

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



*Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées*

*Département de Génie Mécanique*

**Projet de Fin d'Etude Master**

*Présenté pour obtenir le diplôme de Master*

*Filière : Génie mécanique*

*OPTION : Energétique*

**Thème**

***Etude et dimensionnement d'une centrale solaire  
cylindro-parabolique de 100 MW<sup>elec</sup>***

**Réalisé par :**

Belkacemi Boumediene El Amine

Dehimi Samir

Soutenu le ../10/2023

**Président : Mr.**

**Encadreur**

Mr. Lekhal.Rachid

**Examineur : Mr.**

*Année Universitaire : 2022/2023*



## نموذج التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث.

انا الممضي اسفله،

السيد(ة) دهيمي السميع .....الصفة: طالب، استاذ، باحث ..... طالبي

الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية: 121483944 .....والصادرة بتاريخ 2021/10/07

المسجل(ة) بكلية / معهد العلوم والتكنولوجيا قسم هندسة كيميائية

والمكلف(ة) بإنجاز اعمال بحث(مذكرة، التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، اطروحة دكتوراه).

عنوانها: Etude et dimensionnement d'une central solaire

cylindro-parabolique de 100 MW<sub>th</sub>

تحت إشراف الأستاذ(ة): كحل رشيد

أصرح بشرفي اني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 2023/11/19

توقيع المعني(ة)

### رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:

النسبة:  %

Turnitin

الامضاء:





## نموذج التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث.

انا الممضي اسفله،

السيد(ة) بلقاسم بومدين الصفة: طالب، استاذ، باحث للمجالس

الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية: 1099990337011210009 والصادرة بتاريخ 23/09/22

المسجل(ة) بكلية / معهد علوم وتكنولوجيا قسم هندسة ميكانيكية

والمكلف(ة) بإنجاز اعمال بحث(مذكرة، التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، اطروحة دكتوراه).

عنوانها: Etude et dimensionnement d'un Centrale selon le

Cylindre Parabolique de 100 MW

تحت إشراف الأستاذ(ة): رئيس

أصرح بشرفي اني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 2023/11/19

توقيع المعني(ة)

رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:

النسبة:  %

الامضاء:



# *REMERCIEMENTS*

*Avant tout, nous remercions Allah tout-puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience afin de mener à terme ce travail.*

*Nous remercions sincèrement nos parents et tous nos proches pour leurs sacrifices, leur aide, leur soutien et leurs encouragements.*

*Nous remercions sincèrement notre encadreur Mr. LEKHAL RACHID pour ses orientations, disponibilité et ses précieux conseils tout au long de ce parcours.*

*Nous remercions aussi tous les membres de jury pour avoir accepté d'examiner ce travail.*

*Nous remercions également tous nos enseignants du département de génie mécanique.*

*Enfin, Nous remercions vivement tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à réaliser ce travail.*



# *DÉDICACES*

*Je dédie ce travail:*

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

*A mon cher binôme,*

*Dehimi Samir,*

*Pour son entente et sa sympathie.,*

*A mes chers amis,*

*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.*

*Belkacemi Boumediene El Amine*

# *DÉDICACES*

*Je dédie ce travail:*

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

*A mon cher binôme,*

*Belkacemi Boumediene El Amine,*

*Pour son entente et sa sympathie.,*

*A mes chers amis,*

*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.*

*Dehimi Samir*

## **Résumé:**

L'objectif fondamental de ce travail est l'étude et dimensionnement d'une centrale solaire cylindro-parabolique. Pour différentes valeurs d'éclairement solaire, des capteurs cylindro-paraboliques convertissent l'énergie solaire concentrée en énergie thermique. Pour analyser ce phénomène de chauffage, un programme de simulation écrit sous MATLAB issu de différents bilans énergétiques sur le CCP nous a permis d'évaluer les températures de sortie du fluide, de l'absorbeur et de la vitre en fonction de la longueur et du nombre de boucles. L'influence de quelques paramètres sur la puissance thermique collectée du champ solaire, tels que le débit massique du fluide caloporteur, la température d'entrée de la boucle et l'éclairement solaire ont été étudiées.

**Mots clés :** Collecteur cylindro-parabolique, concentration solaire, champ solaire, puissance thermique.

## **Abstract:**

The fundamental objective of this work is the study and sizing of a parabolic through solar power plant. For different solar luminance values, parabolic through collectors convert concentrated solar energy into thermal energy. To analyze this heating phenomenon, a simulation program written in MATLAB from different energy balances on the CCP allowed us to evaluate the outlet temperatures of the fluid, the absorber and the window as a function of the length and the number of loops. The influence of some parameters on the thermal power collected from the solar field, such as the mass flow rate of the fluid, the loop inlet temperature, and, the solar irradiance were studied.

**Key words:** Parabolic cylindrical collector, solar concentration, solar field, thermal power.

## **ملخص**

الهدف الأساسي من هذا العمل هو دراسة وتحديد حجم محطة الطاقة الشمسية الأسطوانية المكافئة. بالنسبة لقيم الإضاءة الشمسية المختلفة، تقوم المجمعات الأسطوانية المكافئة بتحويل الطاقة الشمسية المركزة إلى طاقة حرارية. لتحليل ظاهرة التسخين هذه، سمح لنا برنامج محاكاة مكتوب في ماطلاب من موازين الطاقة المختلفة في محطة الطاقة الشمسية بتقييم درجات حرارة مخرج السائل، وجهاز الامتصاص والنافذة كدالة للطول وعدد الحلقات. تمت دراسة تأثير بعض العوامل على الطاقة الحرارية المجمعة من المجال الشمسي مثل التدفق الكتلي لمائع نقل الحرارة ودرجة حرارة مدخل الحلقة والإشعاع الشمسي. الكلمات المفتاحية: المجمع الأسطوانية القطع المكافئ، التركيز الشمسي، المجال الشمسي، الطاقة الحرارية.

## *Nomenclature*

<b>Symbole</b>	<b>Désignation</b>	<b>Unité</b>
$\delta$ :	Déclinaison solaire	[degré]
$\omega$	Angle horaire	[degré]
a	L'azimut	[degré]
h	l'angle de la hauteur solaire	[degré]
$\phi$	Latitude	[degré]
L	Longitude	[degré]
$\theta$	L'angle d'incidence	[degré]
TU	Le temps universel	[heure]
TSM	Le temps solaire moyen	[heure]
TSV	Le temps solaire vrai	[heure]
ET	Equation de temps	[heure]
Dj	Durée de jour	[heure]
SS	Durée d'ensoleillement	[heure]
$I_d$	Rayonnement solaire direct	[W/m <sup>2</sup> ]
$I_D$	Le rayonnement solaire diffus	[w /m <sup>2</sup> ]
$I_G$	Le rayonnement solaire global	[w /m <sup>2</sup> ]
$I_0$	Rayonnement extraterrestre	[w /m <sup>2</sup> ]
$\epsilon_0$	Correction de la distance solaire-terre	[-]
C	Constante solaire	[w /m <sup>2</sup> ]
$m_A$	La masse d'air atmosphérique	[-]
P	Pression local	[Pa]
$\bar{I}$	Rayonnement solaire moyen, mensuel hors l'atmosphère	[w /m <sup>2</sup> ]
$\bar{H}$	Flux direct sur une surface inclinée	[w /m <sup>2</sup> ]
$R_b$	Rapport de rayonnement solaire journalier	[-]
$\theta_Z$	Angle de zénith	[degré]



$H_{di}$	Flux diffus sur une surface inclinée	[w /m <sup>2</sup> ]
$F_p$	Facteur d'angle plan incliné-ciel	[-]
$H_r$	Rayonnement provenant de la réflexion	[w /m <sup>2</sup> ]
$H_t$	Rayonnement global sur surface inclinée	[w /m <sup>2</sup> ]
$D_{abs(min)}$	Le diamètre extérieur minimum d'un tube absorbeur	[m]
$C_0$	Facteur de concentration optique	[-]
$D_1$	Diamètre intérieur de tube absorbeur	[m]
$D_2$	Diamètre extérieur de tube absorbeur	[m]
$D_3$	Diamètre intérieur de l'enveloppe en verre	[m]
$D_4$	Diamètre extérieur de l'enveloppe en verre	[m]
$nb$	Nombre de boucle	[-]
$L$	Longueur de la boucle	[m]
$T_a$	Température de l'environnement extérieur	[K]
$T_{hs}$	Température d'huile sortie	[K]
$T_{he}$	Température d'huile entrée	[K]
$T_{abs}$	Température de l'absorbeur	[K]
$\dot{m}_h$	Débit de l'huile	[Kg/s]
$c_{ph}$	La chaleur spécifique du huile	[J/kg.K]
$T_{he}$	Température d'huile entrée	[K]
$T_a$	Température ambiante	[K]
$R_{abs.v}$	Résistance absorbeur vitre	[K/W]
$H_{abs.v}$	Coefficient de convection entre l'absorbeur vitre	[W/m.K]
$D$	Diamètre	[m]
$L$	Longueur	[m]
$R_{va}$	Résistance vitre ambiance	[K/W]
$h_{abs.v}$	Coefficient de convection entre vitre ambiance	[W/m.K]
$Q$	La chaleur échange avec le milieu extérieur.	[J]

$W_t$	Le travail technique (machine).	[J]
$\emptyset_P$	Le flux perdu	[W]

## Liste des figures

<b>Figure I.1:</b> Un champ d'éolien .....	3
<b>Figure I.2:</b> Schéma de production d'électricité par l'hydraulique .....	4
<b>Figure I.3:</b> Un schéma illustrant la biomasse .....	5
<b>Figure I.4:</b> La répartition de la température dans le globe terrestre.....	5
<b>Figure I.5:</b> Les panneaux solaire.....	6
<b>Figure I.6:</b> Utilisation directe de l'énergie solaire .....	7
<b>Figure I.7 :</b> Principe de la conversion photovoltaïque .....	8
<b>Figure I.8 :</b> Schéma global de fonctionnement d'énergie solaire thermique .....	9
<b>Figure II.1:</b> Structure du soleil .....	12
<b>Figure II.2 :</b> Le spectre solaire .....	13
<b>Figure II.3:</b> Type de rayonnement solaire .....	15
<b>Figure II.4:</b> Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil.....	16
<b>Figure II.5:</b> Variation annuelle de la déclinaison Solaire .....	17
<b>Figure II.6:</b> Définition des coordonnées terrestres d'un lieu donné .....	18
<b>Figure II.7:</b> Les coordonnées horizontales.....	19
<b>Figure II.8:</b> Angle horaire.....	20
<b>Figure II.9:</b> Angle d'incidence.....	20
<b>Figure II.10 :</b> Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich.....	22
<b>Figure III.1:</b> Différents types des concentrateurs solaires .....	25
<b>Figure III.2 :</b> Schéma d'une centrale à tour.....	26
<b>Figure III.3:</b> Tour solaire .....	26

<b>Figure III.4:</b> Centrales à capteurs paraboliques .....	27
<b>Figure III.5:</b> Fonctionnement du concentrateur parabolique .....	27
<b>Figure III.6:</b> Centrale solaire à miroirs de Fresnel.....	28
<b>Figure III.7 :</b> Schéma d'une centrale solaire à miroir de Fresnel.....	28
<b>Figure III.8:</b> Ensemble d'une centrale à capteurs cylindro-paraboliques .....	30
<b>Figure III.9: :</b> Principe de fonctionnement d'une centrale cylindro-paraboliques .....	30
<b>Figure III.10:</b> Champ solaire .....	31
<b>Figure III.11:</b> Installation à retour direct. ....	31
<b>Figure III.12:</b> Installation à retour indirect .....	32
<b>Figure III.13:</b> Installation à alimentation centralisée .....	32
<b>Figure III.14:</b> Chaleur sensible et chaleur latente.....	33
<b>Figure III.15 :</b> Principe de fonctionnement du circuit de stockage /déstockage .....	34
<b>Figure III.16:</b> Le stockage indirect par deux réservoirs .....	35
<b>Figure III.17:</b> Le stockage direct par deux réservoirs .....	36
<b>Figure III.18:</b> Un seul réservoir avec la stratification induite par un isolant .....	37
<b>Figure III.19:</b> Un seul réservoir avec la stratification induite par le sel fondu .....	37
<b>Figure III.20 :</b> Echangeur double tube .....	38
<b>Figure III.21:</b> Échangeurs à faisceau et calandre .....	39
<b>Figure III.22 :</b> Echangeur a plaques.....	40
<b>Figure III.23:</b> Schéma représentatif de la turbine à gaz .....	40
<b>Figure III.24:</b> Principe de fonctionnement d'une turbine à gaz.....	41
<b>Figure III.25:</b> Représentation schématique d'une turbine à gaz.....	42

<b>Figure III.26:</b> Schéma d'une centrale à vapeur.....	43
<b>Figure IV.1 :</b> Schéma d'une installation de centrale solaire cylindro-parabolique .....	44
<b>Figure IV.2:</b> Schéma du bilan énergétique d'un élément x du collecteur CP.....	45
<b>Figure V.1: :</b> Interprétation graphique da la méthode.....	53
<b>Figure V.2:</b> Organigramme de simulation .....	56
<b>Figure V.3 :</b> L'effet de l'éclairement solaire reçu (DNI) sur les températures de sortie du fluide, du récepteur et de la vitre .....	57
<b>Figure V.4: :</b> L'effet du débit massiqu sur les températures de sortie du fluide, du récepteur et de la vitre.....	58
<b>Figure V.5: :</b> L'effet de la température d'entrée du fluide sur les températures de sortie du fluide, du récepteur et de la vitre .....	59
<b>Figure V.6:</b> Variation des coefficients d'échange .....	60
<b>Figure V.7 :</b> variation de la puissance reçue, gagnée et perdue en fonction de l'éclairement solaire reçu (DNI) .....	61
<b>Figure V.8:</b> La variation de nombre de boucle en fonction DNI.....	62

### *Liste des Tableaux*

<b>Tableau II.1 :</b> Albédo solaire de différentes surfaces.....	14
<b>Tableau IV.2:</b> Paramètres d'un collecteur cylindro-parabolique.....	43

# *Sommaire*

# Sommaire

Résumé

Nomenclature

Introduction Générale ..... 1

## Chapitre I : Généralité sur les énergies renouvelables

I.1. Introduction.....	2
I.2.Énergie renouvelable.....	2
I.2.1.Type des énergies renouvelables.....	2
I.2.1.1.Énergie éolienne.....	2
I.2.1.2.Énergie hydraulique.....	3
I.2.1.3.Énergie de biomasses.....	4
I.2.1.4.Énergie géothermique.....	5
I.2.1.5.Énergie solaire.....	5
I.3. Les types d'énergies solaires.....	6
I.3.1. Energie solaire photovoltaïque.....	7
I.3.1.1Définition.....	7
I.3.1.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	8
I.3.1.3. Avantages et inconvénients.....	8
I.3.2. Energie solaire thermique.....	8
I.3.2.1. Définition.....	8
I.3.2.2. Principe de fonctionnement.....	9
I.3.2.3. Avantages et inconvénients.....	9
I.4. Comparaison entre le solaire thermique et le photovoltaïque.....	9
I.5. Conclusion.....	10

## Chapitre II : Gisement solaire

II.1. Introduction.....	11
II.2. Aspects énergétique solaire.....	11
II.2.1. Le soleil .....	11
II.2.2. Constante Solaire.....	12
II.2.3. Nature du rayonnement solaire .....	12
II.2.3.1. Spectre solaire .....	13
II.2.3.2. Rayonnement solaire .....	13

II.2.3.3. Les types de Rayonnement solaire.....	13
a. Le rayonnement direct.....	13
b. Le rayonnement diffus.....	13
c. Le rayonnement réfléchi (albédo) .....	14
d. Le rayonnement global.....	14
II.3. Aspects géométriques.....	15
II.3.1. Mouvement de la Terre.....	15
II.3.1.1. La Terre tourne autour du soleil .....	15
II.3.1.2. La terre tourne sur elle-même .....	15
II.3.2. La déclinaison solaire ( $\delta$ ).....	16
II.3.3. Latitude.....	17
II.3.4. Longitude.....	17
II.3.5. Méridien.....	18
II.3.6. Mouvement apparent du Soleil.....	18
II.3.6.1. L'azimut ( $a$ ).....	18
II.3.6.2. La hauteur angulaire ( $h$ ).....	19
II.3.6.3. Angle Horaire ( $\omega$ ).....	19
II.3.6.4. Angle d'incidence sur un plan.....	19
II.3.6.5. Les Temps Solaire.....	20
II.3.6.5.1. Le temps solaire vrai (TSV).....	20
II.3.6.5.2. Le temps solaire moyen.....	21
II.3.6.5.3. Le temps universel (TU).....	21
II.3.7. Heures et temps.....	22
II.3.7.1. Durée du jour "DJ" .....	22
II.3.7.2. Equation de temps (ET).....	22
II.3.8. taux d'ensoleillement.....	22
II.3.8.1. Durée d'ensoleillement.....	22
II.3.8.2. Taux d'ensoleillement.....	23
II.4. conclusion.....	23

## Chapitre III : Les centrales solaires à concentration

III.1. Introduction.....	24
III.2. Les types des centrales solaires thermiques.....	24
III.2.1. Centrales à tour.....	25



A/ Les avantages.....	26
B/ Les inconvénients.....	26
III.2.2. Centrales à capteurs paraboliques.....	26
A/ Les avantages.....	27
B/ Inconvénients .....	27
III.2.3. Centrales solaires à miroirs de Fresnel.....	27
A/ Les avantages.....	28
B/ Les inconvénients.....	28
III.2.4. Centrales à capteurs cylindro-paraboliques.....	28
III.2.4.1. Le champ solaire .....	30
III.2.4.1.1. Les configurations du champ solaire.....	31
III.2.4.1.1.a. Installation à retour direct .....	31
III.2.4.1.1.b. Installation à retour indirect.....	31
III.2.4.1.1.c. Installation à alimentation centralisée.....	31
III.2.4.2. Le stockage d'énergie thermique .....	32
III.2.4.2. 1. Le circuit de stockage/ déstockage.....	33.
III.2.4.2.2. Les composants d'un circuit de stockage.....	34
III.2.4.2.2.1. Les réservoirs .....	34
III.2.4.2.2.1.a. Stockage à Deux réservoirs .....	34
III.2.4.2.2.1.b. Réservoir unique.....	35
III.2.4.2.2.2. Pompes de circulation.....	37
III.2.4.2.2.3 .Les échangeurs de chaleur .....	37
III.2.4.2.2.3.a. Échangeurs double tube.....	37
III.2.4.2.2.3.b. Échangeurs à faisceau et calandre.....	38
III.2.4.2.2.3.c. Échangeurs à plaques.....	38
III.2.4.3 .Bloc de puissance.....	39
III.2.4.3 .1 .Définition la turbine à gaz.....	39
III.2.4.3 .2. Composition d'une turbine à gaz .....	39
III.2.4.3 .2 .a. Compresseur axial .....	39
III.4.3 .2. b. Chambres de combustion .....	39
III.2.4.3 .2. c. Section turbine .....	39
III.2.4.3 .3 .Principe de fonctionnement.....	40
III.2.4.3.4. Les cycles thermodynamiques.....	40
III.2.4.3.4. 1. Cycle de Brayton.....	40
III.2.4.3.4. 2. Cycle de Rankine.....	41
A/Les avantages.....	42

B/les inconvénients.....	42
3. Conclusion.....	42

**Chapitre IV : Présentation du model et Bilans thermiques**

IV.1.Introduction.....	43
IV.2. Présentation Générale de la centrale étude.....	43
IV.3. Les caractéristiques du prototype proposé.....	43
IV.4. Présentation du modèle.....	44.
IV.5.1. Le Bilan thermique du tube.....	44
IV.5.2. Le bilan thermique de tube absorbeur.....	44
IV.5.3. Le bilan thermique de l'enveloppe en verre.....	46
IV.5.4. Pertes thermiques.....	48
IV.5.4.1. Perte par conduction.....	48
IV.5.4.2. Perte par convection.....	48
IV.5.4.3. Perte par Rayonnement.....	49
IV.5.5. Puissance utile <i>q<sub>util</sub></i> .....	49
IV.5.6. Rendement instantané du concentrateur solaire $\eta$ .....	50
IV.6. Présentation du modèle mathématique issu des bilans thermiques.....	50
IV.6.1. Pour l'absorbeur.....	50
IV.6.2. Pour la vitre.....	51
IV.6.3. Fluide caloporteur HTF.....	51
IV.7. Conclusion.....	52

**Chapitre V : Méthode de calcul et interprétation des résultats**

V.1.INTRODUCTION.....	53
V.2. Résolution mathématique du système d'équations.....	53
V.2.1. Méthode de Newton-Raphson.....	53
V.2.2 Application au modèle.....	55
V.2.2.1. Pour l'absorbeur.....	55
V.2.2.2. Pour la vitre.....	55
V.2.2.3. Pour le fluide HTF.....	55
V.3. Organigramme de la simulation.....	56

V.4. Présentation des résultats de simulation du champ solaire.....	57
V.4.1. L'effet de l'éclairement solaire reçu (DNI) sur les températures de sortie du fluide caloporteur, du récepteur et de la vitre .....	57
V.4.2. L'effet du débit massique sur les températures de sortie du fluide, du récepteur et de la vitre .....	58
V.4.3. L'effet de la température d'entrée du fluide sur les températures de sortie du fluide, récepteur et de la vitre.....	59
V.4.4. Variation des coefficients d'échange.....	60
V.4.5. La variation de la puissance reçue, gagnée et perdue en fonction de l'éclairement solaire reçu (DNI).....	61
V.4.6. Variation du nombre de boucle en fonction de l'éclairement solaire reçu (DNI).....	61
V.5. Conclusion.....	62
<b>Conclusion Générale .....</b>	<b>63</b>
<b>Annexe</b>	
<b>Références</b>	

*Introduction*  
*Générale*

## *Introduction générale*

La consommation d'énergie a connu une croissance soutenue au cours des dernières années, en grande partie due à l'expansion rapide des secteurs résidentiel, commercial et industriel. Cette augmentation a engendré plusieurs problèmes majeurs, notamment l'épuisement des ressources fossiles et l'impact environnemental néfaste de la production d'énergie. Face à cette situation, la nécessité de se tourner vers des sources d'énergie alternatives et renouvelables est devenue impérative. Celles-ci sont à la fois plus abordables et respectueuses de l'environnement.

Parmi les différentes sources d'énergie renouvelable, l'énergie solaire se démarque comme l'une des plus largement utilisées et accessibles. Elle a joué un rôle crucial dans le maintien de la vie sur notre planète et a été exploitée par l'homme depuis des millénaires, sous diverses formes. L'énergie solaire provient du rayonnement solaire, qui se propage dans toutes les directions à partir du soleil. Grâce à des capteurs spécifiques, cette énergie solaire peut être captée et convertie en chaleur ou en électricité,

Il existe différents types de concentrateurs solaires qui sont utilisés pour maximiser la capture de l'énergie solaire. Parmi eux, les concentrateurs solaires cylindro-paraboliques sont largement reconnus pour leurs performances élevées. Ces dispositifs se composent généralement d'un réflecteur de forme cylindro-parabolique qui permet de focaliser l'énergie solaire incidente sur une ligne focale réfléchissante, où se trouve un tube absorbeur. Ils présentent un excellent rendement thermique, capable de générer des températures jusqu'à 400°C.

Dans le cadre de cette étude, nous nous concentrons spécifiquement sur les centrales solaires à cylindres paraboliques. Notre travail est divisé en cinq chapitres distincts. Le premier chapitre aborde les concepts généraux des énergies renouvelables, tandis que le deuxième se penche sur les définitions des coordonnées solaires et les estimations du rayonnement solaire. Le troisième chapitre explore en détail les différents types de centrales solaires thermiques, ainsi que les méthodes de stockage thermodynamique et les cycles de puissance associés. Le quatrième chapitre présente le modèle de notre centrale solaire cylindro-parabolique, ainsi que les bilans énergétiques associés. Enfin, dans le cinquième chapitre, nous décrivons la méthodologie de calcul que nous avons employée, ainsi que l'interprétation des résultats obtenus grâce à un programme de simulation que nous avons développé en MATLAB.

*Chapitre I :*

*Généralités sur les*

*énergies renouvelables*

## **I.1. Introduction**

Dans ce chapitre, nous parlons en général des types d'énergies renouvelables et de la manière dont elles peuvent être utilisées pour répondre aux besoins énergétiques du monde. En particulier, nous parlons de l'énergie solaire et de son importance en tant que source d'énergie renouvelable largement disponible dans le monde entier.

L'avantage d'utiliser les technologies de production d'électricité par le biais de systèmes de concentration solaire est qu'ils utilisent l'énergie du soleil de manière efficace et à faible coût. Ces technologies reposent sur la concentration des rayons solaires sur un groupe de panneaux solaires pour générer de l'électricité, et sont principalement utilisées dans les zones caractérisées par un fort ensoleillement. Un autre avantage de ces technologies est qu'elles n'émettent aucun polluant nocif et leur fournissent de l'électricité de manière plus au moins stable.

Ces technologies évoluent constamment et sont améliorées pour les rendre plus efficaces et efficaces. En outre, il existe également d'autres technologies pour tirer parti de l'énergie solaire, telles que l'énergie solaire photovoltaïque, qui utilise des cellules solaires pour convertir directement l'énergie solaire en électricité, et l'énergie solaire thermique, qui est utilisée pour chauffer l'eau ou produire de l'électricité en tirant parti de la chaleur du soleil.

## **I.2.Énergie renouvelable**

### **I.2.1Définition**

Les énergies renouvelables : une clé pour un avenir durable.

Dans notre quête pour un avenir énergétique plus propre et durable, les énergies renouvelables jouent un rôle essentiel. Ces sources d'énergie sont inestimables pour notre planète car, à l'échelle humaine, elles sont inépuisables et disponibles en abondance. Elles offrent une solution prometteuse pour répondre à nos besoins énergétiques croissants tout en préservant notre environnement fragile [1].

### **I.2.2.Type des énergies renouvelables**

Les ressources du renouvelable sont diverses, à savoir :

#### **I.2.2.1.Énergie éolienne**

L'énergie éolienne est une ressource naturelle qui a captivé l'humanité depuis des temps immémoriaux. En effet, dès l'Antiquité, nos ancêtres exploitaient le pouvoir des vents pour propulser leurs navires sur les vastes étendues d'eau. Aujourd'hui, cette ancienne pratique s'est modernisée, et l'énergie éolienne est devenue l'une des sources d'énergie renouvelable les plus prometteuses pour répondre à nos besoins énergétiques croissants tout en préservant notre

environnement.

Le principe fondamental de l'énergie éolienne repose sur la conversion de la force des vents en différentes formes d'énergie utile. Lorsque le vent souffle avec puissance, ses forces cinétiques peuvent être utilisées pour produire de l'énergie mécanique. Cette dernière activité peut être utilisée directement pour certaines alimentées, comme la propulsion des bateaux modernes à voile [2].

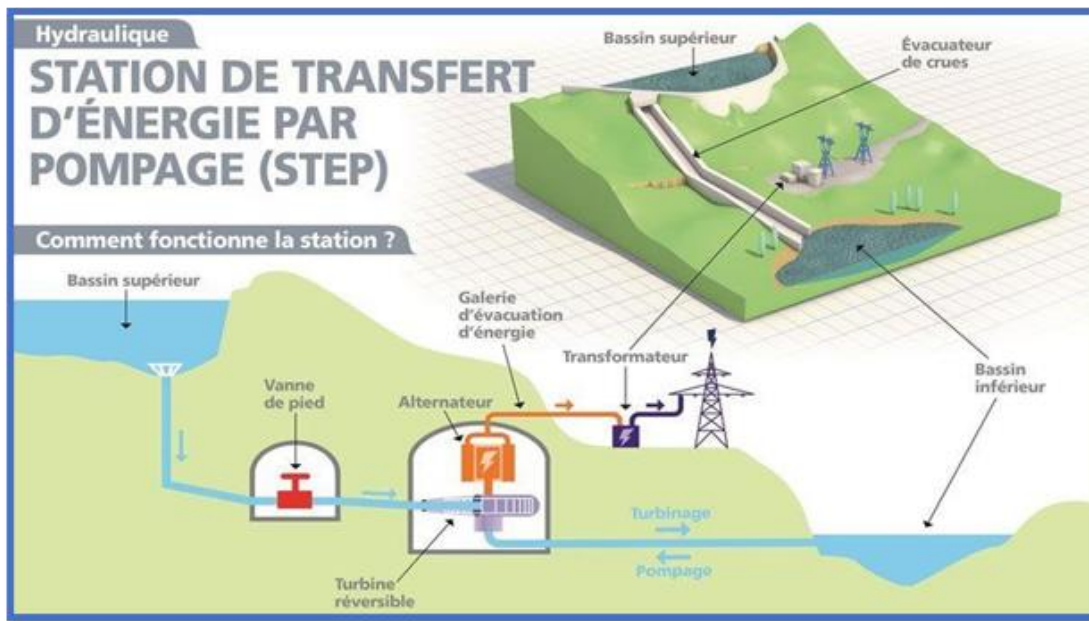


**Figure I.1:**Un champ d'éolien [3]

### **I.2.2.2 Énergie hydraulique**

Le terme énergie hydraulique fait référence à l'énergie qui peut être obtenue en utilisant de l'eau. Une source d'énergie moins affectée par les aléas climatiques, mais toujours réservée à la production à grande échelle [1].





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

### I.2.2.3.Énergie de biomasses

En brûlant la matière organique, nous pouvons produire de la chaleur qui peut être utilisée pour chauffer nos foyers ou alimenter des systèmes de chauffage collectifs. Cette technique est particulièrement intéressante car elle permet de valoriser des déchets organiques tout en générant une énergie renouvelable. En soumettant la biomasse à des températures élevées en l'absence d'oxygène, nous obtenons un gaz synthétique appelé "syngaz". Ce gaz peut être utilisé pour produire de l'électricité ou même servir de matière première pour la fabrication de carburants synthétiques. En chauffant la biomasse à des températures modérées en l'absence d'oxygène, nous obtenons un mélange de bio charbon et de gaz [1].

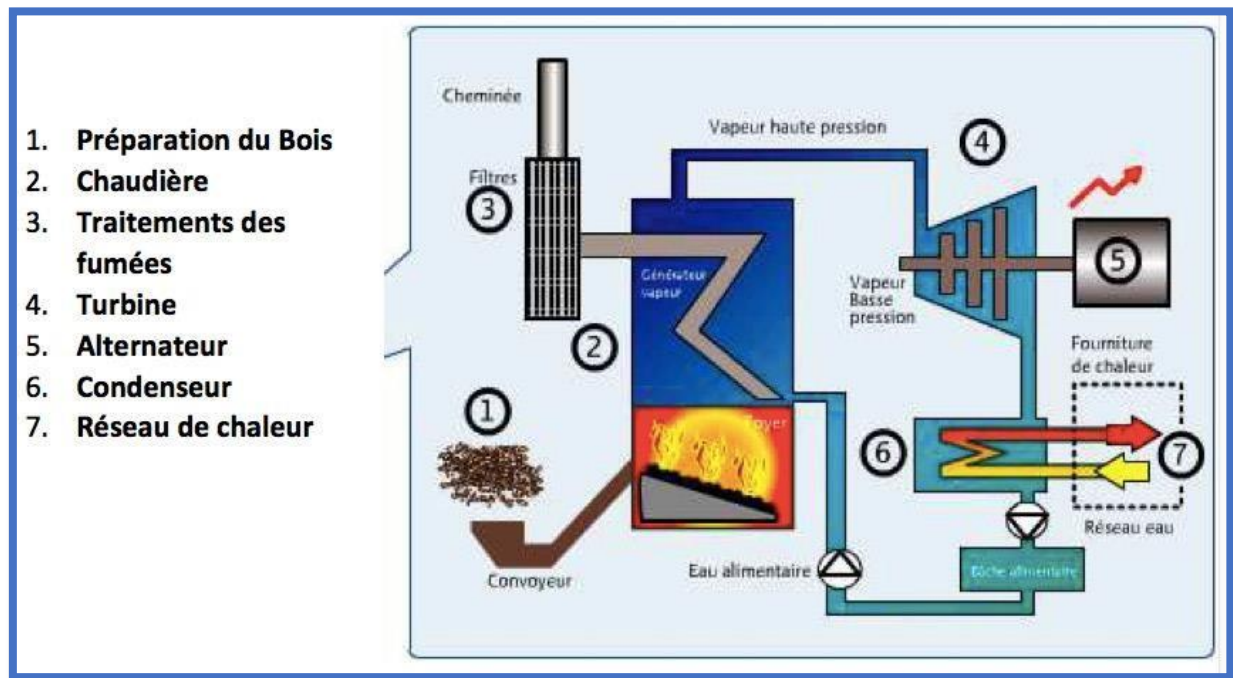


Figure I.3: Un schéma Illustrant la biomasse [5]

#### I.2.2.4.Énergie géothermique

La géothermie, énergie renouvelable en soi, alimente l'énergie enfouie dans la terre, nous fournissant ainsi une source inépuisable de chaleur et d'électricité. Peu importe les fluctuations météorologiques ou climatiques, cette source d'alimentation est toujours disponible et fiable [1].

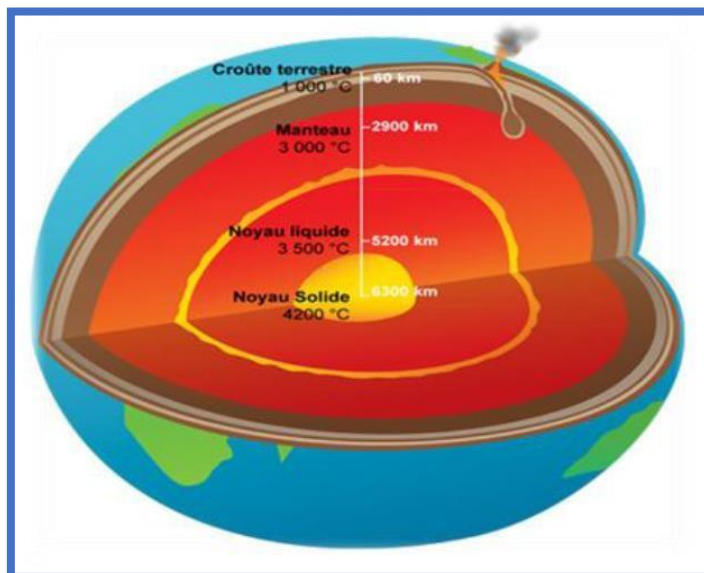


Figure I.4 : La répartition de la température dans le globe terrestre [1]

#### I.2.2.5.Énergie solaire

L'énergie solaire, cette merveilleuse source émanant du soleil, est à la fois lumière et chaleur, nous procurant une richesse inépuisable à l'échelle de notre temps humain. De plus, cette énergie solaire nous fournit une chaleur utile pour le chauffage et la cuisine. Grâce à des systèmes tels que les

chauffe-eau solaires et les fours solaires, l'énergie solaire est un véritable joyau céleste qui a un potentiel infini pour façonner notre avenir énergétique. [6].



Figure I.5 : Les panneaux solaires [7]

### I.3. Les types d'énergie solaire

La première et la plus courante application de l'énergie solaire est sa conversion en énergie thermique. Cette transition se produit naturellement : il suffit de s'exposer aux rayons du soleil pour ressentir une augmentation de chaleur. Notre corps lui-même convertit l'énergie solaire en énergie thermique. Grâce à une conception appropriée, les bâtiments sont également capables de convertir cette énergie en énergie thermique. L'une des applications les plus répandues est le chauffage solaire, où les panneaux solaires sont utilisés pour chauffer l'eau des robinets ou des radiateurs. Une autre application de cette conversion est l'utilisation de fours solaires. Les petits fours solaires domestiques peuvent facilement atteindre des températures jusqu'à 150°C, tandis que les fours industriels ou de recherche peuvent atteindre 3000°C en quelques secondes. [8]

Il existe différents types d'énergie solaire sur Terre, à savoir :

- L'énergie thermique.
- L'énergie photovoltaïque.

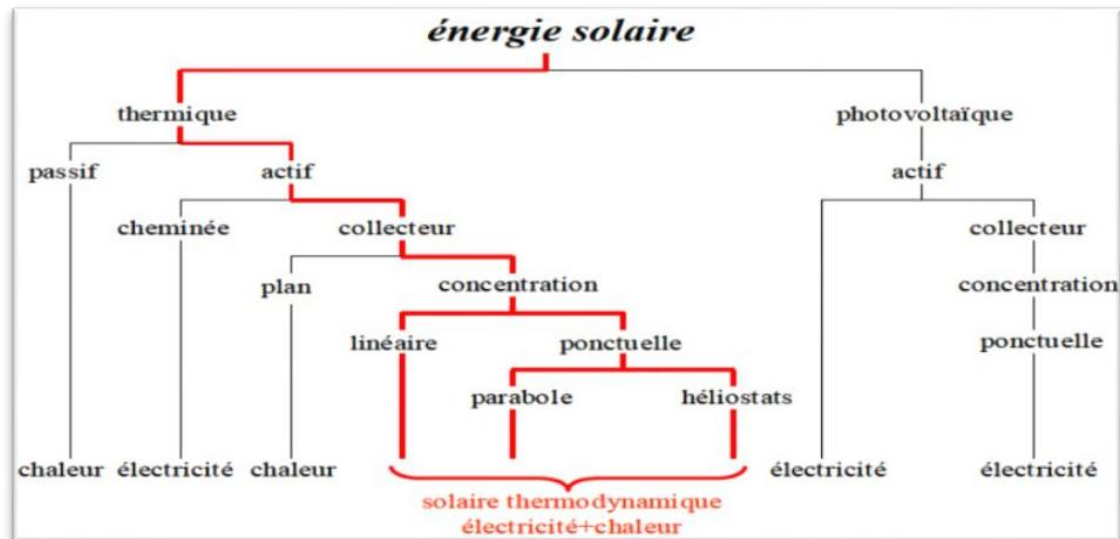


Figure I.6 : Utilisation directe de l'énergie solaire [9]

### I.3.1. Energie solaire photovoltaïque

#### I.3.1.1 Définition

Contrairement à la production d'énergie photo thermique qui utilise le soleil comme source de chaleur, la production d'énergie photovoltaïque exploite le soleil comme source de lumière pour convertir l'énergie photonique atteignant la surface de la Terre en énergie électrique. La lumière du soleil, sous forme de photons, transfère son énergie aux électrons présents dans les semi-conducteurs photovoltaïques. Cette conversion a été découverte par le physicien français A. Becquerel en 1839. Le terme 'photonique' est dérivé de 'photo' (du grec 'phos', signifiant 'lumière') et de 'volt' (en hommage au physicien Alessandro Volta, qui a apporté des contributions majeures à l'étude de l'électricité). [10]

#### I.3.1.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Les cellules solaires permettent la conversion directe de l'énergie lumineuse du soleil en électricité en créant et en déplaçant des charges électriques positives et négatives à l'intérieur du matériau semi-conducteur sous l'influence de la lumière. Ce matériau est composé de deux parties, une avec un excès d'électrons, appelée dopée n, et une avec un déficit d'électrons, appelée dopée p. Lorsque ces deux régions entrent en contact, les électrons en surplus dans la région de type n diffusent vers la région de type p, provoquant une charge négative dans la région initialement de type p.

Cela induit la création d'un champ électrique entre les deux régions, qui exerce une force pour déplacer les électrons hors de la région n et les trous vers la région p. Une jonction, appelée jonction p-n, se forme. Pour obtenir une diode, des contacts métalliques sont ajoutés aux régions n et p. Lorsque le matériau est exposé à la lumière, les photons dont l'énergie est égale ou supérieure à la

bande interdite transfèrent leur énergie aux atomes, ce qui entraîne le déplacement d'un électron de la bande de valence à la bande de conduction. Lorsqu'une tension est appliquée aux bornes de la cellule, les électrons de la région n sont connectés aux trous de la région p par un circuit externe, créant ainsi une différence de potentiel qui permet le passage d'un courant électrique. [11]

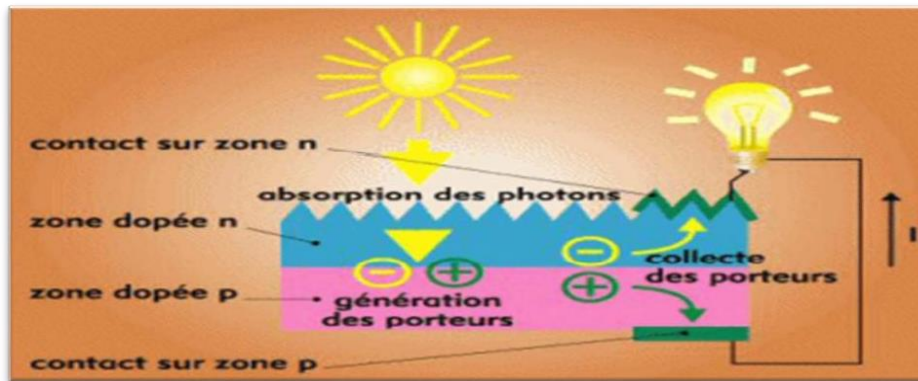


Figure I.7 : Principe de la conversion photovoltaïque [11]

### I.3.1.3. Avantages et inconvénients

#### I.3.1.3.1. Avantages

- L'énergie photovoltaïque présente de nombreux avantages.
- Produit de l'électricité propre et renouvelable. Ce n'est pas toxique.
- Ces systèmes photovoltaïques sont très fiables.
- Cette puissance est intéressante pour les installations urbaines en raison de sa petite taille et de son faible niveau sonore.

#### I.3.1.3.2. Inconvénients

- Production d'énergie dépendante du rayonnement solaire, toujours variable.
- Coût très élevé.
- Mauvaise efficacité de conversion.

### I.3.2. Energie solaire thermique

#### I.3.2.1. Définition

L'énergie solaire est transformée en énergie thermique grâce à l'utilisation de panneaux solaires, composés de cellules solaires qui convertissent le rayonnement solaire en énergie électrique. Cette énergie électrique est ensuite employée pour chauffer de l'eau ou de l'air. La technologie solaire est couramment utilisée pour le chauffage de l'eau domestique. Dans ce scénario, des panneaux solaires sont installés sur le toit de la maison ou dans le jardin et sont connectés à un réservoir d'eau. L'énergie solaire est ensuite utilisée pour chauffer l'eau. De plus, l'énergie solaire est exploitée pour le chauffage de bâtiments et de petites installations. Dans ces cas, des panneaux photovoltaïques

sont installés sur le toit du bâtiment ou dans le jardin de l'installation, et ils servent à chauffer l'air à l'intérieur du bâtiment.

### I.3.2.2. Principe de fonctionnement

Les centrales solaires font généralement usage de vastes miroirs ou de lentilles pour concentrer la lumière du soleil sur un fluide thermique, tel que de l'huile, et le chauffent à des températures très élevées, dépassant souvent les 500 degrés Celsius. Ce fluide thermique est ensuite utilisé pour chauffer de l'eau dans une chaudière à vapeur, produisant de la vapeur qui met en mouvement des turbines. Ces turbines entraînent des générateurs qui produisent de l'électricité. Lorsque la vapeur d'eau se refroidit, elle redevient de l'eau liquide dans une tour de refroidissement.

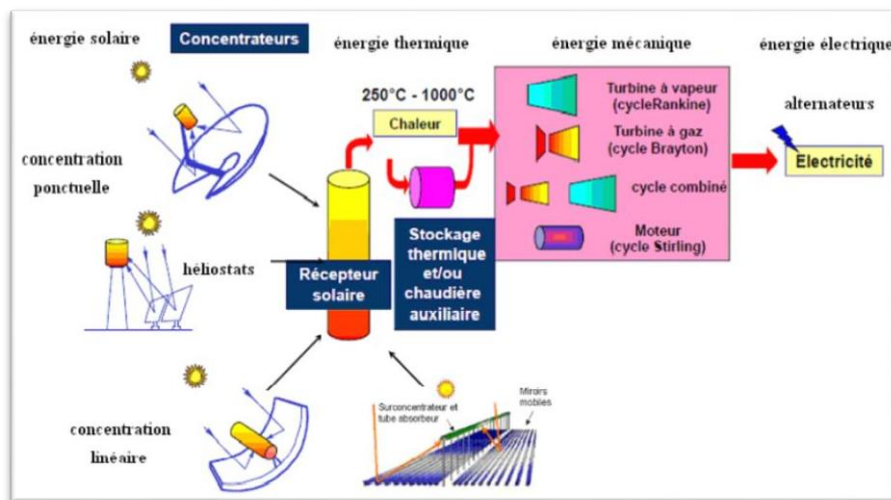


Figure I.8 : Schéma global de fonctionnement d'énergie solaire thermique [9]

### I.3.2.3. Avantages et inconvénients

#### I.3.2.3.1. Avantages

- La source d'énergie solaire est propre et gratuite.
- Les coûts de construction et de fonctionnement sont faibles.
- La production continue pendant la nuit lorsque le stockage est en cours.

#### I.3.2.3.2. Inconvénients

- Ces installations sont réservées aux zones désertiques uniquement.
- Elle ne peut pas concurrencer l'énergie nucléaire.
- Plus cher que le charbon (et le nucléaire).

## I.4. Comparaison entre le solaire thermique et le photovoltaïque

En réalité, aucune des deux technologies ne domine actuellement l'autre, et chacune présente ses

propres avantages distincts. Dans le domaine du photovoltaïque, la production à petite et moyenne échelle est privilégiée, tandis que l'énergie solaire est plus adaptée à une production à grande échelle, généralement de 10 MW à 100 MW. Le photovoltaïque se démarque également dans les zones rurales où l'installation d'un réseau électrique traditionnel serait coûteuse. D'un autre côté, l'énergie solaire présente un avantage significatif en matière de stockage, car elle peut stocker l'énergie dans des réservoirs de sel fondu, une option difficile à réaliser avec le photovoltaïque. De plus, l'énergie solaire offre des coûts de production plus bas que les cellules photovoltaïques dans les régions à fort rayonnement solaire. De manière récente, la technologie solaire thermique a également démontré une durée de vie plus longue que les panneaux solaires, grâce à sa facilité d'entretien et à la durée de vie relativement longue des miroirs. [12]

### **I.5. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons exploré diverses formes d'énergie renouvelable, en mettant particulièrement l'accent sur l'énergie solaire, qui est dérivée du rayonnement solaire. Nous avons examiné les moyens potentiels de convertir cette énergie solaire en deux formes principales : l'énergie lumineuse et l'énergie thermique. Enfin, nous avons analysé les distinctions entre ces deux méthodes de conversion, mettant en évidence leurs caractéristiques et applications spécifiques.

***Chapitre II :***

***Gisement Solaire***

---

---



## II.1. Introduction

Le gisement solaire, une mesure cruciale de l'abondance d'énergie solaire sur une zone géographique donnée, à un moment spécifique de la journée ou de l'année, repose sur une analyse approfondie de plusieurs paramètres. Ces paramètres incluent la position du soleil dans le ciel, l'angle d'incidence des rayons solaires, la durée du jour et les conditions météorologiques du lieu en question.

L'importance du gisement solaire transcende de nombreux domaines, chacun bénéficiant de son évaluation précise. Dans le domaine de la météorologie, il aide à comprendre les modèles climatiques et à prédire les conditions météorologiques futures. Dans le cadre de la planification énergétique, le gisement solaire est une pièce maîtresse. Il permet de concevoir des systèmes de production d'énergie solaire adaptés aux caractéristiques de la région, maximisant ainsi leur efficacité.

## II.2. Aspects énergétique solaire

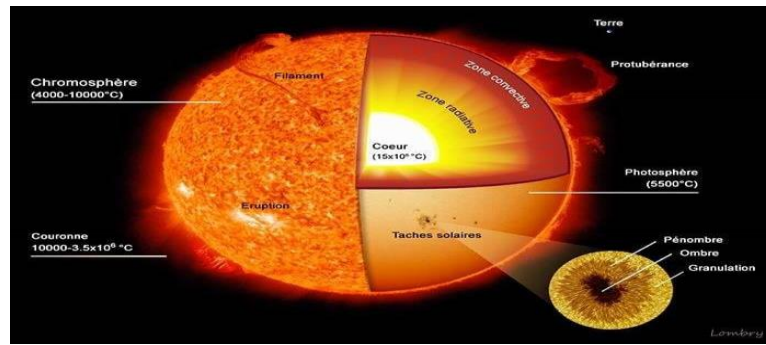
### II.2.1. Soleil

Depuis plus de 4,6 milliards d'années, notre fidèle étoile, le Soleil, a baigné notre planète de sa lumière et de sa chaleur inestimables. Il incarne l'une des sources d'énergie les plus anciennes et puissantes à notre disposition. L'ambition de l'humanité au siècle est de maîtriser cette source d'énergie solaire pour répondre à nos besoins croissants en énergie de manière durable.

Situé au cœur même de notre système solaire, le Soleil occupe une place prépondérante dans notre cosmos. Il est l'étoile centrale autour de laquelle gravitent la Terre et les autres planètes. Dans la vaste classification astronomique des étoiles.

Aujourd'hui, la composition chimique de Skoley est de 80 pour cent d'hydrogène et 19 pour cent d'hélium, avec 1 pour cent de certains métaux. Le centre du Soleil est le noyau où se déroulent les réactions thermonucléaires. La température est de 14000 000 K et La pression à l'intérieur de cette étoile est incroyable, atteignant environ 340 milliards de fois la pression atmosphérique que nous observons ici sur Terre

Le diamètre du Soleil, d'une ampleur impressionnante, s'étend sur 1 392 000 kilomètres, ce qui équivaut à 109 fois le diamètre de notre propre planète, la Terre. De plus, la lumière émise depuis le cœur du Soleil parcourt une distance incroyable avant d'atteindre sa surface, prenant un million d'années pour ce voyage extraordinaire, cela nous rappelle la complexité et l'échelle de temps à laquelle fonctionne notre univers.



**Figure II.1:** Structure du soleil [13]

## II.2.2. Constante Solaire

La quantité d'énergie solaire reçue par une surface donnée dans l'extérieure de l'atmosphère terrestre qui est alignée perpendiculairement à la direction du Soleil à une distance égale à la distance estimée entre la Terre et le Soleil. [14]

Si nous supposons l'absence totale d'atmosphère, nous avons :

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

$R_s$  : Rayon solaire.

$D_{st}$ : la distance entre la terre et le soleil.

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$  (Constante de S. Boltzmann)

La constante solaire est une mesure cruciale du flux d'énergie solaire que notre planète reçoit à sa limite supérieure, c'est-à-dire en dehors de l'atmosphère terrestre. Sa valeur moyenne est estimée à environ 1367 watts par mètre carré (W/m<sup>2</sup>). et elle s'exprime hors de l'atmosphère par cette relation :

$$(S_0)_{ext} = 1553(1 + 0.033 \cos 0.34n) \quad (\text{II.2})$$

$n$  : nombre du jour pendant l'année

## II.2.3. Nature du rayonnement solaire

### II .2.3.1. Spectre solaire

Répartition des longueurs d'onde de la lumière solaire dans un environnement donné (exemple sous une vitre) [15], et ce rayonnement solaire est comprise dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10  $\mu\text{m}$ , l'énergie associée au rayonnement solaire est répartie de la manière suivante [16] :

- 9 % dans la bande des UV ( $\lambda < 400 \text{ nm}$ ) : Les rayons UV sont la forme la plus énergétique de rayonnement solaire, mais elle est danger pour la peau et les yeux.

- 47 % dans la bande du visible ( $400 \text{ nm} < \lambda < 800 \text{ nm}$ ) : est la partie du spectre électromagnétique que nous pouvons voir. Elle est essentielle à la vie sur Terre car elle permet aux plantes de réaliser la photosynthèse, ce qui permet de produire de l'oxygène et de la nourriture pour les autres êtres vivants.
- 44 % dans la bande des IR ( $\lambda > 800 \text{ nm}$ ) : Les rayons infrarouges sont moins énergétiques que les rayons UV et visibles, mais ils sont importants car ils permettent de maintenir la chaleur sur Terre. Ils sont également utilisés pour chauffer des objets et des aliments.

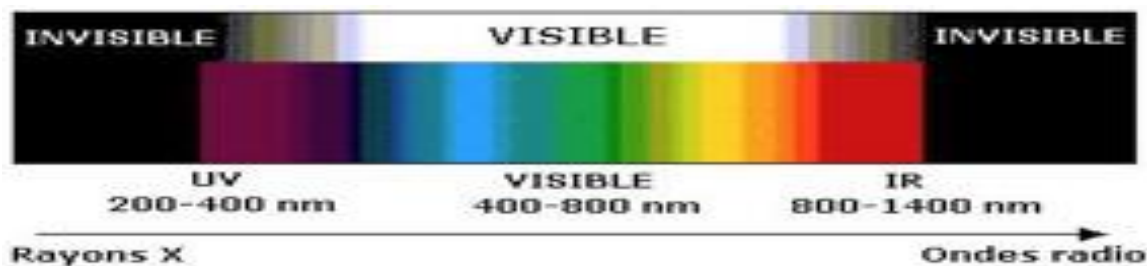


Figure II.2 : Le spectre solaire [16]

### II.2.3.2. Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire, cette fantastique cascade d'ondes électromagnétiques émanant de notre étoile, le Soleil, le soleil, constitue une source inestimable d'énergie pour notre planète. Lors de son trajet depuis le soleil jusqu'à l'atmosphère extérieure de la Terre, la quantité d'énergie disponible atteint environ 1367 watts par mètre carré, une valeur que l'on appelle la constante solaire.

Ce rayonnement capable de répondre à une multitude de besoins énergétiques sur Terre. Il peut être capturé et exploité de diverses manières pour produire de l'énergie utile. Par les panneaux solaires thermiques ont la capacité de convertir ce rayonnement en chaleur, ou par les panneaux photovoltaïques ont le pouvoir de transformer cette lumière en électricité.

### II.2.3.3. Types de rayonnement solaire

#### a- Rayonnement direct

Ce phénomène, c'est le rayonnement solaire pur et non altéré, émanant exclusivement de la surface du Soleil et traversant notre atmosphère sans subir de changement. Il provient de la source lumineuse du Soleil lui-même. Cependant, est réduite à néant lorsque le soleil se trouve occulté par les nuages.

#### b. Le rayonnement diffus

La composante du rayonnement solaire qui provient de l'ensemble de la sphère céleste, à l'exception du disque solaire lui-même, est ce que l'on appelle le rayonnement diffus. Cette forme de rayonnement solaire est caractérisée par le fait qu'elle est réfléchi et dispersée par diverses particules

solides ou liquides qui flottent en suspension dans notre atmosphère. Et ce rayonnement n'a pas de direction préférentielle. Et il est absent durant la nuit.

### c. Le rayonnement réfléchi (albédo)

L'albédo, dans son essence, est une mesure de la réflexion de la lumière solaire par une surface donnée. Sa valeur peut varier en fonction de plusieurs facteurs, notamment la longueur d'onde de la lumière solaire incidente, la direction du rayonnement solaire et même la température de la surface [17]

$$\text{Albédo} = \frac{\text{énergie réfléchie}}{\text{énergie reçue}}$$

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

Type de surface	Albédo (0 à 1)
Surface de lac	0,02 à 0,04
Forêt de conifères	0,05 à 0,15
Surface de la mer	0,05 à 0,15
Sol sombre	0,05 à 0,15
Cultures	0,15 à 0,25
Sable léger et sec	0,25 à 0,45
Calcaire <sup>1</sup>	environ 0,40
Glace	environ 0,60
Neige tassée	0,40 à 0,70
Neige fraîche	0,75 à 0,90
Miroir parfait	1

**Tableau II.1** : Albédo solaire de différentes surfaces [17]

### d. Le rayonnement global

Dans le contexte de l'étude du rayonnement solaire, est une mesure qui englobe tous les composants du rayonnement solaire. Il comprend trois composantes principales : le rayonnement direct, le rayonnement diffus et le rayonnement réfléchi.

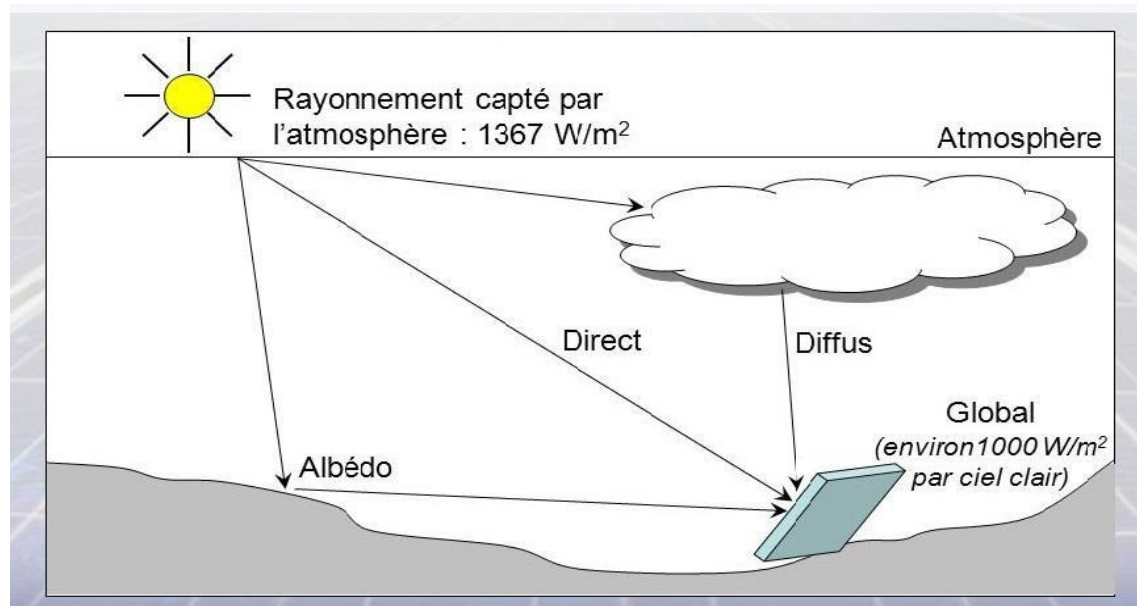


Figure II.3: Type de rayonnement solaire [17]

### II.3. Aspects géométriques

#### II.3.1. Mouvement de la terre

##### II.3.1.1. La Terre tourne autour du soleil

La Terre réalise une révolution autour du Soleil, un mouvement bien établi dans notre système solaire. Cette trajectoire est généralement assimilée à la forme d'un cercle, bien que légèrement elliptique, avec une distance moyenne d'environ 150 millions de kilomètres qui sépare notre planète de l'astre solaire.

Ce phénomène de révolution complète de la Terre autour du Soleil, c'est-à-dire un parcours complet de notre planète autour de notre étoile, s'effectue sur une période de 365 jours. Cette durée de 365 jours correspond à ce que nous appelons une année. [16][18].

$$DTS(n) = 1 - 0.17 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot (n-2)}{365}\right) \quad (\text{II.3})$$

**Pour  $DTS = 1$  UA donc  $H = H_0$  alors  $1UA \approx 150$  million km.**

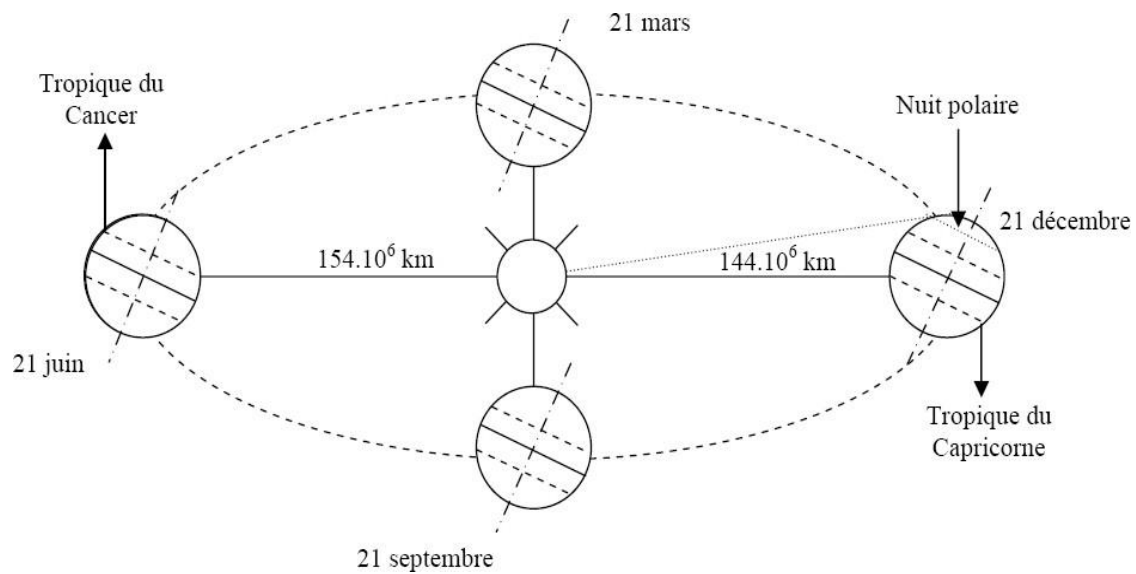
**$n$  : numéro de jour a partir de 1 er Janvier**

##### II.3.1.2. La terre tourne sur elle-même

La Terre est en perpétuel mouvement, et l'un de ses mouvements fondamentaux est la rotation. La Terre effectue une rotation complète en 24 heures, ce qui est à l'origine de l'alternance des jours et des nuits que nous observons. Cette rotation se produit autour d'un axe imaginaire connu sous le nom de l'axe des pôles, qui traversent la Terre de part en part.

Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et qui passe par le centre de la Terre est appelé l'équateur.

Il divise la planète en deux hémisphères, nord et sud. Cet équateur est la ligne de référence pour mesurer la latitude des différents endroits de la Terre [16].



**Figure II.4:** Schéma de mouvement la terre sur le soleil [16]

### II.3.2. La déclinaison solaire ( $\delta$ )

La déclinaison solaire, notée  $\delta$ , est un concept essentiel en astronomie et en météorologie pour comprendre les variations de la position apparente du Soleil dans le ciel au fil de l'année. Elle est définie comme l'angle formé entre la direction du Soleil et le plan équatorial terrestre. La déclinaison solaire est une valeur angulaire qui varie tout au long de l'année en fonction de la position de la Terre dans son orbite autour du Soleil. [21]

$$(-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ),$$

$$\delta = 23,45 \cdot \sin [0,98^\circ \cdot (n + 284)] \quad (\text{II.4})$$

$n$ : est le numéro du jour de l'année

Elle atteint son apogée aux solstices d'été et d'hiver, ces moments de l'année où la Terre est inclinée au maximum par rapport au plan de son orbite autour du Soleil. Cependant, aux équinoxes de printemps et d'automne, la déclinaison solaire s'annule presque complètement.

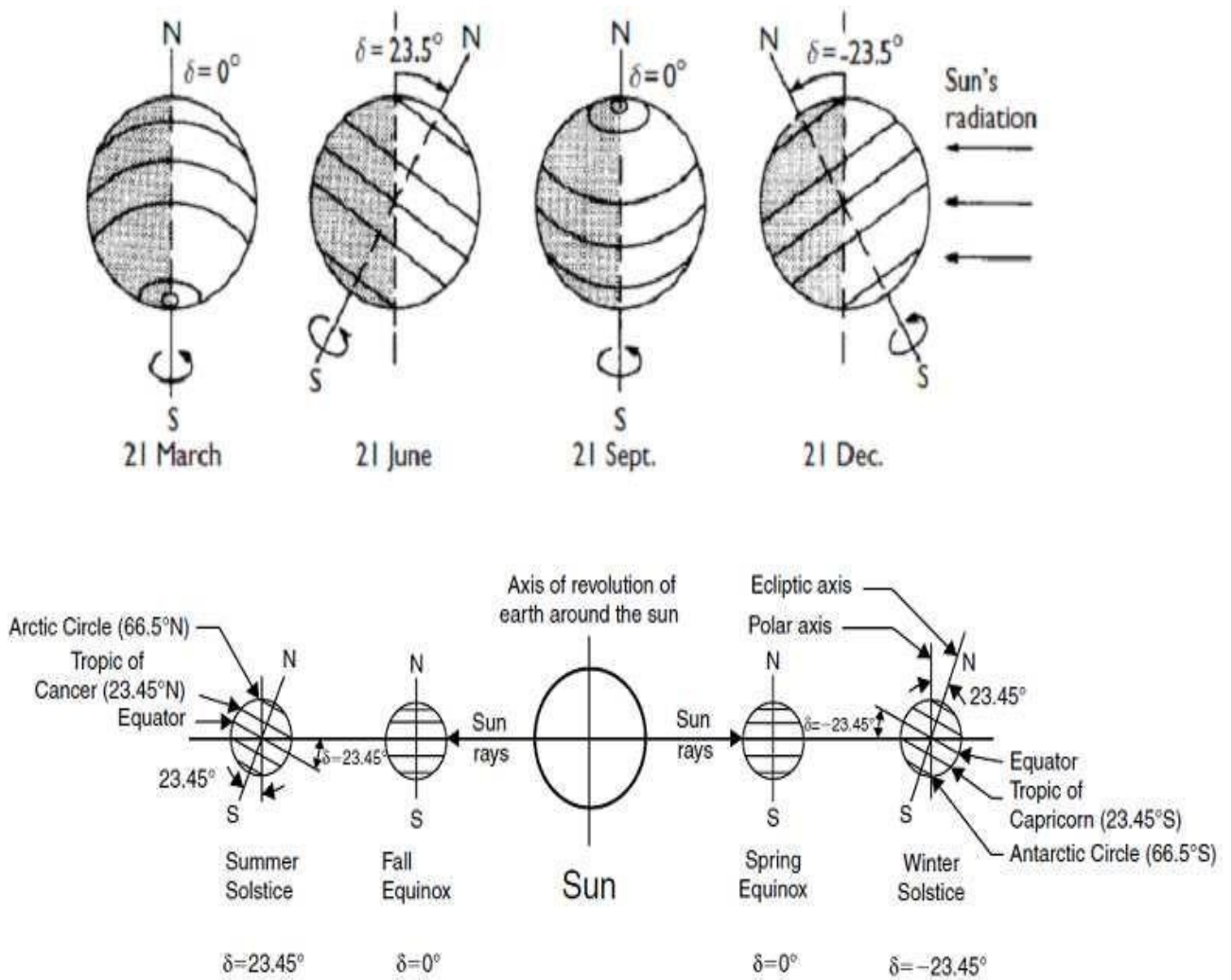


Figure II.5: Variation de la déclinaison Solaire[19]

**II.3.3. Latitude**

La latitude est une valeur angulaire indiquant la position nord-sud d'un point de la Terre par rapport à l'équateur. Elle se mesure en radians, minutes et secondes et varie de 0° à 90°, avec le pôle Nord à 90°N et le pôle Sud à 90°S. La latitude est utilisée pour localiser un emplacement sur Terre et est souvent utilisée en navigation, en géographie et en astronomie. [14].

**II.3.4. Longitude**

Dans le système de coordonnées sphériques la distance angulaire du méridien d'origine sur l'équateur ou sur un cercle parallèle entre 180° ouest et 180°. [20],

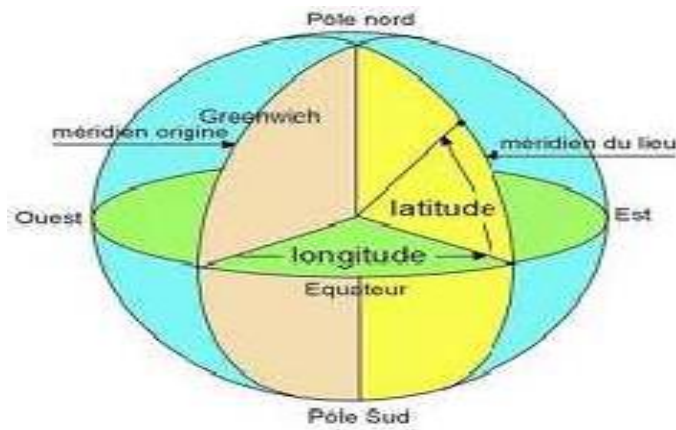


Figure II.6: Définition des coordonnées terrestres [14]

### II.3.5. Méridien

est un demi-grand cercle imaginaire représenté sur la terre, entre les pôles géographiques [19]. Chaque point ayant la même longitude a la même longitude. On parle aussi d'arcs méridiens entre deux latitudes

### II.3.6. Mouvement apparent du Soleil

#### II.3.6.1. L'azimut ( $\alpha$ )

L'azimut est un paramètre fondamental pour déterminer l'orientation d'un objet ou d'un lieu par rapport au Soleil. Cet angle est mesuré en degrés par rapport au sud dans un plan horizontal. Pour clarifier, selon la convention universellement adoptée, une orientation vers l'Est est représentée par un azimut de  $-90^\circ$ , tandis qu'une orientation vers l'Ouest est représentée par un azimut de  $+90^\circ$ . [19]

La relation pour calculer l'azimut solaire est la suivante :

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

Ou bien :

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

$\varnothing$  : Latitude

$\delta$  : Déclinaison solaire

$\omega$  : Angle horaire du soleil

$h$  : Hauteur angulaire du soleil

#### II.3.6.2. La hauteur angulaire ( $h$ )



Il est définie comme l'angle formé entre le plan horizontal du lieu d'observation et la direction du Soleil. Cette mesure est essentielle pour déterminer la position apparente du Soleil dans le ciel par rapport à un observateur ou à un lieu donné.

La plage de valeurs pour la hauteur angulaire est de  $0^\circ$  à  $90^\circ$  vers le zénith, c'est-à-dire lorsque le Soleil est directement au-dessus de l'observateur, et de  $0^\circ$  à  $-90^\circ$  vers le nadir, lorsqu'il est directement en dessous de l'observateur. [21]

Et définie aussi par cette relation

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

$\varphi$ : Latitude du lieu.



**Figure II.7:** Les coordonnées horizontales [19]

### II.3.6.3. Angle Horaire ( $\omega$ )

L'Angle Horaire est défini comme l'angle compris entre la méridienne origine, qui passe par le sud, et la projection du Soleil sur le plan équatorial de la Terre. Sa plage de valeurs s'étend de  $0^\circ$  à  $360^\circ$ . La valeur de l'angle horaire est nulle à midi solaire, lorsque le Soleil est au point le plus élevé dans le ciel. Il devient négatif le matin, indiquant que le Soleil est à l'est de la méridienne origine, et il devient positif dans l'après-midi, indiquant que le Soleil est à l'ouest de la méridienne origine. L'angle horaire augmente de  $15^\circ$  par heure, ce qui signifie que chaque heure qui passe, l'angle horaire augmente de 15 degrés. [21]:

$$h = 15^\circ (TSV - 12) \quad (\text{II.8})$$

$TSV$  : temps solaire vrai.

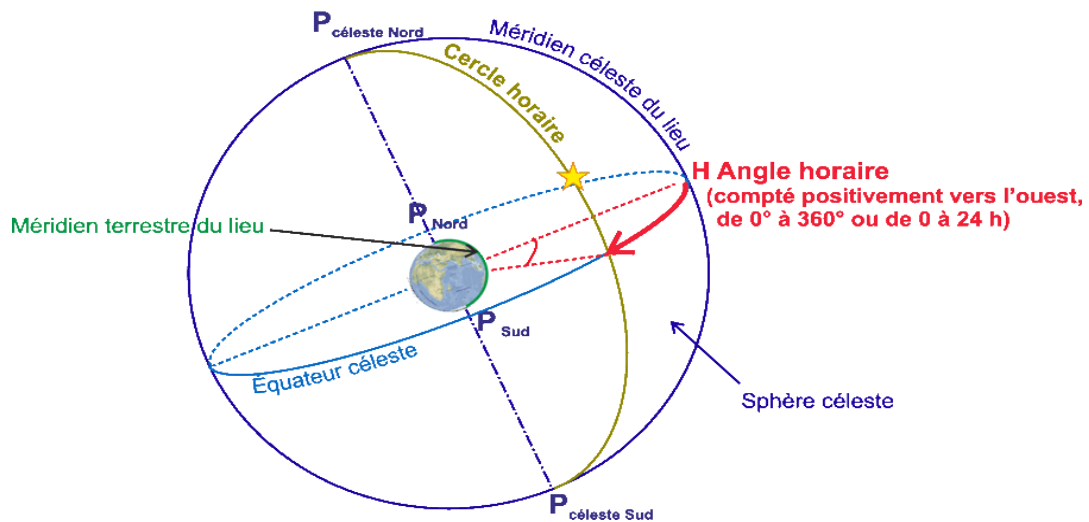


Figure II.8: Angle horaire [23]

**II.3.6.4. Angle d’incidence sur un plan**

L'angle d'incidence est un concept essentiel dans la physique de la lumière et de l'optique. Il est défini comme l'angle formé entre la direction d'arrivée du rayonnement lumineux (ou d'autres types de rayonnement électromagnétique) et la droite normale à la surface ou à la frontière avec laquelle il interagit. [24] , il est donné par cet équation :

$$\cos(\theta) = \cos\varphi \cos\omega + \sin\varphi \sin\delta \tag{II.9}$$

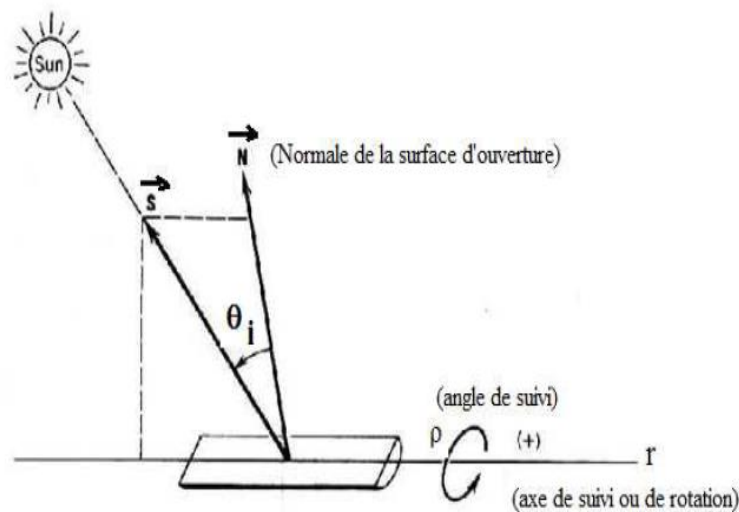


Figure II.9: Angle d’incidence [22]

**II.3.6.5. Les Temps Solaire**

**II.3.6.5.1. Temps solaire varie (TSV)**

Le temps solaire vrai (TSV) est un concept essentiel pour comprendre comment l'heure du jour est déterminée en fonction de la position du soleil dans le ciel.

À midi solaire, le soleil est au point le plus élevé dans le ciel, et on le considère à 0 degrés. Puisque

la Terre effectue une rotation complète en 24 heures, chaque heure correspond à un changement de 15 degrés dans la position du soleil. Le temps solaire vrai peut être négatif le matin lorsque le soleil est à l'est, car il est en avance par rapport à midi solaire, et il peut être positif l'après-midi lorsque le soleil est à l'ouest, car il est en retard par rapport à midi solaire. [19] :

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

*TU* : temps universel standard (mn).

*LSt*: Méridien standard du lieu (°).

*Lg* : méridien local du lieu (°).

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

$$ET = 9,87 \sin (2JD) - 7,35 \cos (JD) - 1,5 (JD) \quad (\text{II.11})$$

Avec :

$$JD = (J - 180) \times \frac{360}{365} \quad (\text{II.12})$$

*J* : nombre de jours à partir du premier janvier

### II.3.6.5.2. Temps solaire moyen

Temps Solaire Moyen est une échelle de temps qui lisse les variations saisonnières du Temps Solaire Vrai pour fournir une mesure régulière du temps basée sur l'année calendaire standard de 365 jours. [19] :

Il est défini par cette relation :

$$ET = TSV - TSM \quad (\text{II.13})$$

ET, équation du temps, corrige TSV par apport TSM

$$Et = 9.87 \sin (2N') - 7.53 \cos (N') - 1.5 \sin (N') \text{ [min]} \quad (\text{II.14})$$

$$N' = (N - 81) \times 360/365 \quad (\text{II.15})$$

Où : *N* est le numéro du jour dans l'année.

**II.3.6.5.3. Temps Universel (TU)** est une échelle de temps qui sert de référence mondiale pour mesurer le temps moyen. Il est basé sur le méridien de Greenwich.

$$TU = TSM - L/15 \quad (\text{II.16})$$

Où : *L* : est la longitude.

Pour les villes situées à l'est du méridien de Greenwich, leur longitude est positive ( $L > 0$ ).

Pour les villes situées à l'ouest de Greenwich ( $L < 0$ )

Pour le méridien de Greenwich lui-même, TU est égal à TSM.

### II.3.7 Heures et temps

#### II.3.7.1. Durée Du Jour (DJ)

Est un élément essentiel du cycle quotidien qui caractérise la période de temps en heures, allant du moment où le soleil se lève à l'aube jusqu'à son coucher au crépuscule, et peut varier considérablement tout au long de l'année en fonction de la latitude géographique d'un lieu donné et de la saison.

$$DJ = \frac{2w}{15} \tag{II.17}$$

Avec:

$$W = \cos^{-1} (tg\varphi . tg\delta) \tag{II.18}$$

#### II.3.7.2. Equation de temps (ET)

La variation de la vitesse de la Terre sur son orbite autour du Soleil. Cette variation périodique peut sembler complexe, mais elle a des implications significatives pour la mesure du temps, en particulier lorsqu'il s'agit de l'heure solaire vraie [19]

$$ET = -[0,0002 \cos(j) + 3,2265 \cos(2j) + 0,0903 \cos(3j) + 7,3509 \sin(j) + 9,3912 \sin(2j) + 0,3361 \sin(3j)] \tag{II.19}$$

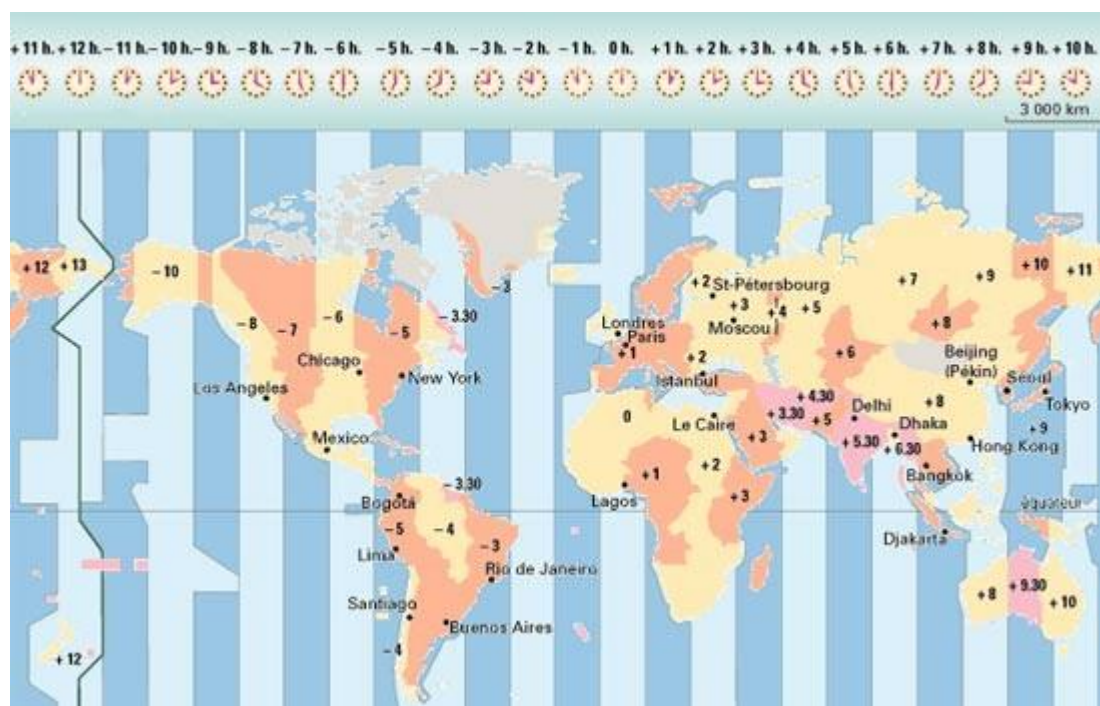


Figure II.10: Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich [14]

### II.3.8. Durée et Taux d'ensoleillement

#### II.3.8.1. Durée d'ensoleillement

Est une quantité temps qui mesure la durée d'ensoleillement dans un endroit ou une zone spécifique.

La durée d'ensoleillement de mesure absolue l'éclairage de la durée réelle de la lumière solaire directe sans interposition de nuages, dans une période donnée (jour, mois, année, etc.). Elle est mesurée avec l'unité de temps [23], généralement en quelques heures, L'instrument pour mesurer la durée d'ensoleillement s'appelle un héliographe [24].

### II.3.8.2. Taux d'ensoleillement

Est une mesure essentielle qui nous permet de quantifier la quantité de rayonnement solaire direct que reçoit la Terre par rapport à la durée totale d'ensoleillement possible en une journée donnée. [19].

$$T_e = \frac{SS}{SSO} \quad (\text{II.20})$$

## II.4. conclusion

La compréhension des mouvements et des positions du soleil est essentielle pour appréhender pleinement les caractéristiques de l'ensoleillement et des ressources solaires d'un site donné. Cette connaissance revêt une importance cruciale pour évaluer la quantité de rayonnement solaire que la Terre reçoit, et par conséquent, son utilisation potentielle en tant que source d'énergie.

Bien que cette ressource soit abondante et propre, son utilisation efficace dépend de notre capacité à recueillir des données précises et à concevoir des systèmes de collecte d'énergie solaire qui optimisent son utilisation.

***Chapitre III :***  
***Les centrales solaires***  
***à concentration***

---

### III. Introduction

La technologie de la solaire thermodynamique se positionne comme une solution prometteuse pour la production d'énergie propre et renouvelable, exploitant de manière efficace le rayonnement solaire direct. Son principe fondamental réside dans la concentration du rayonnement solaire pour chauffer un fluide à des températures élevées, typiquement dans la fourchette de 250 à 1000 degrés Celsius. Cette chaleur concentrée peut ensuite être employée dans divers processus industriels, notamment la génération d'électricité.

Les centrales solaires thermodynamiques se déclinent en plusieurs catégories, chacune reposant sur une technologie de concentration spécifique. Parmi elles, nous retrouvons les tours solaires, les paraboles cylindriques et les miroirs de Fresnel, chacune présentant ses propres avantages et applications.

Enfin, en ce qui concerne le stockage de l'énergie, les centrales solaires thermodynamiques peuvent utiliser des systèmes de stockage de chaleur à court terme, tels que des réservoirs d'eau chaude ou de sels fondus, ainsi que des systèmes de stockage de chaleur à long terme, tels que le stockage thermique saisonnier ou le stockage d'air comprimé.

#### III. 2. Les types des centrales solaires thermiques

Les centrales solaires thermiques à haute température sont des systèmes ingénieux qui reposent sur la concentration du rayonnement solaire pour produire de la chaleur à des niveaux élevés, Il y a quatre types des centrales solaires thermiques et deux catégories distinctes :

- Les systèmes de concentration linéaire: Cylindro-parabolique et miroir Fresnel
- Les systèmes de concentration ponctuelle : Centrale a tour et collecteur parabolique

Ces technologies de concentration solaire tirent parti exclusivement de la composante directe du rayonnement solaire Pour maximiser cette composante directe, ces systèmes sont équipés de dispositifs de suivi solaire qui permettent aux miroirs ou aux réflecteurs de suivre la trajectoire du soleil dans le ciel tout au long de la journée. Ainsi, ils assurent une concentration optimale des rayons solaires sur les récepteurs, ce qui permet de produire de la chaleur ou de l'électricité de manière efficace et propre.[28]

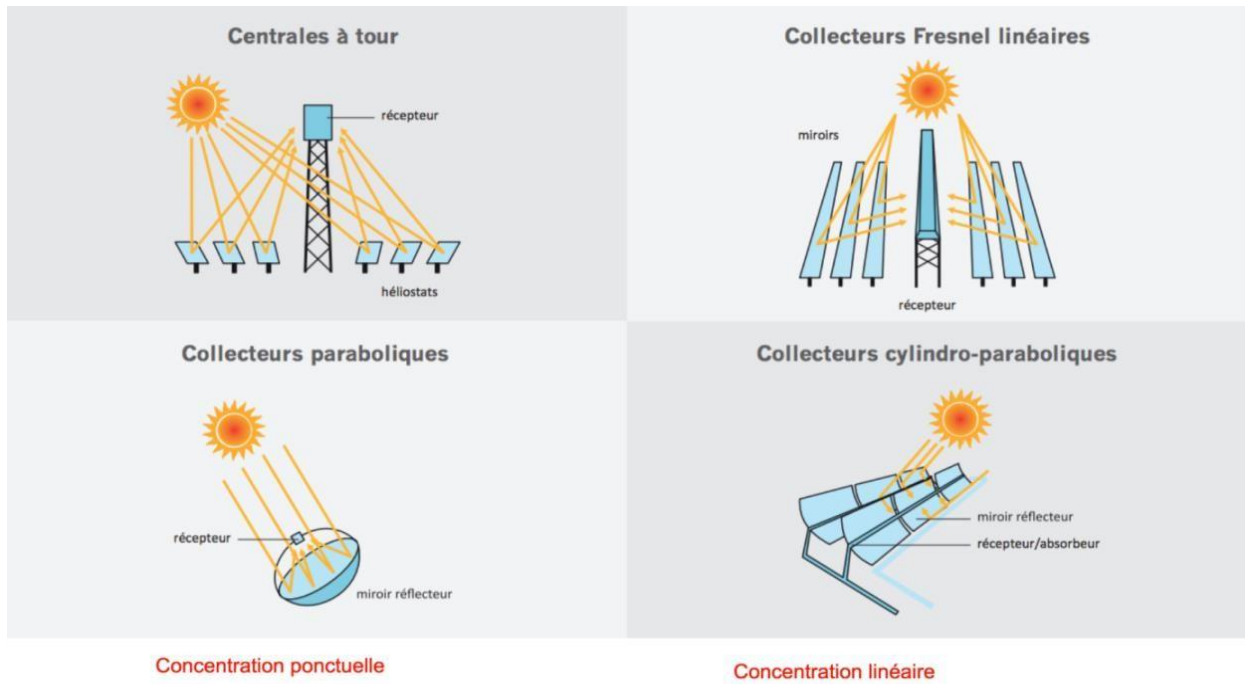


Figure III.1 : Différents types des concentrateurs solaires [25]

### III. 2.1. Centrales à tour

Ce type de centrale solaire se compose d'une haute tour et d'un champ d'héliostats. Chaque héliostat est capable de suivre indépendamment la trajectoire du soleil et de refléter sa lumière vers un récepteur situé au sommet de la tour solaire, une mesure cruciale dans les systèmes de concentration solaire, présente une incroyable amplitude, variant de 600 à plusieurs milliers. Cette ample variation dans le facteur de concentration permet d'atteindre des températures extrêmement élevées, souvent comprises entre 800°C et 1000°C.. cette chaleur est utilisée soit pour chauffer des sels fondus, qui servent ensuite de fluide caloporteur et de système de stockage thermique.

Où la chaleur est générée pour alimenter divers processus, et compris la production d'électricité.

[26]

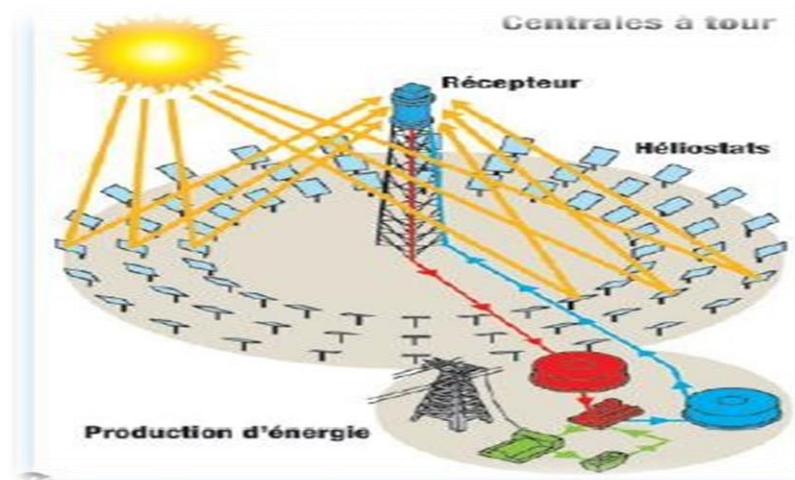


Figure III.2 : Schéma d'une centrale à tour [17]





**Figure III.3 :** Tour solaire [17]

#### **A/ Les avantages**

- les coûts sont relativement faibles
- la possibilité de stocker l'énergie.

#### **B/ Les inconvénients**

- Ces centrales solaires ne sont généralement efficaces que dans des zones désertiques ou très ensoleillées.
- l'énergie solaire ne peut pas rivaliser avec les centrales nucléaires

### **III.2.2. Centrales à capteurs paraboliques**

Des miroirs en forme de parabole pour réaliser une concentration spectaculaire de la lumière solaire en un point précis : le point focal. C'est à cet endroit que réside un élément clé, le récepteur, qui subit une montée en température significative. Ce récepteur particulier est un moteur Stirling, un mécanisme astucieux fonctionnant grâce à l'augmentation de température et de pression d'un gaz emprisonné dans une enceinte hermétique.

Le moteur Stirling est un maître dans la conversion de l'énergie solaire thermique en énergie mécanique. Il accomplit cette transformation en exploitant la chaleur intense générée par la concentration du rayonnement solaire. Cette énergie mécanique est ensuite convertie en électricité, créant ainsi une source d'énergie propre et renouvelable.

Les concentrateurs paraboliques sont généralement équipés de deux axes de suivi, leur permettant de suivre la trajectoire du soleil tout au long de la journée afin de maximiser la quantité de lumière solaire

concentrée au point focal. Le rapport de concentration du système est généralement supérieur à 2 000 et la température du récepteur peut atteindre 1 000 °C.[26]



Figure III.4 : Centrales à capteurs paraboliques [29]

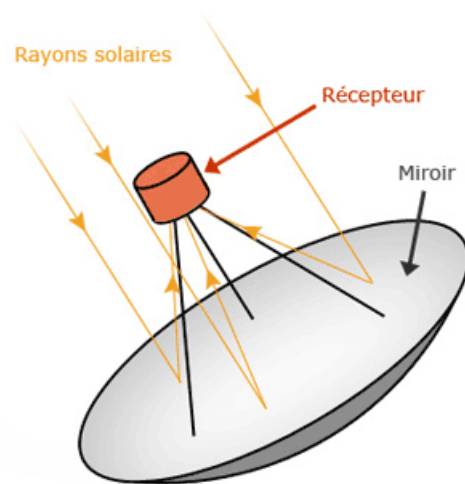


Figure III.5 : Fonctionnement du concentrateur parabolique

#### A/ Les avantages

- Bon rendement
- Peuvent être installés dans des endroits isolés
- Pas d'émissions polluantes

#### B/ Inconvénients

- Fonctionnement par intermittence
- Stockage impossible
- Coût d'investissement encore élevé

### III.2.3. Centrales solaires à miroirs de Fresnel

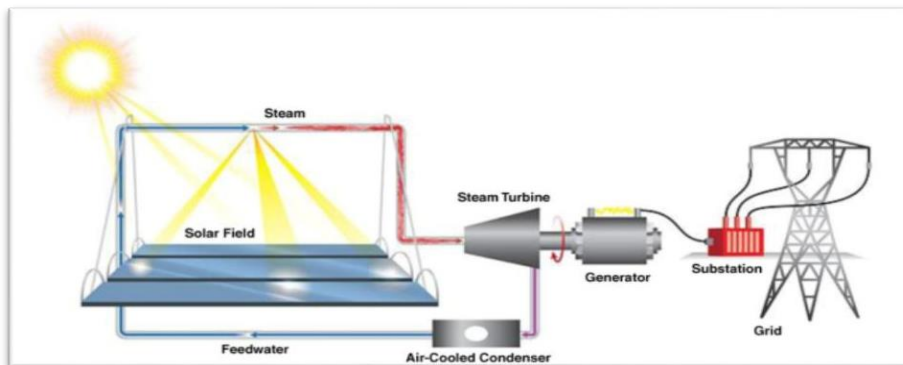
Le système ingénierie repose sur l'utilisation de miroirs spéciaux appelés "réflecteurs compacts linéaires" ou de miroirs faiblement paraboliques, disposés à proximité du sol pour éviter les perturbations causées par les vents.

Chaque miroir, qu'il soit plat ou faiblement parabolique, est capable de suivre la trajectoire du soleil, pivotant au fil de la journée pour constamment rediriger et concentrer les rayons solaires vers un tube absorbant.

Au cœur de ce dispositif, l'eau joue un rôle central. Elle est portée à une pression élevée de 100 bars et chauffée à une température remarquable de 500°C, assume deux fonctions essentielles : elle agit à la fois comme fluide caloporteur et comme fluide de travail [26].



**Figure III.6:** Centrale solaire à miroirs de Fresnel [27].



**Figure III.7 :** Schéma d'une centrale solaire à miroir de Fresnel [27].

#### A/ Les avantages

- les miroirs plats se révèlent nettement plus économiques.
- la fabrication des miroirs plans est relativement simple en comparaison avec leurs homologues paraboliques.

#### B/ Les inconvénients

- la fabrication des miroirs plans est relativement simple en comparaison avec leurs homologues paraboliques
- Investissement lourd.

#### III.2.4. Centrales à capteurs cylindro-paraboliques

Les centrales solaires à capteurs cylindro-paraboliques, qui trouvent leur place principalement dans les déserts et les zones arides à travers le monde, incarnent une technologie solaire très répandue. Leur application la plus significative réside dans la production d'électricité, et elles alimentent actuellement certaines des centrales solaires les plus puissantes au monde, situées dans le sud-ouest des États-Unis et le sud de l'Espagne. Cette technologie a marqué son entrée sur la scène énergétique dès 1984, avec l'installation de la première centrale solaire commerciale, SEGS I, en Californie par la société Luz International Limited.

L'architecture de ces centrales solaires cylindro-paraboliques repose sur un design novateur composé de rangées parallèles de miroirs semi-cylindriques de grande longueur. Ces miroirs sont stratégiquement positionnés pour suivre le mouvement du soleil en pivotant autour d'un axe horizontal, permettant ainsi la concentration précise des rayons solaires sur des tubes horizontaux. À l'intérieur de ces tubes circule un fluide caloporteur, souvent une huile synthétique spécialement conçue pour résister à des conditions extrêmes, et cet échange de chaleur est optimisé par des échangeurs de chaleur intelligemment conçus. Ces échangeurs ont pour mission de transférer la chaleur accumulée dans le fluide vers de l'eau, générant ainsi de la vapeur surchauffée pouvant atteindre une température impressionnante de  $500^{\circ}\text{C}$ , capable de mettre en mouvement une turbine et, par conséquent, un générateur électrique.

Ces centrales solaires à capteurs cylindro-paraboliques peuvent également tirer parti de réservoirs de chaleur, souvent sous forme de réservoirs de sels fondus, pour stocker l'énergie thermique produite pendant la journée. Cette réserve d'énergie permet ensuite d'alimenter la turbine et de produire de l'électricité pendant les heures nocturnes, assurant ainsi un approvisionnement continu d'énergie.

L'un des avantages majeurs de cette technologie réside dans la simplicité de son suivi solaire, qui s'effectue sur un seul axe au lieu de deux, comme c'est le cas pour les héliostats. Les concentrateurs sont généralement orientés nord-sud et pivotent d'est en ouest pour suivre la trajectoire du soleil. Le résultat est une concentration maximale du flux solaire, atteignant  $C^* \text{ max} = 215$ , et un rendement maximal de  $\eta_{\text{max}} = 50\%$ . [28]



**Figure III .8:** Ensemble d'une centrale à capteurs cylindro-paraboliques [16]

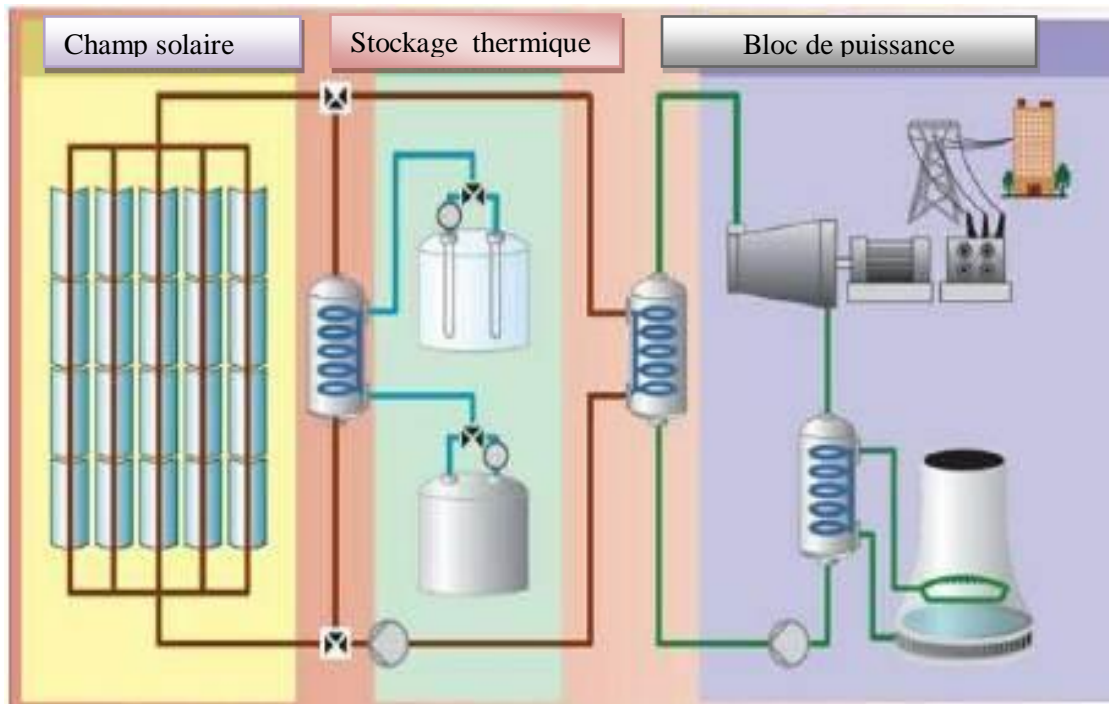


Figure III.9 : Principe de fonctionnement d’une centrale cylindro- parabolique

La centrale thermique cylindro- parabolique est constituée de trois éléments principaux :

**III.2.4.1. Le champ solaire**

Le champ solaire constitue l'élément clé de cet appareil, assurant la conversion efficace du rayonnement solaire en énergie thermique. Il se compose d'un ensemble de capteurs solaires astucieusement disposés en séries le long de lignes étendues. Ces longues lignes, quant à elles, sont connectées en parallèle pour optimiser la capture de l'énergie solaire, favorisant ainsi le démarrage du cycle électrique.[19]

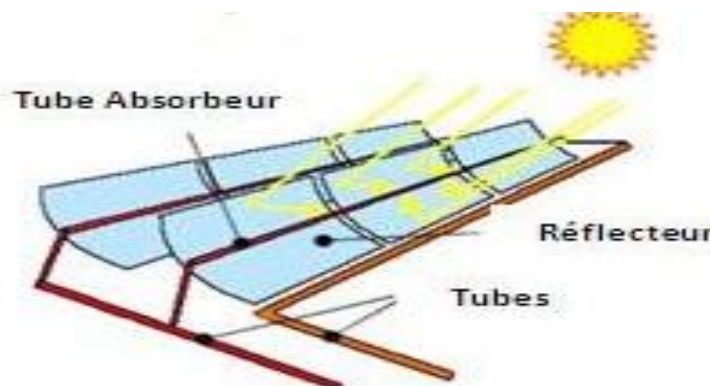
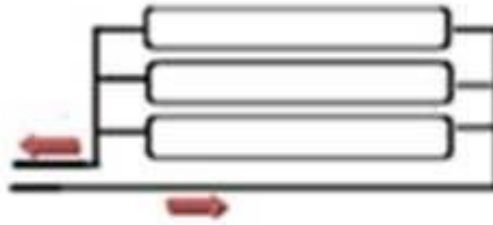


Figure III.10 : Champ solaire [19]

### III.2.4.1. Les configuration du champ solaire

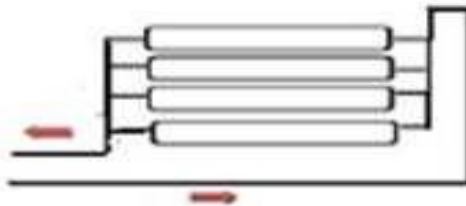
#### III.2.4.1.a. Installation a retour direct



**Figure III.11 :** Installation à retour direct [19]

est la méthode la plus fréquemment adoptée, principalement en raison de sa simplicité. Cependant, elle présente un inconvénient majeur : le déséquilibre de pression à l'entrée et à la sortie de chaque rangée de collecteurs. Cette disparité de pression entraîne inévitablement d'importantes pertes de charge, qui peuvent affecter la performance globale du système. [19]

#### III.2.4.1.b. Installation a retour indirect

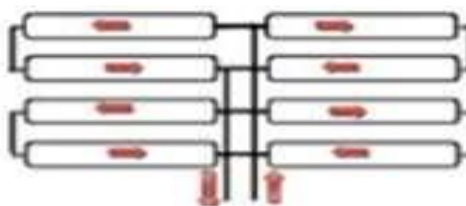


**Figure III.12:** Installation à retour indirect [19]

En somme, équilibrer les pertes de charge pour chaque rangée de capteur . L'une des stratégies utilisées pour atteindre cet équilibre consiste à créer une boucle à l'entrée du champ solaire. Cependant, . La mise en place de cette boucle peut entraîner une augmentation de la longueur totale de la tuyauterie nécessaire.[19]

#### III.2.4.1.c. Installation à alimentation centralisée

L'installation à alimentation centralisée est une approche conçue dans le but spécifique de minimiser au maximum la longueur totale du réseau de tuyauterie. Cette méthode trouve son utilité dans divers contextes, compris les systèmes solaires et les réseaux de distribution d'eau..[19]



**Figure III.13** : Installation à alimentation centralisée.[19]

### III.2.4.2. Le stockage d'énergie thermique

Lorsque l'intensité du rayonnement solaire dépasse la capacité de la turbine, l'excès de chaleur est acheminé vers un collecteur de chaleur (ou ballon tampon) qui se recharge tout au long de la journée. Cette réserve de chaleur stockée est ensuite mobilisée pour générer de l'énergie supplémentaire pendant la nuit ou en cas de conditions nuageuses. [29]

Il existe deux méthodes possibles de stockage.

#### **Chaleur sensible**

Les avantages du stockage de chaleur ont été reconnus depuis des milliers d'années. Un exemple simple est de placer une pierre près d'un feu, de la déplacer ensuite et de profiter de la chaleur qu'elle émet progressivement. Ce principe s'applique également dans le cas de l'utilisation d'un ballon d'eau chaude ou d'une bouteille isotherme.

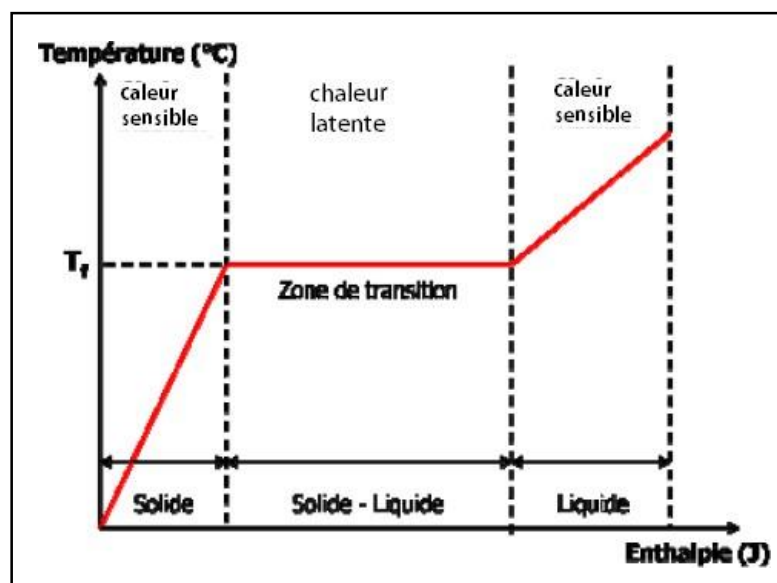
Un système thermodynamique consiste à stocker la chaleur générée pendant une journée ensoleillée. Le fluide caloporteur circule à travers un échangeur thermique connecté à deux réservoirs de sel fondu. Les sels fondus à basse température traversent l'échangeur de chaleur pour absorber la chaleur du fluide, puis ils la stockent dans le réservoir de sel chaud. Lorsque le soleil se couche, le processus s'inverse, et les sels chauds passent à travers l'échangeur de chaleur pour transférer leur chaleur au fluide caloporteur (à environ 393°C), qui est ensuite utilisé pour alimenter des turbines et produire de l'électricité.

- **Chaleur latente**

Le concept du stockage de chaleur latente repose sur l'exploitation de matériaux à changement de phase (PCM) qui transforment leur état de solide à liquide lorsqu'ils sont soumis à la chaleur.

La phase de reconversion libère l'énergie emmagasinée sous forme de chaleur ou de fraîcheur, avec un rendement d'environ 60 %. Cette technologie peut être mise en œuvre dans la construction de bâtiments utilisant des matériaux à changement de phase (PCM) intégrés dans leurs parois, assurant ainsi une régulation thermique en fonction de l'exposition solaire. [26]

Une configuration standard implique le placement du PCM dans un réservoir de grande taille, au sein duquel se trouvent les conduites contenant l'antigel. Les choix du PCM et du fluide peuvent varier en fonction de la puissance thermique requise, ce qui détermine la température ou la quantité de chaleur à stocker.



### III.2.4.2. 1. Le circuit de stockage/ déstockage

#### III.2.4.2.1.1. Principe de fonctionnement

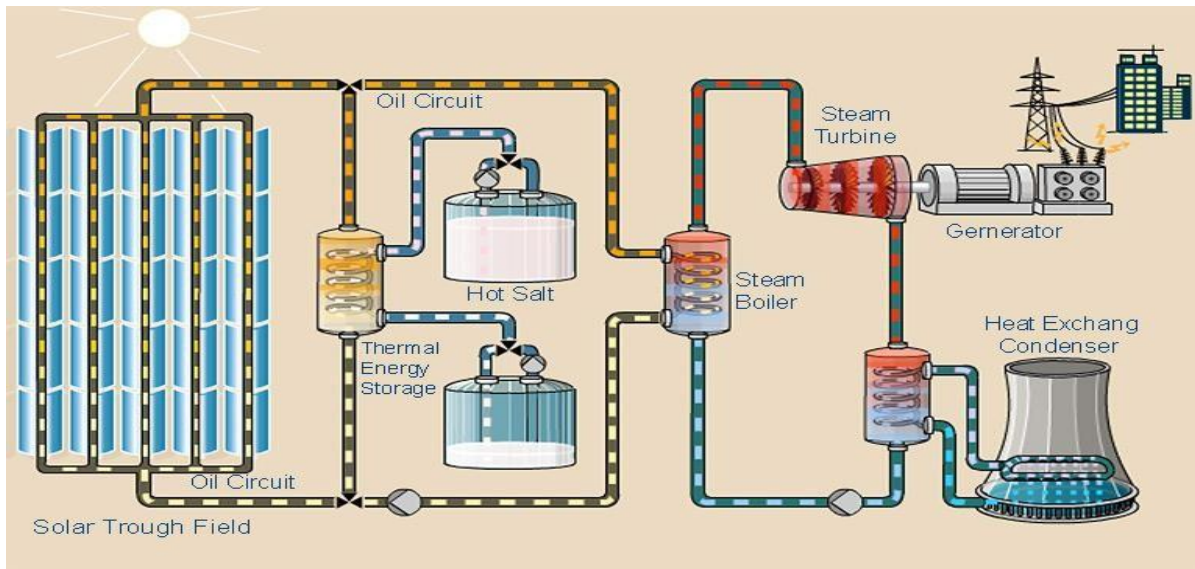
Pendant la phase d'exposition au soleil (stockage), le fluide caloporteur absorbe l'énergie thermique du champ solaire. Une partie de cette énergie est ensuite transférée au sel fondu provenant du réservoir froid pour y être stockée dans le réservoir chaud.

Lorsqu'il n'y a pas de rayonnement solaire (décharge), le sel fondu quitte le réservoir chaud pour rejoindre le réservoir froid, en passant par un échangeur où le fluide caloporteur reçoit l'énergie thermique libérée par le sel fondu.

**Figure III.14:** Chaleur sensible et chaleur latente [29]

Dans les deux scénarios, le fluide caloporteur chaud passe par un échangeur thermique (la chaudière) pour produire de la vapeur, qui sera ensuite utilisée pour alimenter la turbine. [30]





**Figure III.15 :** Principe de fonctionnement du circuit de stockage /déstockage [30]

#### III.2.4.2.1.2. Les composants d'un circuit de stockage

Un circuit de stockage est constitué de :

##### III.2.4.2.1.2.1. Les réservoirs

Deux méthodes de stockage sont envisageables : le stockage multicouche (ou stockage mono-réservoir) et le stockage double-réservoir.. [30]

##### III.2.4.2.1.2.1.a. Stockage à Deux réservoirs

Il s'agit du système de stockage le plus couramment employé dans les centrales à réservoir parabolique. Deux approches sont mises en œuvre pour ce type de stockage.

- **Le stockage indirect**

Ici, le fluide caloporteur qui sort du panneau solaire peut être dirigé vers un échangeur thermique où il transfère sa chaleur au sel fondu, généralement composé de nitrate de sodium et de potassium. Le sel chaud est stocké dans un réservoir chaud. Le sel séparé du réservoir chaud peut alors être utilisé en remplacement du champ solaire pour produire de la vapeur, qui est ensuite injectée dans le réservoir froid.

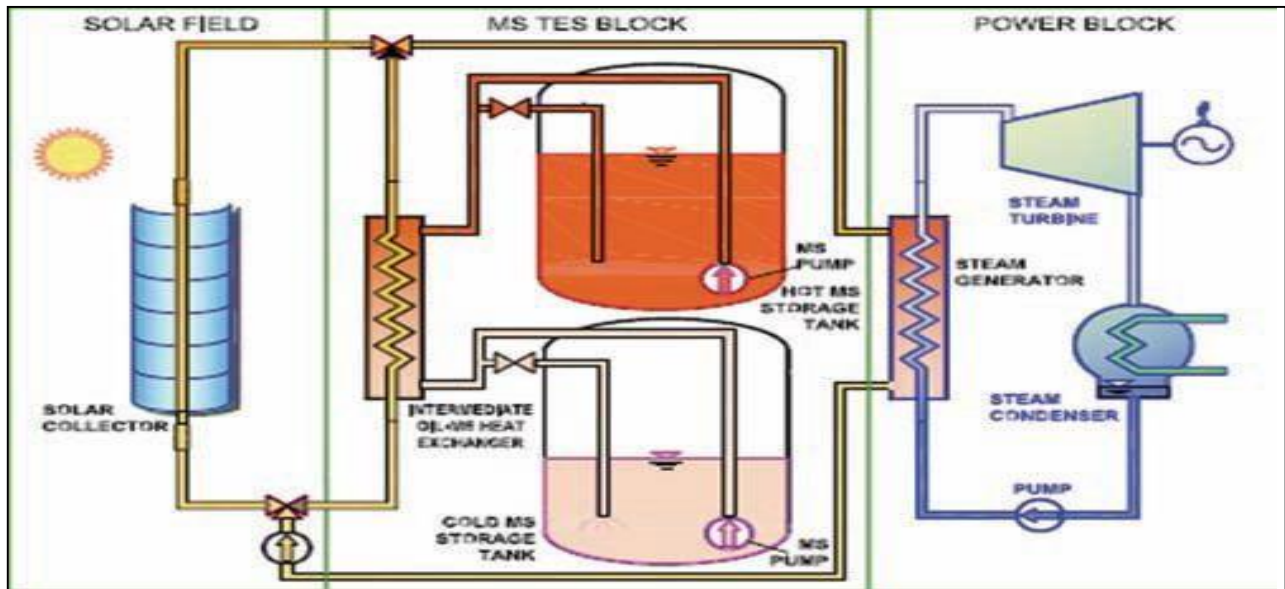


Figure III.16 : Le stockage indirect par deux réservoirs [30]

- Le stockage direct

Étant donné que le système solaire fonctionne également comme un moyen de stockage, il n'est pas nécessaire d'incorporer un échangeur de chaleur, ce qui entraîne une réduction des coûts et une amélioration de l'efficacité globale. La viabilité technique de cette approche a été confirmée dans le cas de l'huile thermique, utilisée dans une centrale CSP parabolique (SEGS-1, Californie), ainsi que pour les sels fondus dans une installation CSP pilote de type cylindrique (ARCHIMEDE, Sicile, Italie).

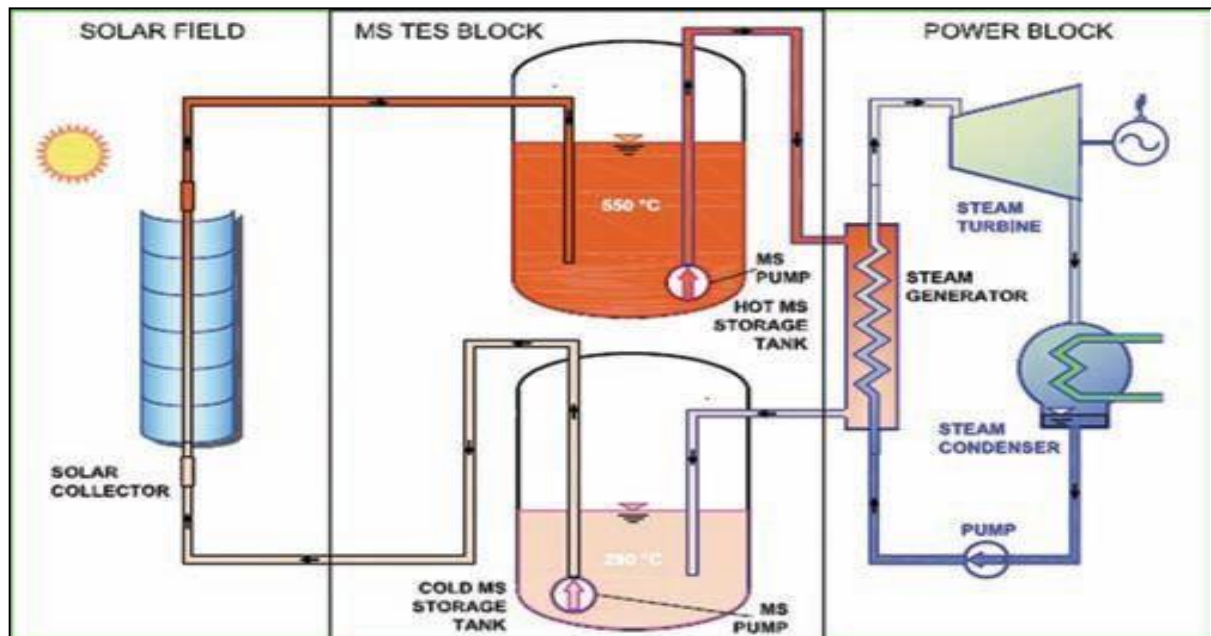


Figure III.17 : Le stockage direct par deux réservoirs [30]

Néanmoins, il convient de noter que la capacité de stockage reste limitée en raison de

considérations environnementales et de risques liés aux incendies.

### III.2.4.2.1.2.1.b. Réservoir unique

Des systèmes à réservoir unique sont actuellement en phase de développement. Ces réservoirs utilisent la thermocline ou la stratification, ce qui est une option économique. Les réservoirs de stockage à thermocline sont actuellement testés avec de l'huile comme fluide de stockage, offrant un haut niveau de performance et de fiabilité. Cependant, la capacité de stockage est limitée pour des raisons environnementales visant à éviter les risques d'incendie associés au stockage de grandes quantités d'huile chaude.

Il existe deux approches en cours de développement pour les systèmes multicouches à réservoir unique.

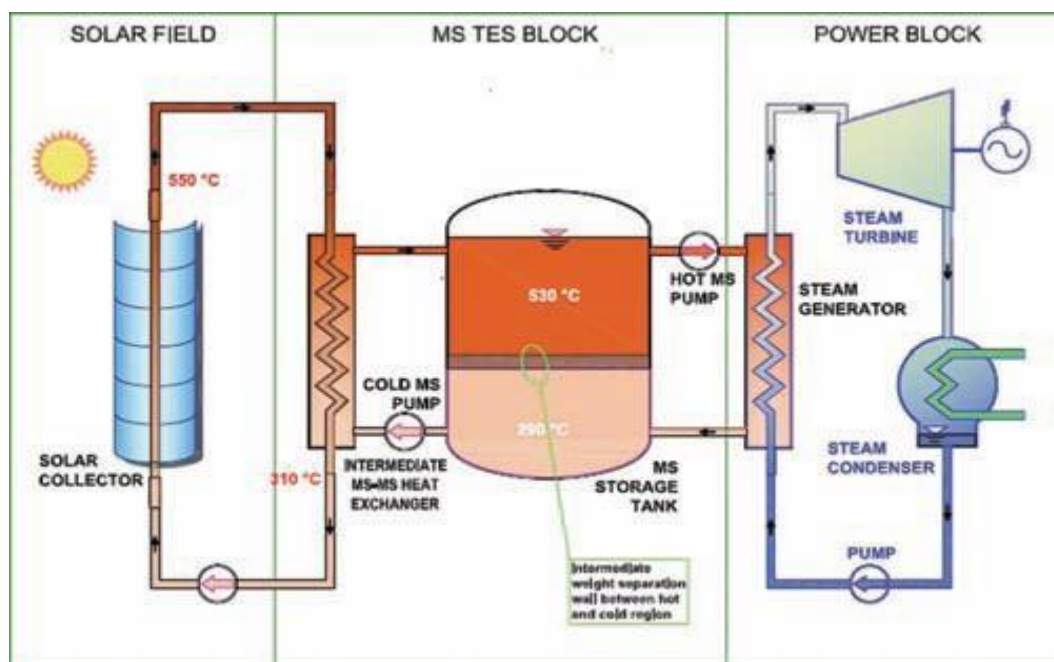


Figure III.18 : Un seul réservoir avec la stratification induite par un isolant [30]

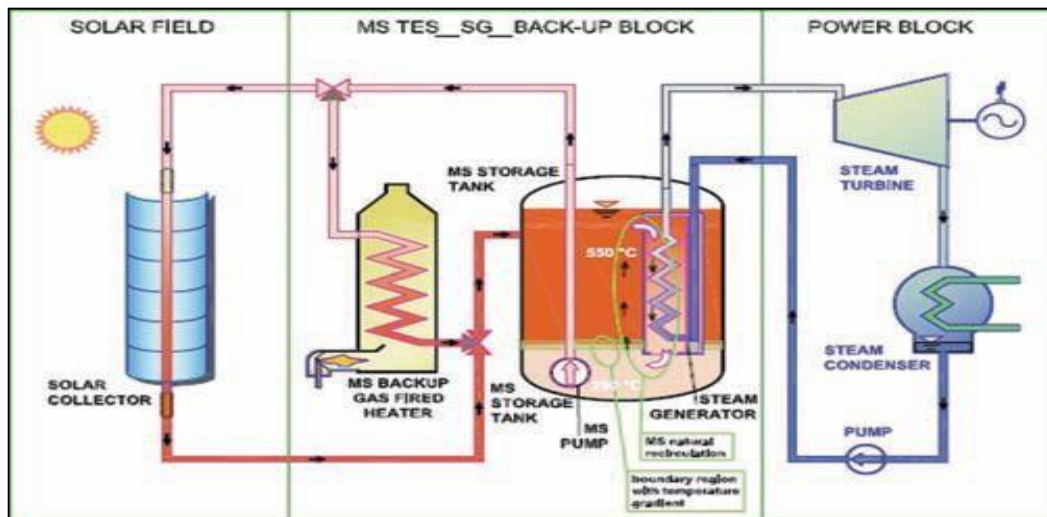
- **Un seul système de réservoir avec la stratification induite par un isolant**

Le déplacement du mur intérieur horizontalement est effectué en maintenant le sel chaud en haut et le sel froid en bas du réservoir. Le sel froid est acheminé à travers un échangeur de chaleur dans le réservoir où il est chauffé, puis renvoyé vers le haut du réservoir. Lors de la phase de stockage, la paroi du réservoir subit un mouvement ascendant et descendant, augmentant ainsi la quantité de sel chaud dans le réservoir tout en réduisant la quantité de sel froid.

Ce processus est inversé lorsque l'accumulateur de chaleur est utilisé pour générer de l'électricité

- **Un seul système de réservoir avec la stratification induite par sel fondu**

Cette idée novatrice et rentable a été brevetée avec succès. Le premier prototype de petite taille a été dévoilé en Italie et devrait bientôt être mis en application dans des installations en Italie et en Égypte.



.Figure III.19 : Un seul réservoir avec la stratification induite par le sel fondu [30]

#### III.2.4.2.1.2.2. Pompes de circulation

Les pompes sont des dispositifs qui transfèrent de l'énergie au fluide, augmentant ainsi son énergie potentielle (par une augmentation de la pression) ou son énergie cinétique (par un mouvement, augmentant le débit).

- **Les pompes volumétriques** : Le débit est dû à la variation du volume occupé par le liquide
- **Les pompes centrifuges** Le déplacement du fluide est le résultat de l'augmentation de son énergie cinétique grâce à la rotation de la roue. Les pompes centrifuges sont les plus couramment employées dans le domaine industriel en raison de leur polyvalence, de leur simplicité et de leur coût abordable. Dans notre contexte, la pompe est spécifiquement une

pompe de circulation, conçue pour maintenir un flux continu de fluides tels que les sels fondus ou l'eau à travers les serpentins de l'échangeur et les conduites du circuit. Pour cette tâche, une pompe de type centrifuge sera utilisée.

#### III.2.4.2.1.2.3 .Les échangeurs de chaleur

Les échangeurs de chaleur sont des dispositifs permettant le transfert de chaleur à des températures basses et moyennes, sans qu'il y ait de changement de phase. Les principaux types d'échangeurs de chaleur sont [31] :

##### III.2.4.2.1.2.3.a. Échangeurs double tube

Ces échangeurs de chaleur se composent de composants simples, formés de deux tubes concentriques reliés aux extrémités par des coudes. Tous les éléments sont interconnectés grâce à des raccords rapides, et les tubes peuvent être facilement remplacés. Les problèmes liés à la dilatation thermique et à l'étanchéité entre le tube intérieur et le tube extérieur sont résolus par l'utilisation de presse-étoupes ou de joints toriques.

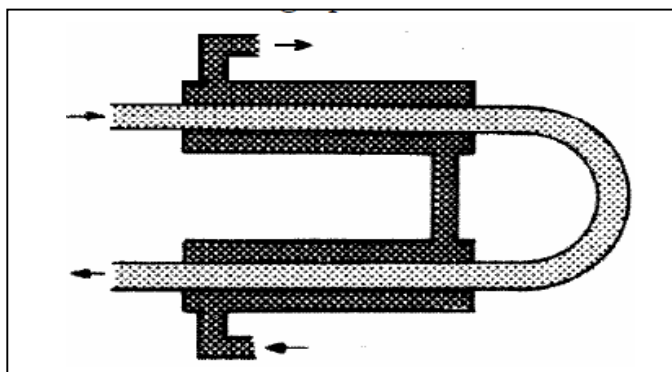


Figure III.20 : Echangeur double tube [31]

Les tubes sont généralement fabriqués en acier et mesurent habituellement entre 12 et 15 ou 20 pieds de long. Dans certains cas, des tubes en verre ou en graphite peuvent également être utilisés

##### III.2.4.2.1.2.3.b. Échangeurs à faisceau et calandre

Ce type d'échangeur de chaleur est largement utilisé dans les unités de transformation des industries chimiques et pétrochimiques. Il se compose d'un faisceau de tubes à l'intérieur d'une enveloppe à travers lesquels circule un deuxième fluide. Cette configuration est également présente dans les condenseurs, les rebouilleurs et les fours à tubes multiples.

L'enveloppe est montée entre deux plaques reliées à des boîtiers de distribution qui facilitent la circulation du liquide à l'intérieur de l'enveloppe par plusieurs passages.

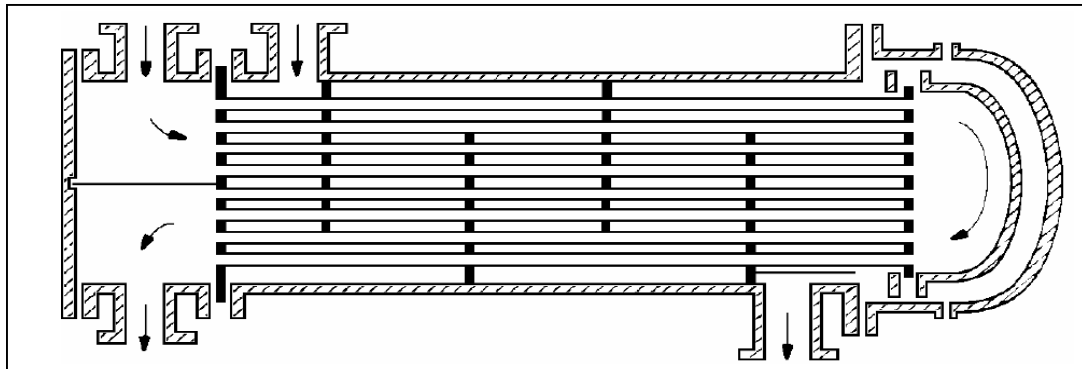


Figure III.21 : Échangeurs à faisceau et calandre [31]

La grille est généralement en acier au carbone, et les brides qui maintiennent les boîtiers de distribution et le couvercle sont habituellement soudées.

#### III.2.4.2.1.2.3.c. Échangeurs à plaques

Les échangeurs de chaleur à plaques se présentent sous de nombreuses formes.

Échangeurs de chaleur à plaques en spirale

Les échangeurs à plaques planes

Les échangeurs à plaques munies d'ailettes

Les échangeurs à tubes munis d'ailettes

Avec ces échangeurs thermiques, les surfaces de transfert de chaleur sont considérablement plus grandes par rapport aux échangeurs à plaque de même taille géométrique. En outre, ils éliminent les problèmes liés aux flux secondaires, aux pertes de charge, ainsi qu'aux problèmes de court-circuit et de dilatation différentielle. Cependant, leur fabrication est plus délicate et coûteuse, et ils sont généralement réservés à des remplacements spécifiques qui n'exigent pas de surfaces de remplacement très étendues en termes absolus.

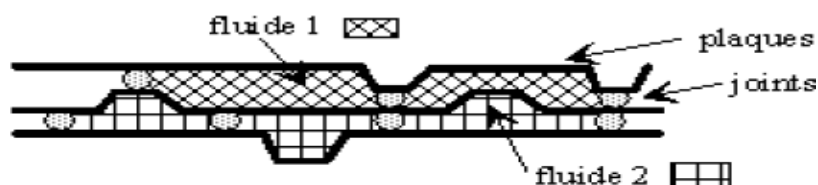
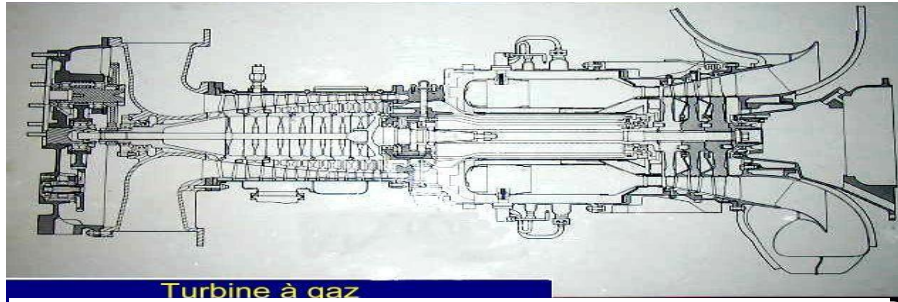


Figure III.22 : Echangeurs à plaques

### III.2.4.3 .Bloc de puissance

#### III.2.4.3 .1 .Définition la turbine à gaz

La turbine à gaz est un dispositif moteur à combustion interne qui fonctionne en produisant un fluide sous pression et à très haute température grâce à un compresseur d'air et une chambre de combustion. Ce fluide, en se détendant à travers les étages de la turbine, libère de l'énergie mécanique pour alimenter la machine destinataire. [32]



**Figure III.23 :** Schéma représentatif de la turbine à gaz. [32]

#### III.2.4.3 .2. Composition d'une turbine à gaz

**III.2.4.3 .2 .a. Compresseur axial :** Le rôle fondamental du compresseur est d'augmenter la pression de l'air atmosphérique.

**III.2.4.3 .2. b. Chambres de combustion :** L'air comprimé provenant du compresseur est mélangé avec le carburant, puis ce mélange s'enflamme. Le résultat de cette combustion est un flux de gaz chauds à haute pression.

**III.2.4.3 .2. c. Section turbine :** Les gaz chauds à haute pression subissent une expansion, ce qui génère la puissance nécessaire pour faire fonctionner la turbine du compresseur d'une part, et de l'autre part, pour effectuer un travail.

#### III.2.4.3 .3 .Principe de fonctionnement

L'air atmosphérique aspiré par le compresseur axial subit une compression avant d'être dirigé vers la chambre de combustion, où le carburant est introduit. Cela permet de créer le mélange souhaité, composé d'air comprimé et de gaz comprimé.

L'allumage généré par la bougie provoque alors la combustion. La chaleur produite dans la chambre de combustion, ainsi que l'énergie émise par les produits de combustion, sont transférées à la première roue de la turbine (HP). À cet endroit, l'énergie thermique est convertie en énergie mécanique.

Une portion de l'énergie engendrée par la turbine est consacrée au fonctionnement du compresseur axial, que ce soit lorsqu'il est désolidarisé du moteur ou lorsque la turbine est en rotation. La portion résiduelle de l'électricité produite est transformée en énergie utilisable, servant ainsi à alimenter la machine réceptrice, en l'occurrence, le compresseur

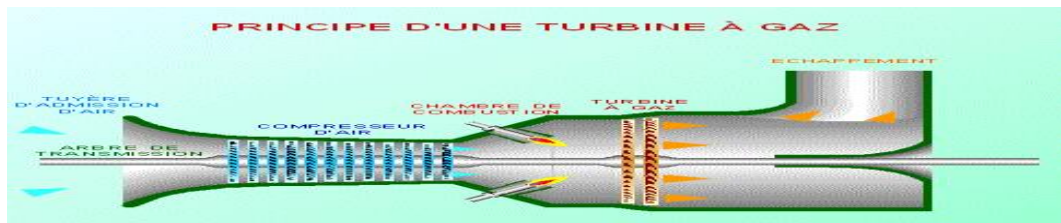


Figure III.24 : Principe de fonctionnement d'une turbine à gaz [32]

#### A/ Les avantages

- cette source d'énergie est à la fois inépuisable et gratuite
- Elle brille également par sa fiabilité, fonctionnant jour et nuit.

#### B/ les inconvénients

- Cette solution révolutionnaire exige un investissement initial considérable.
- Surface au sol importante.

### III.2.4.3.4. Les cycles thermodynamiques

#### III.2.4.3.4. 1. Cycle de Brayton

Le cycle de Brayton conventionnel repose sur l'utilisation d'une turbine à gaz composée de trois éléments principaux : un compresseur, une chambre de combustion et une turbine.

Le compresseur joue le rôle essentiel de comprimer l'air qui pénètre dans la turbine, augmentant ainsi la pression et la température de l'air avant son introduction dans la chambre de combustion. C'est là que le carburant se mélange à l'air comprimé pour ensuite être brûlé, générant ainsi une expansion de gaz chauds à haute pression. Ces gaz s'écoulent par la suite à travers la turbine, entraînant avec eux les pales de celle-ci et produisant ainsi de l'énergie mécanique. [21]



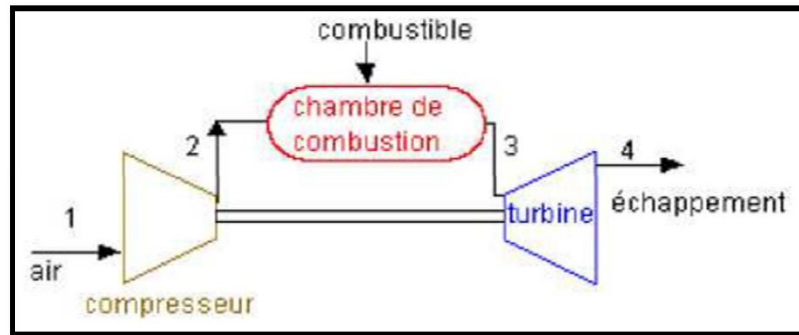


Figure III.25: Représentation schématique d'une turbine à gaz[21]

### III.2.4.3.4. 2. Cycle de Rankine

Le cycle de Rankine, au cœur des systèmes thermodynamiques utilisés dans de nombreuses centrales à vapeur, incarne un principe ingénieux et efficace. Son concept de base consiste à acheminer la chaleur capturée depuis un collecteur vers une chaudière, où l'eau est chauffée jusqu'à atteindre le stade d'évaporation, avec l'aide d'une huile synthétique. Cette vapeur générée est ensuite dirigée vers une turbine, où elle subit un processus de détente, de condensation, puis de compression, avant de retourner au point de départ pour amorcer un nouveau cycle.

Le cycle de Rankine se révèle être une solution polyvalente qui s'applique avec succès aussi bien aux centrales électriques paraboliques cylindriques qu'aux centrales à tour. Cependant, pour qu'il fonctionne de manière optimale, il exige des températures élevées. Sa température maximale de fonctionnement est de  $565^{\circ}\text{C}$ , et une température de vapeur d'entrée inférieure à  $300^{\circ}\text{C}$  engendrera inévitablement une diminution de son efficacité.

En conséquence, pour tirer pleinement parti du cycle de Rankine, il est impératif de disposer d'une superficie de champ solaire conséquente. Cette condition revêt une importance capitale pour maximiser l'efficacité globale du cycle.

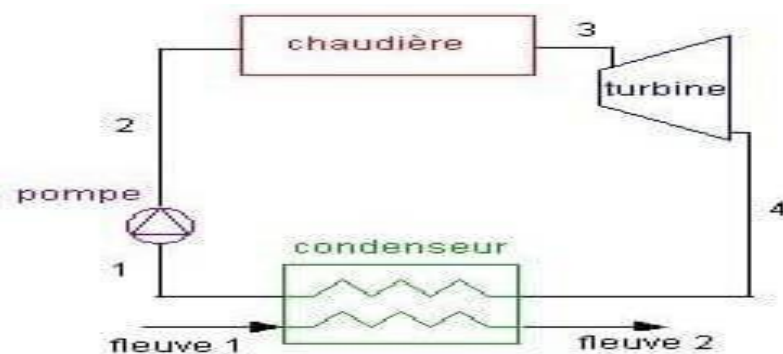


Figure III.26: Schéma d'une centrale à vapeur [22]

## III.3. Conclusion

De ce que nous avons étudié dans ce chapitre, nous concluons que chaque type de centrale solaire

thermodynamique a ses avantages et ses caractéristiques, tout comme le monde est toujours à la recherche de la technologie la plus productive et la plus économique.

Les centrales solaires cylindro-paraboliques sont en fait l'une des technologies de production d'énergie solaire thermique les plus matures et les plus utilisées au monde, car cette technologie présente plusieurs avantages par rapport à d'autres formes d'énergie solaire thermique, telles que les systèmes de tours solaires et les centrales solaires à miroir de Fresnel, notamment en termes de coût, d'efficacité et de fiabilité.

C'est la technique que nous aborderons dans le chapitre suivant.

***Chapitre IV :***  
***Présentation du model***  
***et Bilans thermiques***

---

---

### IV.1. Introduction

Les données opératoires du champ solaire à savoir, le rayonnement direct et diffus qui varient en fonction de l'heure et de la journée de l'année, la répartition et/ou disposition des capteurs solaires (surface du champ, nombre de boucles, ouverture des capteurs, orientation, caractéristiques physiques et thermique des différents matériaux et de fluide caloporteur) ; sont tous des paramètres indispensables pour effectuer la simulation du comportement thermique de ce système de conservation d'énergie solaire.

### IV.2. Présentation Générale de la centrale étudiée

Le système est constitué de collecteurs paraboliques cylindriques d'une capacité électrique totale de 100 MWelect, répartis sur deux surfaces différentes. Chaque surface contient plusieurs anneaux et chaque anneau est composé de quatre modules disposés séquentiellement en rangées. Chaque module est constitué de sections contenant plusieurs miroirs spécialement conçus à cet effet. Le rôle essentiel de ces miroirs est de concentrer la composante directe du rayonnement solaire sur un récepteur situé au foyer de la parabole. Une fois concentrée, cette énergie solaire est utilisée pour chauffer un fluide caloporteur à haute température (HTF), et la température du fluide chauffé peut atteindre jusqu'à 393°C. Ensuite, une série d'échangeurs de chaleur transfère cette chaleur du fluide caloporteur à de l'eau, créant ainsi de la vapeur d'eau dans un générateur de vapeur solaire.

### IV.3. Les caractéristiques du prototype proposé

<b>Caractéristique géométrique et thermique du collecteur</b>			
Diamètre intérieur de l'absorbeur en m	0.065	L'émissivité de l'absorbeur	0.05
Diamètre extérieure de l'absorbeur en m	0.070	L'émissivité de l'enveloppe en verre	0.85
Diamètre intérieur de l'enveloppe en verre en m	0.11	La transmissibilité de l'enveloppe en verre	0.95
Diamètre extérieur de l'enveloppe en verre en m	0.112	L'absorptance de l'enveloppe en verre	0.05
Concentration de panneau	82	Coefficient de réflexion de l'enveloppe en verre	0.05
Coefficient d'absorption	0.90	Coefficient de réflexion de l'absorbeur	0.15
<b>Longueur de module en m</b>			<b>600</b>

**Tableau IV.2:** Les paramètres géothermique et thermique du collecteur

### IV.4. présentation du modèle

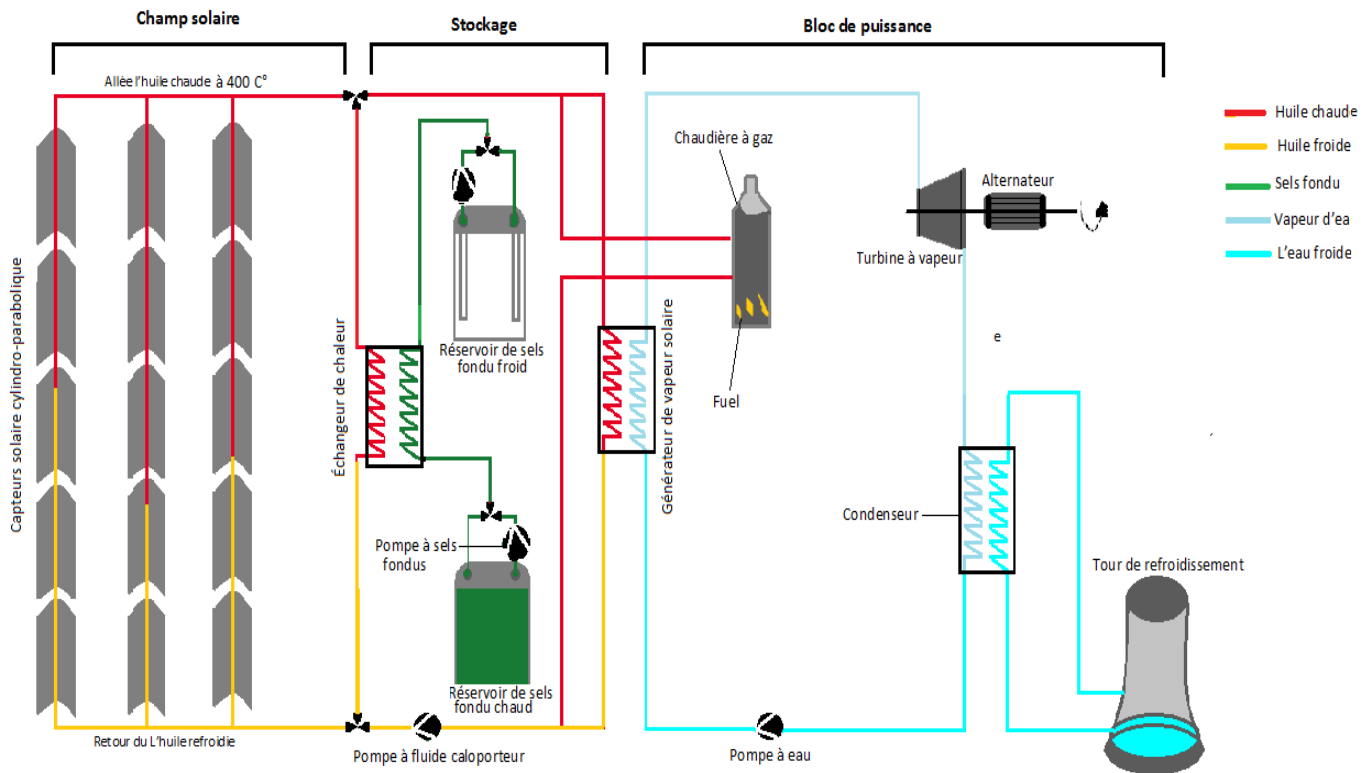


Figure IV.1: Schéma d'une installation de centrale solaire cylindro-parabolique

### IV.5. Bilan thermique

#### IV.5.1. Bilan thermique sur le fluide

Diverses approches sont disponibles pour évaluer le bilan énergétique d'une ligne réceptrice en vue de la modélisation. Parmi elles, il convient de mentionner la méthode de la résistance thermique et une technique électrométrique permettant de calculer la température de chaque composant en utilisant une discrimination unidimensionnelle. La figure ci-dessous illustre le flux de puissance vers le récepteur [21]:

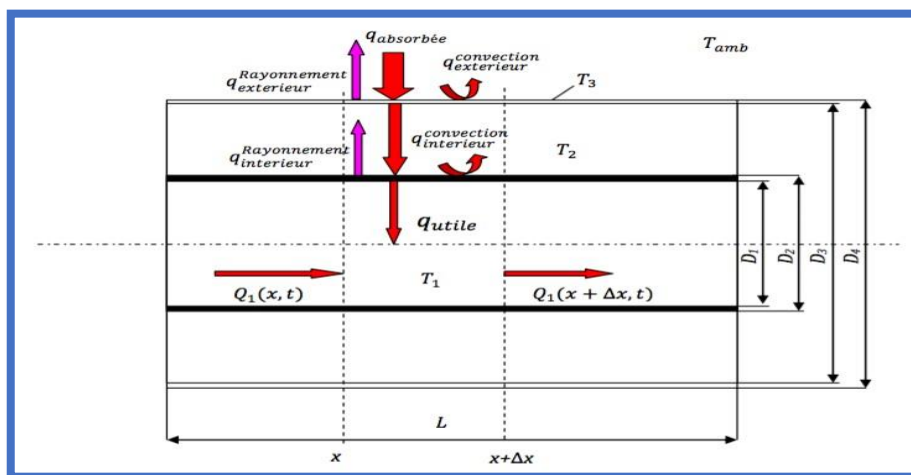


Figure IV.2 : Un diagramme du bilan énergétique de l'élément x du capteur CP [19].

Le bilan thermique sur le fluide est donné 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 :

$$\frac{dT_1(x,t)}{dt} + \vartheta \frac{dT_1(x,t)}{dx} = \frac{q_{utile}(x,t)}{\rho_1 C p_1 A_1} \quad (IV.1)$$

$\vartheta$ : La vitesse d'écoulement

$$A_1: \text{La section transversale de tube} \quad A_1 = \frac{\pi}{4} D_1^2 \quad (IV.2)$$

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

$$q_{utile} = h_1 A \Delta T = h_1 \pi D_1 (T_2 - T_1) \quad (IV.3)$$

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

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

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

$T_1$ : La température de fluide

Pour introduire :

Simplification En raison de la convection forcée du réfrigérant liquide dans le tube absorbeur, ce qui suit s'applique :

$Q_{gagnée}$  est calculé à l'aide de l'équation de Dittus-Boelter pour un débit pleinement développé

En tube rond lisse. Le nombre de Nusselt local est donc donné par l'équation :

$$N_u = 0.0023 R_{e1}^{0.8} P_{r1}^{0.4} = \frac{h_1 D_1}{\lambda_1} \quad (IV.4)$$

$$R_e = 4 \frac{\rho_1 V_1}{\pi D_1 \mu_1} \quad (IV.5)$$

$\lambda_1$ : La conduction thermique du fluide

$\mu_1$ : La viscosité dynamique du fluide

$$\mu_1 = \vartheta_1 \rho_1 \quad (IV.6)$$

$\vartheta_1$ : La viscosité cinématique du fluide

$$\text{Le nombre de Prandtl est donné par :} \quad P_{r1} = \frac{\mu_1 C p_1}{\lambda_1} \quad (IV.7)$$

Les propriétés du fluide caloporteur  $C p_1$ ,  $\lambda_1$ ,  $\mu_1$  et  $\rho_1$  sont en fonction de la température  $T_2$ .

### IV.5.2. Bilan thermique du tube absorbeur

Pour le tube absorbeur le bilan thermique s'écrit :

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

$$\frac{d\Delta Q_2(x, t)}{dt} = (q_{absorbee}(t) - q_{interieur}(x, t) - q_{utile}(x, t)) \Delta_x$$

La simplification de l'équation donne :

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

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

La consommation électrique par surface d'ouverture de l'unité peut être donnée comme suit

$$q_{absorbee} = I. \rho. \gamma. \tau. C_G \quad (IV.8)$$

$q_{interieur}$  : La quantité d'énergie qui indique le transfert de chaleur par et à travers la convection Rayonnement entre le tube absorbeur et l'enveloppe en verre.

$$q_{interieur} = q_{interieur}^{convection} + q_{interieur}^{rayonnement}$$

Convection dans l'espace annulaire entre le tube absorbeur et l'ampoule en verre

Estimé à partir du rapport de convection naturelle entre deux cylindres horizontaux

Et coaxiaux, Cependant, l'enveloppe de verre est généralement plus froide que le tube. Absorbeur ( $T_2 > T_3$ ):

$$q_{interieur}^{convection} = \frac{2\pi\lambda_{eff}}{\ln\frac{D_3}{D_2}} (T_2 - T_3) \quad (IV.9)$$

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

$\lambda_{eff}$  La conductivité thermique de l'air est un indicateur de sa capacité à transférer la chaleur, et l'air immobile doit transférer la même quantité de chaleur que l'air en mouvement [33] :

$$\frac{\lambda_{eff}}{\lambda_{air}} = 0.386 \left( \frac{Pr^{air}}{0.861 + Pr^{air}} \right)^{\frac{1}{4}} (F_{cyl} R_{aL})^{\frac{1}{4}} \quad (IV.10)$$

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

$R_{aL}$ : Le nombre de Rayleigh

$$F_{cyl} = \frac{(\ln\frac{D_3}{D_2})^4}{L^3 (D_2^{\frac{-1}{5}} + D_3^{\frac{-3}{5}})^5} \quad (IV.11)$$

$$R_{aL} = \frac{g\beta_{air}(T_2 - T_3)}{\nu_{air}\alpha_{air}} L^3 \quad (IV.12)$$

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

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

$\alpha_{air}$ : Absorptivité....

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

Transfert de chaleur par rayonnement  $q_{interieur}^{rayonnement}$  Concentrique et horizontal

Le tube absorbeur et l'enveloppe en verre peuvent être exprimés par la relation suivante [34] :

$$q_{interieur}^{rayonnement} = \frac{\pi D_2 \sigma (T_2^4 - T_3^4)}{\frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_3} \left(\frac{D_2}{D_3}\right)} \quad (IV.13)$$

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

$\sigma$ : Constant de Stefan – Boltzmann

Alors:

$$q_{interieur} = \frac{2\pi\lambda_{eff}}{\ln\frac{D_3}{D_2}} (T_2 - T_3) + \frac{\pi D_2 \sigma (T_2^4 - T_3^4)}{\frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_3} \left(\frac{D_2}{D_3}\right)} \quad (IV.14)$$

### IV.5.3. Bilan thermique de l'enveloppe en verre

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

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

$$\frac{dT_3(x, t)}{dt} = \frac{1}{\rho_3 C p_3 A_3} (q_{absorbee}(t) - q_{interieur}(x, t))$$

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

$$q_{exterieur}(x, t) = q_{exterieur}^{convection} + q_{exterieur}^{rayonnement}$$

$$q_{exterieur}^{convection} = h_3 \pi D_4 (T_3 - T_{amb}) \quad (IV.15)$$

Pour introduire  $h_3$ :

$$Nu_3 = \frac{h_3 D_3}{\lambda_3} \quad (IV.16)$$

$$Nu_3 = 0.3 + \frac{0.62 Re_3^{\frac{1}{2}} Pr_3^{\frac{1}{3}}}{[1 + (\frac{0.4}{Pr_3})^{\frac{2}{3}}]^{\frac{1}{4}}} \left[ 1 + \left( \frac{Re_3}{2820000} \right)^{\frac{5}{8}} \right]^{\frac{4}{5}} \quad (IV.17)$$



$$Re_3 = \frac{\rho_{air\ amb} V_{vent} D_4}{\mu_{air\ amb}} \quad (IV.18)$$

$$q_{exterieur}^{rayonnement} = \varepsilon_3 \sigma \pi D_4 (T_3^4 - T_{amb}^4) \quad (IV.19)$$

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

#### IV.5.4. Pertes thermiques

Quand les rayons du soleil atteignent les récepteurs au-dessus La température ambiante de fera perdre de la chaleur au récepteur. Ces types de pertes sont la convection, le rayonnement et la conduction, qui en dépendent la différence de température entre le récepteur et l'environnement, et la géométrie du récepteur. Le formulaire est présenté dans le formulaire ci-dessous [35] :

$$Q_P = Q_{P.cov} + Q_{P.Ray} + Q_{P.cod} \quad (IV.20)$$

##### IV.5.4.1. Perte par conduction

Les pertes par conduction sont généralement faibles par rapport aux pertes convectives et radiatives. Dans la plupart des analyses, elles s'accompagnent souvent de la perte de la composante convective.

$$Q_{cod} = \lambda_{abs} A_{abs} (T_{abs} - T_{amb}) / \Delta_z \quad (IV.21)$$

##### IV.5.4.2. Perte par convection

En ce qui concerne une plaque plane, le phénomène de convection reste relativement peu étudié. Il dépend de la vitesse et de la direction du vent par rapport à l'emplacement. Ces pertes sont directement liées à la surface du matériau absorbant et à la différence entre la température de la surface absorbante et la température ambiante, laquelle est influencée par les caractéristiques du matériau absorbant :

$$Q_{cov} = h_{cov} A_{abs} (T_{abs} - T_{amb}) \quad (IV.22)$$

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

$$h_{cov} = \frac{Nu \lambda_{air}}{d} \quad (IV.23)$$

$d$ : diamètre de récepteur.

$\lambda_{air}$ : Conductivité thermique de l'air

Le nombre de Nusselt  $Nu$  est donné par :

$$Nu = 0.664 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (IV.24)$$

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

$$Re = \frac{v d}{\nu_{air}} \quad (IV.25)$$

#### IV.5.4.3. Perte par Rayonnement

Les pertes de chaleur radiante revêtent une importance significative dans les récepteurs opérant à des températures légèrement supérieures à l'ambiante, et elles prédominent dans les capteurs fonctionnant à des températures élevées. La perte de chaleur radiante est proportionnelle à l'émissivité de la surface et à la différence de température à la quatrième puissance. Cette relation est exprimée sous la forme de l'équation suivante :

$$Q_{Ray} = \varepsilon_{abs} \sigma A_{abs} (T_{abs}^4 - T_{ciel}^4) \quad (IV.26)$$

Ou:

$\varepsilon_{abs}$  : Facteur émissivité de l'absorbeur

$\sigma$  : Constante de Stefan – Boltzmann

$T_{ciel}$  : Température du ciel

La température radiante équivalente du ciel est influencée par la densité et l'humidité de l'air. Lorsque l'humidité relative est élevée au niveau de la mer, on peut généralement supposer que la température du ciel est équivalente à la température ambiante. Toutefois, en cas de faible humidité relative ou à haute altitude, la température radiante du ciel peut être jusqu'à 6°C plus basse que la température ambiante, [35] Cela est exprimé par la formule de Willier (1967) :

$$T_{ciel} = T_{amb} - \sigma \quad (IV.27)$$

Et par la formule de Swinbank :

$$T_{ciel} = 0.0552 T_{amb}^{1.5} \quad (IV.28)$$

On obtient la forme suivante :

$$Q_{Ray} = A_{abs} h_{Ray} (T_{abs} - T_{amb}) \quad (IV.29)$$

$$h_{Ray} = \varepsilon_{abs} \sigma \frac{T_{abs}^4 - T_{ciel}^4}{T_{abs} - T_{amb}} \quad (IV.30)$$

#### IV.5.5. Puissance utile $q_{util}$

L'énergie utile correspond à l'énergie que le système recueille au niveau du ménage, et son calcul peut être effectué à l'aide de l'expression suivante [36] :

$$q_u = q_{abs} + q_{perte} \quad (IV.31)$$

#### IV.5.6. Rendement instantané du concentrateur solaire $\eta$

L'évaluation du rendement d'un capteur solaire représente une étape cruciale et incontournable pour appréhender le fonctionnement de votre système. Ce rendement est défini comme la proportion entre l'énergie thermique captée par le récepteur et l'énergie reçue lors de l'ouverture du condenseur. [36]

$$\eta = \frac{q_u A_a}{A_w (I_b + I_d)} \quad (IV.32)$$

### IV.6. Présentation du modèle mathématique issu des bilans thermiques

Vous trouverez ci-dessous les équations du bilan thermique en régime permanent pour l'absorbeur, le verre et le liquide de refroidissement.

#### IV.6.1. Pour l'absorbeur

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

$$q_{r.abs} - q_{cv.f} - q_{cv.int} - q_{ray.int} = 0 \quad (IV.33)$$

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

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

$$\frac{q_{r.abs}}{\pi D_2} = h_{cv.f} \frac{D_1}{D_2} \left( T_{abs} - \frac{T_{fe} + T_{fs}}{2} \right) + h_{cv.int} (T_{abs} - T_v) + \sigma \varepsilon_{abs} (T_{abs}^4 - T_v^4)$$

$$\frac{q_{r.abs}}{\pi D_2} = \sigma \varepsilon_{abs} T_{abs}^4 + \left( h_{cv.f} \frac{D_1}{D_2} + h_{cv.int} \right) T_{abs} - \sigma \varepsilon_{abs} T_v^4 - h_{cv.int} T_v - h_{cv.f} \frac{D_1}{D_2} \left( \frac{T_{fe} + T_{fs}}{2} \right)$$

On obtient :

$$\varphi_{r.abs} = A_1 T_{abs}^4 + B_1 T_{abs} - A_1 T_v^4 - C_1 T_v - E_1 \quad (IV.34)$$

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

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

#### IV.6.2. Pour la vitre

Son bilan thermique global est :

$$q_{r.v} + q_{cv.int} + q_{ray.int} - q_{ray.ext} - q_{cv.ext} = 0 \quad (IV.35)$$

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

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

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

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

On obtient:

$$\varphi_{r.v} = A_2 T_v^4 + B_2 T_v - C_2 T_{abs}^4 - E_2 T_{abs} - F_2 \quad (IV.36)$$

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

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

### IV.6.3. Fluide caloporteur HTF

De la première loi de la thermodynamique appliquée entre deux sections d'un élément  $dz$  on arrive à :

$$q_{cv.f} = m \cdot C_{Pf} \frac{dT_f(x)}{dx} \quad (IV.37)$$

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

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

On arrive à l'équation différentielle suivante :

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

Avec  $\alpha = \frac{h_{cv.f} \pi D_1}{m \cdot C_{Pf}}$

La solution de cette équation est de la forme :

$$T_f(x) = ce^{-\alpha x} + T_{abs} \quad (IV.38)$$

Et les conditions aux limites correspondantes sont :

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

D'ou

$$T_{fs} = (T_{fe} - T_{abs})e^{-\alpha L} + T_{abs} \quad (IV.39)$$

### IV.7. Conclusion

Les concentrateurs cylindro-paraboliques sont les plus utilisables par rapport aux autres types de capteurs de concentration, ils nous permettent d'avoir des températures de sortie élevées, ce qui se traduit par un bon rendement au niveau de la turbine et de l'échangeur.

Nous avons abordé principalement dans ce chapitre les équations de transferts thermique qui régissent la centrale cylindro-paraboliques. Ainsi, le système sera résolu par l'une des méthodes de résolution du système d'équations à l'aide du logiciel Matlab.



***Chapitre V :***  
***Méthode de calcul***  
***et interprétation des***  
***résultats***

---

## V.1. Introduction

Les bilans thermiques que nous avons précédemment établis, en ce qui concerne le fluide caloporteur, l'absorbeur (ou récepteur) et l'enveloppe protectrice (la vitre), serviront de base à la création d'un modèle mathématique. Ce modèle sera résolu en utilisant la méthode itérative de Newton-Raphson, une approche mathématique puissante pour déterminer les profils de températures et les puissances thermiques associées à chaque composant du système.

Cette méthode nous permettra de mieux comprendre et de prédire avec précision comment les températures évoluent à l'intérieur du fluide caloporteur, de l'absorbeur et de la vitre tout au long du fonctionnement du système. Il nous fournira également des informations sur les puissances thermiques impliquées, notamment la puissance thermique reçue du rayonnement solaire

## V.2. Résolution mathématique du système d'équations

Ce système d'équations est résolu à l'aide de la méthode de Newton-Raphson.

### V.2.1. Méthode de Newton-Raphson

#### \* Principe de la méthode

En analyse numérique, la méthode de Newton, ou méthode de Newton-Raphson, dans son application la plus simple, est un algorithme efficace pour trouver numériquement l'approximation exacte de zéro (ou de la racine carrée) d'une fonction réelle d'une variable réelle. Cette méthode doit son nom aux mathématiciens anglais Isaac Newton (1643-1727) et Joseph Raphson (probablement 1648-1715), qui l'ont décrite pour la première fois pour trouver une solution polynomiale. Thomas Simpson (1710-1761) élargit considérablement la portée de l'algorithme en montrant, grâce à la notion de dérivée, comment il peut être utilisé pour calculer la solution d'une équation non linéaire qui ne peut être un polynôme et un système formé de cette équation [37].

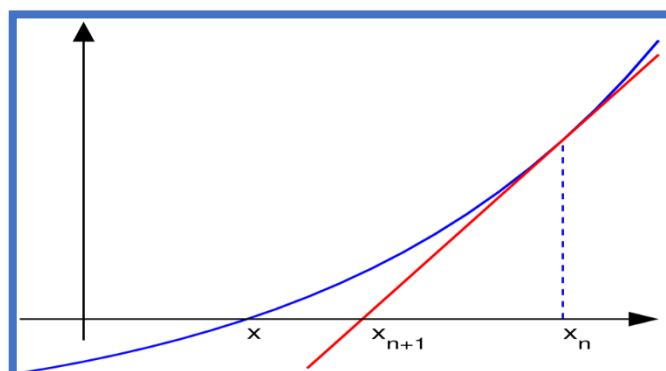


Figure V.1: Interprétation graphique de la méthode [37].

La méthode la plus couramment utilisée pour résoudre des équations algébriques non linéaires est la méthode de Newton-Raphson. Cette méthode est une technique d'approximation successive basée sur



une estimation initiale et utilise la distribution en série de Taylor. Envisagez de résoudre une équation non linéaire unidimensionnelle donnée par [38] :

$$f(x) = c$$

Si  $x_0$  est la solution initiale et  $\Delta x_0$  est la petite solution correcte, alors :

$$f(x_0 + \Delta x_0) = c$$

On le trouve en décomposant la fonction de la série de Taylor autour de  $x_0$  :

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

En supposant que l'erreur  $\Delta x_0$  est très petite, les termes de grands ordre peuvent être négligés, soit :

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

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

Nous ajoutons  $\Delta x_0$  à l'hypothèse initiale et trouvons la deuxième approximation

$$x_1 = x_0 + \Delta x_0 = x_0 + \frac{\Delta c_0}{\left(\frac{df}{dx}\right)} \quad (\text{V.2})$$

$$x_2 = x_1 + \Delta x_1 = x_1 + \frac{\Delta c_1}{\left(\frac{df}{dx}\right)} \quad (\text{V.3})$$

$$\Delta c_1 = c - f(x_1) \quad (\text{V.4})$$

$$x_3 = x_2 + \Delta x_2 = x_2 + \frac{\Delta c_2}{\left(\frac{df}{dx}\right)} \quad (\text{V.5})$$

Une autre application de cette méthode est l'algorithme de Newton Raphson :

$$\Delta c_k = c - f(x_k) \quad (\text{V.6})$$

$$\Delta x_k = \frac{\Delta c_k}{\left(\frac{df}{dx}\right)} \quad (\text{V.7})$$

$$x_{(k+1)} = x_k + \Delta x_k \quad (\text{V.8})$$

On peut les réarranger comme :

$$\Delta c_k = J_k \cdot \Delta x_k \quad (\text{V.9})$$

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

Cette relation montre que l'équation non linéaire  $f(x) - c = 0$  est approximée par la tangente de la courbe. Considérons la tangente à la courbe représentative  $f$  en  $(x_0, f(x_0))$ . Soit  $x_1$  l'abscisse de l'intersection de la tangente avec l'axe des abscisses. Nous pouvons voir que  $x_1$  donne une meilleure estimation de la résolution de l'équation  $f(x)=0$  que  $x_0$ . En partant de  $x_1$ , nous traçons la tangente de  $f$  en  $(x_1, f(x_1))$ . Notez  $x_2$  l'abscisse de l'intersection de cette deuxième tangente avec l'axe des abscisses.  $x_2$  Estime la solution de  $f(x)=0$  mieux que  $x_1$ . Ce processus est répété jusqu'à ce que la précision requise soit atteinte [38].

## V.2.2. Application au modèle

### V.2.2.1. Pour l'absorbeur

Soit:

$$R_{abs}(T_{abs}) = A_1 T_{abs}^4 + B_1 T_{abs} - A_1 T_v^4 - C_1 T_v - E_1 - \varphi_{r.abs} \quad (V.10)$$

$$R'_{abs}(T_{abs}) = \frac{\partial R}{\partial T_{abs}} = 4A_1 T_{abs}^3 + B_1 \quad (V.11)$$

On a:

$$T_{abs}^{i+1} = T_{abs}^i - \frac{R_{abs}}{R'_{abs}} \quad (V.12)$$

Tel que:

$$|T_{abs}^{i+1} - T_{abs}^i| < \varepsilon$$

### V.2.2.2. Pour la vitre

$$R_v(T_v) = A_2 T_v^4 + B_2 T_v - C_2 T_{abs}^4 - E_2 T_{abs} - F_2 - \varphi_{r.v} \quad (V.13)$$

$$R'_v(T_v) = \frac{\partial R}{\partial T_v} = 4A_2 T_v^3 + B_2 \quad (V.14)$$

On a:

$$T_v^{i+1} = T_v^i - \frac{R_v}{R'_v} \quad (V.15)$$

Tel que:

$$|T_v^{i+1} - T_v^i| < \varepsilon$$

### V.2.2.3. Pour le fluide HTF

La température de sortie du fluide est un résultat direct de l'équation:

$$T_{fs}^{i+1} = (T_{fe} - T_{abs}^i)e^{-\alpha L} + T_{abs}^i \quad (V.16)$$

### V.3. Organigramme de la simulation

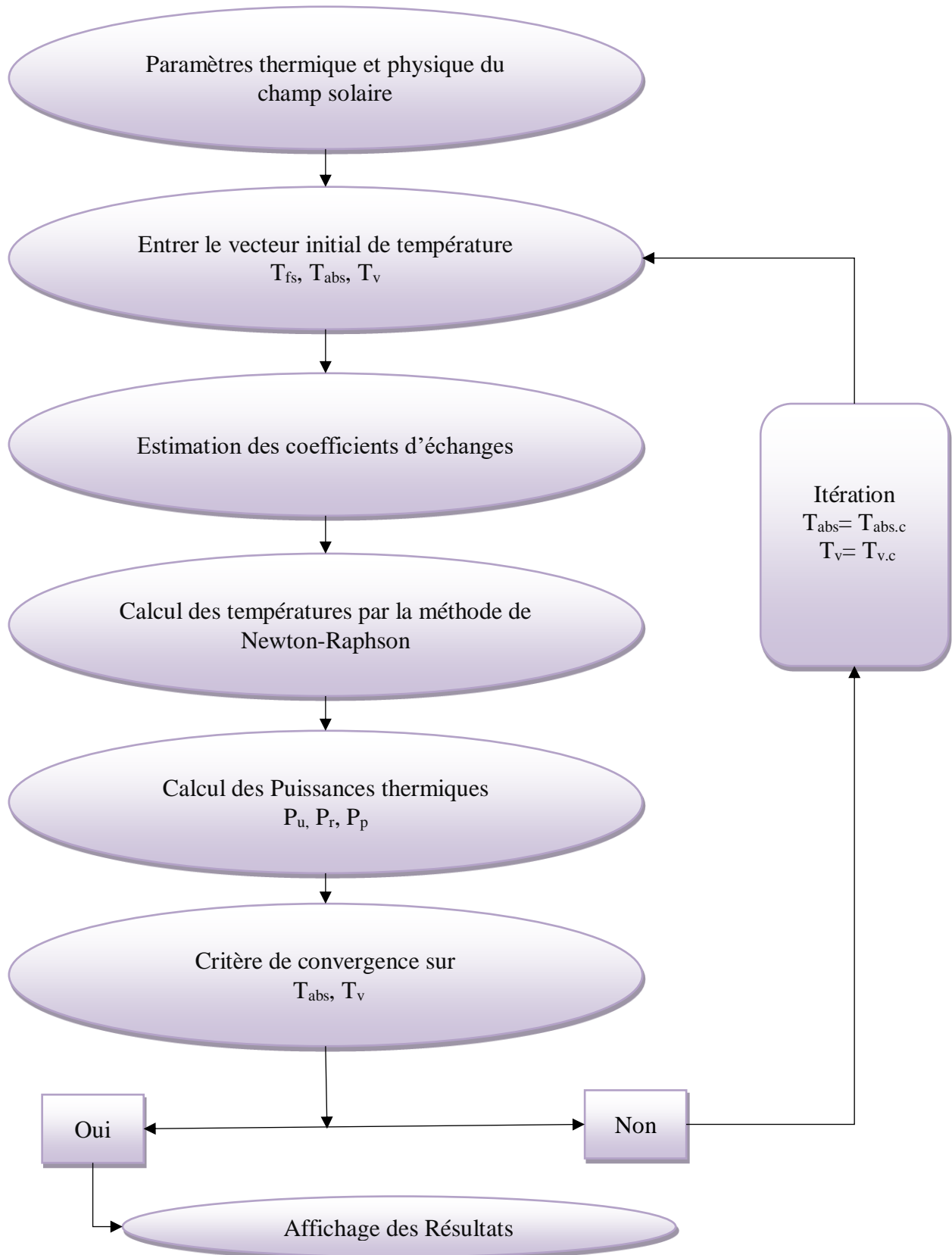


Figure V.2 : Organigramme de simulation.

### V.4. Présentation des résultats de simulation du champ solaire

#### V.4.1. L'effet de l'éclairement solaire reçu (DNI) sur les températures de sortie du fluide caloporteur, du récepteur et de la vitre

On a supposé que :  $T_{fe} = 550K$ ,  $m_f = 7Kg/s$ ,  $L = 600 m$

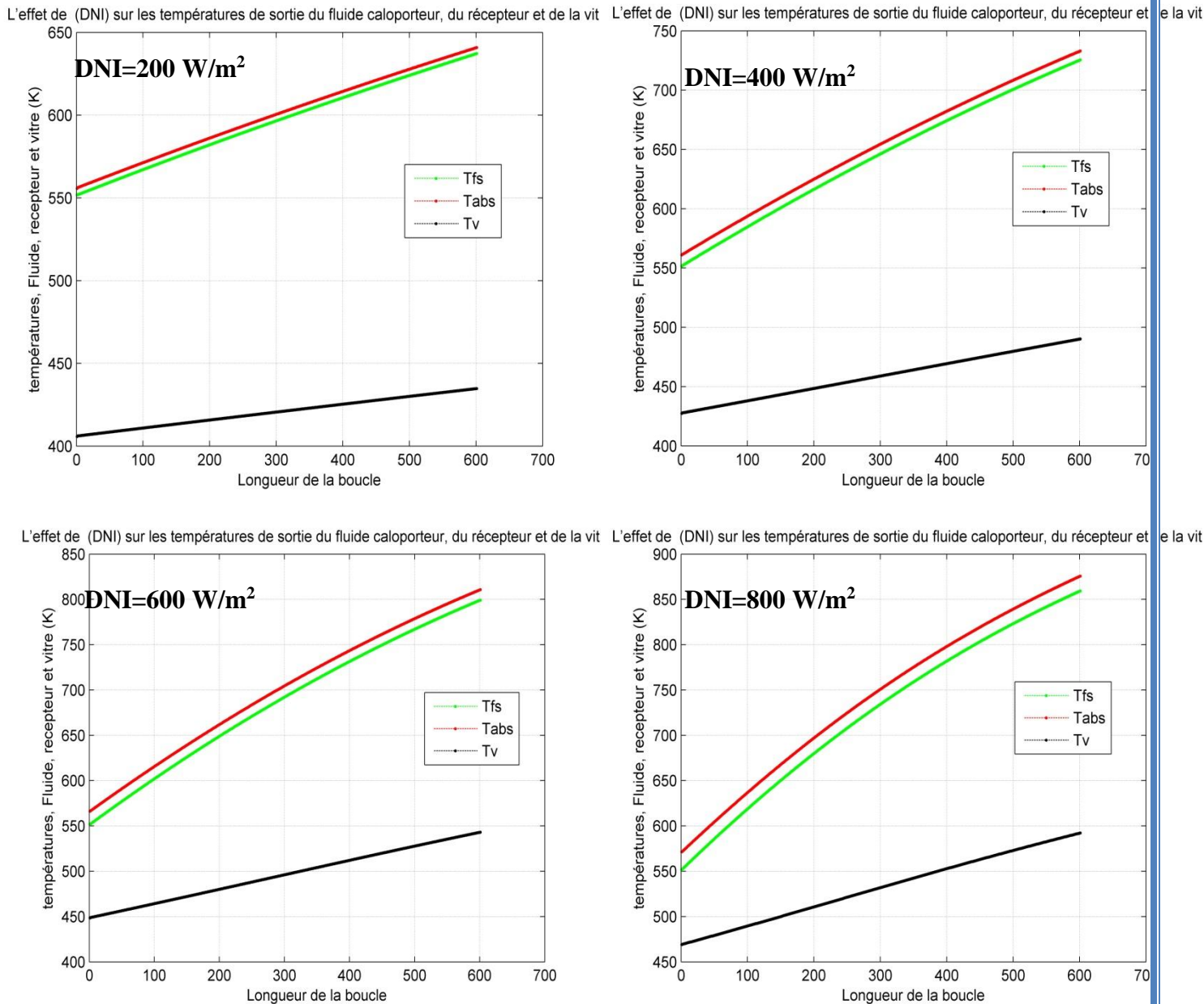


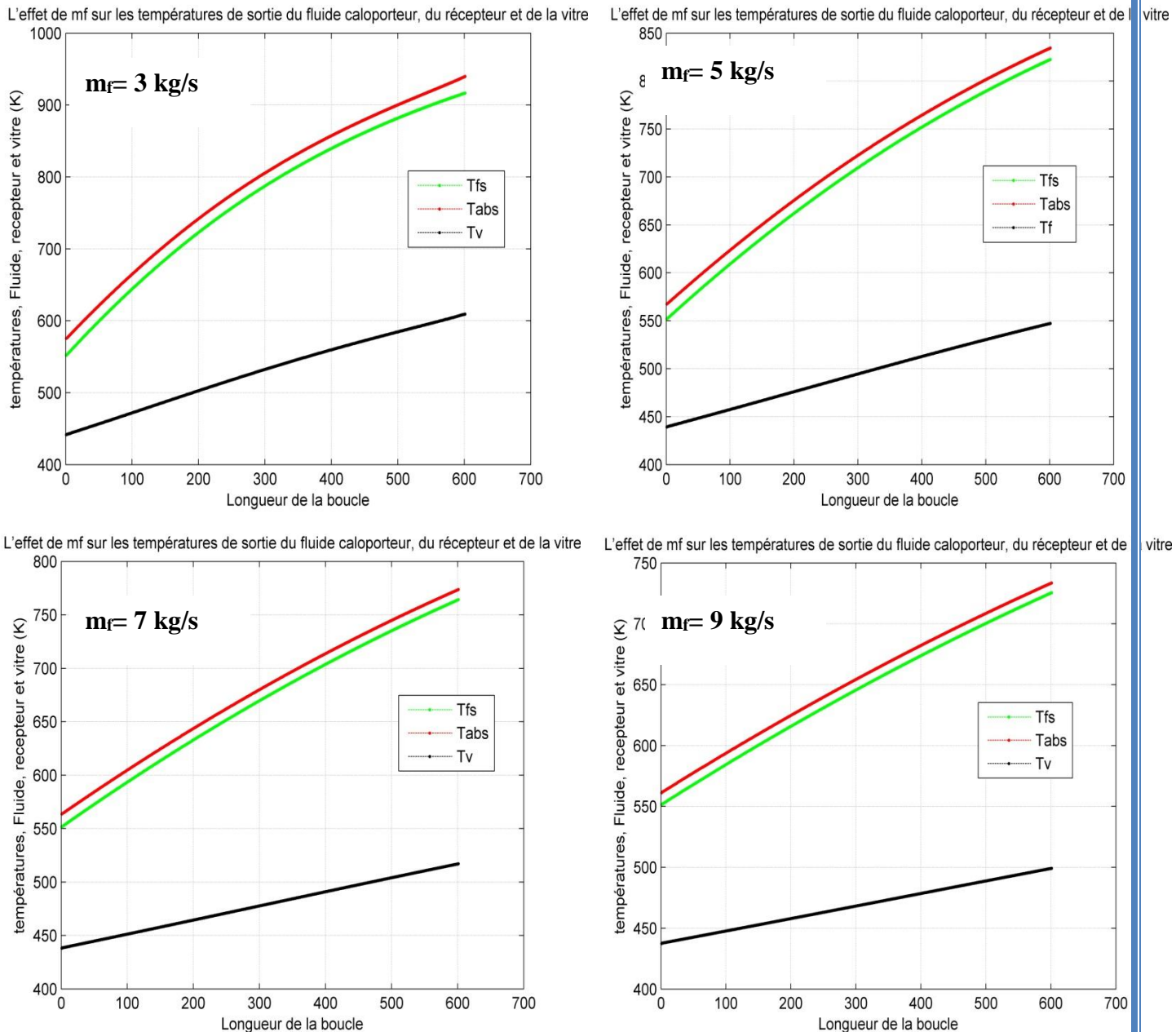
Figure V.3 : L'effet de l'éclairement solaire reçu (DNI) sur les températures de sortie du fluide, du récepteur et de la vitre.

La figure (V.3) représente la variation des températures de sortie du fluide, du récepteur et de la vitre en fonction de l'éclairement solaire reçu (Direct Normal Irradiante, DNI). On remarque que les températures du

fluide, du récepteur et de la vitre augmentent proportionnellement avec l'augmentation de l'éclairement reçu. De plus, la température de la vitre reste nettement inférieure à celles du fluide et du tube absorbeur. Cette disparité s'explique par le fait que la vitre a une capacité d'absorption relativement faible.

**V.4.2. L'effet du débit massique sur les températures de sortie du fluide, du récepteur et de la vitre**

On a supposé que :  $T_{fe} = 550K$ ,  $DNI=500W/m^2$ ,  $L= 600 m$ .



**Figure V.4 :** L'effet du débit massique sur les températures de sortie du fluide, du récepteur et de la vitre

La figure (V.4) représente l'effet du débit massique sur les températures de sortie du fluide, du récepteur et de la vitre, on remarque que plus le débit est faible, plus la température est élevée.

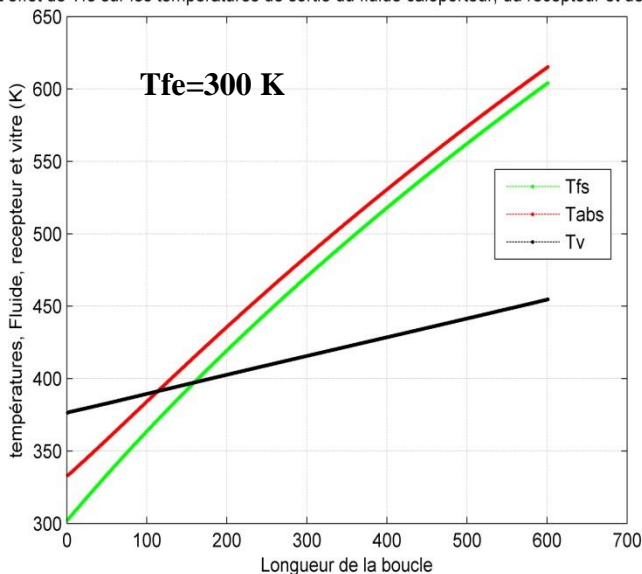
Cette diminution du débit massique permet au fluide de rester plus longtemps en contact avec le récepteur,

ce qui lui donne plus de temps pour absorber de la chaleur et vis-versa.

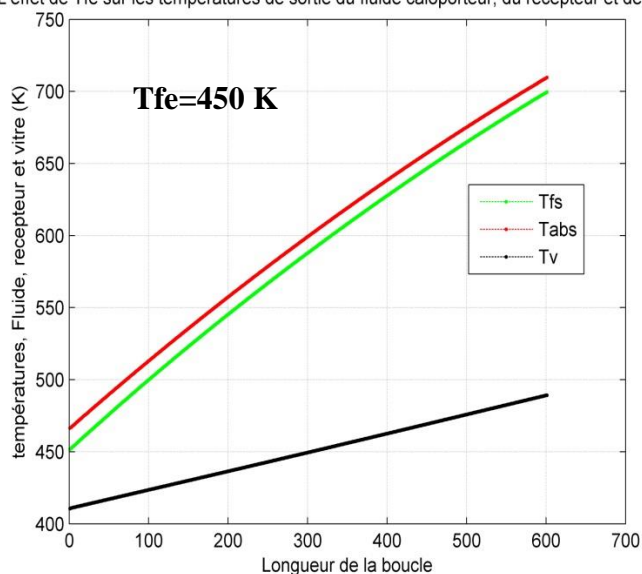
### V.4.3. L'effet de la température d'entrée du fluide sur les températures de sortie du fluide, du récepteur et de la vitre

on a supposé que :  $DNI=500W/m^2$ ,  $m_f=7kg/s$  et  $L= 600m$ .

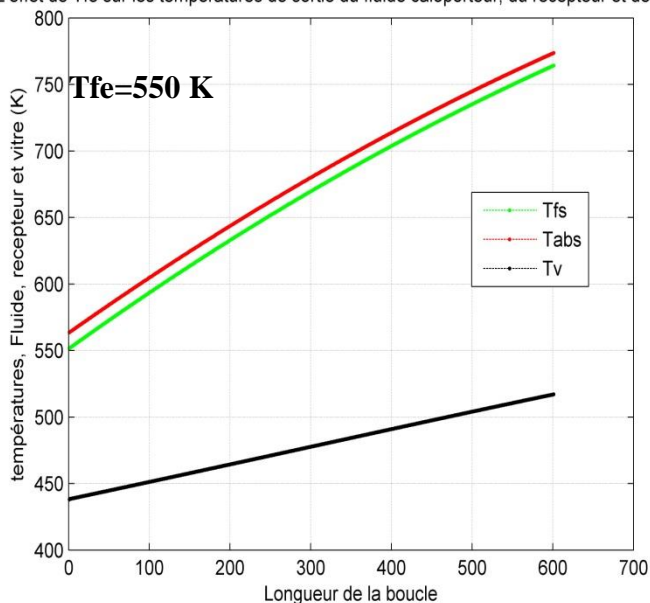
L'effet de Tfe sur les températures de sortie du fluide caloporteur, du récepteur et de la vitre



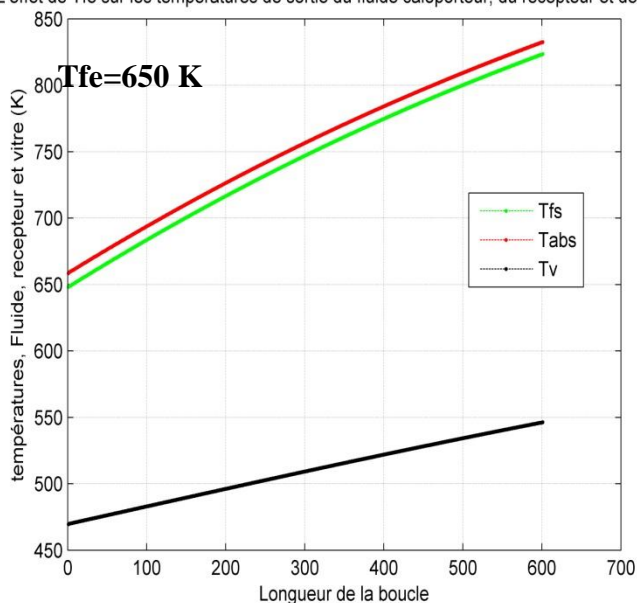
L'effet de Tfe sur les températures de sortie du fluide caloporteur, du récepteur et de la vitre



L'effet de Tfe sur les températures de sortie du fluide caloporteur, du récepteur et de la vitre



L'effet de Tfe sur les températures de sortie du fluide caloporteur, du récepteur et de la vitre



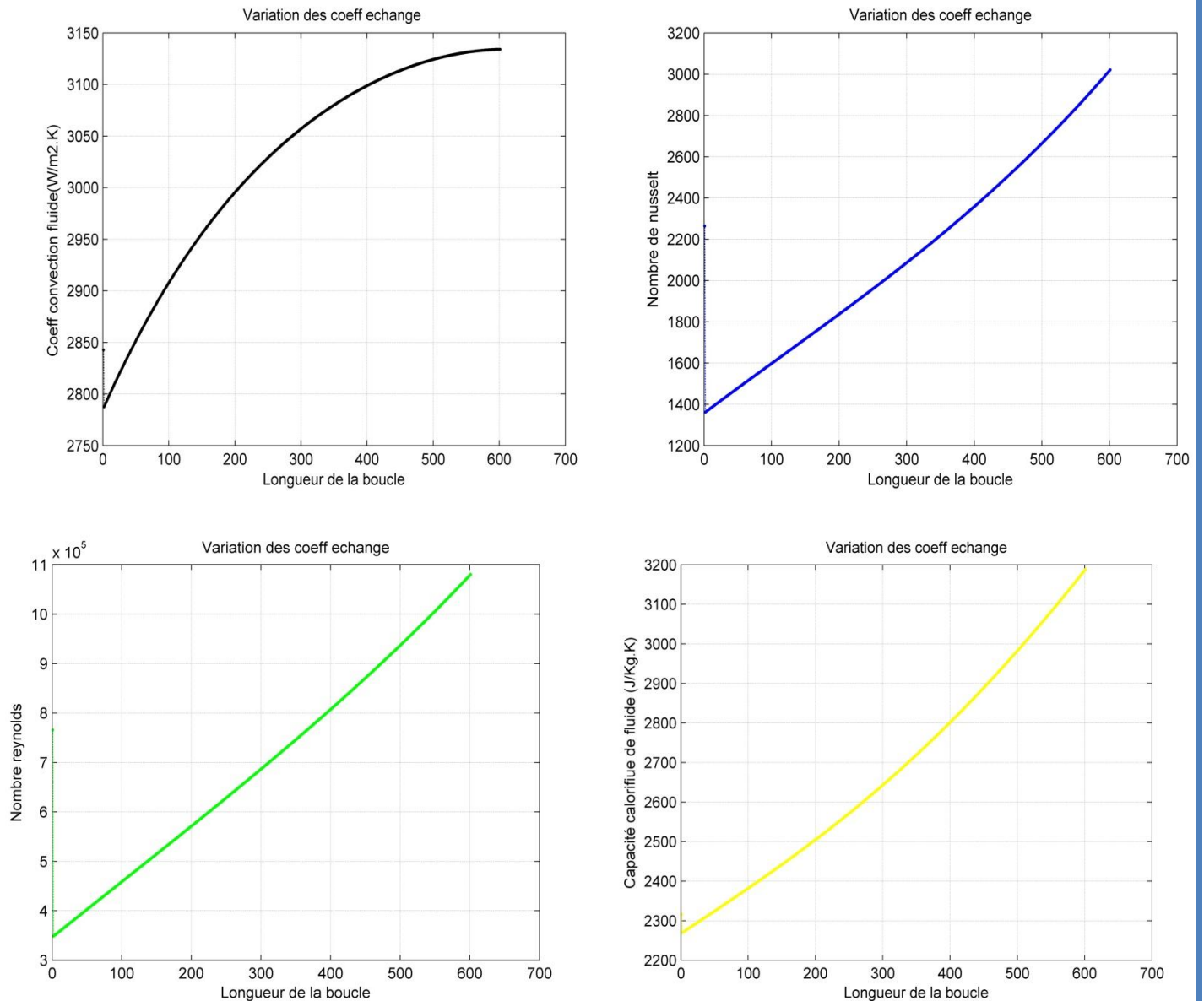
**Figure V.5** : L'effet de la température d'entrée du fluide sur les températures de sortie du fluide, du récepteur et de la vitre

La figure (V.5) représente l'effet des variations de la température d'entrée du fluide sur les températures de

sortie du fluide, du récepteur et de la vitre. On remarque sur ces courbes que la température du récepteur est sensiblement influencée par la température du fluide d'entrée, contrairement à la température de la vitre. Cette variation s'explique par le fait que le récepteur se trouve en contact direct avec le fluide caloporteur avec un coefficient d'échange par convection relativement élevé.

**V.4.4. Variation des coefficients d'échange**

On a supposé que :  $T_{fe} = 550K$ ,  $m_f = 7 \text{ Kg/s}$ ,  $L = 600m$  et  $DNI = 500W/m^2$



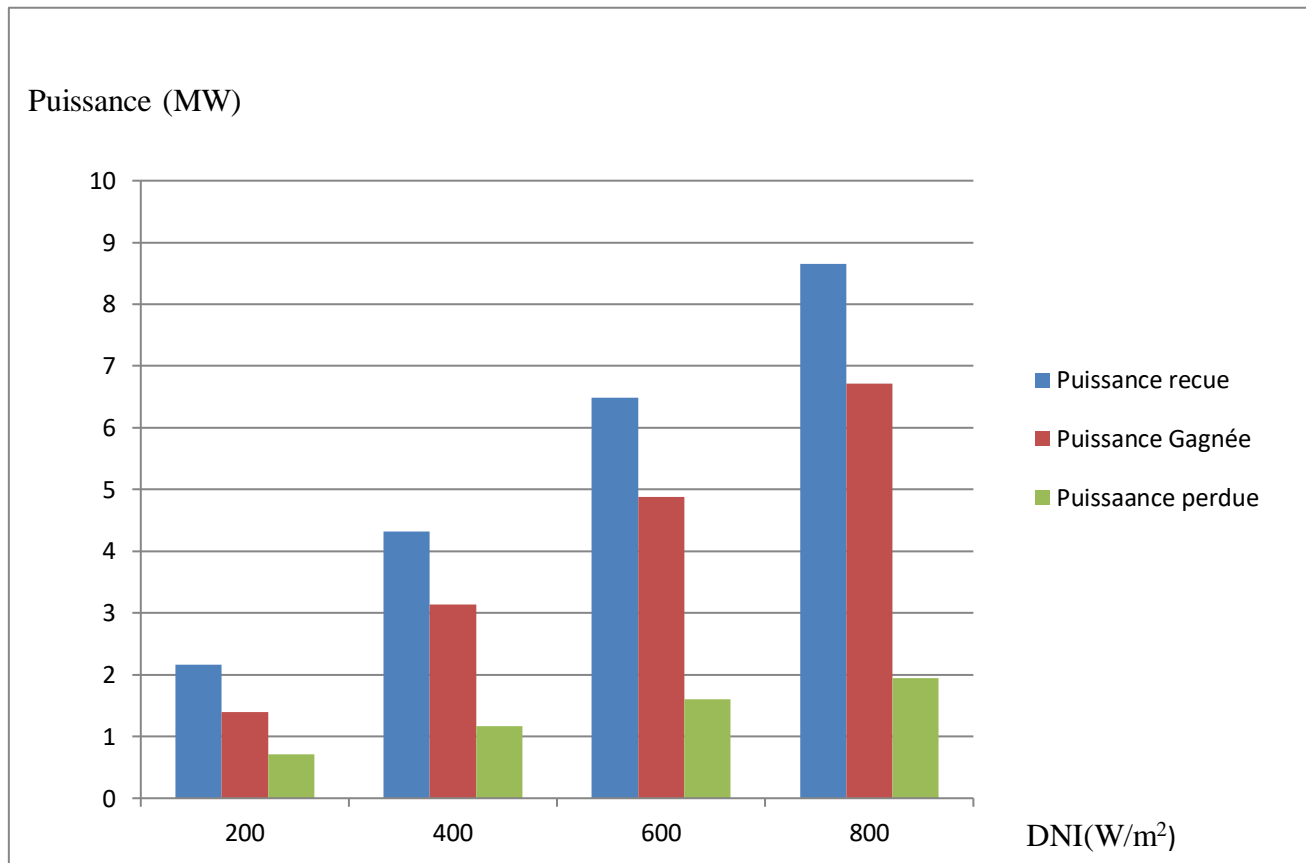
**Figure V.6 : Variation des coefficients d'échange**

La figure (V.7) montre la variation des coefficients d'échange coté fluide (coefficient de convection, nombre de Reynolds, nombre de Nusselt et capacité calorifique) en fonction de la longueur de boucle. On remarque

que ces coefficients ont des augmentations monotones au fur et à mesure que le fluide caloporteur s'échauffe.

#### V.4.5. Variation de la puissance reçue, gagnée et perdue en fonction de l'éclairement solaire (DNI)

On a supposé que :  $T_{fe} = 550K$ ,  $m_f = 7 \text{ Kg/s}$ .



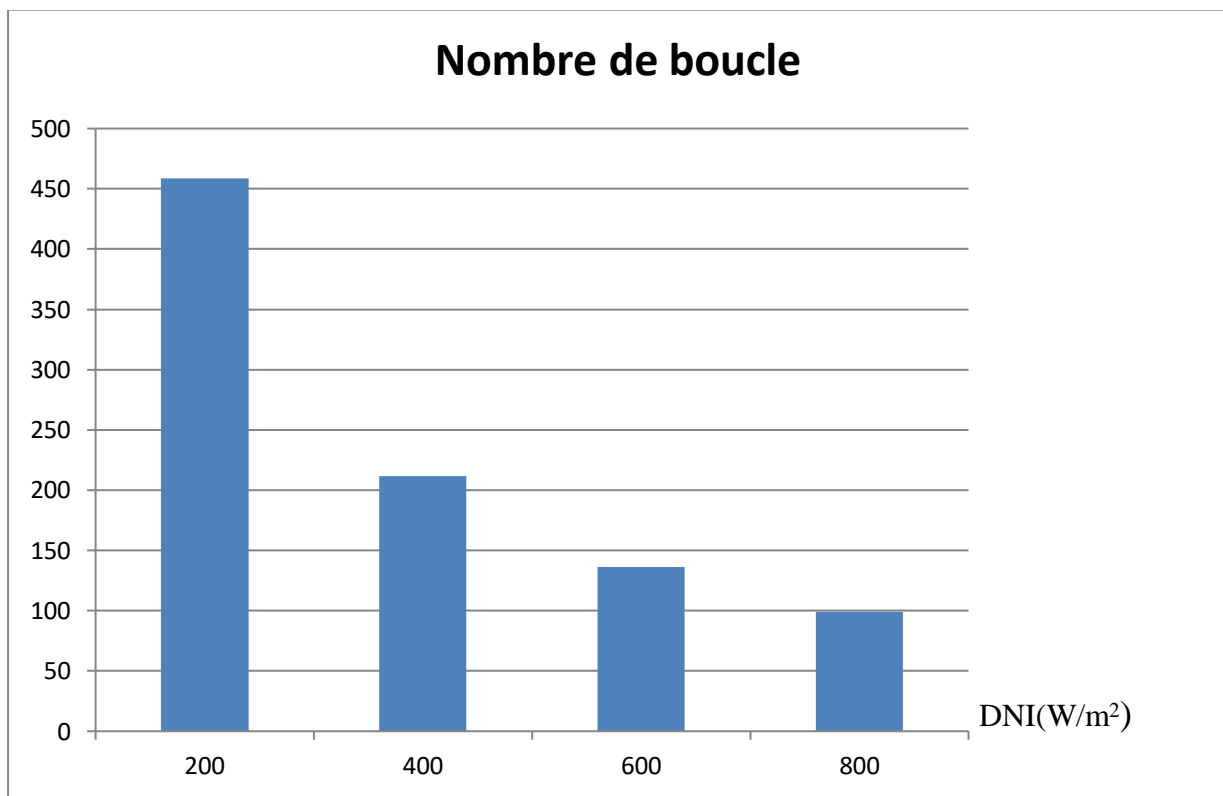
**Figure V.7:** La variation de la puissance reçue, gagnée et perdue en fonction de DNI

La figure (V.7) représente la variation de la puissance reçue, gagnée et perdue en fonction de l'éclairement solaire pour une seule boucle de longueur de 600 m. Cette puissance reçue provient du rayonnement solaire réfléchi directement à travers le miroir et convertie en chaleur absorbée par le fluide de travail. Lorsque le DNI augmente, la puissance thermique gagnée est plus importante. L'énergie thermique convertible en électricité est sensiblement influencée par les conditions d'ensoleillement. Il est également important de noter que l'énergie obtenue par le fluide caloporteur, appelée aussi puissance utile, est liée à la puissance reçue aux entrées et aux pertes d'énergie vers l'extérieur.



#### V.4.6. La variation du nombre de boucle en fonction de l'éclairement solaire reçu (DNI)

La figure ci-après a été obtenue en considérant les besoins en énergie thermique pour une centrale solaire de puissance électrique annuelle nette de  $100 \text{ MW}_{\text{élec}}$ . Le rendement net de conversion thermoélectrique annuel de ce type de centrales est de 15%. Les résultats précédents sont propres à une seule boucle de longueur de 600 mètres. Le débit massique unitaire (par boucle) ainsi que la température d'entrée du fluide de travail (huile synthétique Therminol VP1) sont respectivement de  $7 \text{ Kg/s}$  et  $550 \text{ K}$ .



**Figure V.8:** Variation du nombre de boucle en fonction de l'éclairement solaire reçu

Tel qu'on le voit, plus l'éclairement solaire est faible, plus le nombre de boucle est grand parce que le système a besoin de compenser cette faible disponibilité d'énergie solaire en utilisant plus de boucles pour maximiser l'utilisation de l'énergie solaire disponible dans des conditions de faible ensoleillement pour satisfaire la

totalité des besoins en énergie thermique convertible en électricité.

#### **V.4.Conclusion**

Ces résultats sont obtenus grâce au code de calcul sous MATLAB du champ solaire composés de concentrateurs cylindro-paraboliques. Les profils de température du fluide de travail, du récepteur et de l'enveloppe en verre ont été déterminés, la puissance calorifique absorbée, gagnée et perdue ainsi que l'efficacité de la centrale électrique et l'influence des coefficients d'échange ont été déterminés.

Parmi les résultats les plus importants, on cite :

- ✓ Le suivi du soleil affecte le positionnement et l'efficacité de l'énergie solaire « rayonnante directe ».
- ✓ L'énergie gagnée (utile) fait l'objet du compromis le plus important, puisque sa quantité augmente en fonction du débit, mais sa qualité énergétique (niveau de température) se dégrade en fonction de la diminution de la longueur du capteur.
- ✓ Une augmentation de la longueur des tubes absorbeurs se traduit par une augmentation de la température du fluide caloporteur en sortie des tubes absorbeurs jusqu'à une certaine longueur critique, où cette dernière se rapproche asymptotiquement de la température de l'absorbeur.
- ✓ Le nombre de boucles qui devrait composer le champ solaire est sensiblement dépendant de l'irradiation normale directe (DNI).

*Conclusion  
Générale*

## Conclusion Générale

Ce modeste travail s'est concentré sur l'étude et l'analyse du fonctionnement d'une centrale solaire thermodynamique, en vue de la production d'énergie électrique, Dans des pays bénéficiant d'un ensoleillement généreux, tels que l'Algérie, peuvent jouer un rôle essentiel dans la transition énergétique vers un système efficace, efficient, plus durable et respectueux de l'environnement.

Etant donné l'importance primordiale du concentrateur cylindro-parabolique constituant la technologie de départ de la conversion d'énergie thermomécanique à hautes températures, une modélisation thermique a été effectuée pour ce dernier sous quelques hypothèses simplificatrices.

Pour cela, un programme de simulation a été développé en utilisant le langage Matlab, prenant en compte une variété de paramètres géométriques et thermiques.

La réalisation de ce travail a suivi un processus qui a impliqué plusieurs étapes essentielles pour caractériser et analyser les centrales solaires thermodynamiques utilisant la technologie cylindro-parabolique. Des bilans thermiques détaillés ont été réalisés sur les composants clés du collecteur, notamment le fluide caloporteur (HTF), l'absorbeur et l'écran, dans le but de calculer les puissances thermiques reçues, utiles et perdues. De plus, le nombre de boucle a été déterminé, et les profils de température au niveau de chaque élément du concentrateur ont été évalués.

Ensuite nous avons modifié certains paramètres liés au concentrateur solaire, comme le débit et l'éclairement solaire (DNI), pour connaître leurs effets sur les performances du champ solaire, pour garantir un fonctionnement optimal de ces concentrateurs il est préférable de travailler avec des températures d'entrée du fluide caloporteur élevées et à un débit massique optimal de fluide caloporteur. L'éclairement solaire a sans doute, l'impact le plus significatif sur les performances thermiques du champ solaire. En cas de DNI élevé, le concentrateur peut convertir une grande quantité d'énergie solaire, ce qui favorable et efficient pour la conversion thermoélectrique.

En final, nous aspirons avoir accompli, à travers ce travail, une analyse thermique complète pour les capteurs cylindro-paraboliques, en espérant que ces données contribueront à servir et éclairer d'avantage le lecteur et à ouvrir d'autres horizons pour l'avenir.

# ***Annexes***

## Annexes

Dans le contexte des systèmes solaires utilisant la conversion thermique de l'énergie, la transmission de la chaleur joue un rôle crucial pour maximiser l'efficacité du processus de conversion et la performance globale du système. Les deux modes principaux de transfert de chaleur que nous avons utilisés sont la convection et le rayonnement..

➤ **Convection thermique** : La convection implique le transfert de chaleur par le déplacement de matière. Elle se produit généralement dans les fluides (liquides ou gaz) où la chaleur est transférée par le mouvement des particules chauffées. La relation de transfert de chaleur convective est décrite par la loi de convection :

$$Q = hA(T_s - T_{env})$$

Où :

- $Q$  est la quantité de chaleur transférée par convection,
- $h$  est le coefficient de transfert de chaleur convective,
- $A$  est la surface d'échange thermique,
- $T_s$  est la température de surface,
- $T_{env}$  est la température de l'environnement environnant.

**Rayonnement thermique** : Le rayonnement est le transfert de chaleur sous forme d'ondes électromagnétiques, telles que la lumière et la chaleur infrarouge. Le transfert de chaleur radiatif ne nécessite pas de milieu matériel pour se propager et peut même se produire dans le vide. La loi de Stefan-Boltzmann décrit la puissance radiative émise par un objet :

$$Q = \varepsilon\sigma A(T_{s4} - T_{env4})$$

Où :

- $Q$  est la puissance radiative émise,
- $\varepsilon$  est l'émissivité de surface,
- $\sigma$  est la constante de Stefan – Boltzmann,
- $A$  est la surface rayonnante,
- $T_s$  est la température de surface,
- $T_{env}$  est la température de l'environnement

## ✚ Les propriétés thermiques de fluide caloporteur

Le fluide caloporteur utiliser est caractérisé par propriétés thermique qui sont évalué par les relations suivantes :

- **La densité volumique (kg/m<sup>3</sup>)**

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

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

$$Cp = 0.002414 T + 0.0000059591 T^2 - 0.000000029879 T^3 \\ + 0.000000000044172 T^4 + 1.498$$

- **La conductivité thermique (W/m.K)**

$$K = 0.0000819477T + 0.000000192257T^2 - 0.000000000025034T^3 \\ + 0.00000000000000072974T^4 + 0.137743$$

- **La viscosité cinématique (mm<sup>2</sup>/s)**

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

## ✚ Les pertes de charge en énergie

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

$$h_\lambda = \lambda \frac{mLV^2}{2DAT_{fm}}$$

Avec :

$\lambda$ : *Le coefficient de perte de charge en énergie qui de la rugosité, et de nombre de Reynolds.*

$L$  : *La longueur du conduit, (m).*

$V$  : *La vitesse de fluide, (m<sup>2</sup>/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**

Il caractérise le rapport entre les flux de chaleur convectif et conductif dans un écoulement de fluide.

Le nombre de Nusselt est souvent utilisé pour évaluer l'efficacité des transferts thermiques dans les écoulements convectifs :

$$Nu = \frac{h_{conv-f} D_1}{K_f}$$

$h_{(conv-f)}$ : *Coefficient de convection pariétale du fluide caloporteur*

$- K_f$  : *conductivité de fluide caloporteur.*

–  $D_1$ : Diamètre, (m).

**Nombre de Reynolds ( $Re$ )** : Il caractérise le rapport entre les forces inertielles et les forces visqueuses d'un fluide en écoulement. Le nombre de Reynolds permet de distinguer les écoulements laminaires (faibles  $Re$ ) des écoulements turbulents (élevés  $Re$ ). Il est défini comme :

$$Re = \frac{\rho V D_1}{\mu}$$

–  $\rho$  : la masse volumique de fluide caloporteur.

–  $V$  : la vitesse de fluide caloporteur dans le tube.

–  $\mu$  : la viscosité dynamique de fluide caloporteur

**Nombre de Prandtl ( $Pr$ )** : Il caractérise la relative importance des effets de diffusion thermique et de diffusion de quantité de mouvement (viscosité) dans un fluide. Il est défini comme le rapport de la diffusivité de la chaleur à la viscosité dynamique :

$$Pr = \frac{C_p \mu}{K}$$

–  $C$ : Chaleur spécifique à pression constante.

–  $K$ : Conductivité thermique du fluide.

–  $\mu$  : la viscosité dynamique de fluide caloporteur.

### **Le nombre de Rayleigh( $Ra$ )**

Le nombre de Rayleigh est défini comme le produit du nombre de Grashof ( $Gr$ ) et du nombre de Prandtl ( $Pr$ ). Ce nombre peut fournir un critère de passage de la convection naturelle laminaire à la convection naturelle turbulente

$$.Ra = Gr * Pr$$



# Références

## Reference

- [1] <http://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/energie-renouvelable-sont-cinq-types-energies-renouvelables-4134>.
- [2] <http://www.climamaison.com/lexique/energie-eolienne>.
- [3] <http://www.algerie360.com/developpement-de-lenergie-eolienne-identification-de-21-zones-en-algerie>.
- [4] <http://www.encyclopedie-energie.org/stockage-hydraulique-et-production-deelectricite>
- [5] <http://www.encyclopedie-energie.org/biomasse-et-energie-des-ressources-primaires-aux-produits-energetiques-finaux>.
- [6] <http://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](http://cdn.unitycms.io/image/ocroped/800,800,1000,1000,0,0/XAQzSZf8TPw/6LK9fcHiK1m8B_WDUgdQDe.jpg) .
- [8] **O. Farges**, Conception optimale de centrales solaires à concentration : application aux centrales à tour et aux installations « beam down », thèse de doctorat, Soutenue le 5/06/2014, Université de Toulouse.
- [9] Nations Unies Commission économique pour l'Afrique Bureau pour l'Afrique du Nord-Le secteur des énergies renouvelables en Afrique du Nord – Situation actuelle et perspectives - CEA-AN/PUB/12/01- Septembre 2012
- [10] François NEPVEU- Thèse DE Doctorat de l'Université de Perpignan- Production décentralisée d'électricité et de chaleur par système Parabole/Stirling -le 28 Novembre 2008.
- [11] **S. Skouri**, Contribution à l'Étude des Concentrateurs Solaires, thèse de doctorat, Soutenue le 23/05/2016, Université de Monastir.
- [12] **Dozen H, Aydin H**. Sunshine-based estimation of global solar radiation on horizontal surface at Lake Van region (Turkey). *Energy Convers Manage* 2012; 58: 35–46.
- [13] <https://www.researchgate.net/figure/Illustration-de-la-structure-du-Soleil>.
- [14] **BOUGUETAIA Nadia**, mémoire fin d'étude, Contribution à l'Etude et a la Simulation d'un Concentrateur Cylindro-Parabolique, UNIVERSITE CONSTANTINE 1 ,2013
- [15] [https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/17016333/spectre-solaire?fbclid=IwAR0V2gWMwOX0IXZZxfYPZtPg8C85voIM-X0GKFITquqoWFCOlxqUkUb6BPw#:~:text=D%C3%A9finition,\(exemple%20sous%20une%20vitre\)](https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/17016333/spectre-solaire?fbclid=IwAR0V2gWMwOX0IXZZxfYPZtPg8C85voIM-X0GKFITquqoWFCOlxqUkUb6BPw#:~:text=D%C3%A9finition,(exemple%20sous%20une%20vitre)).
- [16] **MOUSSAOUI MOULAY Zoulikha, MOUSSAOUI MOULAY Hafida**, MEMOIRE DE FIN D'ETUDE, Etude et simulation d'un système solaire thermique cylindro-parabolique, université d'Adrar, 2014.

[17] **BALLO Djibril, BETTARCHA Nesrine Manel**, mémoire fin d'étude, ETUDE EXPERIMENTALE D'UN RETRO-CONCENTRATEUR SOLAIRE PARABOLIQUE, Université de Mostaganem UMAB, 2019.

[18]<https://www.maxicours.com/se/cours/les-mouvements-de-la-terre-du-soleil-et-de-la-lune/>.

[19]**Chabane Tassadit, Sefah Assia**, mémoire fin d'étude, Etude des capteurs solaires à concentration : Application aux centrales cylindro-paraboliques, Université de Bouira, Université de Bouira.2014.

[20]<https://www.lecameleon.eu/latitude-et-longitude.php>.

[21]**Lawan Abdou Ali**, mémoire fin d'étude, Modélisation du Transfert de Chaleur d'un Concentrateur Solaire Cylindro-Parabolique pour la Stérilisation des Instruments Médicaux, UNIVERSITÉ de BLIDA 1,2018.

[22]<http://www.foad.uadb.edu.sn/mod/book/tool/print/index.php?id=2397>

[23]<https://boowiki.info/art/meteorologie/duree-d-enseillement.html>

[24][https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Dur%C3%A9e\\_d%27enseillement#:~:text=La%20dur%C3%A9e%20d'enseillement%2C%20ou,produire%20des%20ombres%20bien%20distinctes](https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Dur%C3%A9e_d%27enseillement#:~:text=La%20dur%C3%A9e%20d'enseillement%2C%20ou,produire%20des%20ombres%20bien%20distinctes).

[25]**Kechidi Mehdi Sayeh Abdelkader, Lazali Adel Abbas**, mémoire fin d'étude, Etude expérimentale d'un concentrateur cylindro-parabolique, UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1, 2019.

[26] **ABACHE SAID, SELLAH IMAD**, mémoire fin d'étude, Etude des performances de la centrale Solaire cylindro-parabolique de HASSI R'MEL, Université Mouloud Mammeri de TIZI OUZOU, 2022.

[27] [https://uved.univ-perp.fr/module2/co/2-1-4-6-centrales\\_cylindro.html](https://uved.univ-perp.fr/module2/co/2-1-4-6-centrales_cylindro.html).

[28] **Yves JANNOT**, solaire thermique, Mars 2011.

[29] EASAC policy report 16, Concentrating solar power: its potential contribution to a sustainable energy future, November 2011

[30] **Incropera F, Dewitt D**. Fundamentals of heat and mass transfer. 3rd ed. New York: John Wiley; 2011

[31] **Ada Boudjema, and Hamida Hamel**. Etude technico économique d'un renouvellement de la chambre de combustion d'une turbine à gaz MS5002C. Diss. Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2016.

[32] **Mazouz Mawloud**. Etude et simulation des transferts de chaleur dans un récepteur d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique. Université m'hamed bougara de boumerdès. 2016/2017.

[33]<https://parlonssciences.ca/ressources-pedagogiques-documents-dinformation/>.

[34] Donald R, Pitts, heat transfer, edition: shaums series, 1977

[35] **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.

[36] [fr.wikipedia.org/wiki/Méthode\\_de\\_Newton](http://fr.wikipedia.org/wiki/Méthode_de_Newton).

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