septembre et mars égale a 58°C

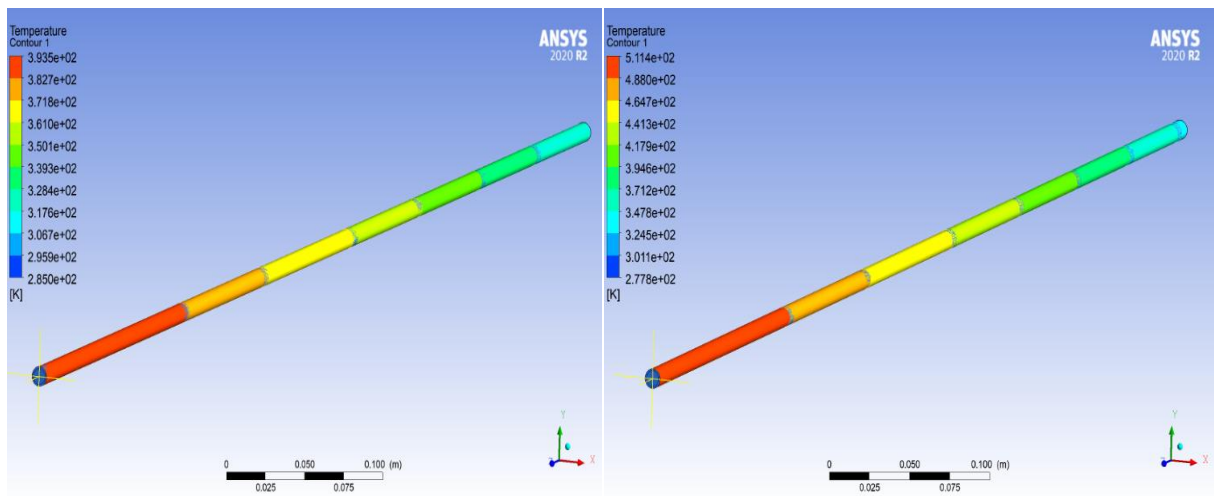


Figure IV. 9: Distribution de flux de chaleur par rayonnement solaire concentré sur la surface extérieure du tube absorbeur a 13am pour le 21 juin et 21décembre

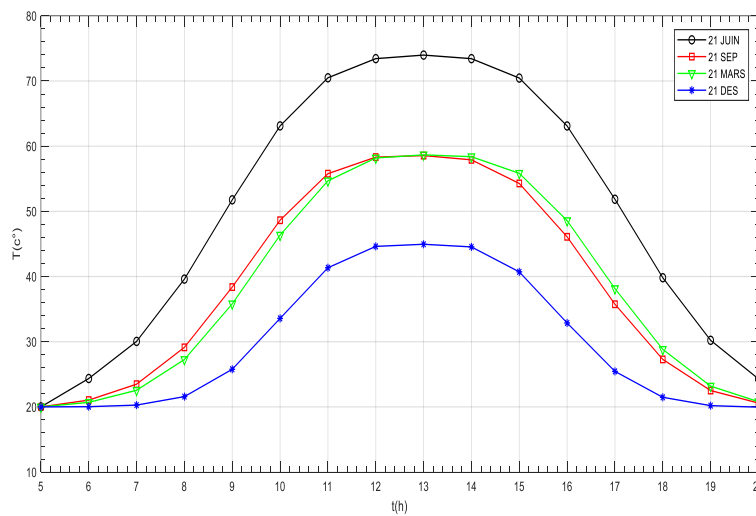
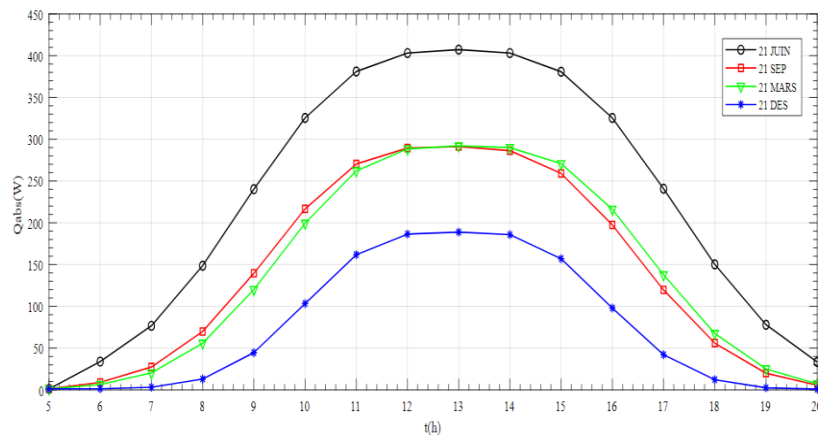


Figure IV. 10: Température de sortie du fluide (sans ailette)

- **Energie thermique utile :**

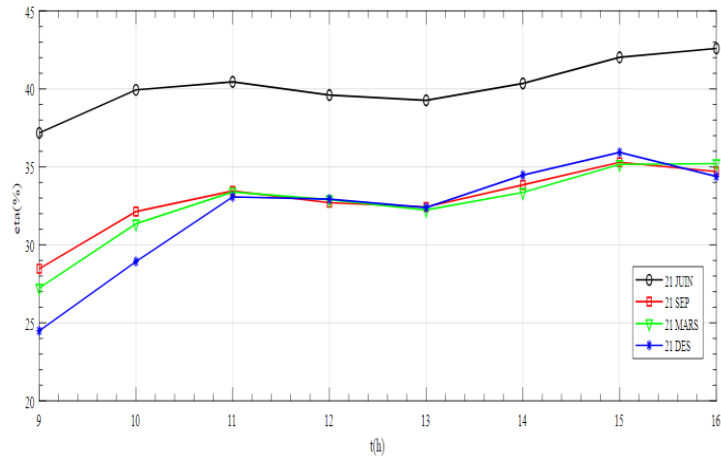
Une fois les températures à la sortie du tube déterminées, le flux de chaleur absorbé par le tube est calculé selon l'équation (III.3). Le débit massique d'eau à travers le tube est d'environ 0,0018 kg/s, ce qui correspond à un écoulement entièrement laminaire. La figure (V.17) a) et b) représente les variations de la chaleur utile en fonction du temps. L'énergie maximale gagnée est enregistrée au mois de juin (400 W), tandis que l'énergie minimale absorbée est enregistrée au mois de décembre (188 W). Pour les mois de mars et septembre, l'énergie maximale absorbée à midi est la même (environ 292W).



**Figure IV. 11:** Variation de l'énergie collectée par rapport au temps.

- **Efficacité thermique :**

L'efficacité thermique du système est déterminée à partir de l'équation (III.4). Les valeurs calculées pour les quatre mois (21 juin septembre décembre mars) sont représentées dans la figure (IV.12). L'efficacité obtenue est enregistrée au cours du mois de juin (environ 40 % pendant toute la journée), tandis que la valeur minimale est obtenue au cours du mois de décembre (environ 32%). En ce qui concerne les mois de mars et septembre, l'efficacité est la même (32%)



**Figure IV. 12:** Variation de l'efficacité thermique instantanée en fonction du temps avec l'utilisation de l'eau comme fluide colporteur

#### IV.5.1.3 Le deuxième Cas de tube avec l'insertion de quatre ailettes :

- **Température de sortie du fluide**

La figure IV.13, IV.14 montre le profil de contour de température à la sortie de tube absorbeur avec la présence de quatre ailettes pour les mois de décembre et juin (9h,13h,16h) à 13 h pour différents nombres d'ailettes insérées dans le tube (de 1 à 4). Comme on peut le voir, le meilleur résultat est obtenu dans le mois de juin.

Dans cette étude, nous considérons la température de l'eau à la sortie au centre du tube. La Figure (IV.15) représente l'évolution de la température de l'eau quittant le tube absorbeur pour quatre jours : le 21 juin, le 21 septembre, le 21 mars et le 21 décembre. Le profil temporel de la température est similaire à celui du flux de chaleur concentré sur la surface du tube, et le maximum est atteint à midi. Nous remarquons également que les températures maximales obtenues dans le deuxième cas (tube avec ailettes) pour le 21 juin est environ 86. °C et pour le mois de décembre est 50°C cependant au mois de septembre et mars égale a 77°C.

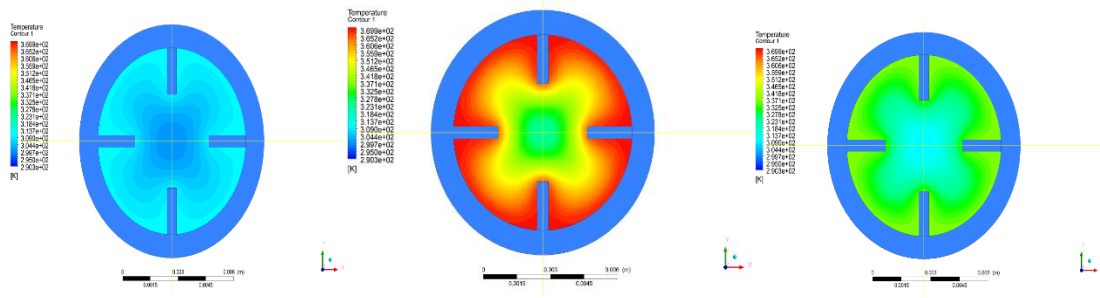


Figure IV. 13: Le contour de la température a la sortie du tube absorbeur dans la journée de 21 décembre (9h, 13h,16h)

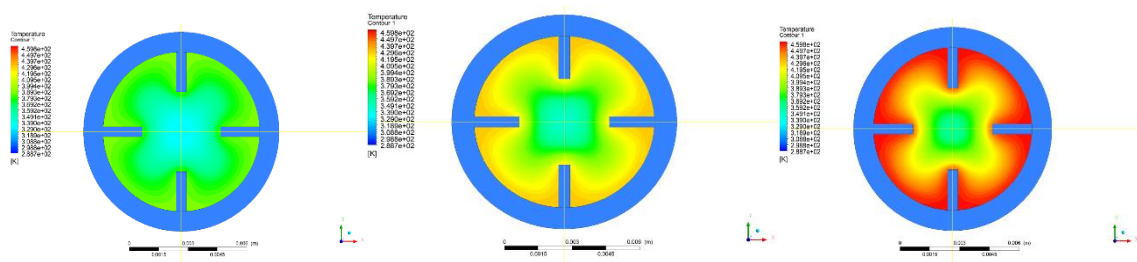


Figure IV. 14: le contour de la température à la sortie du tube pour la journée de 21 juin (9h, 13h,16h)

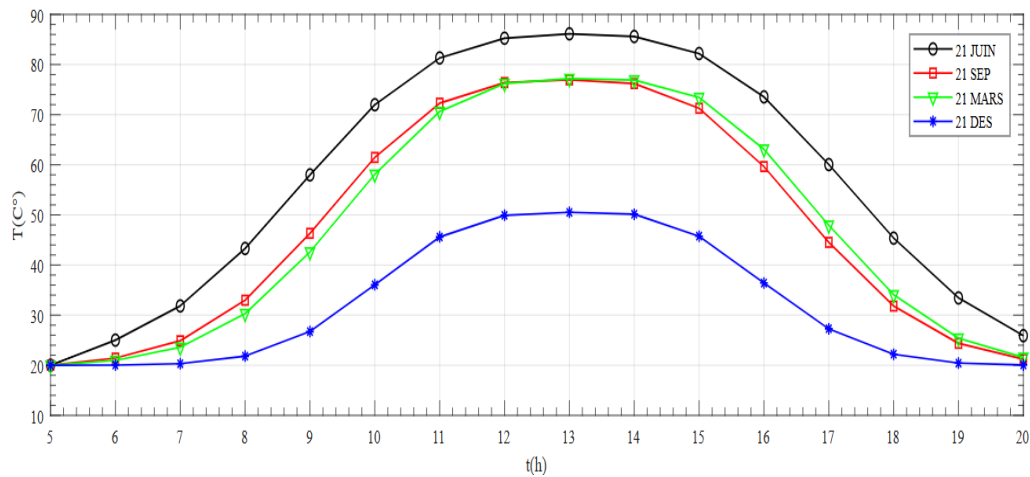
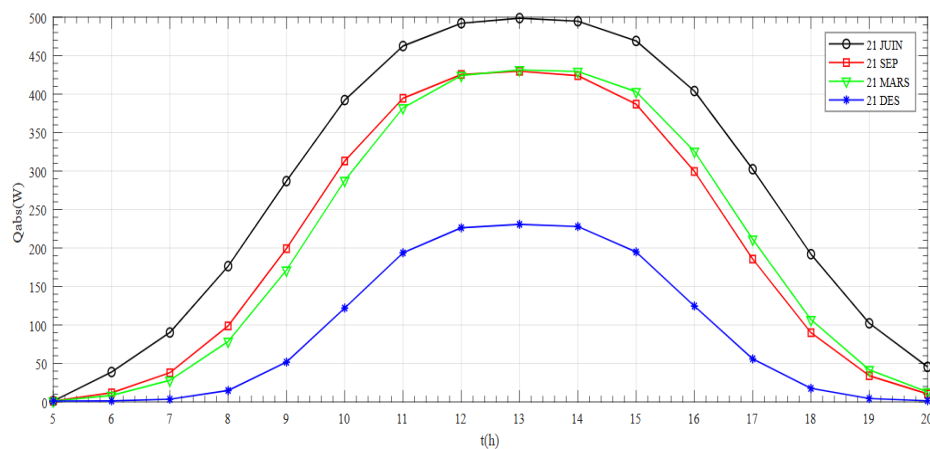


Figure IV. 15: Variation de la température du fluide Cas d'ajout de quatre aillet de la sortie en fonction du temps journée 21 décembre (9h ,13h,16h)

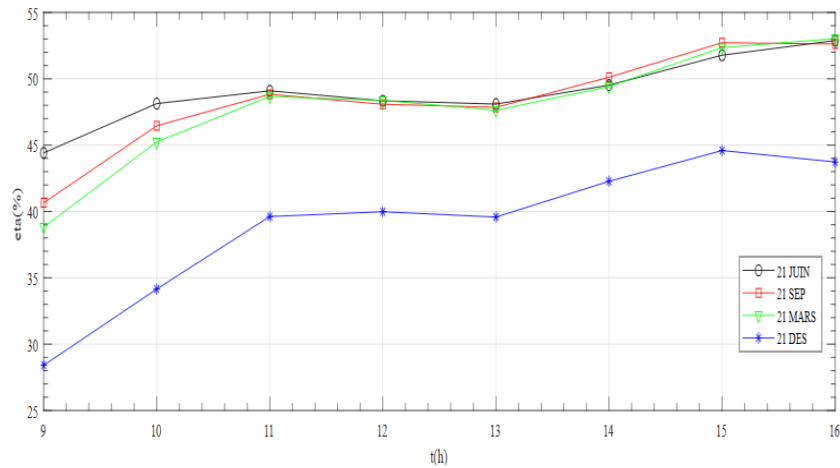
- **Energie thermique utile :**
- Une fois les températures à la sortie du tube déterminées, le flux de chaleur absorbé par le tube est calculé selon l'équation (III.3). Le débit massique d'eau à travers le tube est d'environ 0,0018 kg/s, ce qui correspond à un écoulement entièrement laminaire. La figure (IV.16) représente les variations de la chaleur utile en fonction du temps. L'énergie maximale gagnée est enregistrée au mois de juin (499 W), tandis que l'énergie minimale absorbée est enregistrée au mois de décembre (230W). Pour les mois de mars et septembre, l'énergie maximale absorbée à midi est la même (environ 431W).



**Figure IV. 16 :** Variation de l'énergie thermique utile par rapport au temps

- **Efficacité thermique**

L'efficacité thermique du système est déterminée à partir de l'équation (III.4). Les valeurs calculées pour les quatre mois (21 juin septembre décembre mars) sont représentées dans la figure (IV.17). L'efficacité obtenue est enregistrée au cours du mois de juin (environ 49 % pendant toute la journée), tandis que la valeur minimale est obtenue au cours du mois de décembre (environ 39%). En ce qui concerne les mois de mars et septembre, l'efficacité est la même (48%)



**Figure IV. 17:** Variation de l'efficacité thermique instantané en fonction du temps

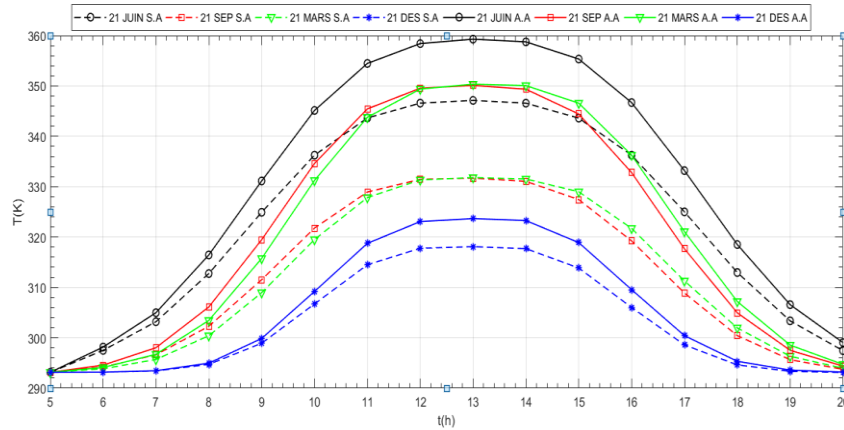
### VI.5.1.3 Le comparution entre deux cas (tube simple et tube avec ailettes):

- Température de sortie :

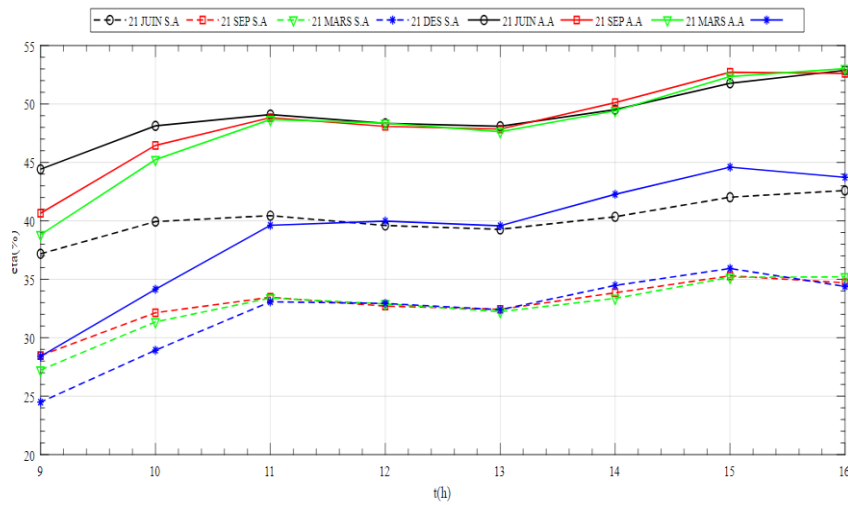
La figure IV. 1 montre l'évolution de la température du fluide caloporteur a la sortie du tube absorbeur pour les deux cas tube simple et avec insertion des quatre ailettes pour les 4 journées (21 juin décembre septembre mars) comme en peut le remarquer, la température augmente avec le temps jusqu'à atteindre une valeur maximale vers 13h, les valeurs maximales sont 359 K pour 21 juin 346 K et pour avec et sans ailettes respectivement pour le mois décembre

La température maximale 323K et 318K pour avec et sans ailettes respectivement, l'efficacité thermique du système le long de la journée de 9h jusqu'au 16h. On remarque que l'efficacité varie légèrement dans le temps, les valeurs moyennes obtenues sont 49% et 40% pour le mois de décembre. Nous remarquons que l'efficacité moyenne 39 % et 32% Un gain d'efficacité d'environ (voir figure IV. 19)

9 % à 15 % peut être atteint en insérant quatre ailettes dans le tube absorbeur pour quatre journées de différentes saisons.



**Figure IV. 18:** variation des températures aux fonctions de temps pour les deux cas tube simple et avec insertion des quatre ailette pour les 4 journée (21 juin décembre septembre mars)



**Figure IV. 19 :** variation d'efficacité thermique aux fonctions de temps pour les deux cas tube simple et avec insertion des quatre ailettes pour les 4 journée (21 juin décembre septembre mars)

### IV.5.2 Effet du débit du fluide caloporteur entre cas avec ailette :

Les résultats de la température du fluide à la sortie du tube et le rendement thermique du concentrateur CCP pour trois débits fluide différents 0.0016kg/s, 0.0018kg/s et 0.002kg/s, sont représentés dans la figure IV.20, montre que la diminution du débit du fluide augmente la température à la sortie du tube (en utilisant l'eau comme fluide caloporteur). On remarque que pour un débit de 0.0016kg/s la température est environ 87°C et le rendement de 57% voir la figure IV.21.

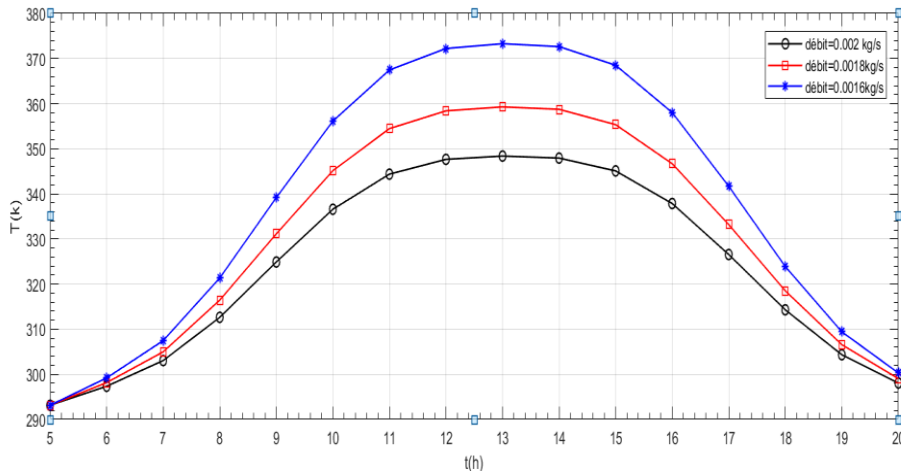


Figure IV. 20: Evolution temporelle de la température du fluide a la sortie du tube

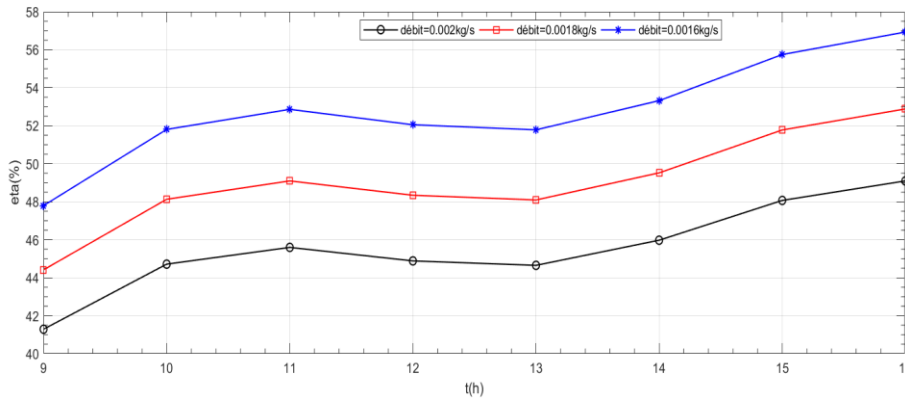
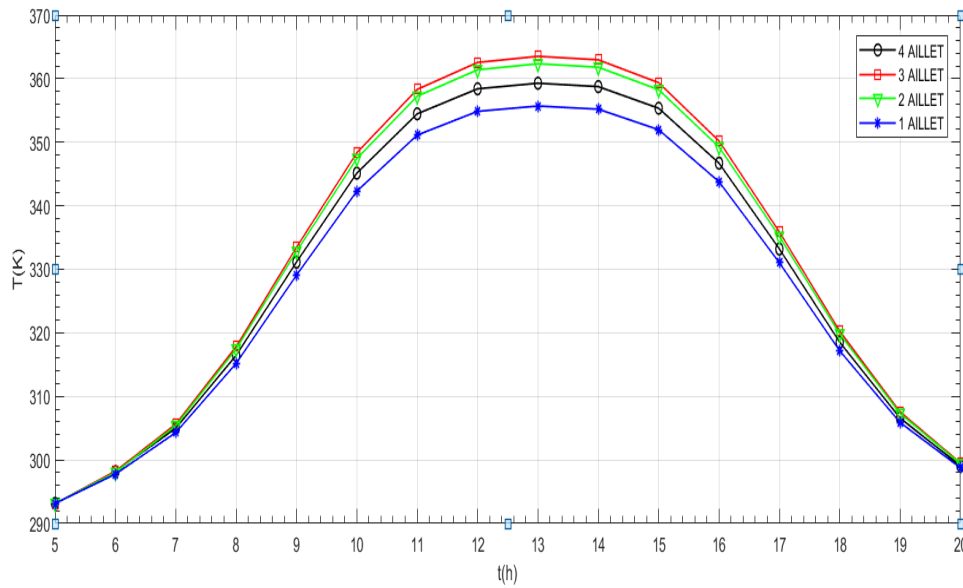


Figure IV. 21 : efficacité thermique pour différents débits avec l'utilisation de l'eau comme fluide caloporteur

### IV.5.3 L'effet de l'insertion d'ailettes à l'intérieur du tube absorbeur :

Les variations de la température du fluide caloporteur (HTF) à la sortie du tube absorbeur le 21 juin sont montrées dans la Figure IV. 2 pour différentes valeurs du nombre d'ailettes insérées. Comme on peut le voir, la température du fluide à la sortie du tube absorbeur est proportionnelle à la lumière solaire directe. À mesure que la densité du flux solaire augmente, la température du fluide augmente jusqu'à atteindre un maximum à 13 heures. La température du HTF est essentiellement influencée par le nombre d'ailettes insérées. La température du HTF augmente avec le nombre d'ailettes insérées et atteint un maximum lorsque 3 ailettes sont ajoutées. Par la suite, la température diminue à mesure que le nombre d'ailettes ajoutées augmente. Avec trois ailettes ajoutées, la température maximale du HTF à la sortie du tube absorbeur est de 363 K à 13 heures.



**Figure IV. 22 :** Les variations de la température du fluide caloporteur à la sortie du tube absorbeur 21 juin

Dans cette section, nous discutons de l'écoulement du fluide et de la distribution de la température sur le tube absorbeur, et présentons l'efficacité du collecteur en fonction du nombre d'ailettes insérées dans le tube. Les performances thermiques du système CCP seront déterminées en résolvant les équations de transfert de chaleur conjugué et d'écoulement du fluide dans le tube absorbeur. La résolution CFD fournit essentiellement la distribution de la température du fluide caloporteur (HTF) dans le tube récepteur. La Figure IV. 23 illustre la distribution de la température à la sortie du tube absorbeur à 13 h pour différents nombres d'ailettes insérées dans le tube (de 1 à 4). Comme on peut le voir, le meilleur résultat est obtenu avec trois ailettes insérées (voir Tableau IV.3).

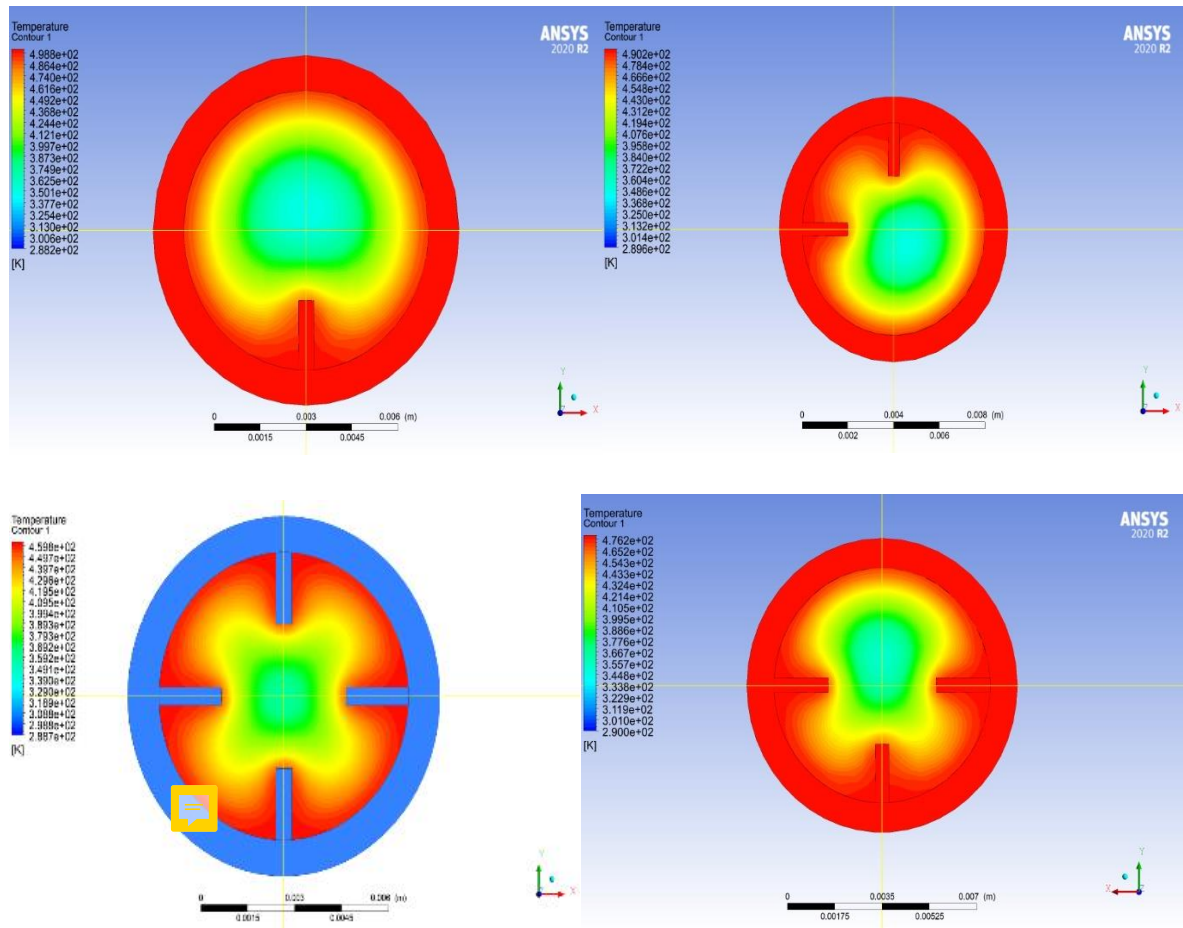


Figure IV. 23 : le contour de la température à la sortie du tube pour la journée de 21 juin (13h)

Les variations de l'efficacité thermique du CCP en fonction du temps, pour différents nombres d'ailettes ajoutées, sont montrées dans la Figure 23. Les valeurs moyennes d'efficacité obtenues pour différents nombres d'ailettes insérées sont présentées dans le Tableau. L'efficacité du système augmente avec le nombre d'ailettes jusqu'à atteindre un maximum avec trois ailettes supplémentaires, puis diminue à mesure que le nombre d'ailettes augmente. L'efficacité obtenue avec trois ailettes insérées est d'environ 52 %, tandis que dans le cas sans aucune ailette ajoutée, elle est d'environ 40 %.

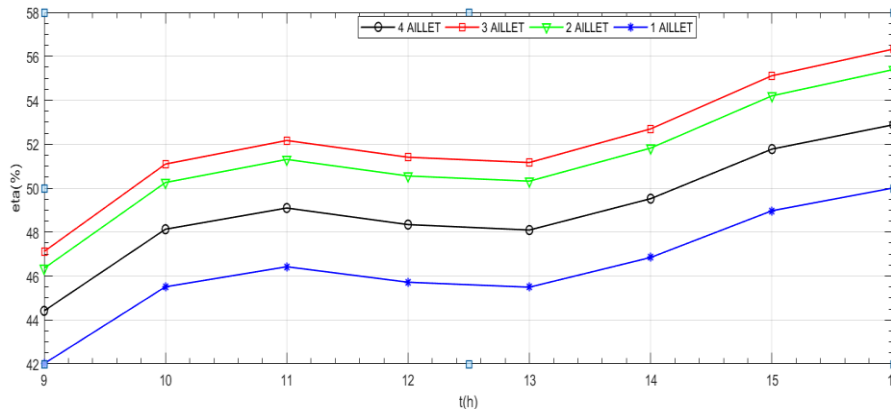


Figure IV. 24: Les variations de l'efficacité thermique du CCP en fonction du temps

Tableau IV. 3: Les valeurs moyennes d'efficacité obtenues pour différents nombres d'ailettes insérées.

$N$	0	1	2	3	4
$\eta$ (%)	40	46	51	52	49

#### IV.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, plusieurs essais ont été effectués sur un CCP de petite taille. L'eau est considérée comme des fluides caloporteurs.

Dans un premier temps, après avoir réalisé la géométrie et le maillage, le modèle est validé par des données expérimentales (bharti2019) [27]. Un bon accord a été observé entre les résultats obtenus par simulation numérique et les données expérimentales.

L'étape suivante consiste à calculer les performances d'un système CCP, Les résultats obtenus nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

Une comparaison entre deux cas avec les insertions de quatre ailettes et sans (tube simple), sont analysée. Les résultats obtenus avec l'utilisation de l'eau comme fluide caloporteur montrent que Les performances thermiques maximales du système CCP (avec et sans l'insertion de quatre ailettes) sont obtenues au cours du mois de juin, tandis qu'au mois de décembre, les performances sont minimales. Pour les mois de mars et septembre, les performances sont à peu près les mêmes.

- La température du fluide à la sortie du tube absorbeur est proportionnelle à l'ensoleillement direct et inversement proportionnel au débit du fluide dans le tube.
- La température maximale à la sortie du tube absorbeur pour le mois de juin est de 73°C et l'efficacité du système est d'environ 40% pour un débit de 0.0018kg/s et minimale pour le mois de décembre avec une valeur de 45°C, l'efficacité du système est d'environ 32% et pour le mois de septembre et mars la température maximale à la sortie du tube absorbeur est environ 58°C pour une efficacité de 32%.
- Pour le deuxième cas, la température maximale obtenue est de 86.8°C pour le mois de juin et l'efficacité du système est d'environ 49% et minimale pour le mois de décembre 50.5°C l'efficacité du système est d'environ 39% en vue que dans le mois de mars et septembre la température est presque 76°C et l'efficacité 48% Pour le même débit.
- Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence l'effet de divers paramètres sur les performances du concentrateur, notamment l'irradiation solaire, le débit, le matériau de l'absorbeur, les saisons et la nature du fluide caloporteur. Le nombre et la forme des ailettes à l'intérieur du tube.
- L'utilisation des ailettes à l'intérieur du tube peut augmenter les performances du système dans une proportion d'environ 1,21 à 1,49.

---

# **Conclusion générale**

---

Les concentrateurs à collecteur parabolique (CCP) sont les concentrateurs linéaires les plus largement utilisés pour la conversion thermodynamique de l'énergie solaire, en particulier dans les domaines industriels et domestiques qui exigent une température de fonctionnement comprise entre 80°C et 160°C. La production d'électricité nécessite des températures élevées de 400°C à 1200°C. Nous pouvons produire de la vapeur surchauffée dans les centrales thermiques avec des concentrateurs paraboliques, où la température peut atteindre 1500°C et plus. Les concentrateurs paraboliques sont les technologies les plus prometteuses pour se substituer aux énergies non renouvelables (énergies fossiles et énergies nucléaires), notamment dans les domaines industriels (centrales électriques, systèmes hybrides, dessalement, climatisation, réfrigération, irrigation, etc.).

Ce travail a l'objectif de faire une étude comparative des performances du concentrateur d'un CCP avec réflecteur secondaire et de l'ajout des quatre ailettes à l'intérieur du tube et sans (tube simple), nous pourrions évaluer si l'ajout d'ailettes peut influencer sur le rendement global du système en utilisant de l'eau comme fluide caloporteur. L'étude est divisée en deux parties principales : optique et thermique. L'analyse optique réalisée avec le code SolTrace fournit la distribution du flux de chaleur autour du tube absorbeur. Le modèle thermique CFD, utilisant le logiciel ANSYS-FLUENT, fournit la variation temporelle de la température du fluide caloporteur à l'intérieur du tube absorbeur

On a évalué la distribution de flux concentré et uniforme autour du tube, et on a testé l'effet des 3 débits du fluide (0.0016 kg/s, 0.018kg/s, 0.0020kg/s) sur la température de la sortie du tube. On a examiné l'influence de différents nombres d'ailettes de (1-4) qui sont montées à l'intérieur du tube absorbeur.

- **Les résultats obtenus ont montré ce qui suit :**

Le modèle actuel est en bon accord avec les données expérimentales. Par conséquent, le modèle peut être utilisé pour analyser les performances optiques et thermiques du CCP.

- L'avantage d'utiliser un réflecteur secondaire est que le flux de chaleur autour du tube récepteur est distribué de manière plus uniforme.
- Les résultats obtenus pour le premier cas (tube simple) avec l'utilisation de l'eau comme un fluide caloporteur montrent que la température maximale à la sortie du tube absorbeur est de 73°C pour le mois de juin et l'efficacité du système est d'environ 40% pour un débit de 0.0018 kg/s.

## **Conclusion générale**

---

- Pour le deuxième cas le tube avec l'insertion de quatre ailettes, la température maximale obtenue est de 87 °C et l'efficacité du système est d'environ 49% pour le même débit.
- L'utilisation d'ailettes insérées dans le tube absorbeur améliore considérablement les performances du système CCP.
- Un gain d'efficacité d'environ 10 % à 15 % peut être atteint en insérant quatre ailettes dans le tube absorbeur.
- La performance du système peut être augmentée en utilisant des ailettes à l'intérieur du tube avec un rapport d'environ 1.49 à 1.21

L'étude de l'effet de la variation du débit et le nombre des ailettes à l'intérieur du tube conjugués a permis d'aboutir aux résultats suivants :

- La température du fluide à la sortie du tube absorbeur est proportionnelle à l'ensoleillement direct et inversement proportionnel au débit du fluide dans le tube.
- Le nombre optimal d'ailettes ajoutées est de trois.
- Un gain d'efficacité d'environ 52 % peut être atteint en insérant trois ailettes dans le tube absorbeur.

## **Perspectives et recommandations**

Pour augmenter et améliorer le rendement et la température du fluide à la sortie du tube il faut prendre en compte les points suivants :

- **Changer de fluide caloporteur**

En utilisant l'eau comme fluide caloporteur on pose la problématique du changement de phase puisque l'eau s'évapore à 100 °C prévoir un fluide caloporteur qui ne s'évapore pas à moins de 400°C.

- **Longueur de concentrateur**

Un concentrateur plus long donnerait forcément une plus grande surface de captation et donc des températures plus hautes

- **Cycle fermé**

Notre étude s'est portée sur un cycle ouvert, en utilisant un cycle fermé nous aurions une plus grande température d'entrée et cela augmenterait également la température de sortie.

## *Conclusion générale*

---

Des analyses supplémentaires pourraient être envisagées à l'avenir, telles que la combinaison de l'utilisation d'un réflecteur secondaire, d'ailettes insérées et d'un nano fluide comme fluide caloporteur.

---

# Références bibliographiques

---

## Références bibliographiques

---

- [1] marif yacine ; caractérisation d'un concentrateur cylindro-parabolique de dimensions réelles au sud de l'algérie : région d'ouargla (2015).
- [2] a. pages, l'utilisation des énergies renouvelables pour l'électrification rurale décentralisée des pays en développement, octobre (2000).
- [3] andraka, charles e., et al. "Solar heat pipe testing of the stirling thermal motors 4-120 stirling engine."ieee.de-ac04-94a185000 (1996).
- [4] kalogirou sa. solar thermal collectors and applications.prog energy combust sci 2004; 30(3): 231-95.
- [5] schawarzböl p, buck r, sugarmen c, ring a, jesus marcos crespo m, altwegg p, et al.
- [6] mancini t, heller p, butler b, osborn b, schielw, goldberg v, et al. dish-stirling systems: an overview of development and status.j solar energy eng 2003; 125(2): 135- 51.
- [7] zhiyong. wu et al."three-dimensional numerical study of heat transfer
- [8] characteristics of parabolic trough receiver".applied energy 113 (2014) 902–911.[1] (f. daniels : direct use of the sun's energy, yale university press (usa), 1964).
- [9] (l'énergie solaire, de la recherche appliquée aux utilisations pratiques-perspectives d'avenir, premier ministre, service d'information et de diffusion, 19 rue constantine- 75700 paris – ministère de l'industrie, du commerce et de l'artisanat, délégation aux énergies nouvelles, 13 rue de bourgogne -75700 paris).
- [10] (peuser f.a., remmers k-h., schnauss m : installations solaires thermiques : conception et mise en œuvre, systèmes solaires, 2005, p 400.
- [11] r. bernard g. menguy m. schwartz : rayonnement solaire, conversion thermique et applications 1980, p 17.
- [12] (r. bernard, g. menguy, m. schwartz, le rayonnement solaire : conversion thermique et applications, 2eédition augmentée, p 197 dans technique et documentation).
- [13] (le pompage photovoltaïque par jimmy royer, thomas djako, eric schiller, bocar sadasy, iepf/ université d'ottawa/ eier/ crepa.
- [14] jacques bernard, génie énergétique, energie solaire : calculs et optimisation (isbn 978-2-7298-6492-7), ellipses edition marketing s.a., 2011
- [15] a.mefti , m.y.bouroubi et a.khellaf , analyse critique du modèle de l'atlas solaire de l'algérie. Article (26/09/99)

## Références bibliographiques

---

- [16] Energie solaire dans le monde site : [www.soltys.fr](http://www.soltys.fr)
- [17] m. capderou, 'atlas solaire de l'algerie, tome1, vol 1 et 2 : modèles théoriques et expérimentaux', office des publications universitaires, algérie, 1987
- [18] ballo djibril tout un,( etude experimentale d'un retro-concentrateur solaire parabolique), memoire de fin d'etude master academique, spécialité énergétique, département génie mécanique, faculté des sciences et de la technologie, université abdel hamid ben badis – mostaganem, 2018 / 2019 p 15 .
- [19] seyedebrahimghasemi et al." numerical study on thermal performance of solar parabolic trough collector". journal of mathematics and computer science 7 (2013)
- [20] j.e. braun et jc. mitchell, solar geometry for fixed and tracking surface, edition: solar energy laboratory, 1983
- [10] wang kun et al. "a design method and numerical study for a new type parabolic
- [21]trough solar collector with uniform solar flux distribution". science china technological sciences. march 2014 vol.57 no.3: 531–540.
- [22]m.geyer .and wb. stine, power from the sun, edition: jt. lyle center, 2001
- [23]benmouiza m. k quantification of solar radiation in algeria, application to the sizing of photovoltaic systems doctoral thesis 2015
- [24]lomansocj ,junroloma r ,seer paller k design and simulation of 100 kw solar photovoltaic (pv) grid connected power plant using pvsyst international journal of science and research (ijsr) :2319-7064 2016
- [25] energie renouvelable, wikipedia, 2015.
- [26] foster, robert, majed ghassemi and alma cota. solar energy: renewable energy and the environment. boca raton: crc press, 2010
- [27] y.jannot, cours de transfert thermique, thermique solaire, édition : mac graw hill,octobre 2003
- [28]f kasten, 'the linke turbidity factor based on improved values of the integral rayleigh optical thickness', solar energy, vol. 56, n°3, pp. 239 – 244, 1996.
- [29]kalogirou, soteris a. solar energy engineering: processes and systems. 1st. usa: elsevier, 200
- [30] mazouz mawloud, etude et simulation des transferts de chaleur dans un recepteur d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique,memoir de master, université m'hamed bougara de boumerdès,2017

## Références bibliographiques

---

- [31] mazouz mawloud, etude et simulation des transferts de chaleur dans un recepteur d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique, memoir de master, université m'hamed bougara de boumerdès,2017
- [32] liu bt, jordon rc. solar energy 1960; 4:1
- [33] mohamed h. yehia, muhammed faiz abdullah hassan, nabeel mahdi abed, a. khalil, najem bailek combined thermal performance enhancement of parabolic trough collectors using alumina nanoparticles and internal fins international journal of engineering res...vol. 62, pp 107-132
- [34] a. y. al-rabeeah, istván seres, istván farkas experimental investigation of parabolic trough solar collector thermal efficiency enhanced with different absorber coatings international journal of thermofluids- vol. 19, pp 100386-100386
- [35] mujahid k. badr, farooq h. ali, mohsen sheikholeslami influence of internal fins and nanoparticles on heat transfer enhancement through a parabolic trough solar collector international journal of heat and techno...- vol. 40, iss: 2, pp 436-448
- [36] nourhan b. saad, antar m m abdala, m. fatouh thermal enhancement of parabolic trough collectors using absorber tubes with internally longitudinal round edge fins engineering research journal- vol. 173, iss: 0, pp 356-375
- [37] a. y. al-rabeeah, istván seres, istván farkas experimental investigation of improved parabolic trough solar collector thermal efficiency using novel receiver geometry design international journal of thermofluids- vol. 18, pp 100344-100344
- [38] laaraba adel1\*, mebaraki ghazali, enhancing thermal performance of a parabolic trough collector with inserting longitudinal fins in the down half of the receiver tube, journal of thermal science ,2020.
- [39] waleed al-aloosi a a , yaser alaiwi a , hudhaifa hamzah , thermal performance analysis in a parabolic trough solar collector with a novel design of inserted fins, case studies in thermal engineering 49 (2023) 103378
- [40] nourhan b. saada, antar m m abdalaa, m. fatouh, thermal enhancement of parabolic trough collectors using absorber tubes with internally longitudinal round edge fins, m. fatouh / engineering research journal 173 (march 2022) / m16-m33
- [41] sumeet anand, sumit kumar, optimization of gaseous working fluid and internally finned absorber tube for enhancing the thermal performance of parabolic trough solar collector, applied thermal engineering 239 (2024) 122078.
- [42] regue, m.h., benchatti, t., medjelled, m., benchatti, a. (2014). improving the performances of a solar cylindrical parabolic dual reflection mirror experimental part. heat and technology, 32(1): 171-178.

## ***Références bibliographiques***

---

[43] <https://mscir.tripod.com/parabola>

[44] pvsyst-tutorial-v7-grid-connected-3-fr.pdf

[45] nerl, ‘concentrating solar power research – soltrace’. 2012

[46] [matlab \(mathworks.com\)](http://matlab.mathworks.com)

[47] ansys-fluent theory guide. (2019), ansys inc

[48] Ansys fluent tutorial guide 2018 sources and references official website: [www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent](http://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent)

[49] bharti2019 thermal performance analysis of small-sized solar parabolic trough collector using secondary.