

**Université Akli Mohand Oulhadj
- Bouira -**



**جامعة أكلي محمد أولحاج
- البويرة -**

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Akli Mohand Oulhadj (Bouira)

**Faculté des Sciences et des Sciences appliquées
Département de Génie Mécanique**

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du Diplôme de

Master

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Énergétique

THEME

**Étude d'une centrale solaire cylindro-parabolique de 100
MWelec**

Réalisé par

AKKACHE Ahmed
ZERROUKI Mohamed Cherif

Encadreur

Mr. LEKHAL Rachid

Examineur : Mr. Lattari Kamel

Examineur : Mr. Mahfoud Brahim

2019/2020

Remerciements

Nous tenons à remercier premièrement Dieu tout-puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.

Nous tenons également à exprimer nos vifs respects et nos forts remerciements à notre encadreur: Mr .Lekhal Rachid enseignant à l'université de Bouira pour son accueil, son assistance et son sens de former et d'informer.

Nous tenons aussi à remercier les membres de jury d'examen pour l'honneur qui nous font en participant au jugement de ce travail.

Nous tenons à remercier vivement tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin à réaliser ce travail.

Nous tenons à remercier aussi tous les enseignants de département de génie mécanique qui ont contribué à notre formation.

Enfin, Nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues pour le soutien moral et matériel.



Dédicace

Je dédie ce projet :

A ma chère mère,

A mon cher père,

*Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me soutenir
et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.*

A mon frère

A ma sœur

Pour leurs soutiens moral et leurs conseils précieux tout au long de mes études.

A mon cher grand-père,

À qui je souhaite une bonne santé.

A mon cher binôme ,ZARROUKI Mohamed,

Pour son entente et sa sympathie.

, Achoure, Trek, Nesrine, Mohamed, Ali ,

Pour leurs indéfectibles soutiens et leurs patiences infinies.

A mon cher , CHALAL Yanis ,

Qui m'a aidé et supporté dans les moments difficiles.

A mes chers amis , ADDOU Mohamed et BOUTAL Walid,

Pour leurs aides et supports dans les moments difficiles.

A toute ma famille,

A tous mes autres ami(e)s,

A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment.

AKKACHE Ahmed

Dédicace

Je dédie ce projet :

A ma chère mère,

A mon cher père,

*Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me soutenir
et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.*

A mes frères

A mes sœurs

Pour leurs soutiens moraux et leurs conseils précieux tout au long de mes études.

A mon cher grand-père,

À qui je souhaite une bonne santé.

A mon chère binôme, AKKACHE Ahmed,

Pour son entente et sa sympathie.

, Trek, Nesrine, Mohamed,

Pour leurs indéfectibles soutiens et leurs patiences infinies.

A mes chères ami(e)s, Rabah et Aziz,

Pour leurs aides et supports dans les moments difficiles.

A toute ma famille,

A tous mes autres ami(e)s,

A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment.

ZERROUKI Mohamed Cherif

ملخص:

يتواجد أكبر مصدر طاقة يمكن الوصول إليه تقنيًا على هذا الكوكب في المناطق الصحراوية. سنقوم بدراسة الطاقة الشمسية التي تمكننا من استعادة الحرارة من الإشعاع الشمسي داخل سائل، عن طريق تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة حرارية بواسطة مجمع شمسي بتركيز أسطواناني مكافئ. تعتبر محطات الطاقة الحرارية الشمسية المركزة (وتسمى أيضًا الطاقة الشمسية المركزة، CSP) مثالية لتوليد الكهرباء بطريقة مضمونة. تهدف هذه الدراسة إلى النمذجة والمحاكاة العددية لمجمع شمسي أسطواناني مكافئ.

الهدف من هذا العمل المتواضع هو تحديد الطاقة الشمسية الممتصة والطاقة الحرارية المفقودة في أنبوب الامتصاص بالإضافة إلى التباين في درجة حرارة السائل، الأنبوب الممتص والأنبوب الزجاجي الواقي.

الكلمات الاستدلالية : الطاقة الشمسية، مجمع شمسي بتركيز أسطواناني مكافئ، تركيز الطاقة الشمسية.

Résumé :

La plus grande ressource d'énergie techniquement accessible sur la planète est disponible dans les régions désertiques. Nous allons étudier l'énergie solaire qui permet de récupérer la chaleur du rayonnement solaire au sein d'un fluide, cela par la conversion d'énergie solaire en énergie thermique par un capteur solaire à concentration cylindro-parabolique. Les centrales thermiques solaires à concentration (appelées aussi Concentrating Solar Power, CSP) sont idéales pour produire de l'électricité de manière sûre. Cette étude vise la modélisation et simulation numérique d'un collecteur solaire cylindro-parabolique.

L'objectif de ce modeste travail consiste à déterminer la puissance solaire absorbée et les pertes thermiques au niveau du collecteur ainsi que la variation de la température du fluide caloporteur, du tube absorbeur et de la vitre protectrice.

Mots clés: Énergie solaire, Collecteur cylindro-parabolique, Concentration solaire

Abstract :

The largest technically accessible energy resource on the planet is available in desert regions.

We are going to study solar energy, which makes it possible to recover heat form solar radiation within a fluid, by converting solar into thermal energy by a solar collector with parabolic-cylindrical concentration. Concentrating solar thermal plants (also known as concentrating solar power, CSP) are ideal for generating electricity in a safe manner.

This study aims at the modeling and numerical simulation of a cylindro-parabolic solar collector.

The objective of this modest work is to determine the absorbed solar power and heat losses at the collector as well as the temperature variation of the heat transfer fluid, the absorber tube

and the protective glass.

Keywords: Solar energy, parabolic trough collector, Solar Concentration

Nomenclature

Nomenclature

Lettres grecques

δ	Déclinaison solaire	degré
ϕ_r	Angle d'ouverture d'un parabolique	degré
Θ	Angle d'incidence	degré
φ	La latitude du lieu	degré
δR	Altitude	[-]
Θ	Inclinaison du plan	degré
Ω	Orientation du plan	degré
λ_{eff}	La conductivité thermique effective	w/m.k

Lettres alphabétiques

A	L'azimut de soleil	degré
A	La surface du capteur cylindro parabolique	m ²
A ₀	La surface d'ouverture	m ²
A _r	Surface d'absorbeur	m ²
B	Epaisseur optique de l'atmosphère	degré
B	inclinaison du concentrateur solaire	degré
D _j	Durée de jour	heure
ET	Fonction de temps	heure
F	La distance focale de la parabole	m
H	Hauteur du soleil	degré
H	Rayonnement global instantané sur une surface horizontale	w/m ²
H ₀	Rayonnement extraterrestre	w/m ²
H _d	Rayonnement diffus instantané sur une surface horizontale	w/m ²
H _b	Rayonnement direct instantané sur une surface horizontale	w/m ²
H _t	Rayonnement global instantané sur une surface incliné	w/m ²
H _{di}	Flux diffus sur une surface inclinée	w/m ²
H _{bi}	Flux direct sur une surface orthogonale aux rayons du soleil	w/m ²
H _y	Flux sur une surface inclinée provenant de la réflexion sur le sol	w/m ²
\bar{H}	Rayonnement solaire moyen, mensuel mesuré sur une surface horizontale	w/m ²
\bar{H}_0	Rayonnement moyen, mensuel hors de l'atmosphère	w/m ²
\bar{H}_d	Rayonnement moyen, mensuel diffusé sur une surface horizontal	w/m ²
$h_{cv.ext}$	Coefficient de convection thermique extérieure du tube en verre	w/m ² k
$h_{cv.int}$	Coefficient de convection thermique intérieur du tube en verre	w/m ² k
h_p	La hauteur de la courbe parabolique	m
I _d	Rayonnement solaire direct	w /m ²
I _f	Rayonnement solaire diffus	w /m ²
I ₀	Constante solaire	w /m ²
\bar{K}_t	Coefficient de la transmission	[-]
L	Longitude du lieu	degré
L	Longueur du capture	m
m	Angle horaire	degré
m _A	Masse atmosphérique	[-]
n	Le numéro de jour de l'année	[-]

Nomenclature

P	Pression locale, Pression de vaporisation	Pa
R _b	Rapport du rayonnement direct journalier sur surface incliné à celui sur surface horizontale	[-]
r	Le rayon parabolique	m
r _d	Rapport entre les valeurs horaires et journalières de l'irradiation diffuse	[-]
r _t	Rapport entre les valeurs horaires et journalières de l'irradiation globale	[-]
S ₀	Constant solaire	w /m ²
SS	Durée effective d'ensoleillement ou insolation	heure
SS ₀	Durée maximale d'ensoleillement	heure
s ₀	Correction de la distance terre-soleil	[-]
T _e	Taux d'ensoleillement	[-]
T _{fe}	Température d'entrée fluide (huile)	K
TSV	Temps solaire vrai	heure
TU	Le temps universel	heure
TSM	Le temps solaire moyen	heure
W _a	Longueur d'ouverture de la parabole	m
Z	Distance	m

Liste des figures

Figure I.1: Un champs d'éolienne.....	4
Figure I.2: Schéma de production d'électricité par l'hydraulique.....	4
Figure I.3: Un schéma illustrant la biomasse.....	5
Figure I.4: La répartition de la température dans le globe terrestre.....	6
Figure I.5: Les panneaux solaire.....	6
Figure I.6: Répartition de l'énergie solaire moyenne reçue au sol.....	7
Figure I.7 : Principe d'un panneau solaire thermique pour l'eau chaude sanitaire.....	8
Figure I.8 : Capteur a tube sous vide.....	9
Figure I.9 : Intérieure tube sous vide.....	9
Figure I.10: Central solaire thermique en Espagne.....	10
Figure I.11: Archimède et un de ses miroirs ardents.....	10
Figure I.12 : Le cuiseur solaire d'Antoine Laurent de Lavoisier.....	11
Figure I.13: Les types de centrales solaire.....	13
Figure I.14: Tour solaire.....	14
Figure I.15 : Schéma d'un moteur Stirling.....	15
Figure I.16 : Capteur parabolique avec un moteur Stirling.....	16
Figure I.17 : Principe de fonctionnement du collecteur de Fresnel.....	17
Figure I.18: Configuration typique d'une centrale à collecteur.....	18
Figure II.1: Structure du soleil.....	19
Figure II.2: Variation mensuelle de la constante solaire.....	21
Figure II.3: Mesure de la constante solaire.....	21

Liste Des Figures

Figure II.4: Plan de l'utilisation de l'énergie solaire	22
Figure II.5: Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil.....	23
Figure II.6: Les coordonnées équatoriales et horizontales.....	23
Figure II.7: Variation de la déclinaison solaire	24
Figure II.8: Les coordonnées horaires	25
Figure II.9: Les coordonnées horizontales.....	25
Figure II.10: Azimut	26
Figure II.11 : Définition des coordonnées terrestres d'un lieu donné	27
Figure II.12: Angle d'incidence	27
Figure II.13: Angles solaire.....	29
Figure II.14: Carte fuseaux horaires	29
Figure II.15: Les types de rayonnements solaire.....	34
Figure II.16: Composantes du rayonnement globale sur la surface inclinée	38
Figure III.1: Concentrateur cylindro-parabolique	39
Figure III.2 : Champ solaire.....	40
Figure III.3: Installation à retour direct	40
Figure III.4: Installation à retour indirect	41
Figure III.5: Installation à alimentation centralisée.....	41
Figure III.6: Vue schématique du collecteur cylindro-parabolique	42
Figure III.7 : Rayon locale de miroir.....	43
Figure III.8: Surface d'ouverture du collecteur et surface d'ouverture du récepteur.....	45
Figure III.9: Structure de l'absorbeur	47

Liste Des Figures

Figure III.10: Schéma d'un tube absorbeur	47
Figure III.11: Revêtement cermet (absorbeur composite céramique-métal)	48
Figure III.12: Les modes de poursuite solaire d'un CCP	49
Figure III.13: Schéma du bilan énergétique d'un élément x du collecteur CP	52
Figure IV.1 : Interprétation graphique de la méthode.....	60
Figure IV.2: Organigramme de simulation	63
Figure IV.3: une partie du champ solaire.....	64
Figure IV.4: Variation des températures fluide récepteur et vitre en fonction de DNI	65
Figure IV.5: Variation de la température du fluide en fonction des débits massiques	66
Figure IV.6 : Influence de la température d'entrer fluide sur la températures sortie fluide récepteur et vitre.....	67
Figure IV.7: Variation des coefficients d'échange	68
Figure IV.8: Variation de la puissance reçue, gagné et perdu en fonction DNI.....	69
Figure IV.9: Variation du rendement du champ solaire en fonction de DNI.....	70

Sommaire

Sommaire

Résumé

Nomenclature

Introduction Générale1

Chapitre I :Généralité sur les énergie renouvelables

1. Introduction.....	3
1.1. Énergie renouvelable.....	3
1.1.1. Énergie éolienne.....	3
1.1.2. Énergie hydraulique.....	4
1.1.3. Énergie biomasse.....	5
1.1.4. Énergie géothermique.....	5
1.1.5. Énergie solaire.....	6
2. Énergie solaire.....	7
2.1. Exploitation de l'énergie solaire.....	7
2.2. Énergie solaire thermique.....	8
2.2.1. Basse température.....	8
2.2.2. Température moyenne.....	8
2.2.2.1. Capteur solaire sous vide.....	9
2.2.3. Haute température.....	9
2.3. Électricité solaire thermodynamique.....	10
2.3.1. Histoire.....	10
2.3.2. Les types de centrales solaires thermodynamique.....	12
2.3.2.1. Les concentrateurs ponctuels.....	13
a) Concentrateur à tour.....	13
1. Avantages.....	14
2. Inconvénients.....	14
b) Concentrateur parabolique.....	14
1. Avantages.....	15
2. Inconvénients.....	16
2.3.2.2. Les concentrateurs linéaire.....	16
a) Concentrateur Fresnel linéaire.....	16

Sommaire

1. Avantages.....	16
2. Inconvénients.....	16
b) Concentrateur cylindro-parabolique.....	17
1. avantages.....	18
2. Inconvénients.....	18
Conclusion.....	18

Chapitre II :Gisement Solaire

Introduction.....	19
1. Le soleil.....	19
1.1. La constante solaire.....	20
1.2. Énergie solaire.....	21
1.2.1. Captation.....	21
2. Aspects géométriques.....	23
2.1. Mouvement du globe terrestre.....	23
2.2. La position du soleil par rapport à la terre.....	23
2.2.1. Repère de coordonnées équatoriales.....	24
a) Déclinaison solaire.....	24
b) Angle horaire.....	24
2.2.2. Repère de coordonnées horizontales.....	25
a) Hauteur angulaire du soleil.....	25
b) Azimut.....	26
2.2.3. Les coordonnées géographique terrestres.....	26
a) Latitude.....	26
b) Longitude.....	26
c) Méridien.....	27
2.2.4. Angle d'incidence sur un plan.....	27
2.3. Heures et temps.....	28
2.3.1. Le temps universel.....	28
2.3.2. Le temps solaire moyen.....	28
2.3.3. le temps solaire vrai.....	28
2.3.4. Équation de temps.....	29
2.3.5. Durée du jour.....	30
2.4. Durée et taux d'ensoleillement.....	30

Sommaire

2.4.1. Durée d'ensoleillement.....	30
2.4.2. Taux d'ensoleillements.....	30
3. Rayonnement solaire.....	30
3.1. Type de rayonnement.....	31
3.1.1. Les rayonnement solaire direct.....	31
3.1.2. Le rayonnement solaire diffus.....	33
3.1.3. L'albédo.....	34
3.1.4. Le rayonnement globale.....	34
3.2. Estimation de rayonnement solaire.....	35
3.2.1. Rayonnement extraterrestre.....	35
3.2.1. Coefficient de clarté.....	35
3.3. Estimation du rayonnement solaire instantané sur une surface horizontale.....	36
3.3.1. Relation entre les moyennes mensuelles.....	36
3.3.2. Relation entre les valeurs horaires.....	36
3.4. Estimation du rayonnement solaire instantané sur une surface inclinée.....	36
3.4.1. Rayonnement direct sur une surface inclinée.....	37
3.4.2. Rayonnement diffus sur une surface inclinée.....	37
3.4.3. Rayonnement provenant de la réflexion.....	37
3.4.4. Rayonnement globale sur une surface inclinée.....	38
Conclusion.....	38

Chapitre III :Étude d'une centrale cylindro-parabolique

Introduction.....	39
1. Principe de fonctionnement.....	39
2. Étude thermique d'un capteur cylindro-parabolique.....	40
2.1. Le champ solaire.....	40
2.1.1. Les différentes configurations.....	40
2.1.1.a Installation à retour direct.....	40
2.1.1.b Installation à retour indirect.....	41
2.1.1.c Installation à alimentation centralisée.....	41
2.2. Le collecteur.....	41
2.3. Les composants d'un concentrateur.....	42
2.3.1. Réflecteur.....	42

Sommaire

2.3.1.1. Surface du miroir et surface d'ouverture.....	44
2.3.1.1.1. Facteur de concentration.....	44
2.3.1.1.2. Matière des miroirs.....	46
2.3.2. Récepteur.....	46
2.3.2.1. Composantes du récepteur.....	47
2.3.2.1.1. Le tube absorbeur.....	47
2.3.2.1.2. Enveloppe en verre.....	48
2.3.3. Revêtement cermet (absorbteurs composites céramique-métal).....	48
2.3.4. Système de poursuite solaire.....	49
2.3.4.1. Angle de poursuite solaire	49
2.4. Fluide transfert de chaleur HTF.....	49
2.4.1. Génération indirect de vapeur.....	50
2.4.2. Génération direct de vapeur.....	50
2.4.3. Comparaison entre les fluides.....	50
2.4.4. Le fluide caloporteur.....	50
3. Le bilan thermique.....	51
3.1. Le bilan thermique du tube.....	51
3.2. Le bilan thermique du fluide.....	52
3.3. Les bilan thermique du tube absorbeur.....	53
3.4. Le bilan thermique de l'enveloppe en verre.....	55
3.5. Perte thermique.....	55
3.5.1. Perte par conduction.....	56
3.5.2. Perte par convection.....	56
3.5.3. Perte par rayonnement.....	56
3.6. Puissance utile.....	57
3.7. Rendement instantané du concentrateur solaire.....	57
Conclusion.....	57

Chapitre IV :Modélisation mathématique de calcul thermique du champ solaire

Introduction.....	58
1. Présentation du modèle mathématique issu des bilans thermique.....	58
1.1. Pour l'absorbeur.....	58
1.2. Pour la vitre.....	59

1.3. Fluide caloporteur.....	59
2. Résolution mathématique du système d'équations.....	60
2.1. Méthode de Newton-Raphson.....	60
2.1.1. Principe de la méthode.....	60
2.2. Application au modèle.....	62
2.2.1. Pour l'absorbeur.....	62
2.2.2. Pour la vitre.....	62
2.2.3. Pour le fluide.....	62
3. Organigramme de la simulation.....	63
3.1. Présentation de la centrale étudiée.....	64
4. Présentation des résultats de simulation du champ solaire.....	65
4.1. Variation de température Fluide, Récepteur et vitre en fonction d'éclairement reçu (DNI).....	65
4.2. Influence du débit massique sur la température du fluide, récepteur et vitre.....	66
4.3. Influence de la température d'entrer fluide sur la température sortie fluide, récepteur et vitre.....	67
4.4. Variation des coefficients d'échange.....	68
4.5. Variation de la puissance reçue, gagné et perdu en fonction éclairément reçu (DNI).....	69
4.6. Variation du rendement du champ solaire en fonction de éclairément solaire DNI.....	70
Conclusion.....	70
Conclusion Générale.....	72
Annexe	
Références	

Introduction

Générale

Introduction Générale

Avec le développement technologique rapide qui se déroule dans le monde, les gens recherchent des sources d'énergie alternatives pour le pétrole et le gaz, car ces derniers polluent le climat et parce que leurs sources sont susceptibles de disparaître. Il l'a remplacé par des énergies naturelles telles que le vent et l'eau.

Contrairement aux autres sources d'énergie, les énergies renouvelables permettent de produire, avec une technologie généralement peu complexe, une énergie « décentralisée » et générant peu d'impacts sur l'environnement : l'énergie solaire est une des énergies les plus facilement exploitables ; elle est en outre inépuisable.

Les dernières années ont vu l'émergence d'une nouvelle technologie d'exploitation de l'énergie solaire par voie thermodynamique.

L'exploitation du rayonnement solaire concentré a. l'aide de champs de miroirs, les centrales solaires thermodynamiques à concentration permettent de chauffer des fluides à des températures susceptibles. Associées à des systèmes de stockage de la chaleur, elles peuvent être utilisées non seulement pour la production d'électricité 24 heures sur 24, mais aussi pour le chauffage, le dessalement de l'eau ou la fabrication d'hydrogène.

Les capteurs "**cylindro-paraboliques**" sont composés de miroirs paraboliques disposés à l'arrière d'un capteur en forme de tube. La forme parabolique des miroirs permet d'en concentrer les rayons du soleil tout au long du tube. En faisant circuler le fluide caloporteur au centre de ce tube, le fluide étant chauffée et conduit la chaleur vers le récipient avec un débit déterminé.

Le tube absorbeur est la partie essentielle du concentrateur, il représente généralement 30% du coût de la construction, il est généralement constitué de matériaux thermiquement conduction et rigides. Et ce tube absorbeur est souvent en cuivre recouvert d'une couche sélective, et il est entouré d'une enveloppe transparente en verre.

Dans ce travail on présente cette technologie et on décrit d'une manière assez exhaustive le fonctionnement d'une centrale cylindro-parabolique, puis on procède à la simulation du tube absorbeur sur MATLAB.

Ce travail vise à étudier les performances thermiques du 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** : est consacré à présenter des généralités sur les énergies renouvelables.

- **Deuxième chapitre** : on s'intéresse à présenter le gisement solaire et calcul de rayonnement thermique.
- **Le chapitre 3** : présente l'étude thermique d'un collecteur cylindro-parabolique.
- **Chapitre 4** : modélisation mathématique et application au calcul du champ solaire.

On terminera notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I :
Généralités
sur les
énergies
renouvelables

1. Introduction

Les énergies renouvelables sont des formes d'énergies inépuisables c'est à dire leur consommation ne diminue pas leur ressource à l'échelle humaine.

L'énergie solaire est la ressource énergétique renouvelable la plus abondante. C'est l'énergie produite dans toutes les directions par le soleil grâce au rayonnement solaire.

Dans ce chapitre, nous avons parlé sur les énergies renouvelables et nous nous sommes concentrés sur l'énergie solaire en particulier et la description des techniques de production d'électricité via les systèmes de concentration des rayons solaires.

1.1. Énergie renouvelable

Le terme énergie renouvelable est employé pour désigner des énergies qui, à l'échelle humaine au moins, sont inépuisables et disponibles en grande quantité. Ainsi il existe cinq grands types d'énergies renouvelables : l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la biomasse et la géothermie. Leur caractéristique commune est de ne pas produire, en phase d'exploitation, d'émissions polluantes (ou peu), et ainsi d'aider à lutter contre l'effet de serre et le réchauffement climatique[1].

1.1.1. Énergie éolienne

On appelle énergie éolienne, la conversion de la force des vents en énergie mécanique, énergie électrique ou énergie cinétique.

C'est une énergie renouvelable car sa source est inépuisable mais intermittente (le vent ne souffle pas toujours).

Le principe de l'énergie éolienne est connu depuis l'antiquité. C'est la deuxième énergie la plus ancienne exploitée par l'homme après le feu. On utilise l'énergie éolienne directement pour propulser des bateaux en récupérant la force cinétique des vents pour la transférer au navire[2].



Figure (I.1) : Un champ d'éoliennes[3].

1.1.2. Énergie hydraulique

Le terme d'énergie hydraulique désigne l'énergie qui peut être obtenue par exploitation de l'eau. Une catégorie d'énergies moins soumise aux conditions météorologiques, mais qui reste réservée à une production d'envergure[1].

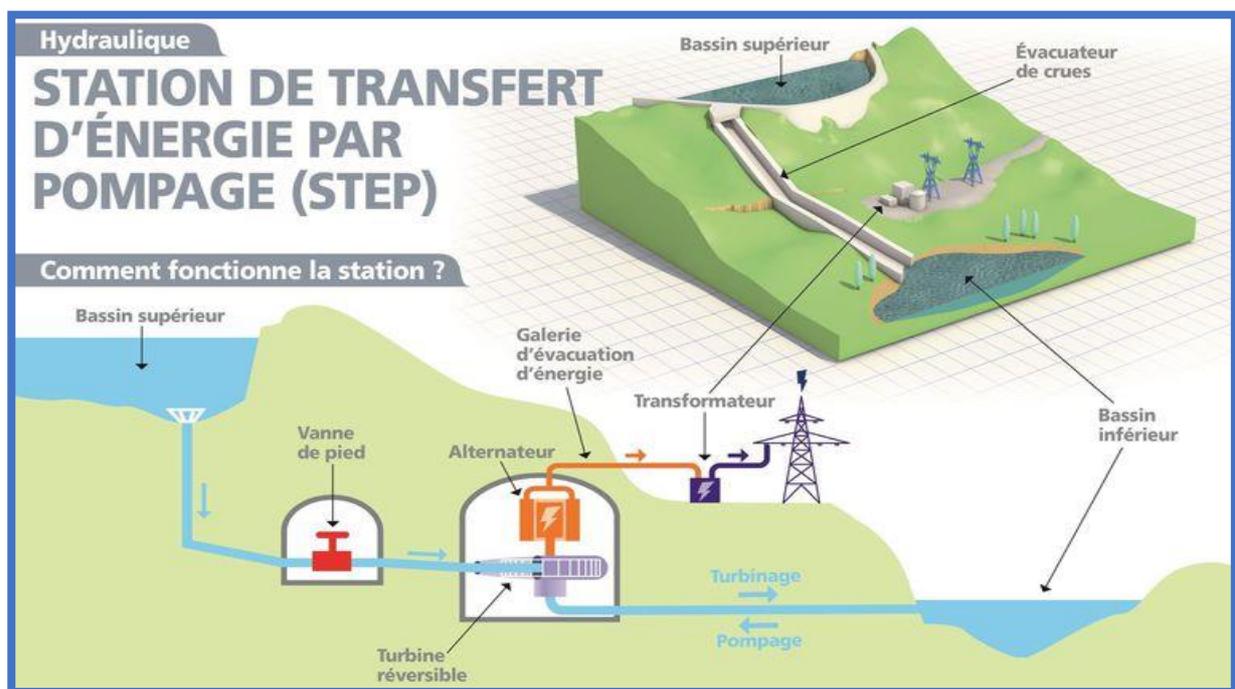


Figure (I.2) : Schéma de production d'électricité par l'hydraulique[4].

1.1.3. Énergie biomasse

La biomasse peut devenir une source de chaleur, d'électricité ou de carburant. Plusieurs techniques peuvent être mises en œuvre pour en tirer son énergie : la combustion, la gazéification, la pyrolyse ou encore la méthanisation par exemple.

L'énergie biomasse peut être produite de manière locale. Mais il faut veiller, dans certains cas, à ce qu'elle n'entre pas en concurrence avec la chaîne alimentaire[1].

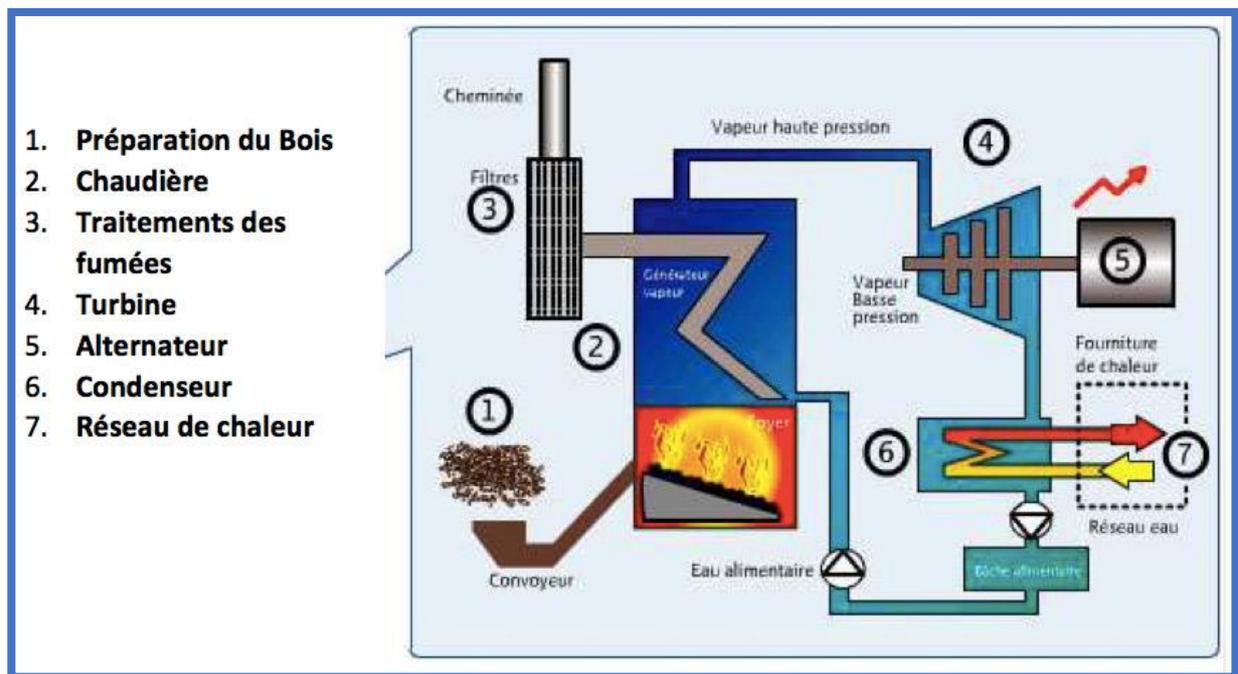


Figure (I.3): Un schéma Illustrant la biomasse[5].

1.1.4. Énergie géothermique

La géothermie est une énergie renouvelable provenant de l'extraction de l'énergie contenue dans le sol. Cette chaleur résulte essentiellement de la désintégration radioactive des atomes fissiles contenus dans les roches. Elle peut être utilisée pour le chauffage, mais aussi pour la production d'électricité. Il s'agit de l'une des seules énergies ne dépendant pas des conditions atmosphériques[1].

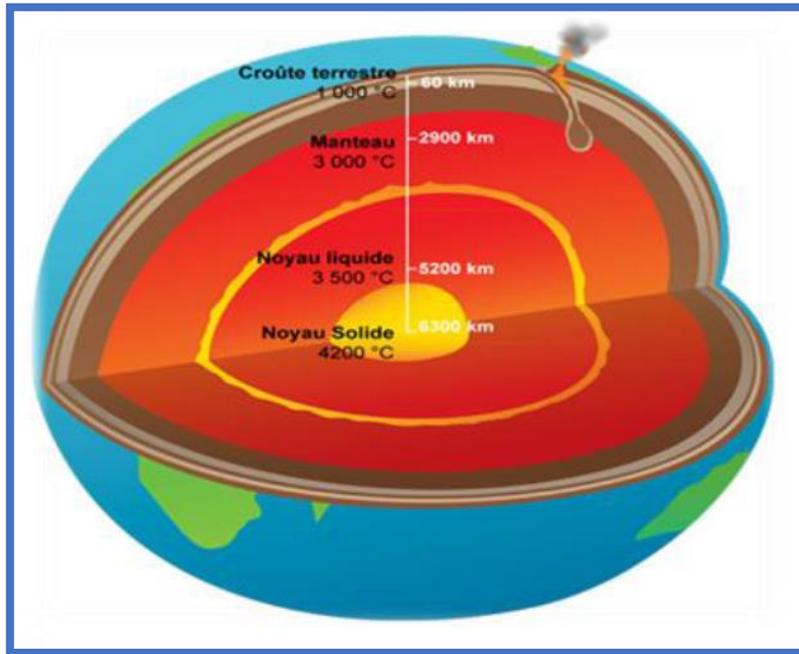


Figure (I.4) : La répartition de la température dans le globe terrestre[1].

1.1.5. Énergie solaire

L'énergie solaire est l'énergie transmise par le Soleil sous la forme de lumière et de chaleur. Cette énergie est virtuellement inépuisable à l'échelle des temps humains, ce qui lui vaut d'être classée parmi les énergies renouvelables (même si le Soleil disparaîtra un jour).

L'énergie solaire peut être utilisée directement par l'Homme pour s'éclairer (fenêtres, puits de lumière), se chauffer et cuisiner (chauffe-eau solaire, four solaire) ou pour produire de l'électricité par l'intermédiaire de panneaux photovoltaïques[6].



Figure (I.5) :Les panneaux solaire[7].

Indirectement, l'énergie solaire est aussi la source de la plupart des énergies renouvelables et des hydrocarbures fossiles. Elle est en effet responsable de la mise en mouvement des masses d'eau (énergie marine) et d'air (énergie éolienne), du cycle de l'eau (énergie hydraulique) et de la photosynthèse (biomasse et hydrocarbures). Seuls trois types d'énergie ne dérivent pas de l'énergie solaire :

- L'énergie marémotrice.
- L'énergie géothermique.
- L'énergie nucléaire.

Le potentiel de cette source d'énergie est donc immense.

2. Énergie Solaire

Le soleil est un gigantesque source d'énergie renouvelable il libère beaucoup d'énergie sous forme de chaleur et lumière . Ce Rayonnement solaire utilisé pour se chauffer et permet de fabriquer de l'électricité à partir des panneaux photovoltaïques ou des centrales solaire thermiques .

2.1. Exploitation de l'énergie solaire

L'utilisation d'énergie solaire passe par deux transformations . La transformation du rayonnement en chaleur et en électricité , ces transformations ont permet de développer 3 filières d'exploitations :

- Pour la chaleur :
 - L'énergie solaire thermique .
- Pour l'électricité :
 - L'électricité solaire thermodynamique .
 - L'électricité solaire photovoltaïque .

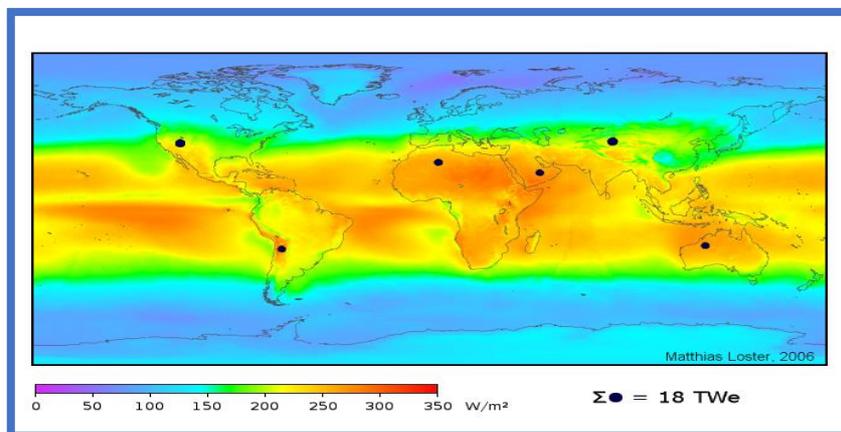


Figure (I.6) : Répartition de l'énergie solaire moyenne reçue au sol[8].

2.2. Énergie solaire thermique

Énergie solaire thermique c'est la transformation d'énergie solaire en énergie thermique et c'est une forme d'énergie renouvelable durable respectueuse de l'environnement , il y a plusieurs applications pour cette énergie : le chauffage de l'eau sanitaire , le chauffage des locaux , et dans les petites installations et dans les grandes centrales électriques .

Il y a trois types d'énergie solaire thermique :

2.2.1. Basse température

Dans ce cas on est dans les installations maison qui fonctionne à des températures inférieure à 65° Celsius , l'énergie thermique récupère la chaleur du soleil grâce à un fluide qui circule dans les panneaux solaires .

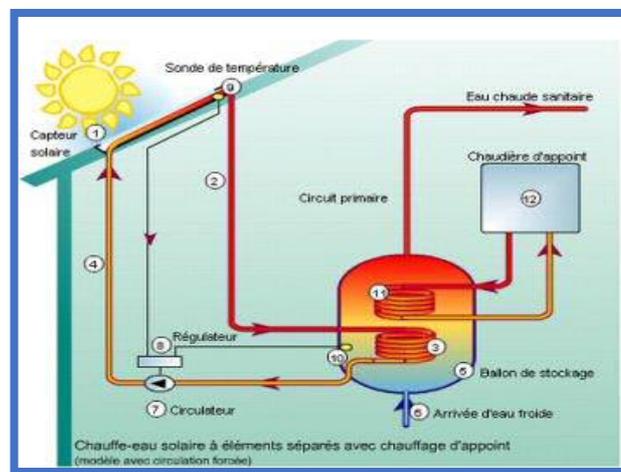


Figure (I.7) :Principe d'un panneau solaire thermique pour l'eau chaude sanitaire[9].

✚ Fonctionnement

Les panneaux solaires captent les rayons grâce à des plaques absorbantes qui se trouvent à l'intérieure des panneaux, ensuite derrière ces plaque passe un circuit d'eau qui récupère cette chaleur .Par la suite ce circuit alimente un circuit secondaire qui alimente une maison en chauffage.

2.2.2. Température moyenne

Dans ce cas on utilise des appareils qui concentrent les rayonnements solaires pour obtenir des températures plus élevées entre 100° et 400° C.

Pour ce type d'énergie on utilise deux types de capteurs :

- ✚ Capteur solaire sous vide.
- ✚ Capteur solaire à concentration.

2.2.2.1. Capteur solaire sous vide

Le capteur solaire sous vide est constitué :



Figure (I.8) : Capteur a tube sous vide[10].

- D'une série de tubes de verre sous vide
- D'un absorbeur à l'intérieur des tubes de verre
- D'un tube en cuivre à l'intérieur des tubes de verre

Les tubes en cuivre sont parcourus par un fluide caloporteur qui se réchauffe au fil de l'écoulement dans les tubes.

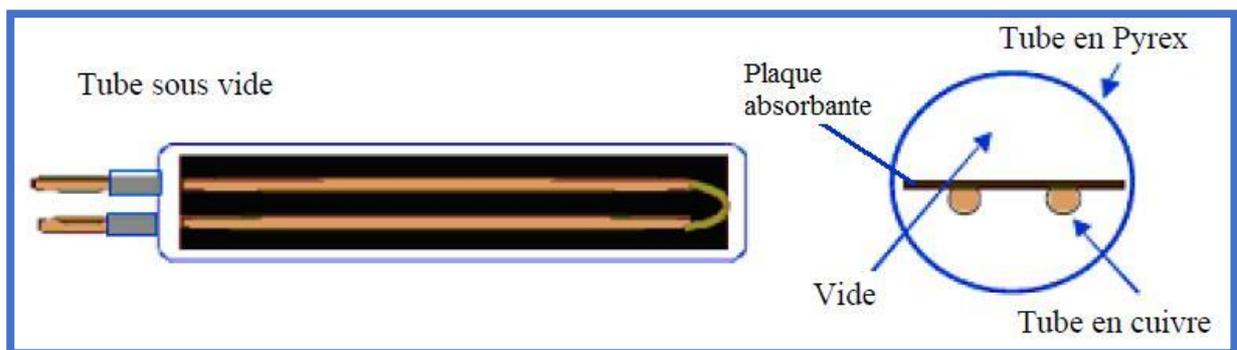


Figure (I.9) : intérieure tube sous vide[11].

2.2.3. Haute température

C'est des centrales solaires thermiques de production d'électricité qui fonctionnent à des températures supérieures à 900° C



Figure (I.10) : Centrale solaire thermique en Espagne[12].

2.3. Électricité solaire thermodynamique

Le solaire thermodynamique ou CSP (Concentrated Solar Power) est l'ensemble des techniques utilisées pour transformer l'énergie du rayonnement solaire en chaleur grâce un dispositif optique qui concentre les rayonnements solaires pour ensuite convertir en énergie électrique.

2.3.1. Histoire [13]

L'histoire de l'utilisation de l'énergie solaire thermique à concentration commence en **Grèce** au VIII^{ème} av. JC. En effet, lors de la cérémonie d'ouverture des premiers Jeux Olympiques de 776 av. JC, la flamme olympique était allumée par les rayons du soleil à l'aide du skaphia , l'ancêtre du miroir parabolique.



Figure (I.11) :Archimède et un de ses miroirs ardents[13].

Cette invention du miroir ardent serait réutilisée cinq siècles plus tard par **Archimède** lors du siège de Syracuse (Sicile). Alors que cette colonie grecque était attaquée par la flotte romaine, la légende veut qu'Archimède ait mis au point des miroirs géants en bronze polis pour réfléchir et concentrer les rayons du soleil afin d'enflammer les voiles des navires romains.

De l'autre côté de l'Océan Atlantique, **Inti** le dieu soleil des **Incas**, envoie MancoCápac, le premier empereur légendaire des Incas. Le culte du soleil devint ainsi très important. A partir du XV^{ème} siècle, il fait l'objet d'un des rituels les plus populaires: l'**Inti Raymi** (la résurrection du soleil). Il se déroule dans la capitale Inca Cuzco pendant le solstice d'hiver, le 24 juin, et ce pendant 9 jours durant lesquels les Incas se prêtaient à des danses mais aussi à des sacrifices. A cette occasion, un feu était allumé par le prêtre suprême à l'aide d'un bracelet en or: le chipana.

En Europe, il faut attendre le XVI^{ème} siècle et la venue de **Léonard de Vinci** pour redonner un souffle aux technologies solaires. En 1515, Léonard de Vinci invente un nouveau concentrateur solaire: un système de type CLFR (Compact Linear Fresnel Reflector). Cependant, ce système semble n'avoir existé que sur le papier.

En 1615, **Salomon de Gaus** construit une pompe solaire. La force motrice était fournie par de l'air chauffé par le rayonnement solaire.

Au XVIII^{ème} siècle, le miroir ardent de l'antiquité et de l'empire Inca refait surface en France. **Georges-Louis Leclerc, Comte de Buffon** fait construire en 1747 un miroir composé de 168 glaces planes de six pouces de largeur sur huit de hauteur. Il fait ainsi fondre différents métaux comme l'étain, le plomb et l'argent.

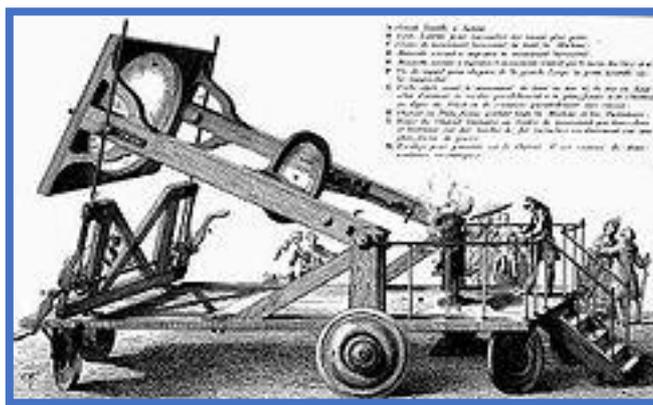


Figure (I.12) :Le cuiseur solaire d'Antoine Laurent de Lavoisier[13].

Les expériences autour de l'énergie solaire s'enchaînent. En 1774, **Antoine Laurent de Lavoisier**, chimiste, philosophe et économiste, invente un cuiseur solaire composé de lentilles convergentes afin de fondre des métaux.

En 1874, le premier distillateur solaire voit le jour à Las Salinas, sur le haut plateau d'Atacama au Chili, qui produit 23 tonnes d'eau douce par jour ensoleillé. Quelques décennies plus tard, le physicien anglais **Charles Vernon Boys** invente et met en œuvre le premier capteur cylindro-parabolique en 1912. Il crée ainsi la première centrale électrique solaire à Meadi en Égypte, utilisée pour le pompage de l'eau d'irrigation.

Il faudra ensuite attendre la fin de la seconde guerre mondiale pour retrouver de nouvelles avancées dans le domaine du solaire thermique. Le français **Félix Trombe** a eu l'idée d'utiliser un projecteur DCA abandonné par les allemands à Meudon (Hauts-de-Seine). En 1946, il le transforme en four solaire et grâce à ses recherches encourageantes, il construit en 1949 un nouveau four solaire à Mont-Louis (Pyrénées-Orientales) d'une puissance de 50kW.

En 1963, l'italien **Giovanni Francia** et le français **Marcel Perrot** installent le premier système CLFR(Compact Linear Fresnel Reflector) à Marseille, près de 450ans après son invention par Léonard de Vinci.

Pendant ce temps-là, le four de Mont-Louis connaît de bons résultats. Ainsi le gouvernement français construit un four solaire de taille quasi industrielle à Odeillo. Mis en service en 1970, le four solaire d'Odeillo a une puissance de 1MW.

En 1983, **EDF** et le **CNRS** construisent Thémis, la première centrale électro-solaire à tour française d'une puissance de 2500 kW. Cependant la politique du tout nucléaire aura raison d'elle, puisqu'elle fermera ses portes 3 années plus tard .

2.3.2. Les types de centrales solaires thermodynamiques

On peut convertir l'énergie thermique du soleil en électricité, mais pas directement, mais en passant par différentes centrales solaires thermiques.

Il existe plusieurs types de centrales thermodynamiques basés sur le même principe la concentration des rayons du soleil en un seul et unique point. Cependant, les méthodes de concentration des rayons varient en fonction des différentes centrales.

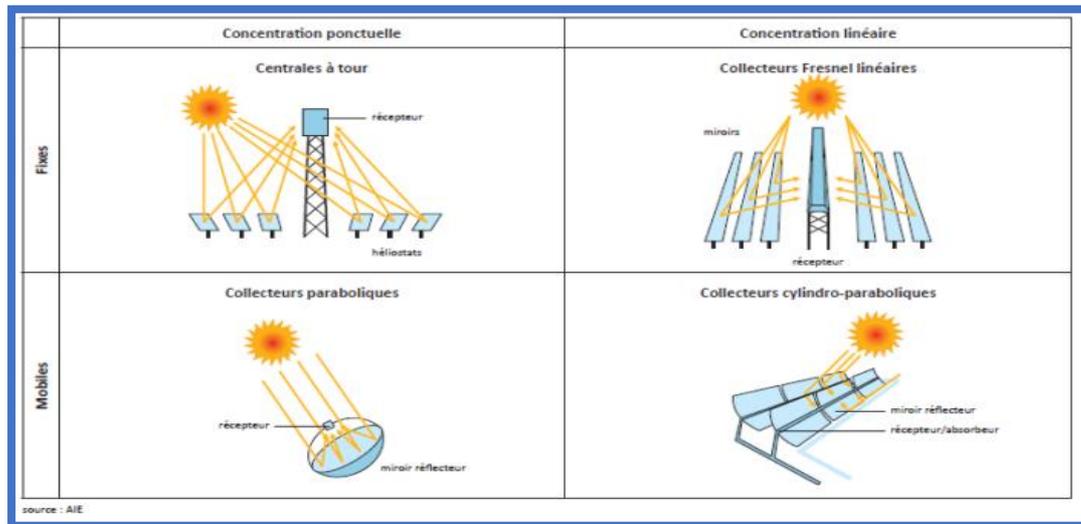


Figure (I.13) : Les types de centrales solaires[14].

2.3.2.1. Les concentrateurs ponctuels

a) Concentrateur à tour (fixe)

Les centrale solaire à tour sont constituées de nombreux de miroirs concentrant les rayons solaires vers une chaudière (récepteur) située au sommet d'une tour. Les miroirs uniformément repartis sont appelés héliostats. Chaque héliostats est orientable, et suit le soleil individuellement et le réfléchit précisément en direction du receveur au sommet de la tour solaire. Le facture de concentration peut dépasser 1000 ce que permet d'atteindre des températures importantes, de 600°c a 1000°c. L'énergie concentrée sur le receveur est ensuite soit directement transférée à la fluide thermodynamique (génération directe de vapeur entrainant une turbine ou chauffage d'air alimentant une turbine à gaz), soit utilisée pour chouffer un fluide caloporteur intermédiaire. Ce liquide caloporteur est ensuite envoyé dans une chaudière et la vapeur générée actionne des turbines[15].

Dans tous les cas, les turbines entrainent des alternateurs produisant de l'électricité.

Aujourd'hui, Les tours solaires sont utilisées pour deux tâches principales[16] :

- La génération de vapeur qui permet de réduire les coûts.
- Le stockage thermique avec l'utilisation de sels fondus.

Il y a 3 types de récepteur [16] :

- **Le récepteur à eau-vapeur:** Dans ce cas, on utilise un récepteur à tubes alimenté en eau sous haute pression.

- **Le récepteur à sel fondu:** Le récepteur à sel fondu est un appareil robuste. Il est parcouru sur toute la longueur de sa paroi par un liquide à grande vitesse.
- **Le récepteur à air:** Aucune centrale à tour n'a été construite autour de ce choix.

1. Avantages [15]

- Source d'énergie inépuisable et gratuite.
- Pas d'émission polluante.
- Permet de valoriser des zones désertiques.

2. Inconvénients [15]

- Nécessite un fort ensoleillement.
- Surface au sol importante.
- Investissent lourd.

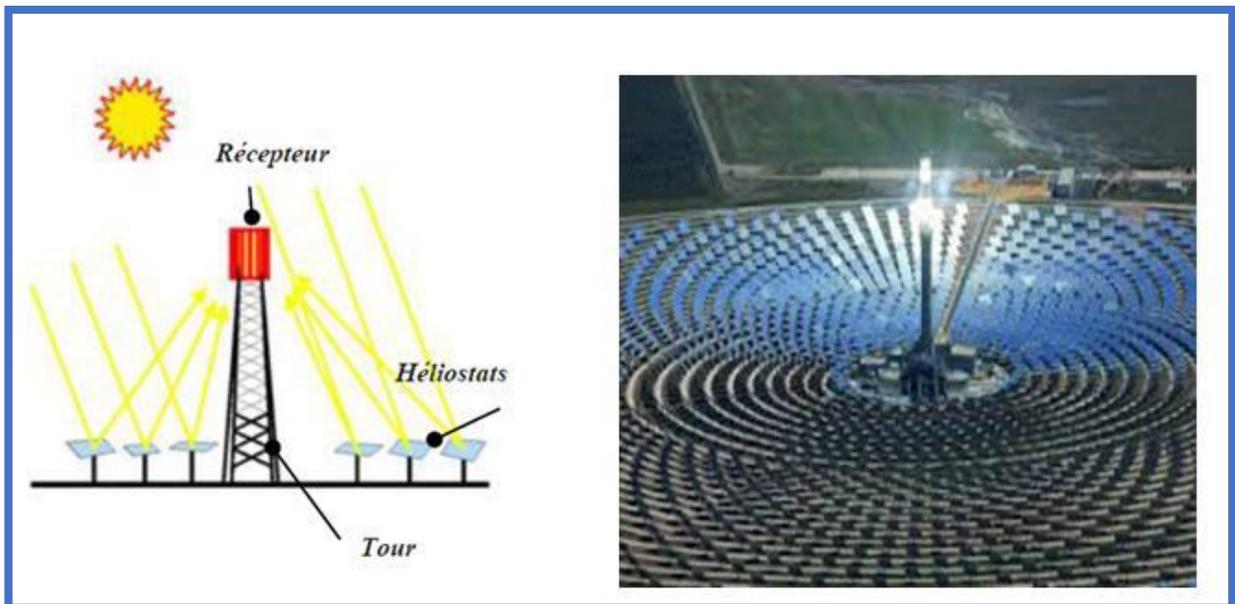


Figure (I.14):Tour solaire[1].

b) Concentrateur parabolique (mobile)

Ce type de centrale, Il se compose de plusieurs parabole chaque parabole fonctionne d'une manière autonome, chaque parabole il se compose a de miroir est un récepteur, Cette parabole suit le déplacement de soleil pour capter le maximum de rayonnement émis par celui-ci.

Ces miroir concentrer les rayonne de soleil vers un point dans le récepteur appelé foyer. Ce récepteur il se compose d'un moteur Stirling pour transformer l'énergie thermique ou énergie mécanique puis converti ou énergie électrique.

La température peut atteindre dans le récepteur à 1000°C, dans ce type de centrales on ne peut pas stocker l'énergie et il n'est pas nécessaire de refroidir l'eau.

- **Le cycle de Stirling**

Cette transformation thermomécanique est considérée depuis plus d'un siècle comme le meilleur des moteurs thermiques tant son rendement théorique est élevé. Il s'agit d'un moteur à piston à chauffage externe, utilisant couramment l'hélium ou l'hydrogène comme fluide thermodynamique. Le système chargé de transformer la chaleur provenant de la radiation solaire en puissance mécanique est monté directement sur le capteur parabolique, à proximité de son foyer solaire. Dans le cas des capteurs paraboliques, la source chaude se situe généralement à une température de 700°C et la source froide est assurée par l'air ambiant, brassé par un ventilateur à l'arrière du moteur. Le rendement chaleur –électricité du moteur Stirling à ces températures peut atteindre 40% [17].

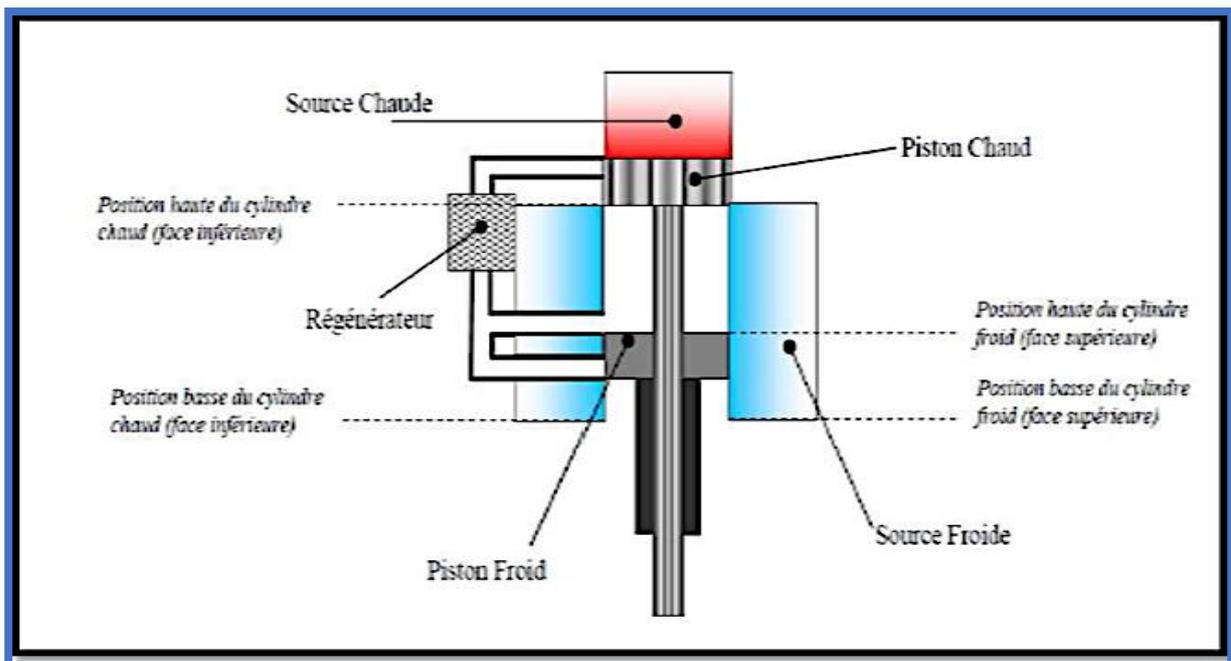


Figure (I.15) : schéma d'un moteur Stirling[18].

1. Avantages[15]

- Modulaire.
- Pas d'émissions polluantes.
- Bon rendement.
- Petites unités indépendantes.
- Peuvent être installés dans des endroits isolés.

2. Inconvénients

- Fonctionnement par intermittence.
- Stockage impossible.



Figure (I.16) : Capteur parabolique avec moteur Stirling[16].

2.3.2.2. Les concentrateurs linéaires

a) concentrateur Fresnel linéaire (fixe)

Ces longs miroirs parfaitement plans, dits aussi « réflecteurs compacts linéaires », sont agencés de façon à pivoter suivant la course du soleil. Tant que celui-ci est sur zone, ils peuvent diriger les rayons en les concentrant vers le gros tube absorbeur placé en surplomb.

Ce tube horizontal, lui-même surmonté d'un miroir secondaire cintré, comporte un fluide caloporteur (sels fondus en général) qui, en circulant, est chauffé à 500 °C.

Cette énergie est transférée à un circuit d'eau, produisant ainsi la vapeur nécessaire au fonctionnement de la turbine génératrice d'électricité[19].

1. Avantage [15]

- Les miroirs plans sont plus simple a fabriqué et meilleur marche que les paraboliques et cylindro- parabolique.
- Moins de prise au vent, infrastructure moins importante qu'une centrale a capteur cylindro-parabolique.

2. Inconvénient

- Performances optiques inferieures d'environ 30% par rapport aux réflecteur parabolique et cylindro-parabolique.
- Investissement lourd.

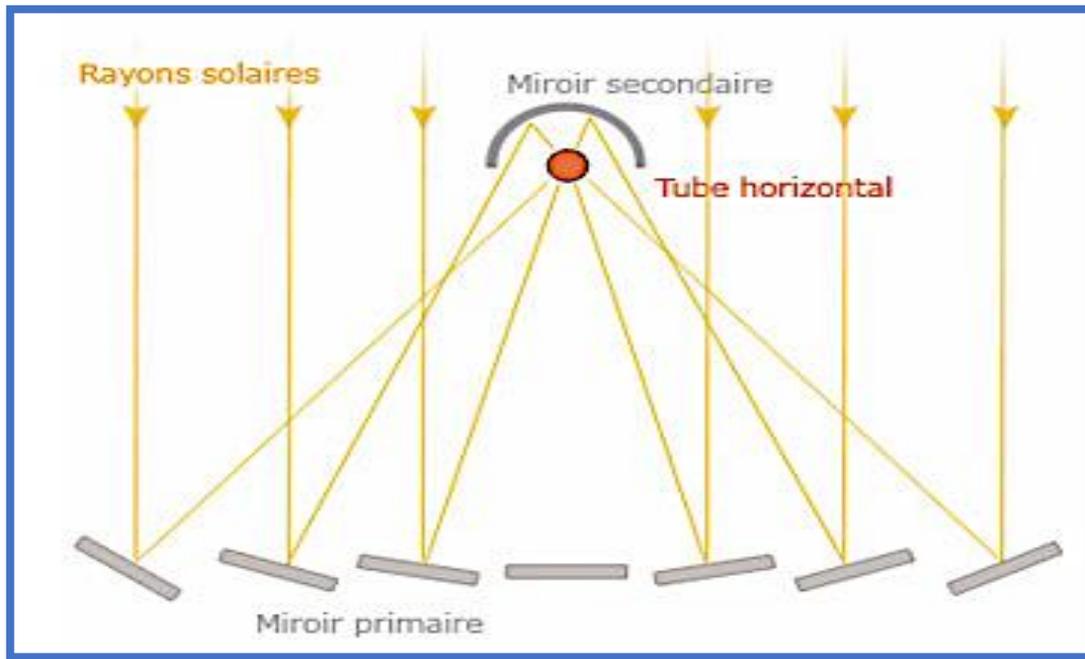


Figure (I.17) : principe de fonctionnement du collecteur de Fresnel[20].

b) Concentrateur cylindro-parabolique (mobile)

Les concentrateurs cylindro-parabolique «CCP» (Parabolic Trough Collector) sont les concentrateurs linéaires les plus largement utilisés pour la conversion thermodynamique de l'énergie solaire, surtout dans les domaines industriels et domestiques qui exigent une température de service entre 80°C et 160°C. La production d'électricité nécessite des températures élevées de 400°C à 1200°C .Nous pouvons produire de la vapeur surchauffée

Dans les centrales électriques, avec des concentrateurs cylindro-parabolique, où la température atteignant jusqu'à 1500°C et plus. Le concentrateur cylindro-parabolique est la technologie la plus prometteuse pour prendre la place à des énergies non renouvelables (les énergies fossiles et les énergies nucléaires) surtout dans le domaine industriel (centrales électriques, systèmes hybrides, le dessalement, l'air conditionné, la réfrigération, irrigation, ...etc.)

Ces centres reposent sur des miroirs semi-circulaires tournant autour d'un axe pour suivre la rotation du soleil.

Ces miroirs captent les rayons du soleil et les concentrent sur un fluide caloporteur pour atteindre une température de 500 degrés. Ce fluide se déplace vers un réservoir dans lequel de l'eau est produite pour produire de la vapeur d'eau qui entraîne le turbo pour produire de l'électricité[18].

1. Les avantages [15]

- C'est une source gratuite et elle inépuisable.
- Elle peut fonctionner sans interruption grâce au nouveau système de stockage.
- Il n'y aucune émission de produits polluant.

2. Les inconvénients [15]

- Ces centrales nécessitent d'une surface au sol très importante un cout d'installation important pour que la centrale fonctionne à plein régime.
- Il faut souvent les placer dans des zones à très fort ensoleillement et une zone assez chaude.

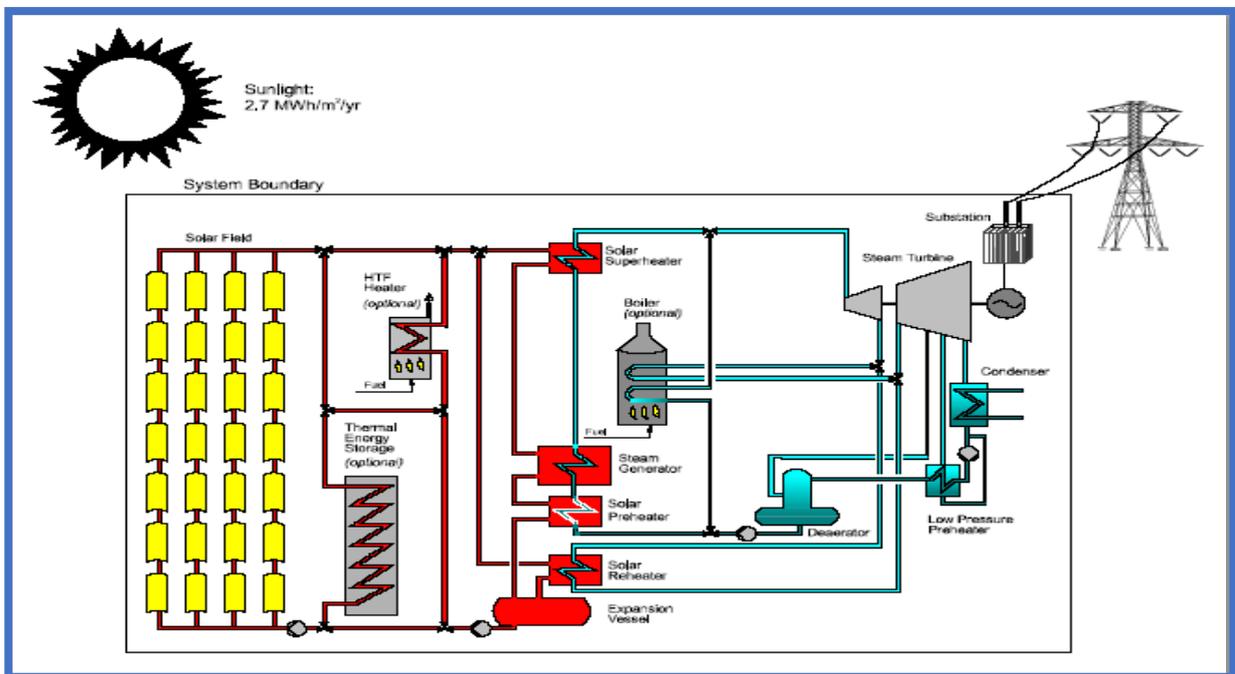


Figure (I.18) : Configuration typique d'une centrale à collecteurs[16].

Conclusion

L'utilisation des énergies renouvelables et la protection de l'environnement est culture mondiale. L'exploitation des matériaux abandonnés ou recyclés est une obligation économique et environnementale. Il existe de nombreuses méthodes qui doivent être prises en compte pour l'exploitation de l'énergie solaire par des projets basés sur les concentrateurs solaires non difficiles et facilement réalisable.

*Chapitre***II** :

Gisement

Solaire

Introduction

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé dans des domaines aussi variés que l'agriculture, la météorologie, les applications énergétiques et la sécurité publique. Dans les systèmes d'exploitation de l'énergie solaire, le besoin de données d'insolation est d'une importance capitale aussi bien dans la conception et le développement de ces systèmes que dans l'évaluation de leurs performances. L'existence d'une solide et fiable base de données est une nécessité pour au moins la survie économique des installations de collection et de conversion de l'énergie solaire.

1. Le soleil

Le soleil est la seule étoile du système solaire et la plus proche de la terre, sa lumière met environ 8 mn à nous atteindre. Sur le plan humain, le soleil a une importance primordiale car il est à l'origine de la vie sur terre, en lui fournissant d'énormes quantités d'énergie.

Le soleil est une étoile naine de forme pseudo-sphérique comparable à une immense boule de gaz très chauds qui se compose de 80% d'hydrogène et de 19% d'hélium, le 1% restant étant un mélange de plus de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus. Bien que le soleil soit une étoile de taille moyenne, il représente à lui seul 99.9% de la masse du système solaire qui est dominé par les effets gravitationnels de l'importante masse du soleil. Une densité moyenne de 700 000 kg/m³ de rayon. L'âge du soleil est approximativement de 5 milliards d'années, et il lui reste une durée de vie équivalente. La température apparente de la surface du soleil est entre 3 500°C et 5 900°C[21].

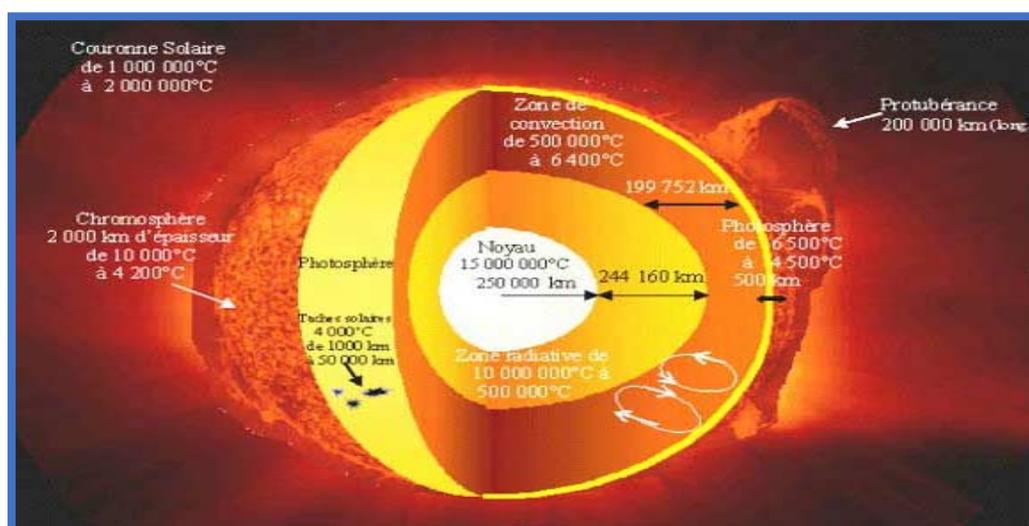


Figure (II.1) : Structure du soleil [21].

Le soleil n'est pas une sphère homogène, il est constitué de :

- **L'intérieur** : contient 40% de la masse du soleil, c'est là où se crée 90% de son énergie sous forme de rayons gamma et X, cette zone s'étend sur une épaisseur de 25.104 km, cette couche est divisée en trois zones, le noyau, la zone radiative, la zone convective. La température atteint plusieurs millions de degrés.
- **La photosphère** : est une couche opaque, son épaisseur est environ 300 km, les gaz qui la constituent sont fortement ionisés et capables d'absorber et d'émettre un spectre continu de radiations, elle émet 99% du rayonnement total principalement dans le visible et c'est elle que l'œil humain perçoit. L'ordre de grandeur de température est de quelques millions de degrés.
- **La chromosphère et La couronne** : constitue l'atmosphère du soleil, sont des régions à faible densité ou la matière est très diluée. Cette couche est caractérisée par un rayonnement émit très faible et la température très élevée (un million de degrés).

1.1. La constante du soleil

La constante solaire est la valeur moyenne du flux solaire reçu à la limite de l'atmosphère terrestre. Supposons que toute l'énergie émise par le soleil est reçue par la terre (absence de l'atmosphère) on aura alors:

$$S_0 = \sigma T_s^4 \left(\frac{R_s}{D_{st}} \right)^2 \quad (\text{II.1})$$

R_s : Rayon du soleil.

D_{st} : Distance terre-soleil.

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{k}^4$

S_0 : la constante solaire.

On a :

$(S_0)_{ext} = 1353 \text{ W/m}^2$ est la valeur moyenne de la constante solaire actuellement retenue.

La constante solaire hors atmosphère pour un jour quelconque s'écrit selon :

$$(S_0)_{ext} = 1353 (1 + 0,033 \cos 0,984 n) \quad (\text{II.2})$$

n : le numéro du jour de l'année.

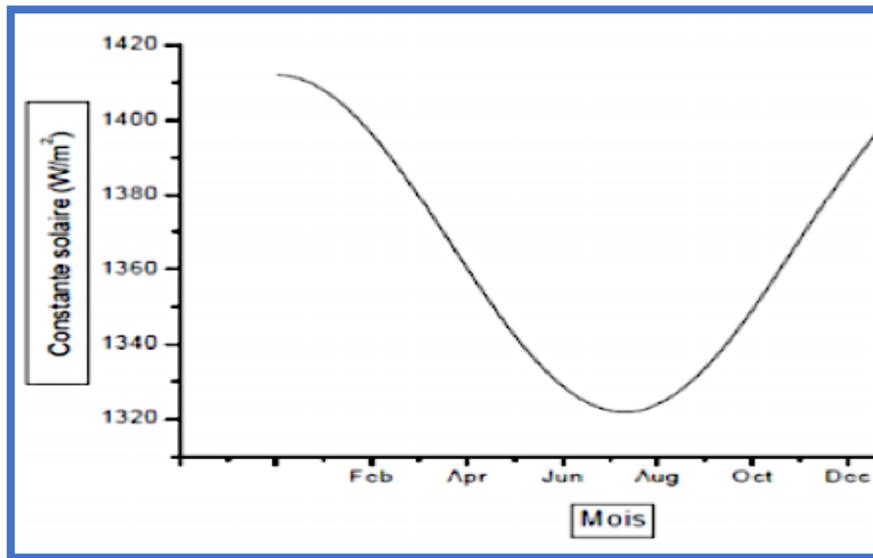


Figure (II.2) : Variation mensuelle de la constante solaire[22].

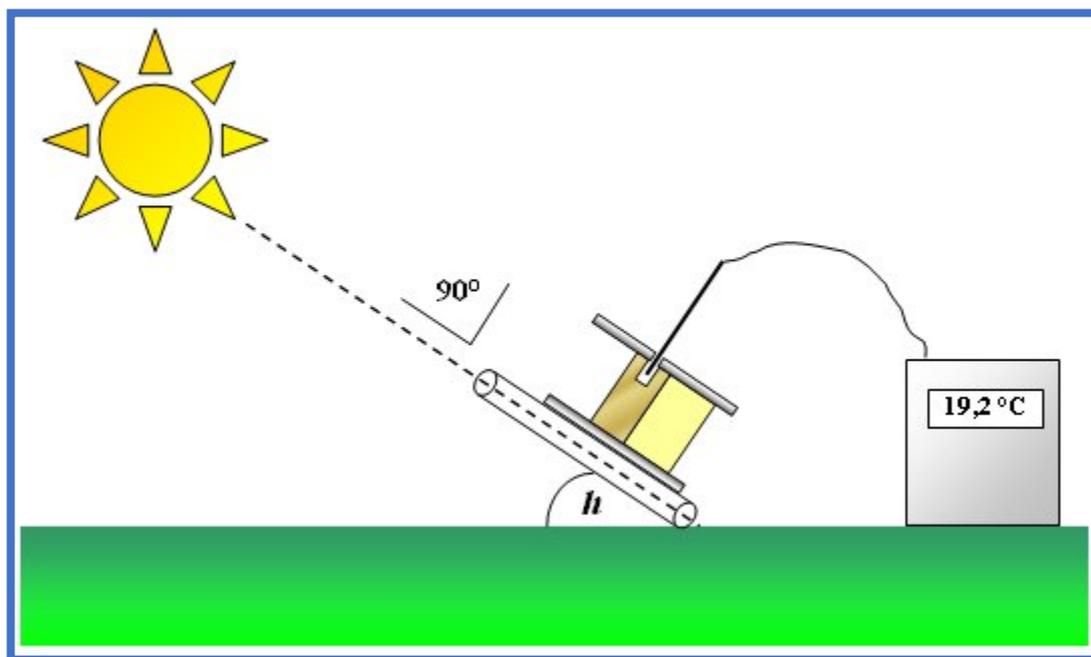


Figure (II.3): Mesure de la constante solaire [23].

1.2. Énergie solaire

L'énergie solaire est la seule source d'énergie externe de la terre, c'est une énergie propre et inépuisable.

1.2.1. Captation

Il existe différentes techniques pour capter une partie de cette énergie à savoir.

- **L'énergie solaire thermique** : La thermique solaire est un procédé de transformation de l'énergie solaire en une forme thermique, qu'on peut utiliser :
 - En usage direct de la chaleur : chauffe-eau solaire, chauffage solaire, cuisinière et séchoir solaire.
 - En usage indirect où la chaleur sert pour un autre usage : centrales solaires thermodynamiques, froid solaire.
- **L'énergie solaire thermodynamique** : La solaire thermodynamique utilise le solaire thermique pour produire de l'électricité selon le même principe qu'une centrale électrique classique mais en utilisant des centrales hélios thermoélectriques. Trois types principaux de centrales sont utilisés [21]:
 - Les centrales à capteurs cylindro-paraboliques pour atteindre des températures entre 300 et 350 °C.
 - Les centrales à capteurs paraboliques pour atteindre des températures de 1000°C ou plus.
 - Les centrales à tour pour atteindre 1000 °C.
- **L'énergie solaire photovoltaïque** : Elle permet de produire de l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque.

Les photopiles utilisent l'effet photovoltaïque, elles sont formées d'une couche d'un matériau semi-conducteur et d'une jonction semi-conductrice. Le silicium est le plus employé ; cependant, l'arséniure de gallium offre des meilleures performances, mais reste beaucoup plus onéreux [21].

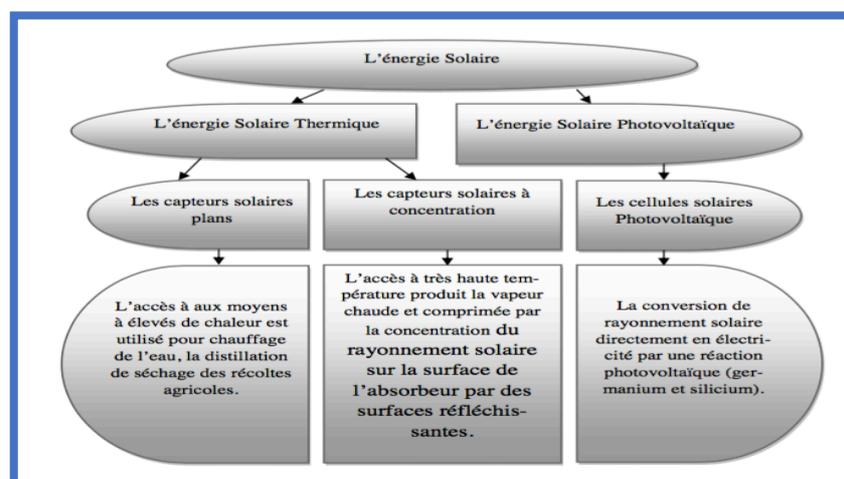


Figure (II.4): Plan de l'utilisation de l'énergie solaire[21].

2. Aspects géométriques

2.1. Mouvement du globe terrestre

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 (22 juin) qu'elle en est la plus éloignée [24].

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 $23,27^\circ$ avec la normale au plan de l'écliptique.

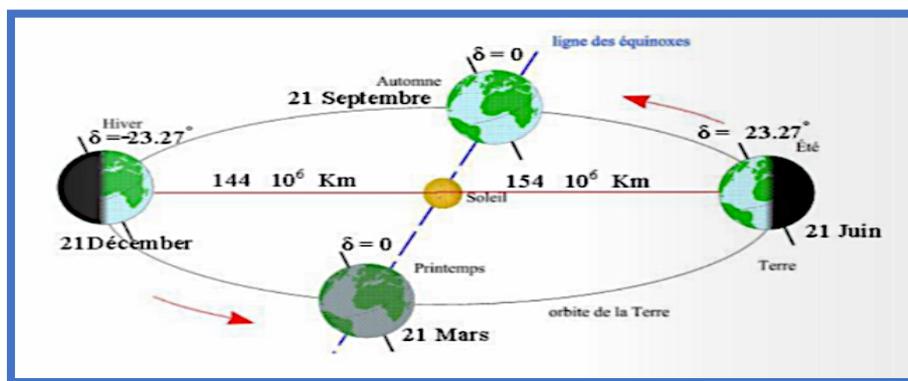


Figure (II.5): Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil[22].

2.2. La position du soleil par rapport à la terre

Les ondes électromagnétiques provenant du soleil portent l'énergie, la projection de cette énergie dépend de l'orientation de la surface réceptrice. Il est possible de déterminer la position du soleil dans la voûte céleste en fonction du temps et de la position de l'observateur sur la terre.

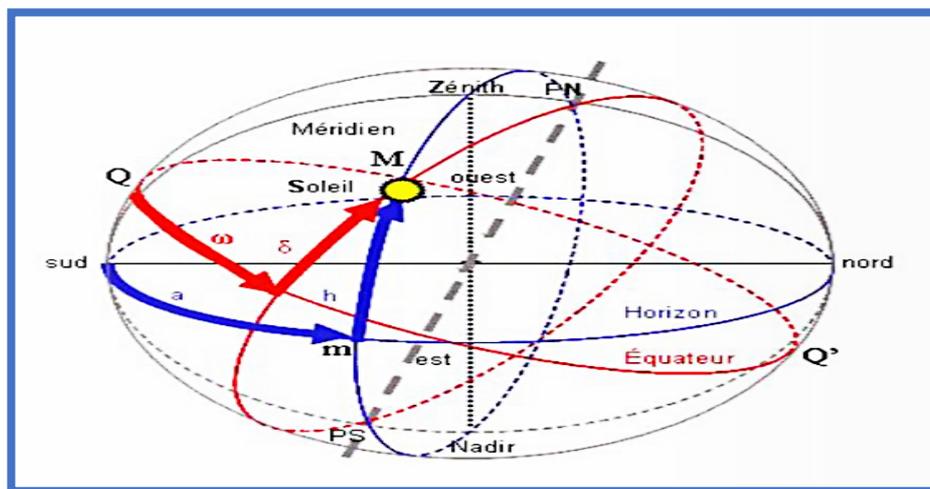


Figure (II.6) : Les coordonnées équatoriales et horizontales [22].

2.2.1. Repère de coordonnées équatoriales

a) Déclinaison solaire (δ)

C'est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre. Elle varie tout au long de l'année, entre deux valeurs extrêmes : $-23,27^\circ$ et $+23,27^\circ$ environ et elle s'annule aux équinoxes de printemps et d'automne, sa valeur peut être calculée par la formule[25]:

$$\delta = 23,27 \sin \left(2 \pi \frac{284+n}{365} \right) \quad (\text{II.3})$$

δ : angle de déclinaison degrés.

n : est le numéro de jour de l'année (1 pour 1 janvier et 365 pour le 31 décembre).

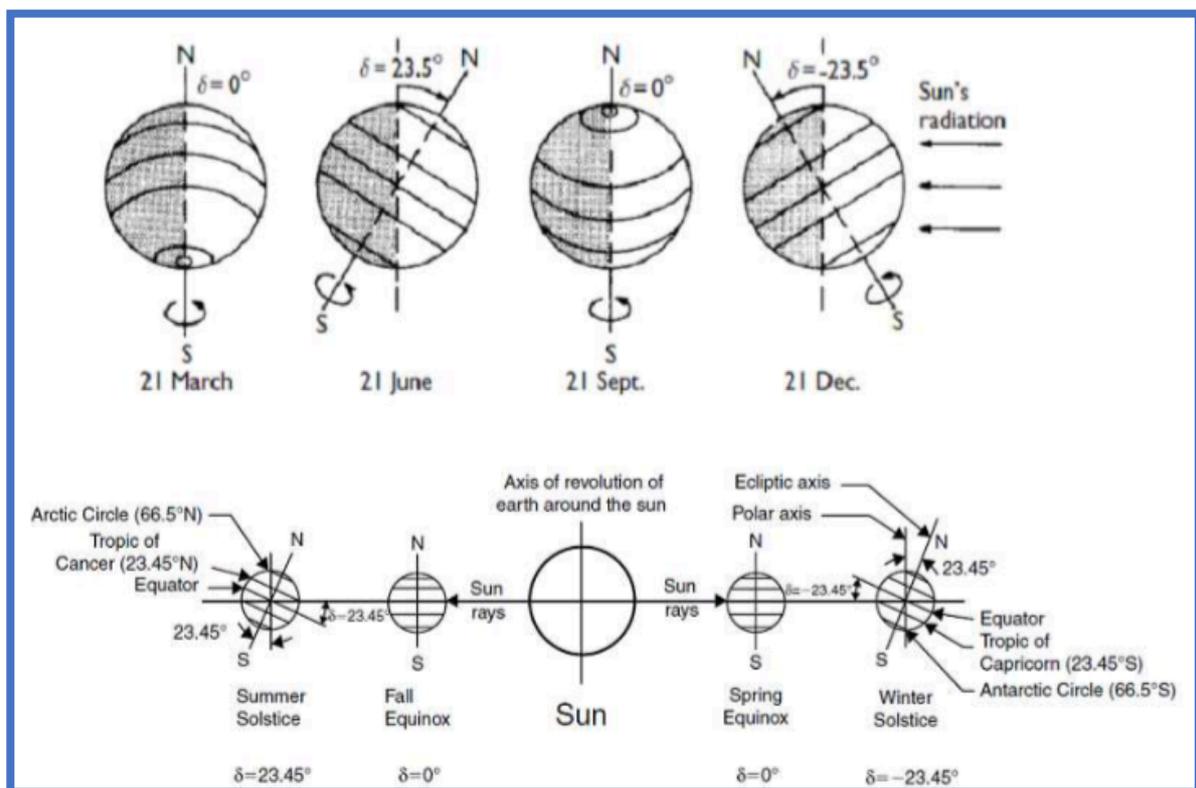


Figure (II.7): Variation de la déclinaison solaire [25].

b) Angle horaire (ω)

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. L'angle horaire est donné par la relation suivante :

$$\omega = 15^\circ(TSV - 12) \quad (\text{II.4})$$

TSV : C'est le temps solaire vrai.

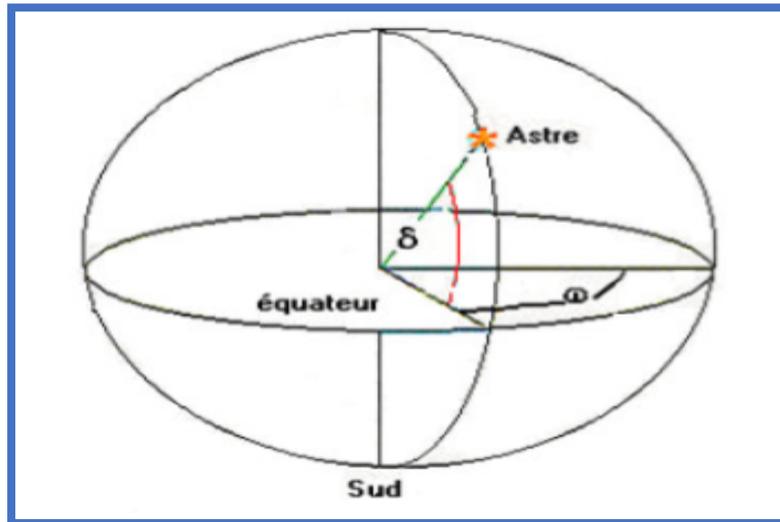


Figure (II.8) : Les coordonnées horaires[25].

2.2.2. Repère de coordonnées horizontales

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

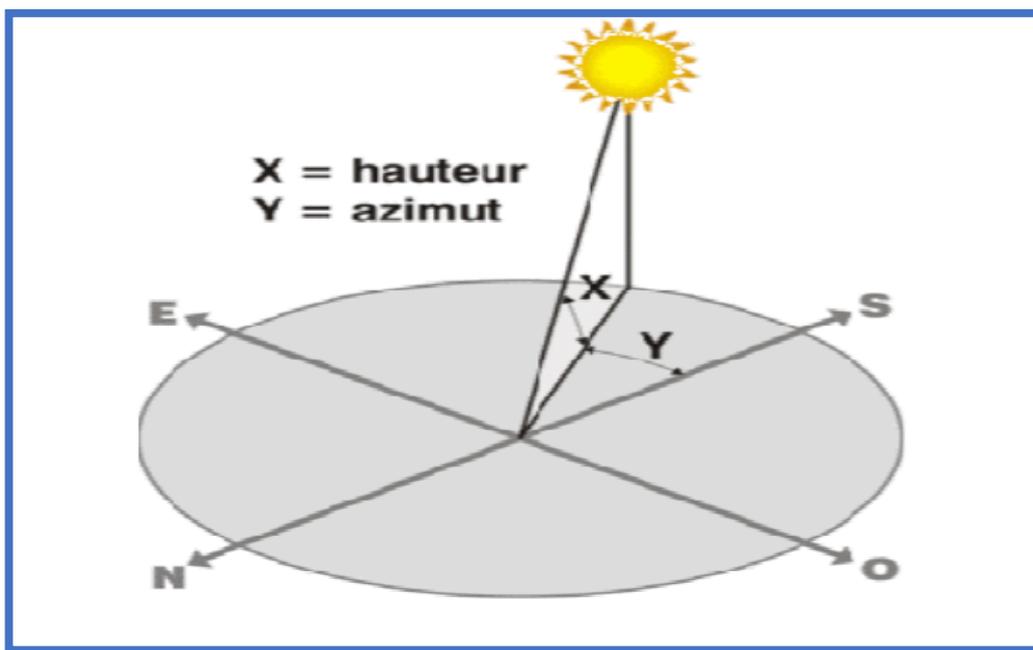


Figure (II.9): Les coordonnées horizontales[22].

a) Hauteur angulaire du soleil (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) [22]. L'angle de la hauteur solaire est donné par :

$$\sin(h) = \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \quad (\text{II.5})$$

φ : Latitude du lieu.

b) Azimut (α)

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. La relation qui donne l'azimut est donné par :

$$\sin(\alpha) = \frac{\sin(\omega) \cdot \cos(\delta)}{\cos(h)} \quad (\text{II.6})$$

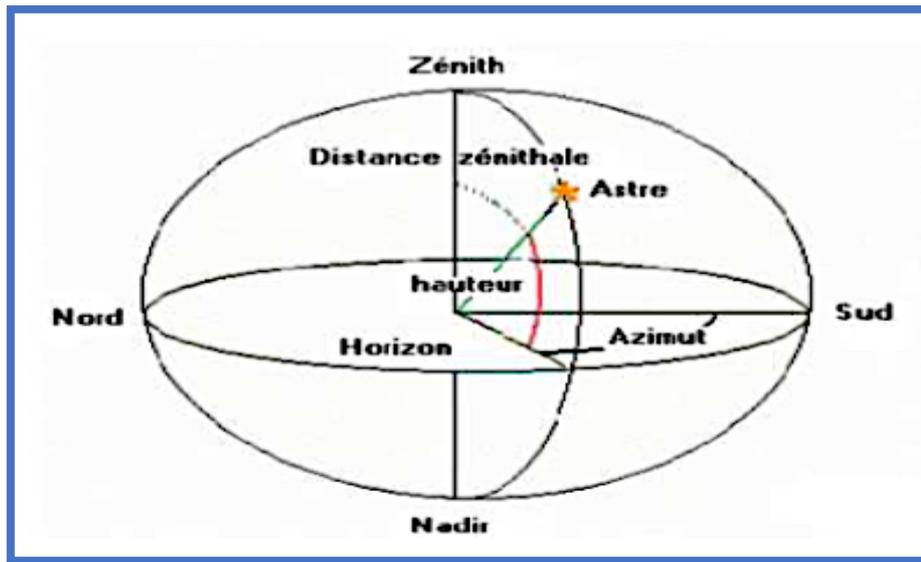


Figure (II.10): Azimut[22].

2.2.3. Les coordonnées géographiques terrestres

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent de récupérer un point sur la terre

a) Latitude (ϕ)

La latitude d'un lieu « ϕ » correspond à l'angle avec le plan équatorial, que fait le rayon joignant le centre de la terre à ce lieu. L'équateur terrestre est donc caractérisé par une latitude égale à 0° , le pôle nord par la latitude $+90^\circ$ et le pôle sud par la latitude -90° . Cette convention de signe (+) à tous les lieux de l'hémisphère nord et le signe (-) à tous les lieux de l'hémisphère sud

b) Longitude (L)

La longitude 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.

c) 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

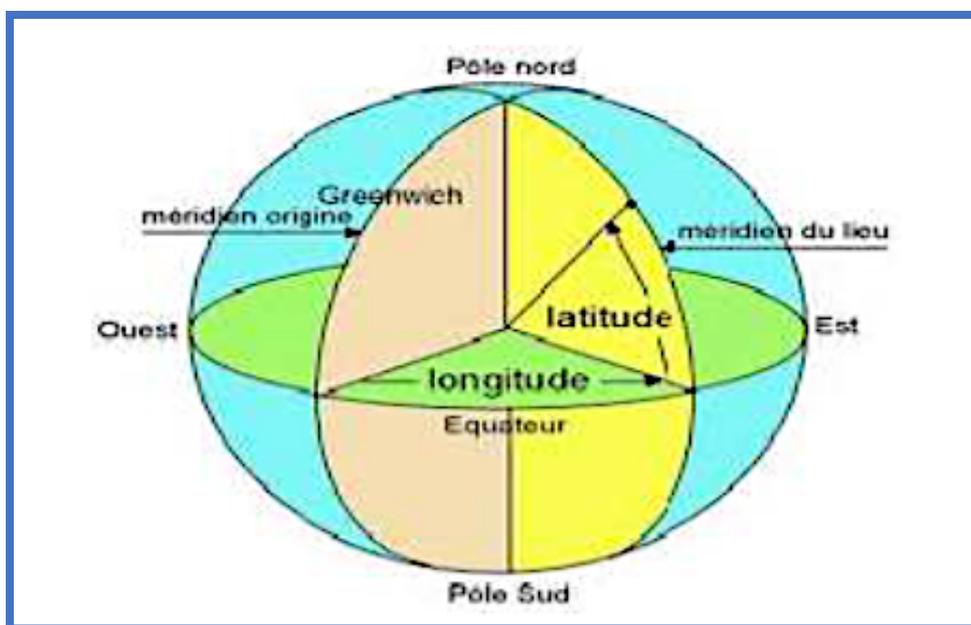


Figure (II.11): Définition des coordonnées terrestres d'un lieu donné[22].

2.2.4. Angle d'incidence sur un plan

L'angle d'incidence θ est l'angle que fait la direction des rayons solaires incidents avec la normale au plan de la surface réceptrice [26]. Il est donné, pour une surface horizontale, par :

$$\cos(\theta) = \sin(\varphi) \cdot \sin(\omega) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\omega) \cdot \cos(\delta) \quad (\text{II.7})$$

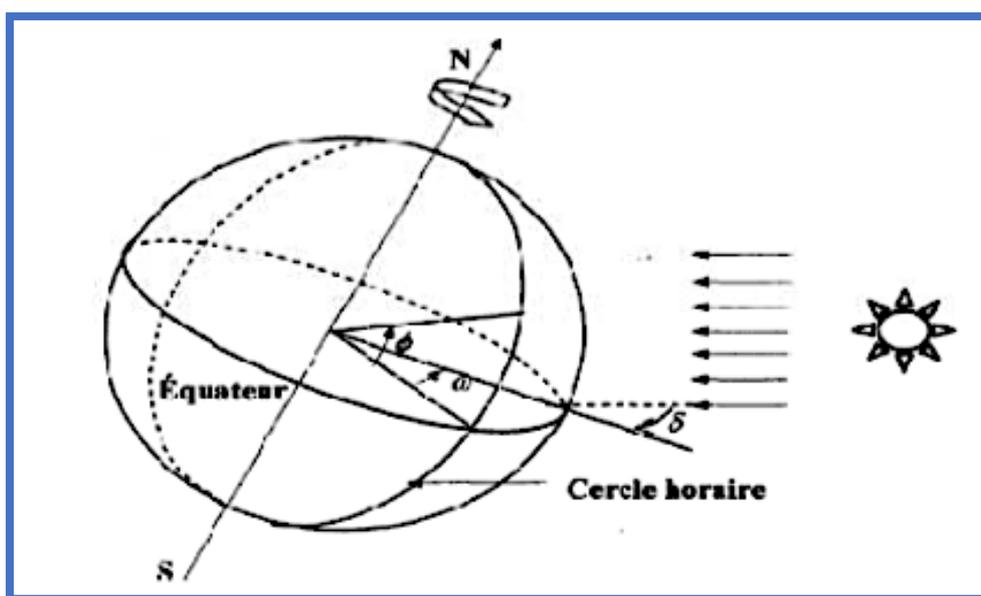


Figure (II.12) : Angle d'incident [25].

2.3. Heures et temps

2.3.1. Le temps universel (TU)

On définit le temps universel comme le temps solaire du méridien fondamental (méridien Greenwich) Pour un lieu de longitude :

$$TU = TSM - L \text{ lieu} \quad (\text{II.8})$$

2.3.2. Le temps solaire moyen (TSM)

C'est le temps qui correspond à une rotation uniforme de la terre autour du soleil .Il diffère peu du TSV (écart maximal ET = 16 minutes) :

$$TSM = TSV + ET \quad (\text{II.9})$$

Avec TSM en heure.

2.3.3. Le temps solaire vrai (TSV)

Il vaut 0° à midi solaire, ensuite chaque heure correspond à une variation de 15° , car la période de la terre dans sa rotation sur elle-même est égale à 24h. Compté négativement le matin lorsque le soleil est vers l'est et positivement le soir.

Le temps solaire vrai est égal au temps légal corrigé par un décalage dû à l'écart entre la longitude du lieu et la longitude référence [26] :

$$TSV = TU + 4(Lst - Lg) + ET \quad (\text{II.10})$$

TU : temps universel standard (mn).

LSt: Méridien standard du lieu ($^\circ$).

Lg : méridien local du lieu ($^\circ$).

ET : correction de l'équation du temps, donnée par la relation suivante :

$$ET = 9,87 \sin(2JD) - 7,35 \cos(JD) - 1,5(JD)$$

Avec :

$$JD = (J - 81) \cdot \left(\frac{360}{365}\right)$$

J : nombre de jours à partir du premier janvier.

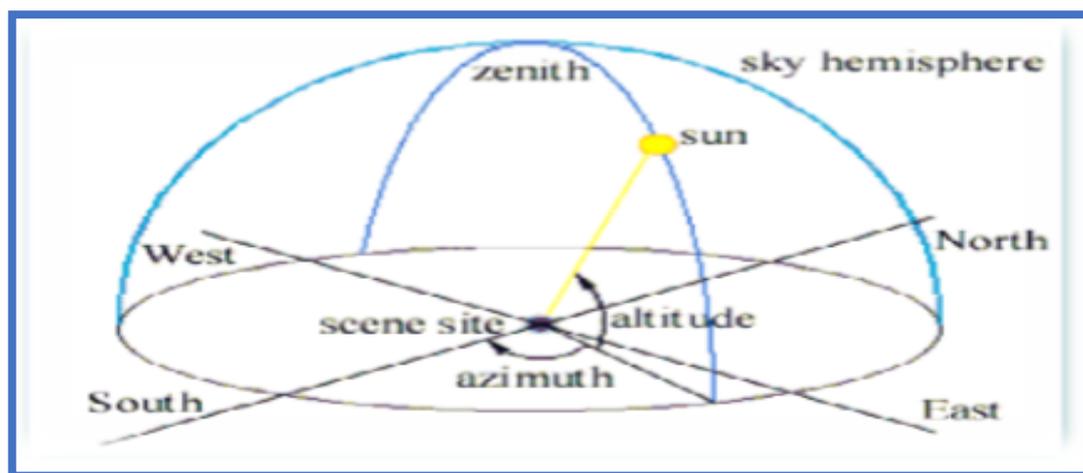


Figure (II.13): Angles solaires [25].

2.3.4. Équation de temps

La variation de la vitesse de la terre sur sa trajectoire autour du soleil qui introduit un terme Correctif appelé équation du temps et noté ET [26]:

$$ET = [0,0002 - 0,4797 \cdot \cos(j) + 3,2265 \cdot \cos(2j) + 0,0903 \cdot \cos(3j) + 7,3509 \cdot \sin(j) + 9,3912 \cdot \sin(2j) + 0,3361 \cdot \sin(3j)] \quad (II.11)$$

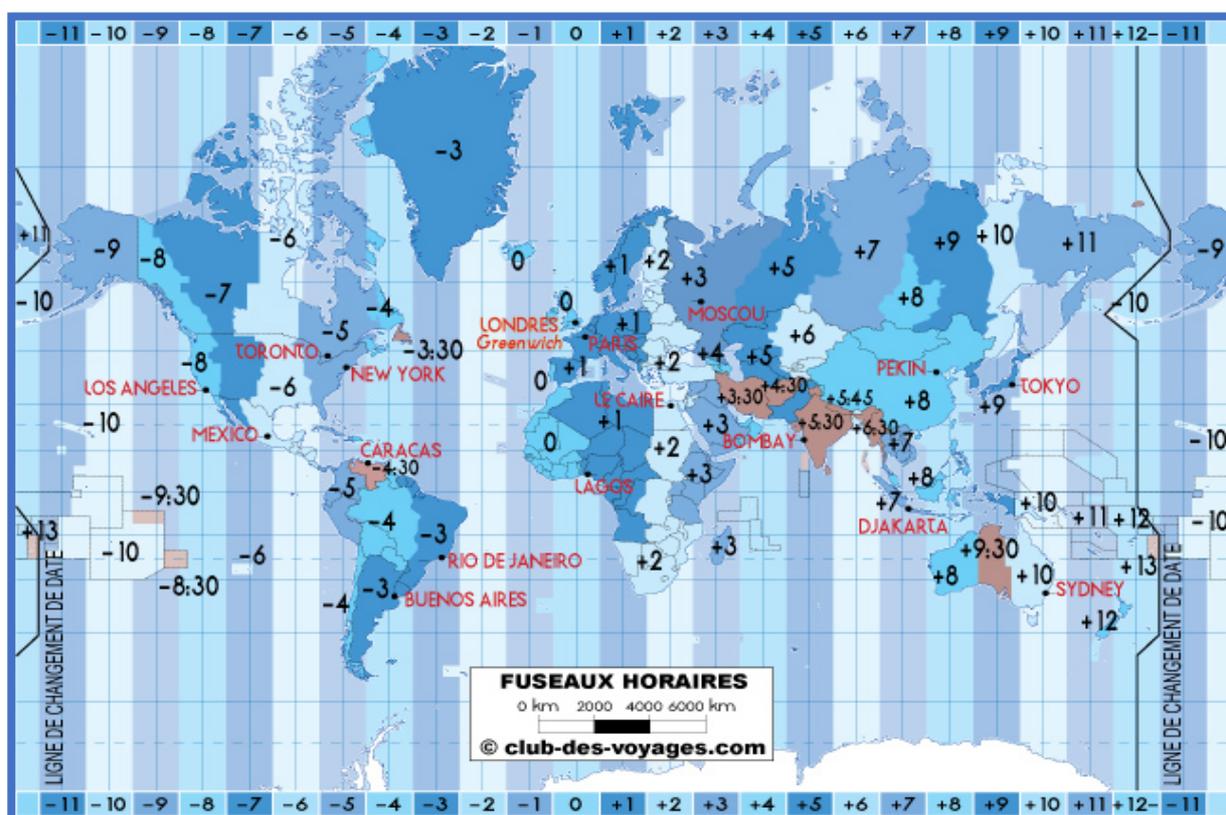


Figure (II.14): Carte des fuseaux horaires[27].

2.3.5. Durée du jour "DJ"

C'est la période en heures du lever au coucher du soleil [25] :

$$Dj = \frac{2W}{15} \quad (\text{II.12})$$

Avec :

$$W = \cos^{-1}(\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)) \quad (\text{II.13})$$

2.4. Durée et taux d'ensoleillement

2.4.1. Durée d'ensoleillement (SS)

Selon les conditions atmosphériques, le ciel peut être plus ou moins couvert de nuages au cours d'une journée. Ceux-ci occultent le Soleil, totalement ou partiellement, empêchant ainsi le rayonnement d'atteindre directement le sol.

On dit que la nébulosité est plus ou moins importante selon qu'il y a beaucoup ou peu de nuages. On appelle durée effective d'ensoleillement ou insolation SS le temps pendant lequel, au cours d'une journée, le rayonnement solaire direct a atteint le sol du lieu considéré.

On appelle rayonnement direct le rayonnement qui atteint la surface terrestre sans avoir subi de déviation depuis son émission par le soleil [25].

2.4.2. Taux d'ensoleillement (τ)

Par ciel clair sans nuages, le sol reçoit le rayonnement solaire direct pendant toute la durée du jour, ou plus précisément pendant la durée maximale d'ensoleillement SS₀. On appelle taux d'ensoleillement ou taux d'insolation le rapport entre la durée effective et la durée maximale d'ensoleillement

$$\tau = \frac{SS}{SS_0} \quad (\text{II.14})$$

3. Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est l'ensemble de rayonnement émet par le soleil. En plus des rayonnement cosmique, particules animées d'une vitesse et d'une énergie extrêmement élevée, le soleil émet des ondes électromagnétiques dont le spectre s'étend des ondes radio aux rayon gamma, en passant par la lumière visible.

Ce rayonnement transporte l'énergie solaire, indispensable à tout vie terrestre. L'énergie reçue au niveau de sol est plus faible que 1354 W/m^2 (la constante solaire) car l'atmosphère absorbe une partie du rayonnement solaire et les réemet dans toutes les directions sous la forme de rayonnement diffus.

Les rayonnements solaires au niveau du sol se divisent en plusieurs rayonnements, direct, diffus, réfléchis et globale, à partir des conditions physiques quel que soit l'atmosphère (les caractéristiques de l'atmosphère soit massique ou thermique) à travers l'année.

3.1. Type de rayonnement

3.1.1. Le rayonnement solaire direct

C'est le rayonnement solaire qui se forme de rayons parallèles provenant du soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère. Il est donc nul lorsque le soleil est occulté par les nuages. Il provient en droite ligne du soleil et représente 30 % de l'énergie solaire entrant dans l'atmosphère[28].

La transmissivité totale de l'atmosphère pour le flux solaire incident direct est donnée par :

$$I_d = I_0 \varepsilon_0 \cos \theta \exp(-T_L m_A \delta_{Ra}) \quad (\text{II.15})$$

La distance terre-soleil ε_0 varie peu au cours de l'année plus ou moins 1.65%. Elle est la plus longue le début de juillet et la plus faible le début janvier.

$$\varepsilon_0 = 1 + 0,034 \cos\left(\frac{360}{365}(n - 2)\right) \quad (\text{II.16})$$

La valeur du flux de rayonnement solaire reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre varie au cours de l'année avec la distance terre-soleil, sa valeur moyenne I_0 est appelée la constante solaire.

Dans notre cas: $I_0 = 1367 \text{ W/m}^2$

Le cosinus d'angle d'incidence est variable en fonction du mode de poursuite solaire, pour une poursuite totale du soleil là on a un réglage continu :

$$\theta = 0 \Rightarrow \cos \theta = 1 \quad (\text{II.17})$$

D'après Capderou :

- Dans le cas d'un suivi solaire suivant l'axe de la terre avec une inclinaison égale à latitude du lieu (Est-Ouest polaire) :

$$\cos \theta = \cos \delta \quad (\text{II.18})$$

- Dans le cas d'un suivi solaire suivant l'axe Est-Ouest horizontal, le tube récepteur du concentrateur est parallèle à l'axe Nord-Sud :

$$\cos \theta = \sqrt{\cos(\delta) \sin(\varphi) \cos(\omega) - \cos(\delta) \cos(\omega)^2} \quad (\text{II.19})$$

- Dans le cas d'un suivi solaire suivant l'axe Nord-Sud horizontal, le tube récepteur du concentrateur est parallèles l'axe Est-Ouest :

$$\cos \theta = \sqrt{1 - \cos(\delta)^2 \sin(\omega)^2} \quad (\text{II.20})$$

Ou :

$$\cos \theta = \sqrt{\sin(\delta)^2 + \cos(\delta)^2 \cos(\omega)^2}$$

- Dans le cas d'un plan fixé quelconque le cosinus d'angle d'incidence est défini par Capderou comme suit [29] :

$$\cos \theta = A \sin \omega + B \cos \omega + C \quad (\text{II.21})$$

Avec :

$$A = \cos \delta \sin \Omega \cos(90 - \beta)$$

$$B = \cos \delta [\cos(90 - \beta) \cos \Omega \sin \varphi + \sin(90 - \beta) \cos \varphi]$$

$$C = \sin \delta [-\cos \Omega \cos(90 - \beta) \cos \varphi + \sin(90 - \beta) \sin \varphi]$$

m_A est la masse d'air atmosphérique (masse d'air optique) qui représente la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol, elle dépend de la Pression locale (P) et de l'évolution de la hauteur du soleil (h), la valeur de m_A est donnée comme suite :

$$m_A = \frac{P}{101325} [\sin(h) + 0,15(h + 3,885)^{-1,253}]^{-1} \quad (\text{II.22})$$

Avec :

$$P = 101325 \exp(-0,0001184Z) \quad (\text{II.23})$$

$$\sin(h) = \cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta \quad (\text{II.24})$$

L'épaisseur optique d'une atmosphère (épaisseur optique de Rayleigh δ_{Ra}) est calculée par un polynôme du 4^{ème} ordre pour la masse d'air, cette formule est ajustée par :

$$\frac{1}{\delta_{Ra}} = 6,6296 + 1,7513 m_A - 0,1202 m_A^2 + 0,0065 m_A^3 - 0,00013 m_A^4 \quad (\text{II.25})$$

Facteur de trouble

Le facteur de trouble de Linke T_L est décomposé par Capderou en trois facteurs de troubles auxiliaires T_0 , T_1 et T_2 :

- T_0 : est le trouble dû à l'absorption gazeuse tant par les constituants fixes de l'atmosphère que par l'ozone et surtout par la vapeur d'eau. Une modélisation de ce facteur en fonction des seules paramètres géo-astronomiques a permis à Capderou de proposer l'expression suivante :

$$T_0 = 2,4 - 0,9 \sin \varphi + 0,1A_{he}(2 + \sin \varphi) - 0,2Z - (1,22 + 0,14A_{he})(1 - \sin h) \quad (\text{II.26})$$

- T_1 : est le trouble dû à l'absorption par les gaz de l'atmosphère (O₂, CO₂ et O₃) et à la diffusion moléculaire de Rayleigh donne par l'approche :

$$T_1 = (0,89)^Z \quad (\text{II.27})$$

- T_2 : est le trouble dû à la diffusion par les aérosols couplée à une légère absorption, qui dépend à la fois de la nature, des dimensions et de la quantité des aérosols:

$$T_2 = (0,9 + 0,4A_{he})(0,63)^Z \quad (\text{II.28})$$

Pour mettre en évidence la variation saisonnière, Capderou a créé la fonction A_{he} (L'alternance hiver-été) avec :

$$A_{he} = \sin\left(\frac{360}{365}(n - 121)\right) \quad (\text{II.29})$$

Pour un plan horizontal, le rayonnement solaire direct incident égal à :

$$I_{dh} = I_0 \varepsilon_0 \sin h_s \exp(-T_L m_A \delta_{Ra}) \quad (\text{II.30})$$

3.1.2. Le rayonnement solaire diffus

C'est une partie du rayonnement du soleil qui a subi de multiples réflexions (dispersion) par les molécules et les aérosols de l'atmosphère, pour un observateur au sol, le rayonnement diffus est un ensemble des directions rayonnées. Le rayonnement diffus résulte de la diffraction de la lumière par les molécules atmosphériques, et de sa réfraction par le sol [25].

Pour calculer le rayonnement diffus, Capderou a utilisé le facteur de trouble diffusif T_{fs} . Dans le cas d'un plan horizontal le rayonnement diffus égal à [26] :

$$I_{fs} = I_0 \varepsilon_0 \exp\left(-1 + 1,06 \log(\sin h_s) + a - \sqrt{b^2 + a^2}\right) \quad (\text{II.31})$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} a = 1,1 \\ b = \log T_{fs} - 2,8 + 1,2(1 - \sin h_s)^2 \\ T_{Lf} = T_1 + T_2 \end{cases}$$

La composante diffuse reçue sur un plan incliné se décompose en deux composantes, le diffus de ciel et le diffus de sol [26]:

➤ Le diffus de ciel

$$I_{f \text{ ciel}} = \delta_d \cos \theta + \delta_i \frac{1 + \sin \beta}{2} + \delta_h \cos \beta \quad (\text{II.32})$$

Il se compose de trois parties :

- Composante directe, elle provient du voisinage du soleil dans un cône de demi-angleux sommet entre 3° et 15° qui peut être considérée qu'elle provient exactement du soleil :

$$\delta_d = I_0 \varepsilon_0 \exp\left(-2,84 + \sin h + a_d - \sqrt{4b_d^2 + a_d^2}\right) \quad (\text{II.33})$$

Avec :

$$a_d = 3,1 - 0,4b_d$$

$$b_d = \log T_{Lf} - 2,8 + 0,5 \log(\sin h)$$

- Composante isotrope, elle corresponde à un ciel de luminance uniforme :

$$\delta_i = I_{fh} - \delta_d \sin h \quad (\text{II .34})$$

- Composante du cercle de l'horizon provient d'une bande d'horizon d'une hauteur de 6° , elle semble associée à une accumulation d'aérosols dans les basses couches atmosphériques :

$$\delta_h = \frac{-0,02a_d I_{dh}}{\sin h (a_h^2 + a_h b_h + 1,8)} \exp(\sin h) \quad (\text{II .35})$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} a_h = \log T_{Lf} - 3,1 - \log(\sin \log(\sin h)) \\ b_h = \exp(0,2 + 1,75 \log(\sin h)) \end{cases}$$

➤ Le diffus du sol

L'albédo du sol caractérise la réflexion de la lumière incidente, pour un plan quelconque :

$$I_{f \text{ sol}} = b(I_d + I_f) \frac{1 - \sin \beta}{2} \quad (\text{II .36})$$

3.1.3. L'albédo

L'albédo du sol est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige) [22].

3.1.4. Le rayonnement globale

C'est la somme de ces diverses contributions (direct + diffus + albédo) comme la montre la figure ci-dessous [26]:

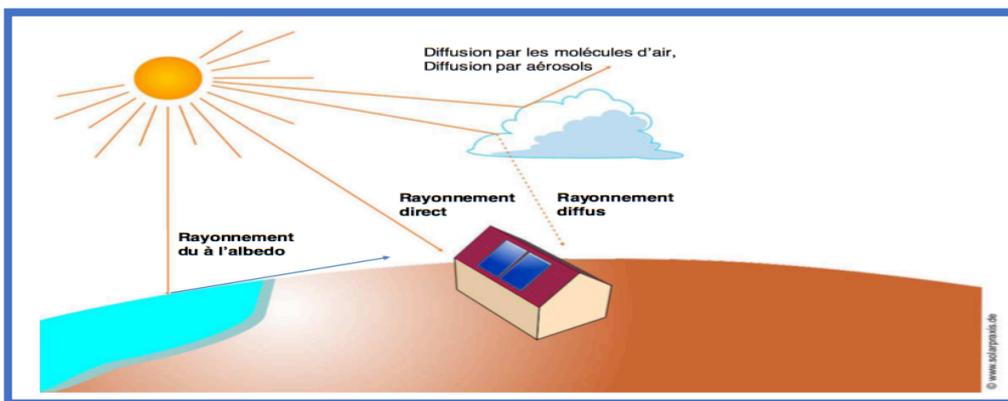


Figure (II.15) : Les différents types de rayonnement solaire[22].

Les trois quantités, le rayonnement direct noté I , le rayonnement diffus D , et le rayonnement global G , sont reliés par la relation suivante :

$$G = I \cdot \sin(h) + D \quad (\text{II .37})$$

3.2. Estimation de rayonnement solaire

Pour le calcul du rayonnement solaire instantané nous considérons [26]:

- Quatre journées totalement couvertes durant les mois de janvier et de décembre.
- Une journée totalement couverte chaque mois.
- Durant les journées couvertes, seul le rayonnement diffus existe, il est égal à 15% du rayonnement d'une journée totalement dégagée.

3.2.1. Rayonnement extraterrestre

Le rayonnement extraterrestre est le rayonnement solaire en dehors de l'atmosphère. Pour un point donné, la formulé est comme suit [26]:

$$H_0 = \frac{86400 S_0}{\pi} \left(1 + 0,033 \cos \left(2\pi \frac{N}{365} \right) \right) (\cos \varphi \cos \delta \sin w_s + w_s \sin \varphi \sin \delta)$$

(II .38)

N : est le numéro de jour de l'année (1 pour 1 janvier et 365 pour le 31 décembre).

S_0 : constante solaire.

δ : déclinaison solaire.

φ : latitude.

3.2.2. coefficient de clarté

Avant d'atteindre le sol, le rayonnement solaire est atténué par l'atmosphère et les nuages. Le rapport entre le rayonnement au sol et le rayonnement extraterrestre est appelle coefficient de transmission, il est définie par [26] :

$$\bar{K}_t = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} \quad (\text{II .39})$$

\bar{H} : Rayonnement solaire moyen, mensuel mesuré sur une surface horizontale.

\bar{H}_0 : Rayonnement solaire moyen, mensuel hors de l'atmosphère.

3.3. Estimation du rayonnement solaire instantané sur une surface horizontale

3.3.1. Relations entre les moyennes mensuelles

L'analyse des mesures de dH et H par Liu et Jordan a montré l'existence d'une liaison entre ces deux termes et un paramètre météorologique appelé coefficient de transmission [26]. Le rayonnement moyen, mensuel diffus sur une surface horizontale est défini par:

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,391 - 3,56 \bar{K} + 1,189 \bar{K}^2 - 2,137 \bar{K}^3 \quad W_s < 81,4^\circ \quad (\text{II .40})$$

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,311 - 3,022 \bar{K} + 3,427 \bar{K}^2 - 1,821 \bar{K}^3 \quad W_s > 81,4^\circ \quad (\text{II .41})$$

\bar{H}_d : Rayonnement moyen, mensuel diffus sur une surface horizontale.

\bar{H} : Rayonnement moyen, mensuel sur une surface horizontale.

3.3.2. Relation entre les valeurs horaires

Dans certaines applications, il est nécessaire de connaître les flux instantanés ou les irradiations pendant des durées courtes.

Cela est réalisé grâce aux formules de Collares-Pereira et Rabl pour le rayonnement global [26]:

$$r_t = \frac{\pi}{24} (a + b \cos w) \frac{\cos w - \cos w_s}{\sin w_s - w_s \sin w_s} \quad (\text{II .42})$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} a = 0,409 + 0,501 \sin \left(w_s - \frac{\pi}{3} \right) \\ b = 0,6609 - 0,4767 \sin \left(w_s - \frac{\pi}{3} \right) \end{cases}$$

r_t : Rapport entre les valeurs horaires et journalières de l'irradiation globale.

w : Angle horaire du soleil.

w_s : Angle horaire de coucher du soleil.

$$r_d = \frac{\pi}{24} \frac{\cos w - \cos w_s}{\sin w_s - w_s \sin w_s} \quad (\text{II.43})$$

r_d : Rapport entre les valeurs horaires et journalières de l'irradiation diffuse :

$$H = r_d \bar{H} \quad (\text{II .44})$$

H : rayonnement global instantané sur une surface horizontale.

$$H_d = r_d \bar{H}_d \quad (\text{II .45})$$

H_d : rayonnement diffus instantané sur une surface horizontale.

$$H_b = H - H_d \quad (\text{II .46})$$

H_b : Rayonnement direct instantané sur une surface horizontale.

3.4. Estimation du rayonnement solaire instantané sur une surface inclinée

Dans la majorité des cas d'application, il est nécessaire de calculer le flux solaire sur des Plans d'orientation quelconque. Pour estimer l'énergie reçue par une surface inclinée à partir de

données concernant une surface horizontale, il faut séparer la composante directe et la composante diffuse.

3.4.1. Rayonnement direct sur une surface inclinée

Connaissant le flux direct sur une surface horizontale H le flux direct sur une surface Incliné H_{bi} est donné par la formule suivante :

$$H_{bi} = R_b H_b \quad (\text{II .47})$$

H_b : Flux direct sur une surface inclinée.

R_b : Rapport du rayonnement direct journalier sur surface inclinée à celui sur une surface horizontale, il est donné par l'expression suivante:

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (\text{II .48})$$

θ : Angle d'incidence du rayonnement direct sur le concentrateur solaire.

θ_z : Angle de zénith.

3.4.2. Rayonnement diffus sur une surface inclinée

En admettant que le flux diffus est isotrope, c'est-à-dire uniformément réparti sur la voûte céleste, la valeur du rayonnement diffus est donnée par :

$$H_{di} = H_d F_p \quad (\text{II .49})$$

H_{di} : flux diffus sur une surface inclinée.

F_p : facteur d'angle plan incliné-ciel, il est donné par :

$$F_p = \frac{1}{2} (1 + \cos \beta) \quad (\text{II .50})$$

Ce qui donne :

$$H_{di} = \frac{H_d}{2} (1 + \cos \beta) \quad (\text{II .51})$$

3.4.3. Rayonnement provenant de la réflexion

De même, le flux réfléchi par le sol est isotrope, on a :

$$H_r = H \rho_s F_r \quad (\text{II .52})$$

R_s : Représente le coefficient de réflexion de la lumière diffuse du sol (aussi appelé albédo du sol, valeur fixée à 0,2).

$$F_r = \frac{1}{2} (1 - \cos \beta) \quad (\text{II .53})$$

F_r : Facteur d'inclinaison du rayonnement réfléchi.

L'équation (II.52) devient :

$$H_r = H \rho_s \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (\text{II .54})$$

H_r : Flux reçu par une surface inclinée provenant de la réflexion sur le sol.

3.4.4. Rayonnement global sur surface inclinée

Connaissant les trois composantes des flux et irradiations, on a finalement [26]:

$$H_t = H_{di} + H_{bi} + H_r \quad (\text{II .55})$$

$$H_t = H_b R_b + H_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + H \rho_s \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (\text{II .56})$$

H_t : Rayonnement instantané sur une surface inclinée.

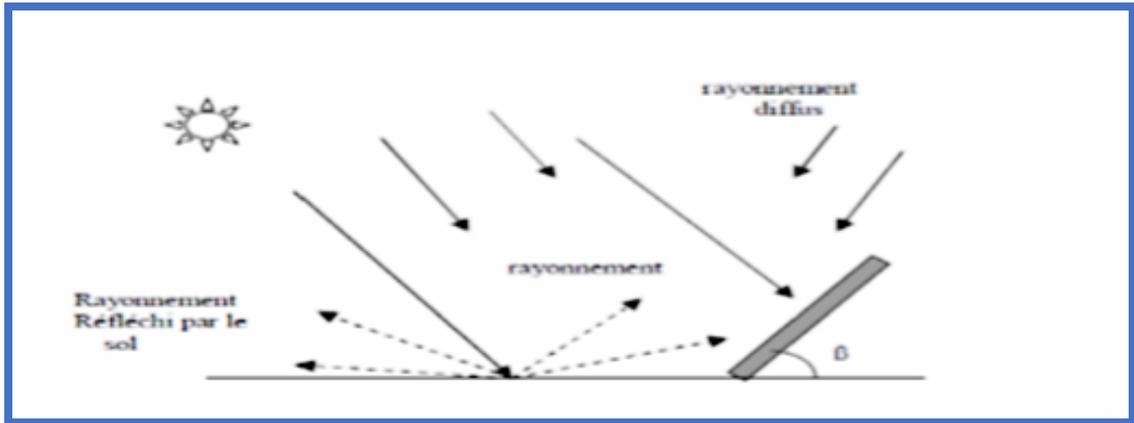


Figure (II.16) : Composantes du rayonnement global sur une surface inclinée[25].

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.

Chapitre III :

Étude d'une

centrale

cylindro-

parabolique

Introduction

Les centrales cylindro-parabolique sont des centrales à produire de l'électricité, ces les centrales le plus utilisées dans le domaine industriel, cette technologie la plus proche pour prendre la place de l'énergie non renouvelables.

Les concentrateurs cylindro parabolique constituent 3 éléments principaux : le champ solaire, le système de transfert de la chaleur et le système de génération électrique.

Ce type de centrale se compose à des lignes des miroirs parallèles de forme cylindro-parabolique, ces miroir sont capables de suivre le mouvement de soleil à l'aide d'un axe horizontal pour capter les rayons du soleil, les rayons captés sont concentrés sur un tube collecteur en verre horizontal qui contient un tuyau métallique, dans ce tuyau il y a un fluide généralement l'huile pour élever sa température, on utilise ce fluide pour évaporer l'eau, par cette vapeur on entraine la turbine pour produire de l'électricité.

Dans ce chapitre nous allons étudier théoriquement le fonctionnement d'un concentrateur cylindro-parabolique, en passant par tous les points importants du principe de fonctionnement jusqu'à l'équation qui régissent une telle installation.

1. Principe de fonctionnement

La centrale cylindro parabolique est une centrale de production de l'électricité. Pour produire l'électricité nous avons besoin des miroirs d'une forme hémicylindrique ils sont classés parallèlement et sont capables de tourner d'est en ouest pour suivre la position du soleil à l'aide d'un axe horizontal.

Les rayons émis par le soleil absorbé par ces miroirs puis concentrés à un collecteur horizontal pour chauffé le fluide thermique (huile) que circule dans ce collecteur pour évaporé un fluide de travail (l'eau), cette vapeur turne une turbine produit de l'électricité.

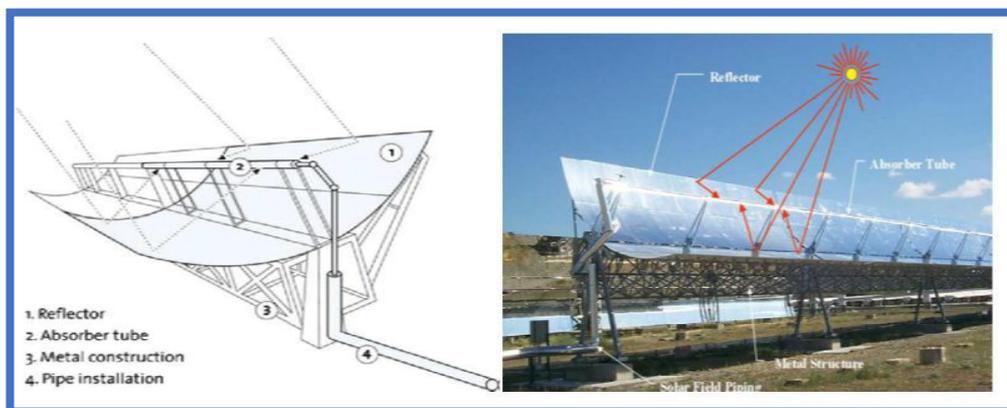


Figure (III.1):concentrateur cylindro-parabolique [18]

2. Étude thermique d'un capteur cylindro parabolique

2.1. Le champ solaire

Le champ solaire est la partie réceptrice de l'installation, c'est un ensemble des lignes des miroirs paraboliques en fer à une forme hémicylindrique placée parallèlement et capable de tourner à la direction est-ouest pour suivre la trajectoire du mouvement du soleil par un axe horizontal pour absorber les rayons solaires.

Ces miroirs utilisés pour refléter les rayons vers un tube récepteur appelé collecteur, dans lequel circule un fluide caloporteur.

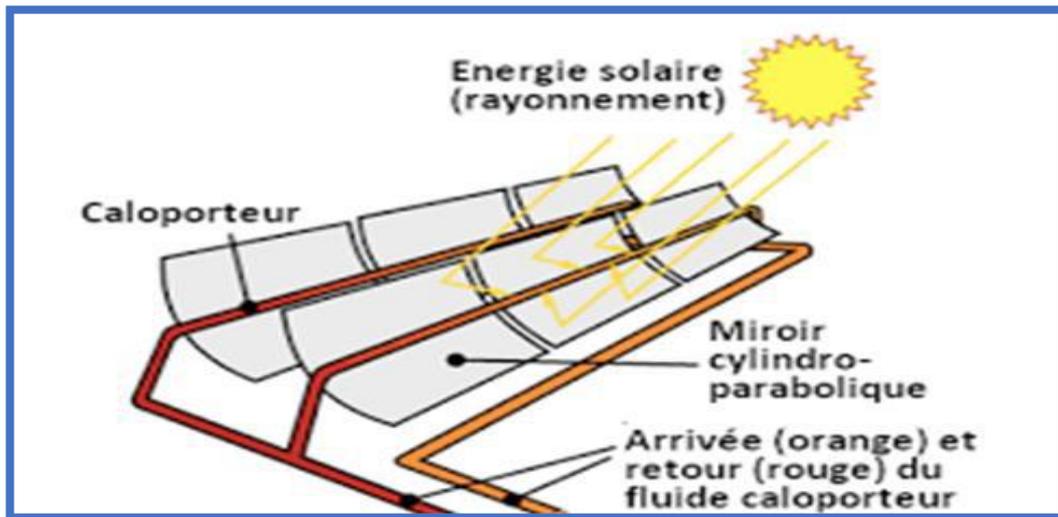


Figure (III.2) : champ solaire [18].

2.1.1. Les différentes configurations

2.1.1.a Installation à retour direct : la plus utilisée parce que c'est la plus simple, mais il y a un inconvénient qui est le déséquilibre de pression à l'entrée et à la sortie de chaque rangée de collecteur, donc les pertes de charge importantes et le débit n'est pas identique pour chaque rangée [16].

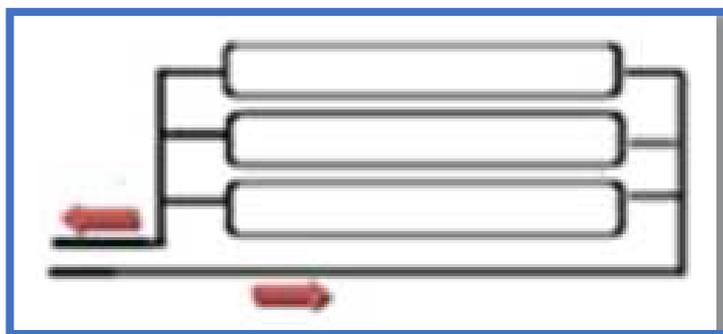


Figure (III.3) : Installation à retour direct [26].

2.1.1.b Installation à retour indirect : les pertes de charge son équilibrées pour chaque rangée en effectuant une boucle à l'entrée du champ solaire. La longueur totale de tuyauterie est légèrement augmentée, ainsi que les pertes à l'ambiance[16].

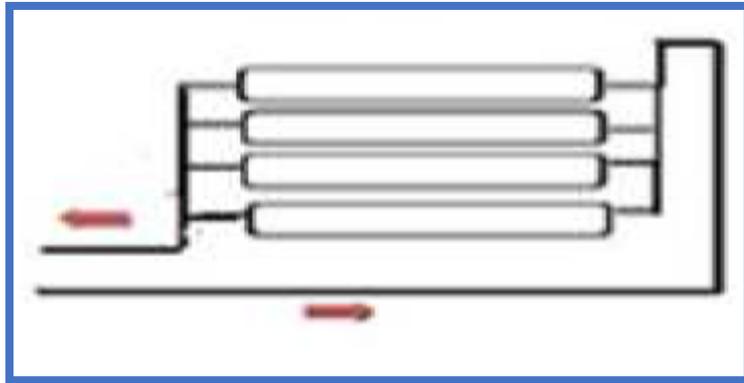


Figure (III.4) : Installation à retour indirect[26].

2.1.1.c Installation à alimentation centralisée : Le but de ce type d'installation est de minimiser la longueur totale de tuyauterie. Comme pour l'installation à retour direct, des vannes d'ajustement de la perte de charge sont nécessaires sur chaque rangée de capteurs[16].

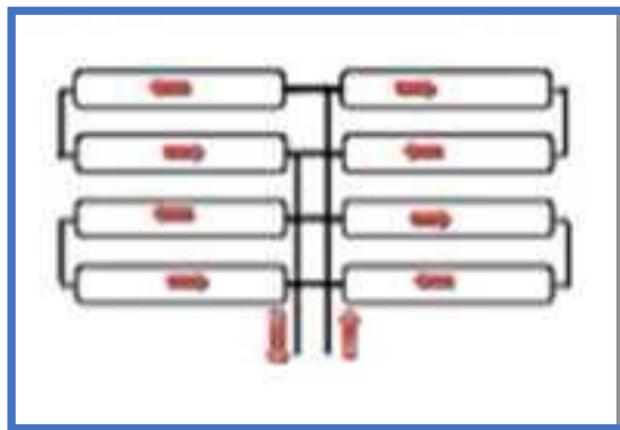


Figure (III.5) : Installation à alimentation centralisée[26].

2.2. Le collecteur :

Le collecteur est le composant de base du champ solaire, il se présente comme un module ayant un réflecteur de forme parabolique cylindrique, ce collecteur est placé horizontalement dans le sens nord-sud, il se compose de deux éléments un tube en verre contient a l'intérieure un fluide thermique (généralement huile) capable de chauffe jusqu'à 500°C, ce tube contient un tuyau métallique sous vide à l'intérieur un fluide de travail (généralement eau).

Le tube collecteur doit avoir les caractéristiques suivantes[16] :

- **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 400°C, 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.

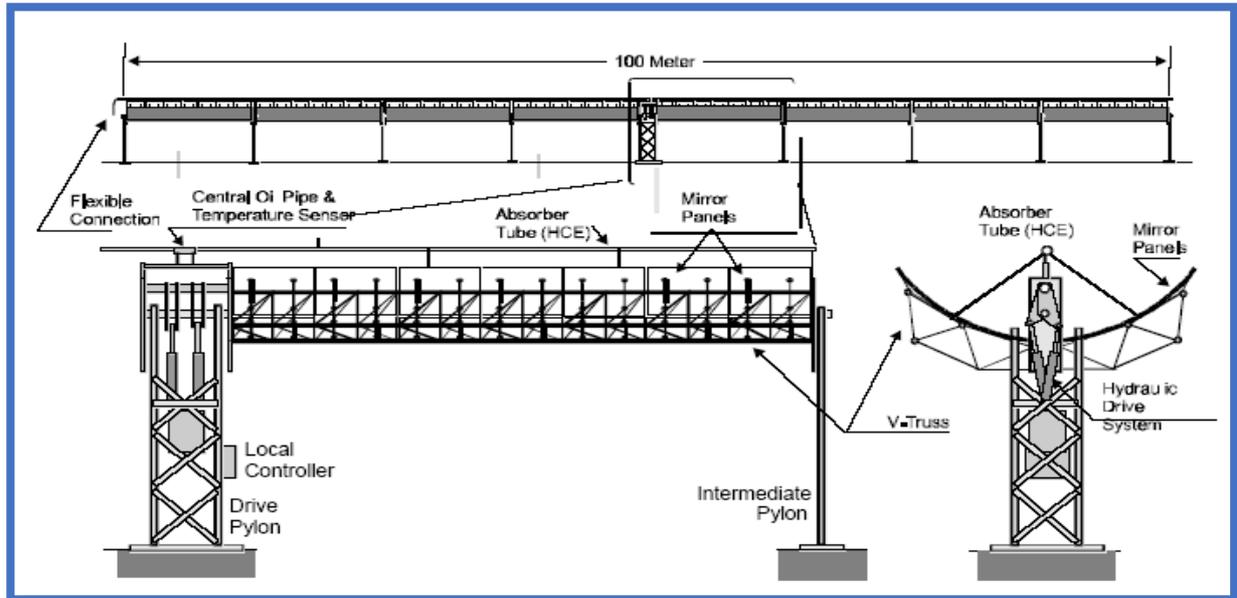


Figure (III.6): Vue schématique du collecteur cylindro-parabolique[16].

2.3. Les composant d'un concentrateur

2.3.1. Réflecteur

Les réflecteurs d'une centrale cylindro-parabolique (CCP) étaient généralement en miroir ou autre métal réfléchissant. Les miroirs sont composés de verre pauvre en fer, ce verre est recouvert d'une pellicule d'argent en sa partie inférieure et d'un enduit spécial de protection .Le matériau réfléchissant le mieux indiqué est l'aluminium pur, l'acier inoxydable a été expérimenté mais il n'est pas conseillé parce que son pouvoir de réflexion est insuffisant[30].

- L'équation de la parabole en coordonnées cartésiennes :

$$x^2 = 4F_y \quad (\text{III.1})$$

F_y :Est la distance focale de la parabole (m)

- L'équation de la parabole en coordonnées polaires :

$$r = \frac{F}{\cos^2(\frac{\theta}{2})} \quad (\text{III.2})$$

Avec :

r : Le rayon parabolique qui représente entre la courbe de la parabole et le foyer F.

$$\varphi_r = \tan^{-1} \left[\frac{\beta \frac{F}{W}}{16 \left(\frac{P}{W} \right)^2 - 1} \right] \quad (\text{III.3})$$

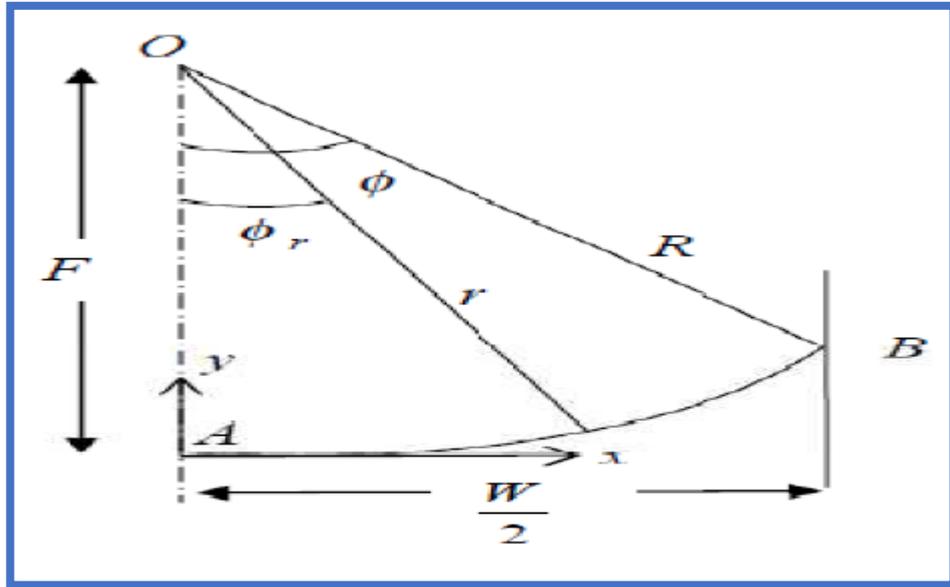


Figure (III.7) : Rayon local de miroir [26].

- **Longueur d'ouverture d'une parabole [30]**

$$W_a = 2 r_r \sin(\varphi_r) \quad (\text{III.4})$$

Avec :

$$r_r = \frac{2 F}{1 + \cos(\varphi_r)} \quad (\text{III.5})$$

On remplace l'équation (II.4) dans (II.5), on obtient :

$$W_a = \frac{4 F \sin(\varphi_r)}{1 + \cos(\varphi_r)} \quad (\text{III.6})$$

On a aussi :

$$\text{tng} \frac{\varphi_r}{2} = \frac{\sin(\varphi_r)}{1 + \cos(\varphi_r)} \quad (\text{III.7})$$

Donc la longueur d'ouverture W_a est défini par :

$$W_a = 4 F \tan \left(\frac{\varphi_r}{2} \right) \quad (\text{III.8})$$

- **Angle d'ouverture d'une parabole**

D'après la relation (II.8), on peut définir l'angle d'ouverture par[30] :

$$\varphi_r = 2 \tan^{-1} \left(\frac{W_a}{4 F} \right) \quad (\text{III.9})$$

- **Hauteur d'une parabole**

La hauteur de la courbe parabolique h_p peut être définie comme la distance maximale du sommet à une ligne tracée à travers l'ouverture de la parabole elle est définie par [30]:

$$h_p = \frac{W_a^2}{16 F} \quad (\text{III.10})$$

h_p : La taille d'une parabole (m)

- **Longueur d'une parabole**

La longueur d'arc d'une parabole peut être donnée par[30] :

$$S = \left[\frac{W_a}{2} \sqrt{\left(\frac{4 h_p}{W_a}\right)^2 + 1} \right] + 2 F \ln \left[\frac{4 h_p}{W_a} + \sqrt{\left(\frac{4 h_p}{W_a}\right)^2 + 1} \right] \quad (\text{III.11})$$

2.3.1.1. Surface du miroir et surface d'ouverture :

Il existe deux surfaces d'exposition qui sont importantes[26] :

- **La surface d'ouverture**

Elle détermine la capture du rayonnement, pour une position du soleil donnée. La surface d'ouverture A_0 est calculée comme le produit de la largeur d'ouverture W multipliée par longueur du capteur L :

$$A_0 = W . L \quad (\text{III.12})$$

- **La surface de capteur cylindro-parabolique**

Est pour déterminer les matières le plus approprié pour la cuve (la matière du miroir). Cette surface est calculée comme suit [31]:

$$A = \left(\frac{W}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{W}{4 F}\right)^2} + 2 F \ln \left(\frac{W}{4 F} + \sqrt{1 + \left(\frac{W}{4 F}\right)^2} \right) \right) . L \quad (\text{III.13})$$

2.3.1.1.1. Facteur de concentration

- **Facteur de concentration optique**

Est égale au rapport de l'énergie à l'ouverture de concentrateur à l'énergie reçue à l'ouverture du récepteur[26] :

$$C_0 = \frac{I_o}{I_r} \quad (\text{III.14})$$

I_o = de l'énergie à l'ouverture de concentrateur

I_r = l'énergie reçue à l'ouverture du récepteur

- **Facteur de concentration géométrique**

La définition la plus commune du taux de concentration est basée sur la notion de surface. Elle est donnée comme étant le rapport de la surface de l'ouverture sur la surface de l'absorbeur[32].

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad (\text{III.15})$$

A_a =surface d'ouverture du miroir.

A_r =surface du récepteur du miroir.

Concernant la surface du collecteur, elle est plus claire 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.

Alors, la concentration géométrique est donné par[32] :

$$C = \frac{a.l}{d.l} = \frac{a}{d} \quad (\text{III.16})$$

a =Largueur d'ouverture

d = diamètre de récepteur

Dans les concertateurs cylindro-paraboliques réels, on prend la surface d'ouverture de récepteur c'est la sur face du tube absorbeur [32]:

$$C = \frac{a.l}{\pi.d.l} = \frac{a}{\pi.d} \quad (\text{III.17})$$

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.

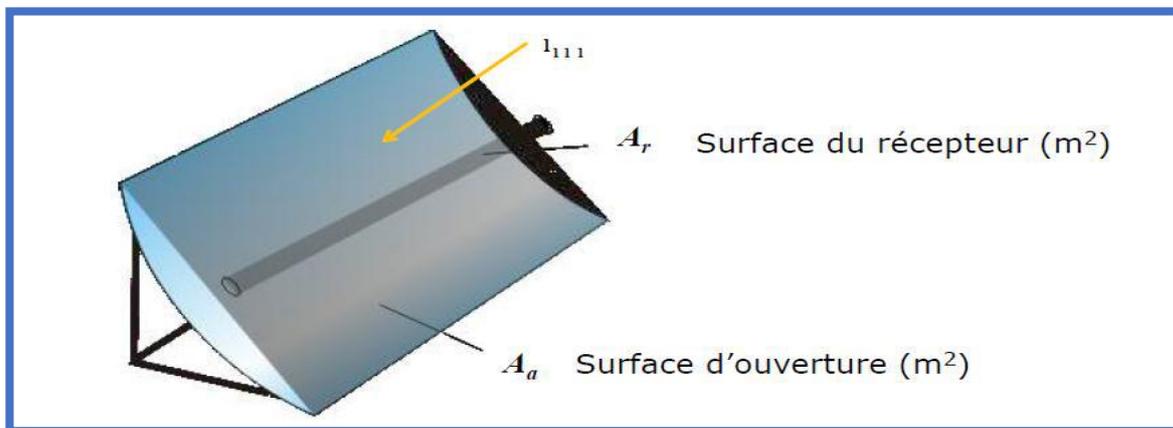


Figure (III.8): Surface d'ouverture du collecteur et surface d'ouverture du récepteur[32].

2.3.1.1.2. Matières des miroirs

Les principales exigences pour les matériaux de miroirs sont dépend de leur propriétés réfléchissantes, à laquelle la réflectivité doit être élevée. Par définition la réflectivité d'une surface est un nombre qui indique la fraction du rayonnement incident qui est réfléchi par la surface. En règle générale, une "réflectivité solaire pondérée" est indiquée que prendre en considération qu'il existe différentes teneurs en énergie à différentes longueurs d'onde du spectre solaire[26].

On distingue deux modes de réflexion :

- **La réflexion spéculaire**

La réflexion spéculaire est comme un miroir de réflexion. C'est la lumière de spéculaire qui provient d'une seule direction entrante est réfléchi dans une seule direction sortante.

Selon la loi de la réflexion de la direction de la lumière entrante et la direction de la lumière sortante ont le même angle par rapport à la normale de la surface du miroir.

- **La réflexion diffuse**

La réflexion diffuse, au contraire, la lumière entrante est réfléchi dans un large éventail de directions. Dans les applications du collecteur cylindro-parabolique, seulement la réflectivité est d'intérêt, parce que le rayonnement réfléchi doit avoir une direction définie. Le critère de qualité décisif pour les miroirs efficaces est, par conséquent «la réflectivité solaire pondérée».

- **Miroirs de verre recouvert d'argent**

Toutes les centrales à collecteur cylindro-paraboliques réalisés l'utilisation de miroirs de verre recouvert d'argent est la plus courantes consistent aujourd'hui. Les miroirs sont avérés durables: Même après plus de dix années de fonctionnement c'est à peine s'ils ont montré une diminution de la réflectivité spéculaire.

2.3.2. Récepteur (absorbeur)

Le tube récepteur et le lieu de la conversion thermique de l'énergie solaire, il se place à la focale de miroir cylindro parabolique. Il se compose d'un tube enveloppe en verre et un tube absorbeur en acier inoxydable.

Le récepteur absorbe l'énergie réfléchi par le concentrateur et la transfère au tube absorbeur, au circule le fluide caloporteur pour le chauffé puis il convertie la chaleur en électricité en actionnant un turbine.

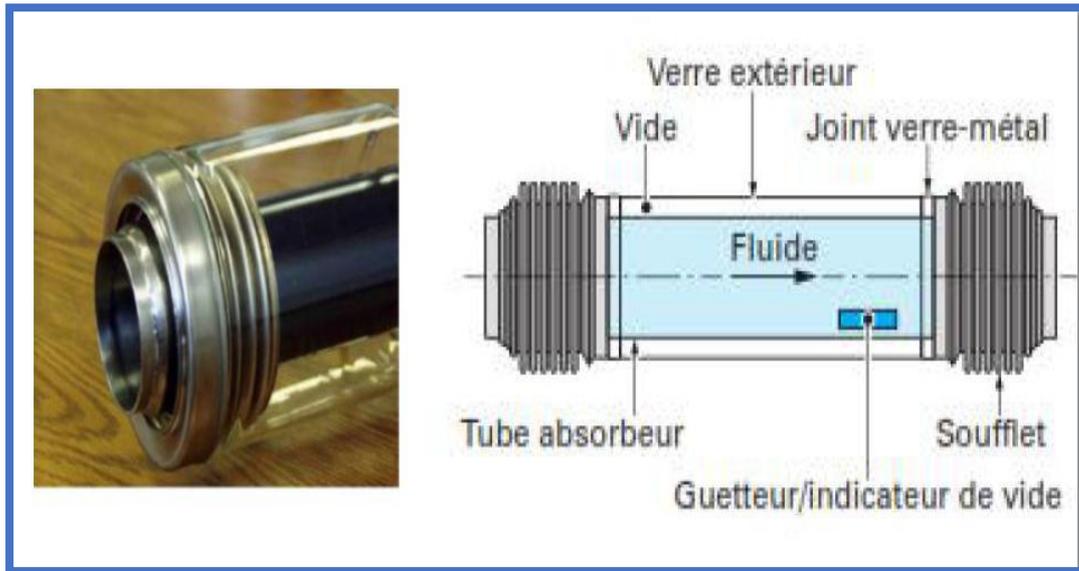


Figure (III.9): Structure de l'absorbeur[18]

2.3.2.1. Composantes du récepteur

2.3.2.1.1. Le tube absorbant

C'est un tube métallique recouvert d'une couche de peinture noire, c'est la partie essentielle du concentrateur, puisqu'il absorbe l'énergie du rayonnement et la transforme en chaleur il faut trouver le bon compromis entre le diamètre, la longueur et l'épaisseur du tube pour ainsi diminuer au maximum les pertes thermique [15].

Le tube absorbant doit :

- Avoir une bonne absorption du rayonnement.
- Supporter des températures élevées.

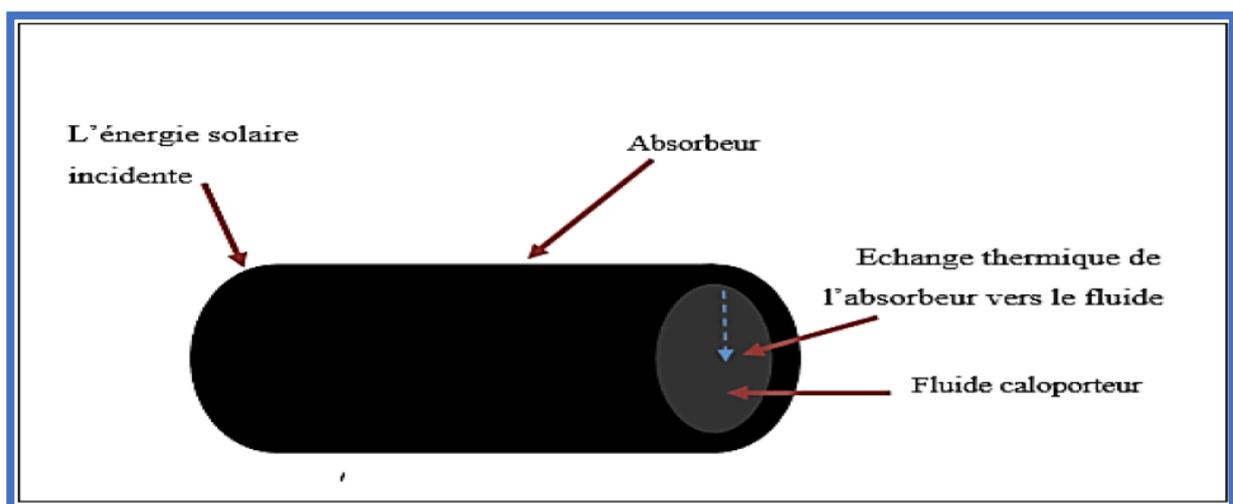


FIGURE (III.10): Schéma d'un tube absorbant [15].

2.3.2.1.2. Enveloppe en verre

Le tube absorbeur est protégé par une enveloppe en verre autour de lui et permet en faisant le vide dans l'espace annulaire d'éliminer les pertes thermiques par convection (entre le tube absorbeur et l'enveloppe du verre) et par conduction.

L'espace entre les deux tubes est maintenu sous vide, ce qui coupe les pertes par convection. La liaison verre-métal est un point délicat de ce système. Elle doit permettre la dilatation des deux matériaux sans rompre l'étanchéité.

La transmittance de l'enveloppe en verre, qui est fabriquée à partir de verre de borosilicate, est indiquée pour être au moins 0.96 pour le rayonnement solaire. Un revêtement anti-réfléchissant spécifique garantit une faible réflectivité de l'enveloppe en verre. Archimède indique que ce revêtement augmente la transmittance de 0.04 (de 0.92 sans revêtement à 0.96 avec revêtement).

Le matériau en verre présente une très faible transmittance dans le domaine infrarouge. Ceci contribue également légèrement à l'effet d'isolation, car une partie du rayonnement thermique émis dans le tube absorbeur est maintenue dans le système : il chauffe le verre, réduisant ainsi les pertes de chaleur par convection à partir de l'absorbeur vers le tube de verre et produit un rayonnement thermique supplémentaire vers le tube absorbeur [26].

2.3.3. Revêtement Cermet (absorbeurs composites céramique-métal)

Les composites métal-diélectrique, aussi appelés cermet pour composite céramique-métal, sont constitués de particules métalliques dans une matrice diélectrique, déposés sur un substrat métallique. La partie cermet absorbe fortement dans le visible, du fait des transitions inter-bandes dans les particules métalliques et de la résonance entre les particules, mais reste transparente dans l'infrarouge. La couche métallique inférieure joue le rôle de réflecteur infrarouge [33].

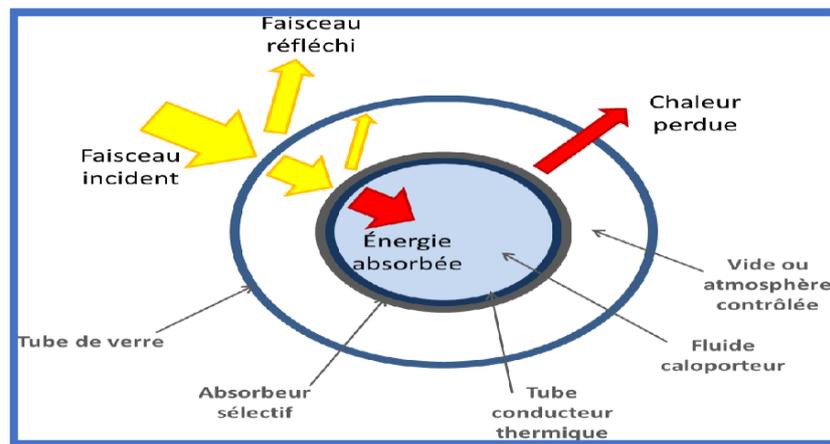


Figure (III.11):: Revêtement cermet (absorbeur composites céramique-métal) [33].

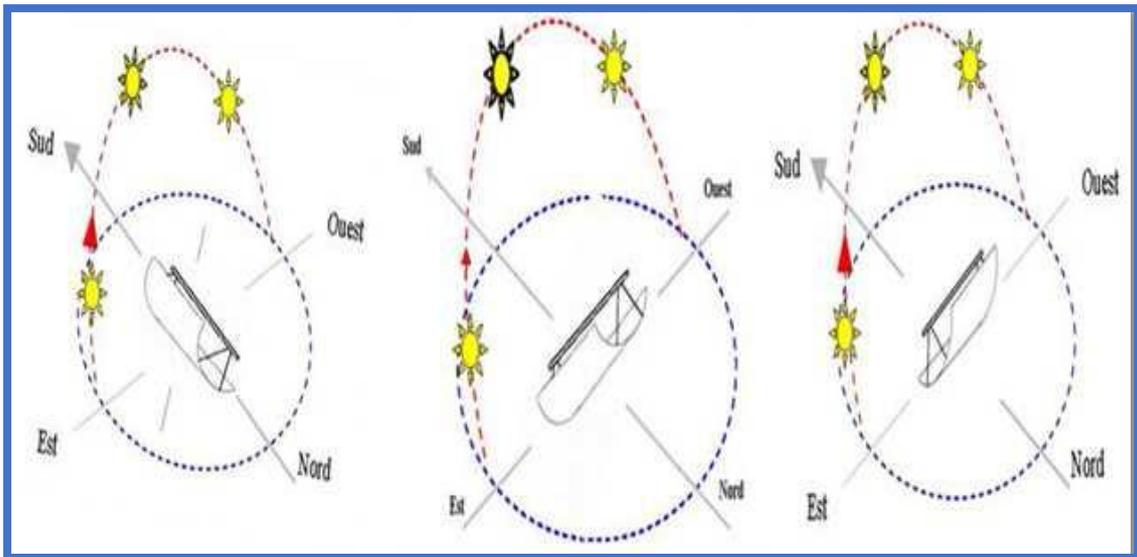
2.3.4. Système de poursuite solaire

2.3.4.1. Angle de poursuite solaire

Comme tout collecteur d'un system CSP (Concentrating Solar Power Plant), les concentrateurs cylindro parabolique sont également équipés d'un mécanisme de poursuite. 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 Est-Ouest horizontal, le tube récepteur du concentrateur est parallèle à l'axe Nord-Sud[32].

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[1] :

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



Figure(III.12): Les modes de poursuite solaire d'un CCP [34].

2.4. Fluide de transfert de chaleur HTF

Le fluide caloporteur (HTF) a pour tâche d'accumuler l'énergie thermique dans les capteurs et de la transporter au bloc d'alimentation. Il existe deux façons fondamentales de transférer la chaleur vers le bloc de puissance[35] :

- On applique le HTF spécial, à partir duquel la chaleur est transférée au fluide de travail du Cycle de Rankine (eau).
- La vapeur du cycle de Rankine est générée directement dans les tubes absorbants des concentrateurs cylindro-paraboliques et est transportée à la turbine. La première version est appelée génération indirecte de vapeur, la seconde est la génération directe de vapeur (DSG : Direct Steam Génération).

2.4.1. Génération indirecte de vapeur

Contiennent deux cycles de fluides, un cycle de fluide caloporteur et le cycle de Rankine. La liaison thermique entre eux se fait dans un train de générateurs de vapeur, qui se compose d'un économiseur (préchauffage de l'eau d'alimentation), d'un évaporateur et d'une surchauffeur.

2.4.2. Génération directe de vapeur (DSG)

Dans les systèmes de production directe de vapeur, il ne s'agit pas de systèmes de chaudières classiques, la vapeur est générée directement dans les tubes d'absorption dans le champ solaire. Au lieu d'huile thermique, l'eau (Alternativement des milieux organiques) est pompés à travers les tubes récepteurs où elle est évaporée. Il n'y a qu'un seul cycle de fluide comme dans les systèmes indirects de production de vapeur.

Le medium de transfert de chaleur dans les systèmes de production directe de vapeur est l'eau/vapeur du cycle de Rankine lui-même. La DSG fournit à la fois la possibilité de générer de la vapeur saturée et de générer de la vapeur surchauffée. La vapeur surchauffée nécessite une section de surchauffe derrière le séparateur de vapeur, tandis qu'une vapeur saturée est fournie au bloc de puissance à la température d'évaporation à la pression idoine (par exemple 285 ° C à 70 bars) .

2.4.3. Comparaison entre les fluides

L'eau et les huiles thermiques sont les fluides les plus utilisés actuellement. L'eau comme simple caloporteur montre ses limites: température peu élevée, échangeur-évaporateur pour produire la vapeur. Les huiles ont aussi leurs limites en température. Le risque de pollution conduit aussi à écarter les huiles thermiques. Les recherches se concentrent donc sur les alternatives les plus sérieuses: la génération directe de vapeur, l'air sous pression (ou autre gaz), les sels fondus.

2.4.4. Le fluide caloporteur

Un fluide caloporteur est un fluide qui permet le transport de chaleur entre plusieurs sources de température. Ils sont notamment utilisés dans le cas des centrales solaires[33].

Il y a plusieurs type, Chaque fluide caloporteur est choisi selon ses propriétés physiques et chimiques (viscosité, capacité thermique volumique, conductivité électrique), quelque conditions [18]:

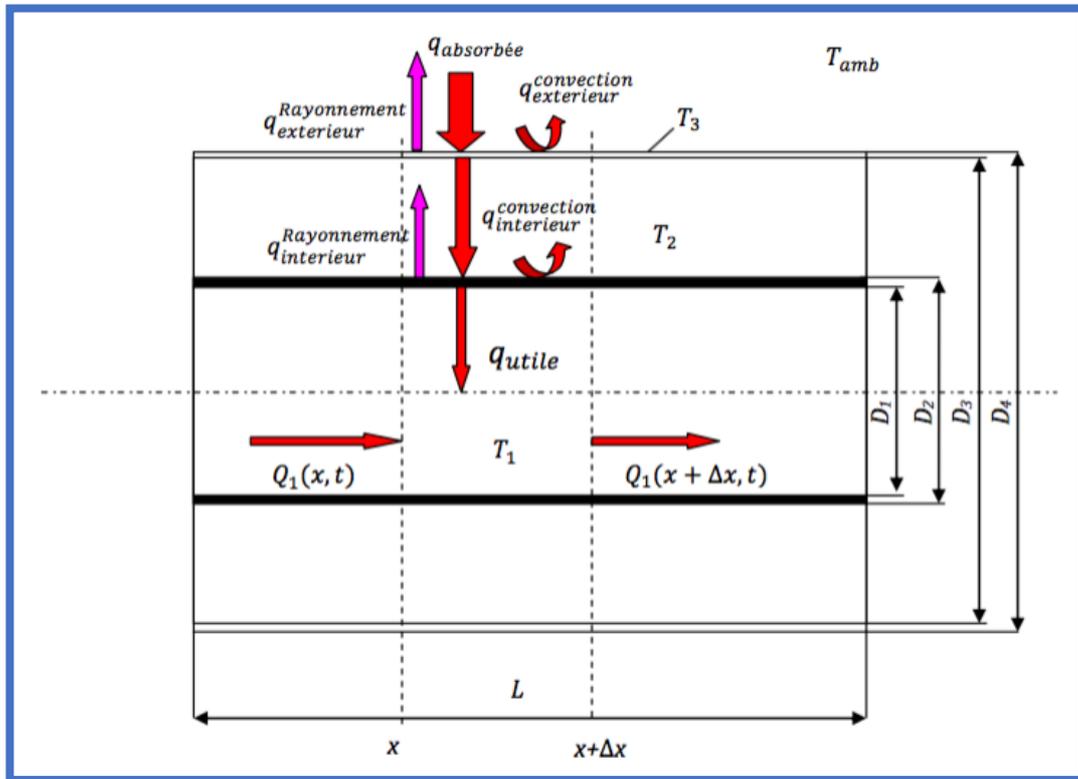
- faible viscosité et avoir un point de coulée aussi bas que possible.
 - haut point d'ébullition et bas point de congélation.
 - résistance chimique vis-à-vis des matériaux de l'installation.
 - pertes de charge faible.
 - coefficient de transfert thermique élève.
 - grande capacité calorifique et toxicité faible.
- **Les sels fondus** : Ces mélanges de nitrate de sodium/potassium, il présente un bon coefficient d'échange et une densité élevée leur température de sortie peut atteindre 650°C, et capable de résiste des températures élevée de 500°C, sont de bons fluides de stockage thermique dans tous les types de centrales.
- **Les huiles thermiques** : qui présentent un bon coefficient d'échange sont les fluides les Plus utilisés dans les centrales cylindro-paraboliques comme un fluide caloporteur[36].
- **Les gaz** : tels que l'hydrogène ou l'hélium peuvent être utilisés comme fluides thermodynamiques et entraîner les moteurs Stirling qui sont associés aux collecteurs paraboliques[36].
- **L'eau liquide** : fluide de transfert idéal, offre un excellent coefficient d'échange et possède une forte capacité thermique est utilisée directement comme fluide thermodynamique dans un cycle de Rankine[36].
- **L'air** : est utilisé classiquement comme fluide de travail dans une turbine à gaz. L'air peut aussi être utilisé comme caloporteur seulement[37].
- **Les fluides organiques** : (butane, propane, etc.) qui ont une température d'évaporation basse sont utilisés comme fluide thermodynamique dans un cycle de Rankine organique.

3. Le Bilan thermique

3.1. Le Bilan thermique du tube

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

la méthode des résistances thermiques et l'analogie électrique la méthode de calcul de la température de chaque élément du collecteur par une discrétisation unidimensionnelle. La figure suivante illustre les flux d'énergie sur un récepteur [32]:



Figure(III.13) : Schéma du bilan énergétique d'un élément x du collecteur CP[32].

3.2. Le bilan thermique du fluide

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

$$\begin{aligned} \Delta Q_1(x, t) &= \rho_1 C p_1 A_1 \Delta x T_1(x, t) \\ Q_1 &= \rho_1 C p_1 V T_1(x, t) \\ \rho_1 C p_1 A_1 \Delta x \frac{dT_1}{dt} &= Q_1(x, t) - Q_1(x + \Delta x, t) + q_{utile}(x, t) \end{aligned}$$

La simplification de l'équation donne :

$$\frac{dT_1(x,t)}{dt} + \vartheta \frac{dT_1(x,t)}{dx} = \frac{q_{utile}(x,t)}{\rho_1 C p_1 A_1} \quad (III.18)$$

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

$$q_{utile} = h_1 A \Delta T = h_1 \pi D_1 (T_2 - T_1) \quad (III.19)$$

h_1 : Le coefficient de transfert de chaleur par convection

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

T_2 : La température de la surface de l'absorbeur

T_1 : La température de fluide

Pour introduire :

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 :

$$Nu = 0,0023 Re_1^{0,8} Pr_1^{0,4} = \frac{h_1 D_1}{\lambda_1} \quad (III.20)$$

$$Re = 4 \frac{\rho_1 V_1}{\pi D_1 \mu_1} \quad (III.21)$$

λ_1 : La conduction thermique du fluide

μ_1 : La viscosité dynamique du fluide $\mu_1 = \vartheta_1 \rho_1$

ϑ_1 : La viscosité cinématique du fluide

Le nombre de Prandtl est donné par :

$$Pr_1 = \frac{\mu_1 C p_1}{\lambda_1} \quad (III.22)$$

Les propriétés du fluide caloporteur $C p_1, \lambda_1, \mu_1$ et ρ_1 sont en fonction de la température T_2 .

3.3. Le bilan thermique de tube absorbeur

Pour le tube absorbeur le bilan thermique s'écrit :

$$\begin{aligned} \Delta Q_2(x, t) &= \rho_2 C p_2 A_2 \Delta x T_2(x, t) \\ \frac{d\Delta Q_2(x, t)}{dt} &= (q_{absorbée}(t) - q_{interieur}(x, t) - q_{utile}(x, t)) \Delta x \end{aligned} \quad (III.23)$$

La simplification de l'équation donne :

$$\frac{dT_2(x, t)}{dt} = \frac{1}{\rho_2 C p_2 A_2} (q_{absorbée}(t) - q_{interieur}(x, t) - q_{utile}(x, t)) \quad (III.24)$$

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

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

$$q_{absorbée} = I. \rho. \gamma. \tau. C_G \quad (III.25)$$

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

$$q_{interieur} = q_{interieur}^{convection} + q_{interieur}^{Rayonnement} \quad (III.26)$$

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

$$q_{interieur}^{convection} = \frac{2\pi \lambda_{eff}}{\ln \frac{D_3}{D_2}} (T_2 - T_3) \quad (III.27)$$

λ_{eff} : La conductivité thermique effective.

λ_{eff} La conductivité thermique effectuée de l'air, elle représente la conductivité thermique que l'air stationnaire devrait avoir pour transférer la même quantité de chaleur que l'air mobile, elle est donnée par [39] :

$$\frac{\lambda_{eff}}{\lambda_{air}} = 0,386 \left(\frac{Pr^{air}}{0,861 + Pr^{air}} \right)^{\frac{1}{4}} (F_{cyl} R_{aL})^{\frac{1}{4}} \quad (III.28)$$

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

R_{aL} : Le nombre de Rayleigh.

$$F_{cyl} = \frac{(\ln \frac{D_3}{D_2})^4}{L^3 \left(D_2^{-\frac{1}{5}} + D_3^{-\frac{3}{5}} \right)^5} \quad (III.29)$$

$$R_{aL} = \frac{g \beta_{air} (T_2 - T_3)}{\nu_{air} \alpha_{air}} L^3 \quad (III.30)$$

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 $q_{interieur}^{Rayonnement}$ concentriques et horizontaux entre le tube absorbeur et l'enveloppe du verre peut être exprimé par la relation suivante [40] :

$$q_{interieur}^{Rayonnement} = \frac{\pi D_2 \sigma (T_2^4 - T_3^4)}{\frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_3} \left(\frac{D_2}{D_3}\right)} \quad (III.31)$$

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

σ : Constant de Stefan-Boltzmann

Alors :

$$q_{interieur} = \frac{2 \pi \lambda_{eff}}{\ln \frac{D_3}{D_2}} (T_2 - T_3) + \frac{\pi D_2 \sigma (T_2^4 - T_3^4)}{\frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_3} \left(\frac{D_2}{D_3}\right)} \quad (III.32)$$

3.4. Le bilan thermique de l'enveloppe en verre

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

$$\begin{aligned} \Delta Q_3(x, t) &= \rho_3 C p_3 A_3 \Delta x \Delta T_3(x, t) \\ \frac{dT_3(x, t)}{dt} &= \frac{1}{\rho_3 C p_3 A_3} (q_{absorbée}(t) - q_{exterieur}(x, t)) \end{aligned} \quad (III.33)$$

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

$$\begin{aligned} q_{exterieur}(x, t) &= q_{exterieur}^{convection} + q_{exterieur}^{Rayonnement} \\ q_{exterieur}^{convection} &= h_3 \pi D_4 (T_3 - T_{amb}) \end{aligned} \quad (III.34)$$

Pour introduire h_3 :

$$\begin{aligned} Nu_3 &= \frac{h_3 D_3}{\lambda_3} \\ Nu_3 &= 0,3 + \frac{0,62 Re_3^{\frac{1}{2}} Pr_3^{\frac{1}{3}}}{\left[1 + \left(\frac{0,4}{Pr_3}\right)^{\frac{2}{4}}\right]^{\frac{1}{4}}} \left[1 + \left(\frac{Re_3}{282000}\right)^{\frac{5}{8}}\right]^{\frac{4}{5}} \end{aligned} \quad (III.35)$$

$$Re_3 = \frac{\rho_{air\ amb} V_{vent} D_4}{\mu_{air\ amb}} \quad (III.36)$$

$$q_{exterieur}^{Rayonnement} = \varepsilon_3 \sigma \pi D_4 (T_3^4 - T_{amb}^4) \quad (III.37)$$

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

3.5. Pertes thermiques

Une fois que les rayons solaires ont fait leurs chemins vers les récepteurs au-dessus de la température ambiante, ce qui produit un processus des pertes de chaleurs à partir du récepteur. Ces modes des pertes sont la convection, le rayonnement et la conduction, qui sont dépendants de la différence dans la température entre le récepteur et l'environnement et de la géométrie du récepteur et celle du concentrateur . La forme est donnée sous la forme suivante[41] :

$$Q_P = Q_{P.cov} + Q_{P.Ray} + Q_{P.cod} \quad (III.38)$$

3.5.1. Perte par conduction

Les pertes par conduction sont habituellement petites comparées à ceux par convection et par rayonnement. Elles sont souvent combinées avec le terme de perte de convection dans la plupart des analyses.

$$Q_{cod} = \lambda_{abs} A_{abs} (T_{abs} - T_{amb}) / \Delta Z \quad (III.39)$$

3.5.2. Perte par convection

La mauvaise connaissance du phénomène de la convection est encore posée pour une plaque plane. Elle est dépendante de la vitesse du vent et sa direction par rapport au site. Ces pertes sont proportionnelles à la surface de l'absorbeur et la différence entre la température de la surface captatrice et la température ambiante donnée parla :

$$Q_{cov} = h_{cov} A_{abs} (T_{abs} - T_{amb}) \quad (III.40)$$

Le coefficient de transfert de chaleur par convection est donnée par la formule suivante :

$$h_{cov} = \frac{Nu \lambda_{air}}{d} \quad (III.41)$$

d : diamètre de récepteur.

λ_{air} : conductivité thermique de l'air

Le nombre de Nusselt Nu est donné par :

$$Nu = 0,664 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (III.42)$$

Le calcul de nombre de Reynolds Re se fait par la formule suivante :

$$Re = \frac{v d}{v_{air}} \quad (III.43)$$

3.5.3. Perte par Rayonnement

Les pertes de chaleur par rayonnement sont importante pour des récepteurs fonctionnant seulement au température légèrement au-dessus de la température ambiante, et devient dominante pour des collecteurs fonctionnant à des températures élevé. Le taux de perte de chaleur de rayonnement est proportionnel à l'émittance de la surface et à la différence dans la température a la puissance quatre. L'équation s'écrit sous la forme :

$$Q_{Ray} = \varepsilon_{abs} \sigma A_{abs} (T_{abs}^4 - T_{ciel}^4) \quad (III.44)$$

Où :

ε_{abs} : Facteur émissivité de l'absorbeur .

σ : Constante de Stefan-Boltzmann.

T_{ciel} : Température du ciel.

La température équivalente du rayonnement du ciel dépend de la densité de l'air et de son contenu d'humidité, quand l'humidité relative est haute où qu'on soit au niveau de la mer, on peut supposer que la température du ciel est identique à la température de l'air ambiante. Cependant pour les basses humidités relatives ou aux altitudes élevées, la température de rayonnement de ciel peut être inférieure de 6°C que la température ambiante, [41] donné par la formule de Whillier (1967) :

$$T_{ciel} = T_{amb} - \sigma \quad (III.45)$$

Et par la formule de Swinbank :

$$T_{ciel} = 0,0552 T_{amb}^{1,5} \quad (III.46)$$

On obtient la forme suivante :

$$Q_{Ray} = A_{abs} h_{Ray} (T_{abs} - T_{amb}) \quad (III.47)$$

$$h_{Ray} = \varepsilon_{abs} \sigma \frac{T_{abs}^4 - T_{ciel}^4}{T_{abs} - T_{amb}} \quad (III.48)$$

3.6. Puissance utile q_{util}

La puissance utile, c'est la puissance récupérée par le collecteur au niveau du foyer, elle peut être déterminée par l'expression suivante [42]:

$$q_u = q_{abs} + q_{perte} \quad (III.49)$$

3.7. Rendement instantané du concentrateur solaire η

La mesure des performances d'un collecteur solaire est une étape importante et nécessaire pour la compréhension du fonctionnement du système. Cette efficacité se définit comme le rapport de l'énergie thermique absorbée par le récepteur à l'énergie reçue à l'ouverture du concentrateur[42].

$$\eta = \frac{\dot{q}_u A_a}{A_w (I_b + I_d)} \quad (III.50)$$

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu les différentes parties d'une centrale cylindro parabolique et leurs caractéristiques ainsi que la stérilisation solaire, et nous avons abordé principalement les équations de transferts thermique qui régissent la centrale cylindro-

Chapitre III : Étude D'une Centrale Cylindro-Parabolique

paraboliques. Ainsi, le système sera résolu par l'une des méthodes de résolution du système d'équations à l'aide du logiciel Matlab.

Chapitre IV :
Modélisation
mathématique
du calcul
thermique du
champ solaire

Introduction

La complexité des systèmes physiques ou technologiques, destinés à être conçus ou étudiés, a conduit à employer des méthodes numériques basées sur le principe d'approcher une solution nominale le plus possible, mais celles-ci exigent de grands calculs nécessitant des calculateurs efficaces. Les bilans thermiques établis au chapitre précédent, relativement sur le fluide caloporteur, l'absorbeur (récepteur) et l'enveloppe protectrice (la vitre) feront l'objet d'un modèle mathématique à résoudre avec la méthode itérative de Newton-Raphson pour la détermination des profils de températures et des puissances thermiques (reçue, utile et perdue...).

1. Présentation du modèle mathématique issu des bilans thermiques

Les équations relatives aux bilans thermiques établis en régime permanent sont présentées ci-après respectivement pour l'absorbeur, la vitre et le fluide caloporteur.

1.1. Pour l'absorbeur

Le bilan thermique global sur l'absorbeur est comme suit:

$$q_{r.abs} - q_{cv.f} - q_{cv.int} - q_{ray.int} = 0 \quad (IV.1)$$

$$q_{r.abs} - h_{cv.f}\pi D_1(T_{abs} - T_{mf}) - h_{cv.int}\pi D_2(T_{abs} - T_v) - \sigma \varepsilon_{abs}\pi D_2(T_{abs}^4 - T_v^4) = 0$$

$$q_{r.abs} = h_{cv.f}\pi D_1(T_{abs} - T_{mf}) - h_{cv.int}\pi D_2(T_{abs} - T_v) - \sigma \varepsilon_{abs}\pi D_2(T_{abs}^4 - T_v^4)$$

$$\frac{q_{r.abs}}{\pi D_2} = h_{cv.f} \frac{D_1}{D_2} (T_{abs} - T_{mf}) - h_{cv.int} (T_{abs} - T_v) - \sigma \varepsilon_{abs} (T_{abs}^4 - T_v^4)$$

$$\frac{q_{r.abs}}{\pi D_2} = \sigma \varepsilon_{abs} T_{abs}^4 + \left(h_{cv.f}\pi \frac{D_1}{D_2} + h_{cv.int} \right) T_{abs} - \sigma \varepsilon_{abs} T_v^4 - h_{cv.int} T_v$$

$$- h_{cv.f} \frac{D_1}{D_2} \left(\frac{T_{fe} + T_{fs}}{2} \right)$$

On obtient :

$$\varphi_{r.abs} = A_1 T_{abs}^4 + B_1 T_{abs} - A_1 T_v^4 - C_1 T_v - E_1 \quad (IV.2)$$

Où A_1 , B_1 , C_1 et E_1 sont des constantes substitutions définies par :

$$\begin{cases} A_1 = \sigma \varepsilon_{abs} \\ B_1 = \left(h_{cv.f}\pi \frac{D_1}{D_2} + h_{cv.int} \right) \\ C_1 = h_{cv.int} \\ E_1 = h_{cv.f} \frac{D_1}{D_2} \left(\frac{T_{fe} + T_{fs}}{2} \right) \end{cases}$$

1.2. Pour la vitre

Son bilan thermique global est :

$$q_{r.v} + q_{cv.int} + q_{ray.int} - q_{ray.ext} - q_{cv.ext} = 0 \quad (IV.3)$$

$$q_{r.v} = -q_{cv.int} - q_{ray.int} + q_{ray.ext} + q_{cv.ext}$$

$$q_{r.v} = -h_{cv.int}\pi D_3(T_{abs} - T_v) - \sigma \varepsilon_v \pi D_3(T_{abs}^4 - T_v^4) + \sigma \varepsilon_v \pi D_4(T_v^4 - T_{ciel}^4) + h_{cv.ext}\pi D_4(T_v - T_{amb})$$

$$\frac{q_{r.v}}{\pi D_4} = -h_{cv.int} \frac{D_3}{D_4}(T_{abs} - T_v) - \sigma \varepsilon_v \frac{D_3}{D_4}(T_{abs}^4 - T_v^4) + \sigma \varepsilon_v (T_v^4 - T_{ciel}^4)$$

$$+ h_{cv.ext}(T_v - T_{amb})$$

$$\frac{q_{r.v}}{\pi D_4} = \left(\sigma \varepsilon_v + \sigma \varepsilon_v \frac{D_3}{D_4} \right) T_v^4 + \left(h_{cv.int} \frac{D_3}{D_4} + h_{cv.ext} \right) T_v - \sigma \varepsilon_v \frac{D_3}{D_4} T_{abs}^4 - h_{cv.int} \frac{D_3}{D_4} T_{abs} - h_{cv.ext} T_{amb} - \sigma \varepsilon_v T_{ciel}^4$$

On obtient :

$$\varphi_{r.v} = A_2 T_v^4 + B_2 T_v - C_2 T_{abs}^4 - E_2 T_{abs} - F_2 \quad (IV.4)$$

Où A_2 , B_2 , C_2 , E_2 et F_2 ont des constantes substitutions définies par :

$$\left\{ \begin{array}{l} A_2 = \left(\sigma \varepsilon_v + \sigma \varepsilon_v \frac{D_3}{D_4} \right) \\ B_2 = \left(h_{cv.int} \frac{D_3}{D_4} + h_{cv.ext} \right) \\ C_2 = \sigma \varepsilon_v \frac{D_3}{D_4} \\ E_2 = h_{cv.int} \frac{D_3}{D_4} \\ F_2 = h_{cv.ext} T_{amb} + \sigma \varepsilon_v T_{ciel}^4 \end{array} \right.$$

1.3. Fluide caloporteur HTF

A partir du premier principe de la thermodynamique appliqué entre deux sections d'un élément dz du fluide caloporteur, on aboutit à :

$$q_{cv.f} = \dot{m} C_{pf} \frac{dT_f(x)}{dx} \quad (IV.5)$$

$$h_{cv.f} \pi D_1 (T_{abs} - T_f) = \dot{m} C_{pf} \frac{dT_f(x)}{dx}$$

$$\frac{h_{cv.f} \pi D_1}{\dot{m} C_{pf}} (T_{abs} - T_f) = \frac{dT_f(x)}{dx}$$

On arrive à l'équation différentielle suivante :

$$\frac{dT_f(x)}{dx} + \alpha T_f = \alpha T_{abs} \quad (IV.6)$$

Avec $\alpha = \frac{h_{cv,f}\pi D_1}{\dot{m}C_{pf}}$

La solution de cette équation est de la forme :

$$T_f(x) = ce^{-\alpha x} + T_{abs} \quad (IV.7)$$

Et les conditions aux limites correspondantes sont :

$$\begin{cases} x = 0 \Rightarrow T_f(0) = T_{fe} \\ x = L \Rightarrow T_f(L) = T_{fs} \end{cases}$$

D'où

$$T_{fs} = (T_{fe} - T_{abs})e^{-\alpha L} + T_{abs} \quad (IV.8)$$

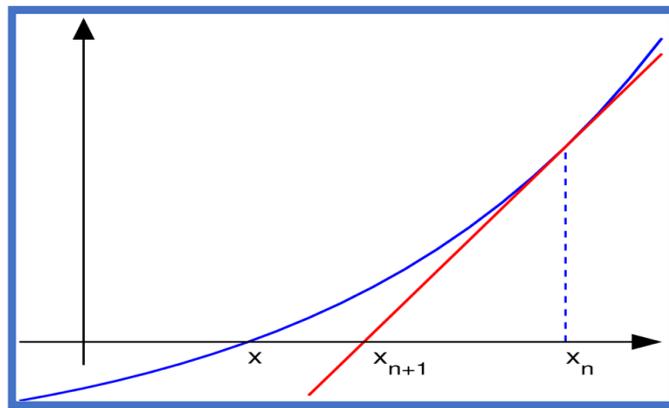
2. Résolution mathématique du système d'équations

Ce système d'équation sera résolu par la méthode de Newton-Raphson.

2.1. Méthode de Newton-Raphson

2.1.1. Principe de la méthode

En analyse numérique, la méthode de Newton ou méthode de Newton-Raphson est dans son application la plus simple, un algorithme efficace pour trouver numériquement une approximation précise d'un zéro (ou racine) d'une fonction réelle d'une variable réelle. Cette méthode doit son nom aux mathématiciens anglais Isaac Newton (1643-1727) et Joseph Raphson (peut-être 1648-1715), qui furent les premiers à la décrire pour la recherche d'une solution polynomiale. Thomas Simpson (1710-1761) élargit considérablement le domaine d'application de l'algorithme en montrant, grâce à la notion de dérivée, comment on pouvait l'utiliser pour calculer une solution d'une équation non linéaire pouvant ne pas être un polynôme, et d'un système formé de telles équations[43].



Figure(IV.1) : Interprétation graphique de la méthode[43].

Chapitre IV : Modélisation mathématique du calcul thermique du champ solaire

La méthode la plus largement utilisée pour résoudre les équations algébriques non linéaires est la méthode de Newton-Raphson. Cette méthode est une procédure d'approximation successive basée sur une estimation initiale et utilise décomposition en série de Taylor. Considérer la solution de l'équation non linéaire à un seul variable donnée par [44] :

$$f(x) = c$$

Si x_0 est une estimation initiale de la solution, et Δx_0 est une petite déviation de la solution correcte, nous avons :

$$f(x_0 + \Delta x_0) = c \quad (\text{IV.9})$$

Décomposant la fonction en série de Taylor au voisinage de x_0 , on trouve :

$$f(x_0 + \Delta x_0) = f(x_0) + \left(\frac{df}{dx}\right) \Delta x_0 + \frac{1}{2!} \left(\frac{d^2f}{dx^2}\right) \Delta x_0^2 + \dots = c \quad (\text{IV.10})$$

Supposons que l'erreur Δx_0 est très petite, les termes de grands ordre peuvent être négligés, soit :

$$\Delta c_0 = c - f(x_0) \approx \left(\frac{df}{dx}\right) \Delta x_0$$

$$\text{Donc } \Delta x_0 = \frac{\Delta c_0}{\left(\frac{df}{dx}\right)}$$

Ajoutons Δx_0 à l'estimation initiale, nous trouverons la deuxième approximation

$$x_1 = x_0 + \Delta x_0 = x_0 + \frac{\Delta c_0}{\left(\frac{df}{dx}\right)} \quad (\text{IV.11})$$

$$x_2 = x_1 + \Delta x_1 = x_1 + \frac{\Delta c_1}{\left(\frac{df}{dx}\right)} \quad (\text{IV.12})$$

$$\Delta c_1 = c - f(x_1) \quad (\text{IV.13})$$

$$x_3 = x_2 + \Delta x_2 = x_2 + \frac{\Delta c_2}{\left(\frac{df}{dx}\right)} \quad (\text{IV.14})$$

L'utilisation successive de cette procédure donne l'algorithme de Newton Raphson :

$$\Delta c_k = c - f(x_k) \quad (\text{IV.15})$$

$$\Delta x_k = \frac{\Delta c_k}{\left(\frac{df}{dx}\right)} \quad (\text{IV.16})$$

$$x_{(k+1)} = x_k + \Delta x_k \quad (\text{IV.17})$$

On peut les réarranger comme :

$$\Delta c_k = J_k \cdot \Delta x_k \quad (\text{IV.18})$$

$$\text{Ou } J_k = \frac{df}{dx}$$

Cette relation démontre que l'équation non linéaire $f(x) - c = 0$ est approximée par la droite tangente de la courbe.

On considère la tangente à la courbe représentative de f en $(x_0, f(x_0))$. Soit x_1 l'abscisse de l'intersection de la tangente avec l'axe des abscisses. On peut remarquer que x_1 donne une meilleure estimation d'une solution de l'équation $f(x)=0$ que x_0 . Partant de x_1 , on trace la tangente de f en $(x_1, f(x_1))$. On note x_2 l'abscisse de l'intersection de cette deuxième tangente avec l'axe des abscisses. x_2 estime mieux la solution de l'équation $f(x)=0$ que x_1 . On répète cette procédure jusqu'à ce qu'on atteigne la précision demandée [44].

2.2. Application au modèle

2.2.1. Pour l'absorbeur

Soit :

$$R_{abs}(T_{abs}) = A_1 T_{abs}^4 + B_1 T_{abs} - A_1 T_v^4 - C_1 T_v - E_1 - \varphi_{r.abs} \quad (IV.19)$$

$$R'_{abs}(T_{abs}) = \frac{\partial R}{\partial T_{abs}} = 4A_1 T_{abs}^3 + B_1 \quad (IV.20)$$

On a :

$$T_{abs}^{(i+1)} = T_{abs}^{(i)} - \frac{R_{abs}}{R'_{abs}} \quad (IV.21)$$

Tel que :

$$\left| T_{abs}^{(i+1)} - T_{abs}^{(i)} \right| < \varepsilon$$

2.2.2. Pour la vitre

Soit :

$$R_v(T_v) = A_2 T_v^4 + B_2 T_v - C_2 T_{abs}^4 - E_2 T_{abs} - F_2 - \varphi_{r.v} \quad (IV.22)$$

$$R'_v(T_v) = \frac{\partial R}{\partial T_v} = 4A_2 T_v^3 + B_2 \quad (IV.23)$$

On a :

$$T_v^{(i+1)} = T_v^{(i)} - \frac{R_v}{R'_v} \quad (IV.24)$$

Tel que :

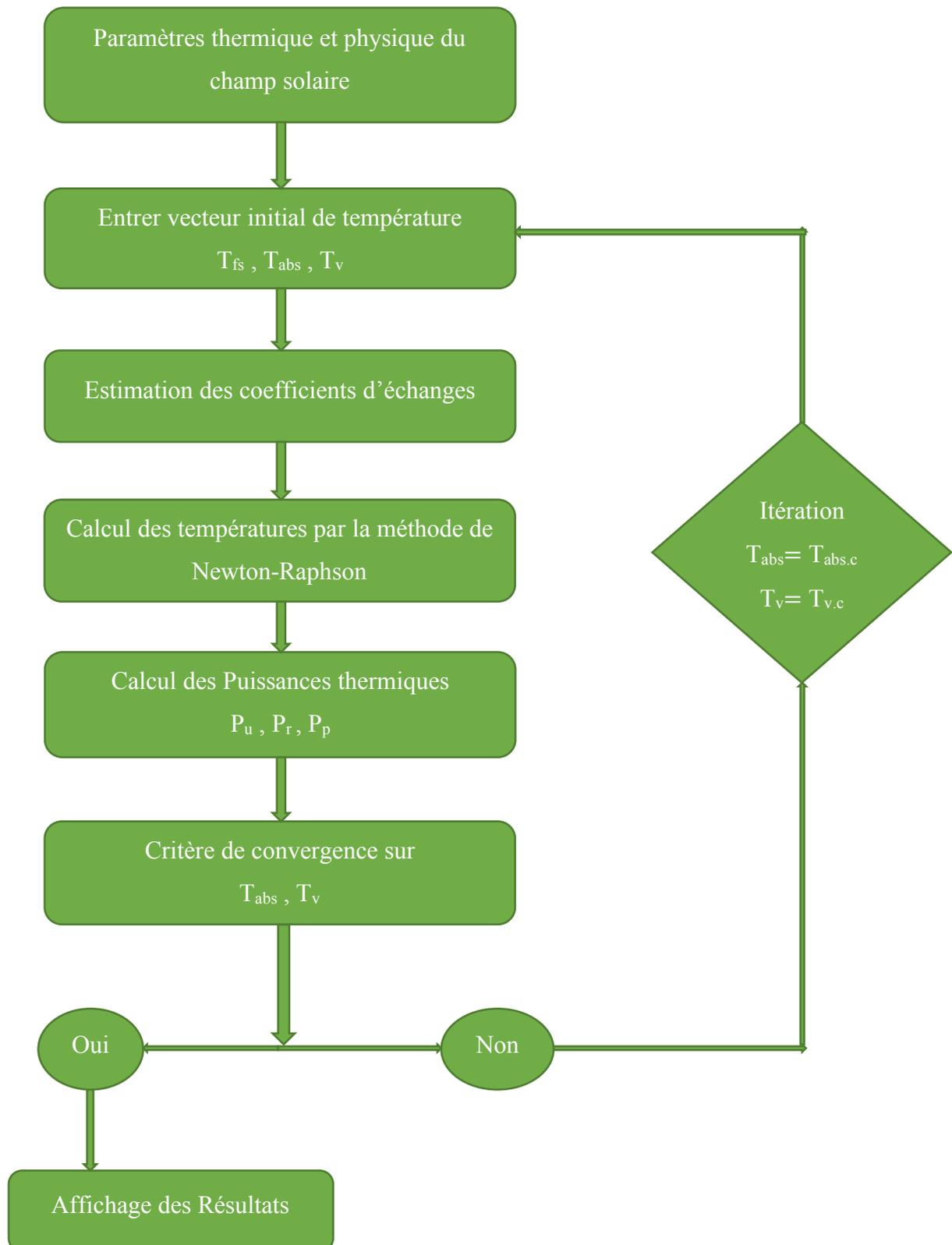
$$\left| T_v^{(i+1)} - T_v^{(i)} \right| < \varepsilon$$

2.2.3. Pour le fluide HTF

La température de sortie du fluide est obtenue directement par la relation :

$$T_{fs}^{(i+1)} = \left(T_{fe} - T_{abs}^{(i)} \right) e^{-\alpha L} + T_{abs}^{(i)} \quad (IV.25)$$

3. Organigramme de la simulation



Figure(IV.2) : Organigramme de simulation.

Chapitre IV : Modélisation mathématique du calcul thermique du champ solaire

3.1. Présentation de la centrale étudiée

Est constitué de capteurs cylindro-paraboliques de 100 MWelect, répartis sur deux surfaces. Chaque surface contient plusieurs boucles de quatre modules, répartis en rangées. Le module est formé des segments comportant chacun plusieurs miroirs. La composante directe du rayonnement solaire incident est concentrée par les miroirs sur un récepteur situé au point focal de la parabole. Un fluide caloporteur HTF (Heat Transfer Fluid) circule à l'intérieur du récepteur. Le fluide chauffe, dont la température peut atteindre 393°C, passe à travers une série d'échangeurs de chaleur pour céder sa chaleur à l'eau et produire ainsi de la vapeur d'eau (générateur de vapeur solaire).

Les caractéristiques du prototype proposée :

Caractéristique géométrique et thermique du collecteur			
Diamètre intérieur de tube absorbeur (m)	0.065	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)	0.11	La transmissibilité de l'enveloppe en verre	0.95
Diamètre extérieur de l'enveloppe en verre (m)	0.112	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.

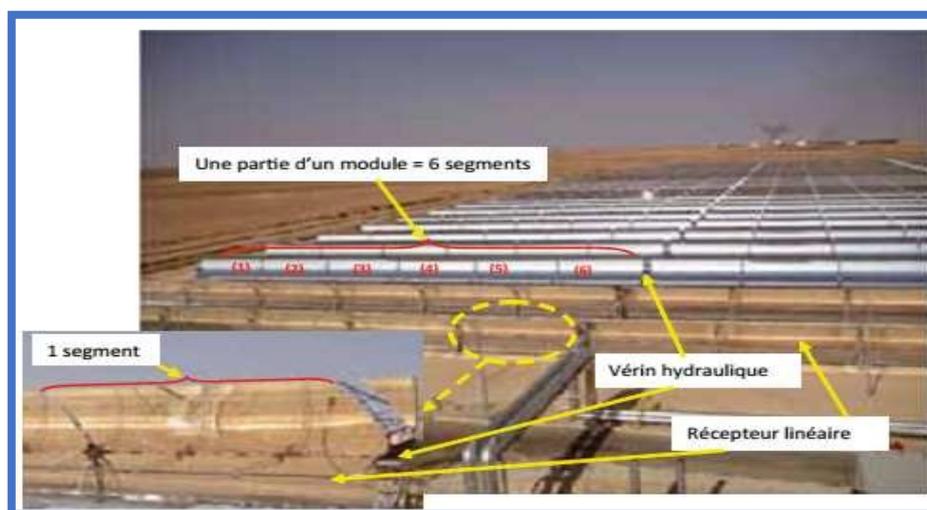


Figure (IV.3): Une partie du champ solaire[26].

4. Présentation des résultats de simulation du champ solaire

4.1. Variation des températures Fluide , Récepteur et Vitre en fonction de Éclairement reçue (DNI)

On a tracé les profils des températures de sortie de fluide, Récepteur (absorbeur) et Vitre dans le même graphe, et on a supposé $T_{fe} = 560K$ et $m_f = 6 \text{ Kg/s}$ et $L = 600m$

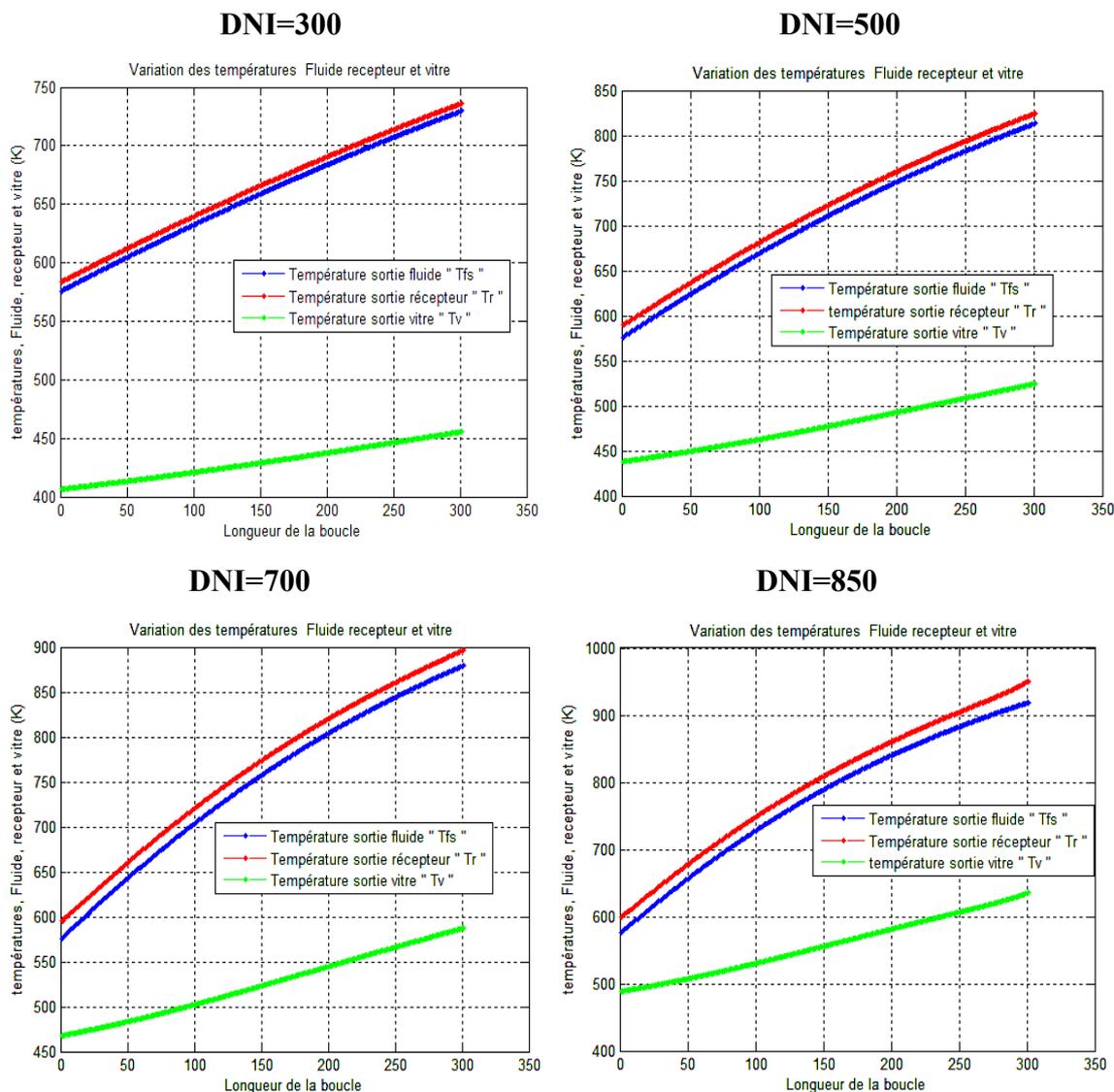


Figure (IV.4) : Variation des températures fluide récepteur et vitre en fonction de DNE.

La figure (IV.4) représente le profil des températures de fluide , du tube absorbeur et la vitre en fonction de l'éclairement reçue par C.C.P (DNI). Ces graphiques permettent de noter que la température de la vitre est faible par rapport à la température de fluide et tube absorbeur, car la

Chapitre IV : Modélisation mathématique du calcul thermique du champ solaire

vitre a une absorptivité faible. Les niveaux de températures du fluide, récepteur et vitre augmentent (d'à peu près 5%) proportionnellement avec l'éclairement reçu par CCP.

4.2. Influence du débit massique sur la température du fluide , récepteur et vitre

On a tracer les profils des températures de sortie de fluide, Récepteur (absorbeur) et Vitre dans le même graphe en fonction de débit massique, et on a supposé $T_{fe} = 560K$ et $L= 600m$

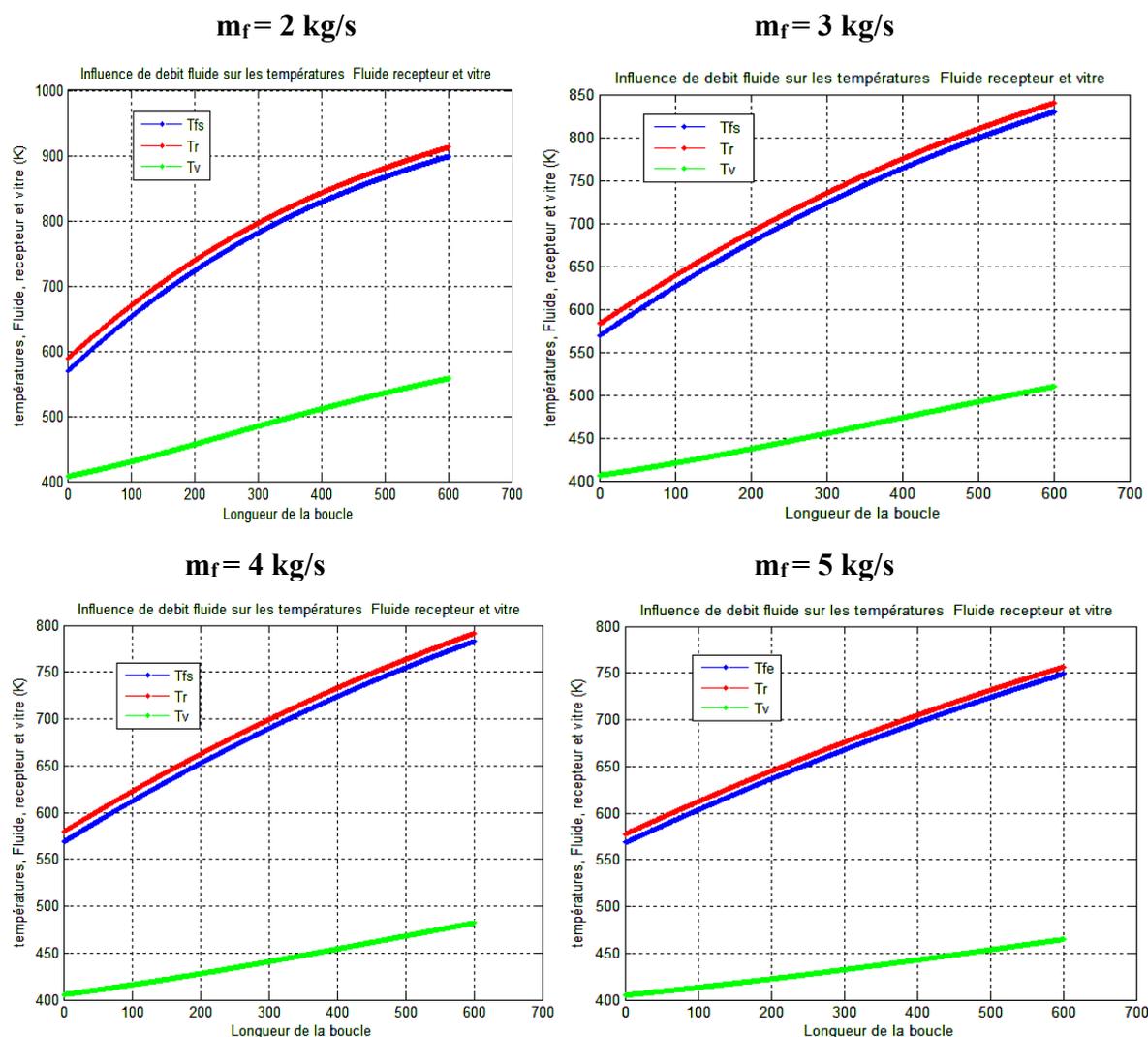


Figure (IV.5) : Variation de la température du fluide caloporteur en fonction des différents débits massiques.

La figure (IV.5) représente la variation de la température du fluide caloporteur en fonction des différents débits massiques. On remarque que les températures du fluide caloporteur (T_{fs}), récepteur (T_r) et vitre (T_v) augmentent de 5,5% avec la diminution du débit. On constate que le débit dans l'intervalle de 2 à 5 kg/s nous avons trouvé des valeurs réel, par contre si on met le débit inférieure à 2 kg/s on trouve des solutions complexes (irréel) car la vitesse de fluide

Chapitre IV : Modélisation mathématique du calcul thermique du champ solaire

devient très faible presque ne bouge pas. La meilleur valeur de débit pour un rendement élevé c'est 2 kg/s.

4.3. Influence de la température d'entré fluide sur la température sortie du fluide , récepteur et vitre

On a tracé les profils des températures de sortie de Fluide, Absorbteur et Vitre dans le même graphe en fonction de longueur de la boucle, et on fait varie la température d'entré fluide

$T_{fe} = (300K, 350K, 400K, 450K)$, et on a supposé $m_f = 6 \text{ Kg/s}$ et $L = 600m$

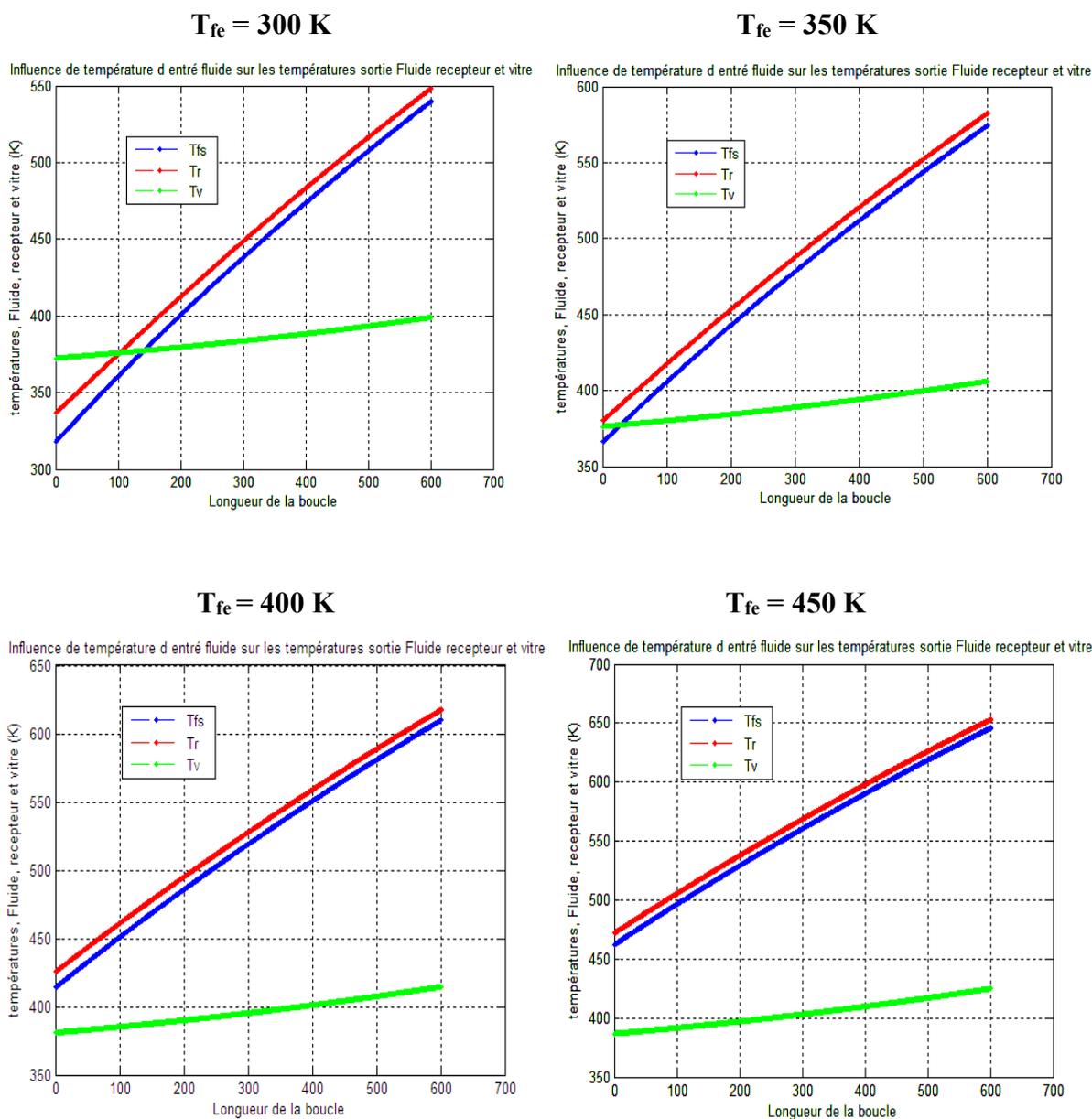


Figure (IV.6) : Influence de la température d'entré fluide sur la température sortie du fluide , récepteur et vitre.

Chapitre IV : Modélisation mathématique du calcul thermique du champ solaire

La figure (IV.6) représente l'influence de la température d'entrée fluide sur la température sortie du fluide, récepteur et vitre. Ces graphiques permettent de noter que la température de récepteur est sensiblement affectée par la température d'entrée fluide contrairement à la température de la vitre. Ceci s'explique par le fait que le récepteur est en contact direct avec le fluide caloporteur et il a un coefficient d'absorptivité de chaleur très importante.

4.4. Variation des coefficients d'échange

On a tracer les profils des coefficients d'échange (coefficient de convection de fluide, nombre de Reynolds, nombre de Nusselt et masse volumique de fluide) en fonction de longueur de la boucle, et on a supposé $T_{fe}=560\text{ K}$, $m_f=6\text{ Kg/s}$ et $L=600\text{m}$

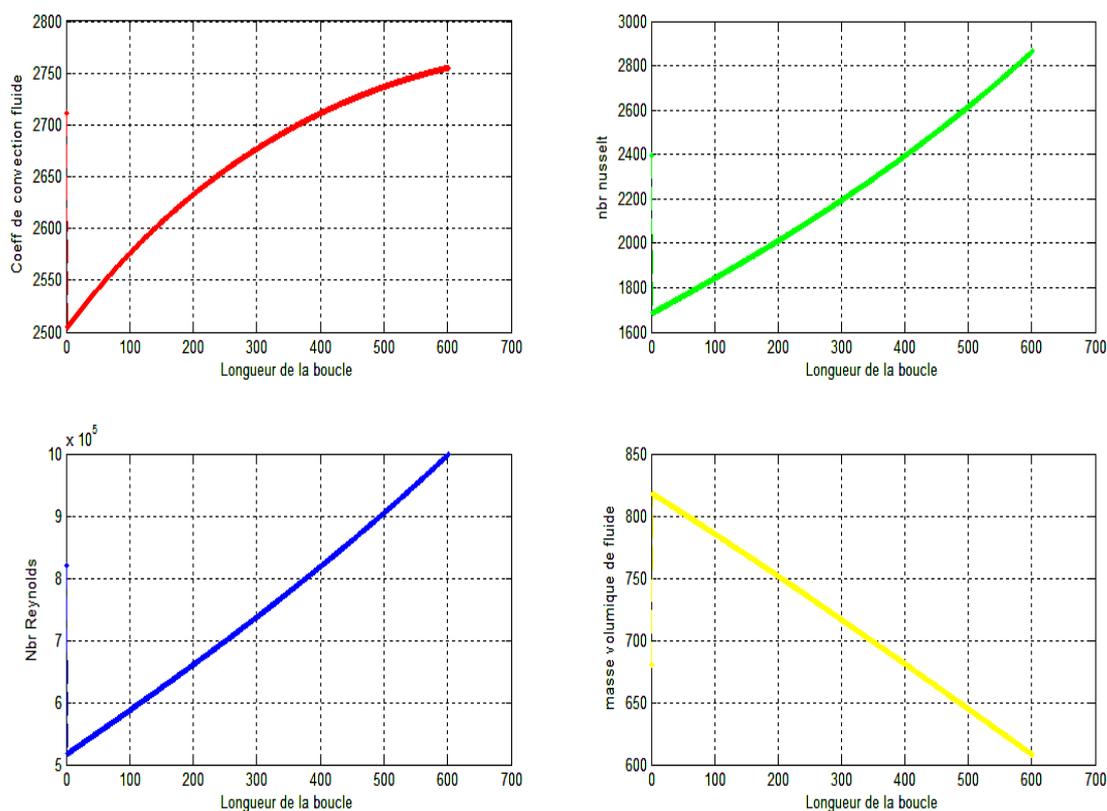


Figure (IV.7) : Variation des coefficients d'échange.

La figure (IV.7) représente la variation des coefficients d'échange (coefficient de convection de fluide, nombre de Reynolds, nombre de Nusselt et masse volumique de fluide). On remarque que la convection fluide augmente proportionnellement avec l'augmentation de nombre Reynolds, nombre Nusselt et la diminution de la masse volumique. Ceci s'explique par le fait que la masse volumique se situe dans le numérateur de la loi de Reynolds.

4.5. Variation de la puissance reçue, gagnée et perdue en fonction Éclairement reçu (DNI)

On a tracer l’histogramme des puissances reçue (PuR1), gagné (PuG1) et perdu (PuD1) en fonction de DNE et on a supposé $T_{fe} = 560K$, $m_f = 6 \text{ Kg/s}$, $L = 600m$, $h_{cv,ext} = 18 \text{ W/m}^2k$ et $h_{cv,int} = 2 \text{ W/m}^2k$

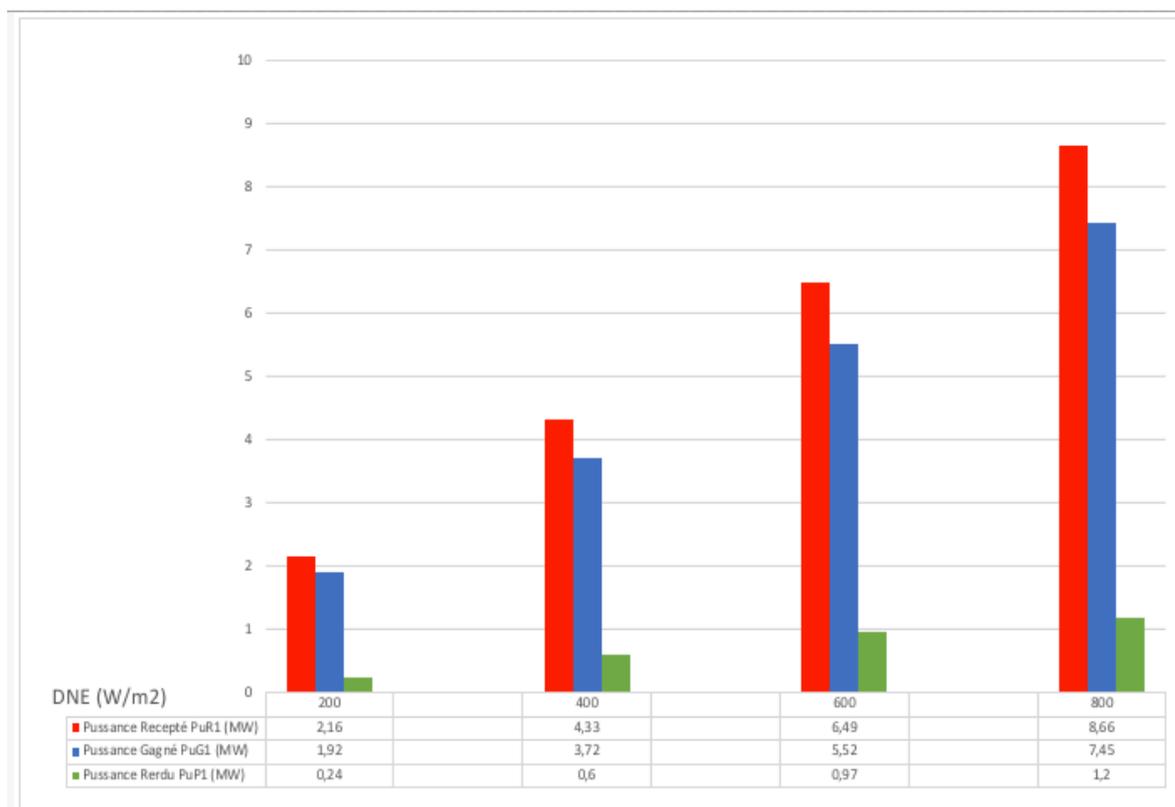


Figure (IV.8) : Variation de la puissance reçue, gagnée et perdue en fonction DNI.

La figure (IV.8) représente la variation de la puissance reçue (recepté), gagnée et perdue en fonction de l’éclairement reçu par CCP (DNI). La puissance absorbée (recepte PuR) est la plus importante et augmente avec la puissance solaire puisque elle provient du rayonnement direct réfléchi par le miroir, son importance est due à ses coefficients (d’absorption de transmission) élevés. Il est évident aussi que la puissance gagnée par le fluide caloporteur (puissance utile) dépend étroitement de la puissance reçue et des pertes. Ces grandeurs varient proportionnellement à l’intensité de l’éclairement solaire reçu. On constate dans une boucle on produit 7.45 MWth et c’est l’équivalent de 2.24 MWelect donc pour produire 100 MWelect on a besoin que le fluide circule environ 45 fois dans la boucle pour arriver à la puissance demandée.

4.6. Variation du rendement du champ solaire en fonction DNI

On a tracé l'histogramme du rendement en fonction de DNE et on a supposé $T_{fe} = 560K$, $m_f = 6 \text{ Kg/s}$, $L = 600m$, $h_{cv.ext} = 18 \text{ W/m}^2k$ et $h_{cv.int} = 2 \text{ W/m}^2k$

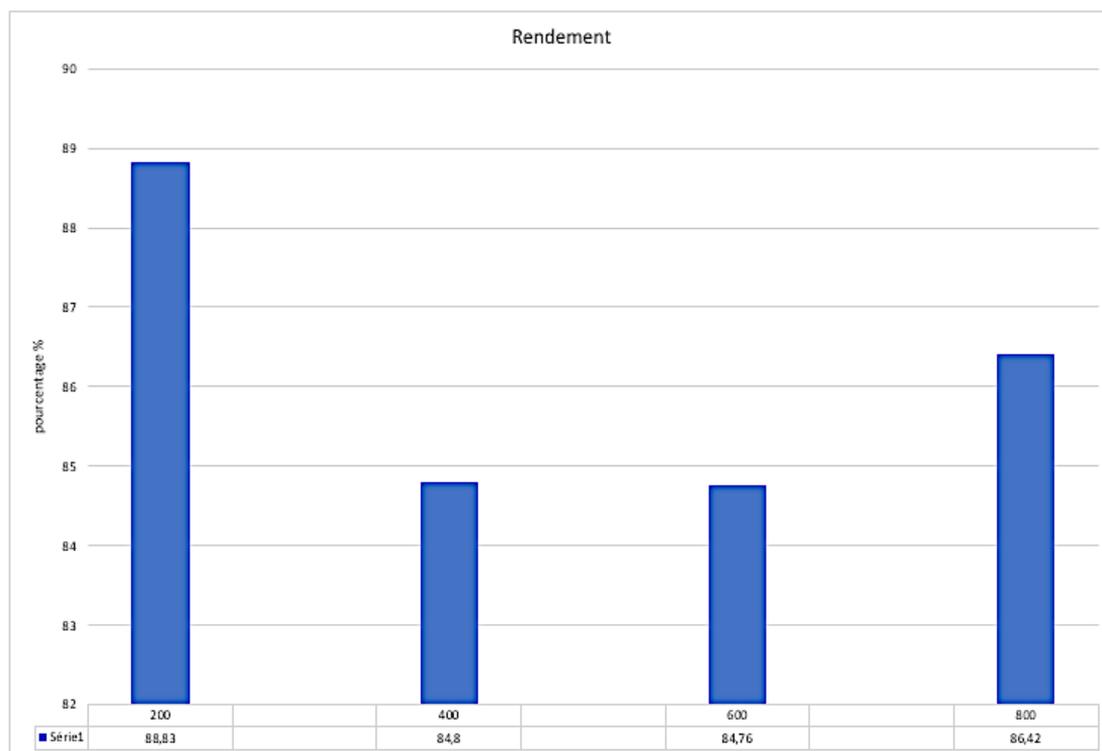


Figure (IV.9) : Variation du rendement du champ solaire en fonction de DNI.

La figure (IV.9) représente la variation du rendement du champ solaire en fonction de l'éclairement solaire (DNI). On remarque que le rendement maximal est obtenu à DNI= 200 (88.83%). Le rendement minimal correspond DNI= 600 qui est d'environ (84.76%).

Conclusion

Les résultats obtenus par l'application du code de calcul (MATLAB) pour un concentrateur cylindro-parabolique, on s'intéresse au rayonnement concentré. Les profils de températures au niveau du fluide caloporteur, de récepteur et de l'enveloppe en verre ont été déterminés ainsi que les puissances thermiques reçues, gagnés et perdues et on a déterminé le rendement de la centrale et l'influence des coefficients d'échange.

Parmi les résultats les plus importants, on cite :

Chapitre IV : Modélisation mathématique du calcul thermique du champ solaire

- L'éclairement reçu qui influence les profils de températures de sortie au niveau du fluide caloporteur, de récepteur et de l'enveloppe en verre.
- l'énergie gagnée qui est sujette à un compromis d'une importance capitale car sa quantité augmente en fonction de l'augmentation de l'éclairement reçue (DNI) et diminution du débit massique de fluide.
- La température d'entrée du fluide caloporteur influence d'une manière conséquente sur les températures de sortie de fluide et absorbeur.

*Conclusion
Générale*

Conclusion Générale

La technologie des capteurs cylindro-paraboliques est actuellement la plus éprouvée des techniques de concentration solaire.

L'énergie thermique reçue est collectée et absorbée pour ensuite être utilisée au chauffage du fluide caloporteur à température élevée, qui est pompé dans des échangeurs afin de produire de la vapeur surchauffée. L'utilisation thermique de l'énergie solaire a tous les avantages dans l'approvisionnement en énergie classique, mais le prix de revient des éléments de ce capteur est le principal facteur qui limite son application économique.

Le champ solaire est une source importante pour les régions désertiques, il assure la production de l'électricité et de l'énergie thermique.

L'utilisation des concentrateurs est particulièrement intéressante, puisque ces capteurs qui sont très développés dans ces dernières années, notamment pour la production de la vapeur surchauffée pour alimenter des turbines à vapeur, peuvent servir à assurer l'énergie nécessaire au fonctionnement des installations. Dans le sud, où l'ensoleillement est très important, le solaire peut fournir l'énergie nécessaire à l'industrie.

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 des bilans thermiques détaillés ont été effectués sur les éléments du collecteur (fluide HTF, absorbeur et écran) en vue de calculer les puissances thermiques en présence (reçue, utile et perdue) ainsi que le rendement du champ solaire et les profils de températures au niveau de chaque élément du concentrateur.

Par ailleurs, nous avons pu varier quelques paramètres importants relativement au concentrateur pour faire apparaître les effets produits sur les performances du champ solaire (rendement). Pour assurer un bon fonctionnement de ces concentrateurs il est préférable de travailler à des températures d'entrée élevées et à faible débit massique de fluide caloporteur qui est favorable au système de production d'énergie (puissance utile). Pour un éclairement reçu DNI élevé, le concentrateur absorbe une grande quantité d'énergie et la température peut atteindre des valeurs très importantes.

Conclusion Générale

En final, tout en espérant que nous avons pu apporter à travers ce travail une analyse thermique appropriée pour les capteurs cylindro-paraboliques.

Annexes

Introduction

Tous les calculs de systèmes solaires utilisant la conversion thermique de l'énergie font appel à quelque formule de base relative à la transmission de la chaleur. Nous rappellerons brièvement ici les modes de transferts et les résultats les plus significatifs que nous aurons utilisés.

Les propriétés thermiques de fluide caloporteur

Le fluide caloporteur utilisé est caractérisé par les propriétés thermiques qui sont évalués par les relations suivantes [26]:

➤ La densité volumique (kg/m³)

$$\rho = -0.90797 T + 0.00078116 T^2 - 0.000002367 T^3 + 1083.25$$

➤ La capacité de transfert de chaleur (kJ/kg.K)

$$C_p = 0.002414 T + 0.0000059591 T^2 - 0.000000029879 T^3 + 0.00000000044172 T^4 + 1.498$$

➤ La conductivité thermique (W/m.K)

$$K = 0.0000819477 T + 0.000000192257 T^2 - 0.000000000025034 T^3 + 0.0000000000000072974 T^4 + 0.137743$$

➤ La viscosité cinématique (mm²/s)

$$\nu = e^{((544.149/(T+114.43))-2.59578)}$$

➤ Les pertes de charge en énergie

Les pertes de charge en énergie s'expriment avec la formule suivante :

$$h_\lambda = \lambda \frac{m L V^2}{2 D A T_{fm}}$$

λ : Le coefficient de perte de charge en énergie de la rugosité, et de nombre de Reynolds.

L : La longueur du conduit, (m).

V : La vitesse de fluide, (m²/s).

T_{fm} : La température moyenne de fluide, (K).

✚ Le coefficient de perte de charge en fonction de Reynolds et la rugosité

➤ Les nombres adimensionnels

• Nombre de Nusselt

La combinaison du coefficient d'échange de chaleur par convection, de la longueur caractéristique et de la conductivité thermique du fluide est appelée module ou nombre de Nusselt.

C'est le rapport du gradient de température dans le fluide en contact immédiat avec la surface au gradient de température de référence. Il caractérise l'intensité de l'échange de chaleur sur la limite fluide-surface.

$$Nu = \frac{h_{cv,f} D_1}{k_f}$$

$h_{cv,f}$: Coefficient de convection pariétale du fluide caloporteur à T_f (W/m²K).

k_f : conductivité de fluide caloporteur.

D_1 : Diamètre, (m).

• Nombre de Prandtl

Ce nombre représente le rapport de la viscosité cinématique à la diffusivité thermique, il caractérise les propriétés physiques du fluide.

$$Pr = \frac{c_{pf} \mu}{k}$$

c_{pf} : Chaleur spécifique à pression constante.

k : Conductivité thermique du fluide.

μ : la viscosité dynamique de fluide caloporteur.

Plus la viscosité est grande plus l'énergie dépensée nécessaire pour véhiculer le fluide est élevée et plus la diffusivité est grande plus le fluide extrait facilement la chaleur de la paroi.

• Nombre de Reynolds

Ce nombre est une mesure de la grandeur relative des forces d'inertie par rapport aux forces de viscosité dans l'écoulement.

$$Re = \frac{4 \dot{m}_f}{\pi \rho v D_1}$$

ρ : la masse volumique de fluide caloporteur.

v : la viscosité cinématique de fluide caloporteur.

D_1 : Diamètre, (m).

\dot{m}_f : Débit massique du fluide, (kg/s)

- **Nombre de Rayleigh**

Il exprime la relation entre les nombres de Grashoff et de Prandlt. Ce nombre peut fournir un critère de passage de la convection naturelle laminaire à la convection naturelle turbulente.

$$R_a = G_r \cdot P_r$$

Références

Références

[1] www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/energie-renouvelable-sont-cinq-types-energies-renouvelables-4134

[2] www.climamaison.com/lexique/energie-eolienne.

[3] www.algerie360.com/developpement-de-lenergie-eolienne-identification-de-21-zones-en-algerie.

[4] www.encyclopedie-energie.org/stockage-hydraulique-et-production-delectricite.

[5] www.encyclopedie-energie.org/biomasse-et-energie-des-ressources-primaires-aux-produits-energetiques-finaux.

[6] www.futura-sciences.com/planete/definitions/energie-renouvelable-energie-solaire-6679.

[7] cdn.unitycms.io/image/ocroped/800,800,1000,1000,0,0/XAQzSZf8TPw/6LK9fcHiK1m8B_WDUgdQDe.jpg

[8] upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/db/Solar_land_area.png

[9] www.econologie.com/energie-solaire-thermique/

[10] www.le-guide-de-la-maison.com/energie-solaire.html

[11] www.solairethermique.guidenr.fr/l_capteur-solaire-thermique-sous-vide.php

[12] commons.wikimedia.org/wiki/File:PS20andPS10.jpg

[13] fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Solaire_thermique_à_concentration#Histoire

[14] fr.solarpedia.net/wiki/images/0/00/Systemes_concentration.png

[15] Kechidi Mehdi Sayeh Abdelkader, Lazali Adel Abbas, Projet de Fin d'études Pour l'obtention du Diplôme de Master en Installations énergétiques et turbomachines , étude expérimentale d'un concentrateur cylindro-parabolique, universite saad dahlab –blida1-2018-2019.

Références

- [16] Quoilin Sylvain, Mémoire fin d'étude , Les centrales solaires à concentration, Université de Liège Faculté des sciences appliquées, Mai 2007.
- [17]houari mohamed redha, Mémoire fin d'étude, modélisation et simulation numérique d'un collecteur cylindro-parabolique, universite saad dahlebe de blida, 2014/2015 .
- [18]BOUSSOUFA Hadj Ahmed, BOURBAA Mokhtar, Mémoire fin d'étude, Étude thermo-économique du cycle combiné avec intégration de l'énergie solaire, Université M'hamed BOUGARA- Boumerdes, 2017.
- [19]www.futura-sciences.com/maison/dossiers/maison-electricite-solaire-energie-rayonnante-1225/page/5/.
- [20]www.ecosources.info/images/energie_industrie/schema_miroir_fresnel-2.jpg
- [21]system.solaire.free.fr/soleil.htm
- [22] fr.calameo.com/read/004226489b32849fdb77
- [23]acces.enslyon.fr/acces/thematiques/paleo/systemclim/effet-de-serre/puissance-solaire
- [24] IFFOUZAR Koussaila, HANIFI Idir , memoire fin d'étude, Étude et réalisation d'un mécanisme de poursuiveur solaire pour un concentrateur cylindro-parabolique avec carte de commande, Université Abderrahmane Mira-Bejaia, 2013.
- [25] www.google.com/url?q=http://dSPACE.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/6837/1/Analyse-des-pertes-thermiques.pdf
- [26] Chabane Tassaidit, Sefah Assia, Mémoire fin d'étude , étude des capteur solaire à concentration : Application aux centrales cylindro parabolique, université Akli Mohand Oulhadj-BOUIRA-2015.
- [27] www.club-des-voyages.com/fuseaux-horaires.html
- [28] Ministère de l'énergie et des mines. www.mem.algeria.org
- [29] Trabelsi.A, Masmoudi.M, 2011.An investigation of atmospheric turbidity over Kerkennah Island in Tunisia. Atmospheric Research 101, 22–30.

Références

- [30] soteris kalogirou . solar anergy engineering : processes and systems, 1ed. elsvier(USA),2009.
- [31] Egbo G, sintali I.S. and dandakouta H., « Analysis of Rim angle Effect on the Geometric Dimensions of solar Parabolic-Trough collector », Int. Jor. P .App.Scs., 2(2008) No.3, 11-202009.
- [32] Mazouz Mawloud. ETUDE ET SIMULATION DES TRANSFERTS DE CHALEUR DANS UN RECEPTEUR D'UN CONCENTRATEUR SOLAIRE CYLINDRO-PARABOLIQUE. UNIVERSITÉ M'HAMED BOUGARA DE BOUMERDÈS. 2016/2017
- [33] MEDJAOUI Fatima-Zohra. BELABBACI Sarra, Etude expérimentale et conception d'un concentrateur cylindro-parabolique, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –2018
- [34] MARIF Yacine, BENMOUSSA Hocine, BOUGUTTAIA Hamza, ZERROUKI Moussa, BELHADJ Mohamed Mustapha, 2014. Etude comparative entre les modes de poursuite solaire d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique. Université Kasdi Merbah Ouargla, Annales des Sciences Technologies (AST) 6(2), 94-102
- [35] Mr Mihoub Sofiane. Contribution à la modélisation et à l'optimisation des concentrateurs solaires motorisés appliqués aux systèmes thermosolaires. UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID – TLEMEN.19/08/2017.
- [36] Kadraoui Hicham, ETUDE COMPARATIVE ET RENDEMENT ENERGETIQUE DES DIFFERENTS DEGRES DE CONCENTRATION DESCONVERTISSEURS THERMODYNAMIQUE DE L'ENERGIE SOLAIRE , UNIVERSITE ABOU-BAKR BELKAID –TLEMEN,2010-2011
- [37]www.memoireonline.com/12/13/8187/m_Simulation-d-une-centrale-solaire-concentrateur-cylindro-parabolique-sous-TRNSYS2.html
- [38] Seyed Ebrahim Ghasemi et al." Numerical Study on Thermal Performance of Solar Parabolic Trough Collector". Journal of mathematics and computer Science 7 (2013)
- [39]J .Bernard. "énergie solaire calculs et optimisations", édition : ellipses, 2004.
- [40] M. Iqbal,"an introduction to solar energy", edition: academic press .toronto, 1983.
- [41] Donald R, Pitts, heat transfer, edition: shaums series, 1977

Références

[42] A. Gama, M. Haddadi et A. Malek, « Étude et réalisation d'un concentrateur cylindro Parabolique avec poursuite solaire aveugle » Revue des Énergies Renouvelables, Vol. 11, N°3 (2008) 437 – 451.

[43] fr.wikipedia.org/wiki/Méthode_de_Newton

[44] A.GOURDIN, M.BOUMAH RAT; thèse : méthode numérique applique, université de Ouargla.