

Université Amar Telidji - Laghouat



Faculté de Technologie

Mémoire de Fin d'Études

En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Énergétique

THEME

Analyse comparative des nanoparticules pour l'optimisation des performances thermiques des capteurs solaires à collecteur cylindro-parabolique avec réflecteur secondaire

Présenté par :

Mr. BEN MESSAOUD Ammar

Encadré par :

Dr. BOUALI Belkacem

M : ZAITRI Tameur

Soutenu le :

JURY :

| | | |
|---------------------|-------------------|-------|
| ***** | Président du jury | ***** |
| ***** | Examineur | **** |
| ***** | Examineur | ***** |
| ***** | Examineur | ***** |
| Dr. BOUALI Belkacem | Encadreur | *** |

Dédicace

Je remercie toujours Dieu Tout-Puissant qui m'a permis de terminer ce mémoire. Je dédie les fruits de mon travail à celui qui m'a appris à donner sans rien attendre, mon père bien-aimé. Au sens de l'amour et de la tendresse, à celle dont les prières ont été le secret de ma réussite, ma chère mère, que Dieu la protège.

Je dédie cette humble œuvre au cœur pur et à l'âme innocente, à mon âme sœur, ma sœur Khadija. À mes chers frères, chacun par son nom, et à toute la famille Ben Messaoud .

À mes professeurs et collègues..

À tous je dédie cet humble ouvrage, demandant à Dieu Tout-Puissant de nous en faire bénéficier et de nous guider vers son succès.

Remerciements

Je remercie ALLAH le Tout-Puissant de m'avoir donné la force, la patience et la volonté nécessaires pour mener à bien ce mémoire de Master.

Ce travail a été réalisé sous la direction de Monsieur **BOUALI BELKACEM, Maître de conférences** à l'Université Amar Telidji de Laghouat. Je tiens à lui exprimer ma profonde reconnaissance pour son encadrement, ses conseils précieux, sa rigueur scientifique et sa disponibilité tout au long de ce travail.

Mes remerciements vont également à Monsieur **ZAITRI TAMEUR**, Co-encadreur de ce mémoire, pour son accompagnement, ses orientations pertinentes et son soutien constant.

Je remercie chaleureusement Monsieur **ELHDI AISSA**chef département mécanique de l'Université Amar Telidji

Nous sommes conscientes de l'honneur que nous a fait Dr. **Ben Lahcen Lahcen** en étant président du jury et **Dr. Ben Houia Amin** d'avoir accepté d'examiner ce travail

Enfin, J'exprime toute ma gratitude à tous les enseignants et personnels du département mécanique de l'Université Amar Telidji pour leur contribution à ma formation tout long de ces années.

الملخص

يحلل هذا المقال تأثير إضافة الجسيمات النانوية (الفضة، ثاني أكسيد التيتانيوم، النحاس) إلى الماء المستخدم كسائل ناقل للحرارة، على الأداء الحراري للمجمعات الشمسية الأسطوانية المكافئة (PTC) المزودة بـ عاكس ثانوي. تنقسم الدراسة إلى جزأين: الأول يتناول محاكاة توزيع الفيض الحراري باستخدام برنامج SolTrace، والثاني يُعنى بمحاكاة انتقال الحرارة وتدفق المائع باستخدام برنامج ANSYS-FLUENT. أظهرت النتائج أن إضافة الجسيمات النانوية تُحسن من كفاءة النظام، حيث بلغت الكفاءة 46.79% عند استخدام عاكس ثانوي. وتبين أن الفضة (Ag) هي الأكثر فعالية، إذ وصلت الكفاءة إلى 55.62% عند نسبة حجمية تبلغ 2%. يُظهر هذا أن استخدام الجسيمات النانوية يُحسن بشكل كبير انتقال الحرارة وكفاءة مجمعات PTC.

الكلمات المفتاحية: مجمع شمسي PTC، العاكس الثانوي، سائل نانوي، تتبع الأشعة، الأنبوب الماص.

Résumé

Cet article analyse l'impact de l'ajout de nanoparticules (argent, dioxyde de titane, cuivre) à l'eau, utilisée comme fluide caloporteur, sur la performance thermique des collecteurs solaires à tube cylindrique parabolique (PTC) avec second réflecteur. L'étude se divise en deux parties : une simulation de la distribution du flux thermique avec SolTrace, et une simulation du transfert de chaleur et de l'écoulement du fluide avec ANSYS-FLUENT. Les résultats montrent que l'ajout de nanoparticules améliore l'efficacité du système, atteignant 46,79 % avec un réflecteur secondaire. L'argent (Ag) s'avère être le plus efficace, atteignant une efficacité de 55.62% à 2 % de fraction volumétrique. L'utilisation de nanoparticules améliore considérablement le transfert de chaleur et l'efficacité des collecteurs PTC.

Mots-clés : PTC , Réflecteur secondaire, Nanofluide, Tracé de rayons, Tube absorbeur.

Abstract

This article analyzes the impact of adding nanoparticles (silver, titanium dioxide, copper) to water, used as a heat transfer fluid, on the thermal performance of parabolic trough solar collectors (PTC) equipped with a secondary reflector. The study is divided into two parts: a simulation of the heat flux distribution using SolTrace, and a simulation of heat transfer and fluid flow using ANSYS-FLUENT. The results show that the addition of nanoparticles improves the system's efficiency, reaching 46.79% with a secondary reflector. Silver (Ag) proves to be the most effective, achieving an efficiency of 55.62% at a 2% volume fraction. The use of nanoparticles significantly enhances heat transfer and the overall efficiency of PTC collectors.

Keywords: PTC, Secondary reflector, Nanofluid, Ray tracing, Absorber tube

Table des matières

| | |
|----------------------------|---|
| Introduction générale..... | 1 |
|----------------------------|---|

Chapitre I : Généralités sur les centrales à concentrateurs cylindro-paraboliques

| | | |
|--------|---|----|
| I.1 | Introduction | 3 |
| I.2 | Généralités sur le Soleil | 3 |
| I.3 | La Trajectoire de la Terre autour du Soleil | 4 |
| I.4 | Les Composantes du Rayonnement Solaire | 5 |
| I.5 | L'Éclairement | 6 |
| I.6 | La Constante Solaire | 7 |
| I.7 | Gisement Solaire en Algérie | 8 |
| I.8 | Diverses Applications de l'Énergie Solaire | 9 |
| I.8.1 | Énergie Solaire Photovoltaïque | 9 |
| I.8.2 | Système Solaire Thermique | 9 |
| I.9 | L'énergie solaire thermique à basse température | 10 |
| I.10 | Système à Basse Température | 11 |
| I.11 | Production de Chaleur..... | 11 |
| I.12 | Le Chauffe-Eau Solaire..... | 12 |
| I.13 | Les Capteurs Solaires..... | 13 |
| I.14 | Capteurs Solaires Photovoltaïques..... | 13 |
| I.15 | Capteurs Solaires Thermiques..... | 13 |
| I.16 | Les Capteurs par Concentration..... | 15 |
| I.16.1 | Capteur Parabolique | 15 |
| I.17 | Applications des Capteurs Solaires | 15 |
| I.17.1 | Chauffage et Climatisation des Habitants..... | 15 |
| I.17.2 | Le Séchage..... | 16 |
| I.18 | Principe de Fonctionnement des Capteurs Solaires..... | 16 |
| I.19 | Conclusion..... | 16 |

Chapitre II: Contexte scientifique et technique des Concentrateurs Cylindro-Paraboliques

| | | |
|------|---|----|
| II.1 | Introduction | 17 |
| II.2 | Historique des Concentrateurs Cylindro-Paraboliques | 17 |
| II.3 | Capteur Cylindro-Parabolique..... | 18 |
| II.4 | Description du Concentrateur..... | 18 |
| II.5 | La Concentration Solaire..... | 19 |
| II.6 | Classification des systèmes à concentration | 19 |
| II.7 | Nécessité de la concentration..... | 20 |

| | | |
|--------|---|----|
| II.8 | Principe de concentration | 20 |
| II.9 | Concentrateurs cylindro-parabolique | 22 |
| II.9.1 | Les composants d'un concentrateur cylindro parabolique..... | 22 |
| II.9.2 | Le système de poursuite solaire | 25 |
| II.9.3 | Les avantages..... | 26 |
| II.9.4 | Les inconvénients..... | 26 |
| II.10 | Etat de l'art | 27 |
| II.11 | Conclusion | 29 |

Chapitre III :

Modélisation Optique et Thermique des Concentrateurs Cylindro-Paraboliques

| | | |
|---------|---|----|
| III.1 | Introduction..... | 31 |
| III.2 | Bilan optique..... | 31 |
| III.3 | Bilan thermique..... | 31 |
| III.3.1 | Bilan thermique (vitre paroi extérieure)..... | 32 |
| III.3.2 | Bilan thermique (vitre paroi intérieure)..... | 32 |
| III.3.3 | Bilan thermique (tube absorbeur)..... | 32 |
| III.4 | Performances thermiques d'un concentrateur cylindro parabolique | 33 |
| III.5 | Puissance utile Qu | 33 |
| III.6 | Rendement global du concentrateur solaire η | 33 |
| III.7 | Ombre et pertes des extrémités | 33 |
| III.8 | Pertes aux extrémités du récepteur..... | 34 |
| III.9 | Conclusion | 35 |

Chapitre IV : Interprétation et Discussion des Résultats Obtenus

| | | |
|--------|--|----|
| IV.1 | Introduction | 36 |
| IV.2 | Matériaux et Méthodes | 36 |
| IV.2.1 | Spécifications de conception | 36 |
| IV.3 | Méthodologie..... | 37 |
| IV.4 | Irradiance Solaire..... | 38 |
| IV.5 | Distribution du flux de chaleur autour du tube récepteur | 39 |
| IV.6 | Analyse CFD | 41 |
| IV.7 | Effet de l'ajout de nanoparticules..... | 41 |
| IV.8 | Conclusion..... | 50 |
| | Conclusion Générale | 51 |
| | Résumé | 53 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure I. 1 : Schématisation des mouvements de la terre autour du soleil [4] | 5 |
| Figure I. 2 : Rayonnement solaire. [6] | 6 |
| Figure I. 3 : L'éclairement [7] | 7 |
| Figure I. 4 : La constante solaire[8] | 8 |
| Figure I. 5 : Panneaux solaire thermiques [10]..... | 10 |
| Figure I. 6 : Fonctionnement d'un chauffe-eau solaire. [11] | 12 |
| Figure I. 7 : capteurs à haute performance | 14 |
| Figure I. 8 : principe de fonctionnement du concentrateur parabolique | 15 |
| | |
| Figure II. 1 : Application collecteur parabolique en Egypte construit en 1913 (source : Ragheb 2011) | 18 |
| Figure II. 2 : Schéma du Principe de fonctionnement d'une centrale CSP..... | 21 |
| Figure II. 3 : Schéma d'un tube absorbeur [27] | 23 |
| Figure II. 4 : Système horizontal de poursuite solaire Est-Ouest..... | 26 |
| Figure II. 5 : Concentrateur cylindro parabolique..... | 27 |
| | |
| Figure III. 1 : Illustration de l'ombrage des collecteurs [43]..... | 34 |
| Figure III. 2 : Pertes aux extrémités du récepteur [44]..... | 35 |
| | |
| Figure IV. 1 : Schéma d'un PTC simple..... | 36 |
| Figure IV. 2 : Schéma d'un PTC avec Réflecteur Secondaire | 37 |
| Figure IV. 3 : Organigramme du modèle de simulation..... | 38 |
| Figure IV. 4 : Irradiance Solaire en Fonction du Temps | 39 |
| Figure IV. 5 : Traçage de Rayons avec SolTrace pour un PTC avec Réflecteur Secondaire..... | 40 |
| Figure IV. 6 : Diagramme de contour de la distribution du flux thermique autour du tube absorbeur pour un PTC avec réflecteur secondaire..... | 40 |
| Figure IV. 7 : Géométrie du Tube Absorbeur, Maillage et Conditions aux Limites | 41 |
| Figure IV. 8 : Gain de flux pendant un jour avec différentes fraction volumiques de Silver (Ag) | 44 |
| Figure IV. 9 : Montre que le profil de la température du fluide de sortie du tube pendant un jour avec différentes fraction volumiques de Silver (Ag) | 45 |
| Figure IV. 10 : Efficacité PTC en fonction du temps avec différentes fraction volumiques de Silver (Ag)..... | 45 |
| Figure IV. 11 : Montre que le profil de la température du fluide de sortie du tube pendant un jour avec différentes fraction volumiques de Titanium (TiO ₂) | 46 |
| Figure IV. 12 : Gain de flux pendant un jour avec différentes fraction volumiques de Titanium (TiO ₂) | 47 |
| Figure IV. 13 : Efficacité PTC en fonction du temps avec différentes fraction volumiques de Titanium (TiO ₂)..... | 47 |
| Figure IV. 14 : Montre que le profil de la température du fluide de sortie du tube pendant un jour avec différentes fraction volumiques de Cuivre (Cu) | 48 |
| Figure IV. 15 : Gain de flux pendant un jour avec différentes fraction volumiques de Cuivre (Cu) | 49 |
| Figure IV. 16 : Efficacité PTC en fonction du temps avec différentes fraction volumiques de Cuivre (Cu)..... | 49 |

Figure IV. 17 : les profils de l'efficacité moyenne en fonction de la fraction volumique avec différente de type nanoparticule.....50

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau I. 1: Caractéristiques du soleil [3]..... | 3 |
| Tableau I. 2 : Potentiel de l'énergie solaire en Algérie [9] | 9 |
| | |
| Tableau IV. 1 : Paramètres géométriques du système PTC de référence | 37 |
| Tableau IV. 2 : Propriétés Optiques des Composants PTC | 38 |
| Tableau IV. 3: Propriétés thermo physiques de l'eau et des nano-fluides [%] | 42 |
| Tableau IV. 4 : Les propriétés de nano-fluides pour $\phi=0.005$ | 42 |
| Tableau IV. 5 : Les propriétés de nano-fluides pour $\phi=0.01$ | 42 |
| Tableau IV. 6 : Les propriétés de nano-fluides pour $\phi=0.015$ | 43 |
| Tableau IV. 7: Les propriétés de nano-fluides pour $\phi=0.02$ | 43 |

Nomenclatures :

| Symboles | Signification | Unité |
|--------------------|---|-------------------|
| Chapitre I | | |
| δ | Déclinaison solaire | ° |
| C^* | Constante solaire | W/m ² |
| h | Hauteur du soleil | ° |
| a_z | Azimut | ° |
| ω | Angle horaire | ° |
| n | Le numéro du jour dans l'année compté à partir du 1er janvier | |
| L | Longitude | ° |
| Z | Altitude | m |
| θ | Angle d'incidence | ° |
| θ_z | Angle zénithal | ° |
| Q | Flux de chaleur | W |
| Q_{cd} | Flux de chaleur par conduction | W |
| Q_{cv} | Flux de chaleur par convection | W |
| Q_r | Flux de chaleur par rayonnement | W |
| Chapitre II | | |
| a | Largeur d'ouverture | m |
| A | Surface d'un cylindro parabolique | m ² |
| A_a | Surface d'un cylindro parabolique | m ² |
| A_r | Surface d'ouverture du miroir | m ² |
| C | Rapport de concentration | - |
| f | Distance focale | m |
| l | Longueur du collecteur | m |
| q_{utile} | Puissance reçue par unité de longueur | W/m ² |
| $q_{absorbée}$ | Quantité d'énergie solaire absorbée | W/m ² |
| $q_{intérieur}$ | Quantité d'énergie qui indique le transfert thermique par convection et par rayonnement entre le tube absorbeur et l'enveloppe en verre | W/m ² |
| T | Température | K |
| ϑ | Vitesse d'écoulement | m.s ⁻¹ |
| x | Cordonnées cartésiennes | |

| | | |
|----------|--|---|
| γ | Facteur optique du collecteur (interception) | - |
|----------|--|---|

| | | |
|----------------|--|------------------------------------|
| erf | La fonction d'erreur | - |
| α^* | le facteur d'absorption solaire | - |
| ε | Emissivité | - |
| E | Rayonnement solaire incident | W/m ² |
| E _b | Rayonnement incident sur le plan d'ouverture | W/m ² |
| m | Débit massique | Kg/s |
| C _p | Pouvoir calorifique | J kg ⁻¹ K ⁻¹ |
| UL | Coefficient des pertes thermiques | |
| Q _u | Puissance utile | W |
| h | Enthalpie | KJ/kg |

Introduction générale

Introduction générale

Face à la demande énergétique mondiale en constante augmentation et aux défis environnementaux associés à l'utilisation des énergies fossiles, les énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire, se présentent comme une solution à la fois durable et essentielle. Le rayonnement solaire, disponible en abondance et gratuitement, représente une source d'énergie propre capable de couvrir une part significative des besoins énergétiques tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre. Selon l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA, 2021[1]), l'énergie solaire pourrait contribuer à hauteur de 20 % à la production d'électricité mondiale d'ici 2050.

Parmi les différentes technologies de conversion de l'énergie solaire, les capteurs solaires thermiques occupent une place clé, notamment dans les régions bénéficiant d'un fort ensoleillement. Ces systèmes permettent de transformer l'énergie du rayonnement solaire en chaleur, laquelle peut être exploitée pour diverses applications, telles que le chauffage domestique, l'industrie ou la production d'électricité. Les concentrateurs solaires cylindro-paraboliques (ou Parabolic Trough Collectors, PTC) sont des dispositifs matures utilisés dans les centrales thermiques solaires à concentration. Leur conception permet de concentrer efficacement le rayonnement solaire sur un tube absorbeur, ce qui favorise l'atteinte de températures élevées et optimise le rendement thermique de l'ensemble du système (Kalogirou, 2013[2]).

Le but de cette étude est d'analyser l'impact de l'ajout de nanoparticules (argent, dioxyde de titane, cuivre) à l'eau, utilisée comme fluide caloporteur, sur la performance thermique des collecteurs solaires à tube cylindrique parabolique (PTC) équipés d'un réflecteur secondaire, tout en maintenant un débit massique constant. L'étude se divise en deux volets principaux : optique et thermique.

Le volet optique consiste à déterminer la répartition du flux thermique autour du tube absorbeur. Cette analyse est réalisée à l'aide du logiciel SolTrace, qui utilise la méthode de lancer de rayons Monte Carlo. La distribution du flux thermique obtenue est ensuite interpolée à l'aide de fonctions gaussiennes.

Dans le volet thermique, le flux thermique et les propriétés physiques du nanofluide sont intégrés dans le solveur CFD ANSYS-FLUENT. La variation de la température de sortie du fluide caloporteur (HTF) est alors déterminée en résolvant les équations de transfert de chaleur conjugué et d'écoulement du fluide à l'intérieur du tube.

Les conditions météorologiques simulées dans cette étude correspondent à la journée du 21 juin 2024, dans la ville de Laghouat, située au sud de l'Algérie (longitude : 2°56', latitude : 33°46', altitude : 700 m).

Ce travail de recherche est structuré en quatre chapitres afin de traiter de manière détaillée et progressive les aspects fondamentaux et appliqués relatifs à la capture de l'énergie solaire via des concentrateurs cylindro-paraboliques :

- **Chapitre I : Généralités sur les Capteurs d'Énergie Solaire.** Ce chapitre présente les principes de base de l'énergie solaire, les différents types de capteurs solaires, ainsi que les paramètres influençant leur performance.
- **Chapitre II : Contexte scientifique et technique des Concentrateurs Cylindro-Paraboliques.** Ce chapitre aborde la définition des PTC, leur évolution historique, leurs avantages, leurs limites et l'état de l'art de cette technologie.
- **Chapitre III : Modélisation Optique et Thermique des Concentrateurs Cylindro-Paraboliques.** Ce chapitre présente les équations fondamentales permettant de simuler le comportement optique et thermique des PTC.
- **Chapitre IV : Interprétation et Discussion des Résultats Obtenus.** Ce chapitre analyse les résultats issus des simulations, en mettant en lumière les performances et les perspectives d'amélioration des systèmes étudiés.

Enfin, la recherche se conclut par une conclusion générale, suivie de perspectives futures pour le développement de cette technologie.

Chapitre I : Généralités sur les Capteurs d'Énergie Solaire

Chapitre I : Généralités sur les centrales à concentrateurs cylindro-paraboliques

I.1 Introduction

L'exploitation de l'énergie solaire repose sur des dispositifs appelés capteurs solaires, capables de convertir le rayonnement solaire en énergie utile. Selon le type de technologie utilisée, cette énergie peut être transformée en chaleur ou en électricité. Ce chapitre présente les notions fondamentales liées aux capteurs d'énergie solaire, leurs principes de fonctionnement, ainsi que leurs différents types et applications.

I.2 Généralités sur le Soleil

Le Soleil, étoile au centre de notre système solaire, est également l'astre le plus proche de la Terre, situé à une distance moyenne d'environ 150 millions de kilomètres. Il est principalement constitué d'hydrogène (représentant environ 74 % de sa masse et 92,1 % de son volume) et d'hélium (environ 24 % de la masse et 7,8 % du volume), tandis que le 1 % restant est composé d'un ensemble de plus de cent éléments chimiques divers.

Par son immense force gravitationnelle, le Soleil maintient l'ensemble du système solaire — des planètes géantes gazeuses aux particules de poussière interplanétaires — en orbite autour de lui. Malgré un rayon moyen de 695 508 km, le Soleil n'est pas une étoile parmi les plus grandes de l'univers ; néanmoins, sa masse dépasse largement celle de la Terre. En effet, il faudrait environ 332 946 Terres pour égaler sa masse, et près de 1,3 million de Terres pour remplir son volume. Cette échelle témoigne de l'importance du Soleil tant sur le plan physique qu'énergétique pour notre planète. [3]

Tableau I. 1: Caractéristiques du soleil [3]

| | |
|---|-----------------------|
| Diamètre (km) | 14×10 ⁵ |
| Masse (kg) | 2×10 ³⁰ |
| Surface (km ²) | 6.09×10 ¹² |
| Volume (km ³) | 1.41×10 ¹⁸ |
| Masse volumique moyenne (kg /m ³) | 1408 |
| Vitesse (km /s) | 217 |

I.3 La Trajectoire de la Terre autour du Soleil

La Terre décrit une trajectoire elliptique autour du Soleil, ce dernier occupant l'un des deux foyers de l'ellipse, conformément aux lois de Kepler. Bien que cette orbite soit légèrement excentrée, elle est souvent considérée comme quasi circulaire en raison de son faible taux d'excentricité. La période de révolution de la Terre autour du Soleil est d'environ 365 jours, 5 heures et 48 minutes, formant ainsi l'année solaire. Le plan dans lequel s'inscrit cette orbite est appelé le plan de l'écliptique.

Au cours de cette révolution annuelle, la position apparente du Soleil dans le ciel varie. Lors du solstice d'été, qui survient généralement autour du 21 juin, le Soleil atteint sa hauteur maximale dans le ciel pour l'hémisphère nord. À l'inverse, au solstice d'hiver (vers le 21 décembre), il atteint sa hauteur minimale. Après cette date, sa trajectoire apparente commence à remonter progressivement, amorçant ainsi un nouveau cycle saisonnier [4].

Cette variation d'inclinaison est due à l'obliquité de l'axe de rotation terrestre, incliné d'environ $23,5^\circ$ par rapport à la perpendiculaire au plan de l'écliptique. Ce phénomène engendre des différences notables en termes de durée d'ensoleillement et d'angle d'incidence du rayonnement solaire selon la période de l'année et l'hémisphère considéré.

Ainsi, durant l'hiver dans l'hémisphère nord, le Soleil reste bas sur l'horizon et la durée du jour est réduite, tandis que l'hémisphère sud connaît l'été. Inversement, pendant les mois d'été dans l'hémisphère nord, la Terre est inclinée de manière à exposer davantage cette partie au rayonnement solaire. Les jours deviennent alors plus longs, et les rayons du Soleil atteignent la surface terrestre avec un angle plus proche de la verticale, maximisant ainsi l'énergie reçue.

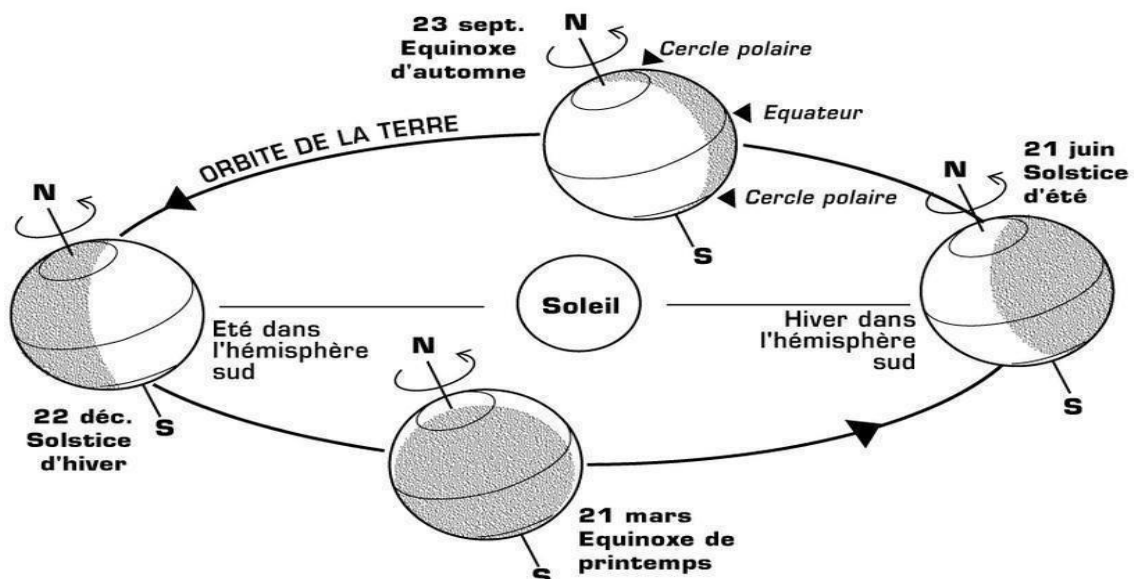


Figure I. 1: Schématisation des mouvements de la terre autour du soleil [4]

Le rayonnement solaire correspond à l'énergie émise par le Soleil à travers le processus de fusion nucléaire de l'hydrogène présent en son cœur. Cette énergie, sous forme de rayonnement électromagnétique, se propage dans l'espace et atteint la Terre. Toutefois, l'intensité du rayonnement incident à la surface terrestre n'est pas constante. Elle varie en fonction de plusieurs facteurs, notamment le moment de la journée, la saison de l'année, l'angle d'incidence des rayons solaires, ainsi que la nature des surfaces réfléchissantes qu'ils rencontrent. Ces variations influencent directement la disponibilité énergétique pour les systèmes de conversion solaire, qu'ils soient photovoltaïques ou thermiques [5].

I.4 Les Composantes du Rayonnement Solaire

Le rayonnement solaire se divise en quatre types principaux :

1. Rayonnement Direct :
Il s'agit du rayonnement que la surface terrestre reçoit directement du Soleil, en ligne droite à partir du disque solaire. Son intensité dépend de l'épaisseur de l'atmosphère que les rayons solaires doivent traverser ainsi que de l'inclinaison des rayons par rapport à la surface terrestre. Ce rayonnement disparaît complètement lorsque le Soleil est entièrement couvert par les nuages.
2. Rayonnement Diffus :
Le rayonnement diffus se produit lorsque le rayonnement solaire direct est dispersé par les nuages et les particules présentes dans l'atmosphère. Ce phénomène résulte de la

diffraction de la lumière par les nuages et les molécules en suspension, ainsi que de la réfraction par la surface terrestre.

3. Rayonnement Réfléchi (Albédo) :

Le rayonnement réfléchi est celui qui est renvoyé par la surface terrestre ou par des objets situés à sa surface. Il dépend de l'albédo, qui est la capacité d'une surface à réfléchir la lumière. Ce rayonnement peut être particulièrement intense lorsque la surface est très réfléchissante, comme l'eau ou la neige. Il est aussi influencé par la longueur d'onde, la direction du rayonnement incident et la température de la surface.

4. Rayonnement Global :

Le rayonnement global est la somme totale de tous les types de rayonnement reçus par la surface terrestre, c'est-à-dire le rayonnement direct, diffus et réfléchi. Cela inclut également le rayonnement réfléchi par le sol et les objets en surface.

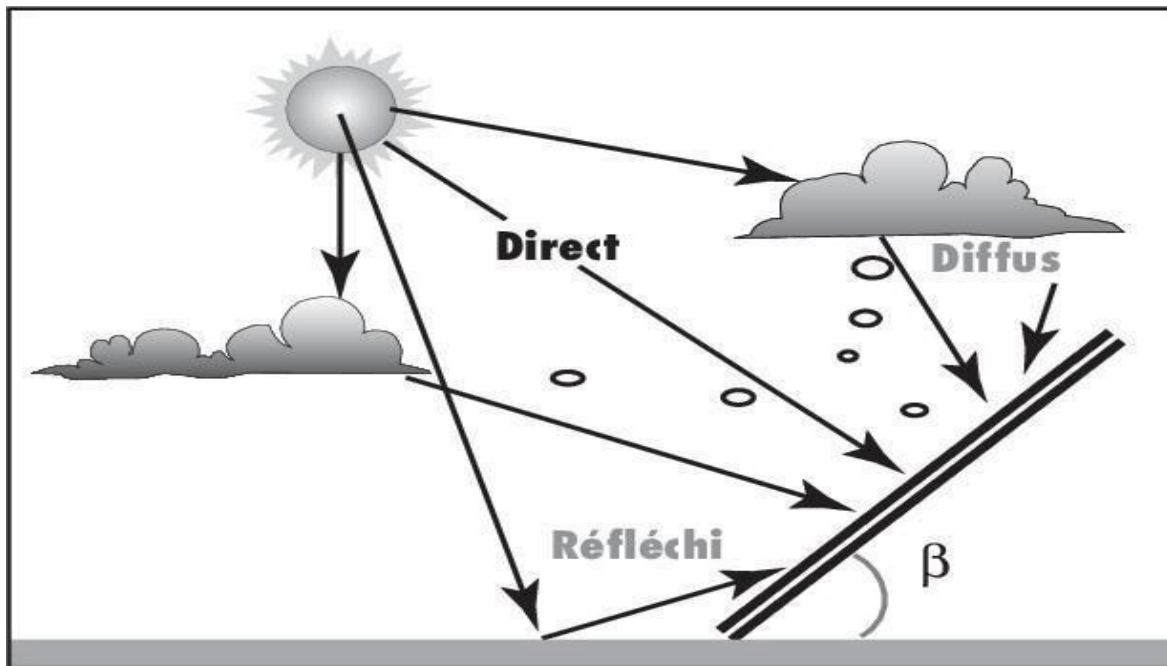


Figure I. 2 : Rayonnement solaire. [6]

I.5 L'Éclairement

En un point donné, l'éclairement (E) est défini comme le quotient du flux lumineux (Φ) reçu par un élément de surface, divisé par l'aire de la surface (S). Il est généralement exprimé en **lux** (**lx**), qui est une unité fondamentale dans le domaine de la photométrie. L'éclairement permet ainsi de quantifier l'intensité de

la lumière reçue sur une surface donnée. [7]

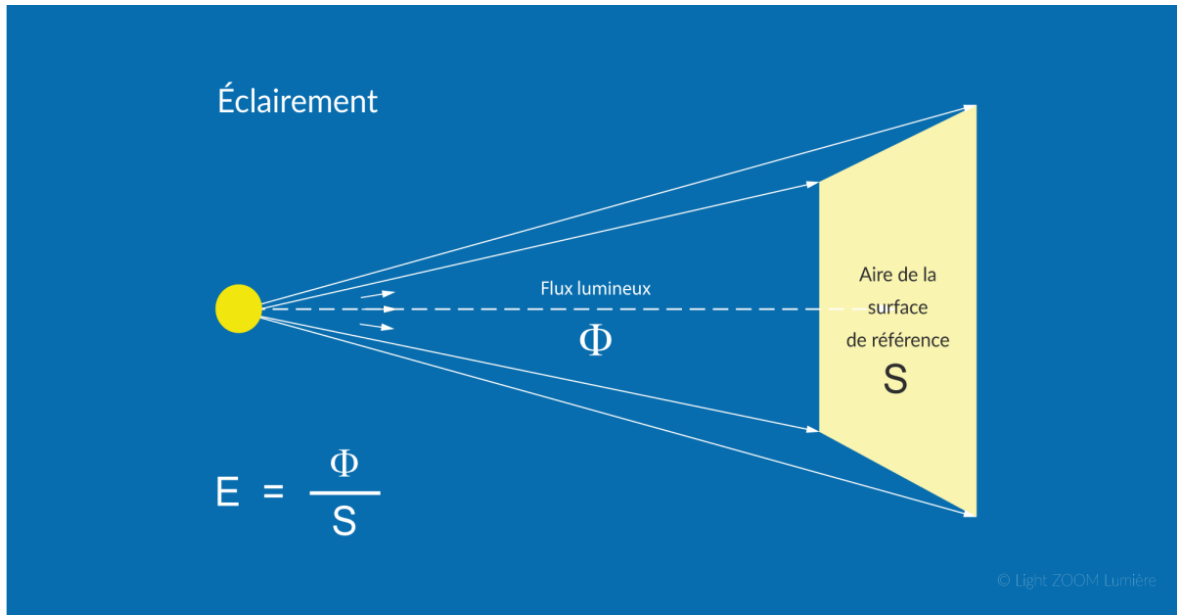


Figure I. 3: L'éclairage [7]

I.6 La Constante Solaire

La constante solaire, notée C^* , représente la valeur moyenne du flux solaire reçu à la limite de l'atmosphère terrestre. En d'autres termes, c'est la quantité d'énergie totale envoyée par le Soleil à la limite de l'atmosphère terrestre sur une unité de surface perpendiculaire aux rayons solaires. Cette valeur a été déterminée à partir de mesures réalisées à l'aide de satellites. La valeur moyenne annuelle de la constante solaire est de **1367 W/m²**. Il est important de noter que cette valeur varie légèrement en fonction de la distance entre la Terre et le Soleil, une distance qui fluctue au cours de l'année[8].

La variation de la constante solaire suit la relation suivante :

$$C^* = C_0^* + 0.033 \times \cos(0.948 \times n) \quad (\text{I. 16})$$

C^* : la constante solaire

On a : $C_0^* = 1367 \text{ W/m}^2$ est la valeur moyenne de la constante solaire actuellement retenue.

n : le numéro du jour de l'année.

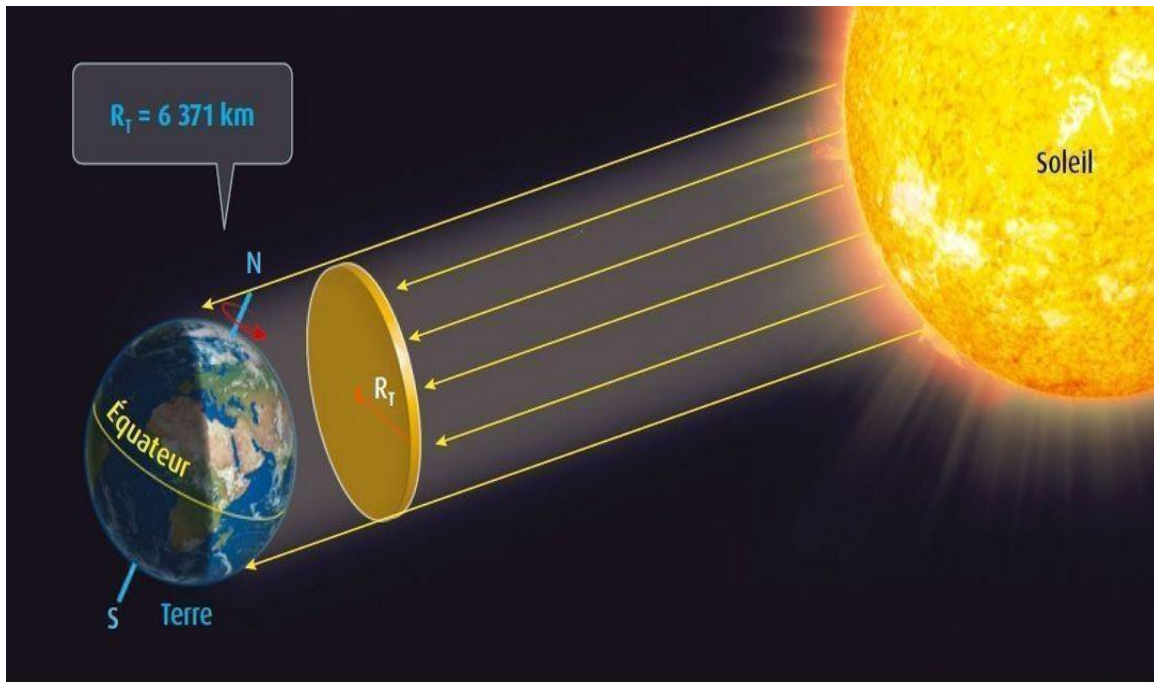


Figure I. 4 : La constante solaire[8]

I.7 Gisement Solaire en Algérie

Le gisement solaire désigne un ensemble de données qui décrit l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Ces données sont essentielles pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et effectuer un dimensionnement aussi précis que possible, en tenant compte de la demande à satisfaire. Le gisement solaire est utilisé dans des domaines aussi variés que l'agriculture, la météorologie, les applications énergétiques, ainsi que la sécurité publique.

De par sa situation géographique, l'Algérie bénéficie d'un gisement solaire exceptionnel, particulièrement important dans le sud du pays. La durée d'insolation, sur la quasi-totalité du territoire national, dépasse les 2000 heures par an et peut atteindre jusqu'à 3900 heures annuellement, offrant ainsi un potentiel solaire considérable.

Tableau I. 2 : Potentiel de l'énergie solaire en Algérie [9]

| Regions | Regions nord | Haut s plateaux | Sahara |
|--|--------------|-----------------|--------|
| Superficies (%) | 4 | 10 | 86 |
| Durée moyenne d'ensoleillement (h/an) | 2650 | 3000 | 3500 |
| Energie moyenne reçue (KWh/m ² /an) | 1700 | 1900 | 2650 |

I.8 Diverses Applications de l'Énergie Solaire

Dans le domaine de l'énergie solaire, on distingue plusieurs filières, à savoir le solaire thermique et le solaire photovoltaïque. Le principe de fonctionnement de ces filières varie selon la technologie utilisée, et chaque filière repose sur des composants spécifiques adaptés à son fonctionnement.

I.8.1 Énergie Solaire Photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque consiste en la transformation directe de la lumière en électricité grâce à des panneaux solaires fabriqués à partir de matériaux semi-conducteurs, tels que le silicium. Ces matériaux ont la capacité de convertir les photons (particules de lumière) en électrons (particules chargées), générant ainsi de l'électricité.

Le principe de fonctionnement repose sur l'interaction entre un photon et un semi-conducteur (comme le silicium), ce qui produit des charges positives et négatives, créant un courant électrique. Les cellules photovoltaïques, fabriquées principalement à partir de silicium, génèrent un courant continu. Cependant, pour que cette électricité puisse être injectée dans le réseau électrique, elle doit être convertie en courant alternatif à l'aide d'un onduleur.

I.8.2 Système Solaire Thermique :

L'énergie solaire thermique est obtenue par la conversion de l'énergie radiative du Soleil en énergie thermique (calorifique). Cette chaleur peut être utilisée pour diverses applications, notamment pour chauffer des bâtiments ou produire de l'eau chaude sanitaire via des chauffe-eaux solaires.

De plus, l'énergie solaire thermique peut être utilisée pour produire de la vapeur d'eau (ou d'autres liquides), qui peut ensuite être utilisée pour faire tourner un alternateur et ainsi

Chapitre I : Généralités sur les Capteurs d'Énergie Solaire

produire de l'énergie électrique. Ce principe est notamment utilisé dans les centrales solaires thermiques.

L'énergie solaire thermique se distingue de l'énergie solaire photovoltaïque, car elle convertit le rayonnement solaire en chaleur, tandis que le photovoltaïque le convertit directement en électricité.

La conversion thermique du rayonnement solaire se fait à travers des capteurs solaires. On distingue principalement deux types de systèmes :

I.9 L'énergie solaire thermique à basse température.

- L'énergie solaire thermique à haute température (concentration solaire par miroir ou CSP, pour *Concentrated Solar Power*).



Figure I. 5 : Panneaux solaire thermiques [10]

I.10 Système à Basse Température

Les installations thermiques solaires à basse température sont des systèmes qui utilisent l'énergie solaire pour produire de la chaleur utile à des températures inférieures à 100°C. Ces systèmes fonctionnent grâce au rayonnement solaire et sont généralement utilisés pour des applications telles que le chauffage de l'eau ou la climatisation.

Une installation à basse température comprend plusieurs composants essentiels :

- Des capteurs solaires pour capter l'énergie solaire.
- Deux circuits d'eau (primaire et secondaire) pour transférer l'énergie thermique.
- Un échangeur de chaleur pour échanger la chaleur entre le fluide caloporteur et l'eau.
- Un accumulateur pour stocker la chaleur.
- Un vase d'expansion pour compenser les variations de volume dues à la température.
- Des conduites pour acheminer l'eau chaude ou le fluide caloporteur.

La circulation de l'eau à l'intérieur des circuits peut être obtenue de deux manières :

1. Par thermosiphon, en tirant parti de la différence de densité de l'eau à différentes températures. Cette méthode fonctionne sans pompe, mais elle nécessite une disposition spécifique des composants.
2. Par une pompe de circulation, qui permet une circulation forcée. Cependant, cette méthode nécessite une source d'énergie externe pour faire fonctionner la pompe.

I.11 Production de Chaleur

Les capteurs solaires absorbent les rayons du Soleil et transmettent leur énergie à un fluide (généralement de l'eau ou de l'air). Cette énergie peut être utilisée pour divers besoins, tels que :

- Le chauffage de l'eau,
- La production d'eau chaude sanitaire,
- La climatisation solaire, qui peut également être utilisée pour la production de froid.

Chapitre I : Généralités sur les Capteurs d'Énergie Solaire

Les installations solaires thermiques sont dimensionnées en fonction d'un besoin spécifique en production de chaleur. Par exemple, dans le secteur résidentiel, elles sont particulièrement intéressantes pour la production d'eau chaude sanitaire.

I.12 Le Chauffe-Eau Solaire

Un chauffe-eau solaire est un dispositif conçu pour capter l'énergie solaire et fournir de l'eau chaude sanitaire, soit de manière partielle, soit totalement. Ce type de chauffage est souvent utilisé pour compléter d'autres systèmes de chauffage de l'eau, tels que ceux utilisant de l'électricité, des énergies fossiles, ou de la biomasse. Dans certaines conditions, il peut même remplacer complètement ces sources d'énergie, réduisant ainsi les émissions de gaz à effet de serre et la production de déchets nucléaires.

Un chauffe-eau solaire se compose généralement de trois équipements principaux :

1. Un panneau thermique, qui capte l'énergie solaire et est généralement installé sur le toit.
2. Un réservoir, qui stocke l'eau chaude produite par les capteurs solaires.
3. Les accessoires nécessaires pour transférer l'énergie entre le panneau thermique et le réservoir, tels que des conduites, des vannes et des régulateurs de température.

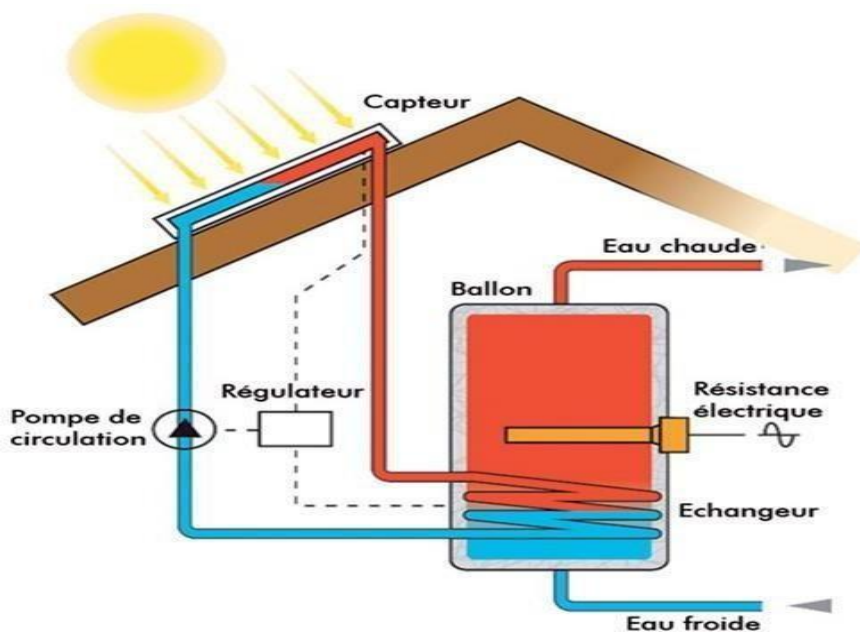


Figure I. 6 : Fonctionnement d'un chauffe-eau solaire. [11]

I.13 Les Capteurs Solaires

Les capteurs solaires sont des dispositifs permettant de transformer l'énergie du rayonnement solaire en énergie thermique. Cette chaleur produite peut ensuite être utilisée de la même manière que celle provenant de sources conventionnelles de chaleur.

Il existe principalement deux types de capteurs solaires :

1. Capteur Solaire Photovoltaïque
2. Capteur Solaire Thermique

I.14 Capteurs Solaires Photovoltaïques :

Les capteurs solaires photovoltaïques sont des dispositifs permettant de transformer l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique. Ils sont constitués de cellules photovoltaïques qui captent les photons du Soleil et les convertissent directement en courant électrique [12].

I.15 Capteurs Solaires Thermiques :

Les capteurs solaires thermiques sont des appareils qui permettent de convertir l'énergie du rayonnement solaire en énergie thermique. Cette conversion repose sur l'effet de serre, qui se produit lorsque le verre, transparent au rayonnement solaire, est presque opaque au rayonnement infrarouge. Ainsi, un flux solaire traversant une vitre chauffe un corps situé derrière cette vitre, et la chaleur émise par ce corps ne peut pas traverser la vitre, créant un effet de piégeage thermique [13].

Il existe plusieurs types de capteurs solaires thermiques, notamment :

- Capteurs Plans
 - Capteurs Plans Vitrés
 - Capteurs Plans Non Vitrés
- Capteurs à Haute Performance

Chapitre I : Généralités sur les Capteurs d'Énergie Solaire

Les capteurs plans absorbent le rayonnement solaire au moyen d'une plaque peinte en noir, sur laquelle sont fixées des fines conduites destinées à transporter le fluide caloporteur. Lorsque ce fluide traverse les conduites, sa température (qu'il soit liquide ou gazeux) augmente en raison de la chaleur reçue par la plaque absorbante [14].

On distingue deux types de capteurs plans :

- **Capteurs Plans Vitrés :**
L'absorbeur métallique dans ces capteurs transforme le rayonnement solaire en chaleur et transfère cette chaleur à un fluide caloporteur. L'absorbeur est généralement en métal (cuivre ou aluminium), et il est placé dans un caisson isolé à l'arrière et vitré à l'avant. Le vitrage joue un rôle crucial en retenant le rayonnement solaire, créant ainsi un effet de serre qui augmente l'efficacité du capteur. Ce type de capteur est couramment utilisé pour la production d'eau chaude sanitaire (ECS), en particulier lorsque les températures varient entre 35°C et 90°C [15].
 - **Capteurs Plans Non Vitrés :**
Ces capteurs sont souvent utilisés pour des applications où la température nécessaire est moins élevée, comme le chauffage des piscines ou la production d'eau chaude dans des environnements moins exigeants.
- **Capteurs à Haute Performance :**

Les capteurs à haute performance sont conçus pour maximiser l'efficacité de la conversion de l'énergie solaire en chaleur, même dans des conditions difficiles, en minimisant les pertes thermiques et en utilisant des matériaux de haute qualité pour l'absorbeur et l'isolation.

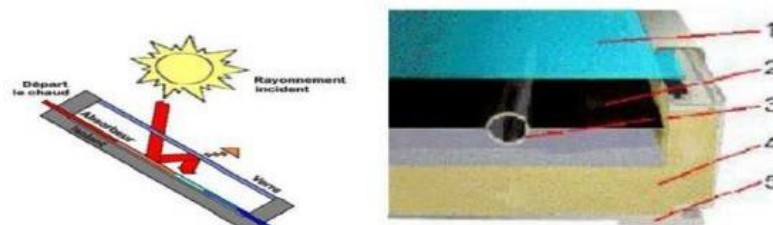


Figure I. 7 : capteurs à haute performance

1. Un ou plusieurs couvertures transparentes
2. Une plaque absorbante
3. Un circuit hydraulique pour l'évacuation du fluide
4. Une isolation thermique
5. Un bac portant

I.16 Les Capteurs par Concentration :

Les capteurs par concentration utilisent des surfaces réfléchissantes (miroirs) paraboliques ou cylindroparaboliques pour concentrer les rayons solaires respectivement dans le foyer ponctuel ou dans le foyer linéaire de ces surfaces. Les récepteurs (absorbeurs), qui captent la chaleur solaire ainsi concentrée, sont situés dans ces foyers.

Il s'agit de réflecteurs en demi-cercle qui renvoient et concentrent l'énergie solaire sur un tuyau dans lequel circule un fluide caloporteur [16].

I.16.1 Capteur Parabolique :

Les capteurs paraboliques fonctionnent de manière autonome, en suivant le soleil tout au long de la journée. Ils permettent de concentrer le rayonnement solaire sur le foyer de la parabole réfléchissante, maximisant ainsi l'efficacité du captage de l'énergie solaire.

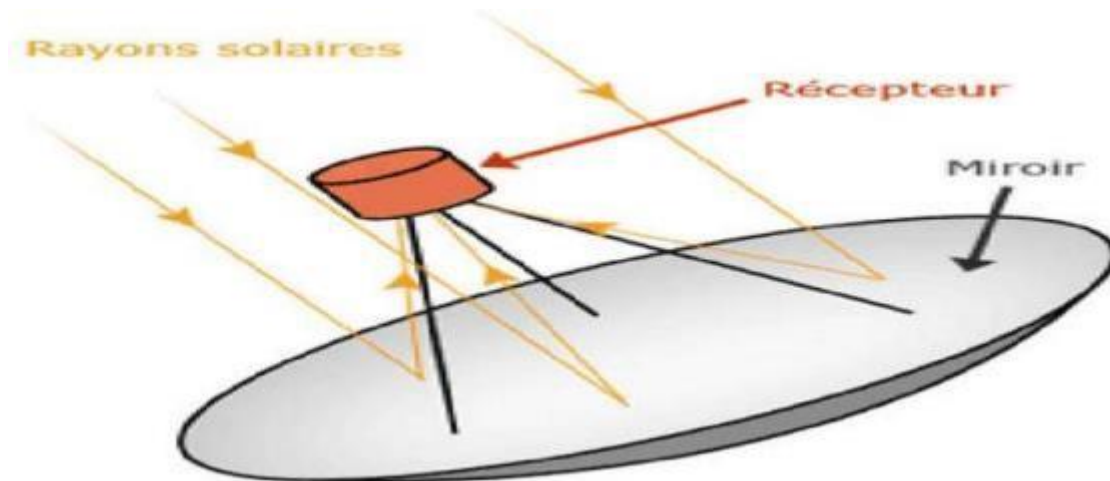


Figure I. 8 : principe de fonctionnement du concentrateur parabolique

I.17 Applications des Capteurs Solaires

I.17.1 Chauffage et Climatisation des Habitants :

L'utilisation des capteurs solaires pour le chauffage et la climatisation consiste à chauffer le fluide dans le capteur solaire, et l'air ainsi chauffé est ensuite véhiculé par un ventilateur vers les points d'utilisation [17].

I.17.2 Le Séchage :

Les capteurs solaires à air sont utilisés pour le séchage de divers produits agricoles tels que le thé, le café, les fruits, les fèves, le riz, les épices, le caoutchouc, le cacao et le bois [18].

I.18 Principe de Fonctionnement des Capteurs Solaires :

Le rôle d'un capteur solaire thermique est de transformer le rayonnement solaire qu'il reçoit en énergie calorifique utilisable. Ce processus se fait généralement à travers l'utilisation d'un fluide caloporteur (comme de l'eau ou de l'air). Le rayonnement solaire est capté par la surface absorbante du capteur, et un fluide caloporteur absorbe et véhicule une partie de l'énergie captée par l'absorbeur [19].

I.19 Conclusion :

L'étude du rayonnement solaire est essentielle pour le choix du meilleur site destiné à l'installation d'un système de captation solaire. La quantité de rayonnement reçue par un capteur solaire dépend principalement du niveau d'ensoleillement du site ainsi que de son orientation par rapport au soleil.

Chapitre II : Contexte scientifique et technique des Concentrateurs Cylindro- Paraboliques

Chapitre II : Contexte scientifique et technique des Concentrateurs Cylindro-Paraboliques

II.1 Introduction

Les capteurs cylindro-paraboliques sont une technologie de concentration solaire utilisée principalement dans les systèmes thermiques à haute température. Ils se composent de miroirs courbés en forme de cylindre parabolique qui concentrent le rayonnement solaire sur un récepteur linéaire (généralement un tube placé au foyer de la parabole). Un fluide caloporteur circule à l'intérieur de ce tube et absorbe l'énergie thermique concentrée, permettant ainsi de produire de la chaleur à haute température, utilisée notamment pour la production d'électricité dans les centrales solaires thermodynamiques.

II.2 Historique des Concentrateurs Cylindro-Paraboliques

En 1880, l'ingénieur John Ericsson construisit le premier collecteur parabolique connu, qu'il utilisa pour alimenter un moteur pneumatique fonctionnant à la chaleur solaire. Plus tard, en 1907, les ingénieurs allemands Wilhelm Meier et Adolf Remshardt obtinrent le premier brevet relatif à la technologie des cuvettes paraboliques, visant principalement à la génération de vapeur [20].

En 1913, l'ingénieur anglais F. Shuman et l'américain C.V. mirent en place une usine de pompage solaire d'une puissance de 45 kW à Meadi, en Égypte, destinée à l'irrigation. Cette installation exploitait l'énergie solaire captée par des collecteurs à auge parabolique pour produire de la vapeur, utilisée ensuite pour faire fonctionner des moteurs à vapeur entraînant les pompes hydrauliques. Les collecteurs paraboliques avaient une longueur de 62 mètres et une largeur d'ouverture de 4 mètres, avec une surface d'ouverture totale de 1 200 m² [21]. Ce système était capable de pomper jusqu'à 27 000 litres d'eau par minute [22].

Malgré le succès technologique de cette centrale, elle fut fermée en 1915, en raison du déclenchement de la Première Guerre mondiale, mais aussi à cause de la baisse des prix des combustibles fossiles, qui rendit les technologies de combustion plus rentables à cette époque.

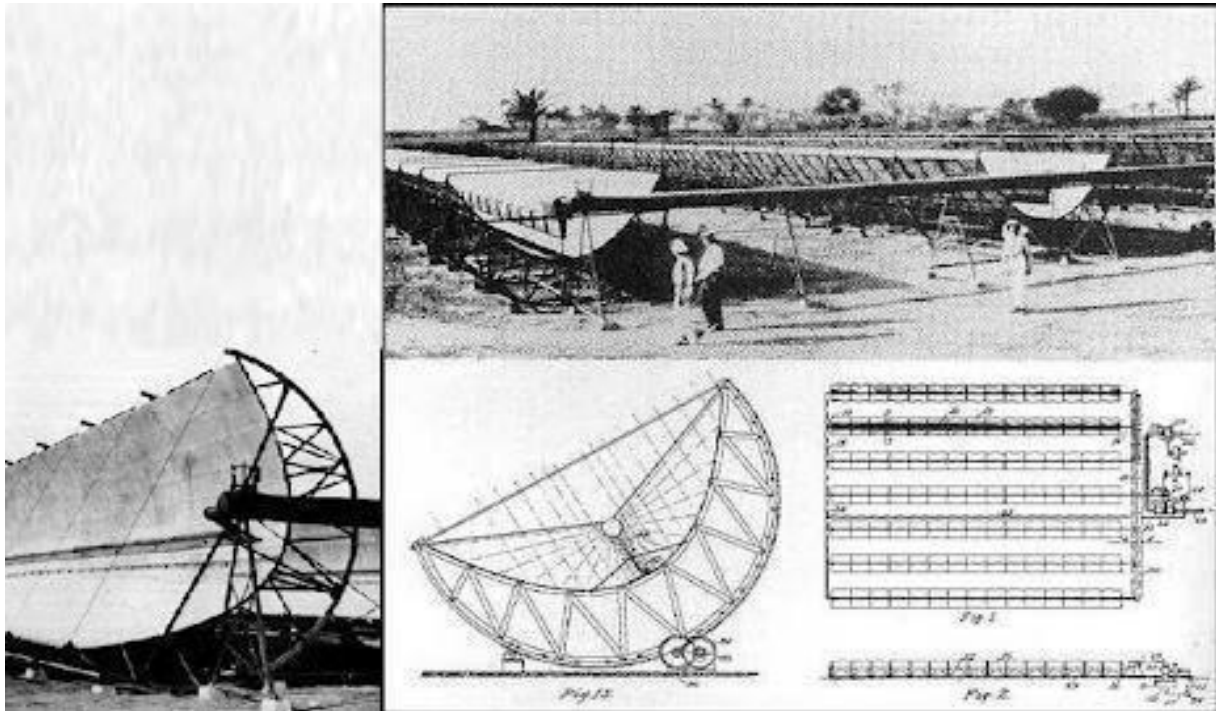


Figure II. 1 : Application collecteur parabolique en Egypte construit en 1913 (source : Ragheb 2011)

II.3 Capteur Cylindro-Parabolique

Le capteur cylindro-parabolique est un type de capteur solaire à concentration fonctionnant avec un foyer linéaire. Il utilise un réflecteur cylindrique de section parabolique pour concentrer le rayonnement solaire. Les miroirs cylindro-paraboliques sont alignés de manière à focaliser l'énergie solaire le long d'une ligne où se trouve un tube absorbeur. À l'intérieur de ce tube, circule un fluide caloporteur qui absorbe l'énergie thermique concentrée. Le fluide traverse ainsi l'ensemble du champ de capteurs en suivant le trajet imposé par la structure [23].

II.4 Description du Concentrateur :

Le concentrateur cylindro-parabolique (CCP) se distingue par sa simplicité de conception. Il se présente sous la forme d'un module composé d'un réflecteur de forme parabolique, disposé de manière cylindrique. Cette géométrie permet de focaliser le rayonnement solaire incident le long d'une génératrice linéaire, où est installé un tube absorbeur. Ce dernier contient le fluide caloporteur chargé de transporter l'énergie thermique.

Pour maximiser la captation, le CCP est généralement équipé d'un système de poursuite solaire (tracking), permettant d'ajuster l'inclinaison du réflecteur afin que le rayonnement

solaire reste perpendiculaire au plan d'ouverture du concentrateur tout au long de la journée (Marif et al., 2011)[24].

II.5 La Concentration Solaire :

Le taux de concentration solaire est un paramètre clé, exprimant la quantité d'énergie que le collecteur est capable de concentrer. On distingue généralement deux types de concentration :

- Concentration géométrique : rapport entre la surface d'ouverture du collecteur et la surface de l'absorbeur.
- Concentration optique (ou en flux) : rapport entre le flux lumineux concentré et le flux incident direct sur le collecteur.

Ces paramètres permettent d'évaluer l'efficacité énergétique du système de concentration.

II.6 Classification des systèmes à concentration :

Il existe plusieurs types de concentrateurs et ils continuent de susciter l'intérêt des chercheurs. Plusieurs critères peuvent être utilisés pour distinguer les différents concentrateurs :

- Les caractéristiques optiques : permettent de différencier les systèmes imageants et les systèmes non imageants.
 - À miroirs
 - À lentilles.
- Le rapport de concentration C détermine les températures opératoires.
On peut distinguer:

Les faibles concentrations ($1 < C < 10$, $T \sim 150^\circ\text{C}$)

- Les moyennes concentrations ($10 < C < 100$, $T \sim 300^\circ\text{C}$)
- Les fortes concentrations ($C > 100$; $T > 500^\circ\text{C}$)

- Les caractéristiques géométriques. Nous distinguons :
 - À une dimension.

- À deux dimensions.
 - À trois dimensions
- Les modes de pointage. Les concentrateurs peuvent être :
- fixes ou périodiquement orientés
 - mobiles autour d'un axe
 - mobiles autour de deux axes
- les positions relatives de l'absorbeur et du concentrateur selon que l'un est mobile par rapport à l'autre ou que les deux sont solidaires.

II.7 Nécessité de la concentration

Les capteurs plans ne permettent pas, en général, de dépasser 130°C au niveau de la surface absorbante. Cette température peu élevée constitue une limite au rendement thermodynamique des systèmes qui les utilisent. Il faut une surface de 50 m² par kW, et ces capteurs ne sont pas adaptés à la production de fortes puissances. Et d'après le cycle théorique de Carnot, pour augmenter le rendement, il faut élever la température de la source chaude, et par conséquent, concentrer le rayonnement solaire [25].

II.8 Principe de concentration :

Les rayons incidents atteignent la surface réceptrice du concentrateur qui est réfléchissante, qui sont ensuite réfléchis vers une surface réceptrice plus petite qui se trouve en son point focal, cette concentration permet d'accroître l'intensité du flux solaire. L'énergie ainsi concentrée est transmise à un fluide caloporteur pour augmenter sa température et qui sera ensuite utilisé dans les différents procédés. Les concentrateurs solaires permettent de diminuer la surface de réception, par conséquent, réduire les pertes thermiques, ce qui implique une température élevée. Pratique l'énergie rayonnée de façon diffuse ne peut pas être concentré. Une orientation permanente et précise de ces capteurs s'avère nécessaire pour obtenir un bon rendement. Un système de captation de l'énergie solaire avec concentration sera donc le plus souvent un système dynamique contrairement aux capteurs plans d'où nécessité d'un mécanisme d'orientation.

Cependant, plusieurs technologies sont utilisées pour la concentration du rayonnement solaire.

Les systèmes à concentration les plus importants pour l'application à grande échelle de l'énergie solaire sont :

- Concentrateurs paraboliques.
- Concentrateurs cylindro-parabolique.
- Centrale solaire à tour.
- Centrale solaire miroir de Fresnel.

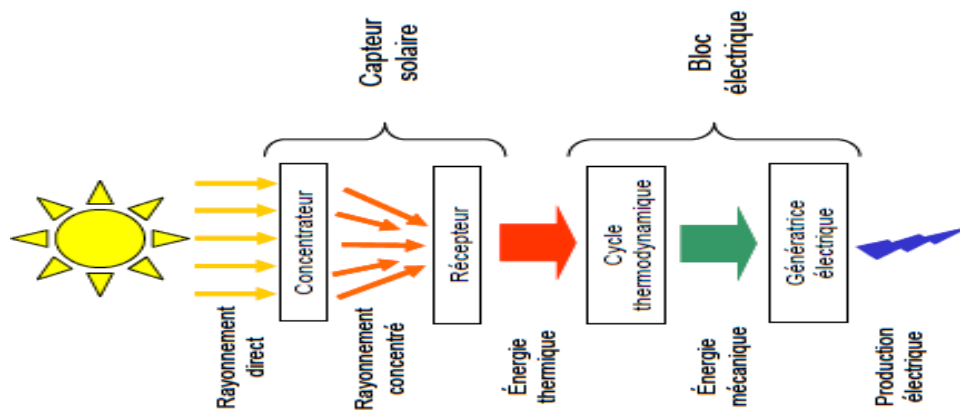


Figure II. 2 : Schéma du Principe de fonctionnement d'une centrale CSP

II.9 Concentrateurs cylindro-parabolique :

II.9.1 Les composants d'un concentrateur cylindro parabolique :

Afin d'augmenter la concentration du rayonnement au niveau de l'absorbeur, la conception d'un collecteur avec effet de concentration, nécessite des techniques plus au moins complexes dont le principe consiste à focaliser le rayonnement incident sur un absorbeur de surface réduite

Les différentes parties du CCP sont les suivantes :

- Structure support
- Moteurs
- Contrôleurs (boucles ouvertes ou fermées)
- Miroir (verre épais, mince)
- Tube absorbeur (sélectif, sous vide, connectique)
- Suivi solaire

Les composants principaux qui caractérisent le fonctionnement d'un cylindro parabolique sont comme suit [26] :

- **Le réflecteur parabolique(les miroirs) :**

Les miroirs sont composés de verre pauvre en fer, dont la transmittivité 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 d'un capteur cylindro parabolique est égale environs 80%.

- **Le tube absorbeur :**

Souvent en cuivre, le tube absorbeur est entouré d'une enveloppe transparente en verre, il est placé le long de la ligne focale du concentrateur et doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Bonne absorption du rayonnement : son coefficient d'absorption doit être plus élevé possible afin d'éviter toute perte de rayonnement à cette étape.
- Pertes thermiques limitées : vu que la température du tube dépasse généralement 400°C et afin de limiter les pertes par échanges convectifs et radiatif, le tube est entouré d'une enveloppe de verre sous vide.

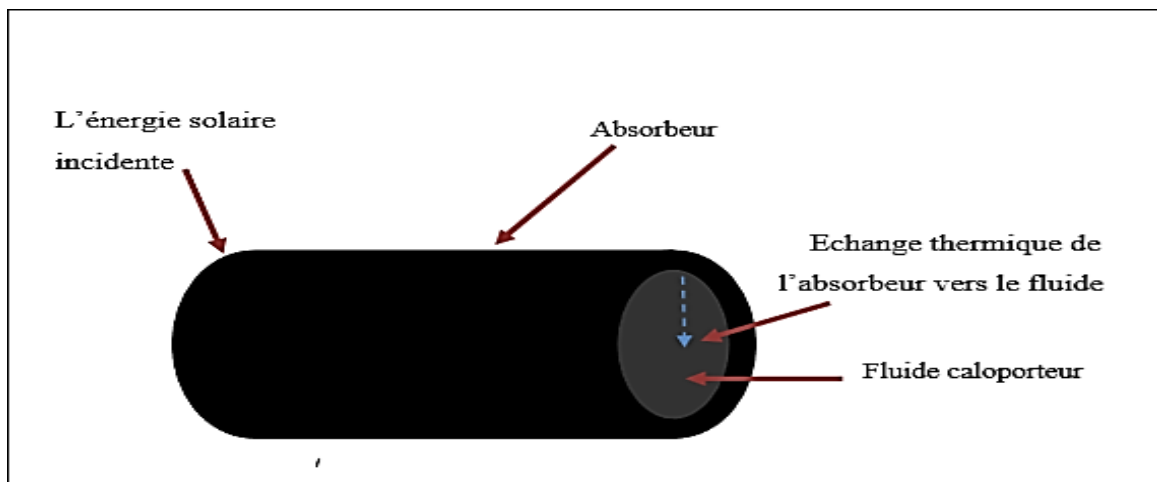


Figure II. 3 : Schéma d'un tube absorbeur [27]

- **Les fluides caloporteurs :**

Le fluide caloporteur a pour rôle d'accumuler l'énergie thermique dans les collecteurs et de la transporter au réservoir d'alimentation, les critères de sélection du fluide doivent répondre à certaines exigences :

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

Parmi les différents types de fluides caloporteur nous pouvons citer :

- a. **Les huiles :**

Ce sont des fluides monophasiques qui présentent un bon coefficient d'échange. Leurs gammes de température sont limitées à environ 400°C. C'est le fluide le plus couramment employé dans les centrales à collecteurs cylindro-paraboliques.

b. Les sels fondus :

A base de nitrates de sodium et de potassium ils offrent un bon coefficient d'échange et possèdent une densité élevée, ils sont donc également de très bons fluides de stockage. Leur température de

sortie peut atteindre 650 °C. Leurs associations avec un concentrateur à tour et un cycle de Rankine constitue une combinaison déjà approuvée.

c. Les gaz :

L'hydrogène ou l'hélium peuvent être utilisés comme fluides thermodynamiques et entrainer les moteurs Stirling qui sont associés aux collecteurs paraboliques. L'air Peut aussi être utilisé comme fluide caloporteur ou comme fluide thermodynamique comme dans les turbines à gaz.

d. L'eau liquide :

C'est a priori le fluide de transfert idéal. Il offre un excellent coefficient d'échange et possède une forte capacité thermique. En outre, l'eau peut être utilisée directement comme fluide thermodynamique dans un cycle de Rankine. Cependant son utilisation implique de travailler à des pressions très élevées dans les récepteurs en raison des hautes températures atteintes, ce qui pose problème pour les technologies cylindro-paraboliques.

e. Les fluides organiques :

(Butane, propane, etc.) possèdent une température d'évaporation relativement basse et sont utilisés comme fluide thermodynamique dans un cycle de Rankine.

II.9.2 Le système de poursuite solaire :

Son rôle est d'adapter l'orientation du capteur de manière à ce que le rayonnement solaire incident soit toujours parallèle au plan de la ligne focale du concentrateur cylindro-parabolique. De cette manière, le rayonnement incident est réfléchi au foyer de la parabole et concentré sur un tube récepteur dans lequel circule le fluide caloporteur.

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

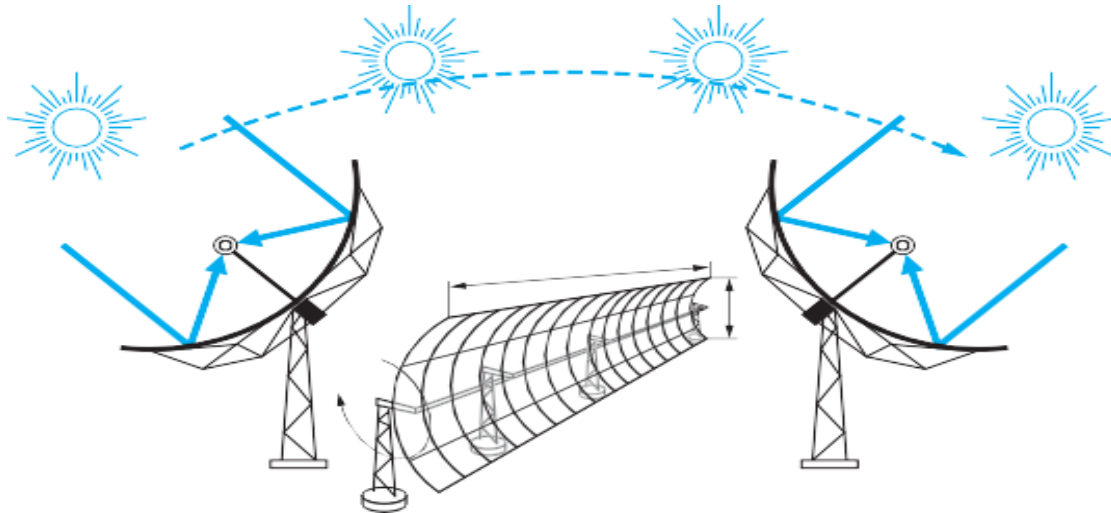


Figure II. 4 : Système horizontal de poursuite solaire Est-Ouest

II.9.3 Les avantages :

- Peu de mouvement mécanique par rapports aux autres centrales à chaleur.
- Moins onéreux que la concentration par miroir et les paraboles Stirling.
- Bon rendement.

II.9.4 Les inconvénients :

- Ne convient pas à de petites installations.
- L'énergie change de forme à de nombreuses reprises : risques de perte d'énergie.
- Toujours plus cher par watt comparativement aux photovoltaïques classiques.



Figure II. 5 : Concentrateur cylindro parabolique

II.10 Etat de l'art

L'optimisation des performances des collecteurs cylindro-paraboliques (CCP) suscite un intérêt scientifique croissant, notamment en ce qui concerne l'amélioration des réflecteurs, qui sont essentiels pour garantir une efficacité optique maximale du système. Ces réflecteurs concentrent le rayonnement solaire direct sur le tube absorbeur placé au foyer de la parabole, permettant ainsi d'atteindre des températures élevées pour des applications liées à la production d'énergie ou à l'usage industriel de la chaleur. Les recherches récentes se sont focalisées sur l'amélioration des propriétés optiques des matériaux utilisés pour ces réflecteurs, en particulier leur pouvoir réfléchissant, leur résistance aux agressions environnementales, ainsi que leur durabilité. Les matériaux classiques, tels que les miroirs en verre argenté, restent largement employés grâce à leur forte réflectivité ($> 93\%$) et leur stabilité thermique, bien qu'ils soient limités par leur fragilité et leur poids élevé (Chen et al., 2021[28] ; Zhang et al., 2022[29] ; Turchi et al., 2020)[30]. Des alternatives plus légères, comme les films polymères multicouches aluminisés, ont été développées et offrent une bonne performance optique à un coût réduit (Reddy et al., 2021[31] ; Liao et al., 2023[32] ; Mallick et al., 2020)[33]. Toutefois, ces matériaux posent encore des problèmes de durabilité

face aux rayons UV, à l'humidité, à l'abrasion et à la salissure (Zhang et al., 2021[34] ; Huang et al., 2023)[35].

Pour pallier ces limitations, des revêtements protecteurs autonettoyants et anticorrosion sont en cours de mise au point afin de prolonger la durée de vie des réflecteurs (Ben Salah et al., 2022[36] ; Gao et al., 2022[37] ; Liang et al., 2021)[38]. Parallèlement, l'introduction de réflecteurs secondaires ou de concentrateurs à double réflexion, comme les concentrateurs paraboliques composés (CPC), a permis de réduire les pertes optiques causées par la variabilité de l'angle d'incidence solaire, améliorant ainsi l'efficacité de la collecte (Li et al., 2023[39] ; Mekhilef et al., 2020[40] ; Ben Salah et al., 2022)[41]. L'optimisation des géométries de réflecteurs a été rendue possible grâce à des analyses numériques utilisant la méthode du ray-tracing et des logiciels spécialisés tels que SolTrace, COMSOL ou TracePro, qui permettent aussi de corriger les erreurs d'alignement et d'évaluer l'impact des défauts optiques sur le rendement global (Chen et al., 2024[42] ; Liu et al., 2022[43] ; Said et al., 2020)[44]. Des essais expérimentaux sur bancs d'essai solaires ont confirmé que des réflecteurs très performants (> 95 %) peuvent améliorer le rendement thermique de 5 à 12 %, selon les configurations (Huang et al., 2023[45] ; Faghri et al., 2020[46] ; Xu et al., 2022)[47].

En outre, la maintenance des performances dans des environnements poussiéreux passe par des systèmes de nettoyage automatisé, qu'ils soient pneumatiques, électrostatiques ou utilisant des surfaces hydrophobes (Rojas et al., 2022[48] ; Kim et al., 2020[49] ; Alami et al., 2021)[50]. Les effets des conditions ambiantes — température, vent, irradiance diffuse — sont également pris en compte dans les modèles thermiques couplés, afin de mieux adapter les systèmes aux divers contextes climatiques (Tian et al., 2023[51] ; Medina et al., 2022[52] ; Gharbi et al., 2021)[53]. Enfin, des recherches prospectives portent sur l'intégration de réflecteurs adaptatifs, élaborés à partir de matériaux électrochromes ou à mémoire de forme, capables de modifier leur géométrie ou leur réflectivité selon l'intensité solaire, ouvrant ainsi la voie à une régulation dynamique du flux solaire (Wang et al., 2023[54] ; Akhmedov et al., 2022[55] ; Joubert et al., 2021)[56]. En somme, les réflecteurs jouent un rôle crucial dans l'efficacité des CCP, et les progrès dans les matériaux, la modélisation optique et l'ingénierie structurelle permettent d'envisager une nouvelle génération de concentrateurs solaires plus performants, durables et adaptés aux conditions climatiques variées.

II.11 Conclusion

Les capteurs cylindro-paraboliques représentent une solution technologique avancée pour la conversion de l'énergie solaire en chaleur à haute température. Grâce à leur capacité à concentrer le rayonnement solaire de manière linéaire, ils offrent un rendement élevé, particulièrement adapté aux applications industrielles et à la production d'électricité. Leur conception, alliant précision optique et efficacité thermique, en fait un choix privilégié dans le développement des centrales solaires thermodynamiques, notamment dans les régions fortement ensoleillées.

Chapitre III : Modélisation Optique et Thermique des Concentrateurs Cylindro- Paraboliques

Chapitre III : Modélisation Optique et Thermique des Concentrateurs Cylindro-Paraboliques

III.1 Introduction

Ce chapitre traite de la modélisation optique et thermique des collecteurs cylindro-paraboliques. Nous y présentons les principes de concentration du rayonnement solaire, les pertes optiques, ainsi que les mécanismes de transfert thermique dans le tube absorbeur. Cette modélisation permet d'évaluer le rendement du système et d'identifier les facteurs influençant ses performances.

III.2 Bilan optique

Le facteur d'interception y est le facteur optique le plus compliqué dans le calcul de la performance optique. Il représente le rapport entre l'énergie interceptée par l'absorbeur et celle réfléchi par les surfaces réfléchissantes. Il traduit le fait que certains rayons solaire peuvent être renvoyés vers l'extérieur ou bien passer à côté de l'absorbeur lorsque les surfaces optiques présentent des défauts ou des irrégularités et lorsque l'absorbeur est mal positionné dans le plan focal. Si on utilise les paramètres d'erreurs universelles appliquées pour toutes les géométries du collecteur, le facteur d'interception y est donné par l'équation générale suivante[39] :

$$Y = \frac{1 + \cos\varphi}{2\cos\varphi} \int_0^\varphi \operatorname{erf} \frac{\sin(1 + \cos\varphi)(1 - 2d'x \sin\varphi) - \pi\beta'(1 + \cos\varphi)}{\sqrt{2\pi(1 + \cos\varphi)}} \operatorname{erf} \frac{\sin(1 + \cos\varphi)(1 - 2d'x \sin\varphi) - \pi\beta'(1 + \cos\varphi)}{\sqrt{2\pi(1 + \cos\varphi)}} \frac{d\varphi}{1 + \cos\varphi}$$

φ : L'angle d'ouverture.

III.3 Bilan thermique

En pratique, Le flux solaire ainsi que toutes les variables climatiques sont en évolution permanente, aussi l'étude (qui n'est pas la nôtre) sera menée en régime transitoire. Avant de dresser le bilan thermique au niveau de tous les composants du concentrateur cylindro-parabolique nous rappellerons que l'inertie thermique est le stockage d'énergie dans un volume. Elle correspond à l'augmentation de son énergie interne et a pour expression [39]:

$$M_i \times c_{p_i} \times dT_i / dt$$

Cette énergie stockée est donnée par la relation :

$$M_i \times c_{p_i} \times dT_i / dt = \sum q_i + p_i$$

Avec q_i et p_i respectivement les différents échanges thermiques et le terme de source.

Le bilan thermique d'un collecteur a généralement pour expression :

$$q^* = q_u + q_a + q_t$$

q^* : Energie absorbée par le recepneur.

: Puissance utile qui permet de réchauffer le fluide caloporteur.

: Énergie perdue vers l'environnement.

: Énergie qui dépend de l'inertie thermique de l'installation .

- En régime permanent $q_t = 0$

En régime transitoire $q_t = \sum m_i \times C_{pi} \times dT_i / dt$

Avec : q_t : Puissance provenant du réchauffement du recepneur(absorbeur).

III.3.1 Bilan thermique (vitre paroi extérieure) :

La paroi extérieure de la vitre échange de la chaleur avec :

- La paroi intérieure par conduction.
- L'environnement par convection.
- Le ciel par rayonnement.

Ces échanges ont pour expression :

$$M_v \times C_{pv} \times dt_{vE} / 2dT = q_{cond} \cdot V - q_{conv} \cdot V - q_{ray} \cdot v_{-c} + P_v / 2$$

III.3.2 Bilan thermique (vitre paroi intérieure) :

La paroi intérieure de la vitre échange de la chaleur avec :

- La paroi extérieure par conduction.
- L'absorbeur par convection et rayonnement.

Ces échanges sont exprimés par :

$$M_v \times c_{pv} \times dt_{vi} / 2dT = q_{cond} \cdot V + q_{conv} \cdot V_{-ab} + q_{ray} \cdot v_{-ab} + P_v / 2$$

III.3.3 Bilan thermique (tube absorbeur) :

L'absorbeur échange de la chaleur avec :

- La vitre paroi intérieure par convection et par rayonnement.

- Le fluide caloporteur par convection.

Ces échanges sont donnés par la relation :

$$M_{ab} \times C_{pab} \times dT_{ab}/dt = -q_{conv, ab-v} - q_{conv, ab-f} - q_{ray, ab-v} + P_{ab}$$

Bilan thermique (fluide caloporteur)

Le fluide caloporteur échange de la chaleur avec l'absorbeur par convection [40] :

$$m_f \times C_{pf} \times (T_{fs} - T_{fe}) = q_{conv, ab-f}$$

III.4 Performances thermiques d'un concentrateur cylindro parabolique :

On pourra calculer la puissance gagnée au collecteur (F_R), en connaissant les valeurs des grandeurs (F_R) et (U_L) [41].

Coefficient des pertes thermiques U_L (tube couvert) :

Dans le cas où l'absorbeur est couvert d'un tube de verre de surface (A_c), le coefficient d'irradiation entre le couvert et l'absorbeur est différent du coefficient entre l'absorbeur et le couvert, qui est généralement négligeable.

III.5 Puissance utile ☒☒

La puissance utile, représentée par la puissance récupérée par le collecteur au niveau du foyer, peut être déterminée par l'expression suivante.

$$Q_u = F_R \times [\rho \cdot \tau \cdot \gamma \cdot A_0 - U_L \cdot A_r \times (T_e - T_a)]$$

Température de sortie du fluide caloporteur T_s Pour calculer la température de sortie, l'équation suivante a été utilisée ; [41] :

$$\eta = \eta_{opt} + \eta_{th} / \eta_{opt}$$

III.6 Rendement global du concentrateur solaire η :

Pour la détermination du rendement global du concentrateur, l'expression suivante a été utilisée. [42]

$$\eta = Q_u / E \times A_0 \times \gamma$$

III.7 Ombrage et pertes des extrémités

Ombrage

La disposition des rangées de cylindro-parabolique en parallèle engendre des pertes à cause de l'ombrage de ces dernières. Un espacement de 13 à 15 mètres est laissé entre ces dernières. Au lever du soleil, tous les capteurs sont orientés vers l'Est. La première rangée de capteurs intercepte la totalité du rayonnement solaire, tandis que les autres rangées restent ombrées. Au fur et à mesure que le soleil prend de l'altitude et les capteurs suivent la trajectoire du soleil, l'ombrage diminue progressivement sur les autres rangées jusqu'au midi solaire où l'ombrage est nul sur toutes les rangées du champ

solaire. La figure montre la poursuite des collecteurs solaire au soleil et l'ombrage causé par les rangées de ces derniers.

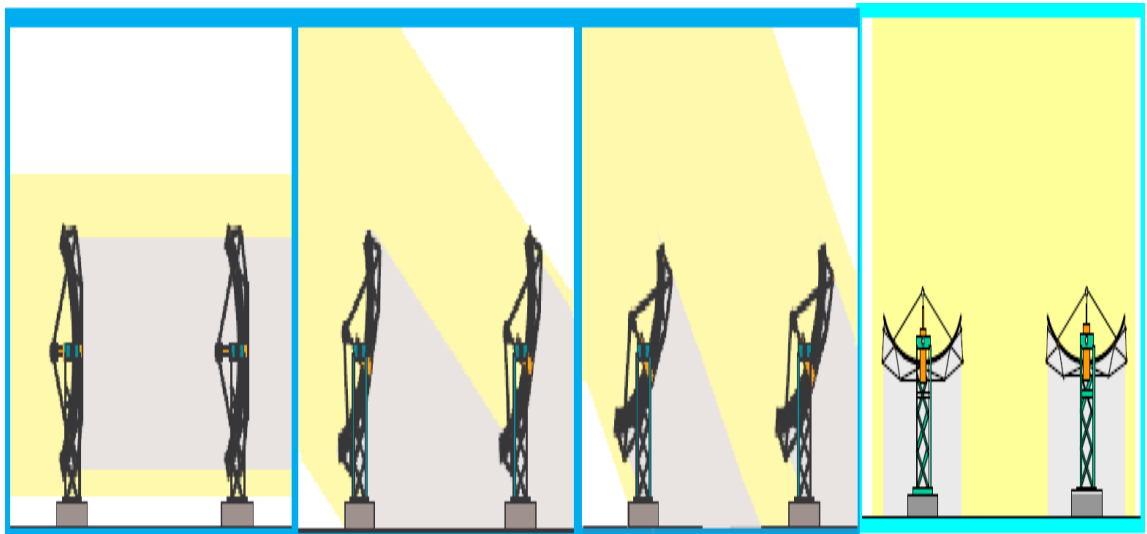


Figure III. 1 : Illustration de l'ombrage des collecteurs [43]

L'ombrage dû aux rangées de collecteurs diminue les performances du champ solaire par la diminution de la quantité d'énergie reçue par les collecteurs. La largeur du miroir réfléchissant qui reçoit le rayonnement incident (partie du miroir qui n'est pas ombrée) est appelée largeur de miroir effective. Le facteur d'ombrage est le rapport de la largeur effective du miroir sur la largeur réelle de ce dernier. Le facteur d'ombrage peut être calculé par la relation suivante [43]:

$$F_o = W_{eff}/W = ER/W \cos(\theta_z)/\cos(\theta)$$

Où :

F_o : facteur d'ombrage.

W_{eff} : largeur effective de l'ouverture du miroir.

W : largeur réelle de l'ouverture du collecteur.

ER : espacement entre les rangées de collecteurs.

III.8 Pertes aux extrémités du récepteur :

Pour un angle d'incidence différent de 0, il y a une partie du récepteur qui n'est pas illuminée par le rayonnement solaire comme le montre la figure

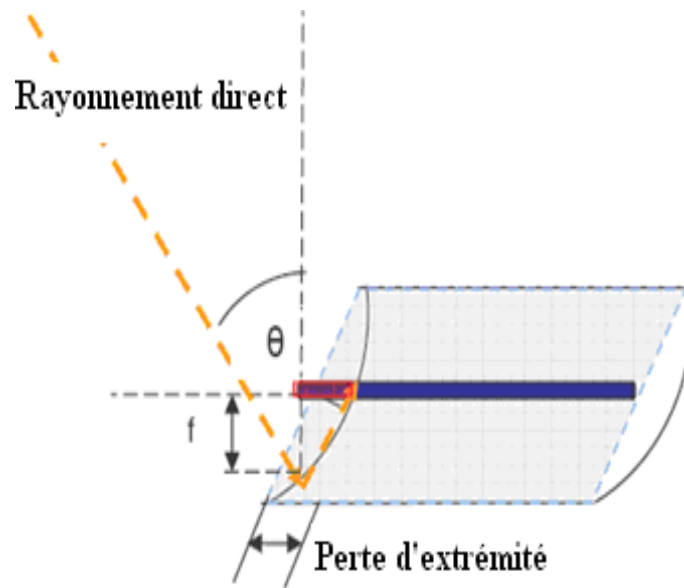


Figure III. 2 : Pertes aux extrémités du récepteur [44]

L'équation qui permet de calculer ces pertes est la suivante

$$M = 1 - f \cdot \tan(\theta) / L_c$$

Où :

M : coefficient de perte aux extrémités.

f : longueur focale du collecteur.

Lc : longueur du collecteur.

III.9 Conclusion

La modélisation développée dans ce chapitre a permis de mieux comprendre le fonctionnement optique et thermique des concentrateurs cylindro-paraboliques. Elle constitue une base essentielle pour analyser l'impact des nanoparticules sur les performances thermiques, qui sera abordé dans le chapitre suivant.

Chapitre IV : Interprétation et Discussion des Résultats Obtenus

Chapitre IV : Interprétation et Discussion des Résultats Obtenus

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous appliquerons des méthodes numériques, à l'aide du logiciel Fluent. L'étude portera sur une configuration de PTC intégrant un second réflecteur ainsi que sur l'utilisation de nanofluides. Nous analyserons l'impact de l'ajout de nanoparticules au fluide de base en considérant différents types de nanoparticules, et leur influence sur les performances thermiques du PTC. Seront également présentés les profils d'irradiation, les distributions de température, les gains thermiques ainsi que les rendements thermiques. L'objectif principal est d'évaluer dans quelle mesure les nanofluides peuvent améliorer le transfert thermique.

IV.2 Matériaux et Méthodes

IV.2.1 Spécifications de conception

La Figure IV.1 représente le système de référence de base. Le réflecteur principal couvre une surface de 1 mètre sur 1 mètre, tandis que le tube absorbeur mesure 1 mètre de long avec un diamètre intérieur de 0,008 mètre. Le Tableau IV.1 décrit les paramètres géométriques du système PTC de référence, et le Tableau IV.2 en présente les caractéristiques optiques.

Un réflecteur secondaire, illustré dans la Figure IV.2, peut être ajouté au système. Toutefois, ses dimensions — notamment l'ouverture (D) et la profondeur (P) — doivent être déterminées. En général, ce réflecteur secondaire est constitué d'une plaque rectangulaire plate de longueur L , ajustée en fonction des dimensions de la parabole.

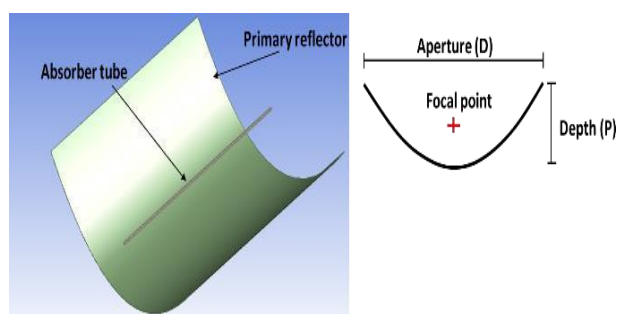


Figure IV. 1 : Schéma d'un PTC simple

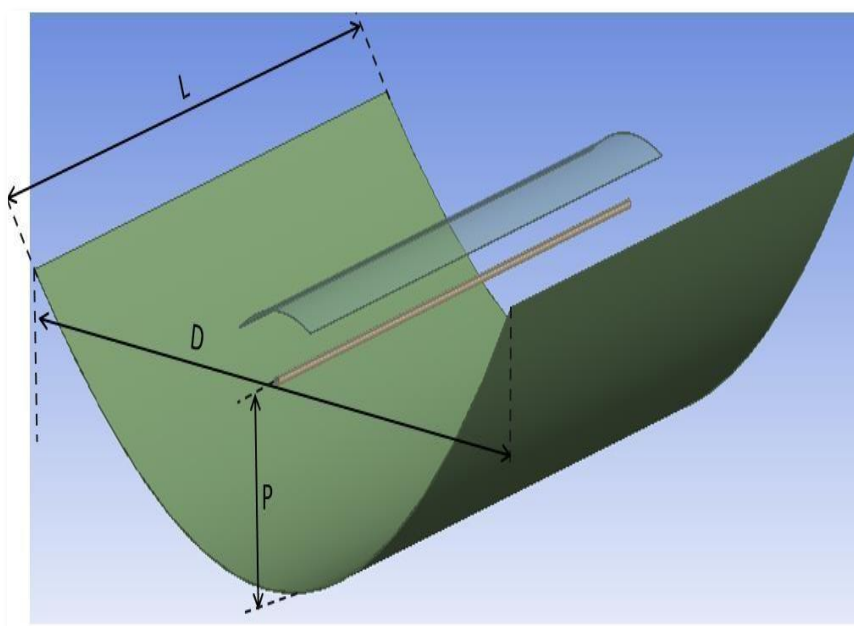


Figure IV. 2 : Schéma d'un PTC avec Réflecteur Secondaire

Tableau IV. 1 : Paramètres géométriques du système PTC de référence

| Concentrateur Parabolique et Tube Récepteur | Valeur |
|---|----------|
| Ouverture du Collecteur (Diamètre) | 1 m |
| Longueur du Collecteur | 1 m |
| Distance Focale du Collecteur | 0.2083 m |
| Diamètre Intérieur du Tube Absorbeur | 0.008 m |
| Diamètre Extérieur du Tube Absorbeur | 0.01 m |

IV.3 Méthodologie

La méthodologie adoptée dans cette étude comprend les étapes suivantes :

Tout d'abord, une configuration du système PTC avec un second réflecteur est analysée. L'ajout de ce second réflecteur a pour objectif de récupérer les rayons solaires réfléchis par le réflecteur primaire. Cependant, ce réflecteur secondaire peut engendrer de l'ombrage, empêchant une partie du rayonnement solaire d'atteindre le réflecteur primaire. L'enjeu est donc de concevoir une configuration qui maximise la récupération des rayons perdus tout en minimisant l'effet d'ombrage. Dans un second temps, des nanoparticules sont ajoutées au fluide de base afin d'évaluer leur effet sur les performances thermiques du PTC. La procédure décrite suit le diagramme de flux présenté dans la Figure 2. Chaque simulation est réalisée conformément aux étapes définies dans ce diagramme.

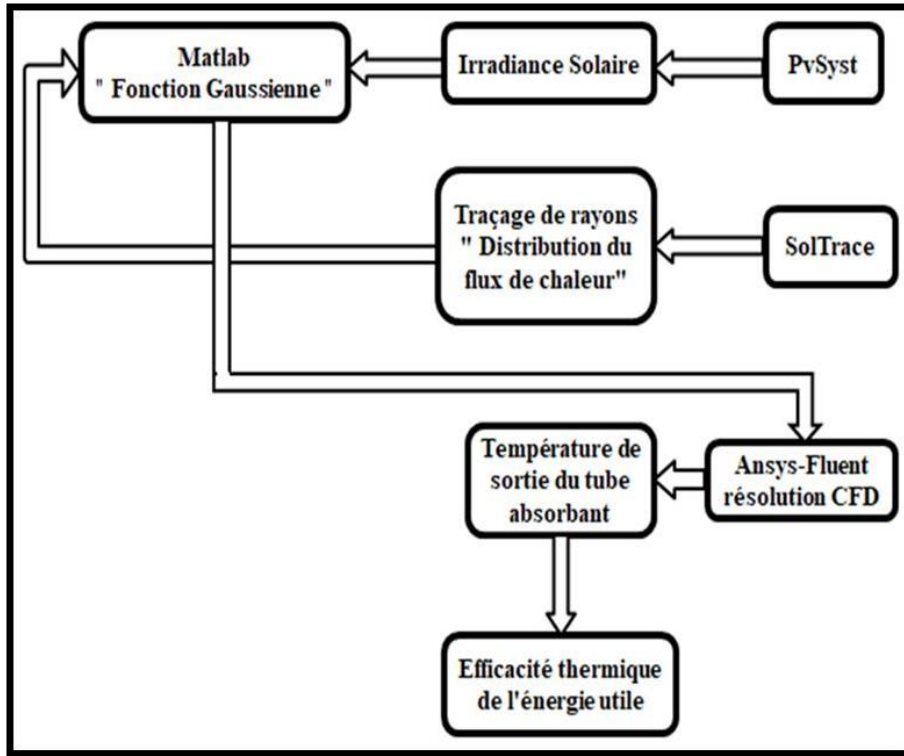


Figure IV. 3 : Organigramme du modèle de simulation

IV.4 Irradiance Solaire

Le logiciel PVSYS5 a été utilisé pour estimer l'intensité du rayonnement solaire à différents intervalles de temps. Les données obtenues (illustrées dans la Figure V.4) concernent spécifiquement la ville de Laghouat, située au sud de l'Algérie, le 21 juin 2024. Cette ville se trouve à une altitude de 700 m, avec des coordonnées géographiques de 33°46' de latitude et 2°56' de longitude.

Tableau IV. 2 : Propriétés Optiques des Composants PTC

| | Réfectivité | Transmissivité | Erreur de pente (mrad) | Erreur de Spéculation (mrad) |
|------------|-------------|----------------|------------------------|------------------------------|
| Absorbeur | 0.05 | 1 | 0.0001 | 0.0001 |
| Réflecteur | 1 | 1 | 3 | 0.5 |

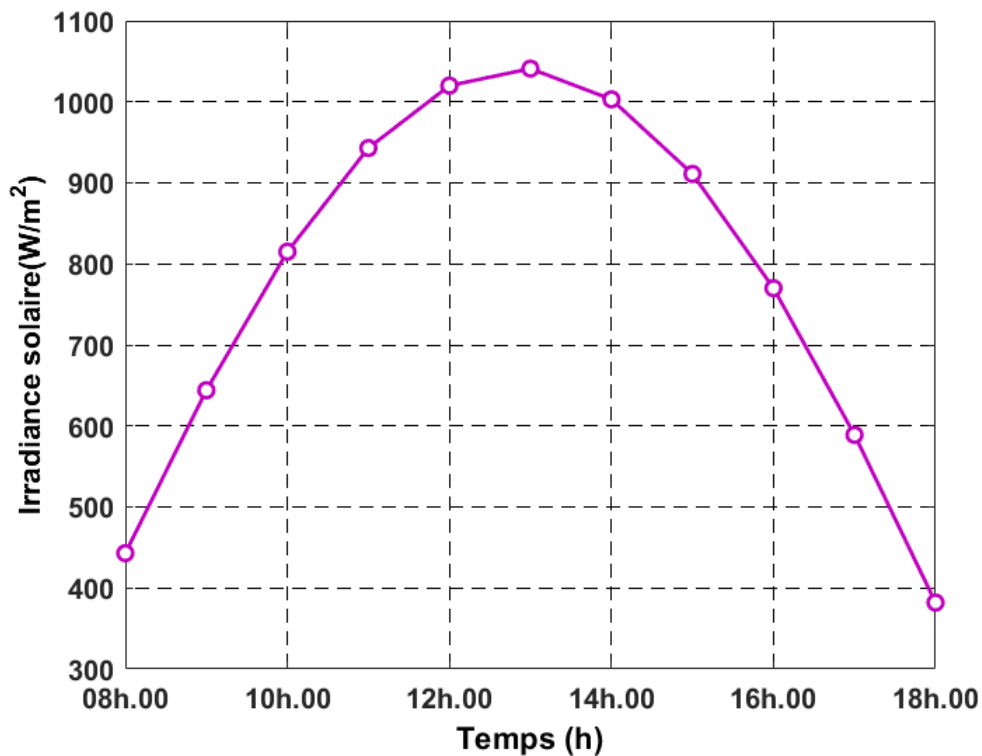


Figure IV. 4 : Irradiance Solaire en Fonction du Temps

IV.5 Distribution du flux de chaleur autour du tube récepteur

Le traçage des rayons ainsi que la distribution du flux thermique autour du tube absorbeur, dans le cas d'un PTC équipé d'un réflecteur secondaire, sont représentés respectivement dans les Figures V.5 et V.6. Les valeurs moyennes temporelles du flux thermique, obtenues à partir de cette modélisation, sont ensuite intégrées dans Matlab. À l'aide de l'outil de courbure cftool, une fonction continue est générée afin de modéliser ce flux de manière plus précise.

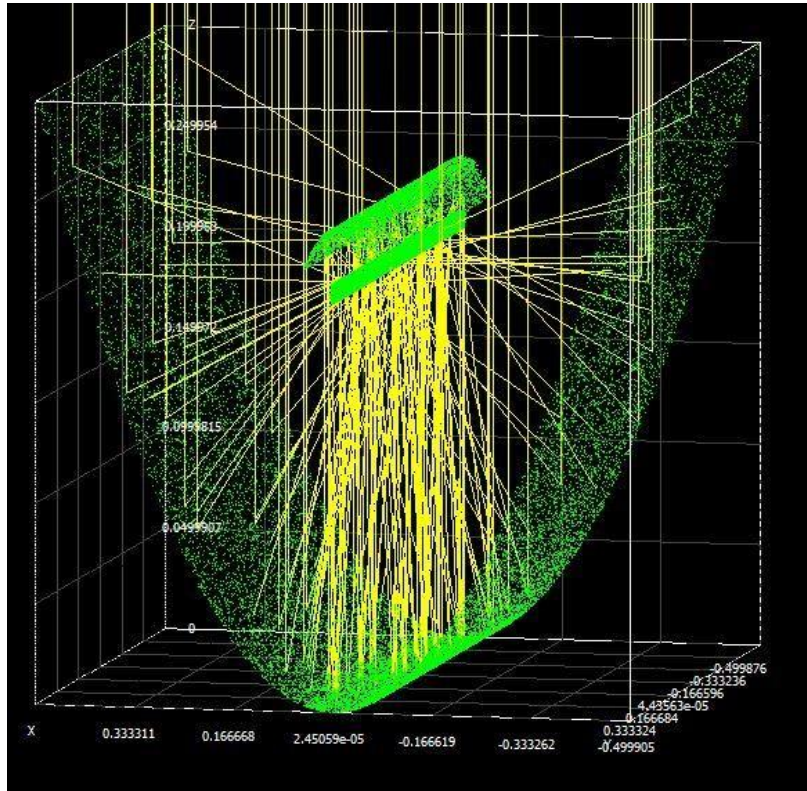


Figure IV. 5 : Traçage de Rayons avec SolTrace pour un PTC avec Réflecteur Secondaire

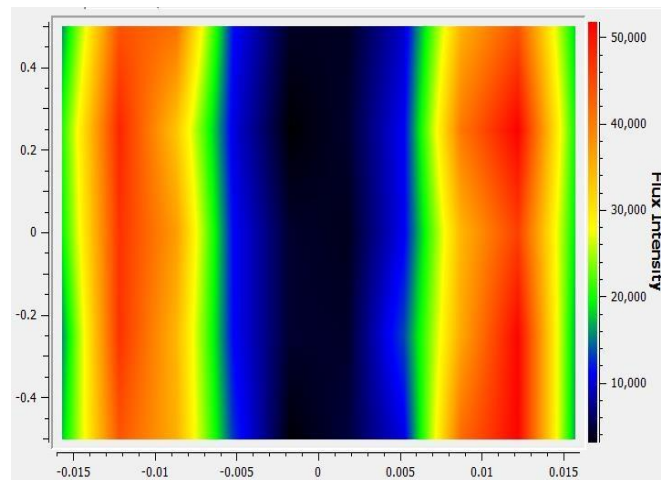


Figure IV. 6 : Diagramme de contour de la distribution du flux thermique autour du tube absorbeur pour un PTC avec réflecteur secondaire.

IV.6 Analyse CFD

L'analyse CFD se compose des étapes suivantes :

- Génération de la géométrie et du maillage. Le domaine physique est composé de deux sous-domaines : solide et fluide. Comme montré dans la Figure IV. 1, deux blocs sont fusionnés. Le bloc structuré représente le domaine solide et le bloc en O représente le domaine fluide. Afin d'étudier la convergence du maillage, nous considérons la température du fluide caloporteur à la sortie du tube absorbeur comme un résultat cible.

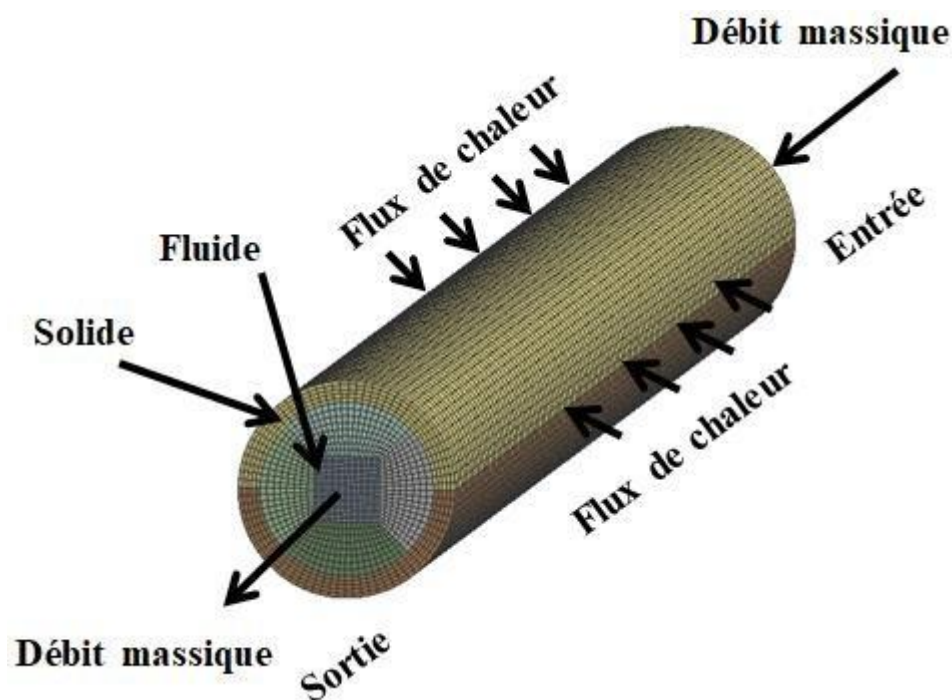


Figure IV. 7 : Géométrie du Tube Absorbeur, Maillage et Conditions aux Limites

IV.7 Effet de l'ajout de nanoparticules

Dans cette section, nous poursuivons l'étude en ajoutant des nanoparticules au fluide de travail, à savoir l'eau, en considérant différents types de nanoparticules ainsi que diverses fractions volumiques.

Toutes les propriétés physiques du fluide caloporteur sont supposées être newtoniennes, à l'exception de la masse volumique dans le terme de poussée, qui est traitée selon l'approximation de Boussinesq. Les propriétés thermophysiques de l'eau et des nanoparticules utilisées sont résumées dans le Tableau IV.3.

Tableau IV. 3: Propriétés thermo physiques de l'eau et des nano-fluides [%]

| | $\rho (kg\ m^{-3})$ | $C_p (J\ kg^{-1}k^{-1})$ | $k (W\ m^{-1}\ k^{-1})$ | $\beta *10^{-5} (k^{-1})$ |
|----------------|---------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------|
| Eau | 997.1 | 4179 | 0.613 | 21 |
| Cuivre (Cu) | 8933 | 385 | 401 | 1.67 |
| Silver(Ag) | 10500 | 235 | 429 | 1.89 |
| Titanium(TiO2) | 4250 | 686.2 | 8.9538 | 0.9 |

La deuxième étape consiste à lancer la simulation 3D dans le logiciel FLUENT, en se basant sur la géométrie précédemment créée. Dans FLUENT, les conditions aux limites ainsi que les paramètres opératoires sont définis. Pour modéliser la variation de la densité, nous avons opté pour le modèle de Boussinesq.

Concernant les propriétés thermophysiques de l'eau et du nanofluide, quatre types différents de nanofluide ont été considérés dans cette étude. Leurs propriétés ont été déterminées à l'aide des équations présentées dans le Chapitre II. Les fractions volumiques utilisées sont détaillées dans les Tableaux V.4, V.5, V.6 et V.7 ci-après.

Tableau IV. 4 : Les propriétés de nano-fluides pour $\phi=0.005$

| | $\rho (kg\ m^{-3})$ | $C_p (J\ kg^{-1}k^{-1})$ | $k (W\ m^{-1}\ k^{-1})$ | $\beta (k^{-1})$ | $\mu (kg\ m^{-3}\ s^{-1})$ |
|-------------------------|---------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------|----------------------------|
| Nano-fluide (Eau- Ag) | 1044.6145 | 3980.7833 | 0.6222 | 0.0002004 | 0.0010156 |
| Nano-fluide (Eau- TiO2) | 1013.3645 | 4105.7569 | 0.62056 | 0.00020579 | 0.0010156 |
| Nano-fluide (Eau-Cu) | 1036.7795 | 4015.5525 | 0.6222 | 0.00020167 | 0.0010156 |

Tableau IV. 5 : Les propriétés de nano-fluides pour $\phi=0.01$

| | $\rho (kg\ m^{-3})$ | $C_p (J\ kg^{-1}k^{-1})$ | $k (W\ m^{-1}\ k^{-1})$ | $\beta (k^{-1})$ | $\mu (kg\ m^{-3}\ s^{-1})$ |
|-------------------------|---------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------|----------------------------|
| Nano-fluide (Eau- Ag) | 1092.129 | 3799.814 | 0.6315 | 0.00019163 | 0.0010285 |
| Nano-fluide (Eau- TiO2) | 1029.629 | 4034.8277 | 0.62819 | 0.0002017 | 0.0010285 |
| Nano-fluide (Eau-Cu) | 1076.459 | 3864.1547 | 0.63149 | 0.00019396 | 0.0010285 |

Tableau IV. 6 : Les propriétés de nano-fluides pour $\varnothing=0.015$

| | $\rho (kg\ m^{-3})$ | $Cp (J\ kg^{-1}k^{-1})$ | $k (W\ m^{-1}\ k^{-1})$ | $\beta (k^{-1})$ | $\mu (kg\ m^{-3}\ s^{-1})$ |
|-------------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------|----------------------------|
| Nano-fluide (Eau- Ag) | 1139.6435 | 3633.9348 | 0.64088 | 0.00015172 | 0.0010416 |
| Nano-fluide (Eau- TiO2) | 1045.8935 | 3966.1045 | 0.63588 | 0.00019775 | 0.0010416 |
| Nano-fluide (Eau-Cu) | 1116.1385 | 3723.5216 | 0.64088 | 0.00018679 | 0.0010416 |

Tableau IV. 7: Les propriétés de nano-fluides pour $\varnothing=0.02$

| | $\rho (kg\ m^{-3})$ | $Cp (J\ kg^{-1}k^{-1})$ | $k (W\ m^{-1}\ k^{-1})$ | $\beta (k^{-1})$ | $\mu (kg\ m^{-3}\ s^{-1})$ |
|-------------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------|----------------------------|
| Nano-fluide (Eau- Ag) | 1187.158 | 3481.3338 | 0.65037 | 0.0001762 | 0.001055 |
| Nano-fluide (Eau- TiO2) | 1062.158 | 3899.486 | 0.64364 | 0.00019391 | 0.001055 |
| Nano-fluide (Eau-Cu) | 1155.818 | 3592.5443 | 0.65036 | 0.00018012 | 0.001055 |

La Figure IV. 8 illustre l'évolution du flux thermique en fonction du temps pour différentes fractions volumiques de nanoparticules d'argent (Ag). On remarque que les courbes de variation du flux suivent une tendance similaire à celle de la température de sortie du fluide, comme indiqué dans la Figure IV.9. Il est également évident que l'augmentation de la fraction volumique entraîne une élévation du gain thermique maximal. D'après l'analyse des résultats, le gain optimal atteint environ 565 W pour une fraction volumique de 2 %.

Par ailleurs, la Figure IV.10 présente la variation de l'efficacité thermique du PTC en fonction du temps pour différentes concentrations de nanoparticules d'argent. Les efficacités moyennes observées sont respectivement de 46,79 %, 49.35 %, 51.97 %, 54% et 55,62 % pour des fractions volumiques de 0 %, 0,5 %, 1 %, 1,5 % et 2 %. Ces résultats mettent en évidence que la meilleure performance est obtenue avec une concentration de 2 %, atteignant ainsi une efficacité d'environ 55,62 %.

Enfin, la comparaison entre le fluide de base seul (l'eau) et le nanofluide composé d'argent et d'eau (Ag-H₂O) a permis de démontrer l'intérêt d'utiliser des nanoparticules pour améliorer

les performances thermiques du système PTC. Cette amélioration confirme l'efficacité des nanofluides dans les applications de transfert de chaleur.

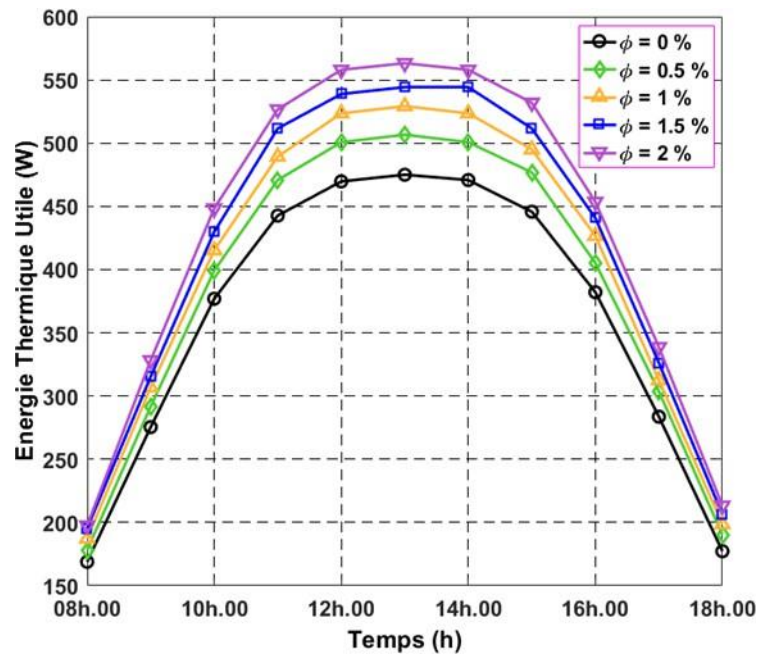


Figure IV. 8 : Gain de flux pendant un jour avec différentes fraction volumiques de Silver (Ag)

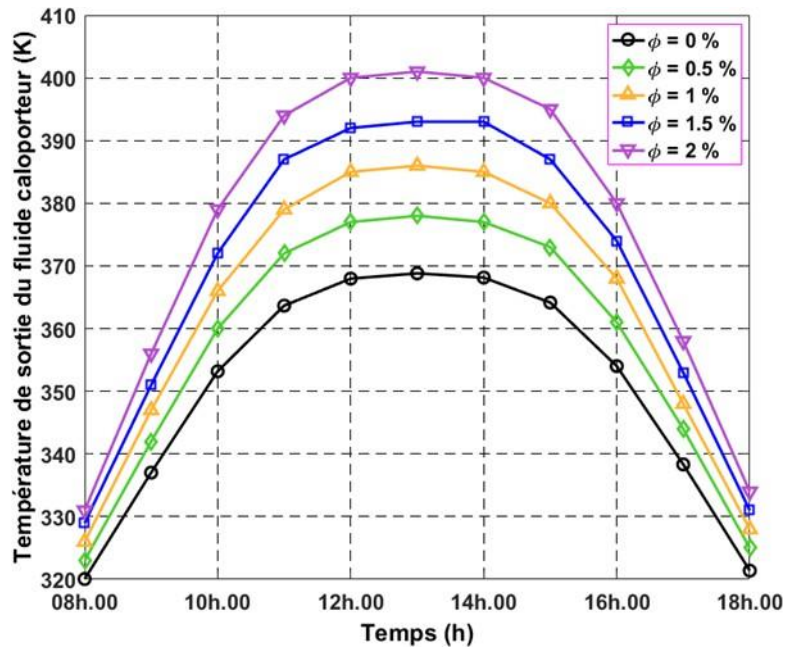


Figure IV. 9 : Montre que le profil de la température du fluide de sortie du tube pendant un jour avec différentes fraction volumiques de Silver (Ag)

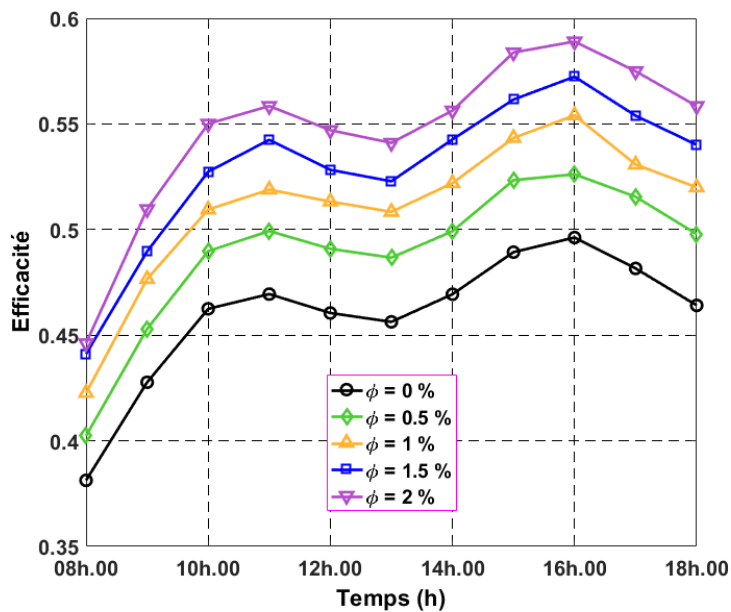


Figure IV. 10 : Efficacité PTC en fonction du temps avec différentes fraction volumiques de Silver (Ag)

L'ajout de nanoparticules de dioxyde de titane (TiO_2) au fluide caloporteur permet d'observer une amélioration progressive de l'efficacité thermique moyenne. Les valeurs obtenues sont

respectivement de 46,79 %, 47,23 %, 49,54 %, 50,24 % et 51,85 % pour des fractions volumiques de 0 %, 0,5 %, 1 %, 1,5 % et 2 %.

Il est à noter que la meilleure performance est atteinte avec une concentration de 2 %, correspondant à une efficacité estimée à 51,85 % .

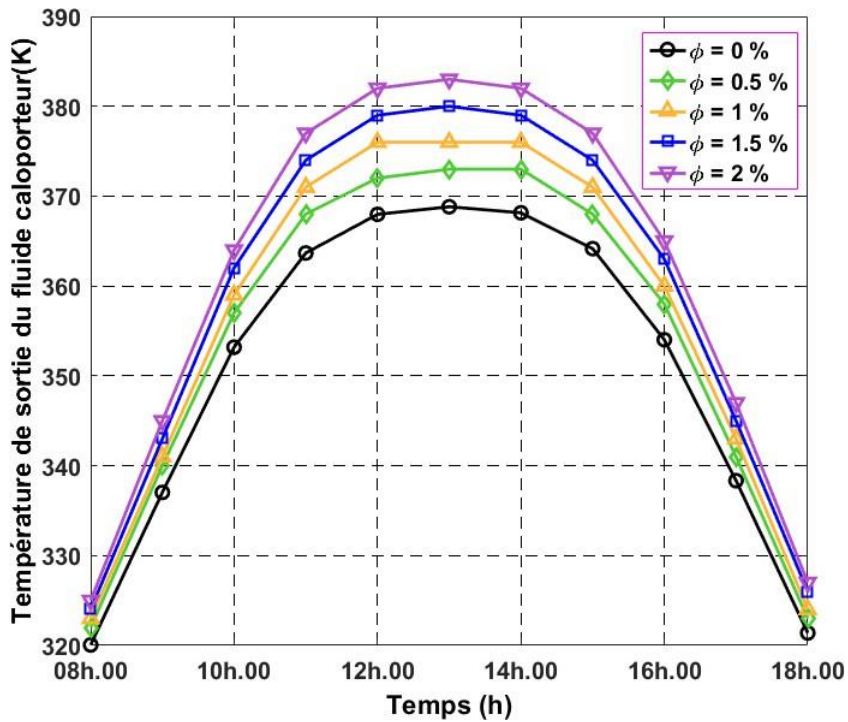


Figure IV. 11 : Montre que le profil de la température du fluide de sortie du tube pendant un jour avec différentes fraction volumiques de Titanium (TiO₂)

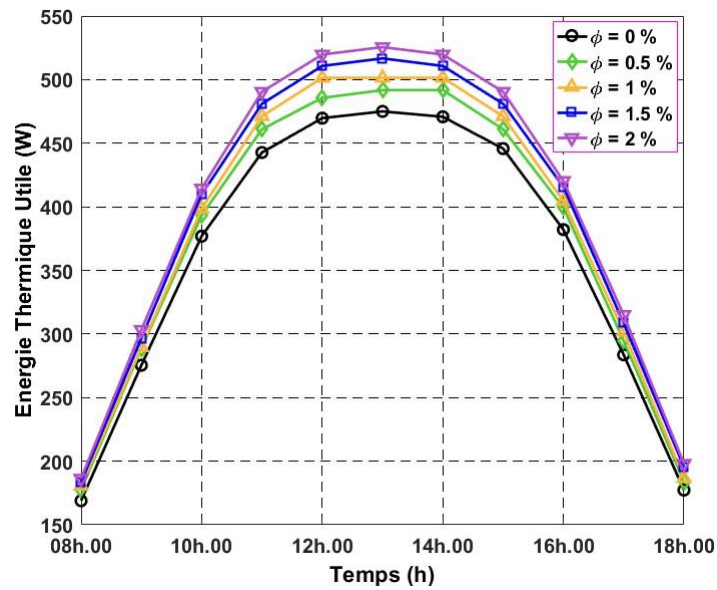


Figure IV. 12 : Gain de flux pendant un jour avec différentes fraction volumiques de Titanium (TiO₂)

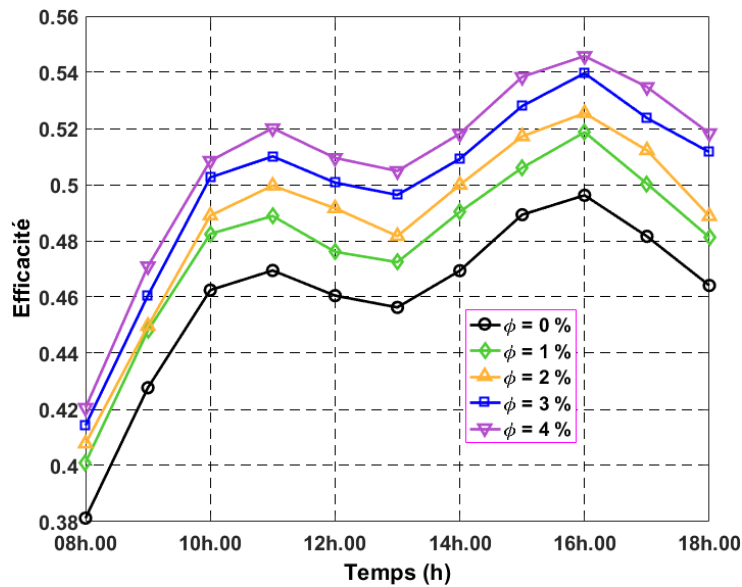


Figure IV. 13 : Efficacité PTC en fonction du temps avec différentes fraction volumiques de Titanium (TiO₂)

La performance thermique du nanofluide Cu-Eau a été examinée et s'est révélée supérieure à celle des autres types de nanoparticules étudiés précédemment. Une amélioration continue de l'efficacité thermique a été constatée avec l'augmentation de la fraction volumique de nanoparticules de cuivre (Cu). Les efficacités correspondantes sont de 46,79 %, 48,12 %, 49,51 %, 50,90 %, 52,29 %.

51,50 %, 52,8 % et 54,76 % pour des concentrations de 0 %, 0.5 %, 1 %, 1.5 % et 2 %, respectivement.

Le meilleur rendement a été obtenu pour une fraction volumique de 2 %, avec une efficacité maximale de 57,67 %. Ces résultats confirment que l'emploi de nanoparticules de cuivre dans le fluide caloporteur contribue de manière significative à l'amélioration du transfert thermique au sein du système PTC.

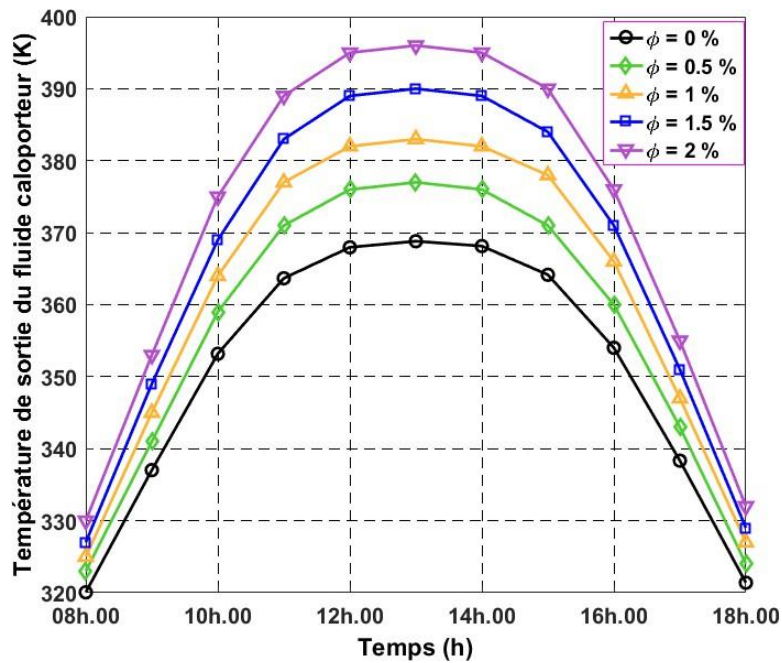


Figure IV. 14 : Montre que le profil de la température du fluide de sortie du tube pendant un jour avec différentes fraction volumiques de Cuivre (Cu)

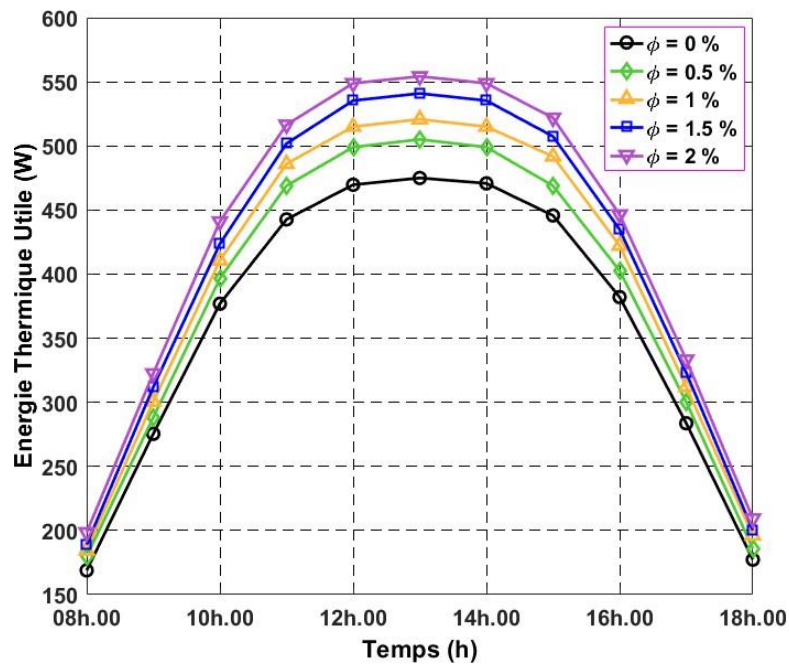


Figure IV. 15 : Gain de flux pendant un jour avec différentes fraction volumiques de Cuivre (Cu)

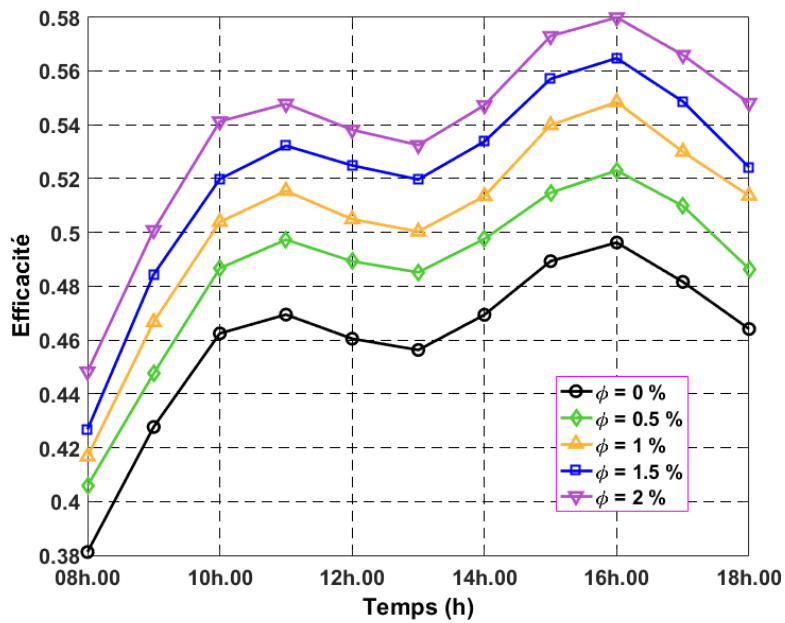


Figure IV. 16 : Efficacité PTC en fonction du temps avec différentes fraction volumiques de Cuivre (Cu)

La Figure V. 17 représente les profils de l'efficacité moyenne en fonction de la fraction volumique avec différente de type nanoparticule .Lorsqu'il est noté à travers l'analyse que la meilleure courbe est pour le nanoparticule Silver (Ag) puis cuivre (Cu) puis Titanium (TiO2) .

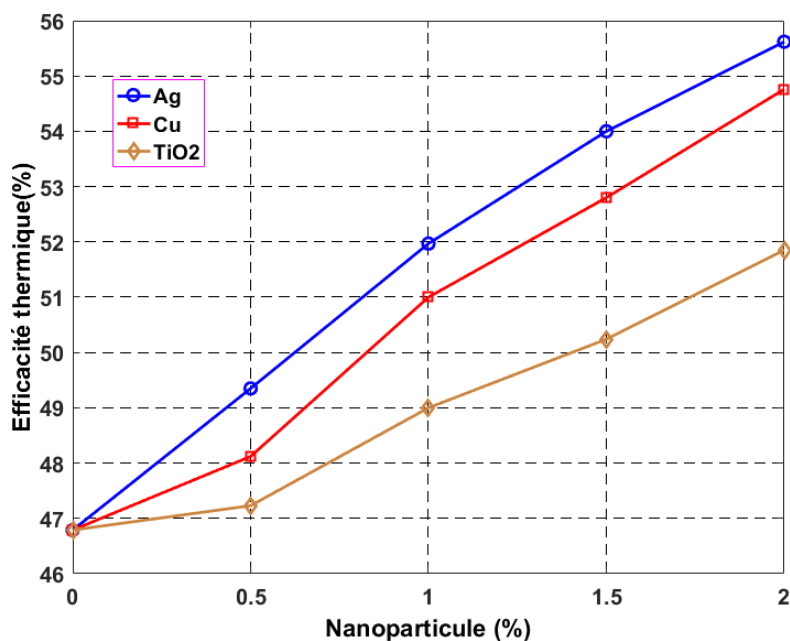


Figure IV. 17 : les profils de l'efficacité moyenne en fonction de la fraction volumique avec différente de type nanoparticule

IV.8 Conclusion

Dans ce chapitre, l'approche numérique mise en œuvre à travers le logiciel Fluent a permis d'analyser en détail le comportement thermique d'un système PTC modifié, intégrant un second réflecteur et utilisant divers nanofluides comme fluide caloporteur. L'étude comparative entre les nanoparticules (Ag, Cu, TiO₂) a mis en évidence l'influence significative de la nature et de la concentration des nanoparticules sur les performances thermiques globales du système. Les résultats obtenus ont montré une amélioration notable du transfert de chaleur, particulièrement avec certaines fractions volumiques optimales, ce qui confirme le potentiel des nanofluides pour accroître l'efficacité énergétique des capteurs solaires à concentration. Cette analyse ouvre ainsi la voie à une optimisation plus poussée des configurations et des propriétés des fluides utilisés, en vue d'un meilleur rendement des installations solaires thermiques.

Conclusion

Générale

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail a été d'analyser l'effet de l'ajout de nanoparticules au fluide caloporteur de base (l'eau), en étudiant différents types de nanoparticules, sur les performances thermiques d'un système PTC (Parabolic Trough Collector). L'étude a été menée en prenant en compte les conditions météorologiques de la ville de Laghouat, située au sud de l'Algérie, durant la journée du 21 juin 2024.

Pour répondre à cet objectif, une démarche d'optimisation séquentielle a été mise en place, s'appuyant à la fois sur des analyses optiques et des simulations CFD. L'étude optique a permis de déterminer la distribution du flux de chaleur focalisé sur la surface du tube absorbeur. Cette distribution a ensuite été utilisée comme condition limite thermique dans les simulations numériques. À travers la résolution des équations CFD, les variations temporelles de la température du fluide caloporteur (HTF) ont été analysées, fournissant ainsi une évaluation précise des performances thermiques du système. Les résultats ont montré une bonne concordance entre les modèles numériques et les observations, et ont pu être généralisés à une famille de modèles répondant aux critères de similarité géométrique, cinématique et dynamique.

Résultats principaux :

- Les profils de variation du flux thermique suivent une tendance similaire à celle de la température de sortie du tube.
- L'ajout de nanoparticules d'argent (Ag) à une fraction volumique de 2 % améliore les performances du PTC d'environ 9 %.
- Le type de nanoparticule ainsi que sa fraction volumique influencent de manière significative le rendement thermique.
- L'étude révèle que les nanoparticules d'argent (Ag) offrent les meilleures performances, suivies de celles de cuivre (Cu), puis de dioxyde de titane (TiO₂).

Perspectives :

Pour les travaux futurs, il serait pertinent d'explorer d'autres paramètres d'optimisation, notamment l'intégration d'ailettes à l'intérieur du tube absorbeur ou encore le développement

de configurations de PTC à double réflexion, en combinaison avec l'utilisation de nanofluides avancés

Références

- [1] **IEA (2021)**. *World Energy Outlook 2021*, International Energy Agency
- [2] **Kalogirou, S. A. (2013)**. *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. Academic Press
- [3] solarsystem.nasa.gov/solar-system/sun/in-depth/
- [4] orbite de la terre- Wikipedia.
- [5] <http://www.aros-solar.com/fr/le-rayonnement-solaire>.
- [6] <https://www.semanticscholar.org/paper/Une-m%C3%A9thode%27estimation-du-rayonnement-solaire-par-Tadili-Bargach>.
- [7] lightzoomlumiere.fr/definition/eclairage-notion-de-flux-et-de-surfacephotometrie.
- [8] Gisement solaire – W. BELAID – 2012.
- [9] Capderou Michel Atlas solaire de l'Algérie Tome 2 : Aspect énergétique.
- [10] <https://www.guide-panneaux-photovoltaïques.be/technologies/lepanneau-solaire-thermique>..
- [11] negosolar.fr.
- [12] ben.mahjoub étude comparative dans les capteurs solaires plans à air . university kasdi merbah ouargla.
- [13] N .Nadir, Recherche des conditions optimales de fonctionnement d'un séchoir solaire. Mémoire de magister, université Kasdi Merbah Ouargla(2009).
- [14] h. ben cheikh.M.ould sidi med et y.draoui .conception et réalisation d'un séchoir solaire indirect opérant en mode convectif, mémoire d'ingénieur université de kasdi merbah ouargla
- [15] SACADURA J. F., Initiation aux transferts thermiques, Cast, INSA de Lyon, Technique et Documentation de Paris, 1980.
- [16] A.BAHADJ ; Etude expérimentale de séchage solaire de pomme de terre ,Mémoire Master,Université de kasdi Merbah Ouargla (2014).
- [17] BENKHELIFA, A. Optimisation d'un capteur solaire plan. Revue des Energies Renouvelables, 1998.
- [18] H. Abdi. Contribution à la détermination des performances de capteurs plans à contact direct eau-plaque d'absorption ; Mémoire de Magister, Université de Blida, 1999.
- [19] JACQUES DESAUTEL, les capteurs héliothermique, Edition EDISUD 1978.
- [20] <https://fr.wikipedia.org>.
- [21] fr.wikipedia.org/wiki/Wikip:Accueil_principal
- [22] Kalogirou, Soteris A. Solar energy engineering: Processes and Systems. 1st. USA:Elsevier, 2009.

- [23] Jean-Pierre PETIT, Convection Naturelle, Ecole Centrale Paris, 1989-1990.
- [24] Marif. Y, Benmoussa. H, Bouguettaia. H, Belhadj. M. M, Zerrouki. M, Ben Hammou. M, 2011. Simulation Numérique d'un Concentrateur Cylindro-Parabolique Dans Le Site d'Adrar. International Conference on Energy and Sustainable Development Adrar
- [25] U.H.Kurzweg ,J.P.Benson ,Iso-Intensity absorber Configurations For
- [26] : Axel Augeard et al. 'Concentrateurs solaires et production électrique'. Proj J.M. Chasseriau, 'Conversion Thermique du Rayonnement Solaire', Ed. Dunod, France, pp. 99.
- [27] A. Gama, M. Haddadi et A. Malek, « Étude et réalisation d'un concentrateur cylindro
- [28] Chen, X., Zhang, Y., & Wang, Z. (2021). Performance enhancement of parabolic trough solar collectors: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110150.
- [29] Zhang, Y., Liu, Y., & Li, X. (2022). Optical performance analysis of solar reflectors under different environmental conditions. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 234, 111358.
- [30] Turchi, C. S., & Mehos, M. S. (2020). Performance of solar thermal collectors: A comparative study. *Solar Energy*, 196, 1–12.
- [31] Reddy, S. K., & Kumar, A. (2021). Polymeric multilayer films for solar reflectors: Fabrication and performance evaluation. *Journal of Applied Polymer Science*, 138(12), 50185.
- [32] Liao, W., & Zhang, Y. (2023). Aluminized polymer films for solar reflectors: Durability and performance analysis. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 242, 111761.
- [33] Mallick, T. K., & McCormack, S. J. (2020). Performance of polymeric reflective materials in solar thermal applications. *Solar Energy*, 207, 1–13.
- [34] Zhang, Y., & Liu, Y. (2021). Durability of solar reflectors under UV radiation and humidity: A comparative study. *Journal of Materials Science*, 56(8), 4923–4935.
- [35]
- Huang, J., & Li, X. (2023). Effect of environmental factors on the performance of solar reflectors. *Renewable Energy*, 182, 1234–1245
- [36] Ben Salah, M., & Bouzidi, A. (2022). Protective coatings for solar reflectors: A review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 237, 111513
- [37]
- Gao, W., & Li, Y. (2022). Anti-corrosion coatings for solar reflectors: Materials and performance. *Journal of Coatings Technology and Research*, 19(4), 1025–1037
- [38] Liang, Y., & Zhang, Y. (2021). Self-cleaning coatings for solar reflectors: Fabrication and performance evaluation. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 219, 110758.

- [39] Li, H., & Wang, Z. (2023). Secondary reflectors and compound parabolic concentrators: Performance analysis and optimization. *Renewable Energy*, 168, 1234–1246
- [40] Mekhilef, S., & Saidur, R. (2020). Performance enhancement of solar collectors using secondary reflectors. *Energy Conversion and Management*, 204, 112-124
- [41] Ben Salah, M., & Bouzidi, A. (2022). Design and optimization of compound parabolic concentrators for solar thermal applications. *Renewable Energy*, 159, 1234–1245
- [42]
- Chen, X., & Zhang, Y. (2024). Ray tracing simulations for solar reflector performance analysis. *Journal of Solar Energy Engineering*, 146(2), 021008
- [43]
- Liu, Y., & Li, X. (2022). Optical performance analysis of solar reflectors using ray-tracing method. *Solar Energy*, 212, 1234–1245.
- [44] Said, Z., & Alami, A. (2020). Impact of optical imperfections on the performance of solar reflectors. *Renewable Energy*, 145, 1234–1245.
- [45] Huang, J., & Li, X. (2023). Experimental study on the performance of solar reflectors under real operating conditions. *Solar Energy*, 215, 1234–1245
- [46] Faghri, A., & Zhang, Y. (2020). Experimental investigation of heat transfer in solar collectors. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 153, 119-130.
- [47] Xu, Y., & Li, X. (2022). Experimental performance evaluation of solar reflectors under different environmental conditions. *Solar Energy*, 213, 1234–1245
- [48] Rojas, J., & Alami, A. (2022). Cleaning strategies for solar reflectors: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145, 111044.
- [49] Kim, J., & Lee, S. (2020). Electrostatic cleaning of solar reflectors: Experimental study and analysis. *Solar Energy*, 202, 1234–1245.
- [50] Alami, A., & Idrissi, B. E. (2021). Dust accumulation effect and cleaning strategies for solar reflectors. *Solar Energy*, 216, 225–232
- [51] Tian, Y., & Li, Y. (2023). Thermal modeling of solar collectors: Impact of environmental factors. *Renewable Energy*, 162, 1234–1245.
- [52] Medina, M., & Gharbi, A. (2022). Thermal modeling of solar collectors: Impact of environmental factors. *Renewable Energy*, 162, 1234–1245.
- [53] Gharbi, A., & Medina, M. (2021). Thermal modeling of solar collectors: Impact of environmental factors. *Renewable Energy*, 162, 1234–1245.

[54] Wang, Z., & Akhmedov, A. (2023). Adaptive reflectors for solar collectors: Electrochromic and shape memory materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 243, 111765

[55] Akhmedov, A., & Wang, Z. (2022). Adaptive reflectors for solar collectors: Electrochromic and shape memory materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 243, 111765

[56] Joubert, J., & Wang, Z. (2021). Adaptive reflectors for solar collectors: Electrochromic and shape memory materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 243, 111765.