



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



## Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GENIE MECANIQUE

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par :

Attia Fatima Zohra

Bensaada Amina Nour

DOMAINE : TECHNOLOGIE

FILIERE : GENIE MECANIQUE

OPTION : ENERGETIQUE

### Thème

# Conception d'une installation hybride Solaire-conventionnelle

### Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Medjelled Ahmed	Professeur	Encadreur
Benchatti Ahmed	Professeur	Président
Mohamed TEGGAR	Professeur	Examineur

Promotion : 2021/2022

## **Remerciement**

Nous tenons avant tout à remercier Dieu tout puissant de nous avoir donné la force et la volonte pour achever ce modeste travail

Nous tenons à remercions tout particulièrement notre encadreur Monsieur Medjelled Ahmed , non seulement pour la qualité de son encadrement mais aussi pour sa disponibilité. Qu'il trouve ici l'expression de notre gratitude la plus sincère. Nos remerciements s'adressent aux membres du Jury qui nous font l'honneur d'examiner notre travail. Nous remercions toute l'équipe de notre promotion dans la spécialité mécanique pour leurs esprits de famille durant le cycle d'étude.

Nous remercions également les enseignants de la formation Génie Mécanique pour tout le savoir qu'ils ont su nous transmettre durant ces années, et en particulier toutes les personnes qui nous a guider volontairement pendant notre cursus de formation ainsi qu'avec leurs précieux.

Nous ne pouvons nous empêcher d'avoir une pensée pour ceux et celles ayant répondu présent et nous ont offert leur soutien moral dans les moments difficile et qui étaient à nos cotés pour partager avec nous les moments de joie.

## Dédicaces

À mes chers parents

À mes sœurs et mes frères  
À toute ma famille

À tous mes enseignants  
À mon encadreur

À mon binôme

À tous mes amis et mes collègues

À Toute la famille du département de  
Génie Mécanique

Je dédie ce modeste travail

**Amina et Fatima**



## Résumé

L'énergie est la source de tous les développements humaine, son utilisation est indispensable pour l'homme, mais sa disponibilité cause jusqu'à maintenant un grand problème soit pour son cout élevé, ou pour sa nature polluante et même limité. Ces dernières années l'homme a commencé à développer les énergies de source renouvelable telle que l'énergie solaire.

Le travail présent s'inscrit dans le cadre général de l'étude des centrales solaire thermique cylindro-parabolique en se basant sur les données climatiques et financières a Laghouat ville et voir l'importance de la production de l'électricité à partir du soleil.

**Mots clés :** Centrale solaire à collecteurs cylindro-paraboliques, TRNSYS,Simulation, SEGS VI, Energie solaire.

## Abstract

Energy is the source of all human developments, it is essential for humans, but its availability cause a big problem, its cost is high, and its source is no clean and very limited. Those last years man has started to develop renewable energies such as solar energy. The present work a general study of solar thermal power parabolic trough based on climate and financial data in Laghouat, to see the importance of generating the electricity from the sun in Laghouat.

## الملخص

الطاقة هي مصدر كل التنمية البشرية، واستخدامها ضروري للإنسان، ولكن توافرها تسبب حتى الآن في مشكلة كبيرة سواء بسبب تكلفتها العالية أو بسبب طبيعتها الملوثة وحتى المحدودة. بدأ الإنسان في السنوات الأخيرة في تطوير الطاقات من مصادر متجددة مثل الطاقة الشمسية. العمل الحالي هو جزء من الإطار العام لدراسة محطات الطاقة الحرارية الشمسية الأسطوانية - المكافئة بالاعتماد على البيانات المناخية والمالية في مدينة الأغواط والتعرف على أهمية إنتاج الكهرباء من الشمس. الكلمات المفتاحية :

طاقة شمسية SEGS VI، محاكاة، TRNSYS: محطة طاقة شمسية مع مجمعات أسطوانية مكافئة

## Nomenclature

$\theta$	Angle d'ouverture du concentrateur .
$G$	Rayonnement solaire .
$G_D$	Éclairement direct dans la section d'ouverture du concentrateur.
$S_o$	Section d'ouverture du concentrateur caractérisée par l'angle $\theta$ .
$S_P$	Section de passage du rayonnement solaire entrant dans le concentrateur,
$S_G$	Surface de l'image de Gauss du soleil, c'est l'image nette du soleil dans le plan focal donnée par des rayons paraxiaux c'est-à-dire des rayons proches de l'axe optique .
$S_R$	Surface de l'image réelle du soleil dans le plan focal.
$S_r$	la surface de l'absorbeur.
$I_o$	l'intensité du flux au niveau de l'ouverture de capteur
$I_a$	l'intensité du flux de l'absorbeur .
$Q$	flux de chaleur par conduction (W)
$\lambda$	coefficient de conductivité (W/m.°C)
$S$	surface de passage du flux de chaleur (m <sup>2</sup> )
$x$	variable d'espace dans la direction du flux (m)
$T$	température du flux (°C)
$Q_{cv}$	flux de chaleur par convection(W)
$h$	le coefficient de convection (W/m <sup>2</sup> . °C)
$S$	la surface de contact fluide/solide (m <sup>2</sup> )
$T_p$	température de la surface du solide (°C)
$T_\infty$	température du fluide loin de la surface du solide (°C)
$Q_r$	Flux de chaleur émis par rayonnement (W)
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann évaluée à $5,6.10^{-8} \text{ W/m}^{-2}\text{K}^{-4}$
$T_p$	Température de la surface (K)
$T_\infty$	Température du milieu environnant la surface (K)
$S$	Aire de la surface (m <sup>2</sup> )
$q_{ab}$	quantité de chaleur absorbée un niveau de l'absorbeur vienne du soleil .
$q_u$	quantité de chaleur utile cède au fluide caloporteur par l'absorbeur .
$q_{a,v}$	quantité de chaleur échangée par convection entre le tube absorbeur et la vitre .

$qv, amb$	quantité de chaleur échangée par convection entre la vitre et l'air ambiant .
$Qf(x)$	le flux de chaleur du fluide caloporteur à l'abscisse x .
$Qf(x+\Delta x)$	le flux de chaleur du fluide caloporteur à l'abscisse $x + \Delta x$ .
$D_{ai}$	diamètre intérieur du tube absorbeur .
$D_{ae}$	diamètre extérieur du tube absorbeur .
$D_{vi}$	diamètre intérieur de l'enveloppe transparente .
$D_{ve}$	diamètre extérieur de l'enveloppe transparente .
$T_f$	température du fluide (K) .
$T_a$	température de l'absorbeur (K) .
$T_v$	température de la vitre (K) .
$\rho_f$	la masse volumique du fluide caloporteur .
$CP_f$	la capacité calorifique du fluide .
$qa_{,v}(x)$	c'est la quantité de chaleur échangée par convection naturelle entre l'absorbeur et la vitre à distance x de l'entrée ;
$qv, amb(x)$	c'est la quantité de chaleur perdue vers l'extérieur par convection entre la vitre et l'air ambiant
$Nu_{Dai}$	Nombre de Nusselt basé sur $D_{ai}$
$Re_{Dai}$	Nombre de Reynolds pour le diamètre $D_{ai}$
$Pr_f$	Nombre de Prandtl pour le fluide
$\mu_f$	Viscosité dynamique du fluide
$K_f$	Conductivité thermique du fluide
$\beta_{air}$	Coefficient volumétrique de dilatation thermique de l'air
$\nu$	Viscosité cinématique de l'air annulaire
$\sigma$	Constante de Stefan Boltzmann.
$\epsilon_v$	L'émissivité de la vitre.
$\epsilon_a$	L'émissivité de l'absorbeur.
$\varphi_{select}$	Coefficient de réflexion de surface sélective
$\alpha_{ab}$	Coefficient d'absorption de l'absorbeur
$\tau_v$	Coefficient de transmission de la vitre $S_e$ : surface efficace du capteur ( $m^2$ )
$G$	Chaleur du rayonnement par surface de capteur ( $W/m^2$ )

## **Abréviation**

**SEGS** Solar Electric Generation System

**CCP** concentrateurs cylindro-parabolique

**TRNSYS** Transient System Simulation Tool

**EES** Engineering Equation Solver

**DNI** Direct Normal Irradiation

# Sommaire

Remerciement

Dédicaces

Nomenclature

Listes des figures

Liste des tableaux

Introduction générale.....1

## Chapitre I : Généralité sur L'énergie renouvelable

I. 1 Introduction.....4

I. 2 Définition .....4

I. 3 Les différents types d'énergie renouvelable.....5

I. 3.1 L'énergie solaire.....5

I.3.2 L'énergie hydraulique.....6

I.3.3 L'énergie éolienne.....7

I.3.4 La biomasse.....7

I.3.5 La géothermie.....8

I. 4 Les différents types d'utilisation de l'énergie solaire.....9

I.4.1 L'énergie solaire thermique.....9

I.4.2 L'énergie photovoltaïque.....10

I. 5 Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire.....11

I.5.1 Les avantage de l'énergie solaire.....11

I.5.2 Les inconvénients de l'énergie solaire.....11

I. 6 Les capteurs solaires.....12

I.6.1 Capteurs plans.....12

I.6.1.1	Capteurs plan vitrés.....	12
I.6.1.2	Capteurs plans non vitrés.....	13
I.6.1.3	Capteurs à air.....	13
I.6.1.4	Capteur sous vide.....	15
I.6.2	Les concentrateurs.....	15
I.6.2.1	Les concentrateurs cylindro-paraboliques.....	16
I.6.2.2	Concentrateur parabolique.....	16
I.6.2.3	Les centrales à tour.....	17
I. 7	Gisement solaire en Algérie.....	19
I. 8	Rayonnement solaire.....	20
I. 9	Les composantes du rayonnement solaire.....	21
a)	Rayonnement direct.....	21
b)	Rayonnement diffus.....	21
c)	Rayonnement global.....	21
I. 10	Le champ solaire.....	22
I. 11	L'effet de la poussière et de la saleté sur l'efficacité des panneaux solaires ...	22

## **Chapitre II : Concentrateur cylindro- parabolique**

II.1	Introduction.....	25
II.2	Principe de fonctionnement.....	25
II.3	Concentrateur cylindro parabolique CCP .....	26
II.3.1	Description.....	26
II.3.2	La poursuite solaire.....	27
II.3.3	Angle d'incidence .....	28
II.3.4	Les Caractéristiques géométriques du CCP.....	29
II.3.5	Taux de concentration.....	29

<b>II.3.6 Les composantes d'un CCP.....</b>	<b>30</b>
<b>II.3.6.1 Le collecteur.....</b>	<b>31</b>
<b>II.3.6.2 Le réflecteur.....</b>	<b>31</b>
<b>II.3.6.3 L'absorbeur (récepteur).....</b>	<b>31</b>
<b>II.3.6.4 La surface sélective.....</b>	<b>32</b>
<b>II.3.6.5. Les fluides caloporteurs.....</b>	<b>33</b>
<b>II.4 Domaine d'application de l'énergie solaire thermique.....</b>	<b>35</b>
<b>II.5 Analyse thermique du champ solaire.....</b>	<b>35</b>
<b>II.6 Analyse thermodynamique du cycle de vapeur.....</b>	<b>37</b>
<b>II.6.1 Introduction.....</b>	<b>37</b>
<b>II.6.2 Le but.....</b>	<b>38</b>
<b>II.6.3 Elements essentielles de cycle de rankine.....</b>	<b>40</b>
<b>II.7 Modélisation mathématique du CCP .....</b>	<b>41</b>
<b>II.7.1 Introduction .....</b>	<b>41</b>
<b>II.7.2 Description du CCP.....</b>	<b>42</b>
<b>II.7.3 Les différents types de transfert de chaleur.....</b>	<b>43</b>
<b>II.7.3.1 Le transfert de chaleur par conduction.....</b>	<b>43</b>
<b>II.7.3.2 Le transfert de chaleur par convection.....</b>	<b>44</b>
<b>II.7.3.3 Le transfert de chaleur par rayonnement.....</b>	<b>44</b>
<b>II.7.4 Etablissement des équations caractéristiques du problème .....</b>	<b>45</b>
<b>II.7.4.1 Bilan Thermique.....</b>	<b>45</b>
<b>II.7.4.2 Bilan thermique du fluide.....</b>	<b>46</b>
<b>II.7.4.3 Bilan thermique de l'absorbeur .....</b>	<b>47</b>
<b>II.7.4.4 Bilan thermique de la vitre.....</b>	<b>47</b>
<b>II.7.4.5 Echanges de chaleur entre les éléments du tube absorbeur.....</b>	<b>48</b>
<b>II.7.4.6 Echange thermique entre le fluide et l'absorbeur.....</b>	<b>48</b>

II.7.4.7 Echange thermique entre l'absorbeur et la vitre.....	49
II.7.4.8 Echange thermique entre la vitre et l'environnement.....	52
II.7.4.9 Energie solaire globale absorbée .....	52
II.7.4.10 Rendement thermique du CCP.....	53

## **Chapitre III : Simulation avec TRNSYS et EES**

<b>III. 1 Introduction.....</b>	<b>55</b>
<b>III. 2 Simulation avec TRNSYS et EES.....</b>	<b>55</b>
III.2.1 Présentation du logiciel TRNSYS.....	55
III.2.2 Définition des Output.....	56
<b>III.3 Modélisation et simulation .....</b>	<b>57</b>
III.3.1 Présentation du modèle de l'installation.....	57
III.3.1.1 Description de différentes composantes de ce système.....	58
III.3.1.2 Ajout de composants et configuration.....	59
<b>III.4 Présentation du logiciel EES.....</b>	<b>61</b>

## **Chapitre IV : Résultats et interprétations**

<b>IV.1 Introduction.....</b>	<b>63</b>
<b>IV.2 Les donnée Météonorm.....</b>	<b>63</b>
<b>IV.3 Analyse et comparaison de centrale Hybride.....</b>	<b>69</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>70</b>

## Liste des figures

Fig (I.1): les différents types d'énergies dans le monde sont toute du soleil.....	5
Fig (I.2) : énergie solaire .....	6
Fig (I.3): Schéma de production d'électricité par l'hydraulique.....	6
Fig(I.4) : une turbine Eolienne.....	7
Fig (I.5): Un schéma Illustrant la biomasse.....	8
Fig (I.6) : Géothermie basse énergie.....	8
Fig (I.7) : Différentes types d'énergie solaire et son utilisation.....	9
Fig (I.8): énergie solaire thermique.....	10
Fig (I.9) : Panneaux Solaires Photovoltaïqu.....	10
Fig (I.10) : Capteur plan vitré.....	13
Fig (I.11) : Capteurs plans non vitrés.....	13
Fig (I.12) : Capteur plan à air.....	14
Fig (I.13) : Capteur sous vide.....	15
Fig (I.14) : Schéma d'un capteur cylindro-parabolique.....	16
Fig (I.15) : Concentrateur parabolique.....	17
Fig (I.16) : Centrale à tour.....	18
Fig (I.17) : Rayonnement solaire annuel dans le monde.....	19
Fig (I.18) : composantes du rayonnement solaire.....	21
Fig (I.19) : champ solaire.....	22
Fig (I.20) : Nettoyage de miroir.....	23
Fig (II.1): Schéma d'une ferme de miroirs cylindro-paraboliques (haut), et une vue latérale montrant comment un MCP concentre la lumière solaire à son point focal.....	26
Fig (II.2) : Capteur à concentration cylindro-parabolique.....	27
Fig( II.3): Orientations possibles d'un CCP.....	28
Fig ( II.4): Angle d'incidence sur un capteur cylindro-parabolique.....	28
Fig (II.5): Différentes surfaces caractérisant un CCP.....	29
Fig( II.6) : Variation du taux de concentration en fonction de la température de l'absorbeur.....	30
Fig( II.7) : Les composantes d'un capteur cylindro-parabolique.....	30
Fig( II.8) : Structure de l'absorbeur.....	32
Fig (II.9): Variation quotidienne du DNI pour les mois de juillet et de décembre.....	37

Fig(II.10): schéma descriptif du diagramme Température, entropie (T, s) du cycle de Rankine de base.....	38
Fig (II.11): schéma des composantes de cycle de Rankine.....	40
Fig (II.12) : Schéma du tube absorbeur.....	42
Fig (II.13) : Transferts thermiques entre les différentes parties du CCP.....	43
Fig (II.14) : Bilan thermique d'un élément de surface du CCP (coupe axiale).....	45
Fig (II.15) : Les différents modes d'échanges de chaleur.....	48
Fig (III.1) : Schéma de fonctionnement de TRNSYS.....	56
Fig(III.2) : Définition des outputs.....	57
Fig (III.3) : Modélisation sous le logiciel TRNSYS.....	58
Fig (III.4) : Control cards and Type 109 (Weather data reader / processor).....	60
Fig (III.5) : programmé logiciel EES.....	61
Fig (IV.1) : Représentation de la variation du rayonnement pour une année.....	63
Fig (IV.2) : la variation de température durant un année.....	63
Fig (IV.3) : Représentation de la variation du rayonnement pour le mois de Janvier [0-744h].....	64
Fig (IV.4) : Représentation de la variation du rayonnement pour le mois d'août [5832-6652h].....	64
Fig (IV.5) : la variation de température pour le mois de Janvier [0-744h].....	65
Fig (IV.6) : la variation de température pour le mois d'août [5832-6552h].....	65
Fig (IV.7) : la variation de température et rayonnement un jour janvier.....	66
Fig (IV.8) : la variation de température et rayonnement un jour d'août.....	66
Fig (IV.9) : Résultat pour EES.....	67
Fig (IV.10) : diagramme T_S de cycle a vapeur.....	67
Fig (IV.11) : Résultat de $q_{in}$ .....	68
Fig (IV.12) : Résultat de $q_{out}$ .....	68
Fig (IV.13) : Résultat de $w_{net}$ .....	68

## Liste des Tableaux

Tableau( I.1) : Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques.....	20
Tableau( II.1): Caractéristiques de collecteurs cylindro - parabolique LS-3.....	34
Tableau (II.2): Caractéristiques de fonctionnement de la turbine à vapeur.....	41

# **Introduction générale**

## Introduction générale

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

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

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

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

Les capteurs "**cylindro-paraboliques**" sont composés de miroirs paraboliques disposés à l'arrière d'un capteur en forme de tube. La forme parabolique des miroirs permet d'en concentrer les rayons du soleil tout au long du tube. En faisant circuler le fluide caloporteur au centre de ce tube, le fluide étant chauffée et conduit la chaleur vers le récipient avec un débit déterminé. Le tube absorbeur est la partie essentielle du concentrateur, il représente généralement 30% du coût de la construction, il est généralement constitué de matériaux thermiquement conduction et rigides. Et ce tube absorbeur est souvent en cuivre recouvert d'une couche sélective, et il est entouré d'une enveloppe transparente en verre.

## **L'objectif de ce travail**

est faire une étude a été menée pour savoir si ce type de capteurs solaires cylindro-parabolique peut être utilisé dans ville comme Laghouat, et couvre-t-il les besoins en électricité requis, sachant que Laghouat a besoin d'une quantité importante d'électricité estimée à 60 MW [1], et combien de capteurs solaires avez-vous besoin d'une couverture adéquate en plus du Coût de revient

Ce présent travail est constitué de quatre chapitres répartis comme suit :

- Le premier chapitre concerne les généralités sur l'énergie solaire renouvelable : il comporte des informations sur les Gisement solaire en Algérie , le potentiel solaire algérien et les capteurs utilisés pour la conversion du rayonnement solaire en énergie thermique et photovoltaïque.
- La technologie de concentrateur cylindro-parabolique( La poursuite solaire , Angle d'incidence , Les composantes d'un CCP....ect) et modélisation mathématique du CCP ont été abordés dans le deuxième chapitre.
- Le troisième chapitre est basé sur l'utilisation d'un code de programmation TRNSYS et EES pour la résolution du système.
- La présentation des résultats et discussions sera faite dans le quatrième chapitre. Enfin, une conclusion résumant les résultats obtenus

# **Chapitre I:**

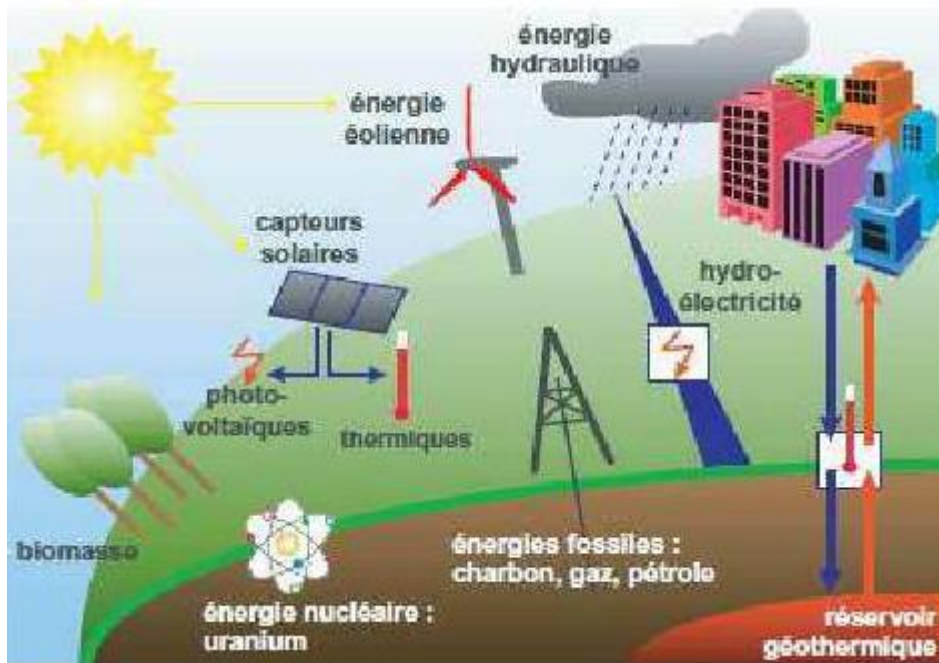
## **Généralité sur L'énergie renouvelable**

## **I.1 Introduction**

L'énergie, sous de multiples formes, est un des piliers du développement socio- économique des sociétés contemporaines. Le paysage énergétique mondial fait toutefois face à une crise grandissante. En effet, l'accroissement de la demande pour les ressources énergétiques en provenance des économies émergentes et la rareté grandissante des combustibles fossiles traditionnels bouleversent les modèles énergétiques actuels. La demande accrue des pays émergents et les réserves de pétrole diminuant encouragent la mise en place d'alternatives afin de combler ces besoins en croissance permanente. Les énergies renouvelables constituent de véritables solutions aux combustibles fossiles, notamment pour les communautés quasi exclusivement dépendantes de ces types d'énergies [2].

## **I. 2 Définition**

Le terme énergie renouvelable est employé pour désigner des énergies qui, à l'échelle humaine au moins, sont inépuisables et disponibles en grande quantité. Ainsi il existe cinq grands types d'énergies renouvelables : l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la biomasse et la géothermie. Leur caractéristique commune est de ne pas produire, en phase d'exploitation, d'émissions polluantes (ou peu), et ainsi d'aider à lutter contre l'effet de serre et le réchauffement climatique [3].



**Fig (I.1):** les différents types d'énergies dans le monde sont toute du soleil [4].

## I.3 Les différents types d'énergie renouvelable

### I. 3.1 L'énergie solaire

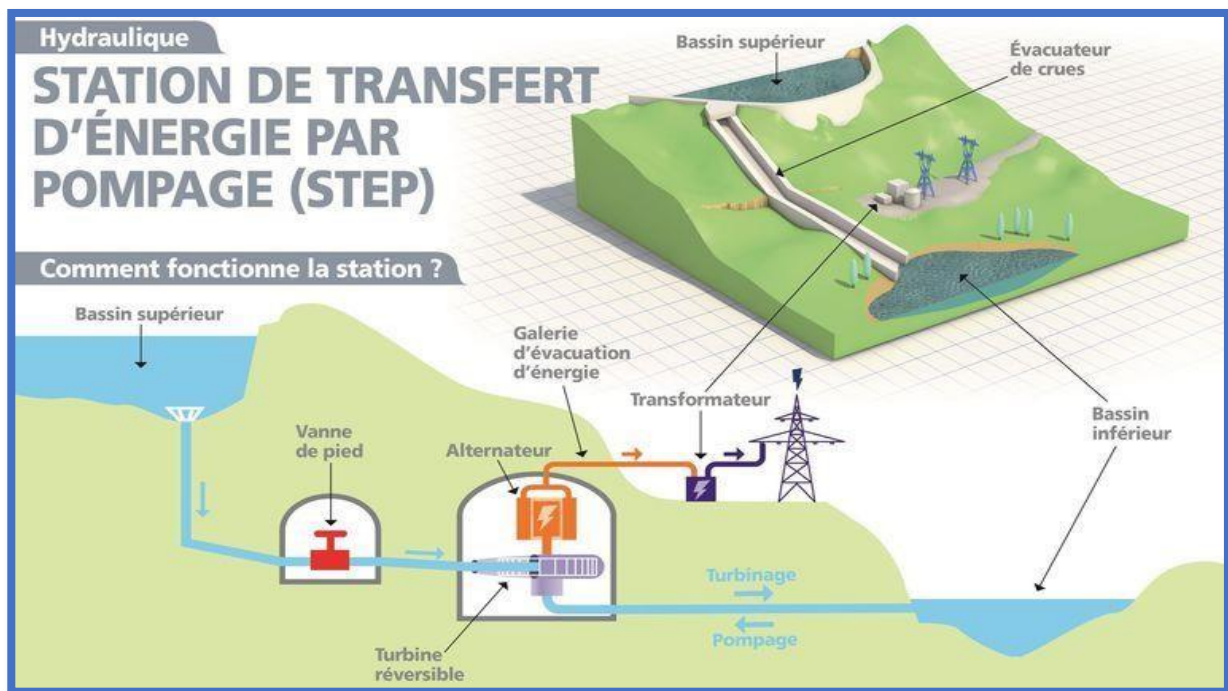
C'est l'énergie fournie par les rayons du soleil, plusieurs technologies transforment cette énergie en une forme électrique ou thermique que nous pouvons utiliser directement. C'est le cas des cellules photovoltaïques qui transforment la lumière du soleil directement en énergie électrique, ainsi que des collecteurs solaires qui permettent de chauffer l'eau des maisons par exemple, et les concentrateurs solaires qui utilisent des miroirs pour concentrer les rayons du soleil et générer une chaleur intense, transformant l'eau en vapeur et produisant de l'électricité grâce à certaines machines [5].



**Fig (I.2) : énergie solaire [6].**

### I.3.2 L'énergie hydraulique

Cette énergie provient de la force de l'eau en mouvement, Plusieurs technologies permettent d'exploiter cette énergie, les roues à aubes peuvent la transformer directement en énergie mécanique (moulin à eau), tandis que les turbines et les générateurs électriques la transforment en électricité [5].



**Fig (I.3): Schéma de production d'électricité par l'hydraulique [7].**

### **I.3.3 L'énergie éolienne**

Provient de l'énergie cinétique du vent, l'aérogénérateur terme technique désignant l'éolienne, permet de la transformer en électricité [8].



**Fig (I.4) : une turbine Eolienne [9]**

### **I.3.4 La biomasse**

(Masse des végétaux) regroupe le bois, la paille, les rafles de maïs, le biogaz et les biocarburants. Le bois issu des déchets de la forêt ou des industries du bois est brûlé pour produire de la chaleur. Il représente 14 % de la consommation énergétique mondiale [5].

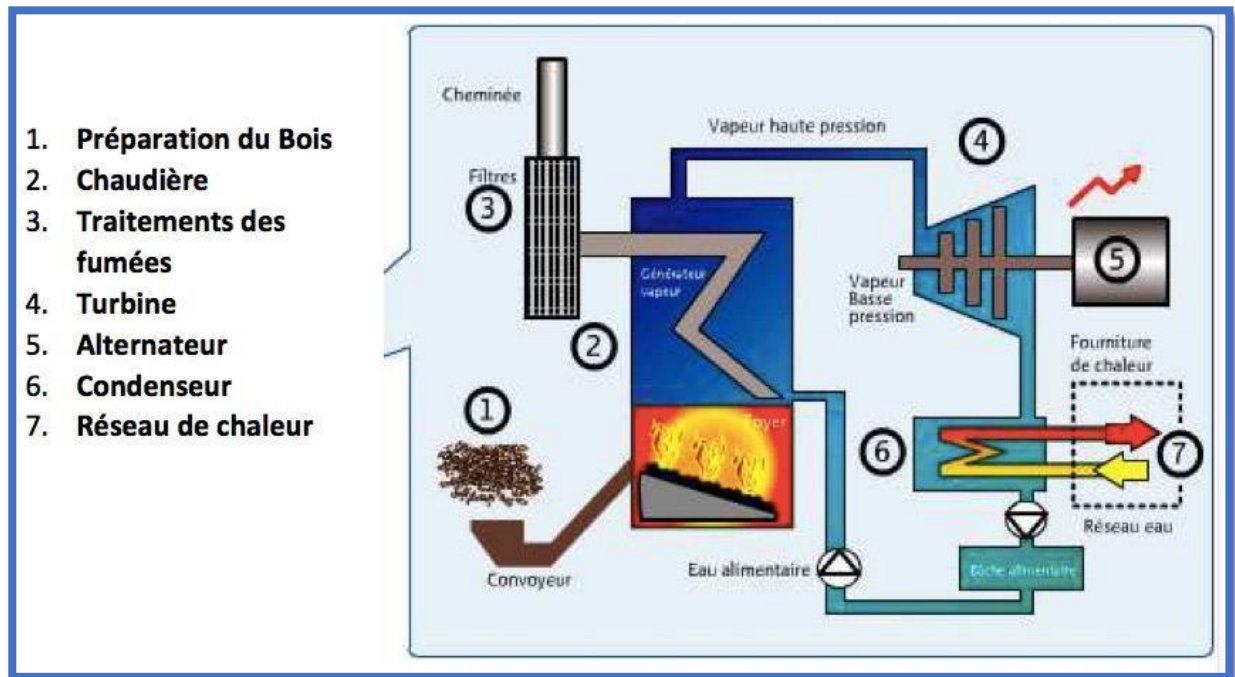


Fig (I.5) : Un schéma Illustrant la biomasse [7].

### I.3.5 La géothermie

Cette énergie Utilisant la chaleur du sous-sol, la géothermie peut permettre de chauffer des locaux (avec une température moyenne ou faible), ou de produire de l'électricité par vapeur interposée (avec une température élevée) [5].

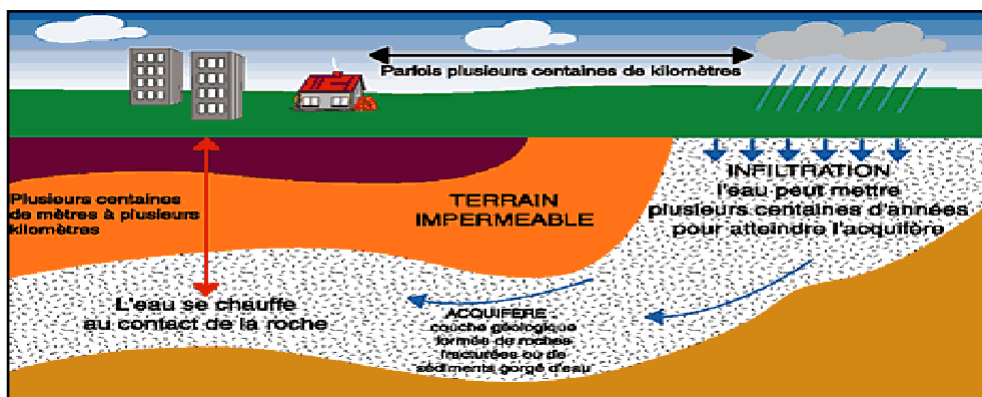
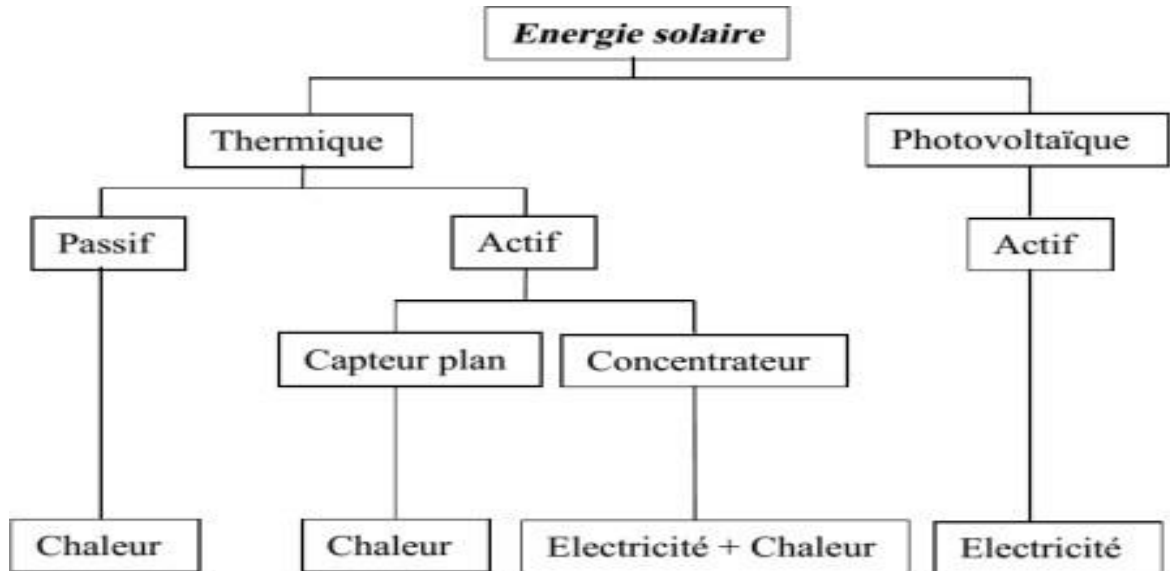


Fig (I.6) : Géothermie basse énergie [9].

## I.4 Les différents types d'utilisation de l'énergie solaire

Il existe différents types d'énergies solaires que nous allons les citer puis les expliquer :



**Fig (I.7) :** Différentes types d'énergie solaire et son utilisation [13].

### I.4.1 L'énergie solaire thermique

Cette énergie est la transformation des rayons du soleil en énergie thermique c'est-à-dire en chaleur. Cette énergie peut être utilisée directement soit pour le chauffage mais aussi pour obtenir de l'eau chaude. Le principe général est de concentrer les rayons solaires en un seul endroit. Ceux-ci sont alors piégés par des capteurs solaires thermiques vitrés qui transmettent l'énergie solaire à des absorbeurs métalliques. Ces mêmes absorbeurs réchauffent alors un réseau de tuyaux où circule un fluide caloporteur (c'est-à-dire un fluide qui reçoit de la chaleur en un point de son circuit et qui la cède en un autre point). Cet échangeur va ensuite chauffer à son tour de l'eau stockée dans un cumulus, cette même eau ira alimenter chauffe-eau (pour l'eau sanitaire) et systèmes de chauffages solaires [11,12].



**Fig (I.8) :** énergie solaire thermique [10].

#### **I.4.2 L'énergie photovoltaïque**

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



**Fig ( I.9) :** Panneaux Solaires Photovoltaïque [9]

## **I.5 Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire [14]**

### **I.5.1 Les avantages de l'énergie solaire**

L'énergie solaire est une énergie renouvelable qui comporte des avantages :

- L'énergie solaire est inépuisable et non polluante ;
- Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple des installations éoliennes ;
- Le rendement énergétique est positif.

### **I.5.2 Les inconvénients de l'énergie solaire**

- Le coût d'investissement d'une installation solaire thermique est relativement élevé
- L'énergie solaire est une énergie intermittente.
- La production d'énergie solaire n'est possible que lorsqu'il y a du Soleil ;
- La durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle mais de l'ordre de 20 à 30 ans ;
- Le recyclage des panneaux solaires pose encore question.

## **I.6 Les capteurs solaires**

Un capteur solaire thermique est un dispositif conçu pour recueillir de l'énergie provenant du soleil et la transmettre à un fluide caloporteur. Il existe plusieurs types de capteurs solaires thermiques : les capteurs plans non-vitrés, les capteurs plans vitrés, les capteurs sous vide et les capteurs à concentration. Ces types de capteurs diffèrent considérablement en qualité, en rendement, en conception et en coût.

### **I.6.1 Capteurs plans**

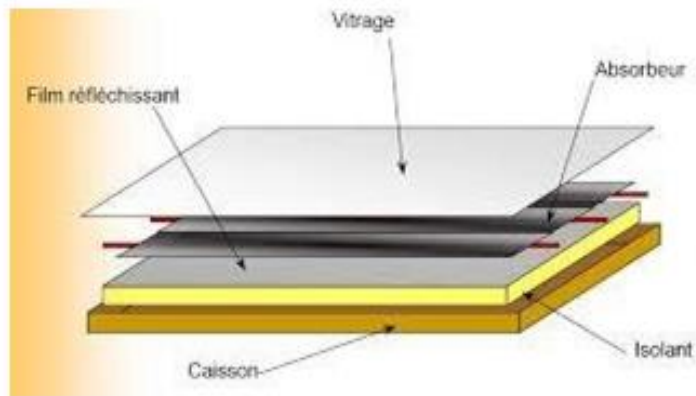
Les capteurs plans sont utilisés pour des applications à basses et à moyennes températures.

De ce type des capteurs on peut citer :

#### **I.6.1.1 Capteurs plan vitrés**

C'est un élément très simple, comportant un absorbeur métallique qui transforme le rayonnement solaire en chaleur, transmet cette chaleur à un liquide caloporteur, cet absorbeur est monté dans un boîtier isolé recouvert d'un verre ou feuille en matière synthétique hautement transparente. L'absorbeur comporte une couche noire souvent sélective qui absorbe efficacement le rayonnement solaire et réduit les pertes par rayonnement.

Pour des niveaux de températures de 35° à 90°C, il est nécessaire d'utiliser des capteurs avec vitrage. L'absorbeur est dans ce cas, métallique (en cuivre ou en aluminium), dans un caisson isolé en face arrière, et vitré en face avant. La fonction du vitrage est de piéger le rayonnement en créant un effet de serre. **fig I.10** présente la structure d'un capteur plan vitré [15].



**Fig ( I.10) : Capteur plan vitré**

### **I.6.1.2 Capteurs plans non vitrés**

Il s'agit d'un seul absorbeur en matière synthétique pour les applications à basse températures en métal revêtu d'une couche sélective, se compose d'un réseau de tubes noirs accolés les uns aux autres [15].



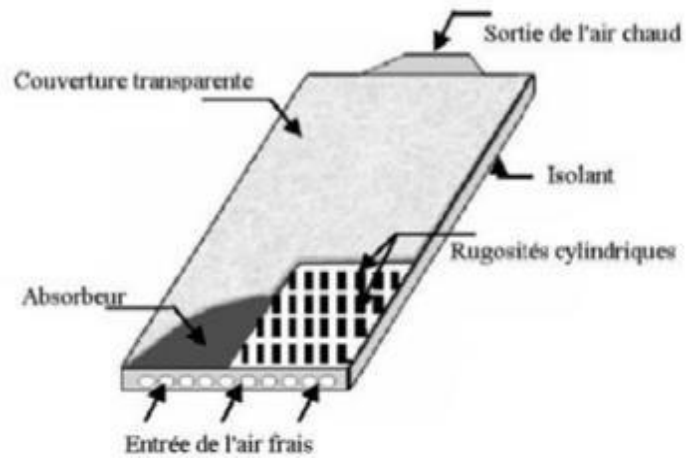
**Fig ( I.11) : Capteurs plans non vitrés. [15]**

### **I.6.1.3 Capteurs à air**

Les capteurs à air produisent de l'air chaud, ces capteurs sont indiqués dans certaines installations de ventilation, d'aération douce, de chauffage des locaux et dans le cas du chauffage à air. Une application particulière de ces capteurs est le séchage du foin, ils sont légers et n'ont pas de problème de refroidissement ni d'ébullition, c'est

son avantage par rapport aux capteurs à liquide.

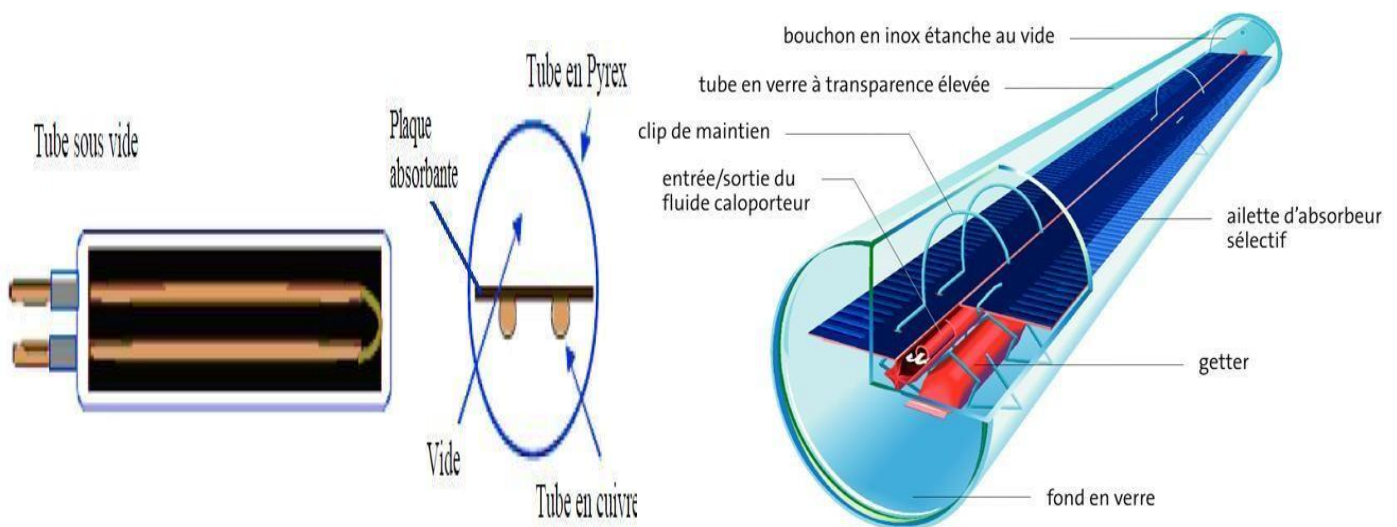
**Fig. I.12** illustre le capteur plan à air [16].



**Fig ( I.12 )** : Capteur plan à air

### I.6.1.4 Capteur sous vide

Le capteur sous vide est composé d'unisérié de tube en verre sous vide (pas d'air), d'un absorbeur à l'intérieur du tube de verre et d'un tube en cuivre, à l'intérieur du tube de verre, au sein duquel circule un fluide caloporteur pour ensuite être chauffé au fil de l'écoulement dans les tube tubes. **Fig I.13** présente le capteur sous vide [15].



**Fig (I.13) :** Capteur sous vide

### I.6.2 Les concentrateurs

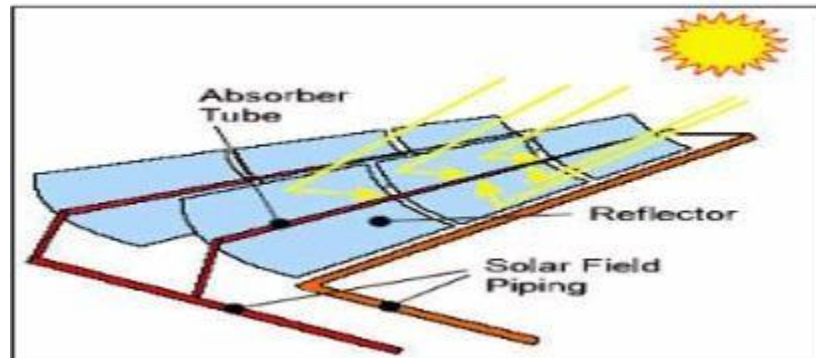
Les capteurs à concentration fonctionnent avec un système de poursuite du soleil selon que la concentration se fait sur un point (suivi du soleil selon deux axes) ou sur une ligne (suivi du soleil selon un axe), les températures atteintes sont plus ou moins élevées. Les principaux types de capteurs à concentration sont :

- Concentrateur cylindro-parabolique
- Concentrateur parabolique
- Centrale à tour

### I.6.2.1 Les concentrateurs cylindro-paraboliques

Les capteurs à concentration cylindro-paraboliques concentrent la lumière sur un absorbeur linéaire, avec un système de poursuite du soleil selon une seule direction.

La **fig I.14** représente le concentrateur cylindro-parabolique [16].

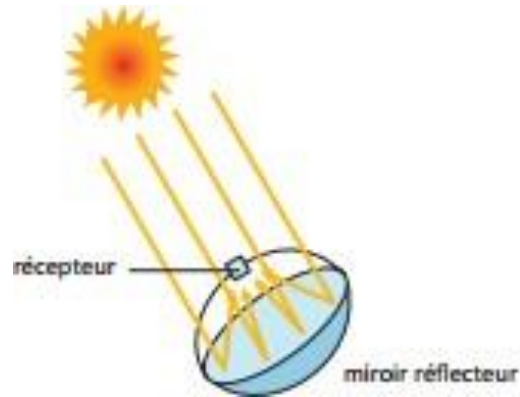


**Fig (I.14) :** Schéma d'un capteur cylindro-parabolique

### I.6.2.2 Concentrateur parabolique

Ces capteurs utilisent des surfaces réfléchissantes paraboliques pour concentrer les rayons solaires dans le foyer où se trouve le récepteur (absorbeurs) qui capte la chaleur ainsi concentrée. Naturellement ces concentrateurs doivent suivre le mouvement du soleil. Les systèmes à réflecteur parabolique peuvent atteindre des températures plus élevées (jusqu'à 1500°C) sur le récepteur.

La **fig I.15** donne le schéma de concentrateur parabolique [17].

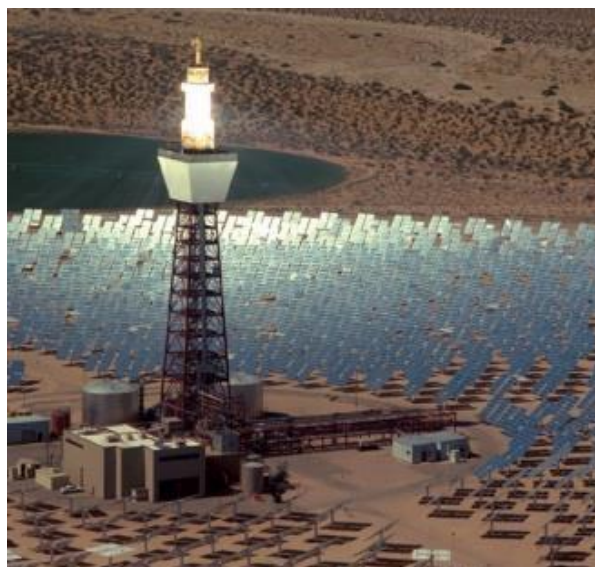
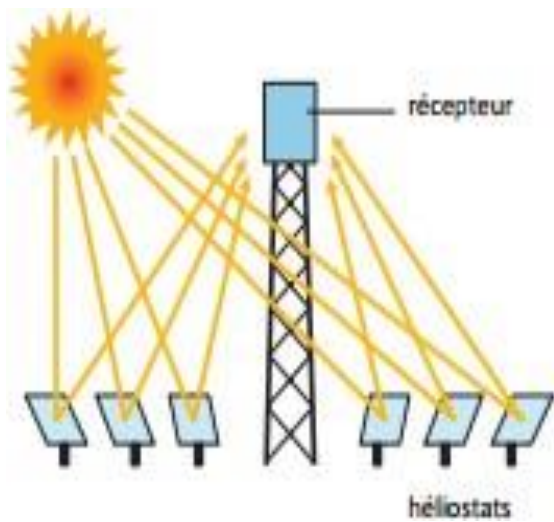


**Fig ( I.15) :** Concentrateur parabolique

### **I.6.2.3 Les centrales à tour**

Les installations de ce type concentrent la lumière sur un absorbeur ponctuel, à l'aide de miroirs (appelé "héliostats") qui suivent le soleil selon deux directions, sur une chaudière située au sommet d'une tour. De ce fait, le facteur de concentration est plus important, ainsi que les températures atteintes. Compte tenu du grand nombre de miroirs, les puissances peuvent atteindre plusieurs MW. Une telle centrale (Thémis) a été expérimentée dans les années 80, et devrait reprendre du service prochainement. Ces systèmes permettent d'atteindre des températures de 400 à 800 °C, pour des puissances de plusieurs MW [16].

La **fig I.16** présente une centrale à tour [17]



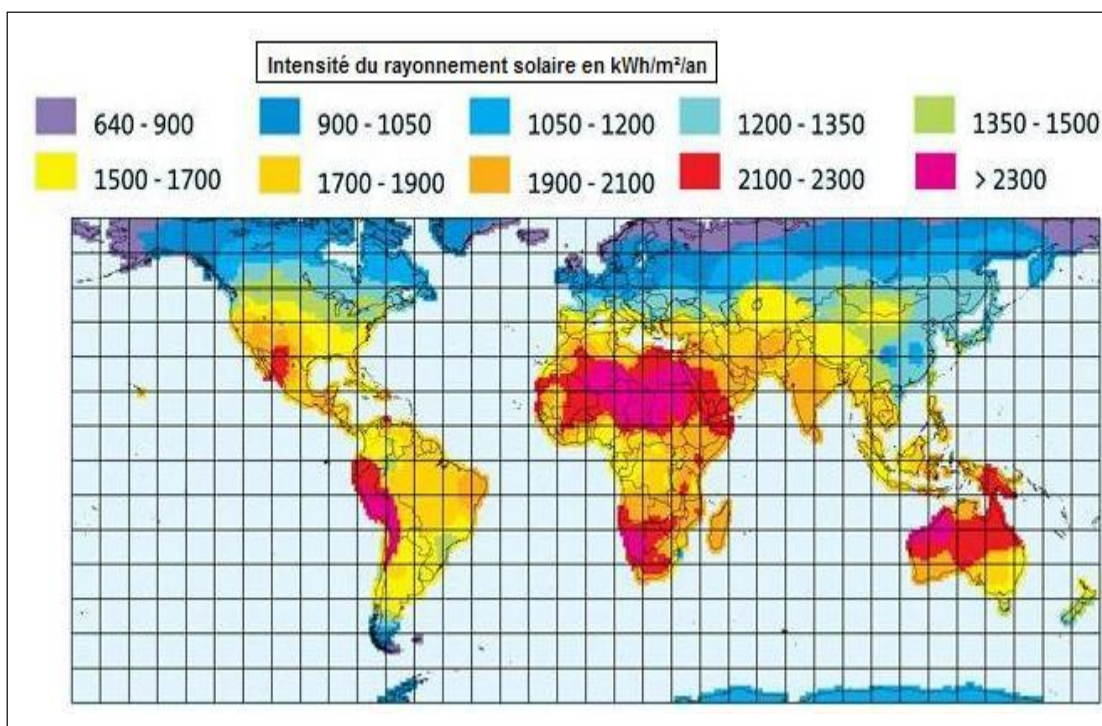
**Fig (I.16) :** Centrale à tour

## I.7 Gisement solaire en Algérie [18]

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire.

Par sa situation géographique, l'Algérie dispose de l'un des gisements solaires les plus élevés au monde comme le montre dans la **Fig (I.17)**.

La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara) (Tableau 1.1). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5KW/h sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 (KW/h/m<sup>2</sup>)/an au Nord et 2263 (KWh/m<sup>2</sup>)/an au Sud.



**Fig (I.17) :** Rayonnement solaire annuel dans le monde

Le potentiel en énergie renouvelable le plus important, en Algérie, c'est le solaire.

Il est le plus important de tout le bassin méditerranéen:

- 169 440 TWh/an [T] : Téra  $10^{12}$
- 5.000 fois la consommation algérienne en électricité
- 60 fois la consommation de l'Europe des 15 (estimée à 3.000 TWh/an)

La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau (I.1) selon l'ensoleillement reçu annuellement :

Régions	Région côtière	Hauts plateaux	Sahar a
Superficie %	04	10	<b>86</b>
Durée moyenne d'ensoleillement h/an	2650	3000	<b>3500</b>
Energie moyenne reçue kWh/m <sup>2</sup> /an	<b>1700</b>	<b>1900</b>	<b>2650</b>

**Tableau ( I.1) :** Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques

## I.8 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est l'ensemble du rayonnement émis par le soleil. En plus des rayons cosmiques, particules animées d'une vitesse et d'une énergie extrême élevées, le soleil émet des ondes électromagnétiques dont le spectre s'étend des ondes radio aux rayons gamma, en passant par la lumière visible. Ce rayonnement transporte l'énergie solaire, indispensable à toute vie terrestre.

En effet, une partie du rayonnement solaire est réfléchi par l'atmosphère, une autre partie y est diffusée et le reste atteindra la surface de la terre, formant le rayonnement global qui est le rayonnement solaire restant à disposition à la surface de la terre. [19]

## I.9 Les composantes du rayonnement solaire

### a) Rayonnement direct

Le rayonnement direct est la lumière parvenant directement du soleil par ciel clair. [20]

### b) Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus est le rayonnement émis par des obstacles (nuages, sol, bâtiments) et provient de toutes les directions. La part du rayonnement diffus n'est pas négligeable et peut atteindre 50% du rayonnement global (selon la situation géographique du lieu). Le rayonnement global sur la terre et sa part de rayonnement diffus varie au cours de l'année. [20]

### c) Rayonnement global

Le rayonnement global est la somme des rayonnements diffus et direct. [20]

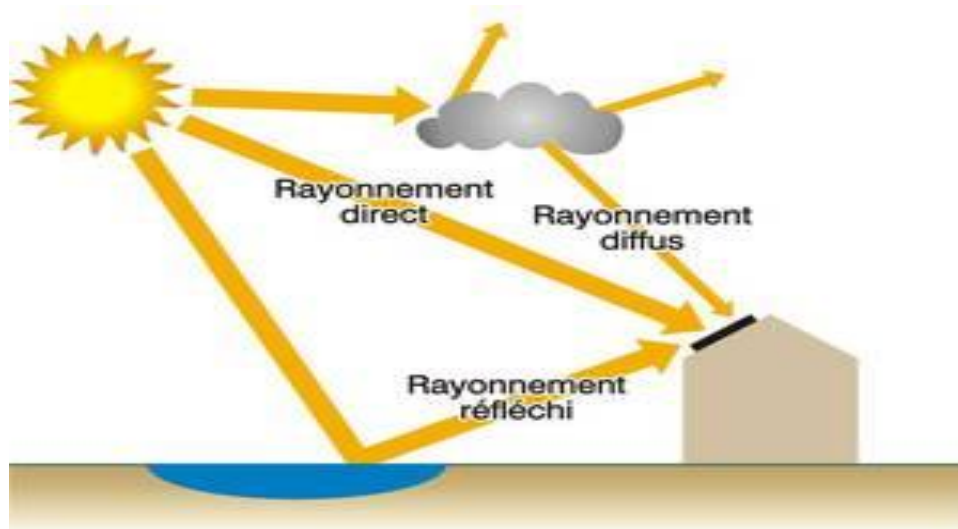


Fig (I.18) : composantes du rayonnement solaire

## I.10 Le champ solaire

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

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

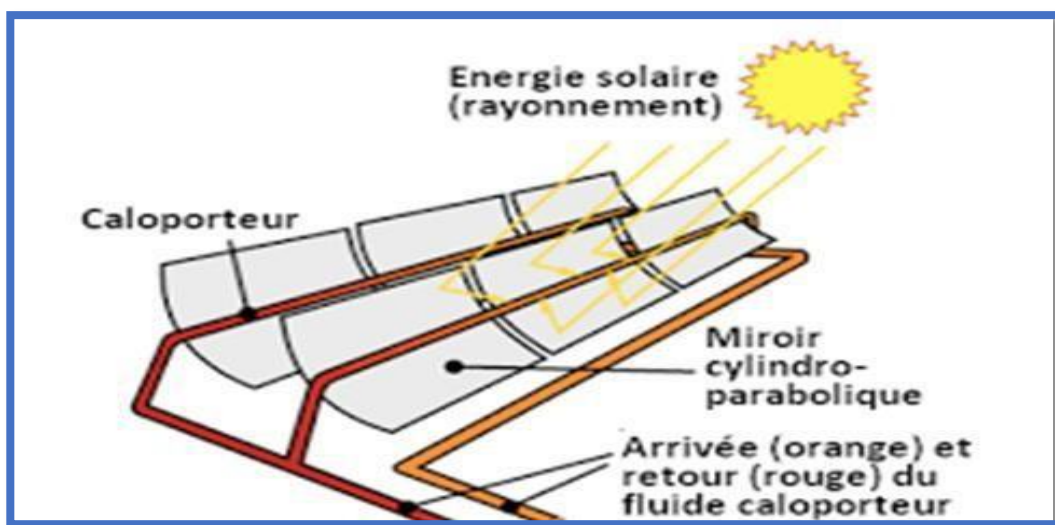


Fig (I.19) : champ solaire [21].

## I.11 L'effet de la poussière et de la saleté sur l'efficacité des panneaux solaires

La poussière et la saleté sont les facteurs les plus importants affectant l'efficacité du travail des cellules solaires, car l'accumulation de poussière sur les panneaux réduit les performances des cellules et leur production d'énergie de 20 à 50 %. Surtout si vous restez longtemps sans nettoyer, car l'accumulation de poussière pendant de longues périodes peut entraîner l'apparition de points chauds sur le point chaud, ce qui endommage les cellules.

L'accumulation de particules de poussière à la surface des cellules solaires reflète une grande quantité de rayonnement solaire disponible. Ainsi, on réduit le rayonnement solaire incident net reçu par les panneaux. Par conséquent, cette réduction affectera la production et l'efficacité énergétiques. Ce problème peut être atténué en introduisant un

mécanisme de nettoyage qui aide à réduire l'accumulation de poussière sur les panneaux solaires. [ 22]



**Fig (I.20) : Nettoyage de miroir [ 23]**

# Chapitre II

## Concentrateur cylindro- parabolique

## **II.1 Introduction**

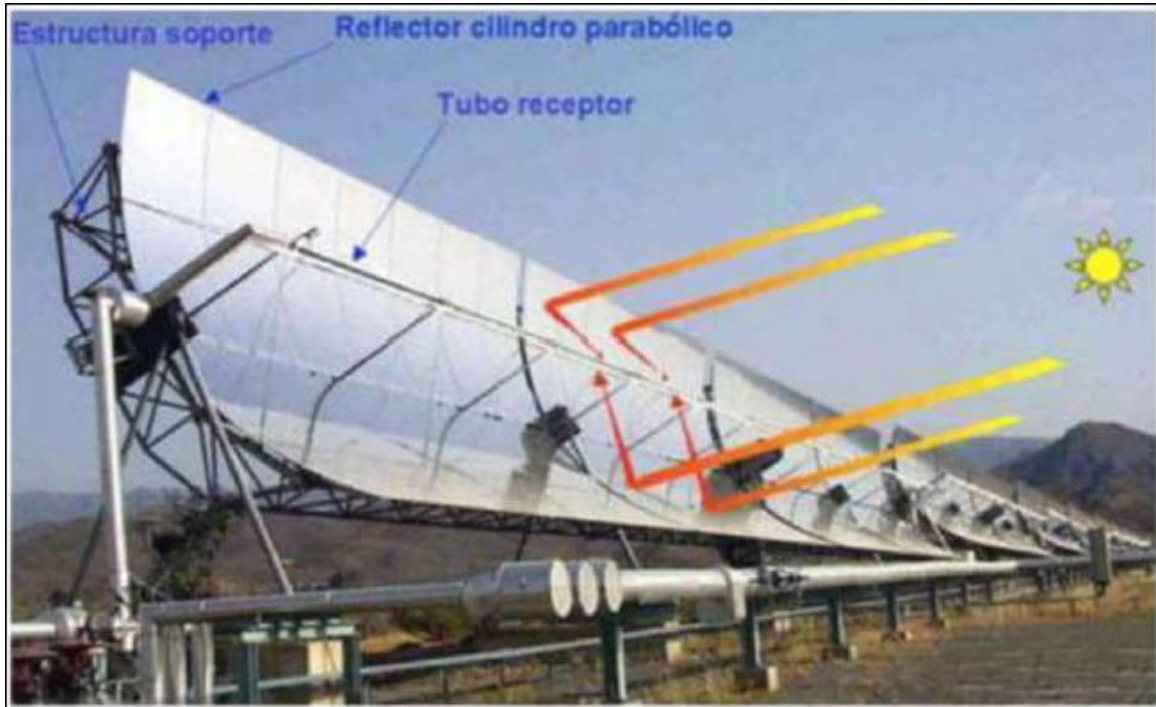
La conversion de l'énergie solaire en chaleur thermique à moyenne et à haute température est obtenue par des techniques différentes en fonction des besoins. Elle fait recours à une technologie plus élaborée, par l'idée de concentrer les rayonnements solaires pour augmenter l'intensité de flux solaire au moyen de capteurs optiques plus élaborés appelés concentrateurs solaires.

L'énergie solaire thermique active permet de récupérer la chaleur du rayonnement solaire au sein d'un fluide, parfois de l'air, le plus souvent de l'eau, par la mise en œuvre de capteurs solaires. Pour ce faire, on utilise des capteurs solaires mais de tous les capteurs, les concentrateurs cylindro-paraboliques occupent une place de haut niveau car ils permettent d'obtenir un bon rendement avec des températures élevées. Cette technique permet assurer la production d'eau chaude sanitaire ou d'eau distillée, le chauffage des piscines et de l'habitation, le séchage de céréales ainsi que la stérilisation médicale.

Dans ce chapitre nous allons parler de cette technologie de capteur cylindro-parabolique et aussi sur la modélisation mathématique du CCP

## **II.2 Principe de fonctionnement**

Ce type de centrale se compose d'alignements parallèles de longs miroirs hémicylindriques, qui tournent autour d'un axe horizontal pour suivre la course du soleil. Les rayons solaires sont concentrés sur un tube horizontal, où circule un fluide caloporteur qui servira à transporter la chaleur vers la centrale elle-même. La température du fluide peut monter jusqu'à 400° C. Cette énergie est transférée à un circuit d'eau, la vapeur alors produite actionne une turbine qui produit de l'électricité [24,25].



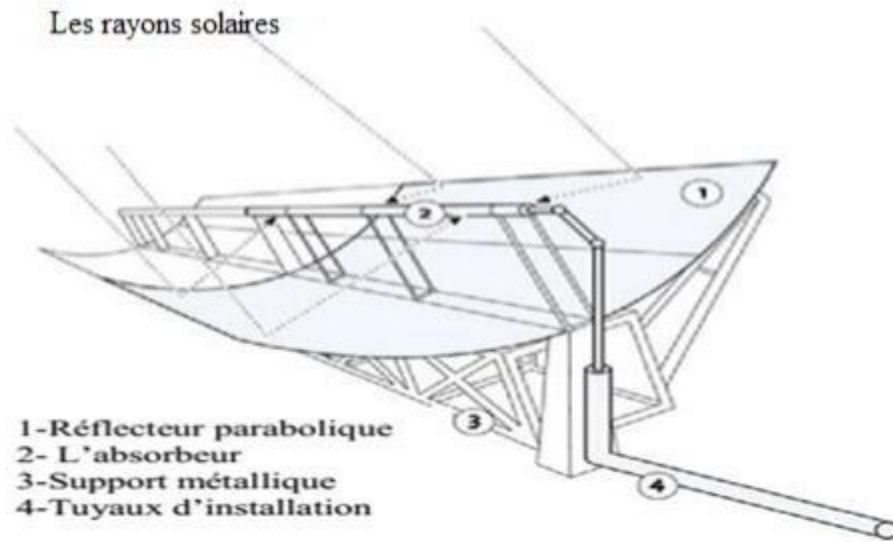
**Fig (II.1):** Schéma d'un miroir cylindro-paraboliques, et une vue latérale montrant comment concentre la lumière solaire à son point focal. [24].

## II.3 Concentrateur cylindro parabolique CCP

### II.3.1 Description

Les CCP sont des systèmes en forme de « U ». Ils concentrent les rayons du soleil sur un tube récepteur situé le long de la ligne focale du réflecteur. Le tube absorbeur est l'élément le plus important car c'est à l'intérieur duquel que circule le fluide caloporteur dont la température peut atteindre entre 200 à 400°C. Il est souvent en cuivre recouvert d'une couche sélective, est entouré d'une enveloppe transparente en verre. L'énergie solaire incidente absorbée, est partiellement transmise au fluide caloporteur, une partie est dissipée sous forme de pertes thermiques entre l'absorbeur et la vitre [26].

Les concentrateurs cylindro-parabolique sont surtout utilisés dans les applications industriels domestiques exigeant des températures importantes et qui peuvent atteindre parfois jusqu'à 1600°C dans des installations sophistiquées comme production de la vapeur surchauffé dans les centrales électriques.



**Fig (II.2) :** Capteur à concentration cylindro-parabolique [27]

### II.3.2 La poursuite solaire

Afin d'être plus efficaces, ces types de concentrateurs doivent avoir un système de poursuite solaire. Dans ce cas, il s'agit d'un système de poursuite biaxiale qui tourne au tour de deux axes en suivant la course du soleil. Sous des angles multiples et de façon à ce que le soleil irradie entièrement le concentrateur. Ce système est appelé Tracker et est considéré comme un système révolutionnaire de traque solaire biaxial qui permet de suivre avec précision la trajectoire du soleil et qui fait appel à une technologie CPS de pointe, de ce fait la variation de l'angle d'incidence selon Kalogéro : [28]

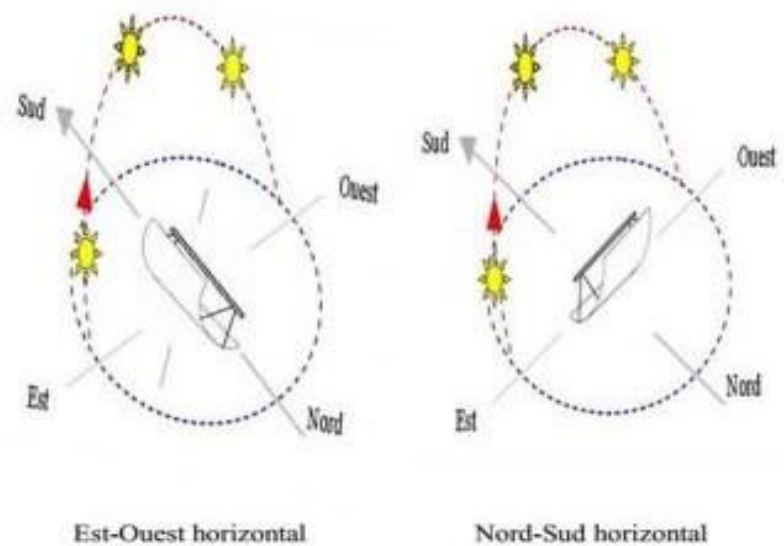
- Poursuite N-S à traction E-W

$$\cos\theta = \sqrt{\sin^2(\alpha) + \cos^2(\delta)\sin^2(h)} \quad (\text{II-1})$$

$$\cos\theta = \cos(\Phi)\cos(h) + \cos(\delta)\sin^2(h) \quad (\text{II-2})$$

Poursuite E-W à traction N-S :

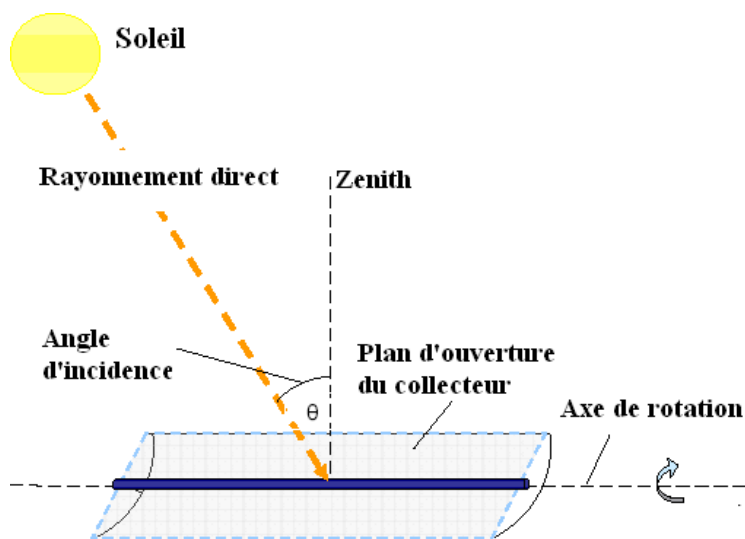
$$\cos\theta = \sqrt{1 - \cos^2(\delta)\sin^2(h)} \quad (\text{II-3})$$



**Fig ( II.3):** Orientations possibles d'un CCP [27].

### II.3.3 Angle d'incidence

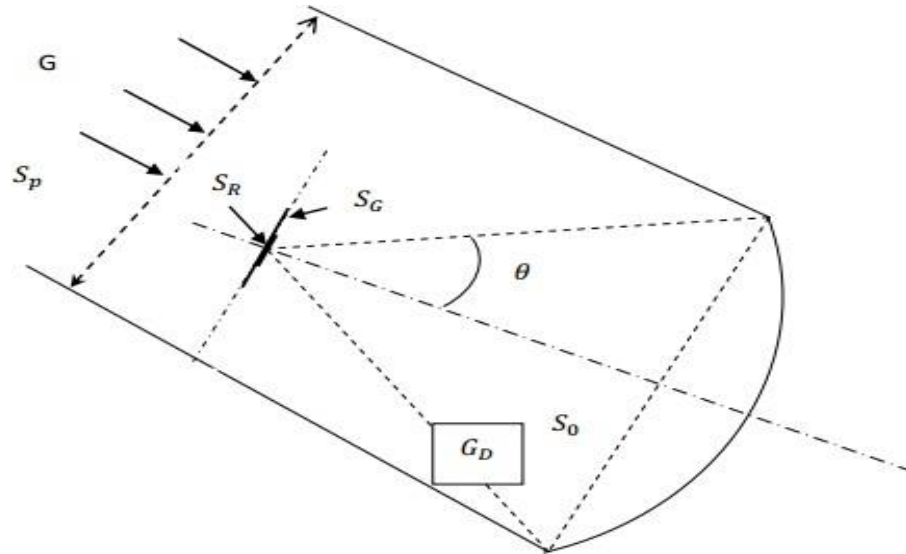
L'angle d'incidence représente l'angle entre le rayonnement direct sur une surface et le plan normal de cette dernière. L'angle d'incidence varie tout au long de la journée, ce qui provoque la variation du rayonnement direct sur la surface du capteur. La figure II.4 illustre l'angle d'incidence sur un capteur solaire cylindro-parabolique.



**Fig ( II.4):** Angle d'incidence sur un capteur cylindro-parabolique [29]

### II.3.4 Les Caractéristiques géométriques du CCP

La figure II.5 nous donne les différentes surfaces caractérisant un CCP :



**Fig (II.5):** Différentes surfaces caractérisant un CCP

### II.3.5 Taux de concentration

Le taux de concentration est le rapport entre la surface d'ouverture (la surface de captation)  $S_0$  et la surface de l'absorbeur  $S_r$  :

$$C = \frac{S_0}{S_r} \quad (\text{II -4})$$

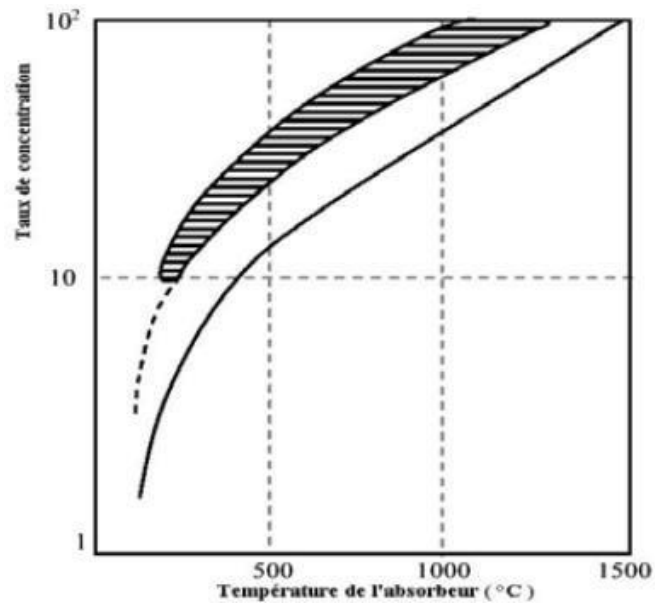
Une autre définition du taux de concentration a été proposée qui est le rapport de l'intensité du flux au niveau de l'ouverture de capteur et l'intensité du flux de l'absorbeur :

$$C = \frac{I_o}{I_a} \quad (\text{II -5})$$

Avec :

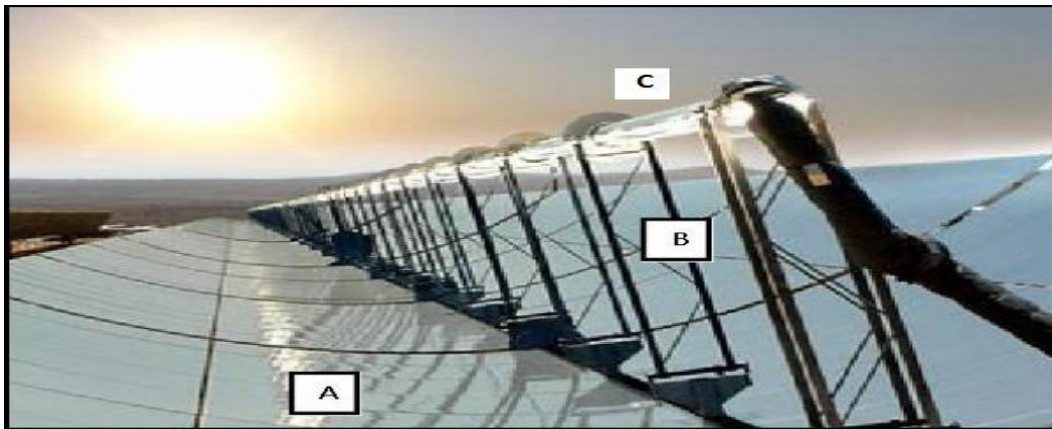
$S_r$  : la surface de l'absorbeur.

La **Fig II.6** montre la variation du taux de concentration en fonction de la température de l'absorbeur.



**Fig ( II.6 ):** Variation du taux de concentration en fonction de la température de l'absorbeur [28]

### II.3.6 Les composantes d'un CCP



**Fig ( II.7 ):** Les composantes d'un capteur cylindro-parabolique

A : Collecteur, B : Reflecteur, C : Tube absorbeur

### **II.3.6.1 Le collecteur**

Le collecteur est la composante de base du champ solaire. Il est constitué d'un réflecteur cylindro-parabolique (miroir), d'une structure métallique (en acier), d'un tube absorbeur et d'un système de poursuite solaire [27].

### **II.3.6.2 Le réflecteur**

Les réflecteurs d'un CCP sont généralement en miroir ou autre métal réfléchissant. Les miroirs sont composés de verre pauvre en fer, ce verre est recouvert d'une pellicule d'argent en sa partie inférieure et d'un enduit spécial de protection. Le matériau réfléchissant le mieux indiqué est l'aluminium pur.

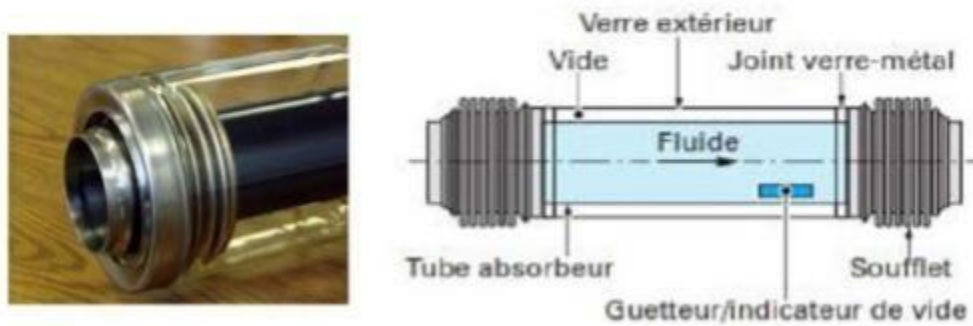
Pour pouvoir choisir un réflecteur cylindro-parabolique. On aura toujours intérêt à adopter la géométrie idéale pour obtenir une bonne concentration géométrique. Un réflecteur de bonne qualité peut réfléchir 97% du rayonnement incident [27].

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

### **II.3.6.3 L'absorbeur (récepteur)**

L'absorbeur doit absorber autant de flux solaire concentré que possible, et le convertir en énergie thermique, cette chaleur est transférée à un fluide caloporteur (généralement de l'eau, de l'air ou de l'huile). Il est important que l'absorbeur soit métallique, car seuls les métaux ont de bons coefficients de conduction (Cuivre : 389W/m.K ; Aluminium : 200 W/m.K ; Acier : 60 W/m.K).

La figure II.8 présente la structure de l'absorbeur :



**Fig ( II.8 ):** Structure de l'absorbeur

La surface de l'absorbeur doit avoir des caractéristiques suivantes : [27]

- Une bonne conductivité et diffusion thermique.
- Un facteur d'absorption aussi voisin que possible de l'unité.
- Une bonne résistance chimique vis à vis du fluide utilisé.

En effet, afin d'augmenter le principe de captation ainsi que le processus du transfert de chaleur, on a généralement recours à des surfaces sélectives.

#### **II.3.6.4 La surface sélective**

C'est une surface qui a une absorptivité élevée pour le rayonnement solaire et une émissivité faible pour le rayonnement infrarouge émis à une température donnée. Cette surface dite sélective est en générale un film mince d'une épaisseur de l'ordre de la grandeur d'onde du rayonnement solaire intercepté, qui peut être obtenu par plusieurs procédés. Parmi les méthodes de réalisation des surfaces sélectives, on note : [30]

- Dépôt par projection sous vide .
- La pulvérisation cathodique .
- Dépôt par action chimique (C.V.D) .
- Oxydation à chaud ou dépôt par pulvérisation (spray) .

- Dépôt par voie d'électrolyse .
- L'oxydation anodique .

### **II.3.6.5. Les fluides caloporteurs**

Le fluide caloporteur a pour rôle de véhiculer l'énergie convertie sous forme de chaleur au moyen de l'absorbeur pour l'utiliser ou la stocker. Il doit avoir les propriétés suivantes: [27]

- Une faible viscosité et un point de coulée aussi bas que possible .
- Un point d'ébullition élevé et un point de congélation bas .
- Une résistance chimique vis-à-vis des matériaux de l'installation et une toxicité faible .
- Occasionnant moins de pertes de charge linéaire .
- Un coefficient de diffusion thermique élevé .

Un fluide caloporteur est utilisé suivant quelques critères de sélection :

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

Les types de fluides caloporteurs utilisés pour les CCP sont : des huiles synthétiques thermiques (par exemple Therminol VP-1, Caloria, Syltherm), de l'eau (liquide ou vapeur), des sels fondus...etc.

**Tableau ( II.1):** Caractéristiques de collecteurs cylindro - parabolique LS-3 [31].

PROPRIETES	MODELE - 3	LS
OUVERTURE	5,76 m	
Longueur	99 m	
DISTANCE ENTRE RANGE	16 – 17 m	
SURFACE DE REFLEXION	545 m <sup>2</sup>	
DIAMETRE DE TUBE ABSORBEUR	0.07 m	
RAPPORT DE CONCENTRATION	80	
REFLECTIVITE DE MIRROIR	0.93	
COEFFICIENT D'ABSORBITIVITE D'ABSORBEUR	0.96	
COEFFICIENT D'EMISSIVITE D'ABSORBEUR	0.17	
COEFFICIENT DE TRANSMISSIVITE DE MIRROIR	0.98	
COEFFICIENT DE TRNSMISSIVITE DE L'ENVELOPE	0.96	
EN VERRE		
RENDEMENT MAXIMALE	68%	

## II.4 Domaine d'application de l'énergie solaire thermique

L'énergie solaire thermique est la transformation du rayonnement solaire en énergie thermique (chaleur). Il consiste à récupérer la chaleur du rayonnement solaire grâce à un fluide caloporteur (le plus souvent de l'eau ou de l'air), qui s'échauffe en circulant dans un absorbeur placé sous un vitrage. Celui-ci laisse pénétrer la lumière solaire et minimise les pertes par rayonnement infrarouge de l'absorbeur en utilisant l'effet de serre. Ce vitrage permet en outre de limiter les échanges de chaleur avec l'atmosphère[32].

Ainsi, cette chaleur produite peut être utilisée pour la production d'eau chaude sanitaire ou d'eau distillée, production de l'air chaud qui est utilisé dans plusieurs processus industriels et techniques tels que le séchage des produits granulaires, le chauffage des maisons, la pasteurisation solaire de liquide et la stérilisation des instruments médicaux [32].

## II.5 Analyse thermique du champ solaire

Le champ solaire comporte des séries assemblées de collecteurs solaires, chaque collecteur est caractérisé par sa performance. Le rendement du champ solaire dépend du rendement thermique et optique du concentrateur. L'énergie globale en termes de puissance du rayonnement solaire incident directement sur la surface réfléchissante du collecteur pourra être mesurée à l'aide de l'équation suivant :

$$Q_{g=A.DNI} \quad (\text{II -6})$$

Où, A désigne la surface totale réfléchissante du champ solaire exprimé en (m<sup>2</sup>), le DNI est l'irradiation normale incidente sur le collecteur pour un angle d'incidence définie.

L'énergie totale absorbée par le fluide HTF circulant à l'intérieure de l'absorbeur est quantifiée par :

$$Q_{Abs} = Q_g \cdot \eta_{op} \quad (\text{II - 7})$$

Le rendement optique est défini par :

$$\eta_{op} = \rho_{renv} \cdot \alpha_{abs} \quad (\text{II - 8})$$

Où,  $\rho$  est le coefficient de réflectivité de la surface du collecteur,  $r_{env}$  désigne la

transmissivité de l'enveloppe du verre et  $\alpha_{abs}$  l'absorptivité de l'absorbeur.

Due aux pertes thermiques au niveau du collecteur à cause des phénomènes de convection et rayonnement, la puissance utile est inférieure à celle déjà absorbée.

La puissance thermique gagnée par le fluide caloporteur vaut :

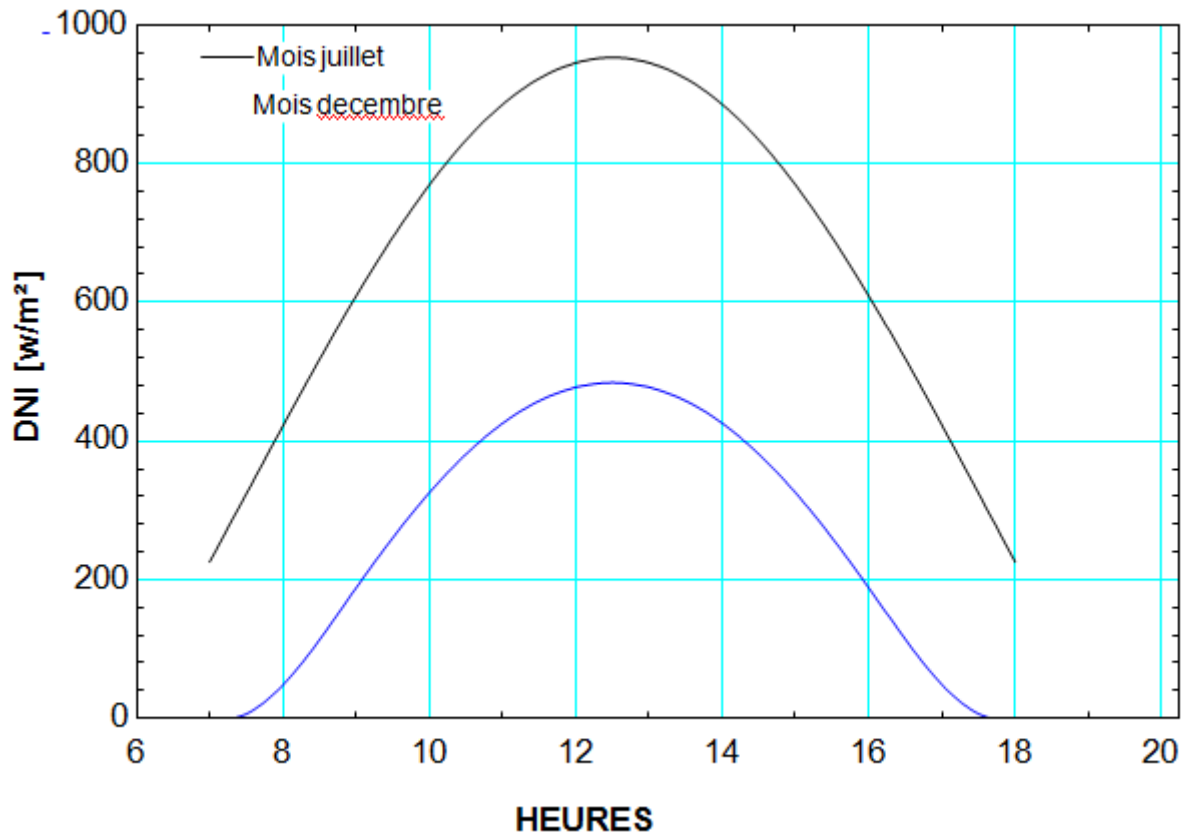
$$Q_u = Q_{Abs} \cdot \eta_{th.col} \quad (\text{II} - 9)$$

$\eta_{th.col}$  représente le rendement thermique du collecteur.

Le rendement du champ solaire est défini par le rapport entre la puissance thermique absorbée au niveau de l'absorbeur à celle de la puissance globale incidente sur la surface de concentrateur :

$$\eta_{cs} = \frac{Q_{Abs}}{Q_g} \quad (\text{II} - 10)$$

La modélisation du champ solaire ainsi que le cycle de vapeur est réalisée par le logiciel Engineering Equation Solver EES [33-34]



**Fig (II.9):** Variation quotidienne du DNI pour les mois de juillet et de décembre

La figure II.9 montre l'intensité des irradiations normales incidentes par tranche horaire pour le mois de décembre et le mois de juillet. Les données sont prises pour un intervalle de 12 heures, de 06h le matin à 18h de l'après midi.

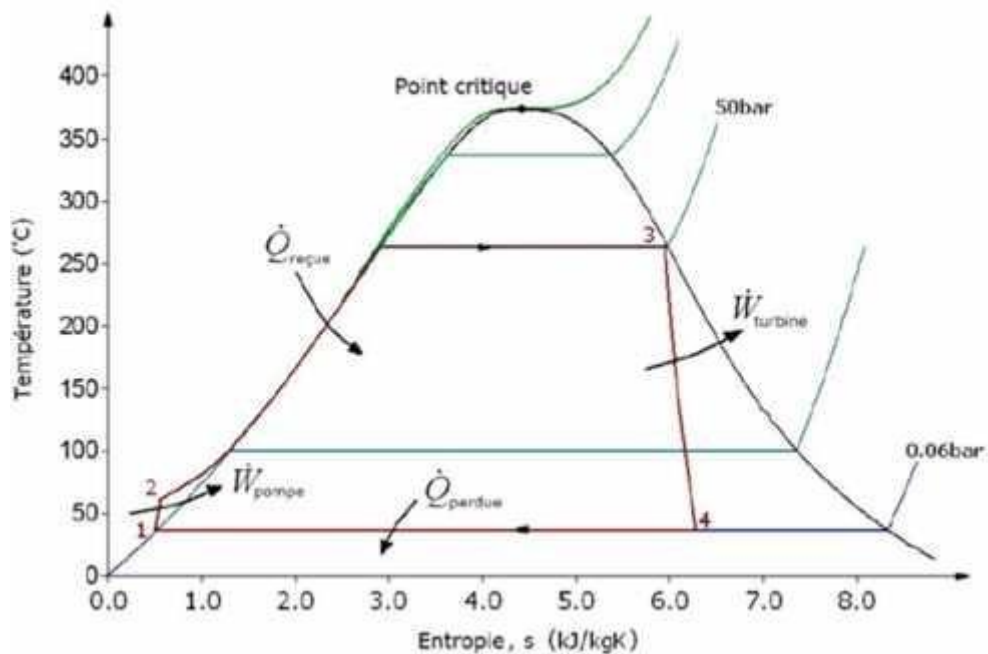
## II.6 Analyse thermodynamique du cycle de vapeur

### II.6.1 Introduction

Le cycle le plus proche de cycle de Carnot c'est celui de Rankine, après l'application de certaines modifications techniques sur le cycle de Carnot.

Le cycle de Rankine idéal diffère du cycle de Carnot par la compression isentropique sur le liquide suivie d'une transformation isobare de chauffage ou chaleur sensible [35], le cycle de Rankine est un moteur thermique à vapeur [36].

Le cycle de Rankine est utilisé dans les différentes installations énergétiques à vapeur, le fluide commun utilisé dans ce cycle est l'eau, d'autres fluides peuvent être utilisés, ROC (Rankine Organique Cycle) qui sont utilisés dans les centrales solaires qui fonctionnent dans un intervalle de températures moins élevé par rapport à celles qui utilisent l'énergie fossile [37]. Des contraintes techniques détériorent cependant le rendement, qui sont améliorés par des changements dans le cycle idéal, des cycles différents introduites après le changement de certains paramètres comme (cycles de Hirn, avec surchauffe et soutirages, cycles combinés gaz / vapeur).



**Fig(II.10):** schéma descriptif du diagramme Température, entropie (T, s) du cycle de Rankine de base.

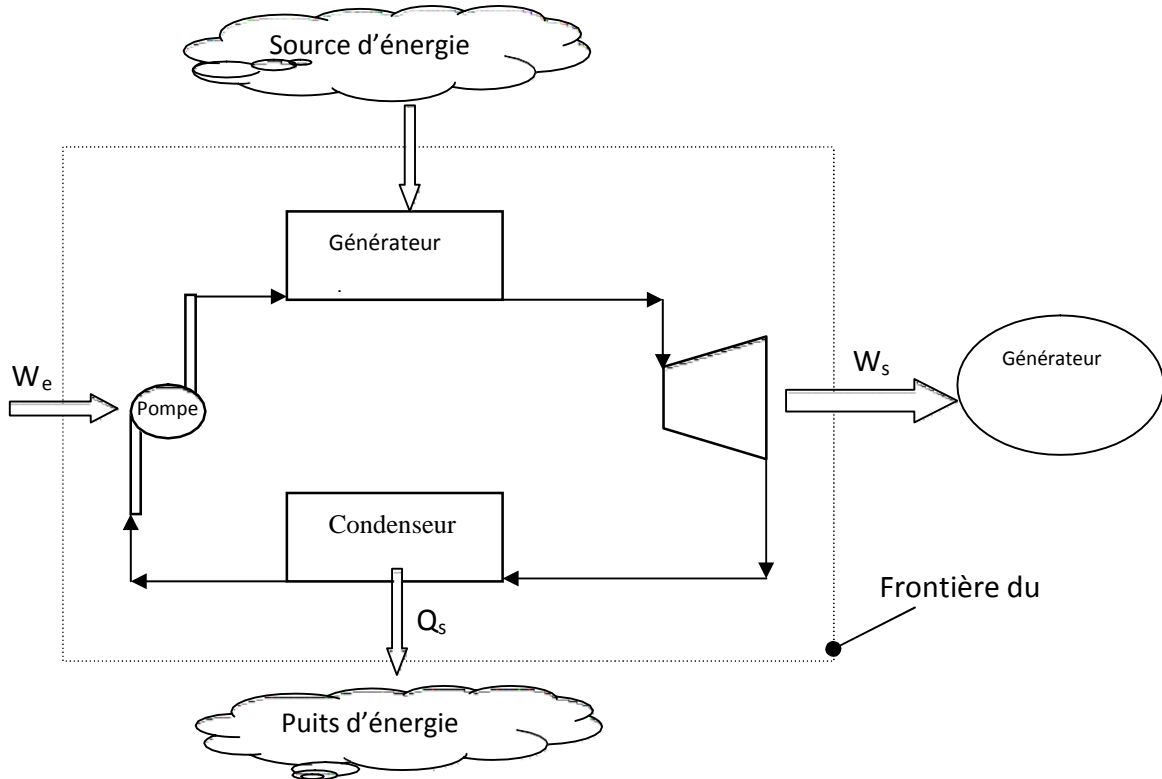
## II.6.2 Le but

De toute étude de performance de cycle de Rankine idéal est de déterminer les points qui limitent de maximiser le rendement thermique et surtout l'efficacité d'un système et de résoudre les problèmes de réalisations. Le cycle de Rankine optimise le rendement thermique avec l'augmentation de travail net et en profitant au maximum d'énergie thermique fournie au système des modifications ont introduites et appliquées par la variations de certains paramètres de fonctionnement de cycle de l'installations motrice qui influence

sur la performance globale du cycle par exemple : la température d'entrée et de sortie dans la turbine et chaudière, la pression dans la chaudière ou de condenseur, débit de fluide traversant le système [38].

### II.6.3 Elements essentielles de cycle de rankine

Les composantes principales d'une centrale thermique fonctionnant suivant le cycle de Rankine est schématisé par :



**Fig (II.11):** schéma des composantes de cycle de Rankine

On suppose que le générateur de vapeur global GVG est l'ensemble du générateur de vapeur solaire SSG et le générateur de vapeur HRSG, donc l'énergie thermique globale fournie au générateur de vapeur GVG s'écrit :

$$Q_t = Q_{solaire} \quad (\text{II -11})$$

$Q_t$  désignant la chaleur totale fournie au cycle de Rankine à surchauffe,

$Q_{solaire}$  est la chaleur récupérée par le fluide caloporteur à partir du champ

solaire, cette quantité d'énergie est variable suivant certains facteurs tel que, l'intensité quotidienne, la température de sortie du fluide caloporteur du champ solaire, le débit de masse du HTF circulant à l'intérieur des boucles des concentrateurs cylindro – paraboliques.

**Tableau II.2:** Caractéristiques de fonctionnement de la turbine à vapeur [39]

Modèle	Siemens SST-600
Température d'entrée de la turbine	560°C
Pression d'entrée de la turbine	83 Bars
Débit massique de vapeur	70kg/s
Température du liquide condense	52°C
Rendement isentropique de la turbine	0.9
Charge totale	80MW

Le travail net produit par le cycle est déterminé par la relation suivante :

$$W_{net} = W_t - W_p \quad (\text{II -12})$$

$W_t$  est le travail mécanique de la turbine à vapeur,

$W_p$  est le travail mécanique de la pompe de recirculation de l'eau

dans le cycle. Donc, le rendement thermique :

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_t} \quad (\text{II - 13})$$

## II.7 Modélisation mathématique du CCP

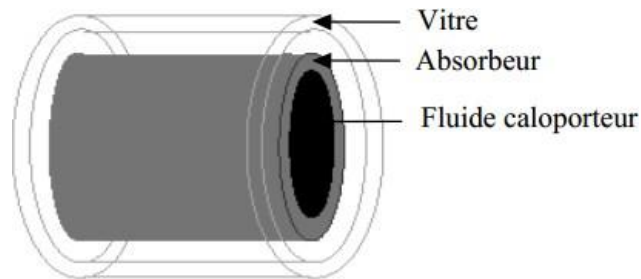
### II.7.1 Introduction

Le CCP est composé de différentes parties comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent mais le tube absorbeur est l'élément le plus important du capteur car c'est dans cette partie que s'effectue les échanges thermiques.

Ces échanges sont régis par des équations de transferts de chaleur que nous allons établir dans ce chapitre puis les discréditer pour la permettre la résolution du système.

## II.7.2 Description du CCP

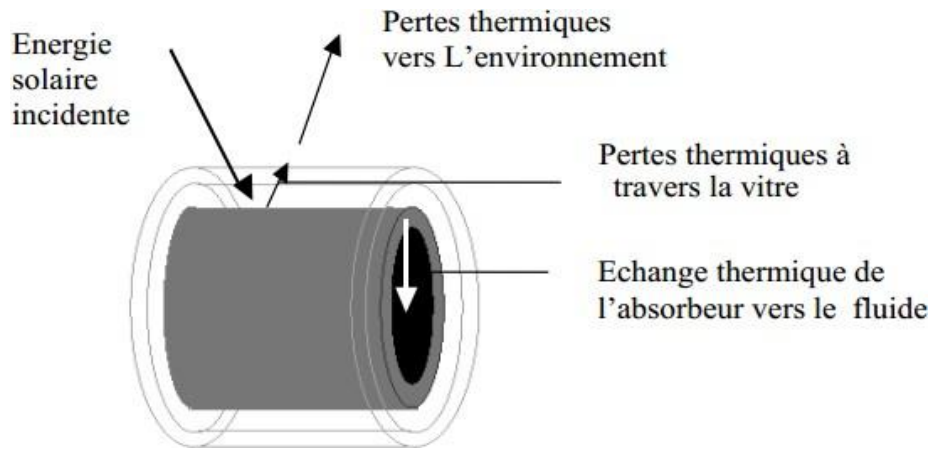
Le tube absorbeur est l'élément le plus important du concentrateur dans lequel circule le fluide caloporteur, il est en métal (soit en aluminium ou en cuivre) et recouvert d'une couche sélective appropriée et entouré d'un tube en verre (l'enveloppe transparente). Il est placé le long de la ligne focale du CCP. La figure II.12 présente la structure du tube absorbeur.



**Fig (II.12) :** Schéma du tube absorbeur [40]

Entre les différentes entités du CCP notamment le verre, l'absorbeur et le fluide caloporteur s'effectue les échanges thermiques. Le rayonnement solaire incident réfléchi par les miroirs paraboliques tombe sur l'absorbeur après passage à travers la vitre. Cette énergie solaire incidente absorbée, n'est pas entièrement transmise au fluide caloporteur, où une partie est dissipée sous forme de perte de chaleur entre l'absorbeur et la vitre d'une part, la vitre et le milieu ambiant d'autre part. En prenant en considération des différentes parts d'énergies, celle recueillie par le fluide et perdue vers l'ambiance.

La **fig II.12** montre les différents types des échanges thermiques :



**Fig (II.13) :** Transferts thermiques entre les différentes parties du CCP [40]

## II.7.3 Les différents types de transfert de chaleur

### II.7.3.1 Le transfert de chaleur par conduction

Le transfert de chaleur par conduction se fait au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres.

Il est régi par la loi de Fourier :

$$Q = -\lambda \cdot S \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{II -14})$$

Q : flux de chaleur par conduction (W)

$\lambda$  : coefficient de conductivité (W/m.°C)

S : surface de passage du flux de chaleur (m<sup>2</sup>)

x : variable d'espace dans la direction  
du flux (m)

T : température du flux (°C)

### II.7.3.2 Le transfert de chaleur par convection

Il se fait entre un solide et un fluide, l'énergie est transmise par déplacement du fluide. Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton :

$$Q_{cv} = h \cdot s(T_p - T_\infty) \quad (\text{II-15})$$

$Q_{cv}$  : flux de chaleur par convection(W)

$h$  : le coefficient de convection

(W/m<sup>2</sup>. °C)  $S$  : la surface de

contact fluide/solide (m<sup>2</sup>)  $T_p$  :

température de la surface du

solide (°C)

$T_\infty$  : température du fluide loin de la surface du solide (°C)

### II.7.3.3 Le transfert de chaleur par rayonnement

Le transfert de chaleur par rayonnement a lieu lorsque de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques est émise par une surface et absorbée par une autre. Cet échange peut avoir lieu lorsque les corps sont séparés par le vide ou par n'importe quel milieu intermédiairesuffisamment transparent pour les ondes électromagnétiques.

La loi fondamentale qui régit le transfert de chaleur par rayonnement est celle de Stefan Boltzmann :

$$Q_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S (T_p^4 - T_\infty^4) \quad (\text{II.16})$$

$Q_r$  : Flux de chaleur émis par

rayonnement (W) $\varepsilon$  : Emissivité

thermique du matériau

$\sigma$  : Constante de Stefan-Boltzmann évaluée à 5,6.10-

8 W/m<sup>-2</sup>K<sup>-4</sup> $T_p$  : Température de la surface (K)

$T_\infty$  : Température du milieu environnant la

surface (K) $S$  : Aire de la surface (m<sup>2</sup>)

## II.7.4 Etablissement des équations caractéristiques du problème

### II.7.4.1 Bilan Thermique

Afin de faire un bilan thermique, des hypothèses simplistes doivent être posées : [26]

- Le fluide caloporteur est incompressible .
- La forme de parabole est asymétrique ;
- La température ambiante autour du capteur est uniforme ;
- La vitre est considérée comme opaque aux radiations infrarouges c'est-à-dire que la réflectivité égale le coefficient d'absorption ;
- L'écoulement du fluide est unidimensionnel ;
- L'échange par conduction dans l'épaisseur de l'absorbeur et la vitre est négligeable ;
- Le flux solaire au niveau de l'absorbeur est uniformément reparti ;
- L'effet de l'ombre du tube absorbeur sur le miroir est négligeable ;
- L'écoulement est hydrodynamique pleinement développé c'est-à-dire que le profil de vitesse est constant suivant l'axe (ox) ;

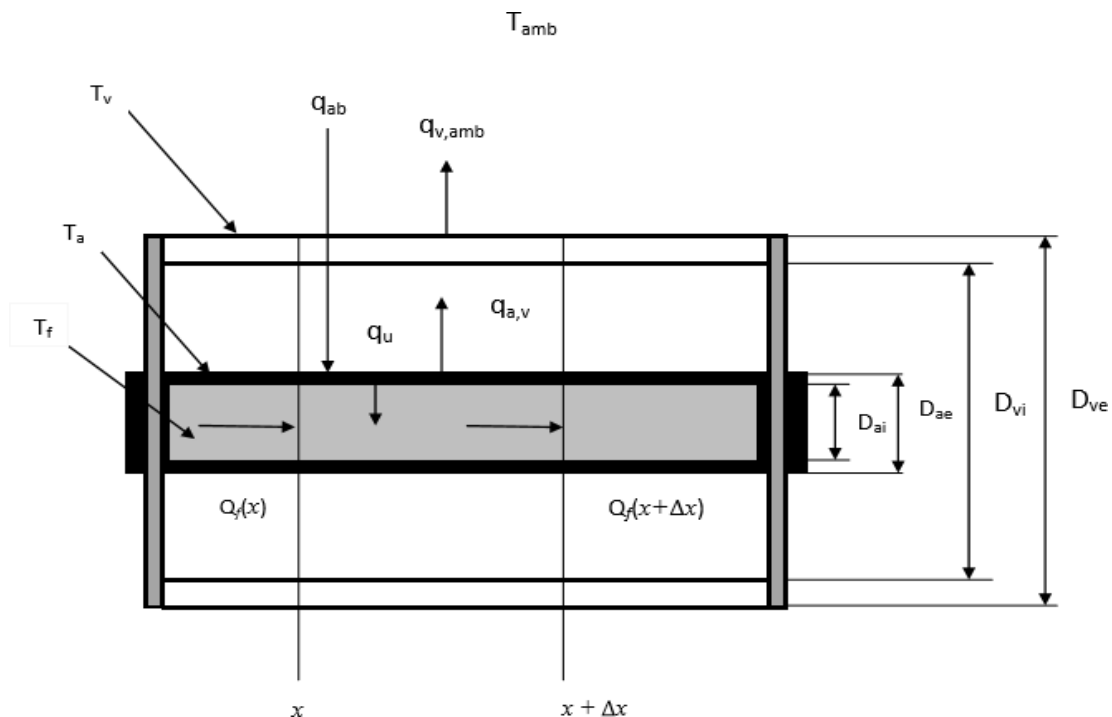


Fig (II.13) : Bilan thermique d'un élément de surface du CCP (coupe axiale) [41]

$q_{ab}$  : quantité de chaleur absorbée un niveau de l'absorbeur vient du soleil .

$q_u$  : quantité de chaleur utile cède au fluide caloporteur par l'absorbeur .

$q_{a,v}$  : quantité de chaleur échangée par convection entre le tube absorbeur et la vitre

$q_{v, amb}$  : quantité de chaleur échangée par convection entre la vitre et l'air ambiant .

$Q_{f-}(x)$  : le flux de chaleur du fluide caloporteur à l'abscisse  $x$  .

$Q_f(x + \Delta x)$  : le flux de chaleur du fluide caloporteur à l'abscisse  $x + \Delta x$

$D_{ai}$  : diamètre intérieur du tube absorbeur .

$D_{ae}$  : diamètre extérieur du tube absorbeur .

$D_{vi}$  : diamètre intérieur de l'enveloppe transparente .

$D_{ve}$  : diamètre extérieur de l'enveloppe transparente .

$T_f$  : température du fluide (K) .

$T_a$  : température de l'absorbeur (K) .

$T_v$  : température de la vitre (K) .

#### **II.7.4.2 Bilan thermique du fluide**

Le bilan énergétique pour le fluide caloporteur qui circule à l'intérieur du tube

absorbeur est donné par la relation suivante :

$$Q_{f_{x+\Delta x}} - Q_{f_x} = q_u(x) \cdot \Delta x \quad (\text{II -17})$$

D'où :

$$Q_{f_x} = \rho_f C_{p_f} \cdot \dot{m}_f T_f(x)$$

(II -18)

$$Q_{f_{x+\Delta x}} = \rho_f C_{p_f} \cdot \dot{m}_f T_{f_{x+\Delta x}} \quad (\text{II-19})$$

$\rho_f$  : la masse volumique du fluide caloporteur .

$C_{p_f}$  : la capacité calorifique du fluide .

$\dot{m}_f$  : le débit volumique du fluide .

**NB** : toutes les propriétés thermo-physiques du fluide sont en fonction de sa température. Si on remplace (II -18) et (II -19) dans (II -17), alors on aura :

$$\rho_f C_{p_f} \cdot \dot{m}_f T_{f_{x+\Delta x}} - \rho_f C_{p_f} \cdot \dot{m}_f T_{f_x} = q_{u_x} \cdot \Delta x \quad (\text{II -20})$$

$$[\rho_f C_{p_f} \cdot \dot{m}_f T_f(x + \Delta x) - \rho_f C_{p_f} \cdot \dot{m}_f T_f(x)] / \Delta x = q_u(x) \quad (\text{II-21})$$

La différence divisée du 1<sup>er</sup> ordre nous donne :

#### II.7.4.3 Bilan thermique de l'absorbeur

Le bilan énergétique pour l'absorbeur s'écrit comme suit :

$$\rho_f C_{p_f} \cdot \dot{m}_f \frac{\partial T_f(x)}{\partial x} + q_{u(x)} = 0$$

(II -22)

$$q_{u_x} + q_{a, v_x} = q_{ab} \quad (\text{II -23})$$

#### II.7.4.4 Bilan thermique de la vitre

Le bilan énergétique pour la vitre est :

$$q_{a, v(x)} - q_{v, amb(x)} = 0 \quad (\text{II -24})$$

$q_{a,v}(x)$  :c'est la quantité de chaleur échangée par convection naturelle entre l'absorbeur et la vitreà distance x de l'entrée ;

$q_{v, amb}(x)$  :c'est la quantité de chaleur perdue vers l'extérieur par convection entre la vitre et l'airambiant .

### II.7.4.5 Echanges de chaleur entre les éléments du tube absorbeur

Des échanges de chaleur se produit entre les différents éléments du tube absorbeur. Lafigure suivante illustre ces échanges :

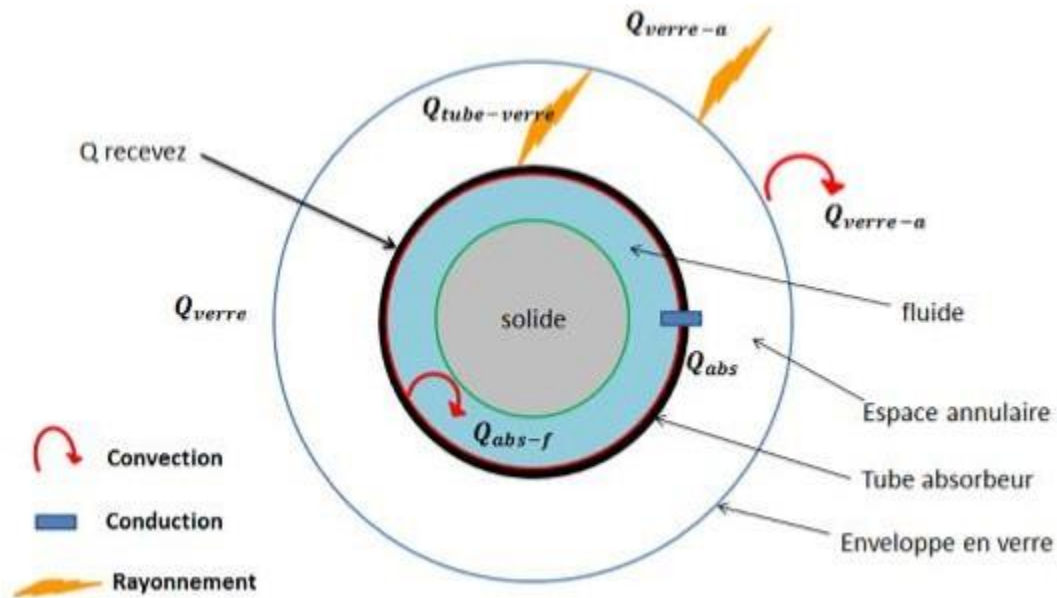


Fig (II.14) : Les différents modes d'échanges de chaleur [27]

### II.7.4.6 Echange thermique entre le fluide et l'absorbeur

Pour un écoulement dans un tube, le seul mode de transfert dominant est la convection, donc le flux utile  $q_u$  est exprimé par : [42]

$$q_u = h_{a,f} \cdot S_{ai} (T_a - T_f) \quad (\text{II -25})$$

$$h_{a,f} = \frac{K_f \cdot Nu_{Dai}}{D_{ai}} \quad (\text{II -26})$$

$$S_{ai} = \pi D_{ai}^2$$

$Nu_{Dai}$  : le nombre de Nusselt basé sur  $D_{ai}$

L'écoulement est considéré comme turbulent, donc on aura à partir de l'équation de DITTUS-BOELTER [43]:

$$Nu_{Dai} = 0.023 Re_{Dai}^{4/5} Pr_n \quad (\text{II -27})$$

$n = 0,3$  pour le

refroidissement ( $T_a < T_f$ )

$n = 0,4$  pour le chauffage

( $T_a > T_f$ )

$Re_{Dai}$  : nombre de Reynolds pour le diamètre  $D_{ai}$

$$Re_{Dai} = \frac{4\rho_f \dot{m}_f}{\pi D_{ai} \mu_f} \quad (\text{II -28})$$

$Pr_f$  : nombre de Prandtl pour le fluide :

$$Pr_f = \frac{\mu_f c_{pf}}{K_f} \quad (\text{II -29})$$

$\mu_f$  : la viscosité dynamique du fluide

$K_f$  : la conductivité thermique du fluide

#### II.7.4.7 Echange thermique entre l'absorbeur et la vitre

Entre l'absorbeur et la vitre, l'échange de chaleur  $q_{a,v}$  se fait par convection et rayonnement on a donc : [42]

- Une convection naturelle de l'absorbeur vers la vitre qui dépend de la pression atmosphérique (plus de 0,013 Pa) ;
- Un rayonnement de l'absorbeur vers l'enveloppe transparente qui se traduit par la différence de température entre la surface extérieure du tube et la surface de

l'enveloppe de verre à l'intérieur ; (II -30)

$$Q_{a,v} = Q_{a,v/conv} + Q_{a,v/ray}$$

On suppose que la paroi de l'enveloppe de verre est opaque à un rayonnement infrarouge et des surfaces grises, pour lequel  $\alpha=\rho$ .

- L'échange par convection est donné par :

$$q_{a,v/con} = \frac{2\pi K_{eff}}{\ln \frac{D_{vi}}{D_{ae}}} (T_a - T_v) \quad (\text{II -31})$$

Pour la détermination de la conductivité effective  $K_{eff}$ , une corrélation a été proposée : [41]

$$K_{eff} = 0.386.K_{air} \left( \frac{pr_{air}}{0.861 + pr_{air}} \right)^{\frac{1}{4}} (Ra_C)^{\frac{1}{4}} \quad (\text{II -32})$$

On a

$$Ra_C = \frac{[ \ln \left( \frac{D_{vi}}{D_{ae}} \right) ]^4}{L_c^3 \left( D_{ae}^{-\frac{1}{5}} + D_{vi}^{-\frac{3}{5}} \right)^5} Ra_L \quad (\text{II -33})$$

D'où :  $L_c$  est la longueur critique donnée par :

$$L_c = 0.5 (D_{vi} - D_{ae}) \quad (\text{II -34})$$

est le nombre de Rayleigh

$$Ra_L = \frac{g \beta_{air} (T_a - T_v) L_c^3}{\alpha_{air} \vartheta_{air}} \quad (\text{II -35})$$

$\beta_{air}$  : Le coefficient volumétrique de dilatation thermique de l'air

$\vartheta$  : La viscosité cinématique de l'air annulaire

Les propriétés de l'air dans l'espace annulaire, telles que  $\beta_{air}$ ,  $\alpha_{air}$ ,  $\rho_{air}$ ,  $K_{air}$ ,  $C_{p,air}$  et  $Pr_{air}$  sont en fonction de la température moyenne entre l'absorbeur et la vitre :

$$T_m = 0,5(T_a + T_v) \quad (\text{II -36})$$

- L'échange par rayonnement est donné par :

- rayonnement est donné par :

$$q_{a,v,ray} = \frac{\sigma \pi D_{ae} (T_a^4 - T_v^4)}{\frac{1}{\epsilon_a} + \frac{1 - \epsilon_v}{\epsilon_v} \left( \frac{D_{ae}}{D_{vi}} \right)} \quad (\text{II -37})$$

Avec  $\sigma$  : la constante de Stefan Boltfmann  $\sigma = 5,67.108Wm^2.K4$ .

$\mathcal{E}_v$  : est l'émissivité de la vitre,  $\mathcal{E}_v = 0,935$ .

$\mathcal{E}_a$  : est l'émissivité de l'absorbeur

L'émissivité de l'absorbeur dépend de plusieurs facteurs comme la température, l'état de surface, la direction du rayonnement et sa longueur d'onde. Mais on suppose parfois, par facilité de calcul, qu'elle ne dépend que de la température.

$$\varepsilon_a = f(T) = 0,000327 \cdot T_a - 0,065971 \quad (\text{II -38})$$

#### II.7.4.8 Echange thermique entre la vitre et l'environnement

Entre la vitre et le milieu extérieur, l'échange de chaleur se fait par deux modes : la convection et le rayonnement : [42] (II -39)

$$q_{v, amb} = q_{v, amb/conv} + q_{v, amb/ray}$$

- Echange par convection :

$$q_{v, amb/conv} = h_{v, amb} S_{ve} (T_v - T_{amb}) \quad (\text{II -40})$$

- Echange par rayonnement :

L'échange par rayonnement effectué entre la vitre et le milieu environnant est donné par la relation suivante :

$$q_{v, amb/ray} = \varepsilon_v \cdot \sigma \cdot S_{ve} (T_v^4 - T_{amb}^4) \quad (\text{II-41})$$

#### II.7.4.9 Energie solaire globale absorbée

L'énergie solaire globale absorbée est donnée par la relation : [41]

$$Q_{ab} = \varphi_{select} \alpha_{ab} \tau_v S_e G \quad (\text{II -42})$$

$\varphi_{select}$  : coefficient de réflexion de surface sélective

$\alpha_{ab}$  : coefficient d'absorption

de l'absorbeur

$\tau_v$  : coefficient de

transmission de la vitre

$S_e$  : surface efficace du

capteur (m<sup>2</sup>)

$G$  : chaleur du rayonnement par surface de capteur ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

#### II.7.4.10 Rendement thermique du CCP

Le rendement thermique du CCP est défini par : [41]

$$\eta = \frac{\int_0^t q_u dt}{\int_0^t GS_e dt} \quad (\text{II -43})$$

Pour un régime permanent, on aura :

$$\int_0^t q_u dt = q_u = \dot{m}_f C_{p,f} (T_{f,e} - T_{f,s}) \quad (\text{II -44})$$

$$\int_0^t GS_e dt = GS_e \quad (\text{II -45})$$

Alors :

$$\eta = \frac{\dot{m}_f C_{p,f} (T_{f,e} - T_{f,s})}{GS_e} \quad (\text{II -46})$$

$T_{f,e}$  et  $T_{f,s}$  sont des températures d'entrée et de sortie du fluide caloporteur.

# Chapitre III

## Simulation avec TRNSYS et EES

### **III. 1 Introduction**

Dans notre travail, nous allons procéder à une simulation du capteur clindro-parabolique pour un site qui se trouve à laghouat à l'aide du logiciel de simulation dynamique TRNSYS. en utilisant l'énergie solaire comme source de chaleur.

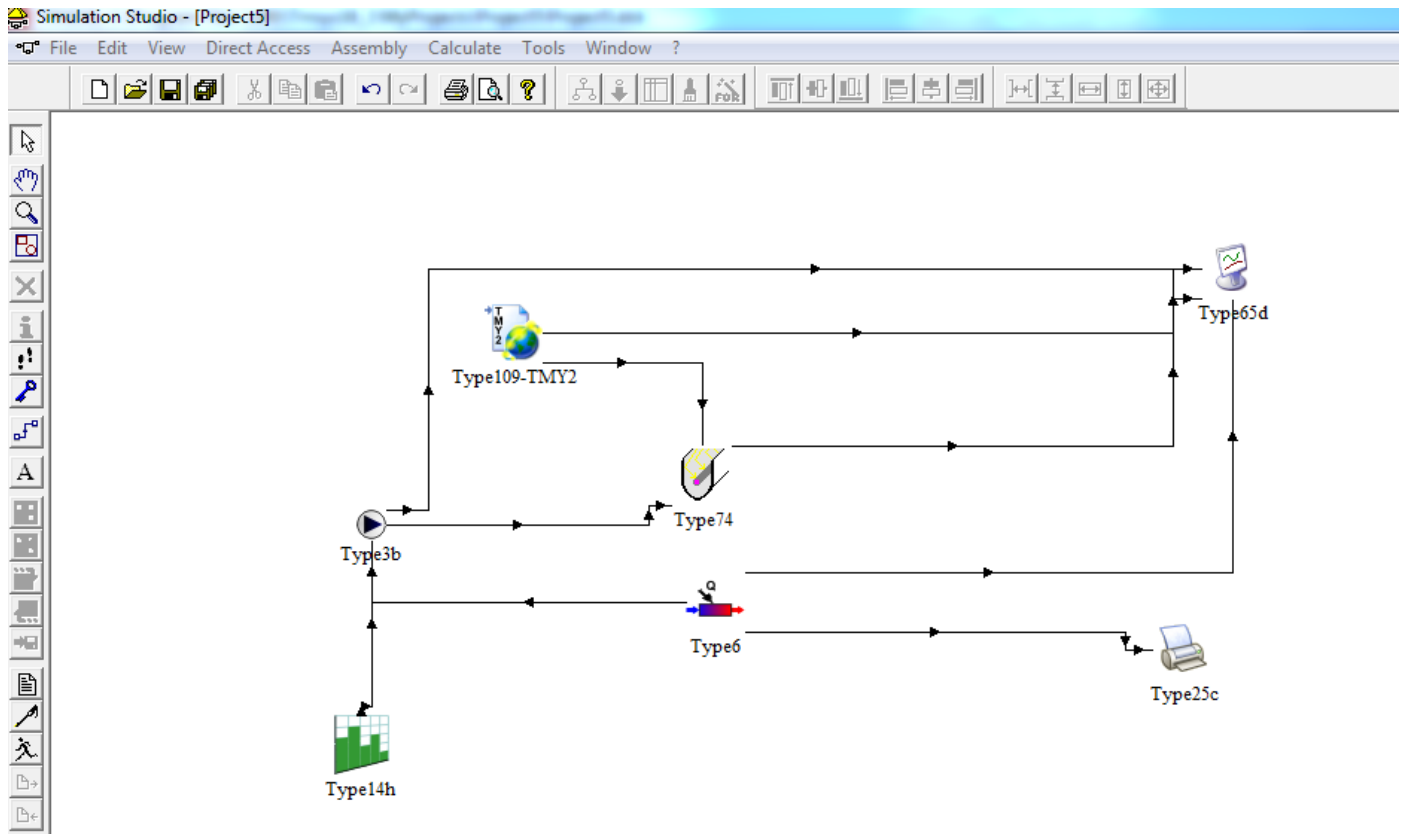
### **III.2 Simulation avec TRNSYS et EES**

#### **III.2.1 Présentation du logiciel TRNSYS [44]**

TRNSYS est un logiciel de simulation dynamique développé par le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) en 1975 dans le cadre d'une collaboration internationale. Ce logiciel permettant de simuler le comportement d'un système complexe. Il a été le précurseur de nombreux autres logiciels de simulation, utilisant son solveur générique et/ou certains de ses modèles (Energy plus, Energy 10, CASIS, ...).

TRNSYS est basé sur une approche par schéma-bloc. Cette approche modulaire permet à la fois de décomposer des problèmes complexes en plusieurs problèmes moins complexes et de travailler dans un environnement « ouvert », permettant de rajouter de nouveaux composants et concepts. Un projet de simulation TRNSYS consiste donc à choisir un ensemble de modèles mathématiques de composants physiques (en s'appuyant soit sur des modèles existants dans les bibliothèques de modèles de TRNSYS, soit en les créant) et à décrire les interactions entre ces modèles.

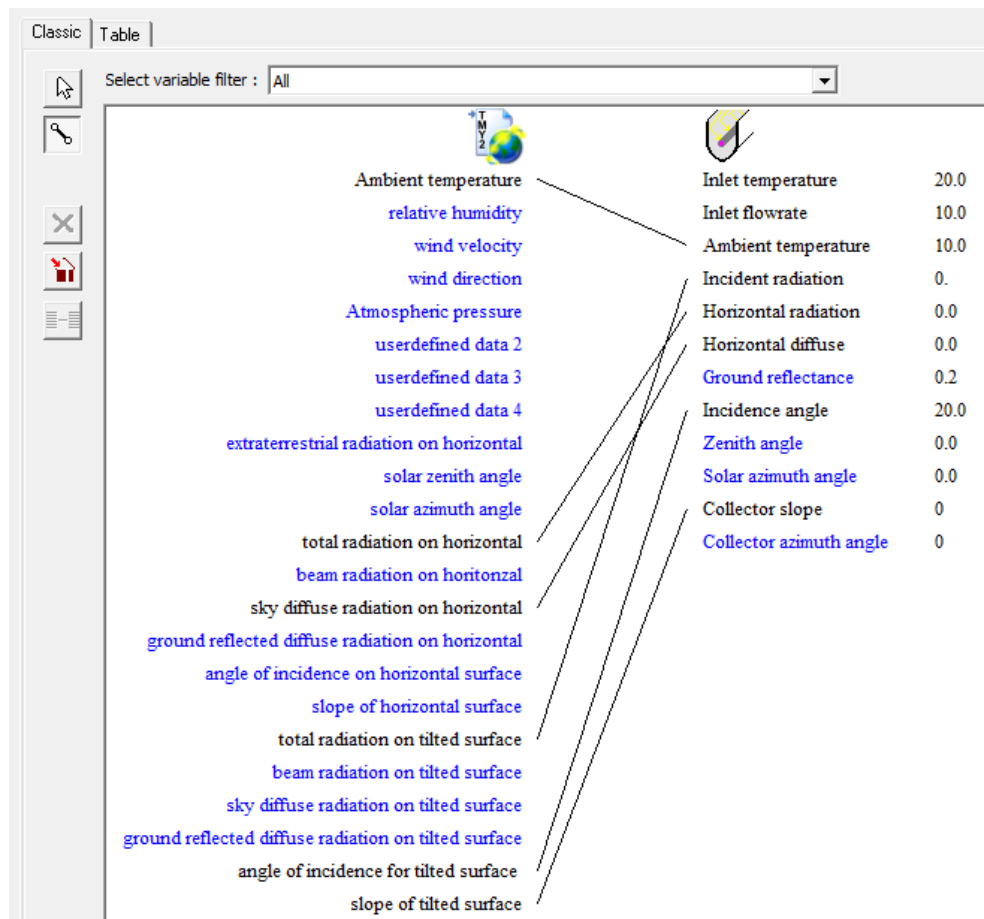
TRNSYS 16 contient un grand nombre de modèles standards (Utilitaires, Stockage Thermique, Équipement, Charges et Structures, Échangeurs de Chaleur, Hydraulique, Régulateurs, Composants électriques/Photovoltaïque, Capteurs solaires, ...). Il suffit de les interconnecter dans un éditeur de projet pour définir un projet de simulation. Plusieurs bibliothèques de modèles TRNSYS existent également en tant que produits commerciaux supplémentaires, développés par des bureaux d'études spécialisés. Il existe plusieurs modèles de bâtiments. Le modèle le plus complet permet de simuler de façon très détaillée le comportement thermique d'un bâtiment multi-zones (température ambiante, besoins d'énergie, humidité de l'air pour chaque zone et chaque surface ; gains par infiltration / ventilation, couplage convectif avec d'autres zones ; variation de l'énergie sensible ; besoins d'énergie latente ; énergie solaire rentrant par les fenêtres ; confort ; ...).



**Fig (III.1) : Schéma de fonctionnement de TRANSYS**

### III.2.2 Définition des Output [45]

Sur simulation studio, on définit les outputs désirés (résultats), ces résultats seront affichés sur des graphes et sous forme de tableaux qu'on pourra exploiter.



**Fig(III.2) : Définition des outputs**

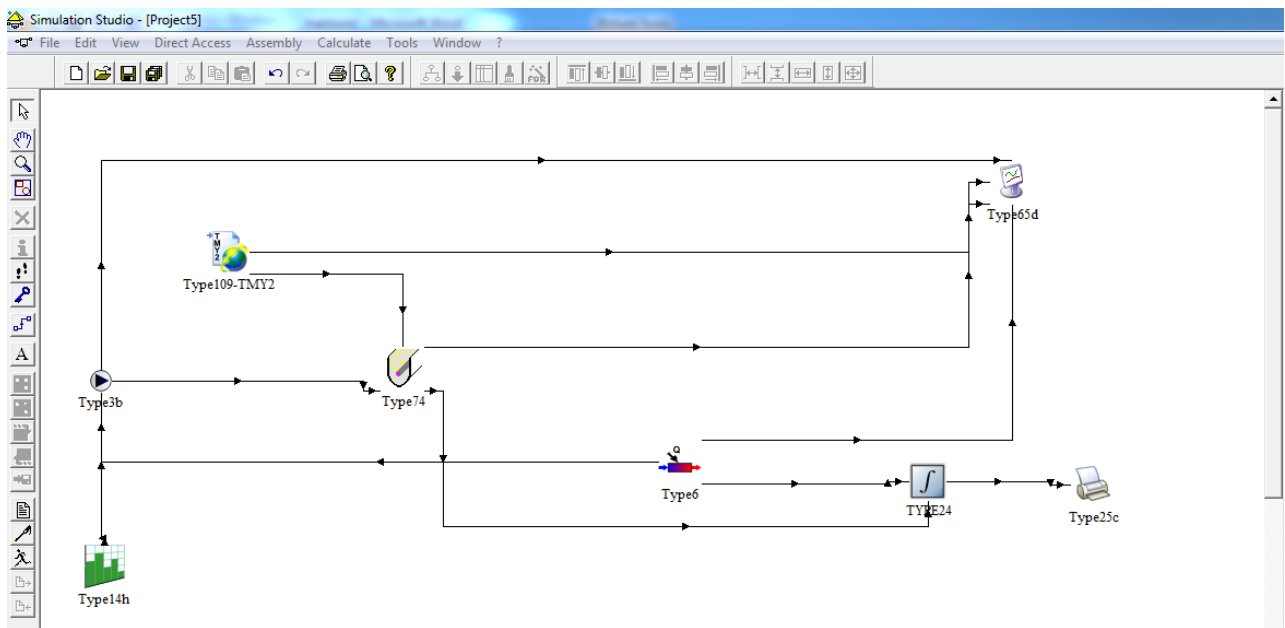
### **III.3 Modélisation et simulation**

#### **III.3.1 Présentation du modèle de l'installation**

Après avoir récupéré les données nécessaires à la modélisation, il est primordial de choisir les bons composants parmi les différentes bibliothèques disponibles. Comme nous pouvons le voir sur la figure (VI.4), sous logiciel TRNSYS Nous allons à présent présenter les différents éléments constitutifs de cette modélisation de système solaire qui comprend des collecteurs solaires, une pompe et un chauffage auxiliaire. Nous devons également lire et traiter les données météorologiques pour le site Bechar et produire des résultats (à la fois en ligne traceur et à un fichier imprimé, les composants utilisés sont : **[46]**

- Meteonorm: (Type 109-TMY2)
- Affichage des résultats (Type 65d)
- CPC collector (type 74)

- Imprimante (Type 25c)
- fonction de forçage Type14h
- Intégrateur (Type 24)
- Pumps (Type 110)
- Heat Exchangers (Type 17)



**Fig (III.3) : Modélisation sous le logiciel TRNSYS**

### **III.3.1.1 Description de différentes composantes de ce système**

#### **a) Type109-TMY2**

Permettant de simuler les conditions météorologiques d'une ville définie et l'irradiation résultante sur les capteurs en fonction de leurs orientations et leurs inclinaisons. [46]

#### **b) Type 65d : traceur en ligne**

Le composant graphique en ligne est utilisé pour afficher les variables système sélectionnées à des intervalles spécifiés du temps pendant la progression de la simulation. Ce composant est fortement recommandé et largement utilisé car il fournit des informations variables valables et permet aux utilisateurs de voir immédiatement si le système ne fonctionne pas comme vous le souhaitez (Objet pour l'affichage graphique).

#### **c) Type 25: imprimante**

Le composant de l'imprimante est utilisé pour émettre (ou imprimer) les variables du système sélectionnées à des intervalles spécifiés de temps.

#### **d) Type 14h: fonction de forçage dépendante du temps**

Dans une simulation transitoire, il est parfois commode d'utiliser une fonction de forçage temporelle qui a un comportement caractérisé par un motif répété. Le but de cette routine est de fournir un moyen de générer une fonction de forçage de ce type.

#### **e) Type 24: intégrateur de quantité**

Ce modèle de composant est analogue à un équipement dans un système physique qui permettant d'afficher les résultats d'intégration et utilisé pour intégrer les taux d'énergie sur une période de temps. Chaque fois qu'une quantité dans une simulation de système nécessite une intégration la période de simulation, l'utilisation de ce composant effectuera la fonction requise.

#### **f) Type 74 : solar thermal collectors**

Ce composant modélise les performances thermiques d'un capteur CPC. Le réseau de collecteurs total peuvent être constitués de collecteurs connectés en série et en parallèle. Les performances thermiques du le réseau de capteurs total est déterminé par le nombre de modules en série et les caractéristiques de chaque module. Le modèle prévoit l'analyse théorique des composés paraboliques concentrateurs (CPC). Le modèle de régime permanent de Hottel-Whillier est utilisé pour évaluer la performance.

#### **g) Type 6 : Chauffage auxiliaire**

Un appareil de chauffage auxiliaire est modélisé pour élever la température d'un flux en utilisant soit un moyen interne contrôle, contrôle externe ou une combinaison des deux. Le radiateur est conçu pour ajouter de la chaleur à la coule à un débit inférieur ou égal à  $Q \& \max$ , qui est une quantité déterminée par l'utilisateur.

### **III.3.1.2 Ajout de composants et configuration [42]**

#### **a) Lecture et traitement des données météorologiques**

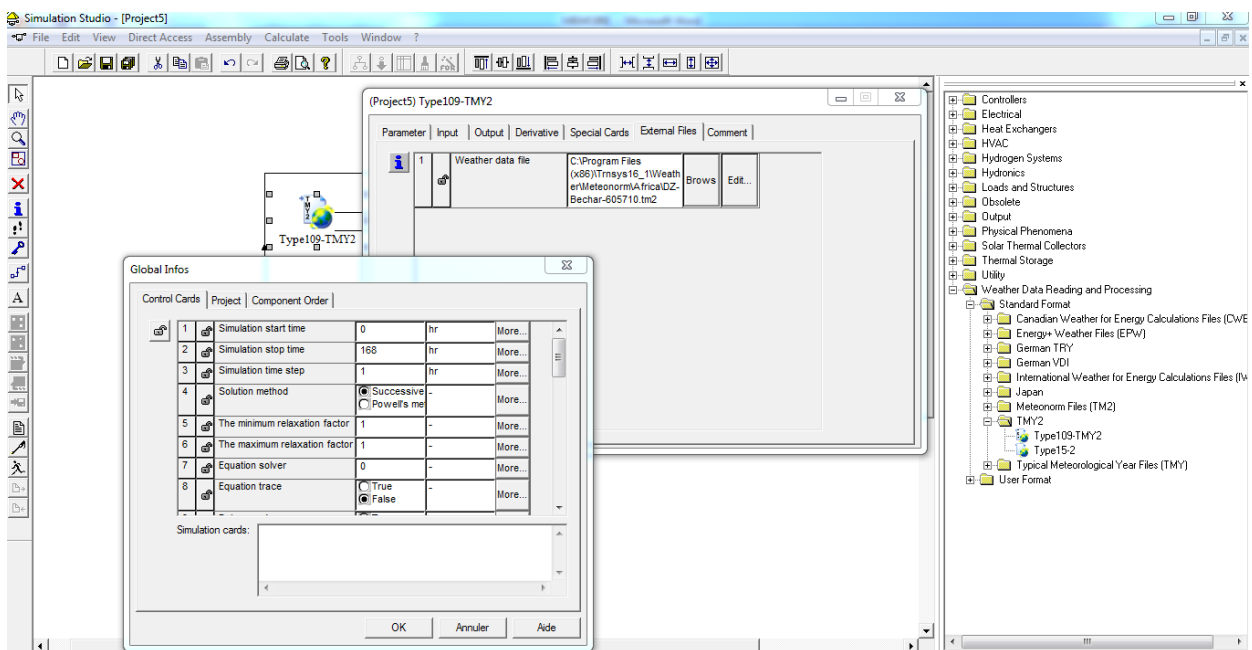
Nous allons commencer avec le lecteur de données et le processeur de rayonnement solaire, Type 109. Vous pouvez le trouver dans l'outil d'accès direct

(arborescence dans une fenêtre à quai à droite de l'écran). Le type 109 est sous "Lecture et traitement des données

météorologiques". Nous devons lire les données météorologiques pour Bachar (Algérie Afrique), qui est disponible dans le cadre de la base de données météorologiques générée avec Meteonorm. Les fichiers Meteonorm utilisent le format de données TMY2, donc nous choisirons la proforma pour Type 109 qui se trouve dans : Format standard \ TMY2.

Vous pouvez ajouter le composant au projet en faisant glisser son icône depuis l'outil d'accès

direct à la fenêtre du projet (voir la figure III.4).



**Fig( III.4) :** Control cards and Type 109 (Weather data reader / processor)

## b) Système solaire :

Nous ajouterons maintenant les 3 composants requis pour le modèle du système physique: pompe, collecteur solaire et chauffage auxiliaire. Les composants sélectionnés sont:

1-Hydraulics \ Pump \ variable speed \ Type110

2- HVAC \ Chauffages auxiliaires \ Type6

### 3- solar thermal collectors \ CPC Col lectors\ Type74

#### C) Composantes utiles :

Nous devons imposer le débit sur la pompe en envoyant un signal de contrôle variable dans le temps et nous doivent également intégrer, tracer et imprimer les résultats. Nous ajouterons 4 composants:

1-Utility \ Forcing Functions \ General \ Type14h

2-Utility \ Integrators \ Quantity Integrator \ Type24

3-Output \ Online Plotter \ Online Plotter without file \ Type65d

4-Output\ Printer \ formatted\ TRNSYS-Supplied units\ Type25d

### III.4 Présentation du logiciel EES

Le logiciel EES\* (Engineering Equation Solver) destiné à la simulation des centrales à vapeur a été développé par le professeur Sandy Klein de l'Université du Wisconsin à Madison. Ce logiciel a pour but de permettre aux étudiants la mise en équation du problème et non la recherche des propriétés dans des tables ou sur la méthode de solution [47]

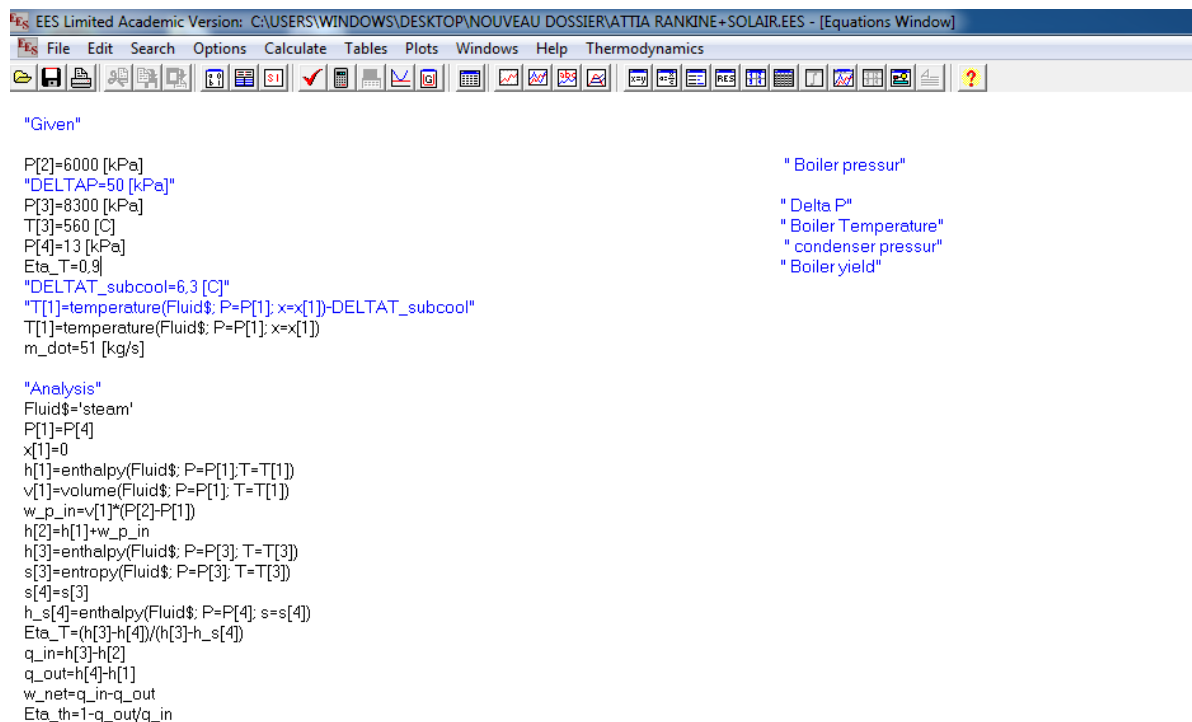


Fig (III.4) : programmé logiciel EE

## **Chapitre IV**

### **Résultats et interprétations**

## IV.1 Introduction

Après avoir dimensionner l'installation du concentrateur cylindro- parabolique et décrit les divers éléments du système , on va présenter les résultats obtenus selon par TRNSYS et EES

## IV.2 Les donnée Météonorm

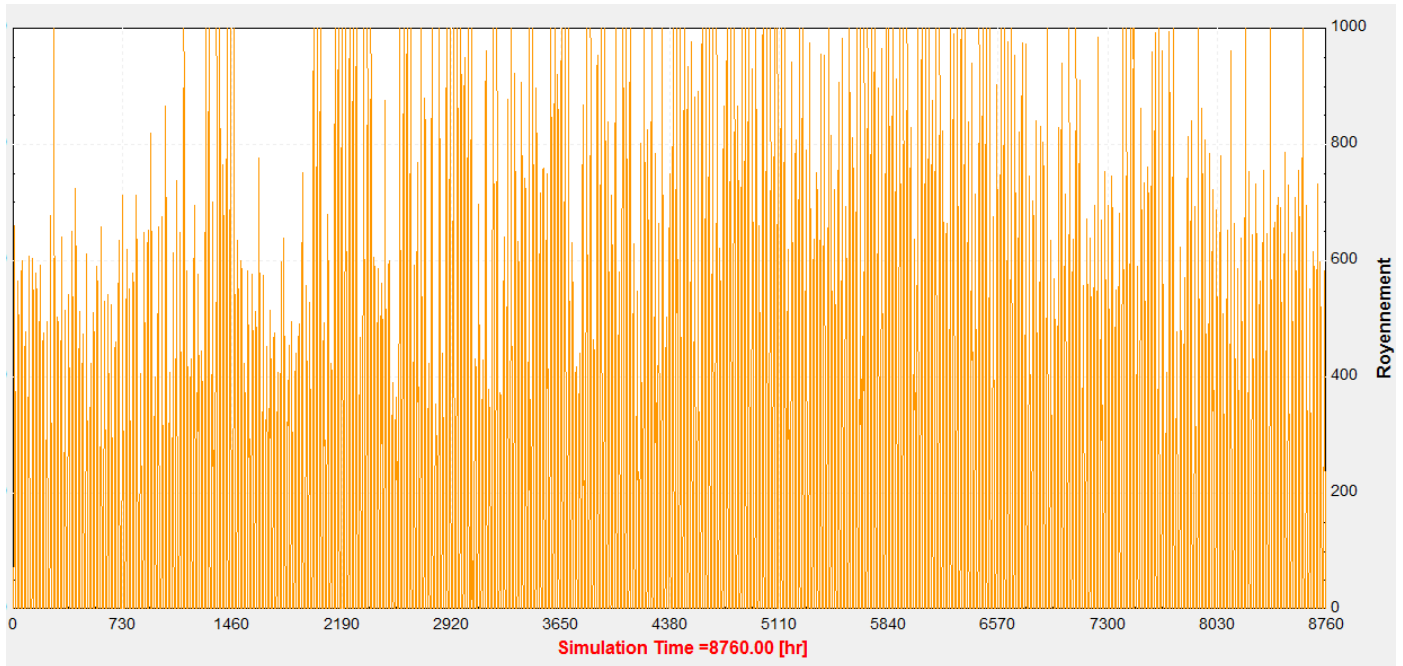


Fig (IV.1) : Représentation de la variation du rayonnement pour une année

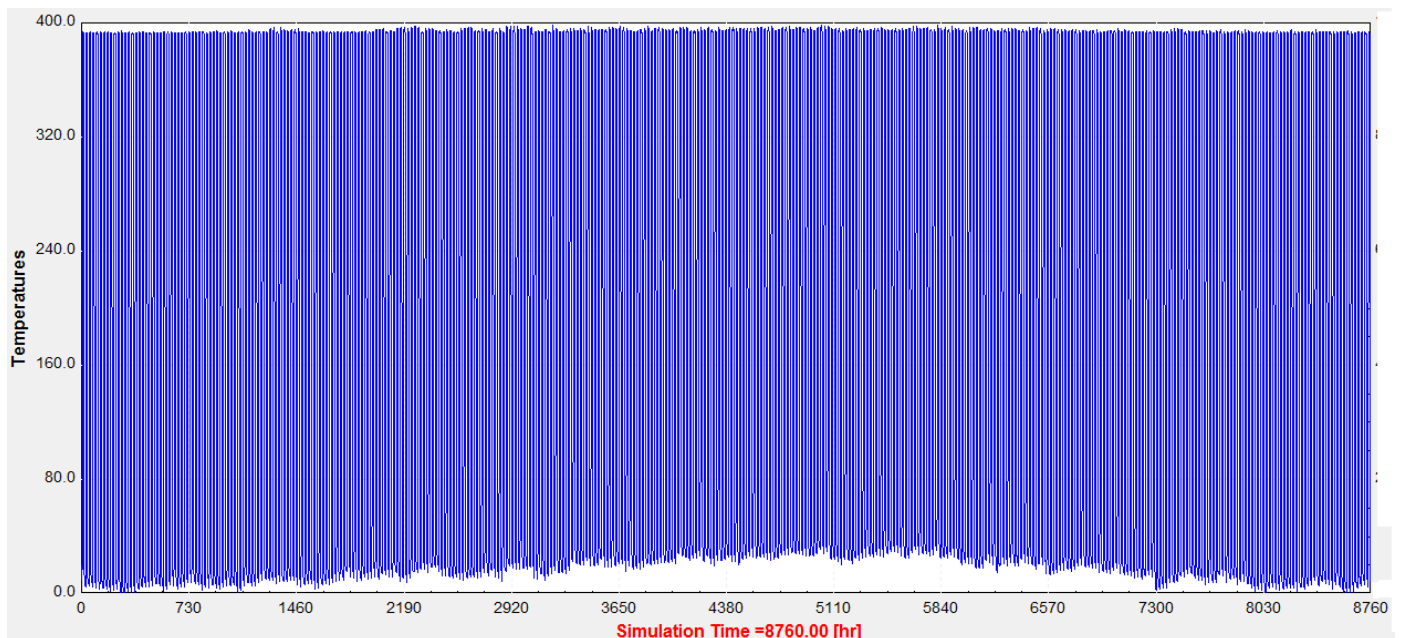
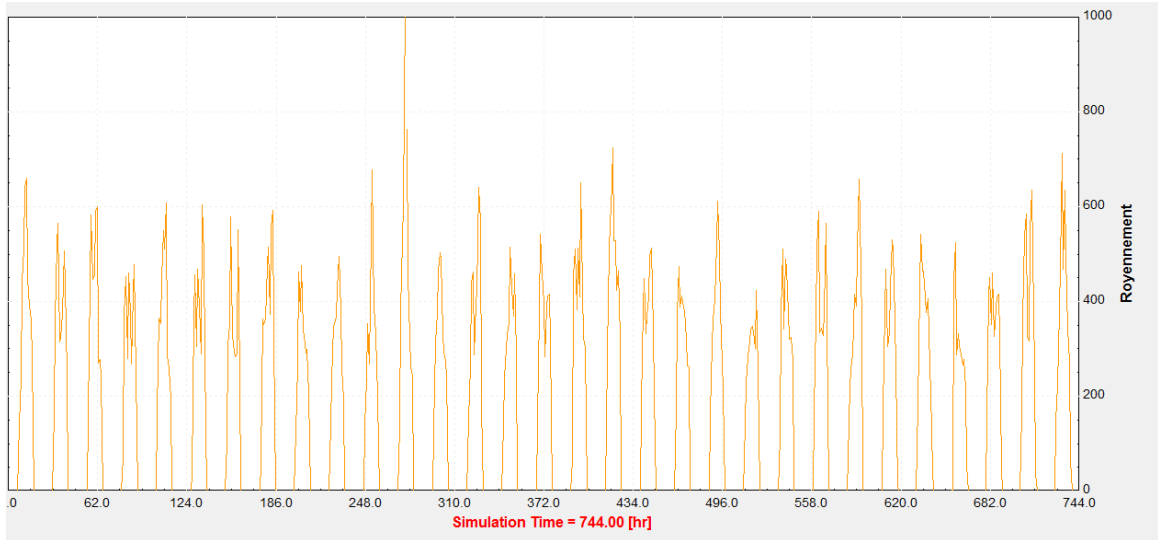
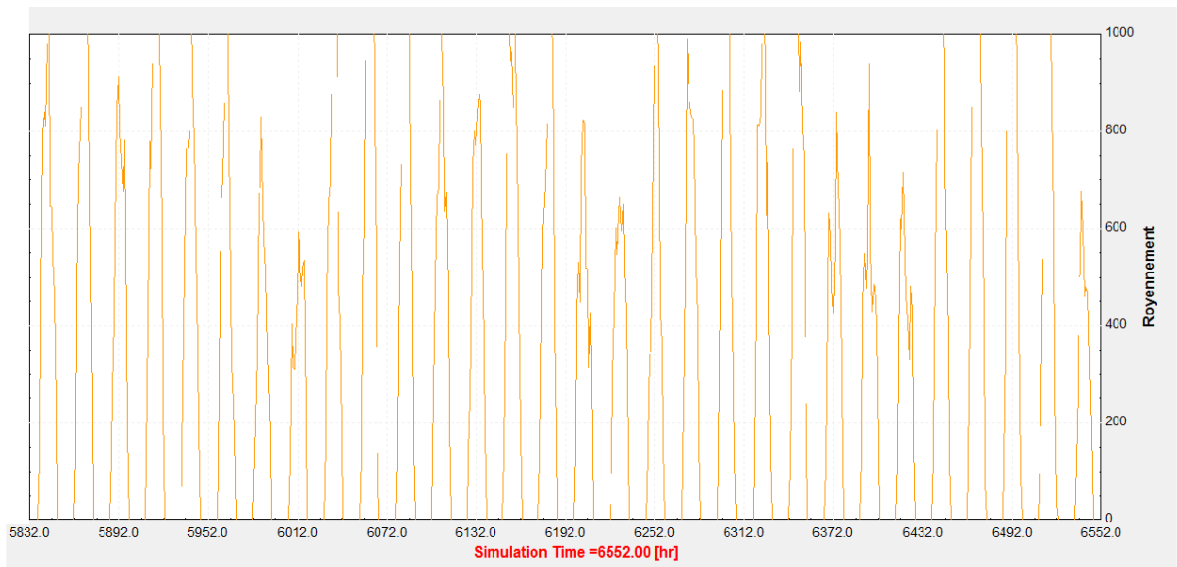


Fig (IV.2) : la variation de température dans le tube durant un année

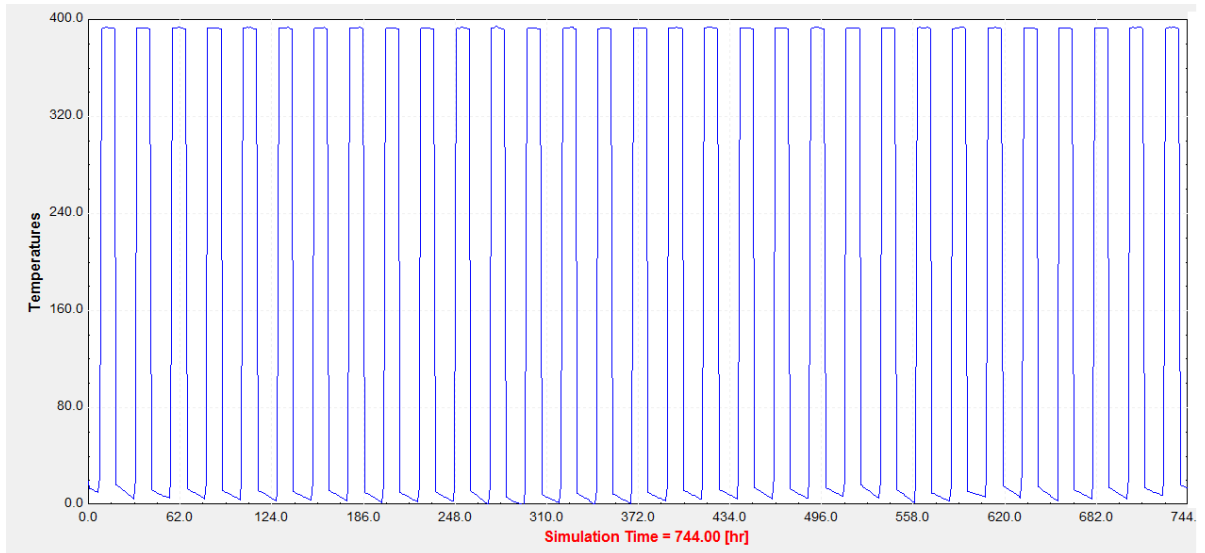
Les courbes donnent des valeurs annuelles de la température et du rayonnement. On note également que la température atteint un maximum de 390 °C (Fig. IV.2) et le rayonnement monte jusqu' à 1000 KWh/.m<sup>2</sup> (Fig. IV.1)



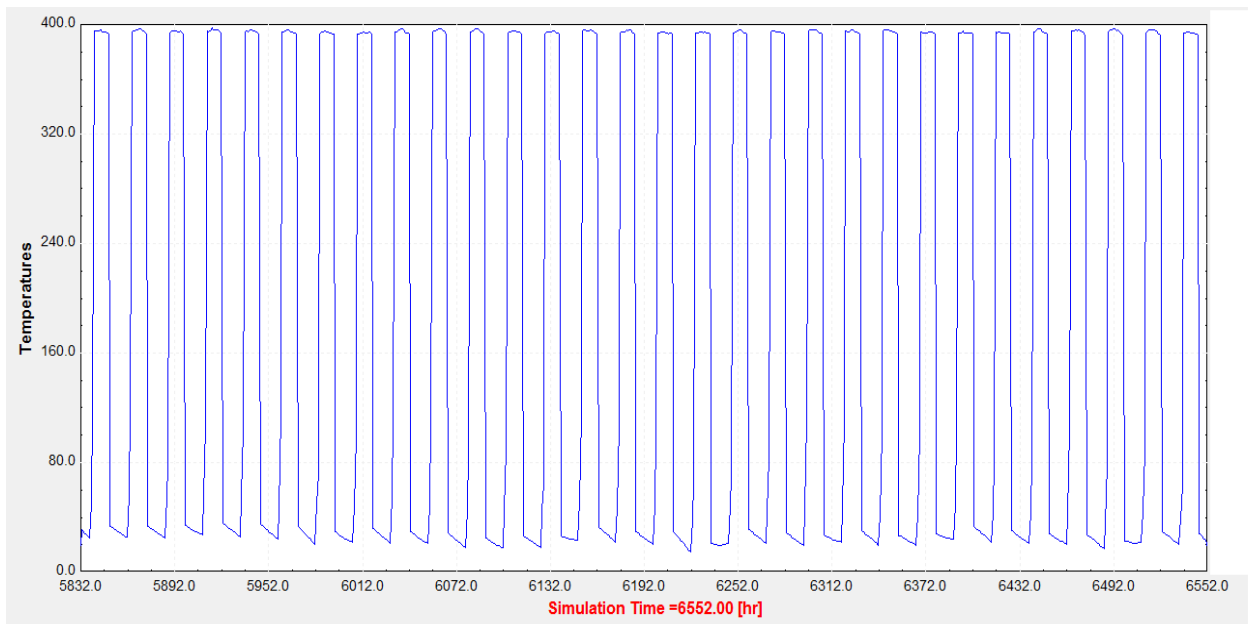
**Fig (IV.3) :** Représentation de la variation du rayonnement pour le mois de Janvier [0-744h]



**Fig (IV.4) :** Représentation de la variation du rayonnement pour le mois d'août [5832-6652h]



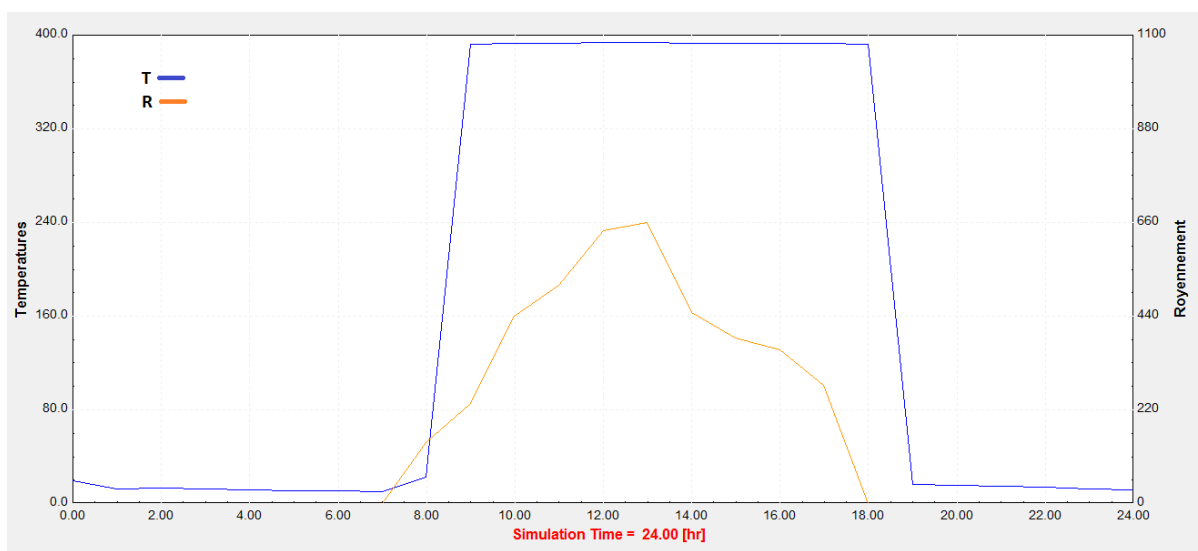
**Fig (IV.5) :** la variation de température pour le mois de Janvier [0-744h]



**Fig (IV.6) :** la variation de température pour le mois d'août [5832-6552h]

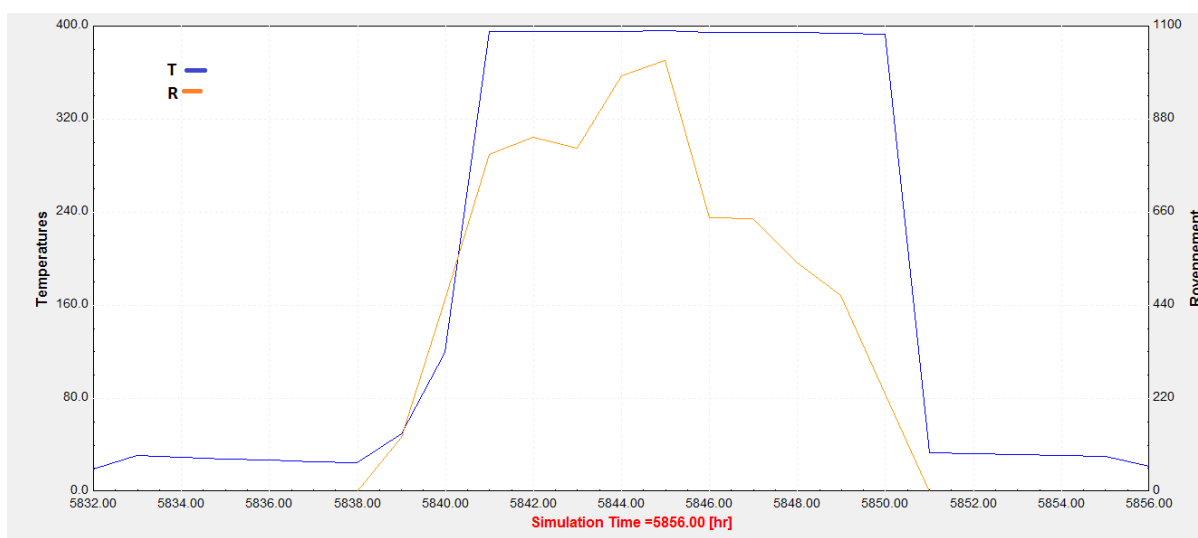
Les courbes donnent des valeurs mensuelles qui sont faites dans le cas d'un affichage mensuel de la température et du rayonnement. En janvier, on remarque que la température descend à 0 °C. Le rayonnement est à 500Kwh/m<sup>2</sup>.

Quant au mois d'août, la température descend à 20°C et le rayonnement atteint 1000Kwh/m<sup>2</sup>.



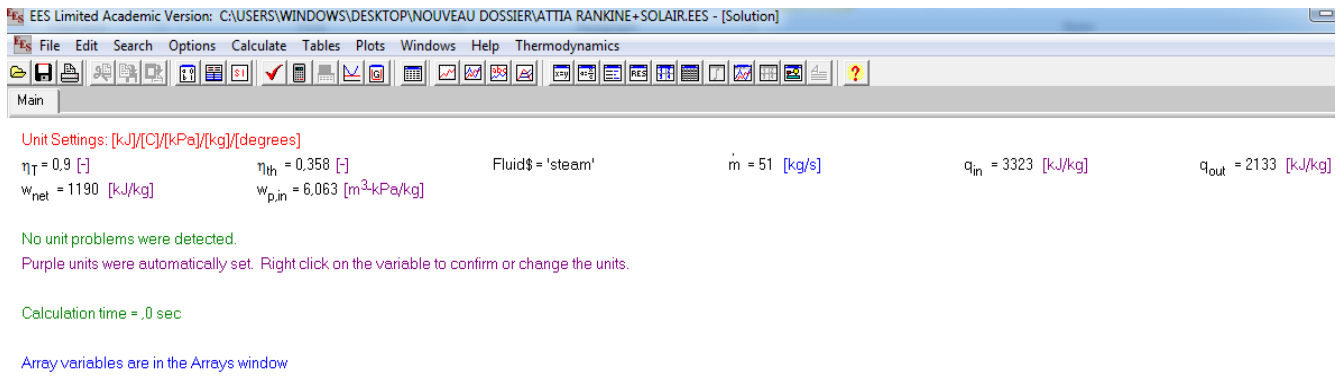
**Fig (IV.7) :** la variation de la température et du rayonnement un jour janvier

Nous remarquons le début d'une augmentation du rayonnement de huit heures du matin à six heures du soir, atteignant 600 [Wh/m<sup>2</sup>] dans la période de [ 12-14] heur et cela conduit à une augmentation de la température



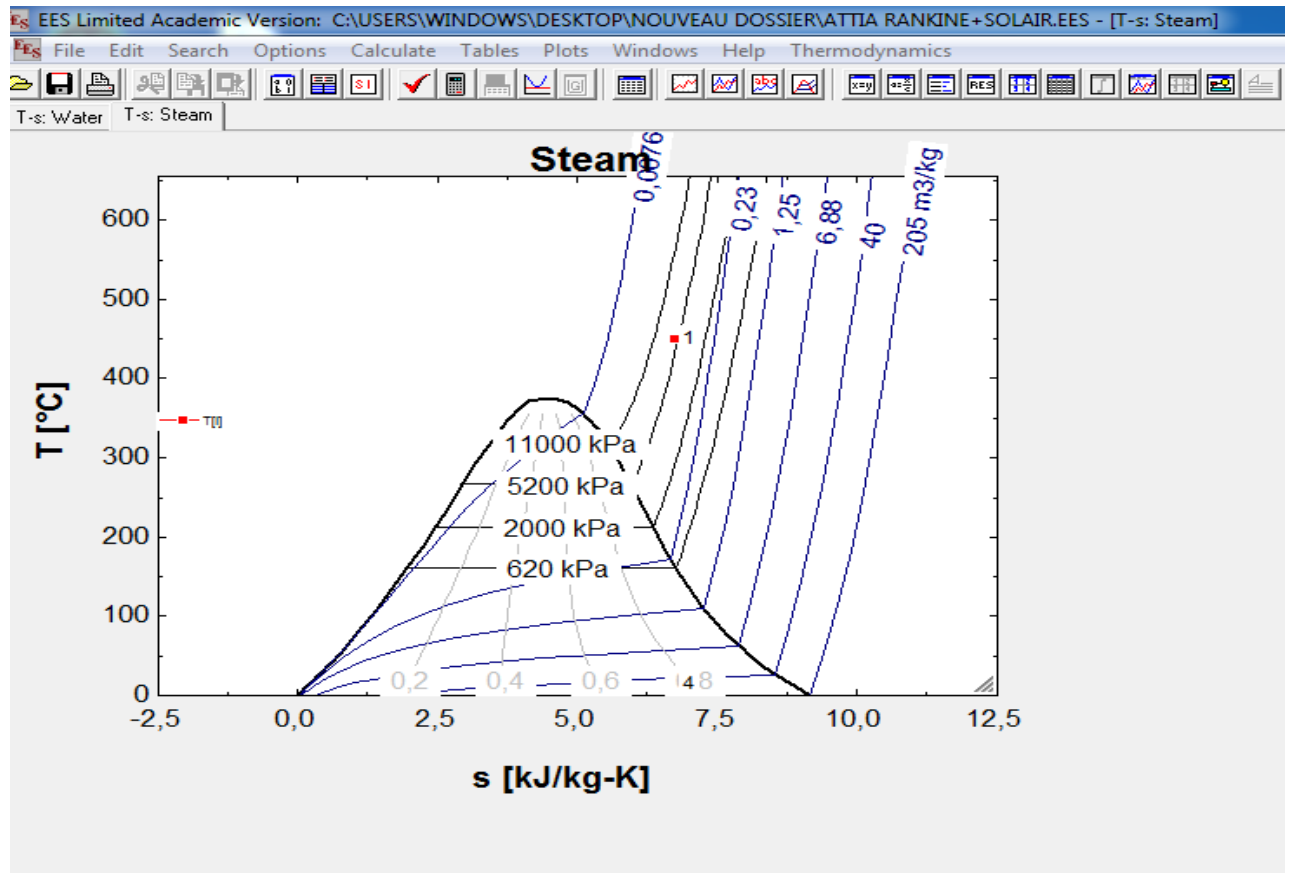
**Fig (IV.8) :** la variation de température et rayonnement un jour d'août

Nous remarquons le début d'une augmentation du rayonnement de six heures du matin à sept heures du soir, atteignant 950 [Wh/m<sup>2</sup>] dans la période de [ 12-14] heur et cela conduit à une augmentation de la température



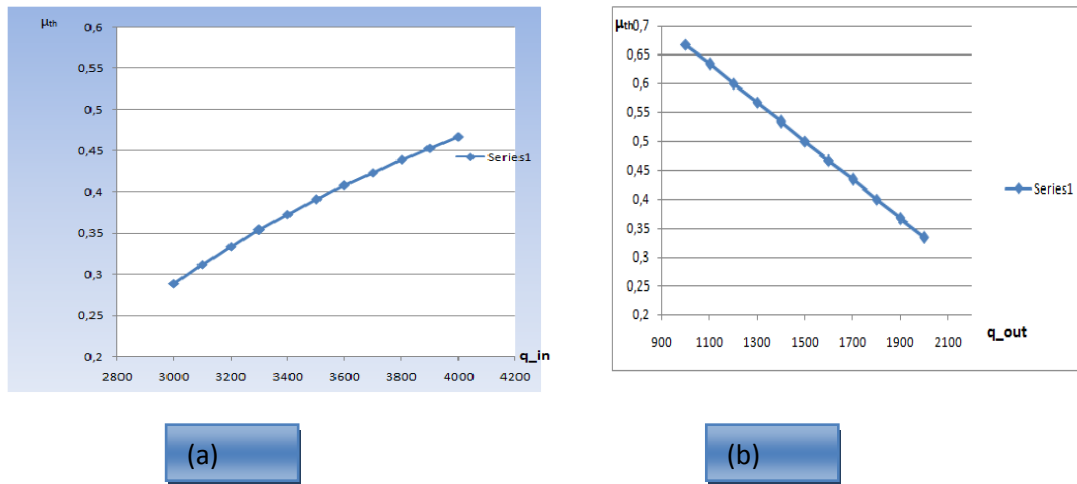
**Fig (IV.9) : Résultat pour EES**

Évaluer les résultats obtenus par EES on remarque  $q_{in} = 3323 \text{ kJ/kg}$ ,  $q_{out} = 2133 \text{ kJ/kg}$ ,  $w_{net} = 1190 \text{ kJ/kg}$



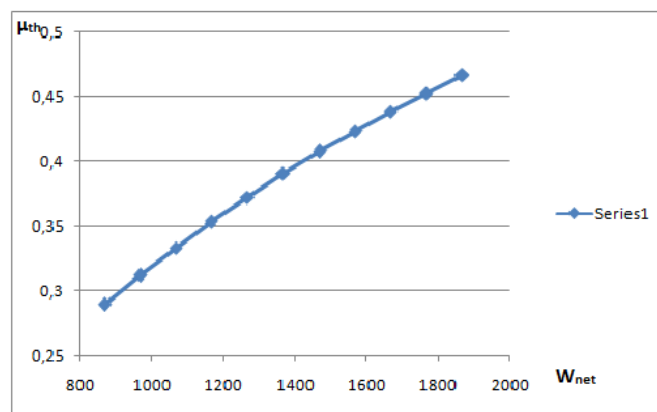
**Fig (IV.10) : diagramme T\_S de cycle a vapeur**

Nous remarquons que plus la température maximale est élevée T3 et plus la pression est faible P1,P4 plus la zone de cycle est grande, ce qui entraîne une augmentation de l'efficacité



**Fig (IV.11) : a) Résultat de  $q_{in}$       b) Résultat de  $q_{out}$**

On note que l'efficacité de  $\eta$  est liée à  $q_{out}$  et  $q_{in}$  Où obtenir le meilleur  $\eta$  l'augmentation de  $q_{in}$  et la diminution de  $q_{out}$



**Fig (IV.13) : Résultat de  $w_{net}$**

L'augmentation du travail de la turbine est l'augmentation de  $\eta_{th}$  Sachant que le travail de la turbine C'est presque le travail net

### **IV.3 Analyse et comparaison de centrale Hybride**

La région de Hassi R'mel est caractérisée par les conditions météorologiques : humidité relative de 24%, pression atmosphérique égale à 0.928 bar, vitesses du vent qui varient entre 2.14 et 4.15 m/s, températures extrêmes qui varient de -10°C en hiver à +50°C en été et insolation normale directe DNI (Direct Normal Irradiation) qui peut atteindre un maximum de 950 W/m<sup>2</sup> en été. La centrale est composée de deux parties, le champ solaire et le cycle combiné. Le champ solaire est constitué de capteurs cylindro-paraboliques.

Le cycle combiné est constitué de 2 turbines à gaz (fonctionnant au gaz naturel) dont la puissance nominale unitaire est de 40 MW. La chaleur de combustion de ces turbines est récupérée dans deux chaudières horizontales à circulation naturelle. Ces dernières font fonctionner une turbine à vapeur d'une puissance nominale de 80MW Il est à noter que le point fort de cette centrale hybride est l'ajout de la vapeur produite par le champ solaire à celle récupérée des turbines à gaz pour alimenter la turbine à vapeur. La puissance électrique produite par la centrale augmente en conséquence. Le montant globale de projet est évalué à €315.8 million

En plus de tout ce qui précède, il y a aussi 224 concentrateurs d'une surface de 180000 m<sup>2</sup> des réflecteurs paraboliques et d'une puissance électrique solaire moyenne de 25MW [48].

Le sujet d'étude dans cette recherche est l'arrivée de cette centrale à une capacité de production de 60mw. S'il y a 224 collecteurs dans la station sur une superficie de 180 000 m<sup>2</sup> avec une capacité de production de 25 MW, alors le seul moyen est d'augmenter la productivité de cette station à 60MW C'est en ajoutant de nouveaux collecteurs dans une nouvelle zone et en la calculant, on constate que la station, pour atteindre la capacité de production requise, doit ajouter une fois et demie le nombre dans la station, et ainsi on atteint une capacité de production estimée à 62mw.

Le montant total est estimé à peu près le même que pour la station de Hybride

## Conclusion

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

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

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

Cette étude nous a permis l'exploration de la possibilité de l'introduction de l'énergie solaire dans le processus de production de l'électricité pour subvenir aux besoins de la ville de Laghouat. En dehors des entraves liées à la nature intermittente du solaire. Notre analyse du problème posé nous a permis d'évaluer le coût exorbitant de l'installation et son rendement modeste.

Dans l'état actuel et avec les technologies disponibles, nous jugeons que s'est encore précoce de se lancer dans de tels projets.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Société Algérienne de Distribution de l'électricité et du Gaz -laghouat-
- [2] عبد المطلب النقرش " الطاقة ومفاهيمها انواعها ومصادرها" المملكة الاردنية الهاشمية (2005)
- [3] [www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/energie-renouvelable-son-t-cinq-types-energies-renouvelables-4134](http://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/energie-renouvelable-son-t-cinq-types-energies-renouvelables-4134)
- [4] livre traité architecture et urbanisme bioclimatique.
- [5] Intelligent énergie Europe .énergie bits.com
- [6] <https://www.google.com>
- [7] [www.encyclopedie-energie.org/stockage-hydraulique-et-production-delectricite](http://www.encyclopedie-energie.org/stockage-hydraulique-et-production-delectricite).
- [8] J'apprends l'énergie, GDF SUEZ 2013, (énergie renouvelable).
- [9] <http://pccollege.toile-libre.org> Cours Physique-Chimie, Biscarrosse.
- [10] <https://images.app.goo.gl/epLJSVMUFbF1us94A>
- [11 ] K. Zakaria, « Etude d'une centrale solaire thermique », Mémoire de Magister , Université Annaba , ( 2017).
- [12] A. Jelali, « Interconnexion d'un système photovoltaïque sur le réseau électrique », Mémoire de Magister, Université du Québec à Trois-Rivières, Canada , (2012) .
- [ 13 ] I. Ouarghi, H. Tria, « contribution et modélisation d'un capteur solaire cylindro-parabolique », Mémoire de Master en Génie Mécanique Option Énergétique, Université LarbiTébessi de Tebessa, 2016
- [ 14] [http://www.clg-champagne-lemesnil.acversailles.fr/IMG/pdf/les\\_energies\\_solaires.pdf](http://www.clg-champagne-lemesnil.acversailles.fr/IMG/pdf/les_energies_solaires.pdf)  
capteur
- [ 15] GUIDEnR SOLAIRE THERMIQUE,  
[Eligne]<http://www.solairethermique.guidenr.fr/>

[ 16 ] INES., Institut National de l'Energie Solaire. [En ligne] <http://www.ines-solaire.org>

[ 17 ] Syndicat des Energies Renouvelables « Principe de fonctionnement du solairethermodynamique », Agence International pour l'Energie, 2012

[ 18 ] B. Mourad, « Contribution à l'étude, la simulation et l'analyse des pompes à chaleur assistées par l'énergie solaire » Magister, Soutenu Le 02./08./2008.

[ 19 ] R.Bernard,. G.Menguy,. M.Schwartz, « Le rayonnement solaire, conversion thermique et applications», Technique et documentation, paris, 1980.

[ 20 ] B. Mourad, « Contribution à l'étude, la simulation et l'analyse des pompes à chaleur assistées par l'énergie solaire »Magister, Soutenu Le 02./08./2008.

[ 21 ] B.Hadj Ahmed,. B. Mokhtar, « Étude thermo- économique du cycle combiné avec intégration de l'énergie solaire», Mémoire fin d'étude Université M'hamed BOUGARA- Boumerdes, 2017.

[22] <https://philadelphia-solar.com>

[23][http://dkti.lifemoz-dev.com/wp-content/uploads/sites/61/2016/07/Contenu\\_formation\\_CSP\\_Ouarzazat\\_mai\\_2016/Ouarzazate\\_CSP\\_PROMES\\_2ab\\_cylindro\\_paraboliques.pdf](http://dkti.lifemoz-dev.com/wp-content/uploads/sites/61/2016/07/Contenu_formation_CSP_Ouarzazat_mai_2016/Ouarzazate_CSP_PROMES_2ab_cylindro_paraboliques.pdf)

[24] B. Abedlaali , « Calcul énergétique de l'installation hybride thermique pour la production d'électricité». Université de Biskra Mémoire de Master. Juin 2013.

[25] I. Bouchtil , « Contribution à l'étude d'une centrale solaire thermodynamique à capteur cylindro-paraboliques dans une zone aride», mémoire master, Université hadj Lakhdar – Batna, 2012.

[ 26 ] M. A. A. Sidiyakoub, « Conception et Modélisation d'un four solaire multifibres sphérique et cylindrique », Mémoire de Master en Physique option

Physique des Matériaux, Systèmes et Energies Renouvelables, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 2015

[ 27] I. Ouarghi,. H.Tria, « contribution et modélisation d'un capteur solaire cylindro- parabolique », Mémoire de Master en Génie Mécanique Option Énergétique, Université LarbiTébessi de Tebessa, 2016

[ 28] A .Gama,.M.Haddadi,. A. Malek, « Etude et réalisation d'un concentrateur cylindro parabolique avec poursuite solaire aveugle », Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°3,p.437 – 451, 2008

[29] A.M. PATNODE, « Simulation and Performance Evaluation of Parabolic Trough Solar Power Plants », Master of Science thesis, university of Wisconsin, 2006, USA.

[ 30] B. Meinel,.P.M.Marjorie, “Applied solar”, Edition ADDISON – WESLEY INPHISICS, 1976

[ 31] H.Brosamle,.H.Manstein,.C.Shillings and F.Trieb, 12 ,2001 «assessment of solar electricity potential in north Africa based on satellite data and géographique information system», solar Energy Vol.70,No.1,pp.1 –

[ 32] M. Bouhadda, « Conception et Réalisation d'un Capteur d'énergie solaire à lit fluidisé »,

Thèse de Doctorat en Génie des Procédés, Université de Ouargla, 2017

[ 33] S.A. Klein, G. Nellis, «Thermodynamic»s. Cambridge University Press, Cambridge, UK 2011.

[ 34] S. A. Klein, «Engineering Equation Solver (EES) », Academic Commercial V8. 208, F-Chart Software 2008.

[35] FEIDT.M, énergétique concepts et application, Dunod, paris, 2006

[ 36] R. K. Kapooria, S. Kumar an analysis of thermal power plant working on Rankin cycle, • February 2008, Journal of Energy in Southern Africa • Vol 19 No 1

[ 37] Y. Çengel, Thermodynamique: une approche pragmatique, De Boeck, 2014, 2<sup>eme</sup>ed.

[38] F.Meunier, Aide mémoire de la thermodynamique, Dunod, Paris, 2004.

- [39] B. Abedlaali , « *Calcul énergétique de l'installation hybride thermique pour la production d'électricité* » Mémoire Master université de Biskra 2013
- [40] N.Hamani, « Modélisation du flux solaire incident et de la température de, sortie dans un capteur solaire à eau avec effet de concentration du rayonnement solaire incident », Mémoire de Magister en physique du solide option Physiques des Semi-conducteurs et matériaux métalliques, Université Mohamed Khider de Biskra, 2005
- [41] S.Madani,« Modélisation mathématique du concentrateur cylindro-parabolique de la centrale hybride de Hassi R'mel » Mémoire de Master en Génie Mécanique option Systèmes Energétiques Et Développement Durable, Université Mohamed Khider Biskra, 2014
- [42] W.Chekirou., N. Boukheit., T. Kerbache, « Différents modes de transfert de chaleur dans un absorbeur d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique », *Revue des Energies Renouvelables ICRES-07 Tlemcen*, p.21-28, 2007
- [43] S.A.Kalogirou, «solar thermal collectors and applications progress in energy and combustion science», edition London, Washington DC, 2004
- [44] T. Marchal, Modélisation en régime dynamique d'une maison basse énergie Etude de cas « Maison Politehnica » Mémoire de Master le 3 septembre 2014.
- [45] Documentation TRNSYS 16 volume 1 Getting Started.
- [46] Documentation TRNSYS 16, Volume 5 Mathematical Reference.
- [47] <https://moodle.polymtl.ca/mod/resource/view.php?id=153175>
- [48] Therminol-VP1. "Technical Bulletin". Available at <http://www.therminol.com> [consulter en 2015]