

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOAND OULHADJE-BOUIRA



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique

Mémoire de fin d'étude

Présenté par :

**Chergui Med Amine Saddam
Zitouni Youcef**

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Filière : GENIE MECANIQUE
Option : Energétique

Thème :

**Analyse des performances d'un capteur cylindro-
parabolique**

Devant le jury composé de :

M^r Lekhal Rachid

Université de Bouira

Encadreur

Année Universitaire 2020/2021

Dédicace

Avant toute chose, je tiens à remercier ALLAH le tout puissant pour m'avoir donné la force, le courage, la volonté et la patience durant la réalisation de ce modeste travail. Je dédie ce travail

A mes parents, frères et sœur, Merci pour votre amour, votre affection, vos encouragements, sacrifices...que Dieu vous garde.

A toutes les personnes qui me sont chères

A mes chers frères et ami(e)s qui m'ont beaucoup soutenu et encouragé.

Mohamed Amine Seddam

Dédicace

Avant toute chose, je tiens à remercier ALLAH le tout puissant pour m'avoir donné la force, le courage, la volonté et la patience durant la réalisation de ce modeste travail. Je dédie ce travail

A mes parents, frères et sœur, Merci pour votre amour, votre affection, vos encouragements, sacrifices...que Dieu vous garde.

A toutes les personnes qui me sont chères

A mes chers frères et ami(e)s qui m'ont beaucoup soutenu et encouragé.

Youcef

Remerciements

En préambule, nous souhaitons rendre grâce à Dieu, le clément et le miséricordieux de nous avoir donné la force et la patience de mener à bien ce modeste travail

*Nous tenons évidemment à débiter ces remerciements en témoignant de nos profondes reconnaissances envers Monsieur **Rachid LAKHAL**, maître de conférences à l'Université BOUIRA pour nous avoir encadré et dirigé ce travail avec patience.*

Nous remercions vivement Monsieur Maître de conférences à l'Université BOUIRA, qui m'a fait l'honneur de présider le jury, ainsi que pour sa contribution à ma formation.

*Je veux exprimer mes remerciements aux membres de jury,
Madame à l'Université BOUIRA*

Nos remerciements s'adressent aussi à tous les enseignants du département de Génie Mécanique de l'Université BOUIRA.

Résumé

Ce travail a pour objectif l'étude des performances optiques et thermiques d'un collecteur solaire cylindro- parabolique (CCP). Le modèle physique présenté est relativement simple et s'appuie sur des bilans thermiques en régime permanent. Les équations locales obtenues sont résolues analytiquement et la solution globale s'appuie sur un calcul itératif pour la détermination des profils de températures du fluide, de l'absorbeur et de l'enveloppe en verre. Le modèle a été validé en confrontant les résultats de simulations obtenues aux données expérimentales et numériques disponibles.

ملخص

والهدف من هذا العمل هو دراسة الأداء البصري والحراري لمجمع طاقة شمسية من طراز cylindro- parabolique (CCP).

إن النموذج المادي المتاح بسيط نسبيا ويعتمد على الموازنات الحرارية الدائمة. ويتم تحليل المعادلات المحلية التي يتم الحصول عليها من خلال التحليل والحل الإجمالي استنادا إلى حساب تكراري لتحديد درجات حرارة السوائل والمص والزجاج .

تم التحقق من صحة النموذج من خلال مواجهة نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها من البيانات التجريبية الرقمية المتاحة.

Abstract

The aim of this work is to study the optical and thermal performance of a parabolic cylindrical solar collector (CCP). The physical model presented is relatively simple and is based on continuous thermal balances. The local equations obtained are resolved analytically and the overall solution is based on an iterative calculation for the determination of the temperature profiles of the fluid, absorber and glass envelope. The model was validated by comparing the results of simulations obtained with the available experimental and numerical data

Tables des matières

<u>INTRODUCTION GENERALE :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>CHAPITRE 1</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>I.1. Introduction :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>I.2. En 1870, John Ericsson, ingénieur suédois :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>I.3. De 1906 à 1911, Frank Shuman, ingénieur américain:</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>I.4. Rafael Almanza et al (1997) :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>I.5. K. Ravi Kumar et al (2009) :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>I.6. Z.D.Cheng et al (2010) :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>I.7. Fuqiang Wang et al (2010) :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>I.8. 2011 Ya-Ling He et al :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>I.9. Zhiyong Wu et al (2013) :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>I.11. WANG Kun et al (2014) :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>I.12. E. Kaloudiset al :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>I.13. ZHENG Zhang Jinget al :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>I.14. Conclusion :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>CHAPITRE 2</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>II.1. Introduction :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>II.2. Mouvement du globe terrestre et distance Terre-Soleil :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>II.3. Systèmes des coordonnées :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>II.3.1. Coordonnées géographiques :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>II.3.1.1. Longitude (λ):</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>II.3.1.2. Latitude (φ):</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>II.3.1.3. Méridien :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>II.3.2. Coordonnées horaires :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>II.3.2.1. Déclinaison de la Terre (δ):</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>II.3.2.2. Angle horaire (W) :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>II.3.3. Coordonnées horizontales :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>II.3.3.1. Hauteur angulaire (h) :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>II.3.3.2. Azimut (γ_s):</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>II.3.3.3. Angle de zénith (θ_z):</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>II.3.3.5. Angle d'incidence (θ):</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>II.4.1. Rayonnement extraterrestre :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>II.4.2. Rayonnement terrestre :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>II.4.2.1. Rayonnement direct IBN :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>II.4.2.2. Rayonnement diffus ID :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>II.4.2.3. Rayonnement global IG :</u>	Erreur ! Signet non défini.

<u>II.5. MODELISATION MATHEMATIQUE :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>II.5.1 Masse atmosphérique :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>II.5.2. Epaisseur optique de l'atmosphère :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>II.5.3. Facteur de trouble de linke :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>II.5.4. Rayonnement hors atmosphère :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>II.5.5. Rayonnement incident sur un plan horizontal (Modèle Capderou) :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>II.5.6. Rayonnement incident sur un plan quelconque (Modèle Capderou) :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>II.6. Conclusion :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>CHAPITRE 3</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>III.1 Introduction :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>III.2. Structure générale de système de concentration cylindro-parabolique :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>III.3. Les composants d'un concentrateur cylindro parabolique :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>III.3.1. Le collecteur :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>III.3.1.1. Le réflecteur parabolique :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>III.3.1.2. Le tube absorbeur :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>III.3.1.3. Les fluides caloporteurs :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>III.3.2. Le champ solaire :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>III.4. La géométrie et l'optique des concentrateurs cylindro-parabolique :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>III.4.1. Les paramètres géométriques : [31]</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>III.4.1.1. La longueur de cylindro parabolique :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>III.4.1.2. La distance focale :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>III.4.1.3. L'angle d'ouverture (ψ) :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>III.4.1.4. La largeur de l'ouverture :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>III.4.2. Les paramètres Optiques :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>III.4.2.1 La surface du miroir et la surface d'ouverture :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>III.4.2.2. La concentration :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>III.5. Le système de suivi solaire :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>III.6. Le Bilan thermique:</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>III.6.1. Le bilan thermique du fluide :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>III.6.2. Le bilan thermique de tube absorbeur :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>III.6.3. Le bilan thermique de l'enveloppe en verre :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>III.7. Conclusion :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>CHAPITRE 4</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>IV.1. Introduction :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>IV.2. Méthode de calcul :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>IV.2.1. calcul le rayonnement global :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>2.2. Calcul et comparaison des températures de (fluide, absorbeur et vitre) et rendement thermique :</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>IV.3. Conclusion :</u>	Erreur ! Signet non défini.

Listes des figures

- Figure I.1** Champs solaire pour le pompage de l'eau d'irrigation en Méadi (Egypte) ..
- Figure I.2** : Vue de la flexion du tube absorbeur en acier inoxydable.....3
- Figure. I.3** : Récepteur poreux solaire: (a) avec conditions aux limites et (b) avec des paramètres géométriques.....
- Figure. I.4** : Distribution de la température sur (a) surface extérieure de l'absorbeur entier, (b) direction axiale et (c) direction angulaire.....
- Figure. I.5** : Profils de température le long de la circonférence interne à la section de sortie pour les tubes absorbeur concentriques et excentriques.....
- Figure. I.6** : Distribution de la densité de flux vs l'angle circonférentiel (a) pour différents taux de concentration géométriques et (b) pour différents angle de RIM.....6
- Figure. I.7** : Distribution de la température de PTR pour Y constante. Tube absorbeur,(b) enveloppe de verre.....
- Figure. I.8** : Schéma du nouveau type de Cylindroparabolique avec un HR..... 8
- Figure. I.9** : Distribution du flux solaire sur la surface extérieure du tube absorbeur (A)Avant l'amélioration; (B) après amélioration.....8
- Figure. I.10** : Schéma du model numérique du collecteur du CCP de type LS-2..... 9
- Figure. I.11** :La comparaison des résultats du rendement entre le module LS-2 avec le Syltherm 800 et les résultats expérimentaux
- Figure. I.12** : Schéma du tube récepteur avec les insertions poreuses et un flux uniforme
- Figure II.1:** Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil.
- Figure II.2:** Définition des coordonnées terrestres d'un lieu donné
- Figure II.3:** Variation de la déclinaison
- Figure II.4.** Equation de temps
- Figure II.5.** Coordonnées célestes
- Figure II.6** Angle d'incidence (θ_i)
- Figure II.7.** Spectre du rayonnement solaire
- Figure II.8.** Atténuation du rayonnement solaire à travers l'atmosphère
- Figure. III.1:** Photographie de deux installations utilisant des capteurs cylindro parabolique
- Figure.III.2:** Centrale type

Figure.III.3 : structure de tube absorbeur

Figure III.4 : Un tube absorbant intégré dans un collecteur parabolique (ci-dessus à gauche), Siemens UVAC 2010 (ci-dessus à droite), Archimede HEMS08 (ci-dessous à gauche), Schott PTR 70 (ci-dessous à droite) (sources: DLR)

Figure .III.5 : les paramètres géométriques d'un cylindro parabolique

Figure.III.6 : Chemin des rayons parallèles dans un miroir parabolique

Figure.III.7 : Relation entre l'angle d'ouverture et la valeur a/f

Figure.III.8 : Relation entre la focale et l'angle d'ouverture pour une ouverture constante

Figure.III.9 : Surface d'ouverture du collecteur et Surface d'ouverture du récepteur

Figure.III.10 : le concentrateur cylindro parabolique en position de suivi

Figure.III.11 : Orientation de concentrateurs cylindro parabolique

Figure. III.12 : Influence d'orientation simulation à PSA du collecteur ET-100

Figure IV.7 : comparaison des résultats (température) du modèle avec les autres références

Figure IV.8 : comparaison des résultats (rendement) du modèle avec les autres références

Figure IV.9 : variation des températures fluide absorbeur et vitre pour $DNI=800 \text{ w/m}^2$

Figure IV.10 : température du fluide VS longueur de la boucle pour différents DNI, $Q_v=600 \text{ l/m}$, $T_{fe}=293^\circ\text{C}$

Figure IV.11 : température absorbeur VS longueur de la boucle pour différents DNI, $Q_v=600 \text{ l/m}$, $T_{fe}=293^\circ\text{C}$

Figure IV.12 : température du la vitre VS longueur de la boucle pour différents DNI, $Q_v=600 \text{ l/m}$, $T_{fe}=293^\circ\text{C}$

Figure IV.13 : rendement thermique VS longueur de la boucle pour différents DNI, $Q_v=600 \text{ l/m}$, $T_{fe}=293^\circ\text{C}$

Figure IV.14 : rendement thermique VS longueur de la boucle pour différents angle d'incidence DNI, $Q_v=600 \text{ l/m}$, $T_{fe}=293^\circ\text{C}$

Figure IV.15 : température du fluide VS longueur de la boucle pour différents angle d'incidence DNI, $Q_v=600 \text{ l/m}$, $T_{fe}=293^\circ\text{C}$

Listes des Tableaux

Tableau IV.1: Paramètres d'un collecteur cylindro-parabolique

Tableau IV.2 : comparaison de la prédiction du modèle avec les résultats expérimentaux du snl test-cas d'un absorbeur de revêtement en chrome noir avec le vide dans l'anneau (tests d'efficacité)

Tableau IV. 3: Comparaison de nos résultats obtenus avec les résultats de Behar.o pour (Tfs ; rendement thermique)

Nomenclature

Symboles	Significations	Unité
λ	Longitude	[degré]
φ	Latitude	[degré]
δ	Déclinaison de la Terre	[degré]
W	Angle horaire	[degré]
w_s	Angle horaire du coucher du soleil	[degré]
θ_z	Angle de zénith	[degré]
T_s	le temps solaire vrai	[heure]
EOT	l'équation du temps	[heure]
h	Hauteur angulaire	[degré]
γ_s	Azimut	[degré]
θ	Angle d'incidence	[degré]
β	inclinaison de la surface	[degré]
H_0	Rayonnement extraterrestre	[w/m ²]
I_{BN}	Rayonnement direct	[w/m ²]
I_D	Rayonnement diffus	[w/m ²]
I_G	Rayonnement global	[w/m ²]
m_A	Masse atmosphérique	[-]
δR	Epaisseur optique de l'atmosphère	[degré]
TL	Facteur de trouble de linke	[-]
ε	la correction de distance entre la terre et le soleil	[-]
I_{sc}	constante solaire	[w/m ²]
n_j	le numéro du jour de l'année du calendrier	[-]
Y	La distance focale	[m]
ψ	L'angle d'ouverture	[degré]
C	La concentration	[-]
ϑ	La vitesse d'écoulement	[m/s]
A_1	La section transversale de tube	
q_{utile}	La puissance reçue par unité de longueur	[pa]
h_1	Le coefficient de transfert de chaleur par convection	[-]

A	La surface interne du tube	[-]
T₂	La température de la surface de l'absorbeur	[-]
T₁	La température de fluide	[-]
N_u	nombre de Nusselt local	[-]
Z		

Acronymes

CCP : concentrateurs cylindro-paraboliques.

Introduction générale

Dans le cadre de changement climatique où la limitation des gaz à effet de serre est essentielle, et devant la menace d'épuisement des combustibles fossiles, le défi présenté est de trouver des sources d'énergie innovantes pour répondre à une nécessité toujours plus pressante.

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 du temps.

L'énergie solaire est transmise à la Terre à travers l'espace sous forme de particules d'énergie, photons et rayonnement. L'énergie solaire peut être captée et transformée en chaleur ou en électricité grâce à des capteurs adaptés. L'énergie solaire thermique est la transformation du rayonnement solaire en énergie thermique. Cette transformation peut être soit utilisée directement (pour chauffer un bâtiment par exemple) ou indirectement (comme la production de vapeur d'eau pour entraîner des alternateurs et ainsi obtenir une énergie électrique).

Pour travailler à température élevée, il faut accroître le flux optique incident qui pourrait être réalisé par concentration de rayonnement solaire. Cette opération est réalisée à l'aide de capteurs appelés concentrateurs solaires. Parmi ce type de concentrateurs, il y a les concentrateurs solaires cylindro-paraboliques. Les centrales solaires à collecteurs cylindro-paraboliques représentent 94 % des centrales actuellement en activité. C'est également la technologie privilégiée pour la plupart des centrales en construction et en projet.

Ce travail vise à étudier les performances thermiques d'un concentrateur cylindro-parabolique avec un système de poursuite selon à un axe, et pour cela on a suivi le plan de travail suivant :

Le premier chapitre, porte sur un historique sur les CCP et leurs domaines d'application ainsi qu'une revue de littérature des études précédentes qui ont été menées sur cette technologie.

Le second chapitre, nous présentons le gisement solaire, tel que la définition des paramètres essentiels utilisés pour le calcul du rayonnement solaire incident.

Dans le troisième chapitre, nous présentons l'étude thermo-optique d'un CCP et l'inventaire des bilans de transfert de chaleur pour chacun des éléments composant le capteur cylindro-parabolique en vue d'en évaluer ses performances thermiques.

Introduction générale

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation du modèle et sa résolution ainsi qu'au calcul et à l'interprétation des résultats.

On termine par une conclusion générale et perspective.

I.1. Introduction

Plus de 90 % de l'énergie utilisée aujourd'hui sur terre provient des combustibles fossiles, mais ces derniers posent de plus en plus de problèmes sur terre. La question de leur remplacement se pose et est inévitable. Mais comment les remplacer ? L'homme cherche aujourd'hui à remplacer les sources d'énergies à cause des multiples pollutions occasionnées et de leurs impacts sur l'environnement, mais aussi (et surtout) à cause du coût de plus en plus important pour l'achat, l'extraction et l'utilisation de ces sources d'énergies.

L'alimentation en énergie future passe certainement par les énergies renouvelables qui sont encore pour certains au stade expérimental et pour d'autres qui connaissent un essor actuellement (comme l'énergie solaire) grâce aux économies engendrées et à leur absence d'impact sur l'environnement.

Ces énergies sont l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, l'énergie des marées, les biogaz, les biocarburants et la géothermie.

Beaucoup d'efforts ont été fournis, notamment dans la décennie dernière pour améliorer les systèmes de conversion de l'énergie solaire en chaleur et surtout pour la production d'électricité.

Les systèmes de conversion thermique les plus utilisés pour la production de l'électricité sont les concentrateurs cylindro-paraboliques et l'amélioration du rendement de ces concentrateurs est la préoccupation de plusieurs chercheurs.

Pour cela, on cite quelques travaux réalisés dans ce domaine :

I.2 Revue Bibliographique

En 1870, John Ericsson, ingénieur suédois [1] a construit le premier capteur solaire cylindro- parabolique (CCP) avec un collecteur d'ouverture de 3,25 m². Le but était de générer de la vapeur à l'intérieur du collecteur, puis de faire tourner un moteur de 373 W. Au cours des années suivantes, il a construit sept systèmes similaires à ceux du premier. Cependant, il utilisait de l'air au lieu de l'eau comme fluide de travail. En 1883, Ericsson a construit un grand système de CCP affiché à New York. Le collecteur parabolique a une longueur de 3,35 m et 4,88 m de large, ce qui focalise les rayons de soleil sur un tube récepteur de 15,88 cm de diamètre. Le tube comprenait des bâtons en bois et des déchirures de fer qui étaient attachés sur les côtés du tube (cylindre). La surface du réflecteur était en verre de fenêtre, qui était installés sur des bâtons. Tout le système suivait manuellement le soleil.

En 1907, Wilhelm Meier et Adolf Remshardt [1] ont obtenu un brevet sur la technologie des CCP. L'objectif du système était de générer de la vapeur.

De 1906 à 1911, Frank Shuman, ingénieur américain, [1] a construit et testé plusieurs moteurs solaires, y compris différentes sortes de capteurs solaires non concentrés et peu concentrés. Certains de ces collecteurs ont été utilisés pour pomper de l'eau pour l'irrigation à Tacony, en Pennsylvanie. Après avoir acquis de l'expérience avec ces systèmes, en 1912, il a construit une grande usine de pompage de l'eau pour l'irrigation, comme le montre la figure I.1 en Meadi, petit village près du Caire, en Égypte, avec l'aide d'un consultant anglais Charles Vernon Boys.

Un changement alternatif a été suggéré par C.V. Boys, c'est-à-dire que les tubes récepteurs à couvercle en verre étaient placés le long du collecteur parabolique. Le système comprenait 5 rangées de CCP face au nord-sud. Chaque rangée a une longueur de 62,17 m et une largeur de 4,1 m avec un diamètre d'absorbeur de 8,9 cm et un taux de concentration de 4,6. La surface totale de collecte était de 1250 m², et la surface totale occupée était de 4047 m². Le système était capable de produire 27 000 litres d'eau par minute

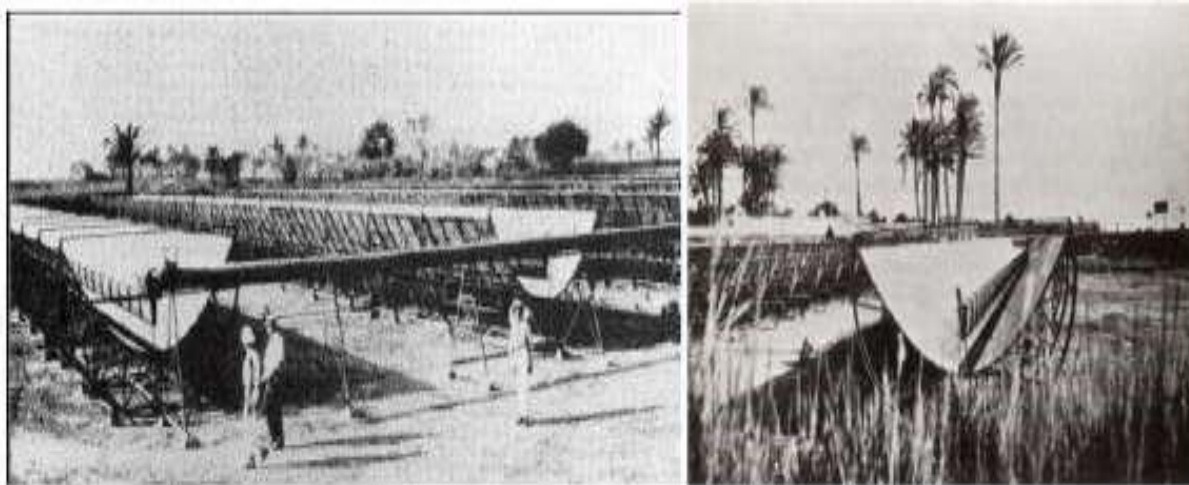


Figure I.1 : Champs solaire pour le pompage de l'eau d'irrigation en Méadi (Égypte) [1]

Rafael Almanza et al (1997) [2] ont étudié la différence de température sur la circonférence entre deux tubes absorbeur en acier inoxydable et cuivre, et ils ont montré que la différence de température circonférentielle a été pratiquement éliminée sur le cuivre. Ils ont conclu qu'il est possible d'éliminer la flexion de ces tubes en minimisant le gradient de température, ce qui favorise l'utilisation des matériaux à haute conductivité thermique pour les tubes absorbeurs.

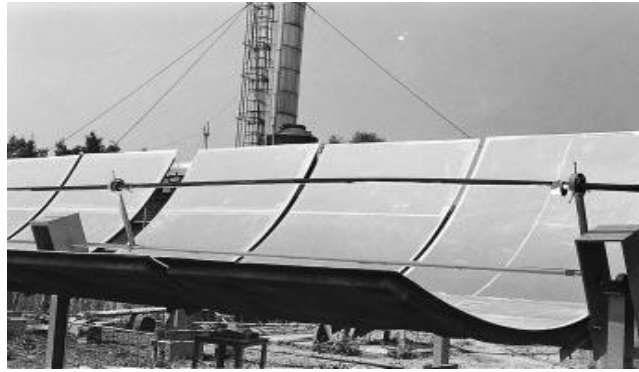


Figure I.2 : Vue de la flexion du tube absorbeur en acier inoxydable

K. Ravi Kumar et al (2009) [3] ont étudié l'amélioration du transfert de chaleur à travers un tube absorbeur avec un disque poreux dans le concentrateur cylindro parabolique, L'étude a révélé que l'utilisation du milieu poreux dans un tube absorbeur améliore le transfert de chaleur dans tous les récepteurs en raison de l'augmentation de la surface d'échange thermique, de la conductivité thermique et de la turbulence.

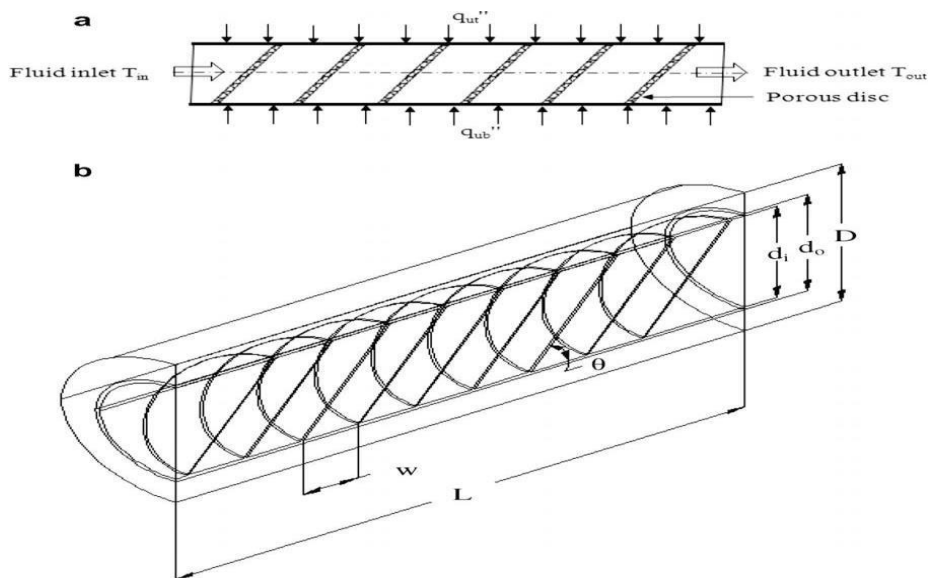


Figure I.3 : Récepteur poreux solaire: (a) avec conditions aux limites et (b) avec des paramètres géométriques.

Z.D.Cheng et al (2010) [4] ont travaillé sur l'identification de la distribution de la température à la surface externe du tube absorbeur d'un CCP, cette distribution est en fonction de la distribution du flux de rayonnement à la surface, et déterminée à son tour en exploitant la technique de Monte Carlo MCRT (Monte Carlo Ray Tracing). Combinant la méthode MCRT et la méthode des volumes finis via le code de calcul Fluent, ils élaborèrent une multitude de simulations. Prenant le fait de la dépendance des propriétés physique du fluide caloporteur (huile Syltherm800) avec la température, la validation du modèle mathématique et de la modélisation, par comparaison avec les données des études expérimentales antérieures de Dudley et al [4], fut poussée jusqu'à une différence de 2% sur la température du fluide caloporteur à la sortie de l'absorbeur.

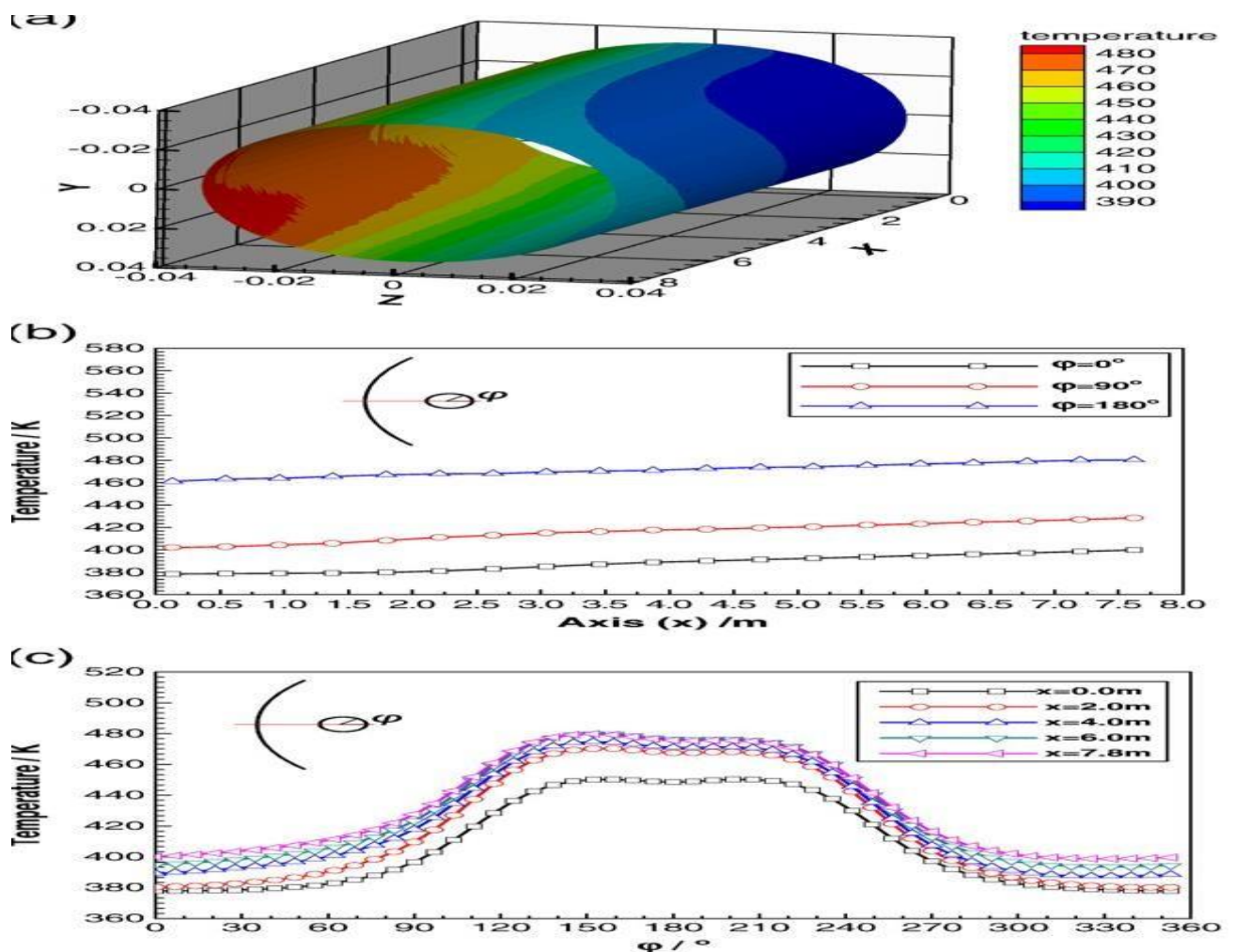


Figure I.4 : Distribution de la température sur (a) surface extérieure de l'absorbeur entier, (b) direction axiale et (c) direction angulaire.

Fuqiang Wang et al (2010) [5] ont étudié numériquement le tube absorbeur excentrique dans le but de réduire les contraintes thermique. Les analyses numériques utilisent la méthode de Monte Carlo pour calculer la distribution du flux solaire sur la demi-périphérie inférieure du tube absorbeur. Les résultats peuvent réduire les contraintes thermiques jusqu'à 41,1% par rapport au tube absorbeur concentrique.

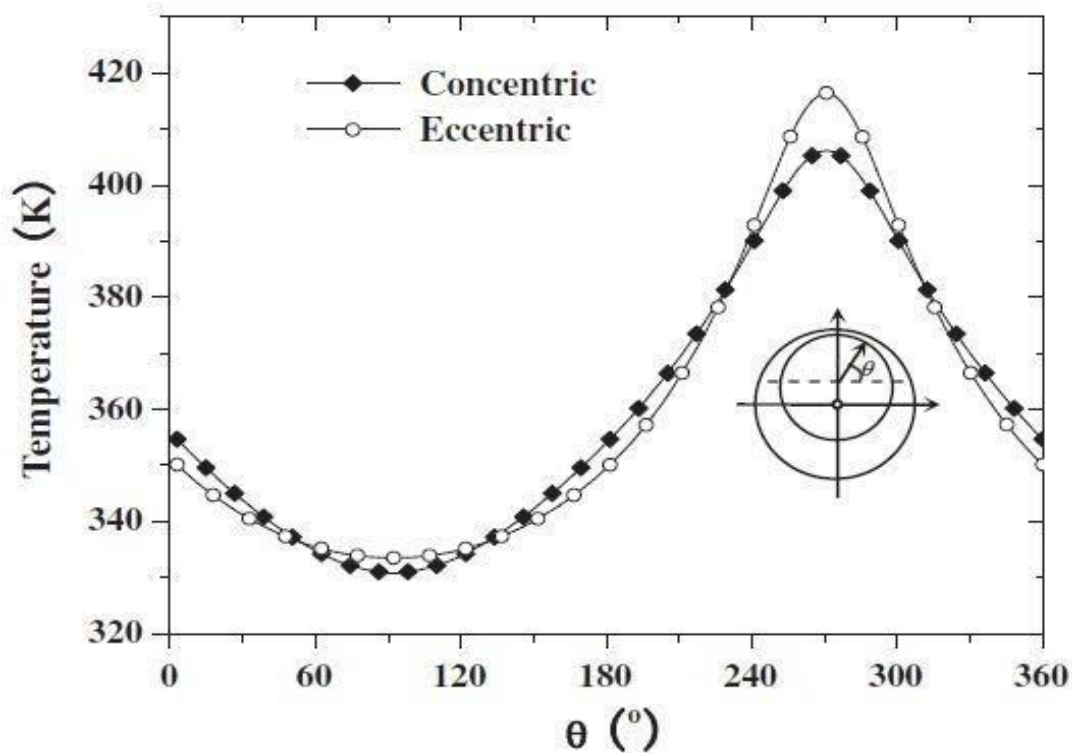


Figure I.5: Profils de température le long de la circonférence interne à la section de sortie pour les tubes absorbeur concentriques et excentriques.

Ya-Ling He et al (2011) [6] ont réalisé une multitude de simulations sur différentes configurations de CCP, étudiés expérimentalement avant par Dudley et al (1994). La finalité de leur travail est l'approfondissement de la compréhension des paramètres qui influent directement sur l'efficacité thermique des CCP. Pour cela deux cas de figures ont été ciblés.

1 cas : en diminuant le diamètre du tube absorbeur, ils augmentés le taux de concentration géométrique (GC) et améliorés ainsi la distribution du flux.

2 cas : en variant l'angle de la jante de la parabole (angle de Rim) tout en gardant la même ouverture et le même diamètre de tube absorbeur.

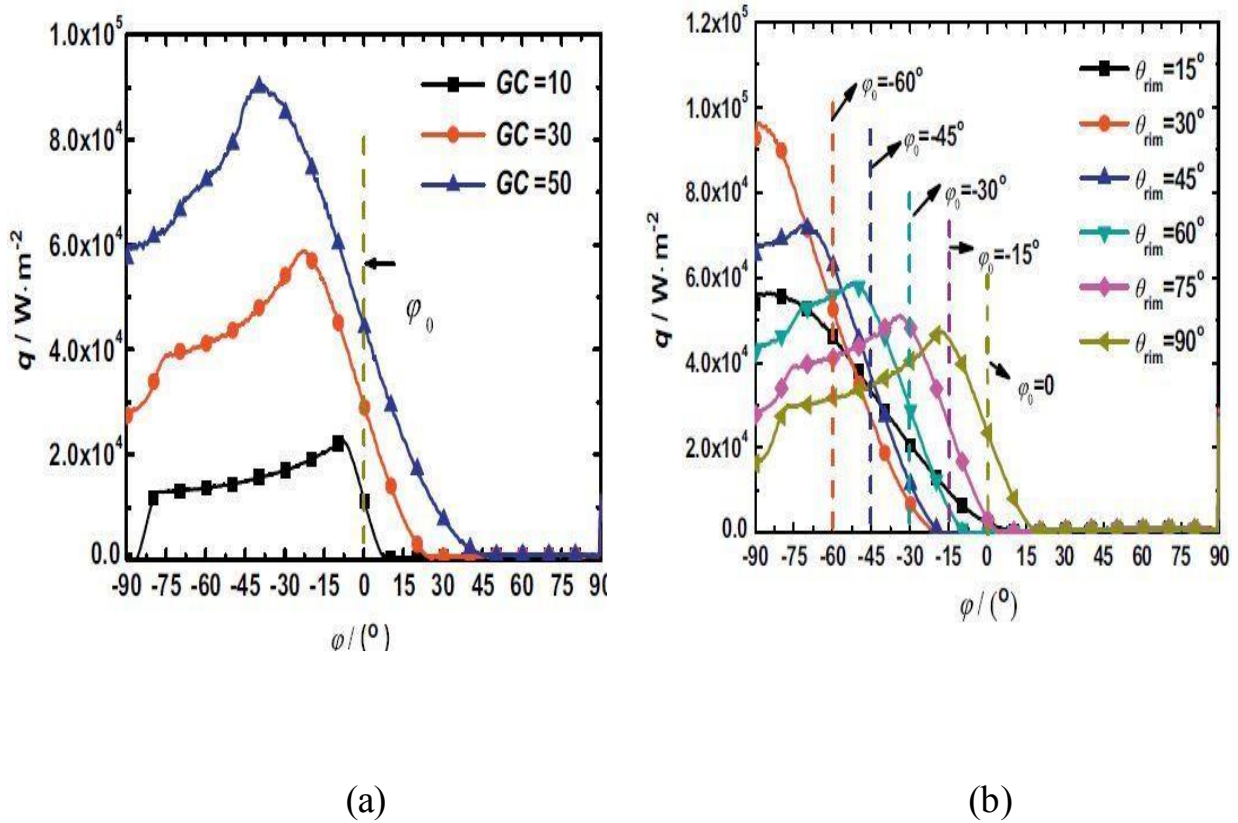


Figure I.6 : Distribution de la densité de flux vs l'angle circonférentiel (a) pour différents axes de concentration géométriques et (b) pour différents angles de RIM

Zhiyong Wu et al (2013) [7] ont étudié numériquement la répartition détaillée de la température d'un tube absorbeur en combinant une Méthode de Monte Carlo et le fluide. Avec la considération de flux solaire et le transfert de chaleur par conduction, convection et rayonnement. Et par la comparaison entre ses résultats expérimentaux il a montré que la différence moyenne est inférieure à 6%. Les résultats de la température de cette étude ont une grande importance pour la conception et l'optimisation de la structure du concentrateur cylindro parabolique.

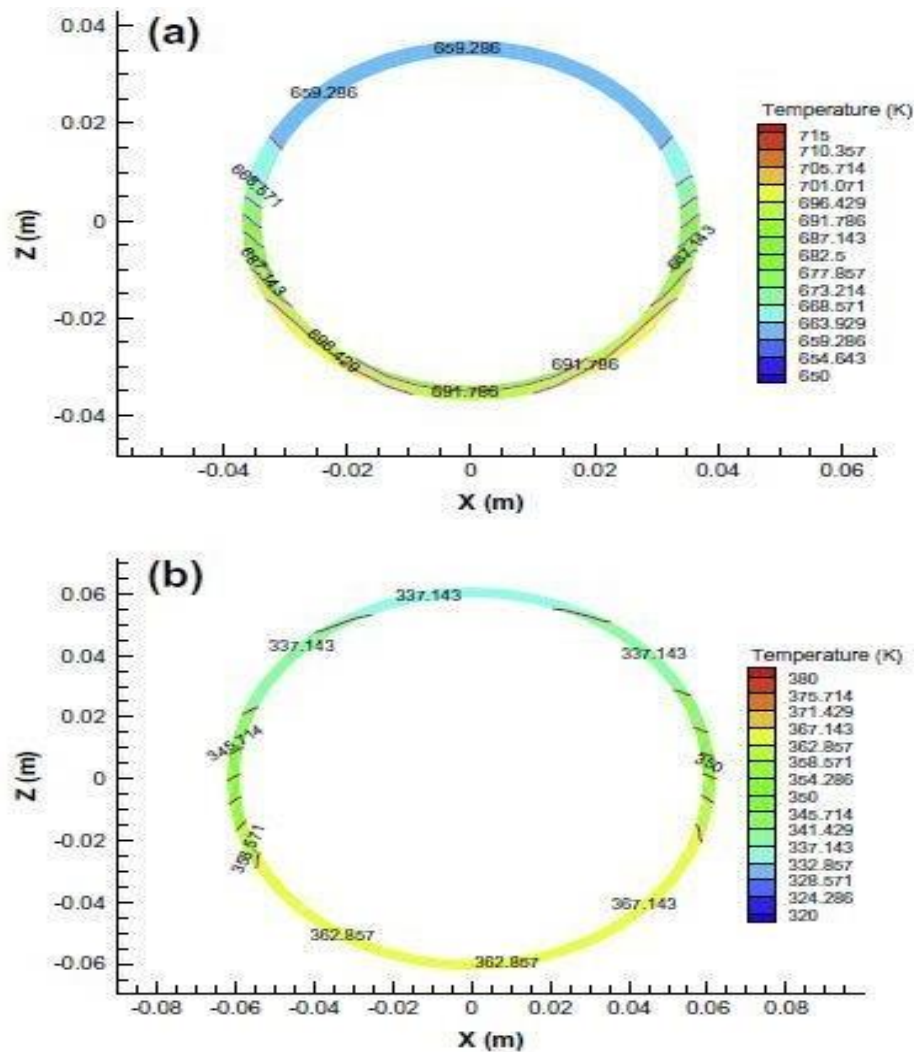


Figure I.7 : Distribution de la température de PTR pour Y constante. (a) Tube absorbeur, (b) enveloppe de verre

WANG Kun et al (2014) [8] ont utilisé un réflecteur secondaire comme un réflecteur à homogénéisation (HR). La caractéristique de concentration du collecteur a été étudiée par la méthode MCRT. La condition aux limites de flux de chaleur est fournie par les résultats du calcul MCRT. La distribution du flux solaire, le champ de température et l'efficacité du collecteur ont été analysés en détail. Les conclusions sont comme suit :

- 1- La répartition du flux solaire peut être homogénéisée par déplacement du tube absorbeur loin de la ligne focale du concentrateur cylindro parabolique vers le HR ajouté.
- 2- Dans les conditions étudiées, l'efficacité du collecteur diminue d'environ 4%, tandis que la température maximale de la paroi du tube absorbeur est réduite de 667 à 661 K et la

différence de température circumférentielle à l'emplacement de l'axe de $z = 3$ m est réduit de 25,7 à 2,3 K. Par conséquent, bien que l'efficacité du collecteur ait tendance à diminuer légèrement, la température maximale et la différence de température circumférentielle de la paroi du tube absorbeur peuvent être considérablement réduites et donc la fiabilité du concentrateur cylindro parabolique peut être améliorée.

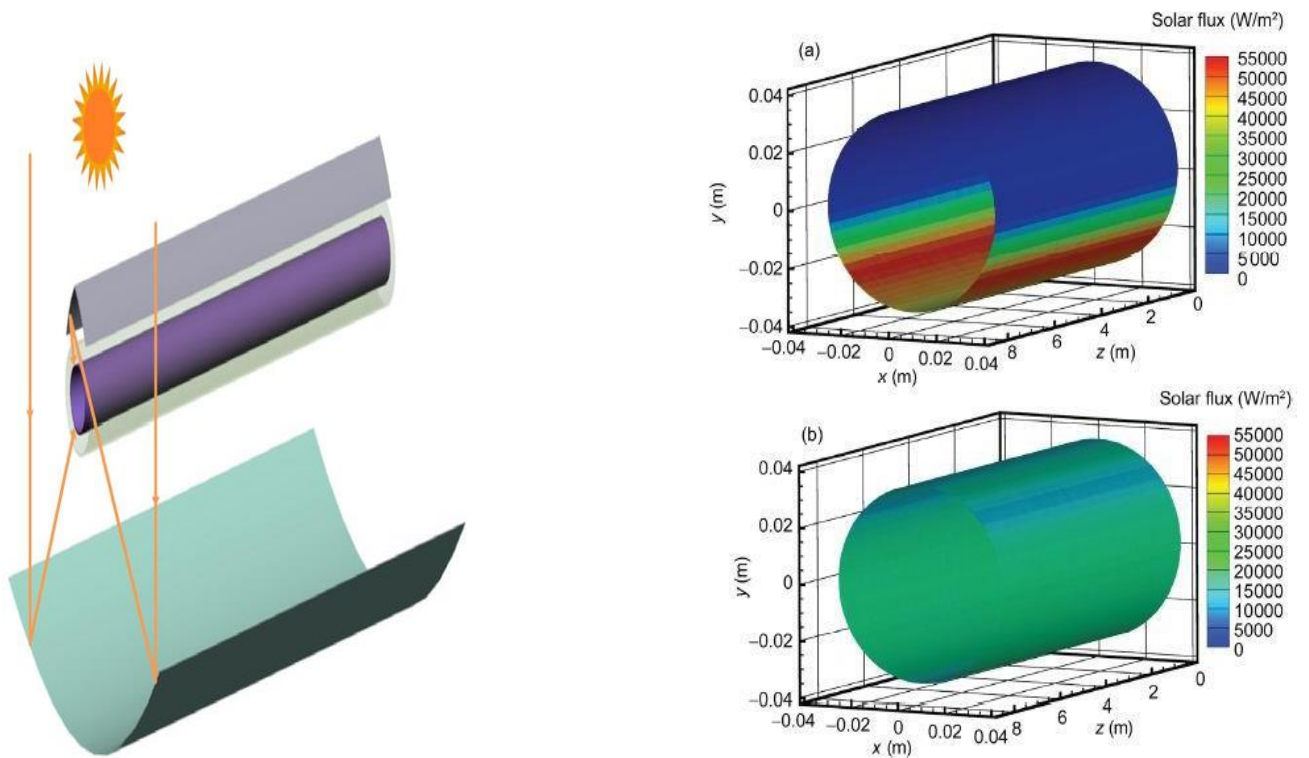


Figure I.8 : Schéma du nouveau type de Cylindro parabolique avec un HR.

Distribution du flux solaire sur la surface extérieure du tube absorbeur.

(A) Avant l'amélioration ; (B) après amélioration

E. Kaloudiset al [9] ont fait une analyse numérique sur le collecteur d'un système de Concentrateur cylindro-parabolique avec le nanofluide caloporteur (HTF), afin de simuler le collecteur de type SEGS LS2. Ses performances thermiques et ses pertes en chaleur sont obtenus du travail expérimental de « Dudley et al » [3]. Quatre cas de conditions aux limites ont été utilisés pour la simulation numérique en impliquant tous les modes de transfert thermiques aux niveaux des différentes interfaces, comme illustré sur la figure I.10.

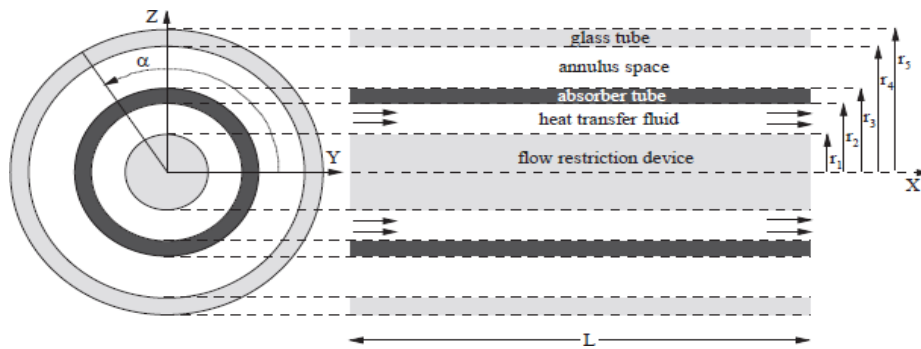


Figure I.10. Schéma du modèle numérique du collecteur du CCP de type LS-2

La comparaison faite entre les résultats numériques et les résultats expérimentaux pour les quatre différents cas cités avec l'huile de Syltherm 800, donne une très bonne compatibilité dans la validation. Voir figure I.11. Surtout, que l'erreur de température maximale signalée à la sortie est de 0.3% et 7.3% pour le rendement. Comme, ils ont préféré établir une modélisation avec une approche de deux phases du nanofluide et la valider avec les résultats numériques et expérimentaux sur un tube circulaire de température de paroi constante.

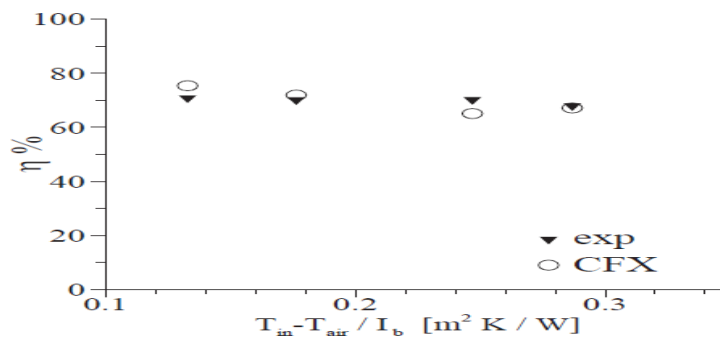


Figure 1.11 La comparaison des résultats du rendement entre le module LS-2 avec le Syltherm 800 et les résultats expérimentaux

ZHENG Zhang Jinget al [10], dans leurs travaux, ont étudié l'augmentation des échanges thermiques aux niveaux du tube récepteur d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique dans le cas des insertions poreuses tout au long et un flux non uniforme, voir figure I.12.

Afin de configurer l'optimisation des insertions poreuses, ils ont proposé une méthode qui a couplé l'utilisation de l'algorithme génétique codé sous MATLAB avec le calcul dynamique numérique du fluide (CFD) par FLUENT. En utilisant les résultats optimaux, ils ont continué

à étudier les critères d'évaluation des performances des facteurs suivants : l'angle de synergie, la dissipation à l'entrée du récepteur et les pertes exégétiques, pour discuter les performances du transfert thermique de ce nouveau tube récepteur amélioré (ERTs).

Les résultats montrent que l'utilisation des meilleurs critères en facteurs déjà cités et le du nombre de Reynolds (Nu) donne des performances plus importantes au récepteur en utilisant cette approche proposée avec cette Algorithme Génétique. Et les résultats seront plus importants si le matériau des insertions poreuses aura une conductivité thermique plus importante.

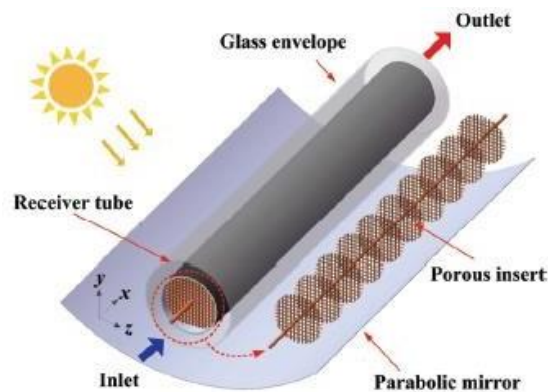


Figure I.12: Schéma du tube récepteur avec les insertions poreuses et un flux uniforme

I.3. Conclusion

Cette historique montre que la technologie a vu le jour depuis le 19^{ème} siècle et que son développement a été si important surtout au début des années 70 avec l'élévation du prix du pétrole et par la suite a joué le rôle du pétrole dans la production de l'électricité. De nos jours, cette technologie est considérée parmi les technologies les plus matures dans la production d'électricité et bien dans d'autres domaines d'applications.

II.1. Introduction

La quantité d'énergie solaire (ou rayonnement solaire) disponible sur la surface de la terre dépend des facteurs astronomiques, physiques, météorologiques, et géographiques tels que le rayonnement extraterrestre, la transmittance atmosphérique, la latitude, la distance Terre-Soleil, l'angle horaire, la durée d'ensoleillement, l'humidité, la température ambiante et la nébulosité à l'endroit correspondant [11, 12].

Pour la sélection et la réalisation des systèmes à conversion solaire; pour la production d'énergie ou d'électricité, le chauffage ou le refroidissement, les structures à effet de serre, la connaissance des données précises de rayonnement solaire est extrêmement importante pour la conception optimale et la prédiction des performances de ces systèmes [12]. Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Les meilleures données du rayonnement solaire à l'endroit d'intérêt seraient mesurées à cet endroit particulier d'une façon continue et précise sur une longue période. Malheureusement, pour beaucoup de pays en développement comme l'Algérie, les mesures du rayonnement solaire ne sont pas facilement disponibles en raison de contraintes financières, techniques ou institutionnelles. Il est donc important d'élaborer des données de rayonnement solaire sur la base de modèles de haute performance.

II.2. Mouvement du globe terrestre et distance Terre-Soleil

La variation de la disponibilité du rayonnement solaire saisonnier à la surface de la terre peut être prise à partir de la géométrie du mouvement relatif de la terre autour du soleil. La terre décrit autour du soleil une orbite elliptique quasi circulaire avec une période de 365,25 jours. Le plan de cette orbite est appelé plan de *l'écliptique*. C'est au solstice d'hiver (21 décembre) que la terre est la plus proche du soleil, et au solstice d'été (21 juin) qu'elle est la plus éloignée. La terre tourne sur elle-même avec une période de 24h. Son axe de rotation (l'axe des pôles) a une orientation fixe dans l'espace. Il fait un angle $\delta = 23^{\circ}45'$ avec la normale au plan de l'écliptique (figure II.1). La variation de la distance terre-soleil en fonction de la date est donnée par la formule suivante [11]:

$$\varepsilon = 1 + 0.0033 \cos\left(\frac{2\pi}{365}J\right) \quad (\text{II.1})$$

J : le numéro du jour de l'année du calendrier

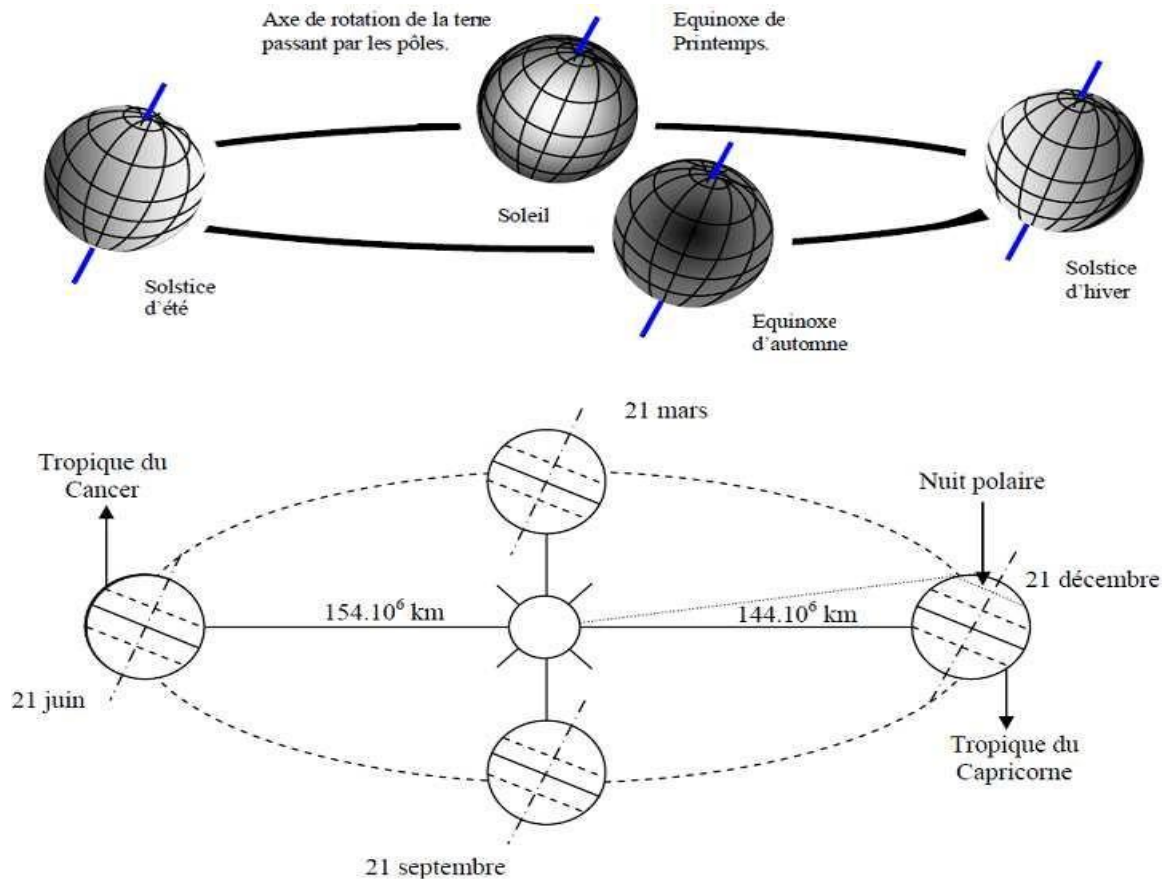


Figure II.1: Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil.

II.3. Systèmes des coordonnées :

II.3.1. Coordonnées géographiques :

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre :

II.3.1.1. Longitude (λ)

La longitude λ d'un lieu correspond à l'angle que fait le plan méridien passant par ce lieu avec un plan méridien retenu comme origine. On a choisi pour méridien (origine 0°) le plan passant par l'observatoire de Greenwich. Par convention on affecte du signe (+) les méridiens situés à l'est de ce méridien, et du signe (-) les méridiens situés à l'ouest.

II.3.1.2. Latitude (φ)

La latitude φ permet de repérer la distance angulaire d'un point quelconque par rapport à l'équateur. Elle varie de 0° à l'équateur à 90° au pôle Nord. Le pôle nord par la latitude $+90^\circ$ et le pôle sud par la latitude -90° . Cette convention de signe affecte le signe (+) à tous les lieux de l'hémisphère nord et le signe (-) à tous les lieux de l'hémisphère sud.

II.3.1.3. Méridien

Est un demi grand cercle imaginaire tracé sur le globe terrestre reliant les pôles géographiques. Tous les points de la Terre situés sur un même méridien ont la même longitude. On parle également d'arc de méridien entre deux latitudes [13].

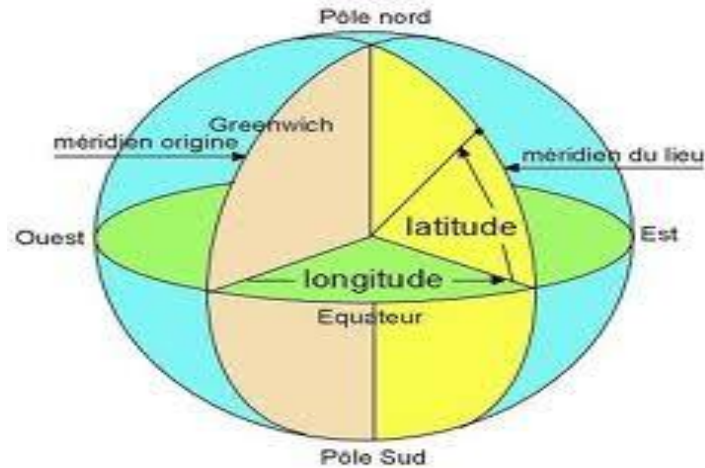


Figure II.2: Définition des coordonnées terrestres d'un lieu donné

II.3.2. Coordonnées horaires :

II.3.2.1. Déclinaison de la Terre (δ)

La déclinaison de la Terre δ est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre. Cet angle varie au cours des saisons [14].

- ✓ Equinoxe de printemps : 21 Mars $\delta = 0$.
- ✓ Solstice d'été : 21 Juin $\delta = + 23^{\circ} 45'$.
- ✓ Equinoxe d'automne : 21 Septembre $\delta = 0$.
- ✓ Solstice d'hiver : 21 Décembre $\delta = - 23^{\circ} 45'$.

Sa valeur peut être calculée par la formule de Cooper (1969):

$$\delta = 23.45 \sin \left(\frac{360}{365} (J + 284) \right) \tag{II.2}$$

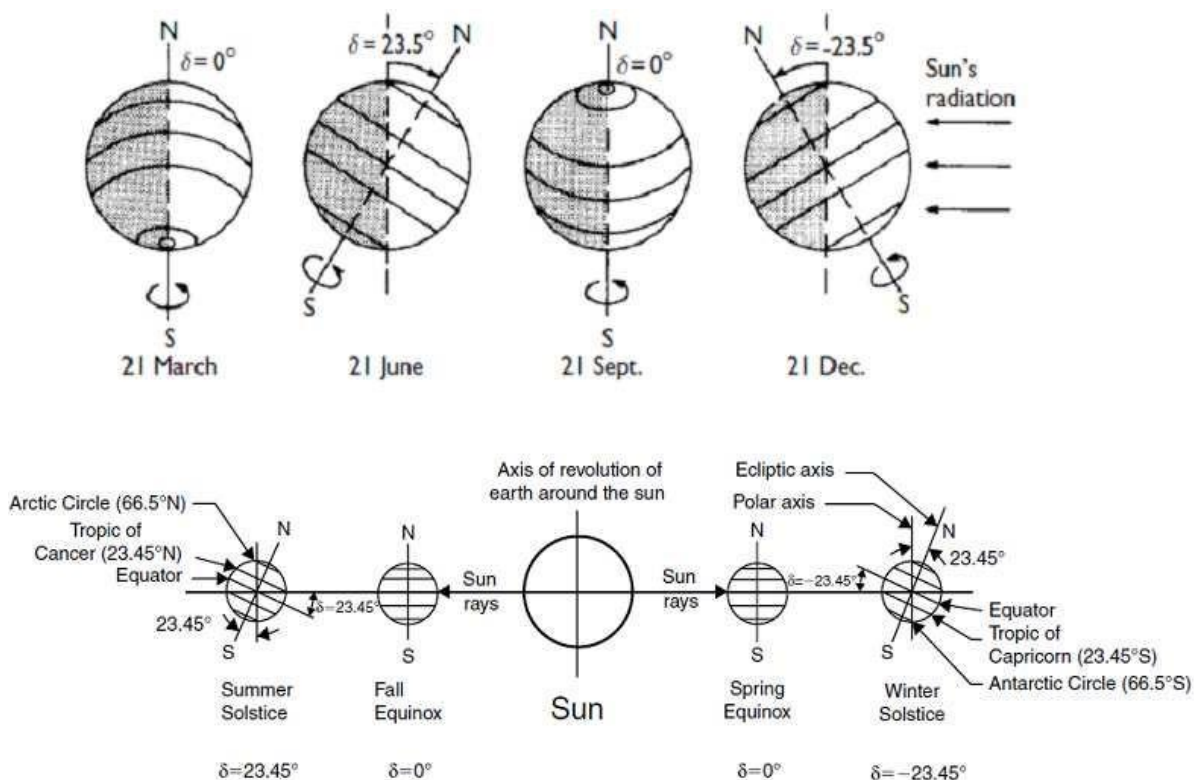


Figure II.3: Variation de la déclinaison

II.3.2.2. Angle horaire (W)

L'angle horaire du soleil est l'angle formé par le plan méridien du lieu et celui qui passe par la direction du soleil si l'on prend comme origine le méridien de Greenwich, l'angle horaire est compris entre 0° et 360°. La valeur de l'angle horaire est nulle à midi solaire, négative le matin, positive dans l'après-midi, et augmente de 15° par heure. Il est calculé comme suite [14]:

$$W = 15^\circ(t_s - 12) \tag{II. 3}$$

Où : t_s est le temps solaire vrai en heures, il est donné par :

$$t_s = t + EOT + (l_{st} - l_{local}) \frac{4min}{degree} \tag{II. 4}$$

Où l_{local} est le temps légal ou temps local standard, donné par une montre; l_{st} est le décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich (égal 1 pour l'Algérie); EOT (min) est l'équation du temps (figure II.14), il est donnée par Woolf [14]:

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

$$x = \frac{360(J-1)}{365,242} \tag{II. 6}$$

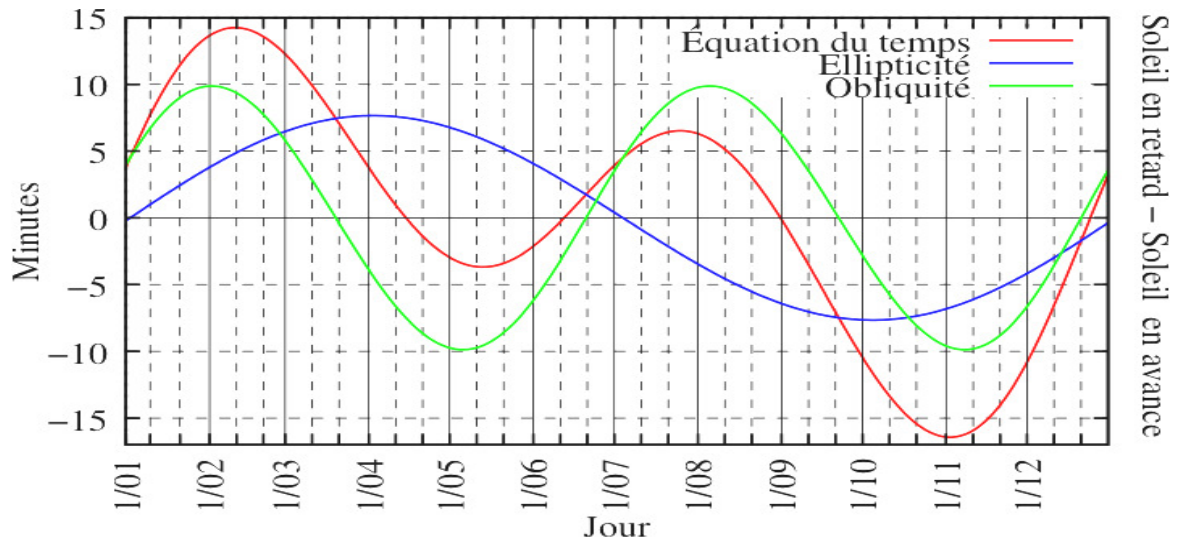


Figure II.4. Equation de temps [14].

II.3.3. Coordonnées horizontales :

Le repérage du soleil se fait par l'intermédiaire de deux angles :

II.3.3.1. Hauteur angulaire (h)

C'est l'angle formé par le plan horizontal au lieu d'observation et la direction du soleil. Cette hauteur durant le jour peut varier de 0 (soleil à l'horizon) à 90 (soleil au zénith), il est donné par l'équation suivante [15]:

$$\sin h = \sin \delta \times \sin \varphi + \cos \delta \times \cos \varphi \times \cos w \tag{II. 7}$$

II.3.3.2. Azimut (γ_s)

C'est l'angle compris entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil. La connaissance de l'azimut du soleil est indispensable pour le calcul de l'angle d'incidence des rayons sur une surface non horizontale. Il est donné par l'équation suivante [15]:

$$\cos(\gamma_s) = \frac{\sin(h) \times \sin(\varphi) - \sin(\delta)}{\cos(h) \times \cos(\varphi)} \tag{II. 8}$$

II.3.3.3. Angle de zénith (θ_z)

C'est l'angle entre la verticale d'une surface et un rayon du soleil, il est donné par l'équation suivante [15]:

$$\cos \theta_z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \delta \cos \varphi \cos w \tag{II. 9}$$

II.3.3.4. Angle horaire du coucher du soleil (ω_s) :

L'angle horaire du coucher du soleil est le déplacement angulaire du soleil autour de l'axe polaire. Dans sa course de l'est vers l'ouest, par rapport au méridien local. Il est donné par l'équation suivante [15]:

$$\omega_s = \arccos(-\tan \varphi \tan \delta) \tag{II. 10}$$

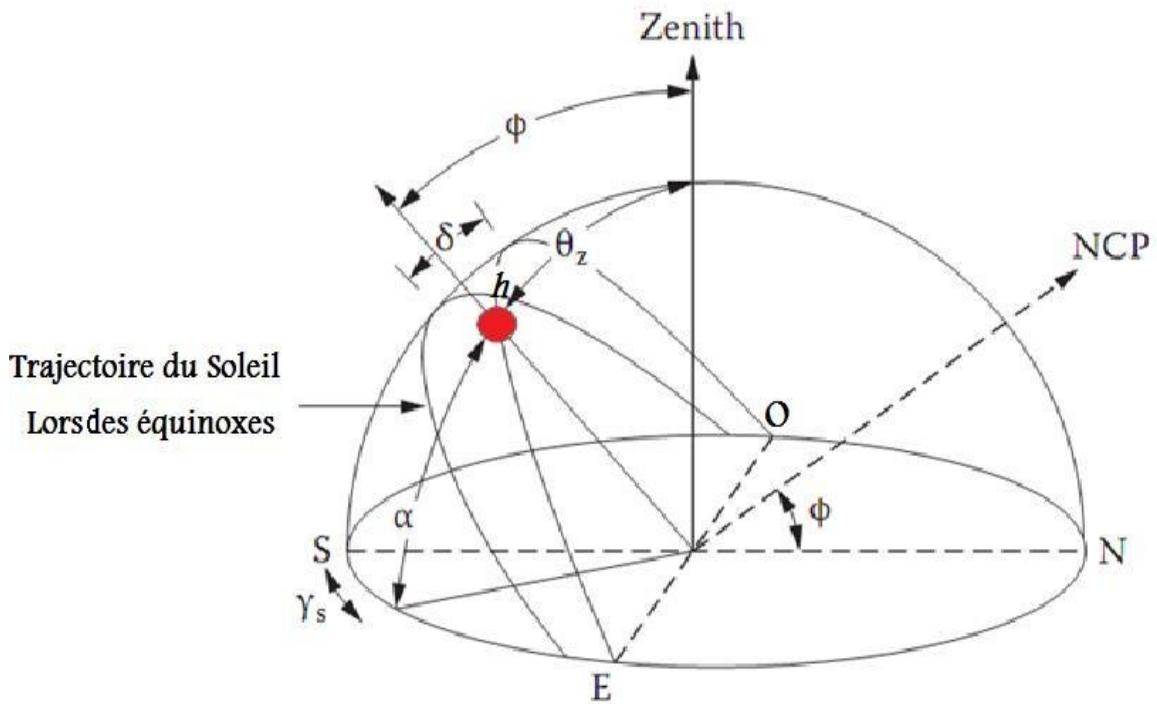


Figure II.5. Coordonnées célestes [13].

II.3.3.5. Angle d'incidence (θ)

C'est l'angle entre le rayon solaire direct et la normale extérieure de la surface du plan, il est donné par l'équation suivante [15] :

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \sin(\delta) \times \sin(\varphi) \times \cos(\beta) - \sin(\delta) \times \cos(\varphi) \times \sin(\beta) \times \cos(\gamma_s) + \cos(\delta) \\ & \times \cos(\varphi) \times \cos(\beta) \times \cos(w) + \cos(\delta) \times \sin(\varphi) \times \sin(\beta) \times \cos(\gamma_s) \\ & \times \cos(w) \end{aligned} \quad (\text{II. 11})$$

β : inclinaison de la surface.

γ_s : angle extérieur d'azimut. C'est l'angle mesuré à partir du sud sur le plan

1 er cas sans poursuite solaire :

$$\theta = 90 - h \quad (\text{II.12})$$

2eme cas poursuite totale :

$$\theta = 0 \quad (\text{II.13})$$

3eme cas poursuite E-O Polaire :

$$\theta = \delta \quad (\text{II.14})$$

4eme cas poursuite E-O horizontale :

$$\cos \theta = \sqrt{\cos(\delta) \times \sin(\varphi) \times \cos(\omega) - \cos \delta \times \cos(\omega)^2} \quad (\text{II.15})$$

5eme cas poursuite N-S horizontale :

$$\cos \theta = \sqrt{1 - \cos^2(\delta) \times \sin^2(\omega)} \quad (\text{II.16})$$

horizontal avec la projection horizontale de la normale sur la surface, il est également donné comme un angle entre le méridien local et la projection horizontale de la normale avec la surface.

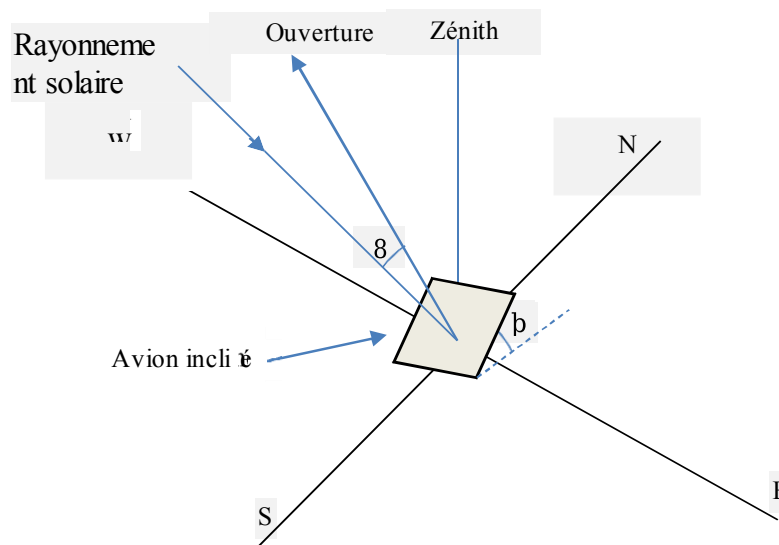


Figure II.6 Angle d'incidence (θ_i)

II.4. Rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est un rayonnement thermique qui se propage sous la forme d'ondes électromagnétiques. Il est composé de toute la gamme de rayonnements (Ultraviolet, Visible et Infrarouge).

II.4.1. Rayonnement extraterrestre

La valeur moyenne du rayonnement solaire tombant sur une surface normale aux rayons du soleil hors l'atmosphère de la terre (extraterrestre), à distance moyenne terre-soleil est appelé la constante solaire I_{sc} . La variation de la distance terre-soleil correspond à une variation de l'éclairement énergétique de ($\pm 3,5\%$) au solstice d'hiver et d'été par rapport à l'éclairement énergétique aux équinoxes. La figure II.6 montre le spectre du rayonnement solaire extraterrestre.

Le calcul du rayonnement extraterrestre peut être effectué par la formule approximative

[11] suivante :

$$H_0 = \left(\frac{24 \times 60}{\pi}\right) I_{sc} \varepsilon [\cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s) + \omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta)] \quad (II.17)$$

$I_{sc} = 0,082 \text{ MJ/m}^2/\text{min}$ (1367 W/m^2) [11].

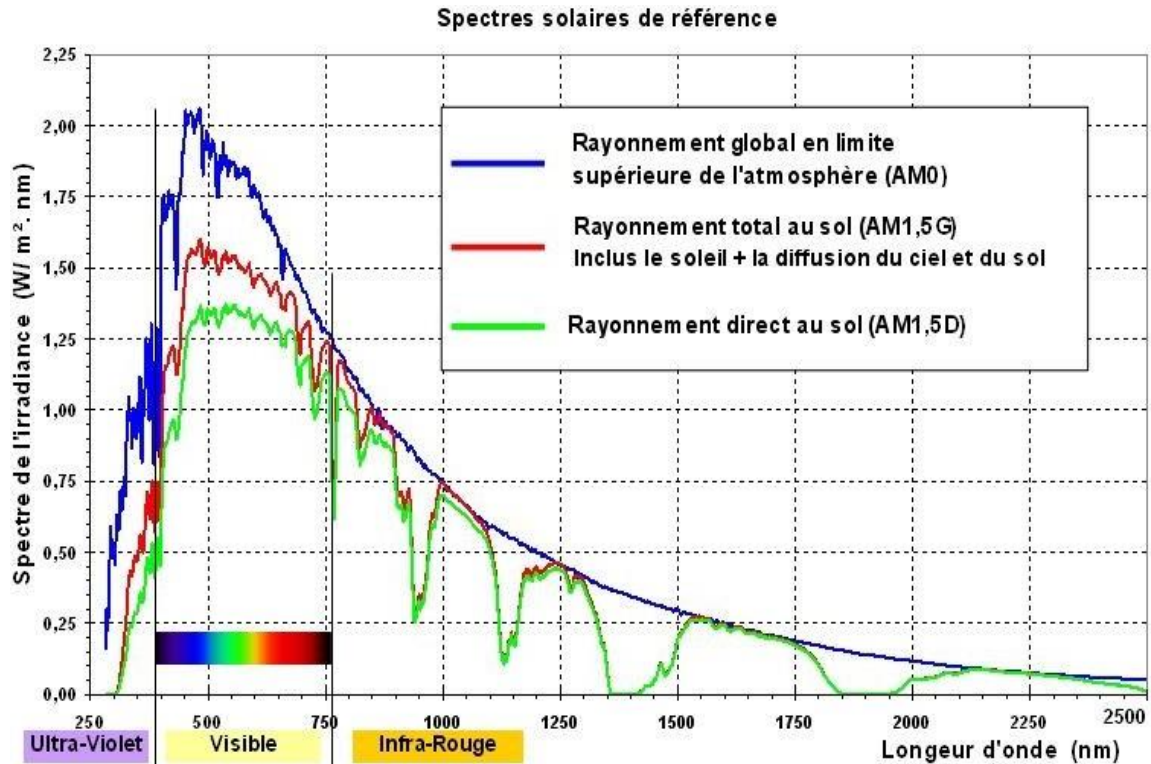


Figure II.7. Spectre du rayonnement solaire .

II.4.2. Rayonnement terrestre

La traversée de l'atmosphère modifie la composition spectrale du rayonnement solaire extraterrestre par des différents phénomènes tels que ; absorption, réflexion, réfraction et diffusion. Le rayonnement solaire arrivant au niveau de notre capteur est la somme de deux rayonnements: direct et diffus (figure II.7).

II.4.2.1. Rayonnement direct I_D

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

II.4.2.2. Rayonnement diffus I_D

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

II.4.2.3. Rayonnement global I_G

Il correspond à la somme des rayonnements solaires direct et diffus reçu sur une surface horizontale à partir d'un angle solide de 2π stéradians.

$$I_G = I_D + I_{BN} = I_{BN} \sin w + I_D \quad (\text{II. 18})$$

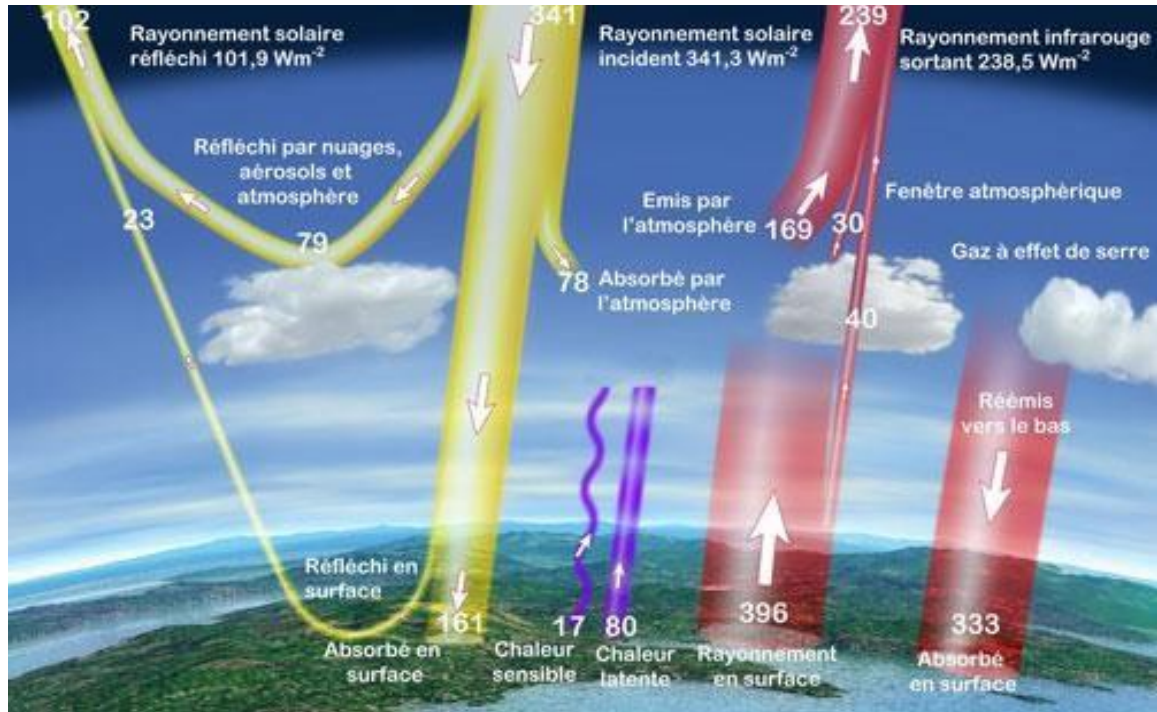


Figure II.8. Atténuation du rayonnement solaire à travers l'atmosphère [16].

II.5. MODELISATION MATHEMATIQUE

II.5.1 Masse atmosphérique

On appelle masse d'air m_A la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol (par ciel clair), par rapport à une traversée verticale au niveau de la mer [17]. Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus il va subir des transformations. Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie, Capderou a utilisé la formule suivante:

$$m_A = \frac{1}{\sin(h) + 9.40 \times 10^{-4} \times [\sin(h) + 0.0678]^{-1.253}} \quad (\text{II.19})$$

II.5.2. Epaisseur optique de l'atmosphère

En 1922, Linke [18] définit l'épaisseur optique de Rayleigh δ_R comme étant l'épaisseur optique totale d'une atmosphère sans nuages, vapeur d'eau et aérosols

Kasten, en 1980 [19] utilisa les données spectrales publiées par Feussneret *al.*, en 1930[20] et proposa l'expression (15) pour δ_R , connue sous le nom de formule pyrhélio métrique de Kasten, où la diffusion moléculaire et l'absorption de la couche d'ozone stratosphérique sont prises en compte.

$$(\delta_R)^{-1} = 9.4 + (0.9 \times m_A) \quad (\text{II. 20})$$

Dans cette formule utilisée depuis fort longtemps, l'absorption par les gaz atmosphériques permanents tels que: CO₂, O₂, NO₂ et le CO n'est pas prise en compte. Capderou, dans l'Atlas Solaire de l'Algérie, 'A.S.A', utilisa la formule pyrhélio métrique de Kasten.

II.5.3. Facteur de trouble de linke

Le facteur de trouble atmosphérique de linke T_L représente le nombre d'atmosphères idéales qui, si elles étaient superposées, entraîneraient la même atténuation que l'atmosphère réelle [21]. L'avantage du facteur de linke est d'exprimer les divers paramètres, tels que la vapeur d'eau atmosphérique et les aérosols en un seul indice facile à utiliser.

Le rayonnement direct normal est exprimé en fonction du facteur T_L , selon la formule suivante [21]:

$$T_l = T_0 + T_1 + T_2 \quad (\text{II.21})$$

$$I_{BN} = I_{sc} \times \varepsilon \times \exp(- T_L \times m_A \times \delta_R) \quad (\text{II.22})$$

ε : la correction de distance entre la terre et le soleil .

La détermination du rayonnement solaire en fonction du facteur de Linke nécessite un modèle mathématique indépendant du rayonnement [22]. La plupart des modèles existants nécessitent la connaissance d'un grand nombre de données relatives au site [23].

Malheureusement, ces données ne sont pas toutes disponibles, par contre des tables relatives au facteur de Linke sont très abondantes [24-25]. Pour cela, nous avons choisi d'utiliser les données du projet SoDa [26] mis en disposition sur un site Web. La méthode adoptée par ce projet fait appel à des données satellitaires d'une part et des données de mesures au sol d'autre part pour calculer le facteur de Linke.

II.5.4. Rayonnement hors atmosphère

Le rayonnement solaire extraterrestre ; fonction de la constante solaire I_{sc} et de la correction de distance entre la terre et le soleil , est donné par l'équation suivante :

$$H_0 = I_{sc} \times \varepsilon \tag{II.23}$$

II.5.5. Rayonnement incident sur un plan horizontal (Modèle Capderou)

Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie (A.S.A) [27], Capderou; selon la préface de C. Perrin de Brichambaut, donna un modèle mathématique pour calculer le rayonnement direct et diffus incident sur un plan horizontal.

Il reste le modèle le plus utilisé en Algérie. Selon ce modèle, le rayonnement global modélisé par Capderou est la somme du rayonnement direct et diffus:

Pour le rayonnement direct, Capderou utilisa la formule (14) pour la masse d'air m_A et la formule (15) pour l'épaisseur totale de l'atmosphère δ_R et donna l'équation (18) qui permet de calculer le rayonnement direct incident sur un plan horizontal.

$I_{BN}^h (h , T_L)$, en fonction de la hauteur du soleil α et du facteur de trouble total de Linke T_L :

$$I_{BN}^h (h, T_L) = H_0 \times \sin (h) \times \exp \left(\frac{-T_L}{0.9 + \frac{9.4}{(0.89)^Z \sin (h)}} \right) \tag{II.24}$$

Pour calculer le rayonnement diffus, Capderou utilisa le facteur de trouble diffusif T_L et donna, en 1987, l'expression (19) fonction de la hauteur du soleil h :

$$I_D^h(h, T_L) = H_0 \times \exp \{ -1 + 1.06 \times \log (\sin (h)) + a - \sqrt{b^2 + a^2} \} \tag{II.25}$$

Avec:

$$a = 1.1 \tag{II.26}$$

$$b = \log(T_L) - 2.80 + 1.02 \times [1 - \sin(h)]^2 \tag{II.27}$$

II.5.6. Rayonnement incident sur un plan quelconque (Modèle Capderou)

Capderou proposa un modèle pour calculer le rayonnement solaire incident sur un plan (γ_s , α) , le rayonnement global étant la somme des deux composantes directe et diffuse.

Capderou utilisa l'angle d'incidence pour calculer le rayonnement direct à l'aide de l'équation suivante :

$$I_{BN}^i(h, TL) = I_{BN}(h, TL) \times \cos(\theta^i) \quad (II.28)$$

Le rayonnement diffus est lui-même décomposé en deux parties : celle provenant du ciel et celle provenant du sol:

$$I_D^i(h, TL) = \delta_a \times \frac{1 - \sin(\gamma_s)}{2} + (\delta_i + \delta_{i'}) \times \frac{1 + \sin(\gamma_s)}{2} + \delta_d \times \cos(\theta^i) + \delta_h \times \cos(\gamma_s) \quad (II.29)$$

Les coefficients δ_j sont les modules des différentes composantes du diffus, associés aux facteurs de forme. Ils donnent le rayonnement diffus reçu par le plan incliné considéré.

II.6. Conclusion

Le rayonnement reçu par un capteur solaire dépend également du niveau d'ensoleillement du site considéré et de son orientation par rapport au soleil.

Un capteur solaire fixe reçoit le maximum d'énergie lorsqu'il est orienté vers le sud et est incliné selon un angle pratiquement égal à la latitude du lieu.

Pour que le rayonnement solaire soit perpendiculaire au panneau solaire, et afin d'optimiser tout le système de captation, il est nécessaire de recourir à la technique de poursuite du soleil qu'on verra en détail dans le chapitre suivant.

III.1 Introduction :

Les concentrateurs cylindro-paraboliques sont la technologie la plus utilisée dans les grandes centrales solaires thermodynamiques pour la production d'électricité. Le miroir concentrateur est un cylindre de section parabolique et ne comporte qu'une seule direction de courbure. La concentration a lieu 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.

De très grandes puissances peuvent être installées par interconnexion de plusieurs concentrateurs. La limitation dans ce cas dépend des pertes de charges et des pertes thermiques qui augmentent avec la taille de l'installation. La Figure (III.1) montre deux exemples d'installations utilisant ce type de capteurs à concentration. La photo de gauche présente l'installation de production d'eau chaude sanitaire d'une prison aux Etats-Unis, où 100 m² de capteurs cylindro-parabolique de petite taille alimentent un ballon d'eau chaude de 20 m³. La photo de droite quant à elle, n'est autre qu'un aperçu du champ de capteurs de la centrale solaire thermodynamique Solar Electric Generating System (SEGS) de Kramer Junction (Californie, Etats-Unis) [28].

L'analyse optique et thermique de ces collecteurs est très importante pour le calcul des pertes optiques et thermiques et permet aussi d'évaluer les effets de la dégradation du collecteur.



Figure. III.1: Photographe de deux installations utilisant des capteurs cylindro parabolique. [28]

III.2. Structure générale de système de concentration cylindro-parabolique :

La technologie des concentrateurs solaires cylindro-paraboliques est actuellement la plus répandue, l'application la plus importante de cette technologie est la production de l'électricité.

En 1984, la première centrale solaire commerciale, SEGS I était installée en Californie par la société Luz International Limited [29]. La centrale thermique solaire à CCP est constituée de trois éléments principaux:

-Le champ solaire, qui utilise une série de longs concentrateurs cylindro-paraboliques.

- Le système de transfert de la chaleur.
- Le système de génération électrique (Turbine + Générateur).

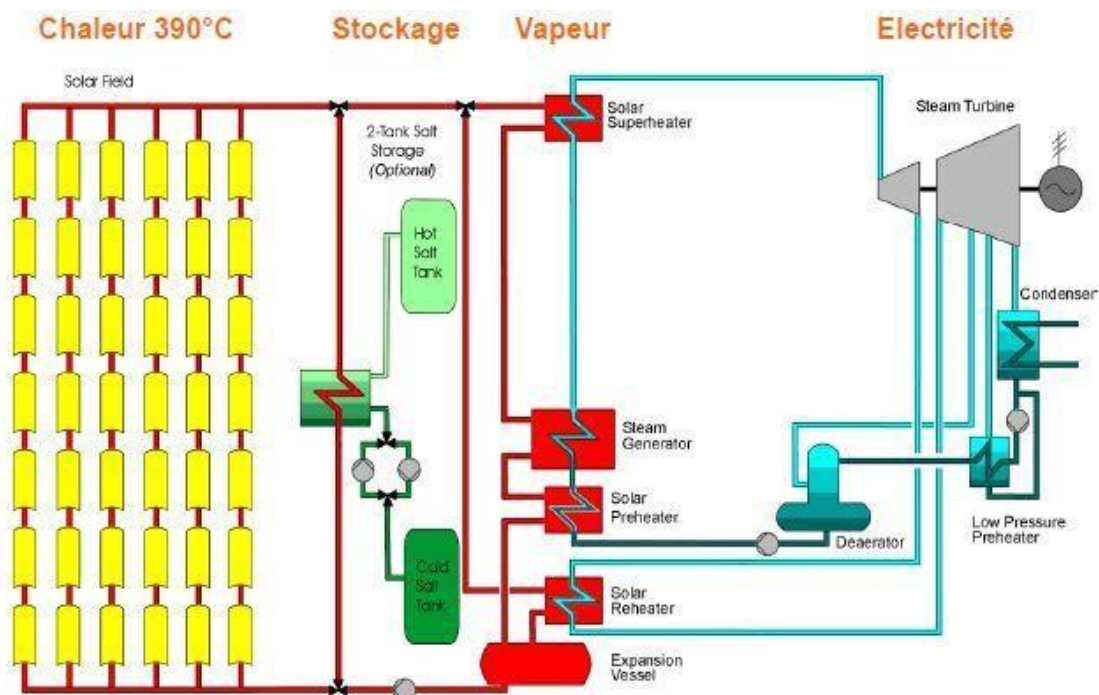


Figure. III.2 : Centrale type

III.3. Les composants d'un concentrateur cylindro parabolique :

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, afin d'augmenter la concentration du rayonnement au niveau de l'absorbeur, les différentes parties du CCP sont les suivantes :

- Structure support
- Moteurs (hydraulique, moteur électrique + réductions)
- Contrôleurs (boucles ouvertes ou fermées)
- Miroir (verre épais, mince)
- Tube absorbeur (sélectif, sous vide, connectiques)
- Suivi solaire

Et Les composants principaux qui caractérisent le fonctionnement d'un cylindro parabolique sont comme suit [30] :

III.3.1. Le collecteur :

III.3.1.1. Le réflecteur parabolique :

Les miroirs sont composés de verre pauvre en fer, dont la transmissivité atteint 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%.

III.3.1.2. 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 (III.3). Il est placé le long de la ligne focale du concentrateur cylindro- parabolique. Il doit avoir les caractéristiques suivantes :

Chap03: Caractéristiques géométriques et thermiques d'un CCP

- 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.

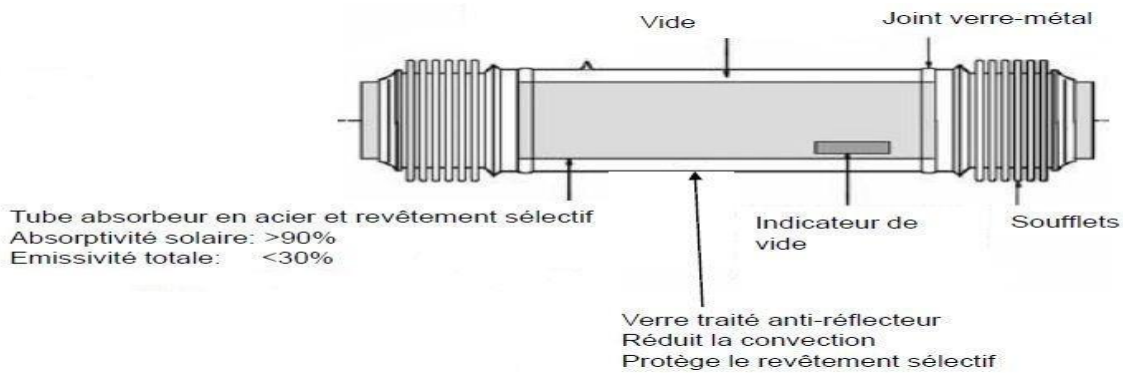


Figure. III.3 : structure de tube absorbeur



Figure. III.4 : Un tube absorbant intégré dans un collecteur parabolique (ci-dessus à gauche), Siemens UVAC 2010 (ci-dessus à droite), Archimède HEMS08 (ci-dessous à gauche), Schott PTR 70 (ci-dessous à droite) (sources: DLR)

Chap03: Caractéristiques géométriques et thermiques d'un CCP

III.3.1.3. Les fluides caloporteurs :

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

III.3.2. Le champ solaire :

Le champ solaire est la partie réceptrice de l'installation : la radiation solaire y est transformée en énergie thermique. Les collecteurs sont connectés en série pour former de longues files qui à leur tour sont connectées en parallèle. La taille du champ solaire dépend de la puissance désirée et de la température du fluide caloporteur en sortie. Les collecteurs sont alignés dans la direction nord-sud, et disposent d'un système mono axial de poursuite du soleil dans la direction est-ouest. Un capteur permet de contrôler la position du soleil par rapport à les rangées de collecteur. Cette information est transmise au système de contrôle central qui ajuste l'angle d'inclinaison en fonction.

III.4. 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.

III.4.1. Les paramètres géométriques : [31]

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 (III.5)

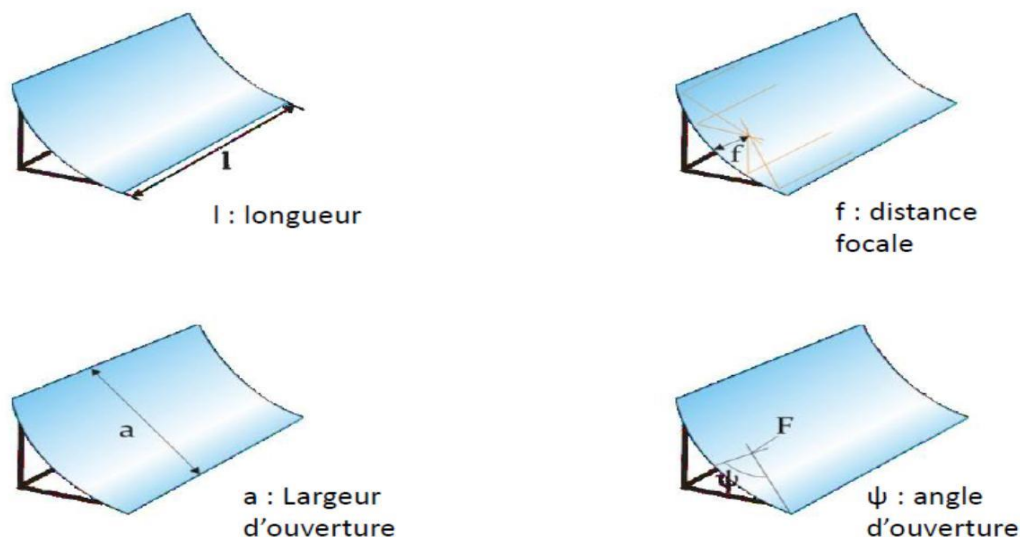


Figure. III.5 : les paramètres géométriques d'un cylindro parabolique

Chap03: Caractéristiques géométriques et thermiques d'un CCP

III.4.1.1. La longueur de cylindro parabolique :

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

III.4.1.2. 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 (III.6). L'équation de parabole est :

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

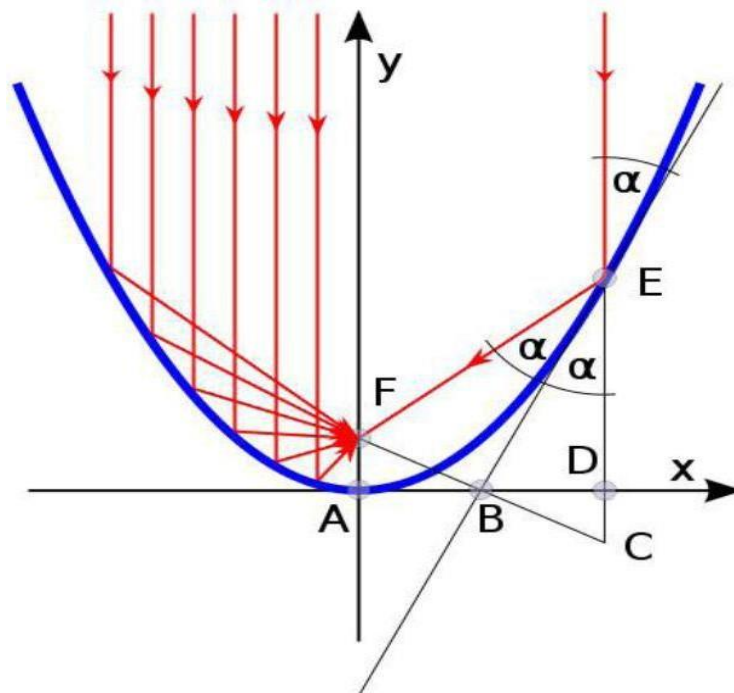


Figure. III.6 : Chemin des rayons parallèles dans un miroir parabolique

III.4.1.3. L'angle d'ouverture (ψ) :

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

Chap03: Caractéristiques géométriques et thermiques d'un CCP

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. Peut être exprimée en fonction du rapport entre la largeur d'ouverture et la distance focale:

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

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

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

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

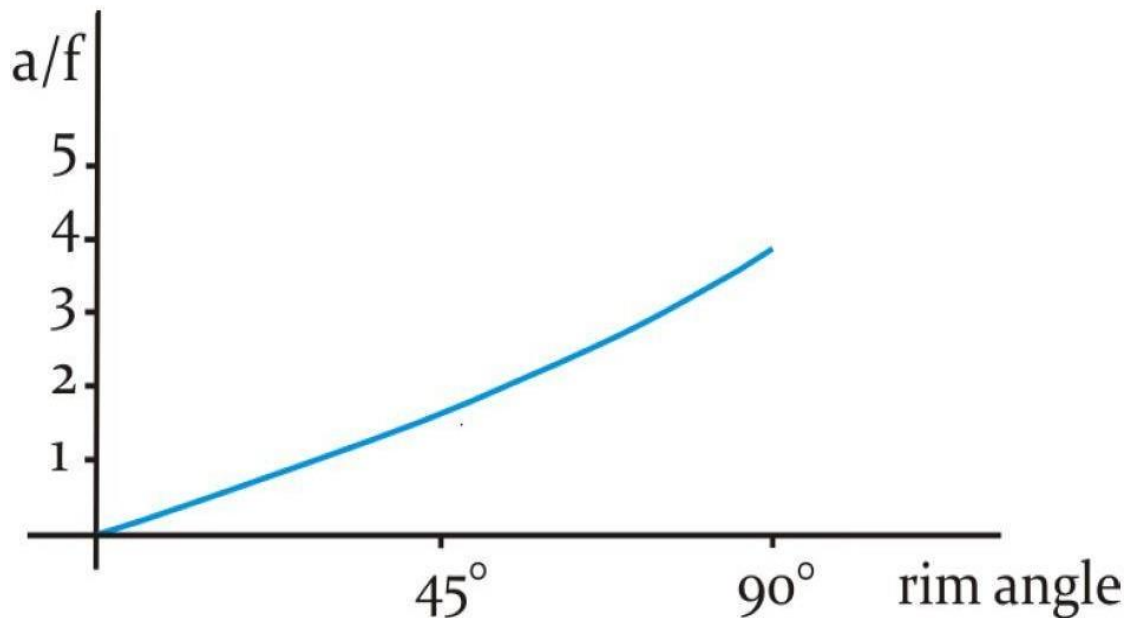


Figure. III.7 : Relation entre l'angle d'ouverture et la valeur a/f.

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 (III.8) 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 °.

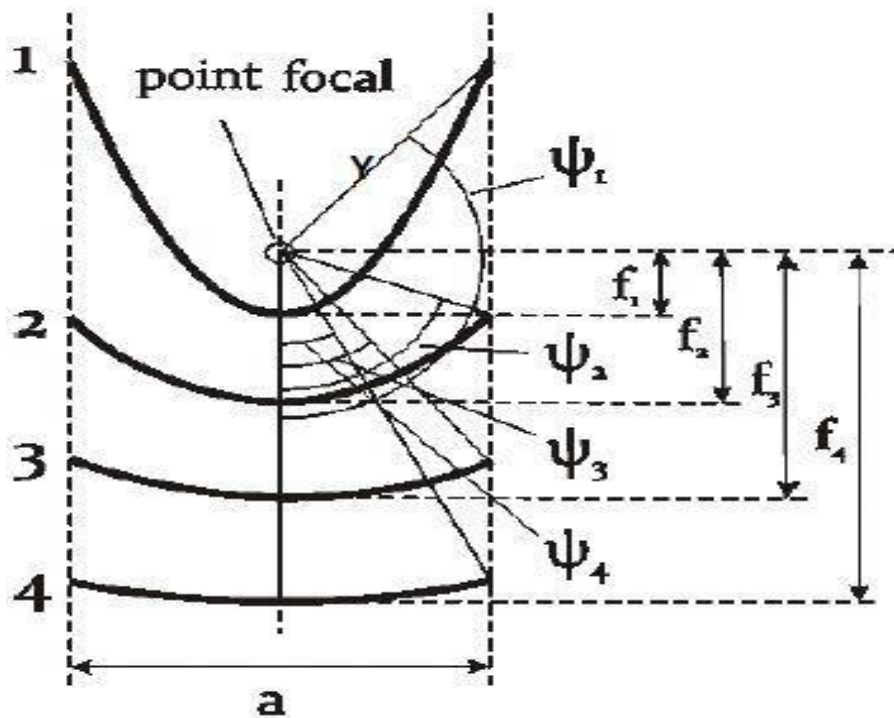


Figure. III.8 : Relation entre la focale et l'angle d'ouverture pour une ouverture constante

III.4.1.4. La largeur de l'ouverture :

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.

III.4.2. Les paramètres Optiques :

III.4.2.1 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 et de la longueur du collecteur . Figure(III.9)

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

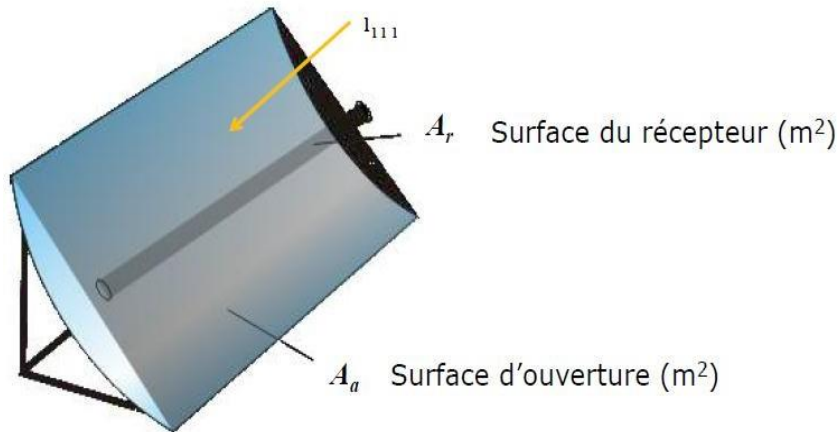


Figure. III.9: Surface d'ouverture du collecteur et Surface d'ouverture du récepteur

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

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

III.4.2.2. 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 défini comme le rapport de la densité de flux radiant à la ligne focale, à l'éclairement direct à l'ouverture du collecteur, :

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad (\text{III } 6)$$

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

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

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 .

Chap03: Caractéristiques géométriques et thermiques d'un CCP

Alors, la concentration géométrique est donné par :

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

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

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

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.

III.5. 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 (III.10). 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.

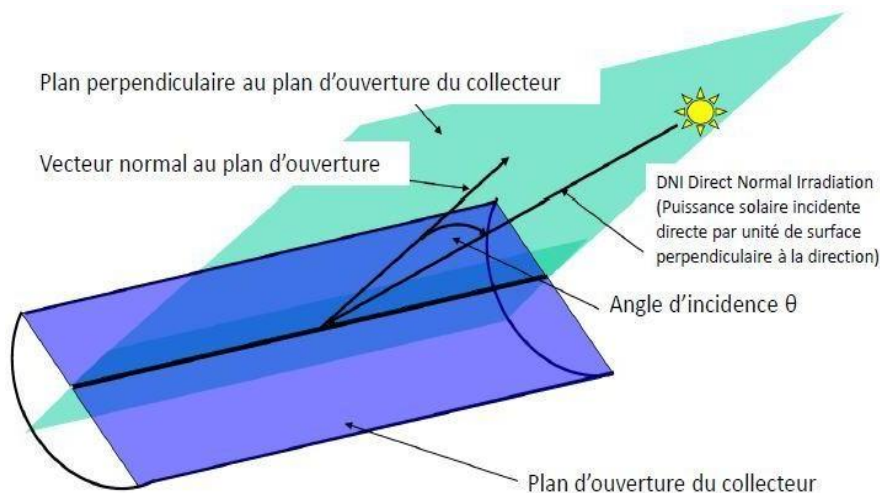


Figure. III.10 : le concentrateur cylindro parabolique en position de suivi

Chap03: Caractéristiques géométriques et thermiques d'un CCP

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.
- Poursuite totale, permet le suivi du soleil à deux axes

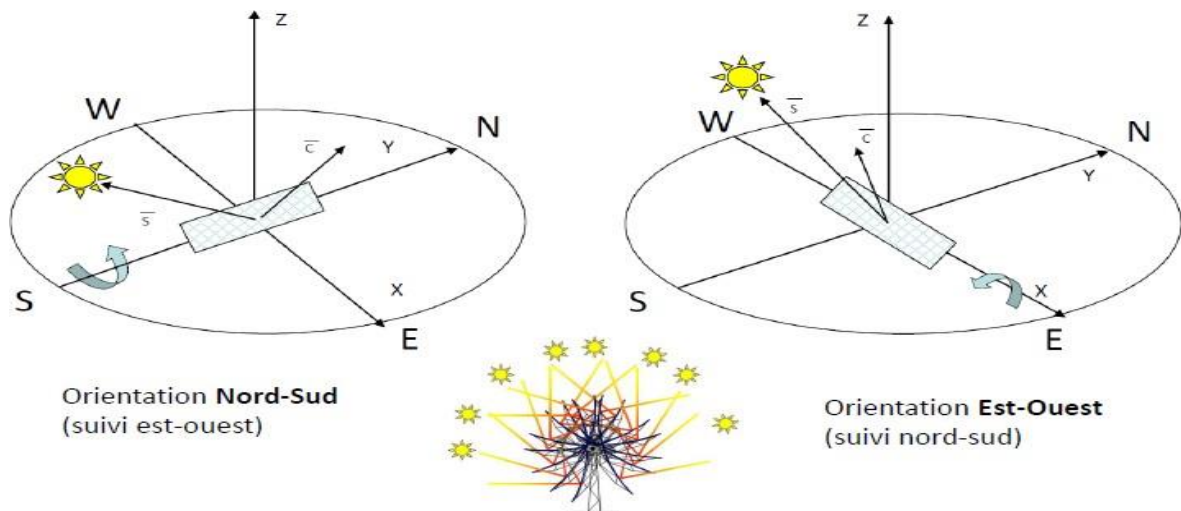
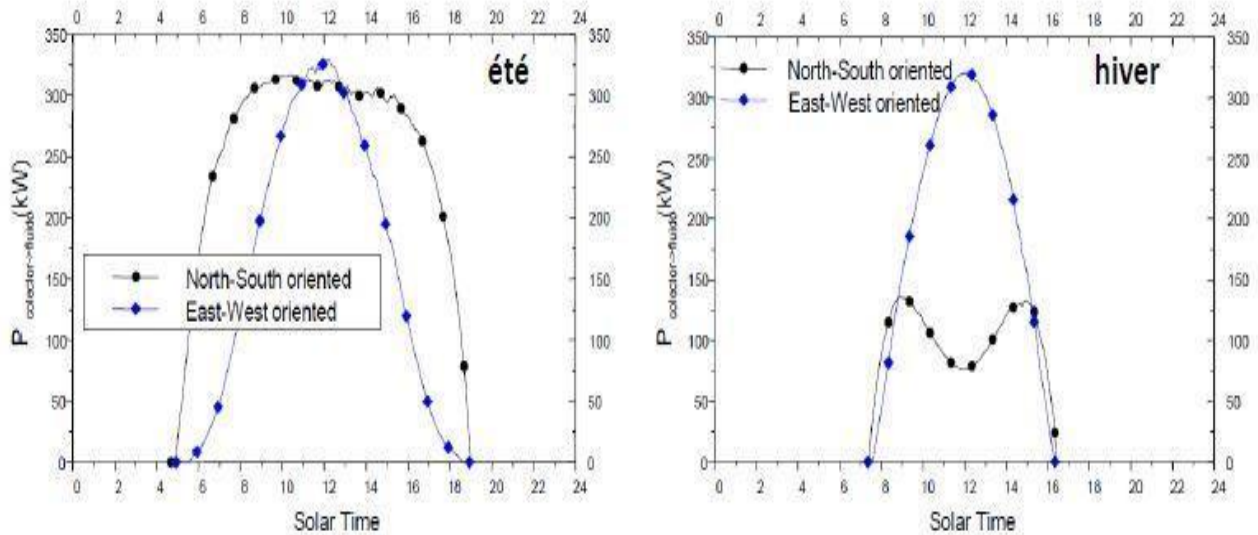


Figure. III.11: Orientation de concentrateurs cylindro parabolique

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.

Chap03: Caractéristiques géométriques et thermiques d'un CCP

Et dans les deux graphiques qui suivent figure (III.12), 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. III.12: simulation de l'influence de l'orientation à PSA du collecteur ET-100

III.6. Le Bilan thermique:

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.

III.6.1. Le bilan thermique du fluide :

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

$$\Delta Q_1(x, t) = \rho_1 C p_1 A_1 \Delta x T_1(x, t)$$

$$Q_1 = \rho_1 C p_1 V T_1(x, t)$$

$$\rho_1 C p_1 A_1 \Delta x \frac{dT_1}{dt} = Q_1(x, t) - Q_1(x + \Delta x, t) + q_{utile}(x, t)$$

La simplification de l'équation donne :

Chap03: Caractéristiques géométriques et thermiques d'un CCP

$$\frac{dT_1(x,t)}{dt} + \vartheta \frac{dT_1(x,t)}{dx} = \frac{q_{utile}(x,t)}{\rho_1 c p_1 A_1} \quad (\text{III } 10)$$

ϑ : 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

$$q_{utile} = h_1 A \Delta T = h_1 \pi D_1 (T_2 - T_1) \quad (\text{III } 11)$$

h_1 : Le coefficient de transfert de chaleur par convection

A : La surface interne du tube

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 :

$$N_u = 0.0023 \cdot R_{e1}^{0.8} \cdot P_{r1}^{0.4} = \frac{h_1 D_1}{\lambda_1} \quad (\text{III } 12)$$

$$R_e = 4 \frac{\rho_1 V_1}{\pi D_1 u_1} \quad (\text{III } 13)$$

λ_1 : La conduction thermique du fluide

u_1 : La viscosité dynamique du fluide $u_1 = \vartheta_1 \cdot \rho_1$

ϑ_1 : La viscosité cinématique du fluide

Le nombre de Prandtl est donné par :

$$P_{r1} = \frac{u_1 c p_1}{\lambda_1} \quad (\text{III } 14)$$

Les propriétés du fluide caloporteur $c p_1$, λ_1 , u_1 et ρ_1 sont en fonction de la température T_2 .

III.6.2. Le bilan thermique de tube absorbeur :

Pour le tube absorbeur le bilan thermique s'écrit :

$$\Delta Q_2(x,t) = \rho_2 C p_2 A_2 \Delta x T_2(x,t)$$

$$\frac{d\Delta Q_2(x,t)}{dt} = (q_{absorbée}(t) - q_{interieur}(x,t) - q_{utile}(x,t)) \Delta x \quad (III\ 15)$$

La simplification de l'équation donne :

$$\frac{dT_2(x,t)}{dt} = \frac{1}{\rho_2 C p_2 A_2} (q_{absorbée}(t) - q_{interieur}(x,t) - q_{utile}(x,t)) \quad (III\ 16)$$

$q_{absorbée}$: La quantité d'énergie solaire absorbée de la thermodynamique.

La puissance absorbée par unité de surface d'ouverture peut être écrit comme suit :[9]

$$q_{absorbée} = I \cdot \rho \cdot \gamma \cdot \tau \cdot C_G \quad (III\ 17)$$

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

$$q_{interieur} = q_{interieur}^{convection} + q_{interieur}^{rayonnement} \quad (III\ 18)$$

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 [34], cependant l'enveloppe du verre est usuellement plus froid que le tube absorbeur ($T_2 > T_3$) :

$$q_{interieur}^{convection} = \frac{2\pi \lambda_{eff}}{\ln \frac{D_3}{D_2}} (T_2 - T_3) \quad (III\ 19)$$

λ_{eff} : La conductivité thermique effective.

λ_{air} : 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 [32] :

$$\frac{\lambda_{eff}}{\lambda_{air}} = 0.386 \left(\frac{P_r^{air}}{0.861 + P_r^{air}} \right)^{\frac{1}{4}} (F_{cyl} R_{aL})^{\frac{1}{4}} \quad (III\ 20)$$

Chap03: Caractéristiques géométriques et thermiques d'un CCP

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

R_{aL} : Le nombre de Rayleigh.

$$F_{cyl} = \frac{\left(\ln \frac{D_3}{D_2}\right)^4}{L^3 \left(D_2^{-\frac{1}{5}} + D_3^{-\frac{3}{5}}\right)^5} \quad (\text{III 21}) \quad R_{aL} = \frac{g \beta_{air} (T_2 - T_3)}{\vartheta_{air} \alpha_{air}} L^3 \quad (\text{III 22})$$

L : La longueur effective de l'absorbeur $L = \frac{D_3 - D_2}{2}$

β_{air} : Facteur de dilatation volumique du fluide

α_{air} : Absorptivité

Les propriétés physiques de l'air sont évaluées. $T_{moy} = \frac{T_2 - T_3}{2}$

Le transfert thermique par rayonnement $q_{interieur}^{rayonnement}$ entre deux cylindres concentriques et horizontaux entre le tube absorbeur et l'enveloppe du verre peut être exprimé par la relation suivante [33] :

$$q_{interieur}^{rayonnement} = \frac{\pi D_2 \sigma (T_2^4 - T_3^4)}{\frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_3} \left(\frac{D_2}{D_3}\right)} \quad (\text{III 23})$$

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

σ : Constant de Stefan-Boltzmann

Alors :

$$q_{interieur} = \frac{2\pi \lambda_{eff}}{\ln \frac{D_2}{D_3}} (T_2 - T_3) + \frac{\pi D_2 \sigma (T_2^4 - T_3^4)}{\frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_3} \left(\frac{D_2}{D_3}\right)} \quad (\text{III 24})$$

III.6.3. Le bilan thermique de l'enveloppe en verre :

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

$$\Delta Q_3(x, t) = \rho_3 C p_3 A_3 \Delta x \Delta T_3(x, t)$$

$$\frac{dT_3(x, t)}{dt} = \frac{1}{\rho_3 C p_3 A_3} (q_{absorbée}(t) - q_{exterieur}(x, t)) \quad (\text{III 25})$$

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

Chap03: Caractéristiques géométriques et thermiques d'un CCP

$$q_{exterieur}(x,t) = q_{exterieur}^{convection} + q_{exterieur}^{rayonnement} \quad (\text{III } 26)$$

$$q_{exterieur}^{convection} = h_3 \pi D_4 (T_3 - T_{amb})$$

Pour introduire h_3 :

$$Nu_3 = \frac{h_3 D_3}{\lambda_3}$$

$$Nu_3 = 0.3 + \frac{0.62 Re_3^{\frac{1}{2}} Pr_3^{\frac{1}{3}}}{\left[1 + \left(\frac{0.4}{Pr_3}\right)^{\frac{2}{4}}\right]^{\frac{1}{4}}} \left[1 + \left(\frac{Re_3}{282000}\right)^{\frac{5}{8}}\right]^{\frac{4}{5}} \quad (\text{III } 27)$$

$$Re_3 = \frac{\rho_{air\ amb} V_{vent} D_4}{\mu_{air\ amb}} \quad (\text{III } 28)$$

$$q_{exterieur}^{rayonnement} = \varepsilon_3 \sigma \pi D_4 (T_3^4 - T_{amb}^4) \quad (\text{III } 29)$$

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

Au cours de cette modélisation on a déduit les trois corrélations représentatives (III- 11), (III-17) et (III-26) du bilan thermique au niveau de l'absorbeur.

III.7. Conclusion :

Dans ce chapitre on a présenté la structure générale et les composants et la géométrie et l'optique et le système de suivi solaire et le billon thermique d'un concentrateur cylindro-parabolique.

1. Introduction

Dans ce chapitre nous procéder au calcul optique et thermique d'un ensemble de capteurs solaires cylindro-paraboliques assemblés pour former une boucle pour la conversion d'énergie solaire-thermique. La première partie est consacrée à l'énergie solaire disponible au niveau de la surface d'ouverture du capteur selon le mode de poursuite solaire. Dans la deuxième partie, nous allons déterminer les profils de température respectivement du fluide caloporteur, du tube absorbeur et de la vitre en fonction de la longueur de la boucle solaire. Le rendement thermique de la boucle solaire a été évalué en fonction des paramètres optiques et thermiques du modèle. Les résultats obtenus sont tracés via le logiciel Matlab pour les deux parties.

2. Méthode de calcul

2.1 Partie optique

Les étapes de calcul et les données d'entrée du modèle sont présentées comme suit :

- Donner la latitude du lieu (site bouira) : 36°
- Choisir le numéro du jour : Journées types : Solstice d'hiver, Equinoxes, Solstice d'été.
- Donner la constante solaire $I_{sc}=1367$
- Calcul de la correction de distance entre la terre et le soleil (Eq. II.1)
- Calcul de la déclinaison de la terre (Eq. II.2)
- Calcul de l'angle horaire du lever ou coucher du soleil (Eq. II.10)
- Définir l'Angle horaire (Eq. II.3)
- Calcul de la Hauteur du soleil (Eq. II.7)
- Calcul de l'angle d'incidence suivant le mode de poursuite (Eq. II.12.13.14.15.16)
- Calcul du Facteur de trouble de linke $TL=T0+T1+T2$ (Eq.II.22)
- Calcul du Rayonnement direct I_{BN} (Eq. II.16)
- Calcul du Rayonnement diffus I_D (Eq. II.17)
- Calcul du Rayonnement global $I_G= I_{BN}+ I_D$

2.2. Partie thermique

Le calcul thermique du capteur solaire a été obtenu pour le cas d'un régime permanent en utilisant une méthode itérative pour la détermination des températures du fluide caloporteur (Therminol VP1), du tube absorbeur et de la vitre protectrice. Les équations respectives ont été définies en chapitre III. Les flux thermiques échangés par rayonnement ont été exprimés en convection équivalente et ce, pour linéariser le système d'équations obtenus. Les coefficients d'échange thermiques et paramètres optiques sont évalués à chaque pas de calcul (dx : pas de longueur).

Le système de trois équations linéarisé (**Eq. IV-1**) pour la détermination des trois températures T_f , T_{abs} et T_v est résolu analytiquement pour chaque pas de longueur.

$$\begin{cases} \mathbf{a}_1 T_f + \mathbf{b}_1 T_{abs} = \mathbf{c}_1 \\ \mathbf{a}_2 T_f + \mathbf{b}_2 T_{abs} + \mathbf{c}_2 T_v = \mathbf{d}_2 \\ \mathbf{b}_3 T_{abs} + \mathbf{c}_3 T_v = \mathbf{d}_3 \end{cases} \quad (\text{IV-1})$$

Où les a_i , b_i et c_i sont des constantes de substitution définies comme suit :

Constantes de substitution fluide:

$$a_1 = \frac{1+h_{cvf} \pi d_1 dx}{2 \times m_f \times cp_f}$$

$$b_1 = \frac{-h_{cvf} \pi d_1 dx}{m_f \times cp_f}$$

$$c_1 = \frac{1-h_{cvf} \pi d_1 dx}{2 \times m_f \times cp_f} \times T_{fe}$$

Constantes de substitution Absorbeur :

$$a_2 = \frac{-h_{cvf} \pi d_1 dx}{2}$$

$$b_2 = h_{cvf} \pi d_1 dx + h_{c_vrv} \pi d_2 dx + h_{rv} \times \pi d_2 dx$$

$$c_2 = -h_{c_vrv} \pi d_2 dx - h_{rv} \pi d_2 dx$$

$$d_2 = \phi_{sr} \pi d_2 dx + \left(\frac{h_{cvf} \pi d_1 dx}{2} \right) \times T_{fe}$$

Constantes de substitution Vitre :

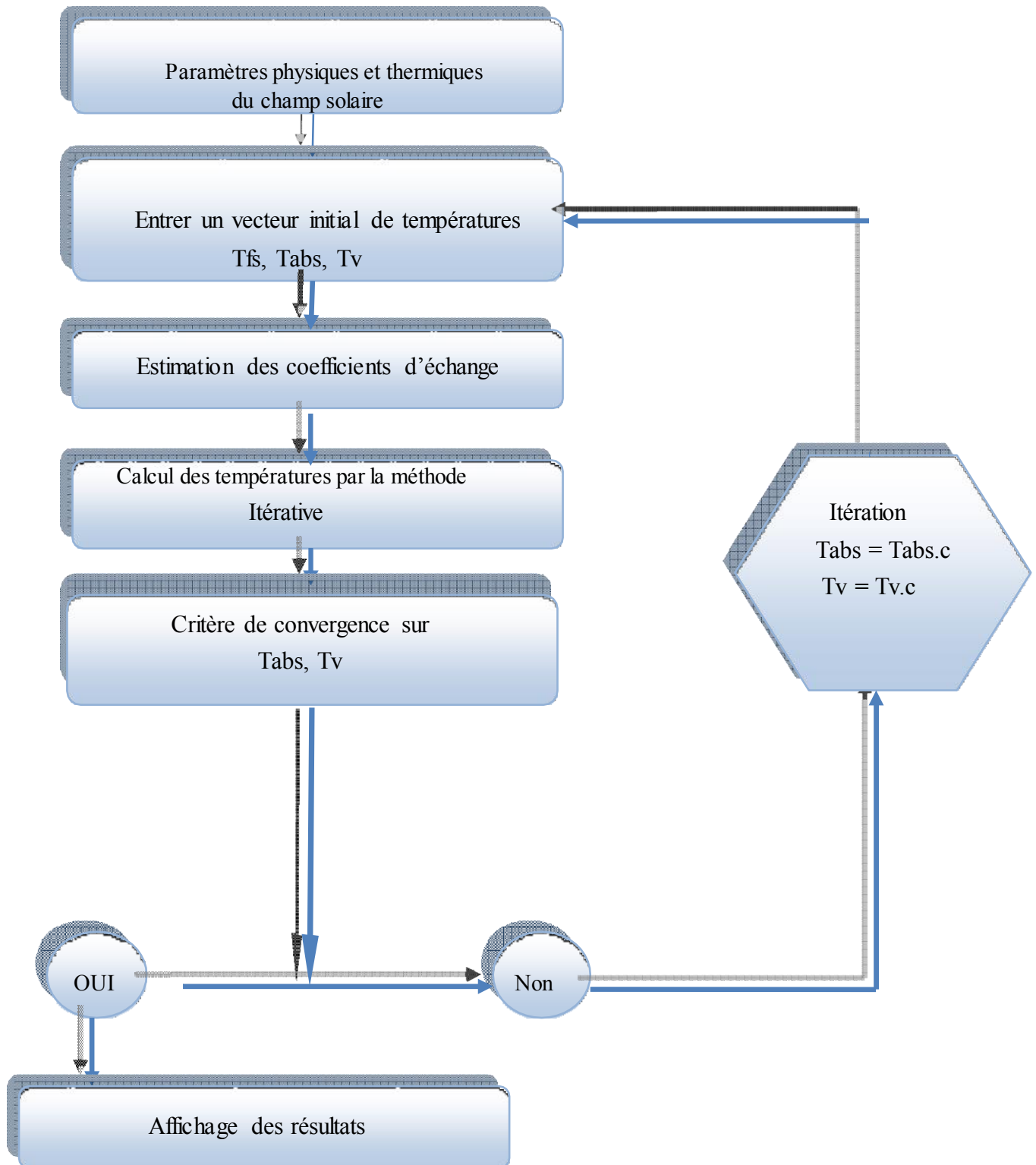
$$b_3 = h_{c_vrv} \pi d_3 dx + h_{rv} \pi d_3 dx$$

$$c_3 = -h_{c_vva} \pi d_4 dx - h_{rva} \pi d_4 dx - b_3$$

$$d_3 = \phi_{sv} \pi d_4 dx - h_{rva} \pi d_4 dx T_c - h_{c_vva} \pi d_4 dx T_a$$

Où : ϕ_{sr} et ϕ_{sv} en (W/m^2) sont respectivement les rayonnements concentrés absorbés par la surface externe du tube absorbeur et de la vitre. $T_c = T_a - 8$, est la température du ciel et T_a celle de l'air extérieur en (K).

2.3 Organigramme de calcul



Organigramme de simulation.

2.4 Les Caractéristiques du Prototype

Caractéristique géométrique et thermique du collecteur			
Diamètre intérieur de tube absorbeur (m)	0.066	L'émissivité de tube absorbeur	0.05
Diamètre extérieur de tube absorbeur (m)	0.070	L'émissivité de l'enveloppe en verre	0.85
Diamètre intérieur de l'enveloppe en verre (m)	0.109	La transmissibilité de l'enveloppe en verre	0.95
Diamètre extérieur de l'enveloppe en verre (m)	0.115	L'absorptance de l'enveloppe en verre	0.05
Concentration de panneau	82	La réflectivité de l'enveloppe en verre	0.05
L'absorptance de tube absorbeur	0.90	La réflectivité de tube absorbeur	0.15
Longueur de la boucle (m)			600

Tableau IV.1: Paramètres d'un collecteur cylindro-parabolique.

3. Calcul du rayonnement global :

Nous avons Calculé et tracer le rayonnement global pour un capteur CCP avec différents modes de poursuite solaire

- Lieu Bouira

- Journées: solstice d'hiver, solstice d'été, équinoxes

Mode de poursuite:

- sans poursuite solaire
- Poursuite totale
- poursuite E-O Polaire
- poursuite E-O horizontale
- poursuite N-S horizontale

3.1 Courbes d'angle d'incidence

La variation de l'angle d'incidence des rayons solaires en fonction des modes de poursuite du soleil sont présentés dans les figures qui suivent pour les journées types choisies.

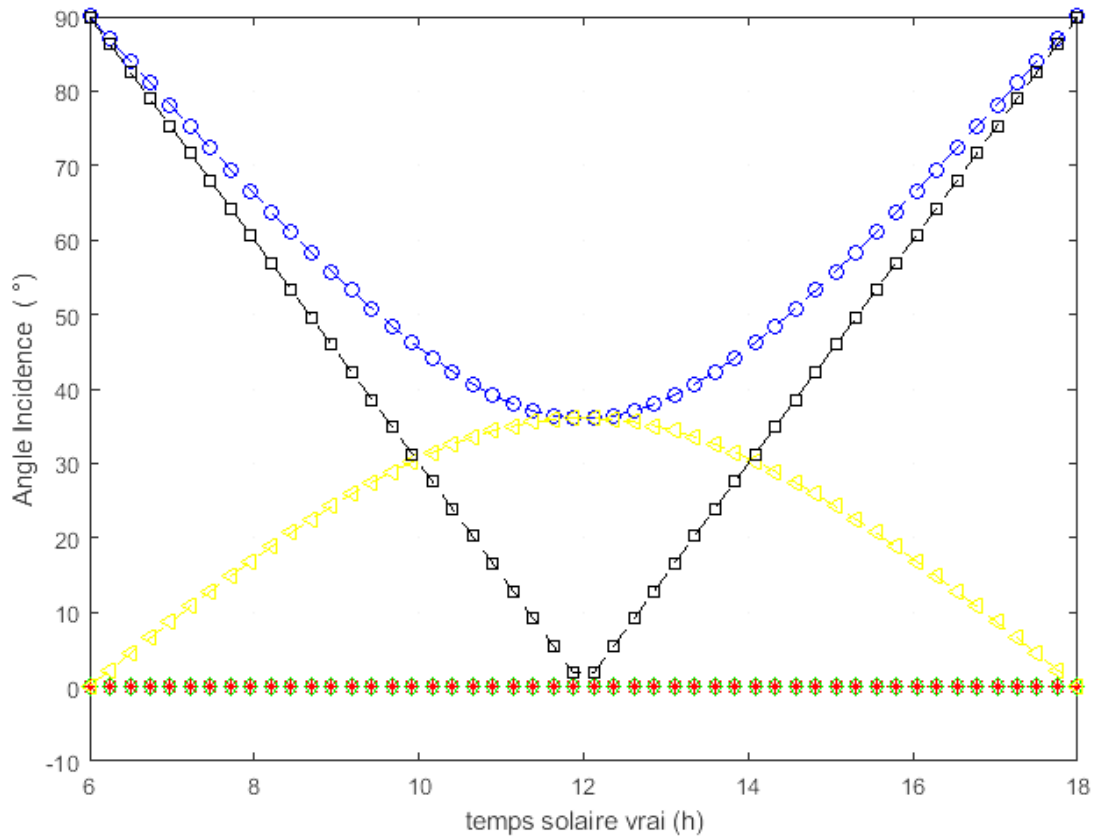


Figure IV.1 : Variation de l'angle incidence avec des différentes poursuites solaires durant la journée des équinoxes (21 Mars et 21 Septembre).

Les codes couleurs des figures IV.1 pour les modes de poursuite solaire :

- » Sans poursuite solaire
- » Poursuite totale
- » Poursuite E-O Polaire
- » Poursuite E-O horizontale
- » Poursuite N-S horizontale

Le résultat en figure IV-1, est évident pour le mode de poursuite totale dont l'angle d'incidence est nul durant toute la journée (poursuite avec deux axes). Le même résultat est observé pour le mode de poursuite N-S polaire étant donné qu'aux équinoxes la déclinaison de la terre est nulle (durée du jour est égale à la durée de la nuit). L'angle d'incidence est très élevé pour le cas sans poursuite solaire et celui du mode N-S horizontal surtout en début en en fin de journée. Par contre le mode de poursuite solaire E-O horizontal présente une variation d'angle d'incidence modéré malgré qu'il atteint son pic à midi solaire.

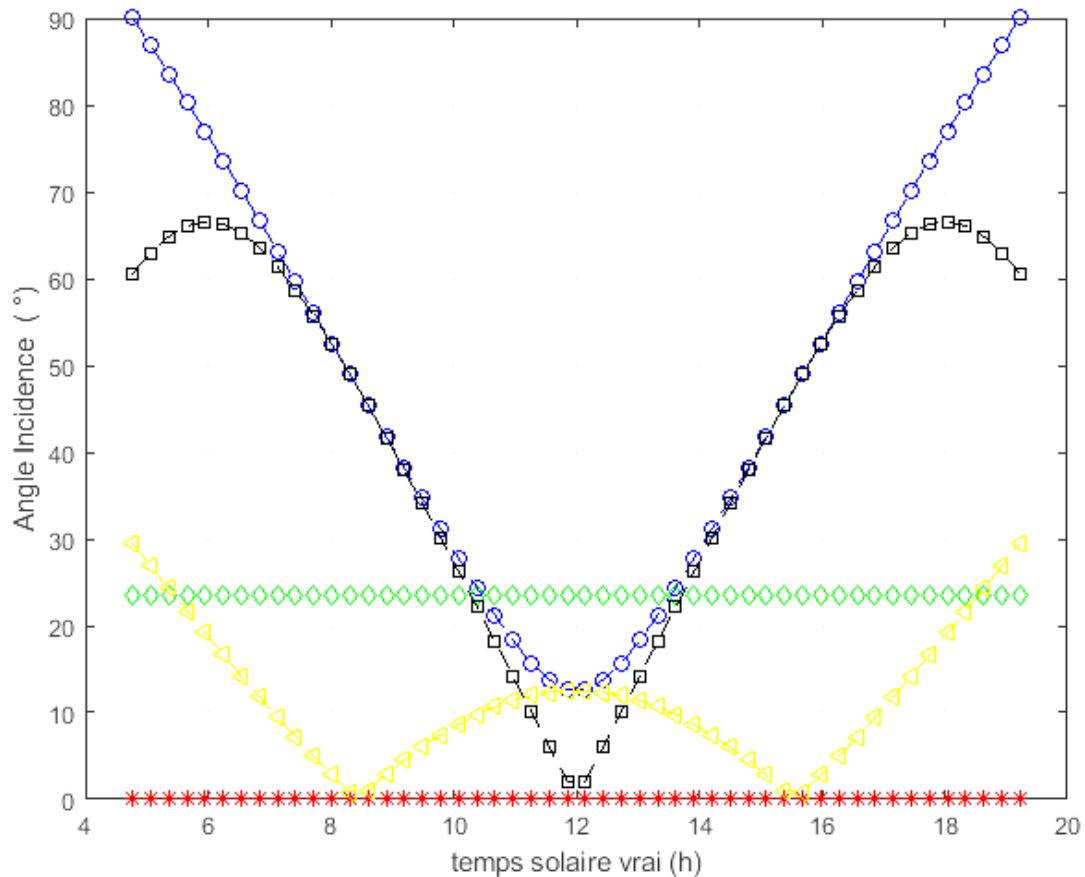


Figure IV.2 : la variation d'angle incidence avec des différentes poursuites solaires durant la journée solstice d'été (21 juin).

Les codes couleurs des figures IV.2 pour les modes de poursuite solaire :

- » Sans poursuite solaire
- » Poursuite totale
- » Poursuite E-O Polaire
- » Poursuite E-O horizontale
- » Poursuite N-S horizontale

La déclinaison de la terre au solstice d'été est égale à 23.45° et c'est la valeur retenue pour l'angle d'incidence qui reste bien évidemment constante pour toute la journée (Figure IV-2). Pour les autres modes de poursuite solaire excepter le mode de poursuite totale, on remarque que le plus avantageux est le mode E-O horizontal qui présente des angles d'incidence les plus petits.

Sans poursuite solaire, au lever ou au coucher du soleil, l'angle d'incidence est égal à 90° . Sa valeur minimale est obtenue à midi solaire 11° .

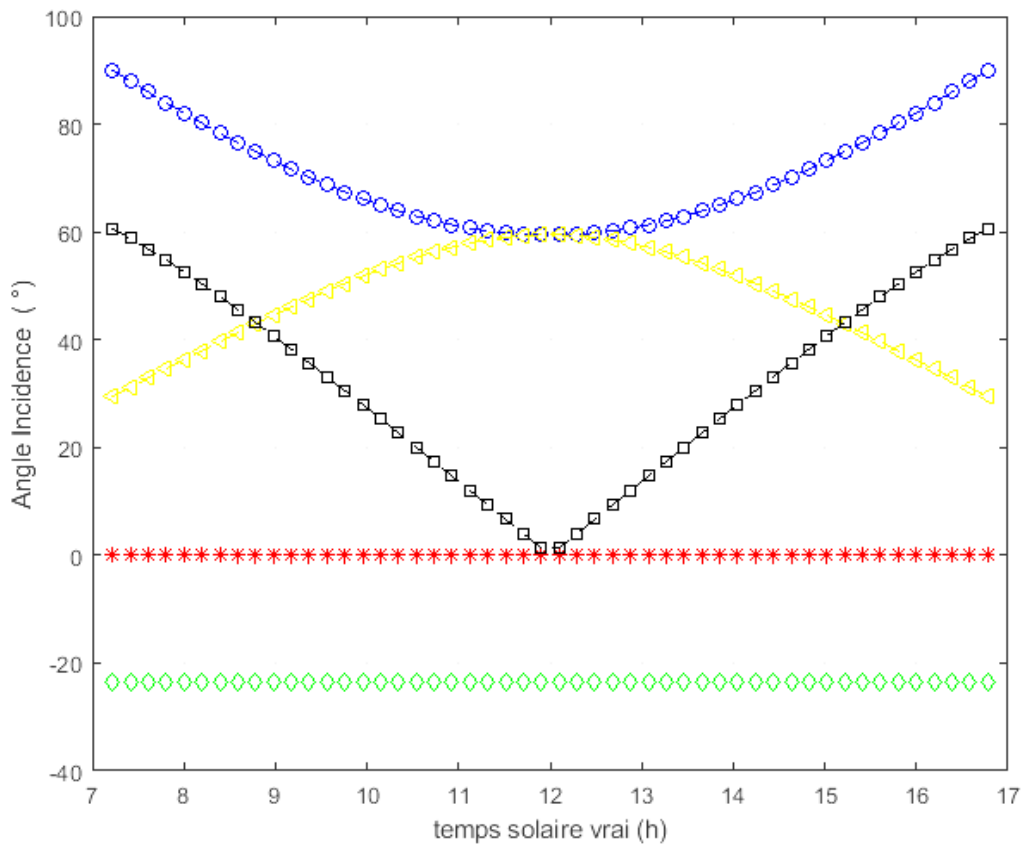


Figure IV.3 : Variation d'angle incidence avec des différentes poursuites solaires durant la journée du solstice d'hiver (21.décembre)

Les codes couleurs des figures IV.3 pour les modes de poursuite solaire :

- » Sans poursuite solaire
- » Poursuite totale
- » Poursuite E-O Polaire
- » Poursuite E-O horizontale
- » Poursuite N-S horizontale

La **Figure IV.3** fait apparaître une situation avantageuse pour le mode de poursuite solaire N-S polaire dont la valeur de l'angle d'incidence reste constante à la valeur de la déclinaison de la terre (-23.45°) par rapport aux autres mode hormis l'étalon qui est la poursuite totale. Le mode de poursuite N-S horizontal vient juste après et donne un avantage meilleur comparé à la poursuite E-O horizontale.

3.2 Courbes du rayonnement global

Les résultats obtenus pour le calcul du rayonnement global sont présentés dans les figures qui suivent :

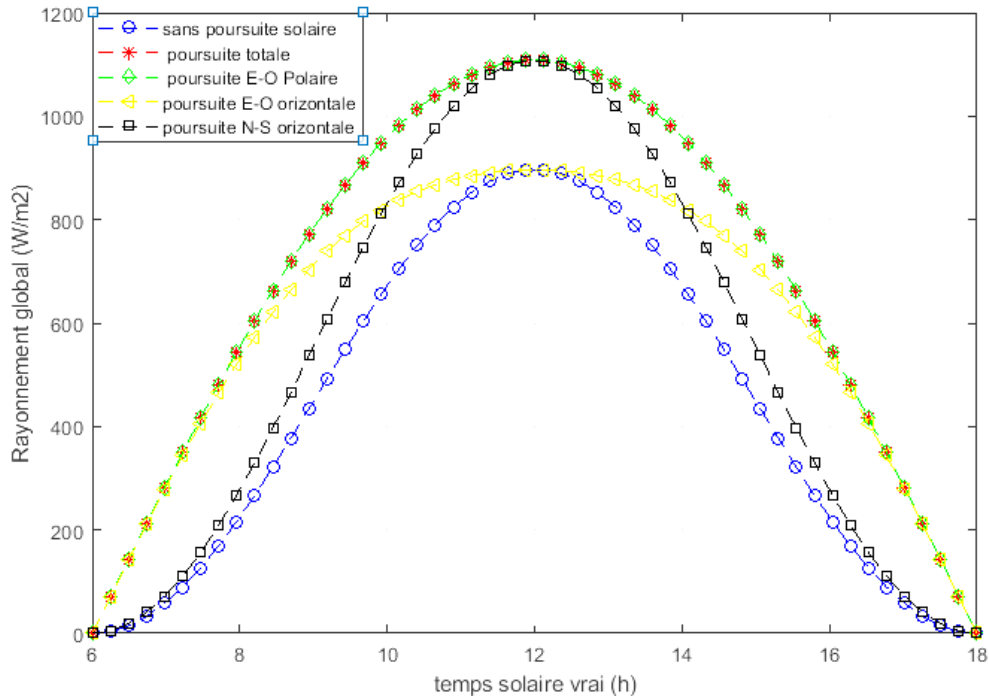


Figure IV.4 : la variation du rayonnement global avec des différentes poursuites solaires durant la journée des équinoxes (21 Mars et 21 Septembre).

A l'automne et au printemps les résultats sont les mêmes et l'on note une modération de la durée du jour et de la valeur du rayonnement obtenu avec une parfaite adéquation entre poursuite totale et E – O polaire.

La valeur maximale (1160w/m^2) du rayonnement solaire est obtenue à midi solaire pour trois configurations ; poursuite totale, poursuite E-O polaire et poursuite N-S horizontale. Les deux autres configurations sans poursuite et E-O horizontale ont aussi le même pic (900w/m^2), néanmoins, la poursuite E-O horizontale offre un meilleur avantage car elle d'une envergure plus importante. **(Figure IV.4)**

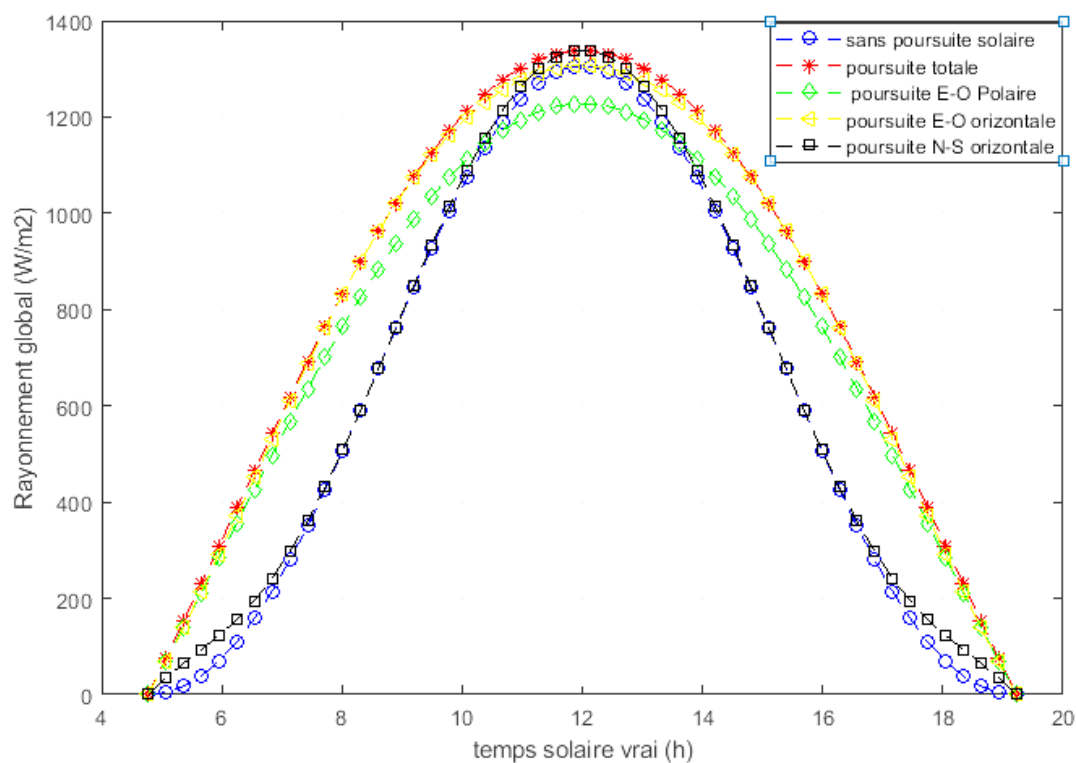


Figure IV.5 : la variation de rayonnement globale avec des différentes poursuites solaires durant la journée solstice d'été (21 juin)

On remarque (**Figure IV.5**) qu'en été le rayonnement global reçu pendant la longue journée est le plus important dans les différents modes de poursuite solaire. Néanmoins la poursuite E-O horizontale est la configuration la plus proche à la poursuite totale étant donné que l'angle d'incidence pour ces journée type est le plus petit.

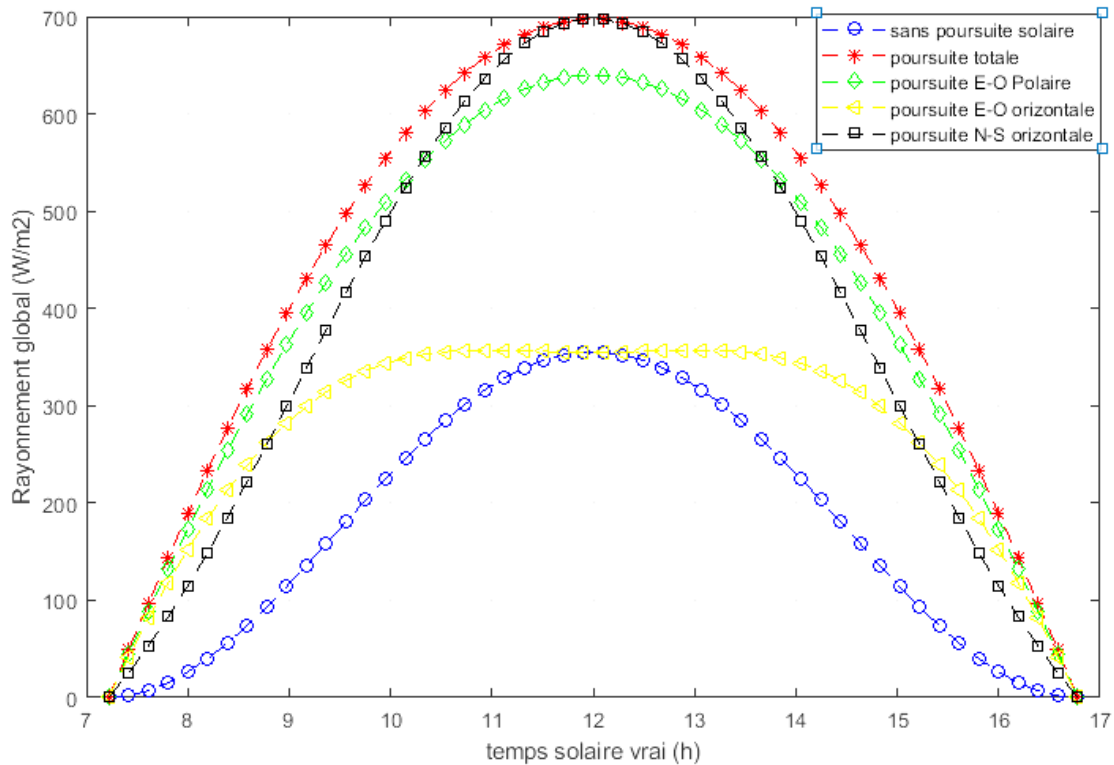


Figure IV.6 : la variation de rayonnement globale avec des différentes poursuites solaires durant la journée solstice d'hiver (21.décembre)

En hiver (**Figure IV.6**), la journée est courte la valeur totale du rayonnement diminue généralement par rapport à aux autres saisons. Les deux configurations relatives à la poursuite N-S horizontale et E-O polaire donnent les résultats les plus proches à la poursuite totale prise comme référence.

On remarque que le rayonnement global avec la poursuite totale et poursuite nord-sud horizontal ont le même pic et aussi pour la poursuite est-ouest horizontal et sans poursuite solaire.

4. Calcul thermique

4.1 Validation du modèle

Pour valider notre modèle, nous avons choisis de confronter les résultats de simulation aux données expérimentales de la référence [35]. Il s'agit de deux capteurs de type PTC –Black-crome de longueur totale de 7,8 m, installés dans une plate-forme pour un suivi total du soleil.

Nous avons deux tableaux : le premier montre les résultats numériques du travail de Behar et al. [36] comparés à ceux de Dudley et al. Le deuxième, sont exposés, les résultats de notre modèle pour les mêmes données d'entrée en vue de les comparer.

						Température de sortie Fluide HTF			Rendement thermique		Ecart	
Cas N°	DNI (w/m ²)	V (m/s)	T _a (°C)	T _{fe} (°C)	Q _v (l/min)	Dudly	Behar	Ecart	Dudly	Behar	Dudly	Behar
1	744.6	1.1	-5	100.8	50.7	117.2	115.11	2.09	72.47	70.12	3.62	2.35
2	839.8	1.1	3.6	103.4	50.6	122.2	119.59	2.61	73.56	70.19	3.35	3.37
3	902	0	6.4	154	52.1	173.3	170.87	2.43	72.1	69.6	1.98	2.5
4	871.8	4	1.6	201.5	53.2	219.5	217.28	2.22	69.69	67.68	1.86	2.01
5	900.7	1.3	0.2	201.6	54	219.5	217.67	2.14	69.91	68.09	3.06	1.82
6	882.7	2.1	-3.1	253.3	54.8	271.3	268.74	2.56	69.58	65.53	1.95	4.05
7	884.6	3	2.6	303.1	54.9	320.6	318.33	2.27	65.36	62.2	2.03	3.16
8	921.5	0	-0.7	349.6	56	367.3	365.2	2.1	61.49	59.48	1.82	2.01
9	928.4	2.4	-0.9	379.6	56.1	397.4	394.8	2.6	57.7	55.44	1.91	2.26
Ecart moyen								2.34			2.40	2.61

Tableau IV.2 : comparaison de la prédiction du modèle avec les résultats expérimentaux du snl test-cas d'un absorbeur de revêtement en chrome noir avec le vide dans l'anneau (tests d'efficacité)

Cas N°	Température de sortie Fluide HTF	Ecart Modèle	Rendement thermique	Ecart Modèle
01	117.32	0.12	72.43	0.04
02	122.07	0.13	72.42	1.14
03	173.55	0.25	72.20	0.1
04	219.59	0.09	69.63	0.06
05	220.11	0.21	70.00	0.09
06	270.97	0.33	67.44	2.14
07	320.54	0.06	64.06	1.3
08	367.95	0.65	62.66	1.17
09	397.32	0.08	57.61	0.09
Ecart moyen		0.21		0.68

Tableau IV. 3: Comparaison de nos résultats obtenus avec les résultats de Behar.o pour (Tfs ; rendement thermique)

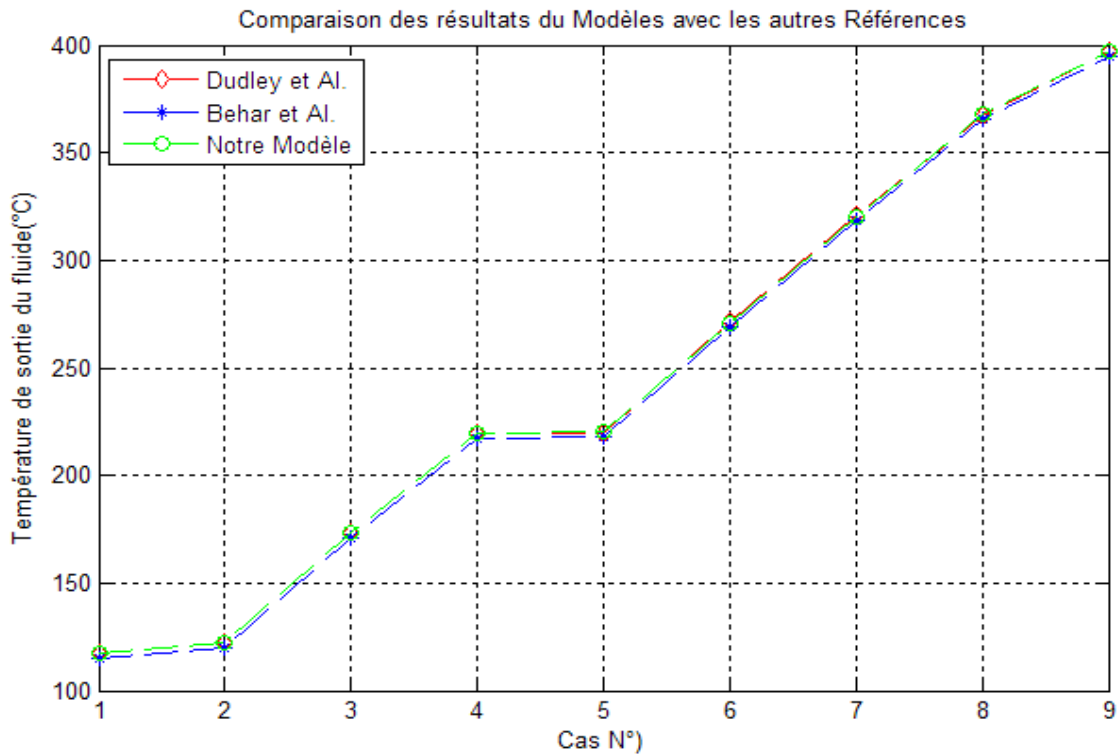


Figure IV.7

Sur cette courbe nous comparons les résultats du modèle avec les autres références ou l'on observe une correspondance presque parfaite de la température de sortie du fluide comparée aux résultats de Dudley dont l'écart moyen est de 0,21 contre 2,34 pour le modèle de Behar.

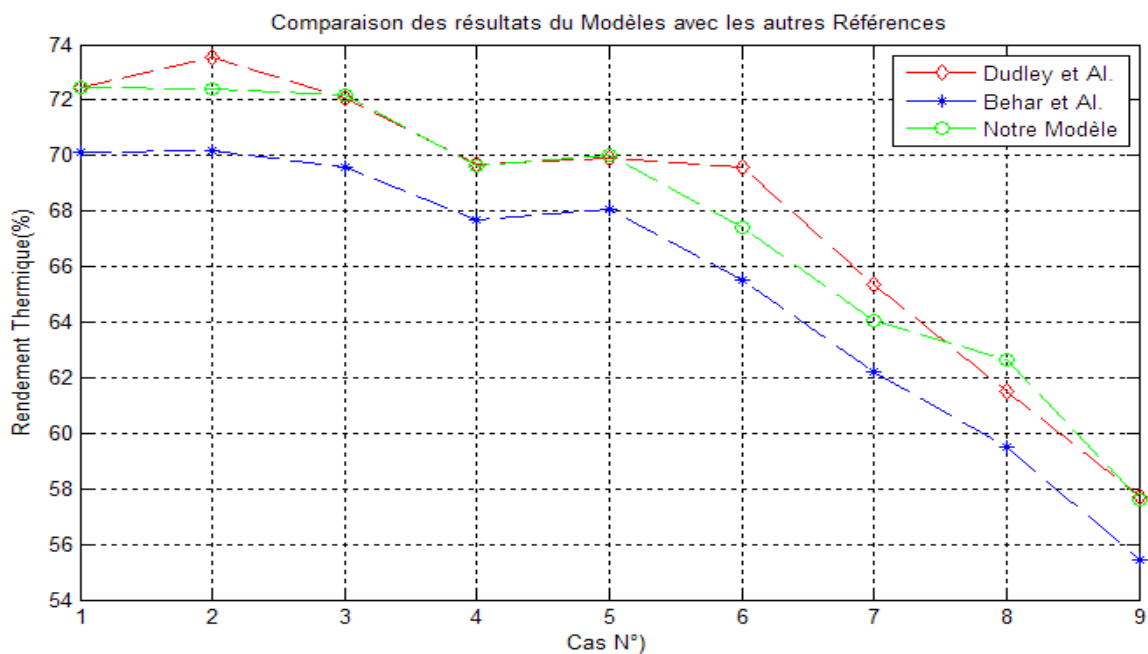


Figure IV.8

Sur cette courbe nous avons aussi comparé les résultats de notre modèle avec les autres références et nous avons remarqué une excellente concordance avec les résultats expérimentaux. Notre modèle présente un écart moyen de 0,68 contre 2,61 pour celui de Behar.

4.2 Présentation des résultats

Cette partie est consacrée au calcul thermique d'une boucle solaire de 600 m de long composée de plusieurs modules de CCP de type black chrome receiver. Les températures du fluide, de l'absorbeur et de la vitre sont tracées en fonction de la longueur de la boucle pour différents DNI et angles d'incidence du rayonnement solaire. La température d'entrée du fluide dans la boucle est fixée à 293°C.

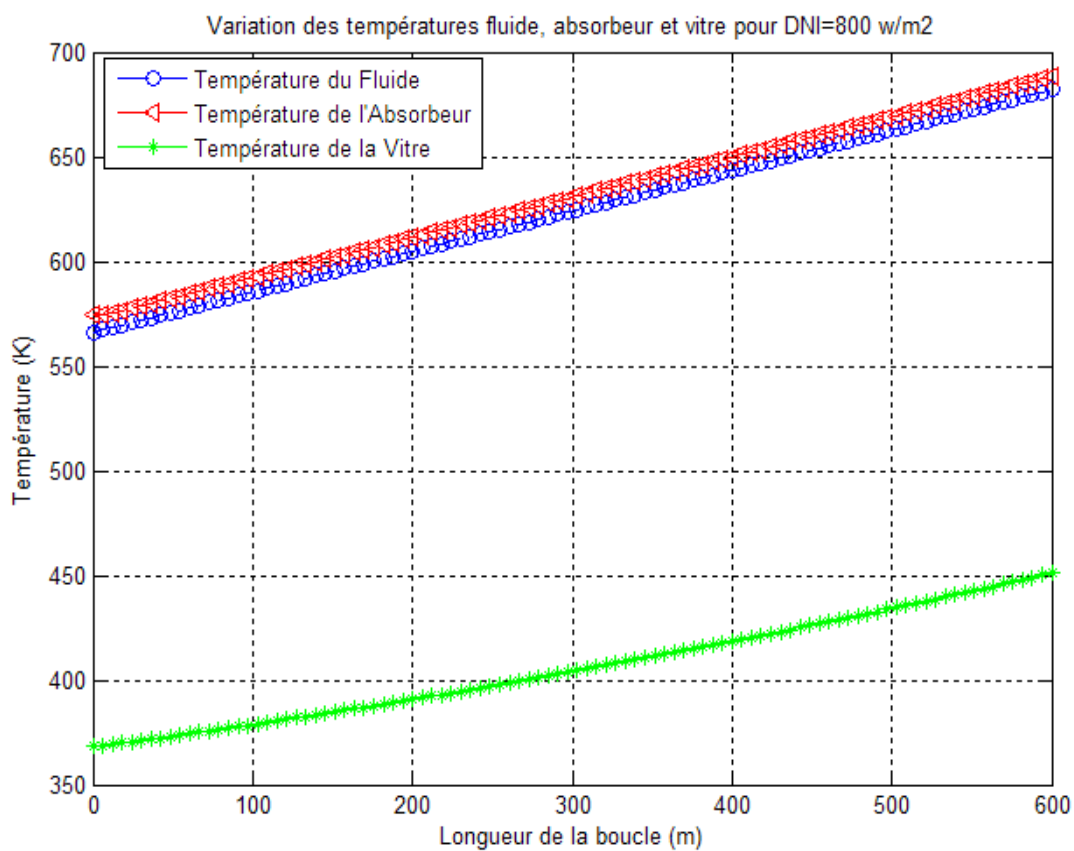


Figure IV.9

La courbe montre la variation des températures fluide ; absorbeur et vitre pour DNI :800 W/m² en fonction de longueur de la boucle ou l'on remarque que plus la valeur de longueur de boucle est élevée plus la température du (fluide ; absorbe ; vitre) est élevée ; et on remarque aussi que la température de la vitre est très petite par rapport à température du fluide et de l'absorbeur. Ceci s'explique par le fait que le transfert de chaleur entre le fluide et l'absorbeur

est très intense comparativement aux échanges de chaleur entre la vitre et l'absorbeur dont le coefficient de convection est pratiquement nul puisqu'on est en présence d'un vide poussé.

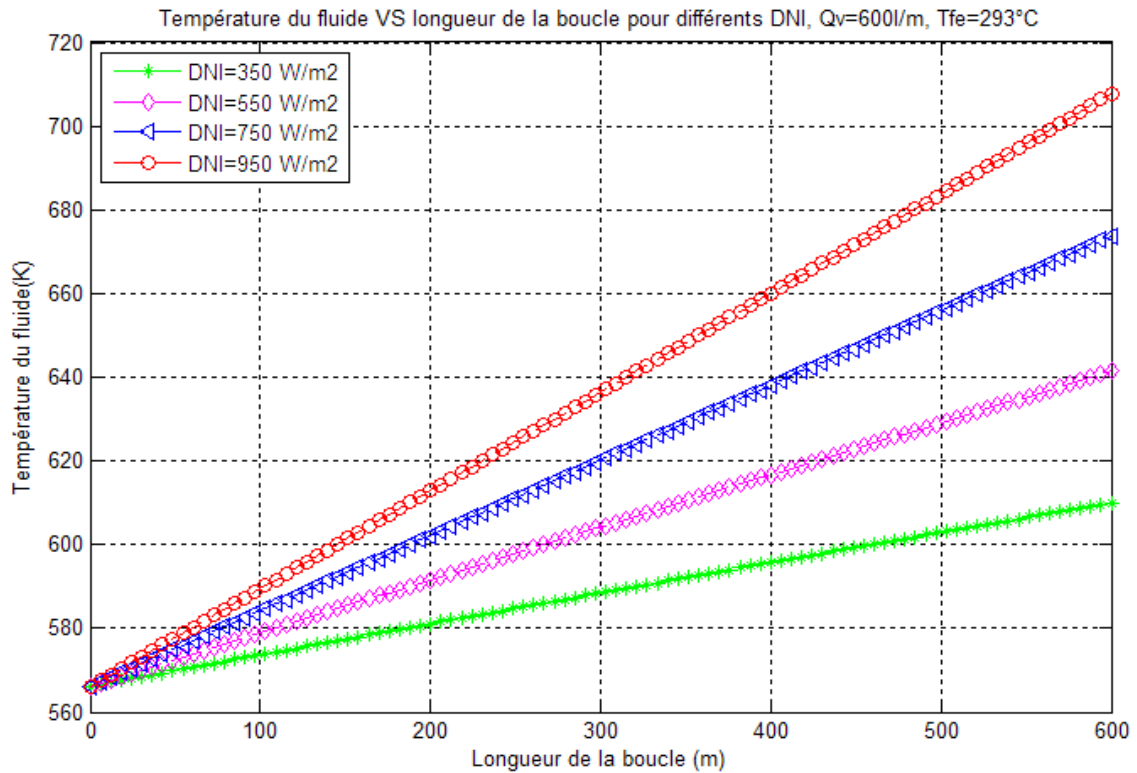


Figure IV.10

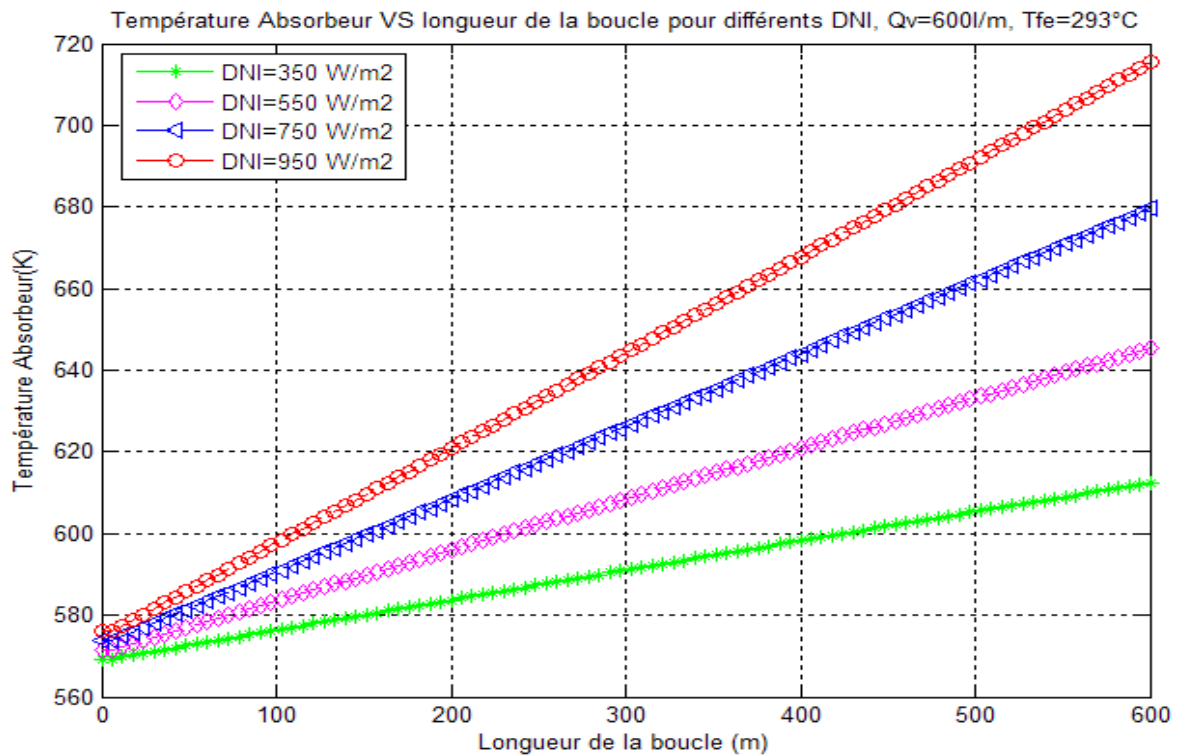


Figure IV.11

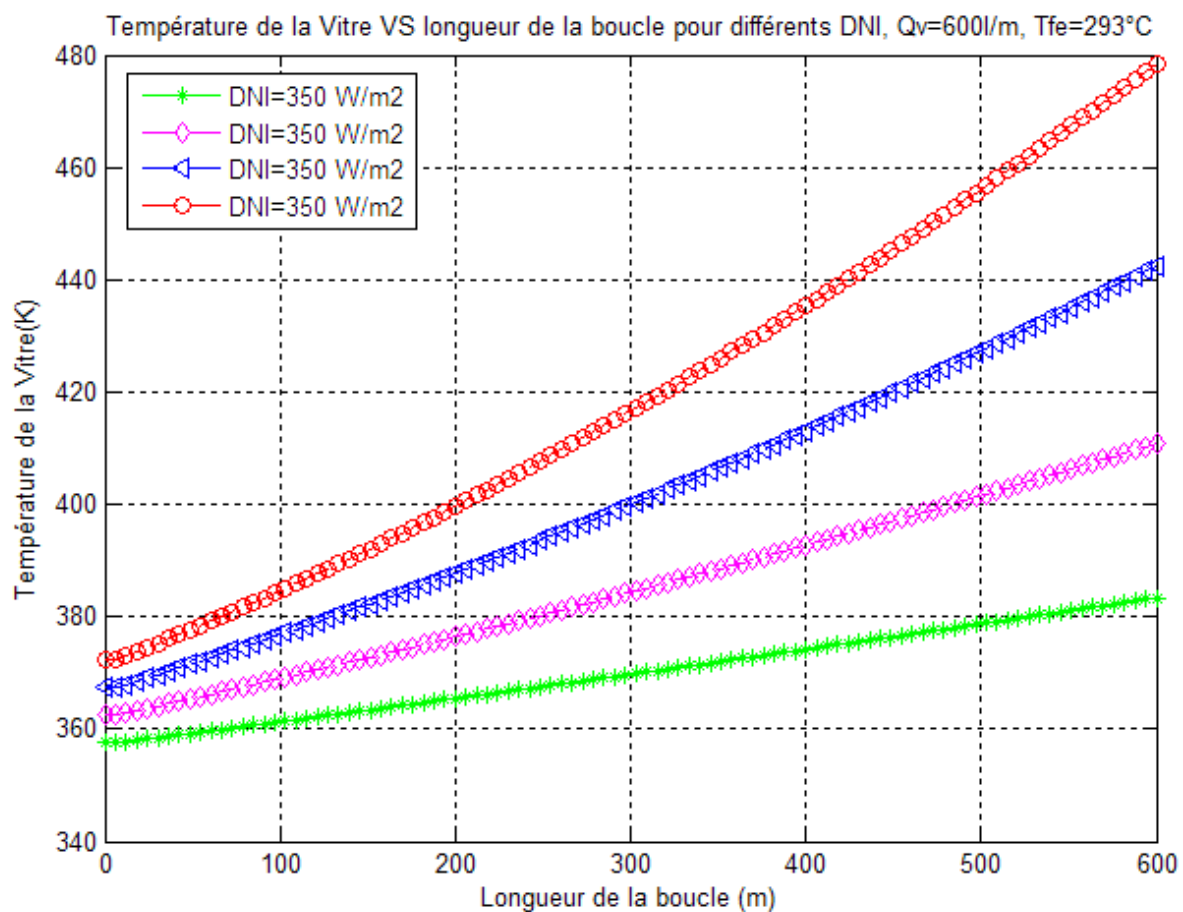


Figure IV.12

Les trois courbes des figures IV (4.5.6) montrent la variation de température de l'absorbeur, fluide et de la vitre par rapport à la longueur de la boucle pour différents DNI. On remarque de la diminution du rayonnement incident impacte négativement l'augmentation de la température. L'écart en fin de boucle est d'environ 30K par 200W/m^2 de perdu.

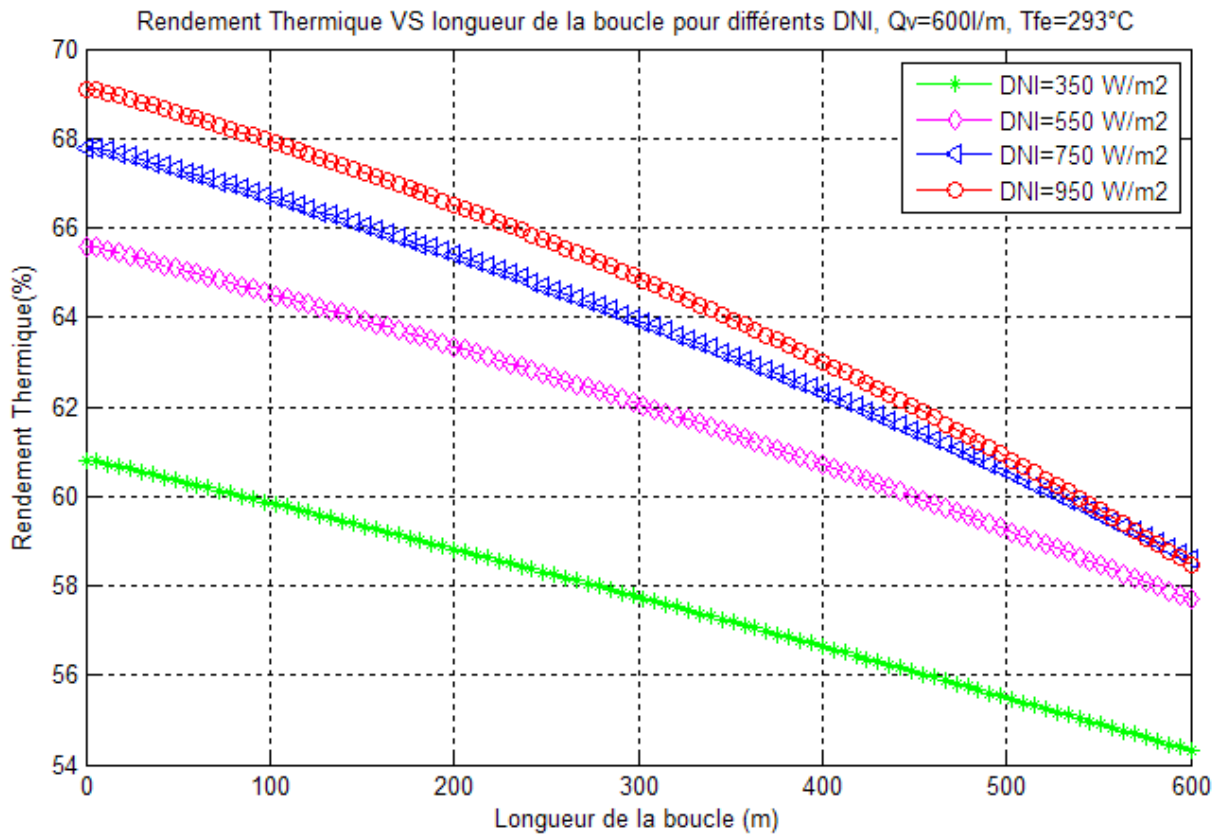


Figure IV.13

La courbe IV-7 montre la variation du rendement thermique VS la longueur de la boucle pour différents DNI ou l'on remarque que plus la valeur DNI est élevée, plus le rendement thermique est élevée ; par contre plus la longueur de la boucle est élevée plus la valeur de rendement diminue. La diminution du DNI entraîne une chute de plus en plus importante du rendement thermique.

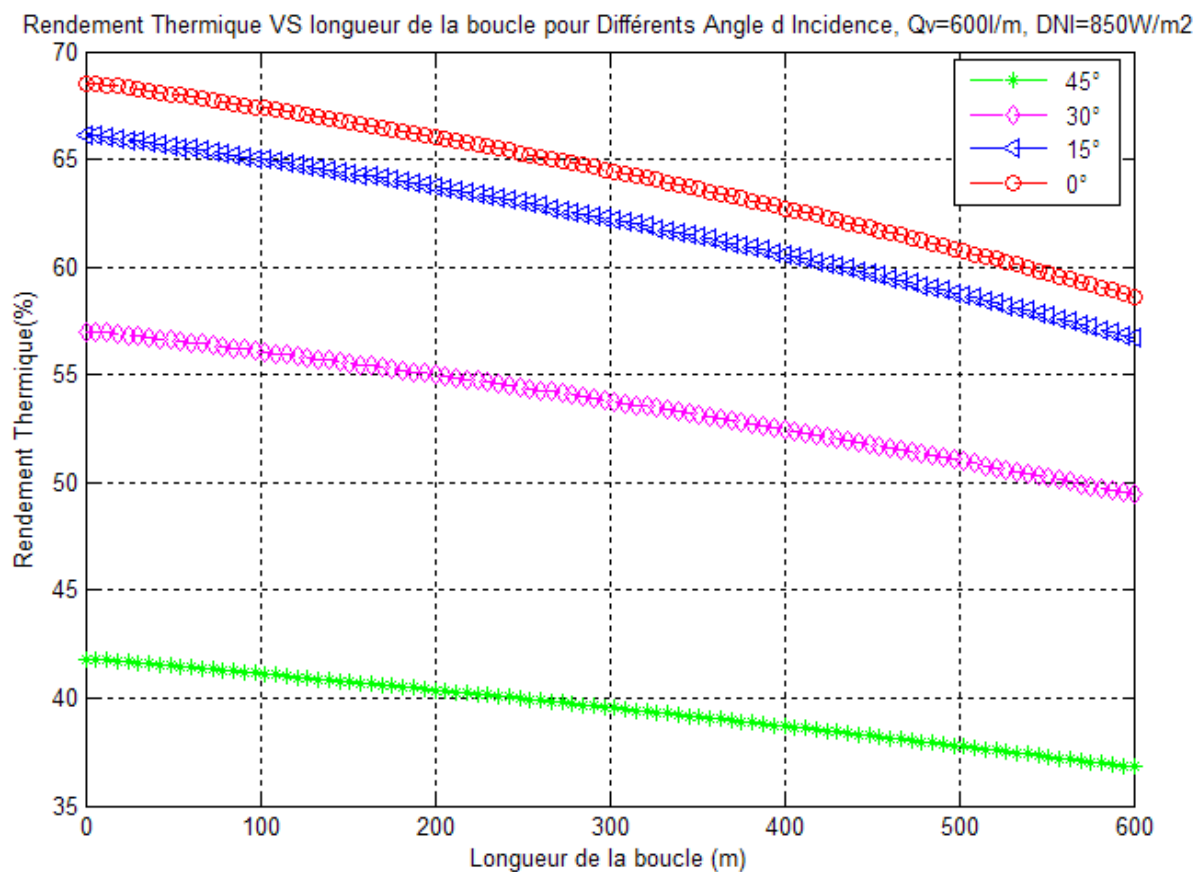


Figure IV.14

L'effet de l'angle d'incidence sur le rendement thermique de la boucle est présenté sur la courbe IV-8. On remarque que l'augmentation de l'angle d'incidence des rayons solaires entraîne diminution très significative du rendement thermique ; cet effet prend de l'ampleur en allant vers des valeurs encore plus grandes de l'angle d'incidence.

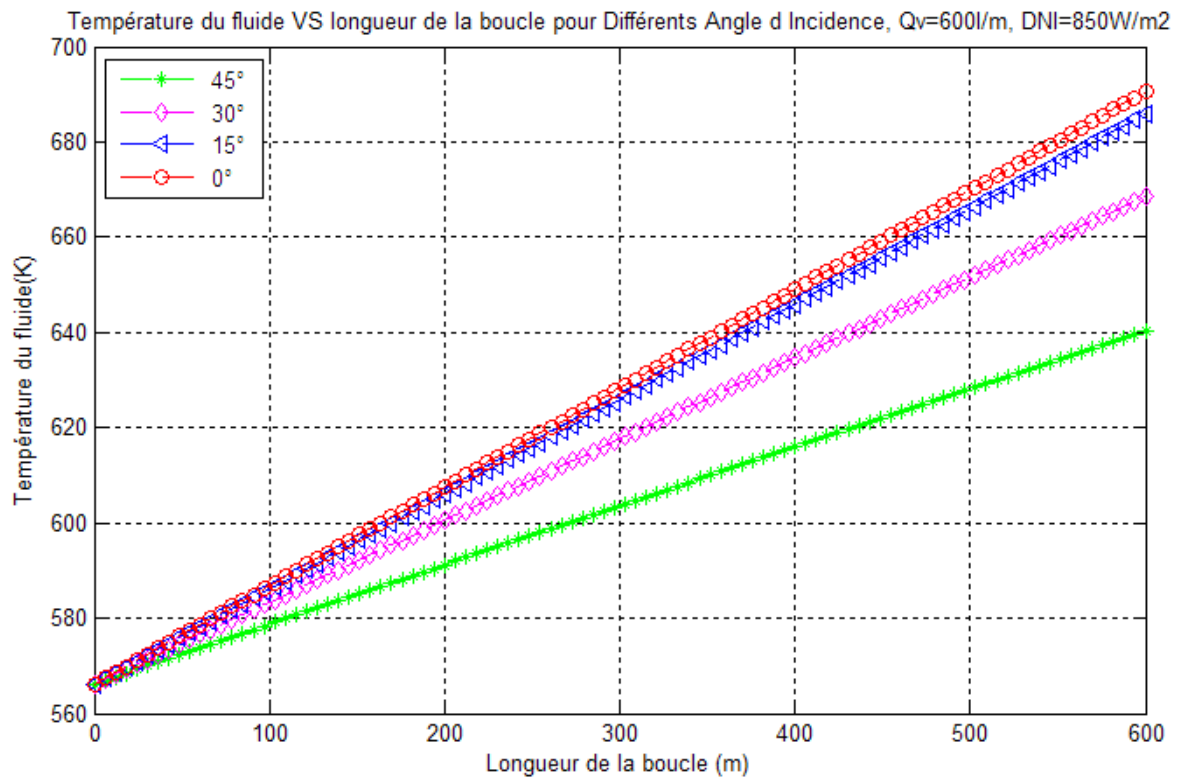


Figure IV.15

la courbe IV-9 montre la variation de la température du fluide Vs longueur de la boucle pour différents angles d'incidence ($Q_v= 600 \text{ l/m}$; $\text{DNI}= 850 \text{ W/m}^2$).

On remarque que plus la valeur d'angle d'incidence est grande plus la valeur de température diminue. L'effet de l'augmentation de l'angle d'incidence diminue drastiquement l'énergie collectée par le capteur solaire et donc, impacte négativement la température de sortie du fluide caloporteur.

Conclusion

Les résultats obtenus par l'application du code de calcul (MATLAB) pour un concentrateur cylindro-parabolique, s'intéresse particulièrement au rayonnement concentré qui constitue l'élément moteur du champ solaire. Le modèle a été validé par la confrontation de nos résultats aux deux références dans le domaine. Les profils de températures au niveau du fluide de travail, de l'absorbeur et de l'enveloppe en verre ont été déterminés ainsi que le rendement thermique de la boucle.

Parmi les résultats les plus importants, on cite :

- La poursuite solaire qui influence le positionnement et le rendement de la puissance solaire « rayonnement direct ».

- Le rendement thermique influencé grandement par la variation du rayonnement direct et de l'angle d'incidence.

Conclusion générale

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire vise la maîtrise du comportement thermique de la technologie des collecteurs cylindro-paraboliques pour la conversion d'énergie solaire en énergie thermo-électrique.

Cette technologie est considérée parmi les technologies les plus matures dans la production d'électricité.

Le rayonnement reçu par un capteur solaire dépend également du niveau d'ensoleillement du site considéré et de son orientation par rapport au soleil.

Pour ce faire, un programme de simulation thermique est réalisé sous Matlab qui utilise différents paramètres géométriques et thermiques ainsi que des données de base propres au gisement solaire.

Afin de mener à bien ce travail, nous avons respecté les étapes de calculs relatives à plusieurs aspects caractérisant les centrales solaires thermodynamiques dans la filière cylindro- parabolique. En premier lieu nous avons définis les Coordonnées géographiques, Coordonnées horizontales et la modélisation mathématique pour calculer le Rayonnement incident sur un plan (horizontale, quelconque). Par suite on a présenté la structure générale et les composants et la géométrie et l'optique et le système de suivi solaire ainsi que les bilans thermiques détaillés sur les composants du concentrateur cylindro- parabolique.

Les résultats les plus importants qui en ressortent des simulations effectuées sont les suivants :

- Le modèle physique proposé en régime permanent a été testé et validé par comparaison des résultats de simulation obtenus avec les travaux des références [35-36] et donne d'excellents résultats.
- Le choix du système de poursuite solaire est déterminant, étant donné la variation de l'angle d'incidence des rayons solaires dont les effets sur la puissance solaire collectée au niveau du CCP sont inversement proportionnels.
- La température de sortie du fluide et le rendement thermique de la boucle solaire sont grandement influencés par la variation du rayonnement direct et de l'angle d'incidence.

Au final, nous espérons que ce travail que nous avons réalisé sera utile pour de futures études dans ce domaine et contribuera également à l'orientation future sur l'utilisation des énergies renouvelables, notamment l'énergie solaire.

Bibliographie

- [1] Iyél HADRAMY. Analyse et modélisation d'un capteur cylindro-parabolique. Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de master. Spécialité énergies renouvelables. U.MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU.2016/2017.
- [2] Rafael Almanza et al. "Receiver behavior in direct steam generation with parabolic troughs". *Solar Energy* Vol. 61, No. 4, pp. 275–278, 1997
- [3] K. Ravi Kumar et al."Thermal analysis of solar parabolic trough with porous disc receiver". *Applied Energy* 86 (2009) 1804–1812.
- [4] Z.D.Cheng et al. "Three-dimensional numerical study of heat transfer characteristics in the receiver tube of parabolic trough solar collector". *International Communications in Heat and Mass Transfer* 37 (2010) 782–787.
- [5] Fuqiang Wang et al."Thermal stress analysis of eccentric tube receiver using concentrated solar radiation". *Solar Energy* 84 (2010) 1809–1815
- [6] Ya-Ling He et al. "A MCRT and FVM coupled simulation method for energy conversion process in parabolic trough solar collector". *Renewable Energy* 36 (2011).
- [7] Zhiyong Wua et al."Structural reliability analysis of parabolic trough receivers". *Applied Energy* 123 (2014) 232–241
- [8] WANG Kun et al. "A design method and numerical study for a new type parabolic trough solar collector with uniform solar flux distribution". *SCIENCE CHINA Technological Sciences*. March 2014 Vol.57 No.3: 531–540.
- [9] E. Kaloudis et al."Numerical simulations of a parabolic trough solar collector with nanofluid using a two-phase model". *Renewable Energy* 97 (2016) 218e229
- [10]ZHENG Zhang Jing et al."Thermal analysis of a solar parabolic trough receiver tube with porous insert optimized by coupling genetic algorithm and CFD". *SCIENCE CHINA Technological Sciences*. October 2016 Vol.59 No.10: 1475–1485.
- [11] Solutia Inc. Therminol vp-1, vapor phase/liquid phase heat transfer fluid 54 °f to 750 °f. Technical bulletin 7239115c, 2008.
- [12] Zavoico, AB. Solar Power Tower Design Basis Document. Tech. rep, Sandia National Laboratories, SAND2001-2100, 2001.

Bibliographie

- [13] J.E. Braun et J.C. Mitchell, solar geometry for fixed and tracking surface, edition: solar energy laboratory, 1983
- [14] Capdrou. M, 1987. Atlas Solaire de l'Algérie, Modeles Théoriques et Expérimentaux. Volume1, Tome 2 ; Office des Publications Universitaires, Algérie.
- [15] J.M Chassériau, Conversion thermique du rayonnement solaire ; Dunod, 1984
- [16] Abderraouf Meziani et Mohamed Temim, Mémoire de fin d'étude, « Étude d'un capteur solaire a eau avec effet de concentrateur de type cylindro-parabolique », Université de Biskra, 2005.
- [17] A. Labouret, 'Energie Solaire Photovoltaïque', Ed. Dunod, France, 302 p., 2003.
- [18] F. Linke, 'Transmissions - Koeffizient und Trübungsfaktor', Beiträge zur Physik der Atmosphäre, Vol. 10, pp. 91 – 103, 1922.
- [19] F. Kasten, 'A Simple Parameterization of Two Pyrheliometric formulae for determining the Linke Turbidity Factor', Meteorology Rdsch, Vol. 33, pp. 124 - 127, 1980.
- [20] K. Feussner and P. Dubois, 'Trübungsfaktor, Precipitable Water', Staub. Gerlands Beitr., Geophysical, Vol. 27, pp. 132 - 175, 1930.
- [21] A. Louche, G. Peri and M. Iqbal, 'An analysis of Linke Turbidity Factor', Solar Energy, Vol. 37, N°6, pp. 393 – 396, 1986.
- [22] C.P. Jacovides, 'Model Comparison for the Calculation of Linke's Turbidity Factor', International Journal of Climatology, Vol. 17, N°5, pp. 551 – 563, 1997
- [23] R. Dogniaux, 'De l'influence de l'Estimation du Facteur Total de Trouble Atmosphérique sur l'Evaluation du Rayonnement Solaire Direct par Ciel Clair. Application aux Données Radiométriques de l'IRM à Uccle', Institut Royal Météorologique de Belgique (IRM), Miscellanea, Serie C, N°20, 1984.
- [24] R. Pedros, J.A. Utrillas, J.A. Martinez-Lozano and F. Tena, 'Values of Broad Band Turbidity Coefficients in a Mediterranean Coastal Site'. Solar Energy, Vol. 66, N°1, pp. 11 – 20, 1999.

Bibliographie

- [25] J. Remund, L. Wald, M. Lefèvre, T. Ranchin and J. Page, In press. 'Worldwide Linke Turbidity Information', In: Proceedings of the ISES Solar World Congress 2003, Goeteborg, Sweden, 16-19 June 2003.
- [26] B. Gschwind, L. Ménard, M. Albuisson and L. Wald, 'Converting a Successful Research Project into a Sustainable Service: The Case of the SoDa Web Service', Environmental Modelling and Software, Vol. 21, N°11, pp. 1555 – 1561, 2006.
- [27] M. Capderou, 'Atlas Solaire de l'Algérie', Modèles Théoriques et Expérimentaux, Vol. 1, T1, Office des Publications Universitaires, EPAU, Algérie, 375 p., 1987
- [28] Guillaume ANIES. "Modélisation, simulation dynamique, validation expérimentale et optimisation énergétique d'une unité de rafraîchissement solaire par absorption". Thèse de doctorat de L'Université de Pau et des Pays de l'Adour. Novembre 2011.
- [29] Quoilin, S. "Les Centrales Solaires à Concentration". Université de Liège. Mai 2007
- [30] Axel Augeard et al. "Concentrateurs solaires et production électrique". Projet de Physique. INSA Rouen. 2014
- [31] Matthias Günther, Michael Joemann, Simon Csambor. "Advanced CSP Teaching Materials". DLR Centre allemand pour l'[aéronautique](#) et l'[astronautique](#).
- [32] J. Bernard. "énergie solaire calculs et optimisations", édition : ellipses, 2004.
- [33] M. Iqbal, "an introduction to solar energy", edition: academic press .toronto, 1983.
- [34] Seyed Ebrahim Ghasemi et al. "Numerical Study on Thermal Performance of Solar Parabolic Trough Collector". Journal of mathematics and computer Science 7 (2013)
- [35] Dudley V, Kolb G, Sloan M, Kearney D. SEGS LS2 solar collector-test results. Report of Sandia National Laboratories, SAN94-1884; 1994.
- [36] Behar, O.; Khellaf, A.; and Mohammedi, K., 2015, "A novel parabolic trough solar collector model – Validation with experimental data and comparison to Engineering Equation Solver (EES)", Energy Conversion and Management, 106, 268-281.