



LICENCE SCIENCES ET TECHNIQUES
Génie Electrique

RAPPORT DE FIN D'ETUDES

Intitulé :

Réalisation d'un concentrateur
solaire parabolique

Réalisé Par :

AAJOUJ SALAH EDDINE

Encadré par :

P^r : ABDELLAH MECHAQRANE (FST FES)

Soutenu le 15 Juin 2015 devant le jury

Pr A.MECHAQRANE (FST FES)

Pr A.AHAITOUF (FST FES)

Pr F.ABDI (FST FES)

REMERCIEMENTS

J'adresse mes sincères remerciements dans un premier temps à nos professeurs de la Faculté des Sciences et Techniques, qui m'ont bien préparée durant les trois années passées de notre formation.

*Je remercie notre professeur **Mr A. MECHAQRANE** de la faculté des sciences et techniques, qui a bien voulu assurer l'encadrement de ce projet, et qui ma offert les meilleures conditions de la réalisation pratique du projet.*

*Merci à **Mr A. AHAITOUF** en tant que directeur du laboratoire d'Energie Renouvelables et Système Intelligents qui ma donner la permission de faire ce stage.*

*Je tiens à remercier le professeur **Mr. M. JORIO** responsable de la filière Génie électrique, qui nous a dirigés durant notre formation de spécialité.*

*Merci à monsieur **MAHMOUD BOUOUD**, doctorant au laboratoire d'Energie Renouvelables et Système Intelligents qui ma aidé durant toute la période du projet*

Merci aux membres de jury d'avoir accepté de juger notre travail.

Sommaire:

<i>Introduction</i>	5
<i>Laboratoire d'accueil</i>	6
Chapitre 1 : Les concentrateurs solaire	7
<i>I / Les différents types de concentrateur solaire</i>	7
<i>I -1- Réflecteurs cylindro-paraboliques</i>	7
<i>I-1 -1-avantages/inconvénients</i>	8
<i>I-2 Concentrateur parabolique</i>	9
<i>I-2-1Description</i>	9
<i>I-2-2-Principe</i>	9
<i>I-2-3 Avantages/Inconvénients</i>	10
<i>I-3 Centrale à tour</i>	10
<i>I-3-1Principe</i>	10
<i>I-4 Capteurs solaires fixes à concentration</i>	11
<i>II-La conception de la parabole en utilisant le logiciel TONATIUH</i>	12
<i>II-1Introduction :</i>	12
<i>II-2-Caractéristiques du système à concentration à modéliser</i>	12
<i>II-3) Modélisation du système de concentration</i>	13
<i>II- 4 Modélisation de la parabole :</i>	14
<i>II –5 Modélisation du récepteur de disque plat</i>	15
<i>II -6 Modélisation du rayonnement solaire direct</i>	16
<i>II-7 Traçage des rayons avec TONATIUH :</i>	17

<i>II -8 Conclusion :</i>	19
<i>III- Réalisation d'une parabole solaire :</i>	19
<i>III-1-conclusion</i>	22
<i>Chapitre 2 : Echangeurs et circuit caloporteur</i>	23
<i>I-Echangeurs de chaleur:</i>	23
<i>I.1. Échangeur monotube :</i>	23
<i>I-2 Échangeur coaxial :</i>	23
<i>I-3 Échangeur multitubulaires :</i>	24
<i>I-3-1 Échangeur à tubes séparés :</i>	24
<i>I-3-2 Échangeur à tubes rapprochés :</i>	24
<i>I-3-3 Échangeur à tubes à ailettes :</i>	25
<i>I-3-3-2 Ailettes longitudinales :</i>	25
<i>I-3-3-2 Ailettes longitudinales :</i>	26
<i>II - Modes de transfert de chaleur :</i>	27
<i>II -1- La conduction :</i>	27
<i>II-2 Convection :</i>	28
<i>II -3-Rayonnement :</i>	28
<i>III- Circuit caloporteur:</i>	31
<i>III-1 Tuyauterie:</i>	31
<i>III -2-Pompe de circulation :</i>	31
<i>III -3-Raccordement :</i>	32
<i>III-4-Echangeur spirale:</i>	32
<i>III -5- Autres raccords :</i>	33

<i>III -6- Conclusion :</i>	34
Chapitre 3 : MESURES ET RESULTATS.....	35
<i>I- Réglages préliminaire</i>	35
<i>II- Mesures à circuit ouvert :.....</i>	35
<i>III- circuit fermé :.....</i>	37
Conclusion générale.....	38
ANNEXE I :.....	39
<i>I. Echangeur à plaque :.....</i>	39
<i>I.1 Échangeurs à surface primaire :.....</i>	39
<i>I-2-Échangeurs à plaques et joints :.....</i>	39
<i>I-3 Echangeurs à plaques soudées ou brasées :.....</i>	40
<i>II- flux par conduction dans cylindre creux</i>	40
Références	43

Introduction

Dans le cadre de la réalisation de ce projet de fin d'étude on a eu l'occasion d'effectuer une recherche au sein de la Faculté des sciences et techniques au laboratoire d'Energie Renouvelables et Système Intelligents.

Au cours de ce dernier qui a duré deux mois, on a pu enrichir notre formation professionnelle et mettre en pratique nos connaissances acquises lors de notre formation.

L'objectif de notre travail consiste à l'étude et la réalisation d'un concentrateur solaire parabolique.

Ce rapport s'articule autour de trois axes :

Tout d'abord nous présenterons les concentrateurs solaires, la conception des concentrateurs solaires parabolique en utilisant le logiciel TONATIUH.

Puis, nous traiterons la réalisation d'une parabole solaire.

Et Enfin, nous parlerons de notre application pratique sur les concentrateurs solaires paraboliques.

Laboratoire d'accueil

Le laboratoire (L.E.R.S.I) est constitué de 34 personnes de trois équipes comme le montre l'organigramme suivant :

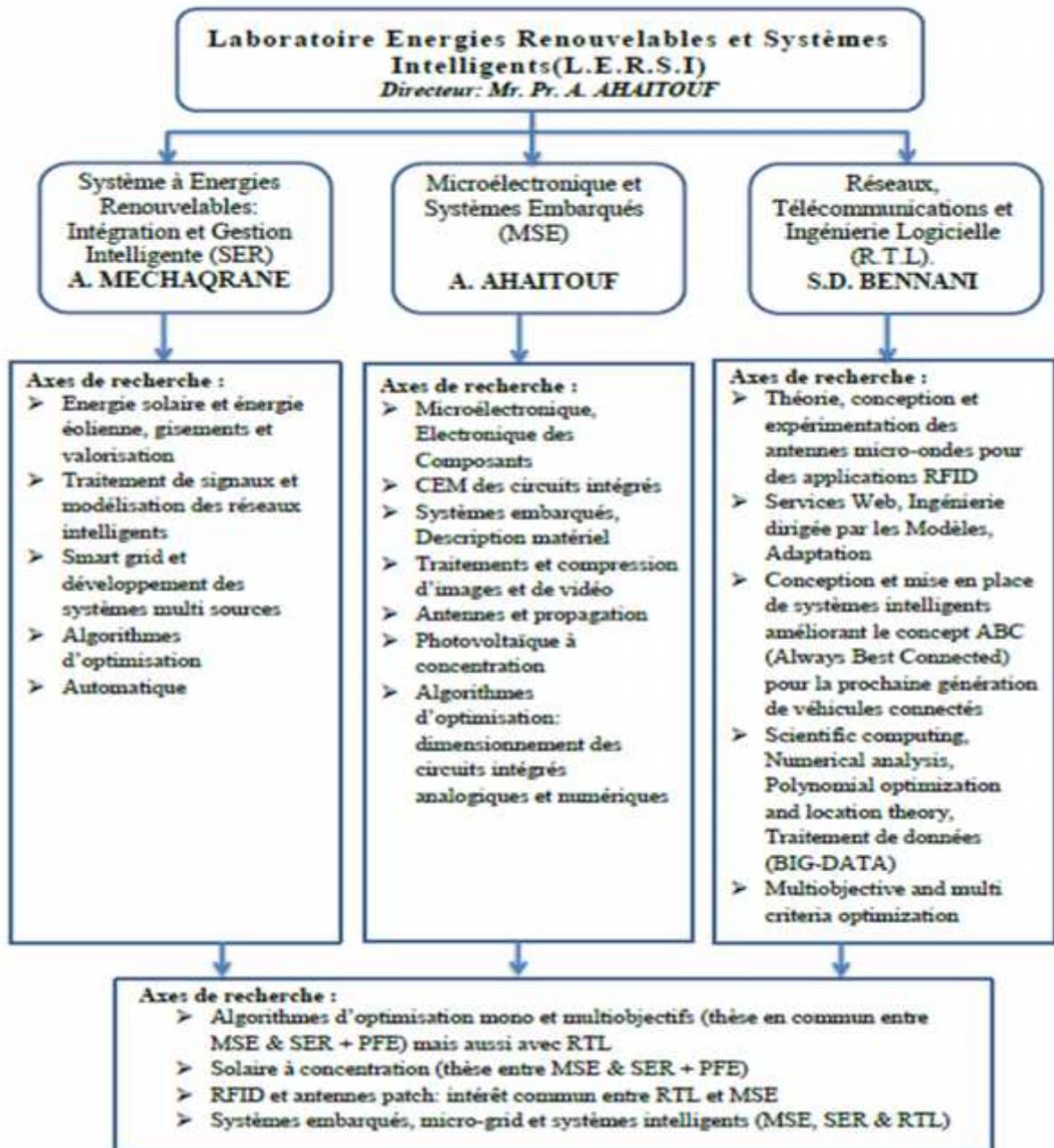


Figure 1 : Organigramme du Laboratoire Energies Renouvelables et Systèmes Intelligents(L.E.R.S.I)

J'ai effectué mon stage au sein de l'équipe Système à Energies Renouvelables: Intégration et Gestion Intelligente (SER) (Pr. A. MECHAQRANE).

Chapitre 1 : Les concentrateurs solaires

Un concentrateur solaire est un dispositif qui concentre la lumière du soleil pour en exploiter l'énergie thermique. Il s'agit donc d'un principe différent de celui des panneaux solaires photovoltaïques qui convertissent directement une partie de la lumière en électricité par effet photo-électrique. Les deux techniques sont intéressantes mais elles sont très différentes.

Comment fonctionne un concentrateur solaire ? Toute la lumière qui arrive sur une large zone est concentrée par un jeu de miroirs sur un petit absorbeur où circule un fluide (de l'eau par exemple). La température de l'absorbeur, et celle du fluide qui y circule, augmentent ainsi de manière importante. On obtient donc une source de chaleur renouvelable que l'on peut utiliser de différentes manières.

Certaines applications concrètes reposent simplement sur l'utilisation immédiate de la chaleur dans des fours, pour des procédés chimiques, le séchage de matériaux, la stérilisation.

Il est possible d'atteindre des températures de 200°C à 400°C. D'autres dispositifs, beaucoup plus complexes, ont été développés depuis plusieurs décennies par des laboratoires de recherche dans le monde entier. Ils peuvent atteindre des températures jusqu'à 3500°C. On le voit, parmi les concentrateurs solaires, il existe en fait toute une gamme de possibilités adaptées à de multiples usages.

I - Les différents types de concentrateur solaire

Il existe différentes façons de faire un concentrateur solaire. Il faut tout d'abord des collecteurs solaires. Nous en avons trouvé quatre qui vont être présentés et développés plus loin :

**/ réflecteur cylindro-parabolique*

**/ réflecteur parabolique*

**/ centrale à tour*

**/ capteur solaire fixe à concentration*

I-1 - Réflecteurs cylindro-paraboliques :

Les centrales à réflecteur cylindro-parabolique: Le réflecteur cylindro-parabolique est un capteur solaire à concentration à foyer linéaire qui utilise

Un réflecteur cylindrique de section parabolique : c'est le concentrateur le moins récent et le plus utilisé. En effet, de nombreuses installations ont déjà vu le jour et ont déjà été commercialisées depuis 1980 dans le monde. [1]

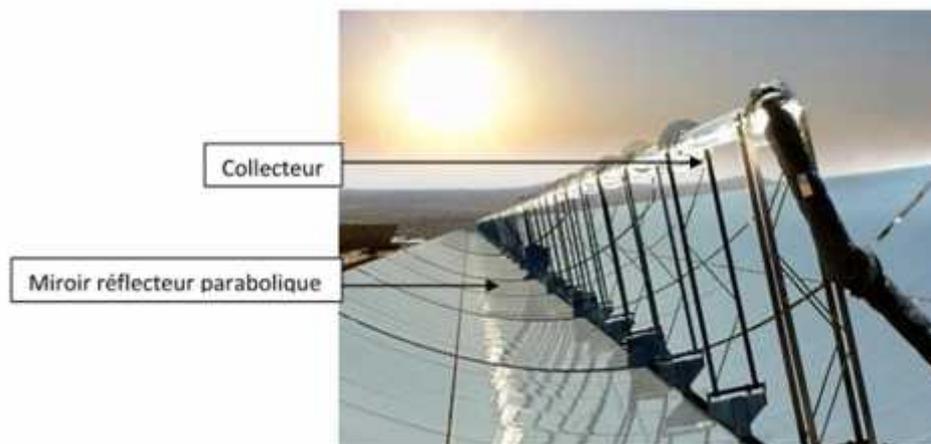


Figure 1-1 : Capteur cylindro-parabolique de la centrale de Nevada Solar One [1]

Dans ce type de centrale, les miroirs réflecteurs sont alignés parallèlement et tournent autour d'un axe horizontal pour suivre la course du soleil et collecter le plus de rayon possible.

Ces rayons sont ensuite concentrés sur un tube horizontal, dans lequel circule un fluide caloporteur qui peut atteindre une température de 500°C. Ce fluide servira à transporter la chaleur vers la centrale elle-même. L'énergie récoltée par ce fluide est transférée à un circuit d'eau, la vapeur alors produite actionne une turbine qui produit de l'électricité.

En effet, ce tube est situé au foyer du système parabolique, c'est-à-dire à l'endroit où tous les rayons se croisent. Cela permet de chauffer le fluide caloporteur, qui circule dans le tube, au maximum. Le tube récepteur doit présenter une bonne absorption pour empêcher au rayonnement de se refléter et les pertes thermiques doivent être limitées afin d'avoir un rendement maximum. Pour le fluide caloporteur, il faut choisir un fluide en fonction de la température maximale admissible: les huiles (400°C), les sels fondus (650°C) sont les plus utilisés. [1].

I-1 -I-avantages/inconvénients :

Les principaux avantages des centrales cylindro-paraboliques sont, d'une part, qu'ils peuvent aujourd'hui fonctionner 24h/24h grâce à un système de stockage de chaleur. D'autre part, le soleil est une source d'énergie inépuisable et gratuite, et il n'y a pas d'émission polluante. Néanmoins, il faut un fort ensoleillement et une zone chaude donc on ne peut pas créer ce type de centrale partout dans le monde. De plus, il faut disposer d'une surface importante au sol comme le montre l'image ci-dessous. [1].

I-2 Concentrateur parabolique



Figure 1-2 : Nombreux prototypes de concentrateurs paraboliques [1]

I-2-1 Description :

Les concentrateurs solaires paraboliques sont formés par un ensemble de miroir incurvés dont l'assemblage entraîne la réalisation d'une parabole. Ressemblant à des paraboles de réception satellite, ces concentrateurs paraboliques sont en 3 dimensions. En effet, ils forment une courbe de la même manière sur toute leur longueur et la largeur. En plus ils sont bordés de miroirs ou recouverts d'un revêtement réfléchissant tel que l'aluminium. Bien entendu, l'utilisation de certains revêtements entrainera des résultats plus élevés dans la réflectivité. Plus la réflectivité sera grande, plus les concentrateurs solaires seront puissants. [1].

I-2-2-Principe :

Par principe, lorsque la lumière frappe une surface réfléchissante, elle rebondit sur le même angle. Les miroirs ont été conçu de sorte que toute la lumière reflète en un seul point, peu importe où elle frappe la surface du concentrateur. La distance entre la surface du concentrateur et le point où la lumière se concentre est la distance focale. Le capteur solaire réfléchit les rayons du soleil sur un point appelé point de convergence.

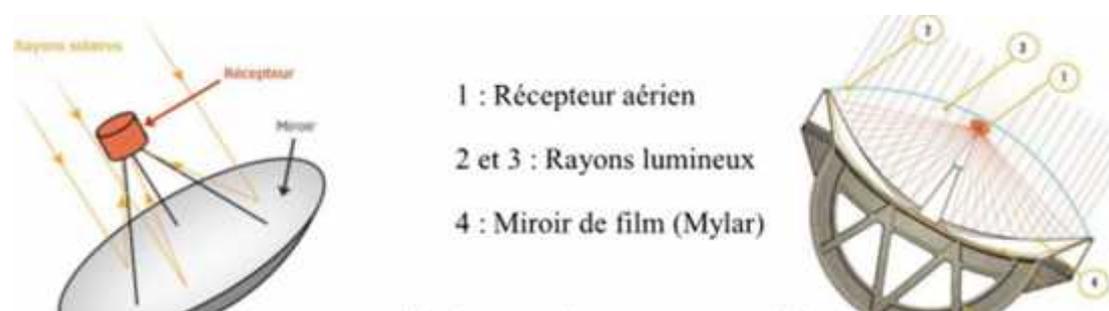


Figure 1-3 Schéma de principe d'un concentrateur parabolique [1]

Le rayonnement solaire se concentre sur le récepteur sur lequel la température monte. L'énergie thermique reçue est ensuite transmise au moteur Stirling. Si un moteur Stirling est placé au foyer de la parabole, la chaleur du soleil va dilater un

fluide comprimé afin de générer de l'électricité. En effet, dans le point de convergence, le moteur Stirling récupère la totalité de la chaleur fournie par le soleil au réflecteur. Il fonctionne grâce à la montée en température et en pression d'un gaz contenu dans une enceinte fermée. Le moteur Stirling permet de convertir l'énergie thermique en énergie mécanique. Un générateur directement couplé au vilebrequin du moteur, appelé génératrice de courant alternatif, transforme l'énergie mécanique en courant alternatif (énergie électrique). [1].

I-2-3 Avantages/Inconvénients :

Le principal avantage de ce type d'installations réside dans le fait qu'il représente une source d'énergie inépuisable et gratuite. En effet, il ne produit aucunes émissions polluantes.

De plus, le concentrateur solaire parabolique permet souvent d'avoir un bon rendement. Le rendement est généralement du même ordre que pour des panneaux photovoltaïques, mais ce type de système a atteint des rendements supérieurs à 30% dans la conversion du rayonnement solaire en électricité. Cependant, il faut savoir que ce concentrateur fonctionne par intermittence. Ce système étant alimenté par le soleil, il connaît une production soumise aux aléas météorologiques. Lors des jours nuageux ou les jours de pluie, le rendement de cet appareil est considérablement diminué. Pour pallier cette discontinuité, un système d'appoint ou un système de stockage peut être mis en place pour assurer l'autonomie de ce type d'appareil. [1]

I-3 Centrale à tour :

I-3-1 Principe :

Une centrale solaire thermodynamique est une centrale présentant un dispositif de concentrateur solaire (ci-dessous). Ce dispositif est composé des miroirs plans et d'une tour comportant un fluide caloporteur. A l'aide de miroirs plans appelés héliostats, les rayons solaires seront regroupés en une zone appelé foyer avec une grande précision. Cette zone est située en haut d'une grand tour pouvant dépassée les 100 mètres de haut. La température y régnant, y est alors largement augmentée puisqu'elle peut dépasser les 1000°C. On trouve, également, dans cette zone, un fluide caloporteur qui permettra, par la suite, de produire de l'énergie électrique. Dans l'absolu, un ordinateur positionne les miroirs de façon à ce que les rayons captés soient toujours redirigés vers la tour, ainsi les miroirs tournent.

On note des différences avec les dispositifs présentés précédemment. Un inconvénient des centrales à tour est qu'elles doivent être grandes (tour haute et dispositif au sol important) pour avoir une rentabilité acceptable. Elles nécessitent aussi un fort ensoleillement. Elles sont cependant toujours au stade d'expérimentation concernant le développement industriel. Un avantage des ces centrales réside au niveau des déperditions d'énergie. Elles sont en effet minimisées lors du transfert de chaleur. De plus, ces centrales utilisent une source d'énergie inépuisable et gratuite sans produire d'émissions polluantes [1].



Figure 1-4 Deux cuves de sels fondus se trouvant à la centrale Solar 2 en Californie (USA)[1]

I-4 Capteurs solaires fixes à concentration :

Les capteurs solaires fixes à concentration utilisent deux types de réflecteurs dans le but d'orienter le rayonnement solaire : des réflecteurs à composés paraboliques et des réflecteurs plans. Ces réflecteurs permettent l'orientation du rayonnement solaire vers une fente ou un absorbeur d'accompagnement à travers un important angle d'admission. En d'autres mots, ce type de capteur solaire combine deux types de réflecteurs afin de pouvoir capter le rayonnement solaire quelque soit la position du soleil dans le ciel. Pour cela, il est généralement couplé à un absorbeur d'accompagnement qui, lui, « accompagne le soleil » pour que la concentration des rayons s'effectue toujours sur l'absorbeur. De plus, l'angle d'admission relativement important sur ce type de capteur élimine la nécessité de se munir d'un système de pointeur solaire. En effet, l'absorbeur « accompagnant » le soleil, permet à l'installation toute entière, le capteur solaire à concentration, de rester fixe sur son emplacement.

Ce type de capteur comprend des capteurs plans à réflecteurs cylindro-paraboliques, des capteurs plans, avec des réflecteurs paraboliques de surpression. [1]



Figure 1-5 Système de pointeur solaire [1] parabolique[1]

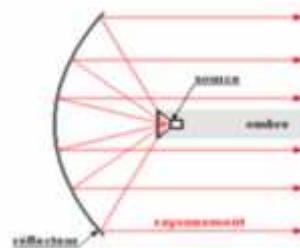


Figure 1- 6 Réflecteur



Figure 1-7 Capteur parabolique Ben Gurion National Solar Energy Center. Source: RENAC

[II-La conception de la parabole en utilisant le logiciel TONATIUH :](#)

[II-1 Introduction :](#)

Tonatiuh est un logiciel open source qui permet de modéliser une antenne parabolique et de simuler son comportement optique. Il permet également à l'aide de Mathematica de traiter la sortie de Tonatiuh pour estimer la distribution du flux solaire concentré au niveau du plan focal de la parabole et des paramètres associés, tels que le rayon maximum de cette distribution, à savoir, la taille du spot de rayonnement solaire au niveau du plan focal.

Dans notre cas nous allons traiter seulement la première partie de ce logiciel à savoir la modélisation et simulation du comportement optique.

[II-2\) Caractéristiques du système à concentration à modéliser](#)

La parabole que nous allons modéliser est composée d'un miroir parabolique et d'un récepteur rectangulaire situé dans le plan focal du miroir avec une translation de 28 cm du foyer.

Pour plus de simplicité, nous allons supposer que le miroir est un miroir spéculaire parfaite de forme parabolique idéale et le récepteur est un absorbeur parfait de la forme idéale.

Nous allons utiliser les valeurs suivantes pour les paramètres définissant la géométrie de plat et le récepteur:

1. Miroir parabolique
Rayon = 0,515 mètres
Distance focale = 0,73 mètres
2. récepteur de rectangulaire
Longueur = 0,18 mètres
Largeur = 0,16 mètres

II-3) Modélisation du système de concentration

1- Création de la structure " Group Node tree "

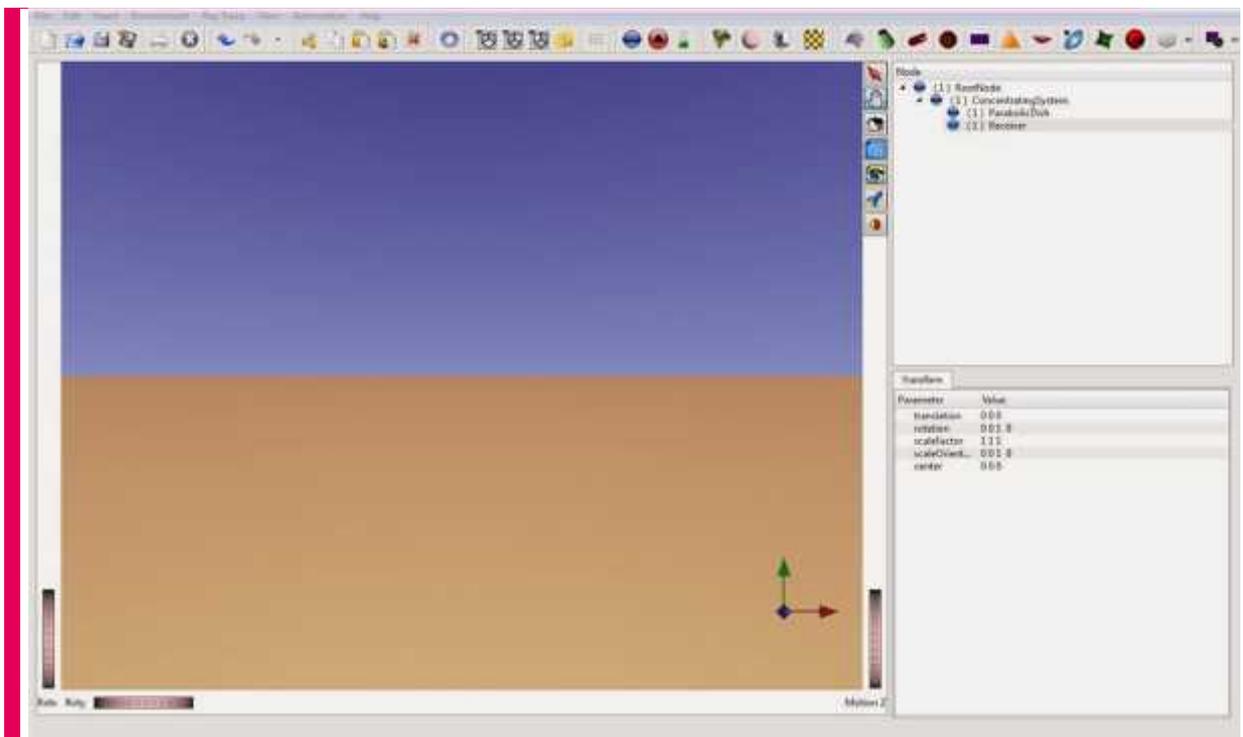
Après le démarrage de Tonatiuh 2.0.1, on procède comme suit:

Ajouter un groupe de nœuds pour "RootNode" et le nommer "ConcentratingSystem".

Ajouter un groupe de nœuds pour le "ConcentratingSystem" Groupe de nœuds et le nommer "ParabolicDish".

Ajouter un second nœud du groupe pour le "ConcentratingSystem" Node Groupe et le nommer " Receiver".

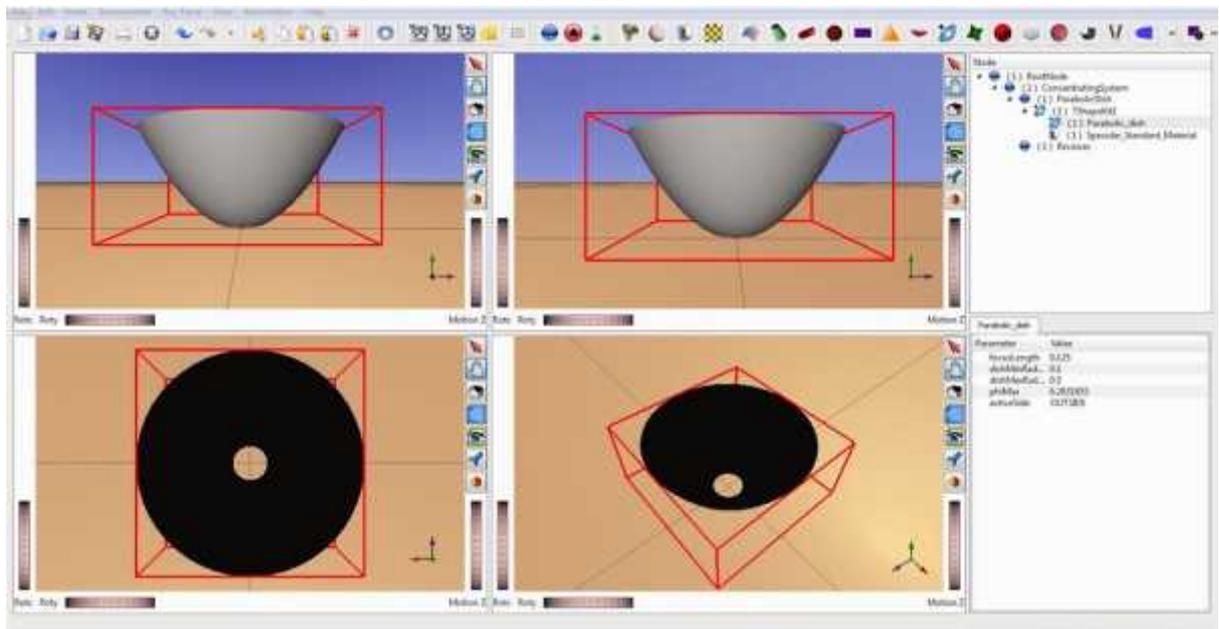
Après cela, l'interface utilisateur de Tonatiuh devrait ressembler à ceci:



II- 4 Modélisation de la parabole :

1. Cliquer sur le "ParabolicDish" groupe de nœuds pour le sélectionner. Ajoutez à cela un nœud de surface et de garder l'étiquette automatique "TShapeKit1" fourni par Tonatiuh.
2. Cliquer sur la juste créé "TShapeKit1" Nœud de surface " et y ajouter:
Un noeud "Parabolic_Dish".
Un noeud "Specular_Standard_Material".

Après cela, si on sélectionne dans le menu "Affichage" l'option "Edit Mode" et mettre en place les quatre 3D Windows de la vue 3D de volet de manière appropriée, l'interface utilisateur de Tonatiuh devrait ressembler à ceci:



Comme le montre le graphique de Tonatiuh, nous avons réussi à créer une antenne parabolique. Cependant, la parabole que nous avons créée n'est pas la parabole que nous voulions modéliser.

De toute évidence, nous devons changer les valeurs attribuées à certaines des variables énumérées ci-dessus pour modéliser la parabole nous sommes intéressés dans les changements dont nous avons besoin pour mener à bien sont les suivants.:

- Changer la focale "focusLength" à 0,73 mètres.
- Changer le rayon minimum "dishMinRadius" à 0 mètre.
- Changer le rayon maximum "dishMaxRadius" 1,03 mètre.
- Changer le côté actif à des fins de représentation "activeSide" à "INSIDE".

Nous avons encore à modéliser ses propriétés physiques. Pour ce faire, nous sélectionnons le noeud "Specular_Standard_Material" et changer les valeurs des variables suivantes de leurs valeurs par défaut à les suivantes:

m_reflectivity = 1 (valeur par défaut 0)

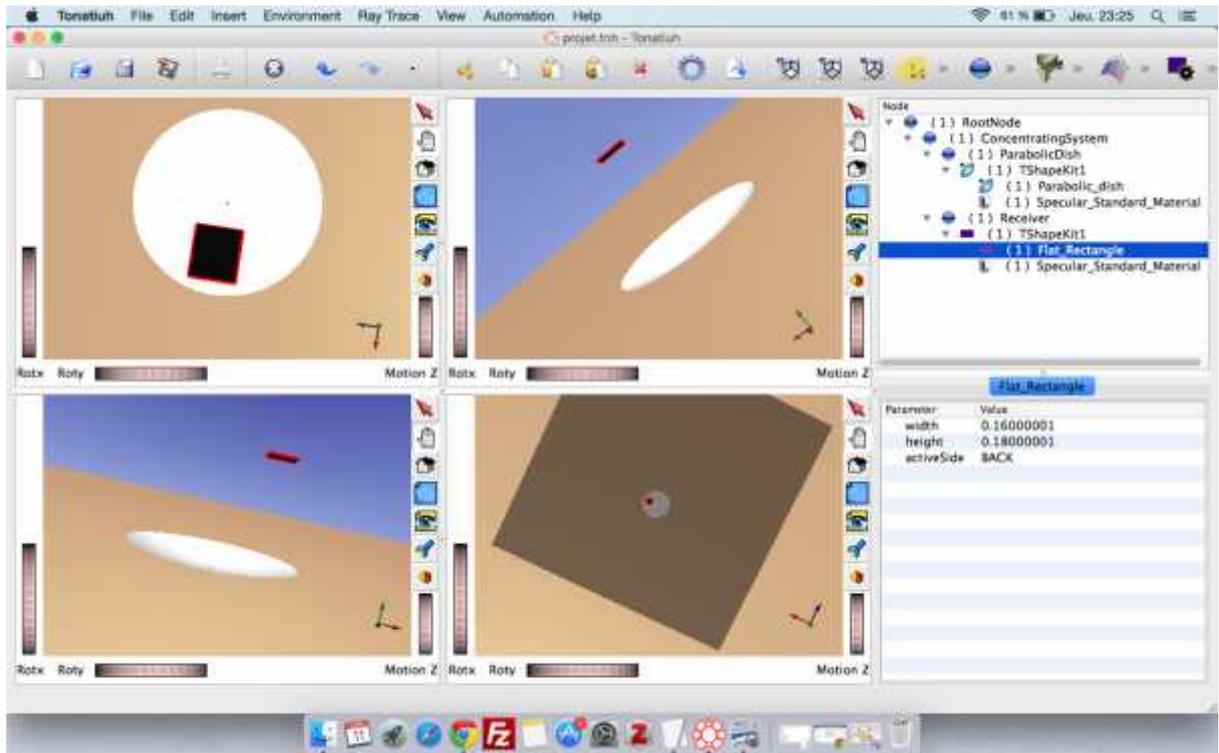
m_sigmaSlope = 0 (valeur par défaut 2)

En réglant la réflectivité à une pente et le sigma 0, nous disons à Tonatiuh que le miroir doit être modélisé comme un miroir réfléchissant spéculaire idéal qui suit exactement la loi de Descartes de la réflexion.

II –5 Modélisation du récepteur de disque plat :

1. Cliquer sur le "Receiver" groupe de nœuds pour le sélectionner et modifier la valeur de la variable de la traduction de "0 0 0" à "0,28 0,73 0" afin de traduire le cadre de référence du récepteur dans la direction y verticale et placer son origine au plan focal du miroir avec une translation de 28cm du point focal.
2. Ajouter au "Receiver" Node groupe un nœud de surface et de garder l'étiquette automatique "TShapeKit1" fourni par Tonatiuh.
3. Cliquer sur le "TShapeKit1" Nœud de surface vient d'être créé et y ajouter:
 - Un noeud "Flat_Rectangle".
 - Un noeud "Specular_Standard_Material".
4. Sélectionnez le nœud "Flat_Rectangle" et changer le «Width» à 0,18 mètres, le «Height» à 0,16mètre et le "activeSide" de "FRONT" à "BACK".

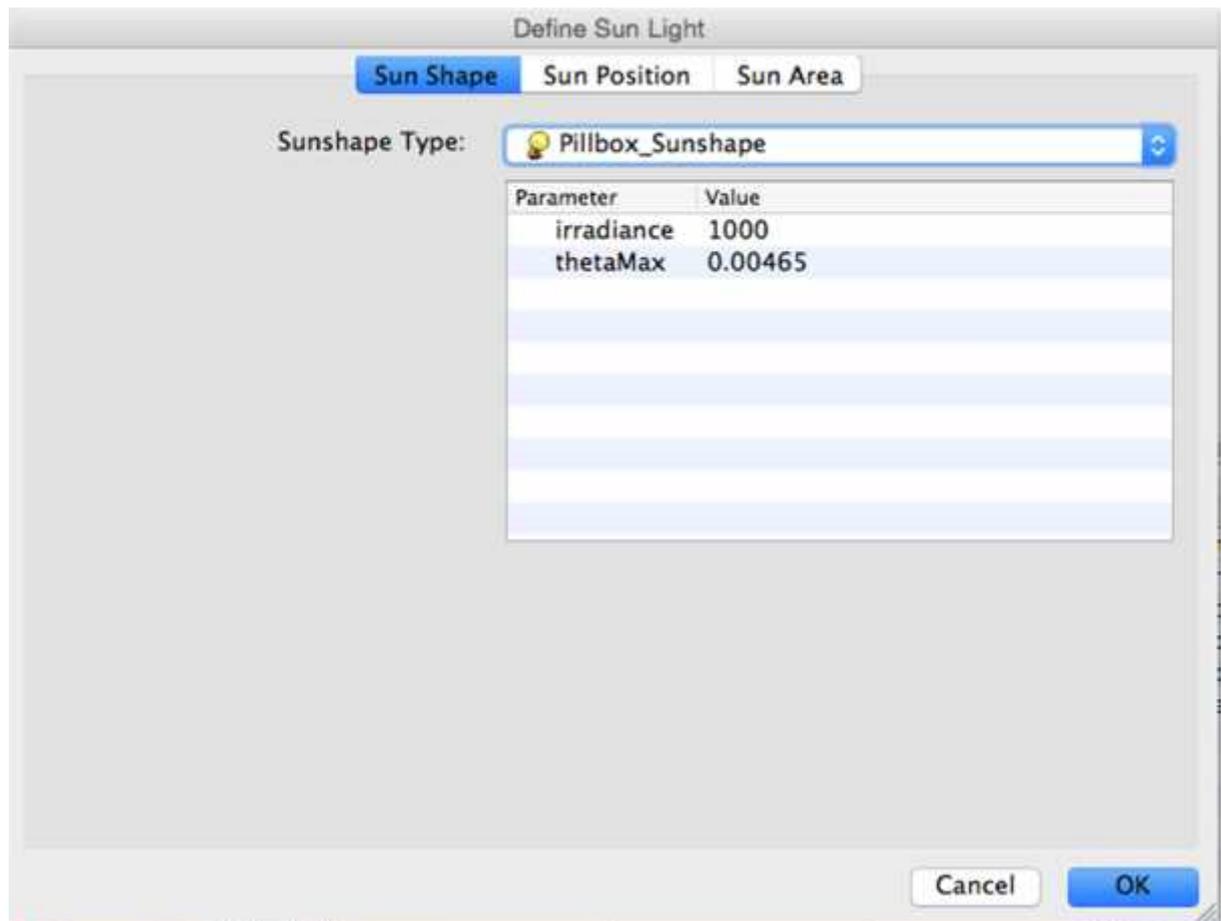
Après cela, si on sélectionne dans le menu "Affichage" l'option "Edit Mode" et on met en place les quatre 3D Windows de la vue 3D de volet de manière appropriée, l'interface utilisateur de Tonatiuh devrait ressembler à ceci:



II -6 Modélisation du rayonnement solaire direct :

1. De la barre de menu de Tonatiuh on sélectionne "Environnement> Sun Light> Définir SunLight» afin de rendre le programme pour afficher la boîte de dialogue "Définir Sunlight".
2. Dans l'onglet "Sun Shape" de ce dialogue, sélectionnez "Pillbox_Sunshape" comme "Sunshape Type".
3. Acceptez les valeurs par défaut fournies par le programme pour l'irradiance solaire directe (1000 W / m²) et pour les maximums demi-angles sous-tendu par le rayonnement solaire direct, "thetamax" (0,00465 radians ou 16 minutes d'arc) et cliquez sur "OK".

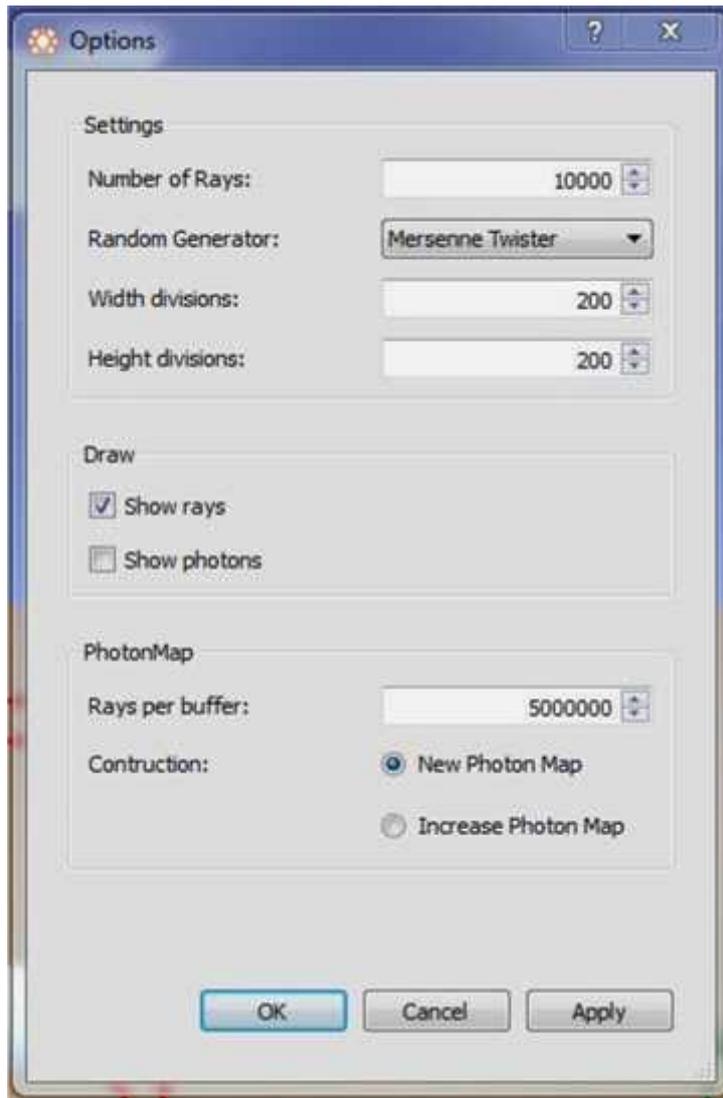
On n'a pas besoin de changer l'azimut et l'élévation du vecteur de soleil, car par défaut l'azimut est considérée comme 0 degrés et l'élévation de 90 degrés, qui est, le soleil vecteur, par défaut, est définie dans la direction y vers le haut et Par conséquent, aligné avec l'axe optique du miroir parabolique nous venons modéliser.



II-7 Traçage des rayons avec TONATIUH :

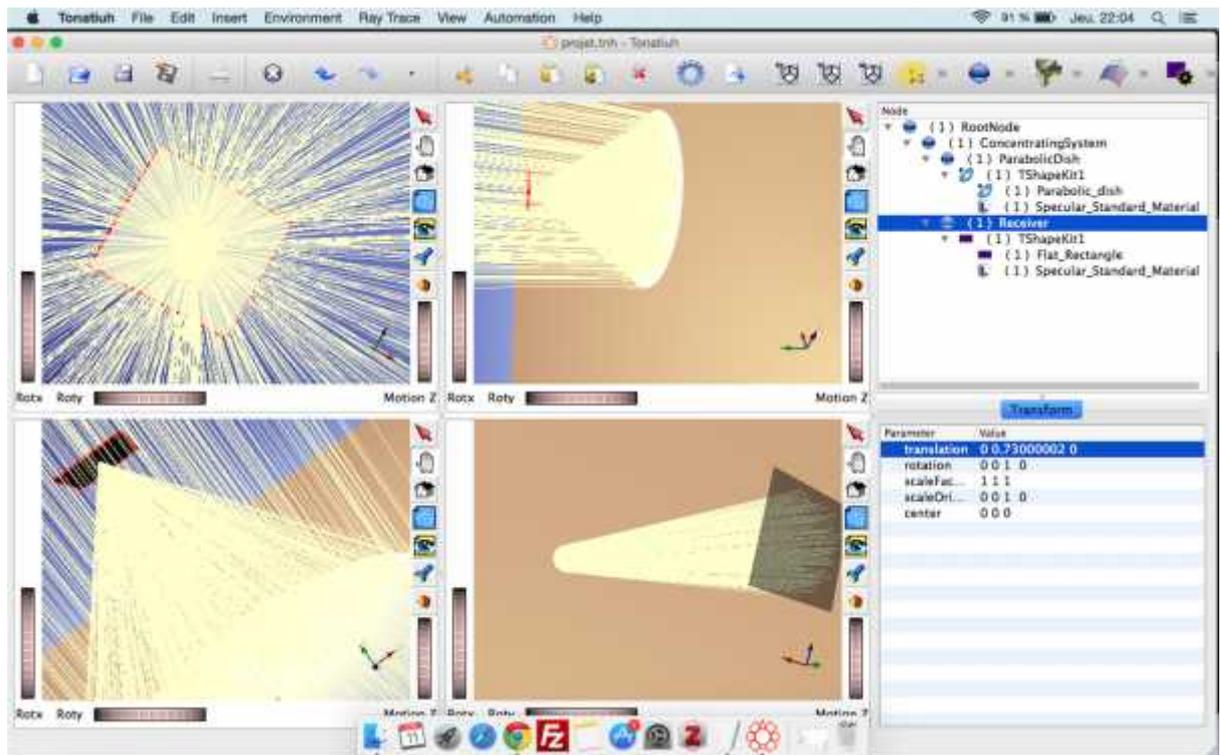
Une fois que nous avons modélisé le système solaire à concentration et le rayonnement solaire direct entrant, nous sommes prêts à fonctionner Tonatiuh pour tracer des rayons du Soleil dans le système de concentration et de recueillir des rayons tracés de rayons pour le post-traitement en dehors Tonatiuh.

Pour spécifier le nombre de rayons nous voulons générer, et d'autres options de 'Ray Tracing' nous allons à la barre de menu principal et sélectionnez "Ray Trace> Options Ray Trace" afin de rendre le programme pour afficher le pop-up de dialogue "Options Ray Trace", représentée sur la figure ci-dessous.



Dans ce dialogue, nous suffit de modifier le nombre de rayons à tracer par Tonatiuh de la valeur par défaut de 10000 à 75000000 rayons, et cliquez sur le bouton "OK".

Enfin pour tracer les rayons, nous allons encore sur l'onglet " Ray Trace" et on click cette fois ci sur "Run" ce qui va nous donner la figure ci-dessous :



II-8 Conclusion :

Ce logiciel libre nous permet la modélisation et simulation optique de différents types de concentrateurs solaires ainsi que l'estimation du flux de chaleur qui atteint le récepteur, mais à défaut de temps nous n'avons malheureusement pas pu adapter le programme sous Mathematica à notre étude de cas vu la complexité des commandes et du traitement des fichiers binaires engendrés par TONATIUH.

III- Réalisation d'une parabole solaire :

Pour réaliser notre concentrateur parabolique, nous avons utilisé le collecteur d'une antenne parabolique dont le diamètre est de 110 cm. Ce collecteur a ensuite été entièrement couvert par un film réfléchissant adhésif.



Figure 1-8 représente le concentrateur parabolique que l'on a obtenu.

Comme collecteur de chaleur, nous avons utilisé un ancien échangeur d'un chauffe-eau à gaz (Figure 1-9).



(Figure 1-9) : échangeur d'un chauffe-eau à gaz

Cet échangeur a été fixé au foyer de la parabole à l'aide d'un support en aluminium (Figure 1-10)..



(Figure 1-10) : un support en aluminium

Les tests réalisés montrent que l'on peut atteindre une température allant jusqu'à 551°C au foyer (.Figure 1-11)



Figure 1-11 :température atteinte au foyer

III-1-Conclusion :

Dans cette partie, nous avons présenté le concentrateur parabolique qu'on a réalisé au cours de notre travail de PFE.

Avec ce concentrateur, nous avons atteint une température de 500°C au foyer.

Malheureusement, les conditions météorologiques n'étaient très favorables ces dernières semaines ce qui ne nous a permis de faire plusieurs mesures aux différentes heures de la journée.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter la réalisation de la boucle calorifique.

Chapitre 2 : Echangeurs et circuit caloporteur :

Pour récupérer la chaleur du rayonnement concentré au foyer de la parabole, on doit utiliser un échangeur comme interface d'absorption. La chaleur absorbée peut alors être véhiculée en utilisant un fluide caloporteur.

I-Echangeurs de chaleur:

Un **échangeur de chaleur** est un dispositif permettant de transférer ***l'énergie thermique*** d'un milieu vers un autre. Il existe plusieurs types d'échangeurs: tubulaires, à plaques,

Dans cette partie, on va décrire uniquement la première catégorie à savoir les échangeurs tubulaires, car c'est le type que nous avons utilisé dans notre conception, D'autres catégories sont présentées en **annexe I**.

Les échangeurs tubulaires utilisent un fluide caloporteur circulant dans un ou plusieurs tubes. Différentes architectures existent en pratique.

I.1. Échangeur monotube :

Dans lequel le tube est placé à l'intérieur d'un réservoir et a généralement la forme d'un serpentín comme montré sur la figure au dessous. [3]



Figure 2-1 : Échangeur monotube en serpentín [3].

I-2 Échangeur coaxial :

Dans lequel les tubes sont le plus souvent cintrés ; en général, le fluide chaud ou le fluide à haute pression s'écoule dans le tube intérieur comme montré sur la figure suivante. [3]

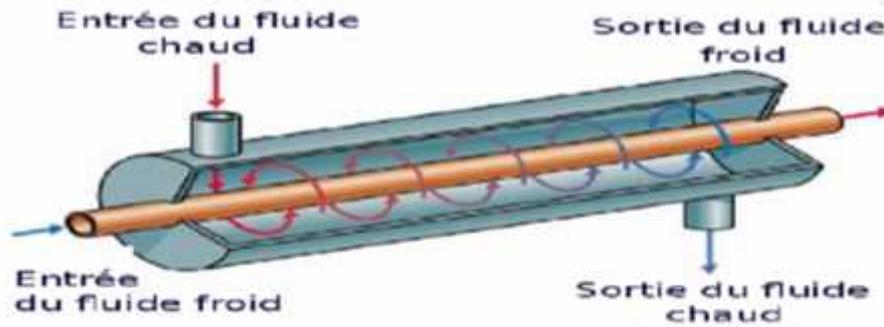


Figure 2-2: Échangeur coaxial [2].

I-3 Échangeur multitubulaires :

Existant sous trois formes :

I-3-1 Échangeur à tubes séparés :

À l'intérieur d'un tube de diamètre suffisant (de l'ordre de 100 mm) se trouvent placés plusieurs tubes de petit diamètre (8 à 20 mm) maintenus écartés par des entretoises. L'échangeur peut être soit rectiligne, soit enroulé. [3]

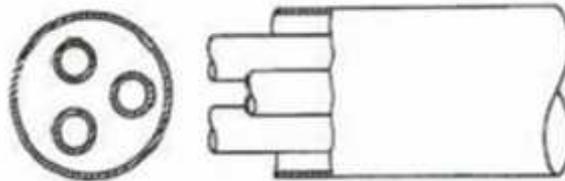


Figure 2-3: Échangeur à tube séparé [3]

I-3-2 Échangeur à tubes rapprochés :

Pour maintenir les tubes et obtenir un passage suffisant pour le fluide extérieur au tube, on place un ruban enroulé en spirale autour de certains d'entre eux. Les tubes s'appuient les uns sur les autres par l'intermédiaire des rubans. [3]

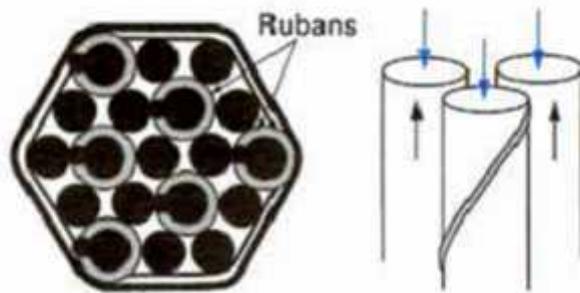


Figure 2-4: Échangeur à tube rapproché [3]

I-3-3 Échangeur à tubes à ailettes :

Ces échangeurs permettent d'améliorer le coefficient d'échange thermique grâce à la présence d'ailettes qui facilitent les échanges ou transferts de chaleur. Différents types d'ailettes sont présentées ci-dessous. [3]

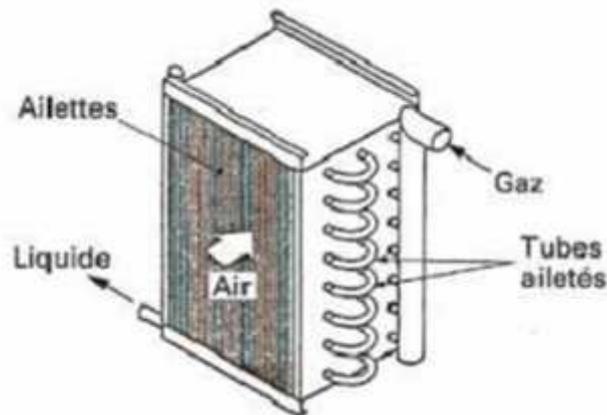


Figure 2-5: Échangeur à tube ailette [3]

I-3-3-1 Ailettes transversales :

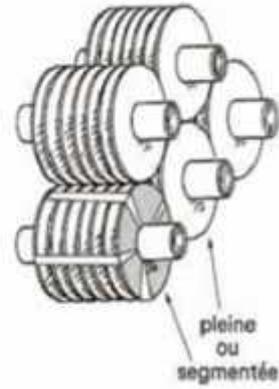
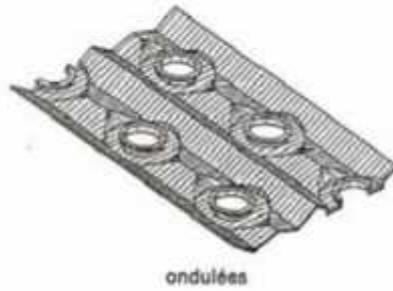
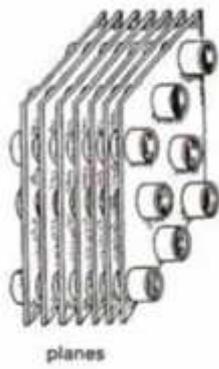


Figure 2-6 : Ailettes continue [3].

Figure 2-7 : Ailettes indépendantes [3].

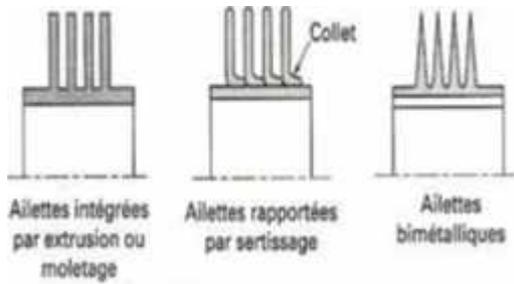


Figure 2-8 Ailettes annulaire [3]

Figure 2-9 Ailettes spirale [3]

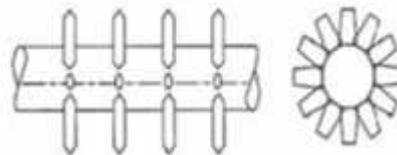
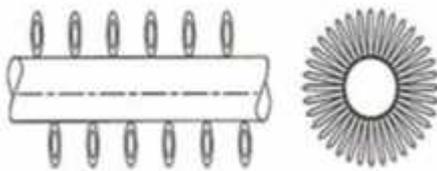


Figure 2-10 Ailettes à fils préformés [3].

Figure 2-11 :Ailettes poinçonnées [3].

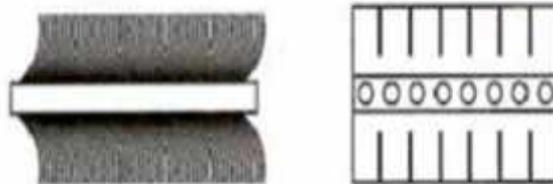


Figure 2-12 :Ailettes en brosse [3]

I-3-3-2 Ailettes longitudinales :

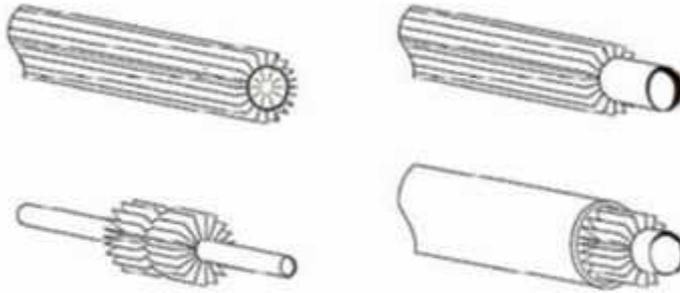


Figure 2-13: Autre différent type d'ailettes [3].

II - Modes de transfert de chaleur :

Il existe trois modes de transfert de chaleur : la conduction, la convection et le rayonnement.

II-1- La conduction :

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température :

$$\vec{\varphi} = -\lambda S \vec{\text{grad}} (T)$$

[4]

Ou sous forme algébrique :

$$\varphi = -\lambda S \frac{dT}{dx} \quad [4]$$

Avec : φ : Flux de chaleur transmis par conduction (W).

λ : Conductivité thermique du milieu ($\text{W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$).

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

S : Aire de la section de passage du flux de chaleur (m^2).

II-2 Convection :

C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par déplacement du fluide. Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton :

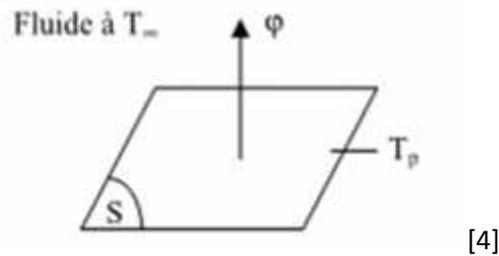


Schéma du transfert de chaleur convectif

$$\varphi = h S(T_p - T_\infty) [4]$$

Avec :

φ : Flux de chaleur transmis par convection (W).

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection ($W m^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1}$).

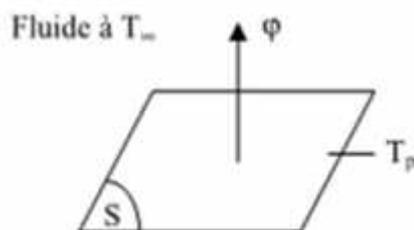
T_p : Température de surface du solide ($^\circ C$).

T_∞ : Température du fluide loin de la surface du solide ($^\circ C$).

S : Aire de la surface de contact solide/fluide (m^2).

II -3-Rayonnement :

C'est un transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces (même dans le vide). Dans les problèmes de conduction, on prend en compte le rayonnement entre un solide et le milieu environnant et dans ce cas nous avons la relation :



[4]Schéma du transfert de chaleur radiatif

$$\varphi = T_1^4 - T_{f2}^4 (\sigma \varepsilon 2\pi L) [4]$$

Avec : φ : Flux de chaleur transmis par rayonnement (W).

σ : Constante de Stefan ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$).

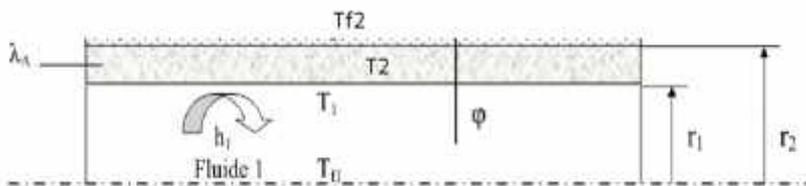
ϵ : Facteur d'émission de la surface.

T_p : Température de la surface (K).

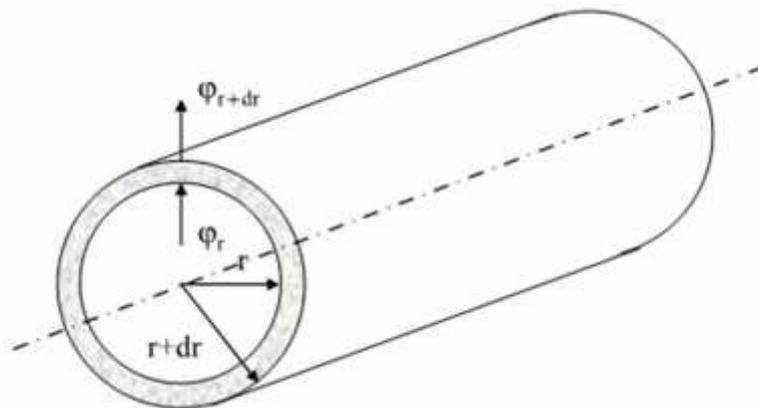
T_∞ : Température du milieu environnant la surface (K).

S : Aire de la surface (m^2).

Dans notre travail, nous avons utilisé des échangeurs tubulaires. Les équations qui régissent le transfert de chaleur dans ce dispositif peuvent être obtenus par la modélisation des transferts dans un cylindre creux (figure I-24)



[4]



[4]

Figure 2-14 : cylindre creux

Puisque le flux est conservatif :

$$\varphi = h_1 2\pi r_1 L (T_{f1} - T_1) = \frac{2\pi \lambda_A L (T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = h_2 2\pi r_2 L (T_2 - T_{f2})$$

$$(T_{f1} - T_1) = \frac{\varphi}{h_1 S_1}$$

$$(T_1 - T_2) = \frac{\varphi \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi \lambda_A L}$$

$$(T_2 - T_{f2}) = \frac{\varphi}{h_2 S_2}$$

avec $S_1 = 2\pi(r_1)L$ et $S_2 = 2\pi(r_2)L$ Sont les surfaces latérales

En faisant la somme de ces différences de température :

$$T_{f1} - T_{f2} = \varphi \left(\frac{1}{2\pi r_1 L h_1} + \frac{1}{2\pi r_2 L h_2} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi \lambda_A L} \right)$$

Donc l'expression du flux :

$$\varphi = \frac{T_{f1} - T_{f2}}{\left(\frac{1}{2\pi r_1 L h_1} + \frac{1}{2\pi r_2 L h_2} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi \lambda_A L} \right)}$$

En ajoutant l'équation du flux par rayonnement :

$$T_1^4 - T_{f2}^4 = \frac{\varphi}{(6\varepsilon 2\pi L)}$$

En faisant la somme des différences comme l'opération quand a fait dans la convection on obtient :

$$\phi = \frac{T_{f1} + T_{f2} + T_1^4 + T_{f2}^4}{\frac{1}{2\pi r_1 L h_1} + \frac{1}{2\pi r_2 L h_2} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L \lambda_A} + \frac{1}{6\varepsilon 2\pi L}}$$

Voir **ANNEXE I** pour le calcul de flux par conduction dans cylindre creux.

III- Circuit caloporteur:

III-1 Tuyauterie:

Nous avons utilisé un tuyau d'eau chaude dont la surface interne est recouverte en aluminium afin d'avoir une meilleure résistance aux températures élevées. Ce tuyau a un diamètre extérieur de 8mm et intérieur de 6mm. Pour construire notre circuit on avait besoin de 3m de longueur (Figure 2-15).



Figure 2-15 : Tuyau d'eau chaude utilisé

III -2-Pompe de circulation :

Afin de forcer la circulation du fluide dans le circuit caloporteur, il faut utiliser un circulateur approprié. Du fait du coût de ces dispositifs, nous avons eu l'idée d'intégrer une pompe utilisée dans les machines à laver. Les caractéristiques de cette pompe sont données sur la Figure 2-16.



Figure 2-16 : .Les caractéristiques de la pompe

III -3-Raccordement :

Pour assurer l'étanchéité du circuit caloporteur nous avons utilisé des douilles de sertissage comme le montre la Figure 2-17.

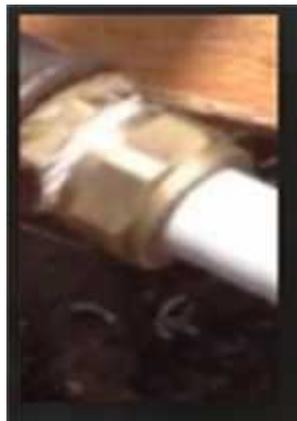


Figure 2-17 : douilles de sertissage

III-4-Echangeur spirale:

Pour tester les performances de notre système, nous l'avons utilisé pour chauffer de l'eau. Pour cela nous avons conçu localement un échangeur tubulaire en spirale

(Figure 2-18)



Figure 2-18 : un échangeur tubulaire en spirale

Cet échangeur est formé d'un tuyau en cuivre de 6mm de diamètre et 4m de longueur.

III -5- Autres raccordements :

On avait utilisé un raccordement en T afin de faire circuler l'eau dans le sens souhaité et que l'on a utilisé par la suite comme un dispositif de sécurité dans le cas des pressions élevées (Figure 2-19).



Figure 2-19 : raccordement en T

III -6- Conclusion :

Nous avons décrit dans ce chapitre les différents éléments de la boucle du fluide caloporteur (échangeur, raccords, pompe...). Ce circuit d'intérêt particulier nécessite des précautions dans sa conception et son utilisation. En effet des mesures de sécurité doivent être prises en compte à savoir, la vérification d'étanchéité et les dispositions de sécurité concernant les pressions élevées.

Chapitre 3 : MESURES ET RESULTATS

Dans ce chapitre nous allons présenter les mesures et résultats obtenus en utilisant notre système à concentration.

I- Réglages préliminaire

Au départ nous avons cherché la meilleure position d'emplacement de l'absorbeur pour profiter au mieux du rayonnement concentré.



Figure 3-1 : recherche du point optimal pour une bonne concentration

Nous avons mesuré la température au foyer dans différentes journées et nous avons obtenu les résultats suivants:

	Température ambiante (°c)	Température au foyer (°c)	Heure	Ensoleillement direct (Wh/m ²)
Mesure 1 (1 juin)	28	232	16.35	614
Mesure 2 (2 juin)	31	172	14.15	985
Mesure 3 (3 juin)	32	420	13.20	1024,57

II- Mesures à circuit ouvert :

Nous avons travaillé à circuit ouvert et nous avons mesuré la température de l'eau à la sortie de l'absorbeur pour différents débits. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Mesure 1: (le 12 mai 2015 à 16:08)

	Le temps (Secondes)	Quantité d'eau (ml)	Température du liquide(°c) (Dans le seau	Ensoleillement direct(°c) Wh/m2	Température ambiante(°c)	le débit (ml/S)	Température maximale à la sortie de l'échangeur (°c)
Mesure	300	500	55	476.1	38	1.66	80

$$Q=(\text{quantité d'eau})/(\text{le temps})$$

$$Q=(0.0005)/(300)= 1,66 * 10^{-6} \text{ m}^3 /\text{S} =1.66 * 10^{-3} \text{ L/S} = 1.66 \text{ ml/s}$$

Mesure 2:(le 12 mai à 15:46)

	Le temps (Secondes)	Quantité d'eau (ml)	Température du liquide(°c) (Dans le seau	Ensoleillement direct(°c) Wh/m2	Température ambiante(°c)	le débit (ml/S)	Température maximale à la sortie de l'échangeur (°c)
Mesure	180	2000	45	542.8	38	11.11	50

Donc le débit:

$$Q= (\text{quantité d'eau})/(\text{le temps})$$

$$Q=(0.002)/(180)= 1,11 * 10^{-5} \text{ m}^3/\text{S} =11.11 \text{ ml /s}$$

On remarque que lorsque le débit augmente, la température de l'eau à la sortie de l'absorbeur diminue. Ceci est normal, vu que le fluide caloporteur passe moins de temps à l'intérieur de l'absorbeur (dans le deuxième cas) et par conséquent récupère moins de chaleur.

Dans un deuxième temps, nous avons pensé à utiliser un circuit fermé avec un fluide caloporteur pour transférer la chaleur de l'absorbeur vers un bain d'eau à l'aide d'un deuxième échangeur. Ceci du fait qu'à plusieurs passages dans l'absorbeur, le fluide caloporteur va récupérer de plus en plus de chaleur. Les résultats des mesures de ce circuit seront présentés dans le prochain paragraphe.

III- circuit fermé :

En premier temps nous avons essayé d'obtenir une circulation d'eau à l'intérieur du circuit fermé due uniquement à l'effet thermosiphon, mais nous avons constaté que ce mécanisme reste insuffisant dans notre cas, ce qui nous a amené à penser à l'intégration d'une pompe qui va contrôler le passage du fluide caloporteur dans tous les éléments du circuit.

Dans ce cas on a utilisé deux échangeurs en même temps le premier qui joue le rôle d'un absorbeur et le deuxième d'un échangeur plonger dans un seau pour faire chauffer l'eau (échangeur spirale) (Figure 3-2).



(Figure 3-2).

Les mesures :

	Température ambiante (°c)	Température l'absorbeur (°c)	Ensoleillement direct Wh/m2	Heure	Température dans le seau (°c)	Température foyer (°c)
Mesure	32	280	965.3	13.25 vers 13.50	60	500

Nous constatons qu'avec une température d'absorbeur de 280°C, l'eau dans le seau a atteint une température de 60°C après 25 min de circulation forcée. Cette température reste quand même considérable vu que le circuit est sans isolation thermique.

Conclusion générale

Notre objectif était la réalisation d'un concentrateur solaire parabolique pour la production de chaleur qui reste l'un des processus industriels les plus importants et qui augmente considérablement la facture énergétique.

Vu la complexité technologique du processus de production de chaleur qui nécessite des précautions strictes, nous étions amené à résoudre les différents problèmes que l'on avait rencontré pendant la conception de notre système à savoir l'étanchéité du circuit caloporteur, l'augmentation de la pression ainsi que le contrôle de la circulation du fluide caloporteur.

Malgré les conditions météorologiques défavorable pendant les dernières semaines nous avons pu atteindre lors des tests effectués des températures importantes à savoir pour température d'absorbeur de 280°C l'eau a été chauffé jusqu'à 60°C dans une journée où l'ensoleillement était de 965.3 Wh/m².

Nous croyons que nous pourrions facilement atteindre des températures meilleures si nous assurons l'isolation thermique du circuit caloporteur, du réservoir d'eau à chauffer et le contrôle du débit du fluide caloporteur.

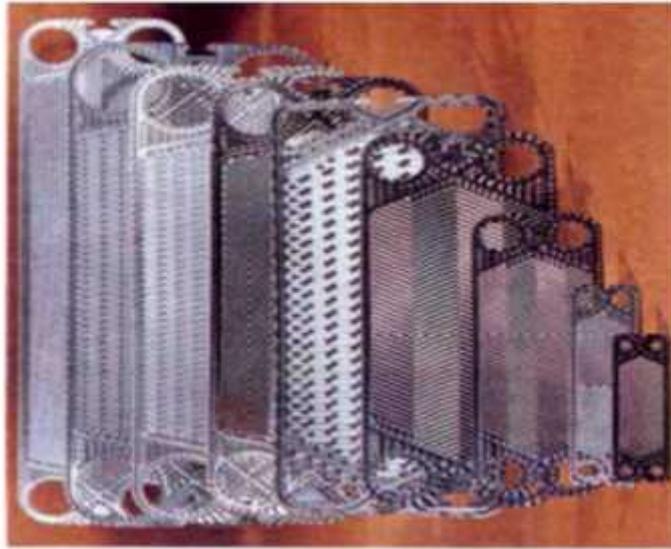
Les systèmes solaires à concentration peuvent être utilisés dans plusieurs applications industrielles à petite et moyenne échelle à cause de leur efficacité et capacité de production de chaleur.

ANNEXE I :

I. Echangeur à plaque :

I.1 Échangeurs à surface primaire :

Les échangeurs à surface primaire sont constitués de plaques corruguées, nervurées ou picotées. Le dessin du profil de plaques peut être assez varié mais il a toujours un double rôle d'intensification du transfert de chaleur et de tenue à la pression par multiplication des points de contact [3].



Différentes géométries de plaques d'échangeurs à surface primaire [3]

I-2-Échangeurs à plaques et joints :

La surface d'échange est alors composée de plaques métalliques, équipées de joints, serrées les unes contre les autres à l'aide de tirants entre deux flasques, l'un fixe, l'autre mobile [3].



Échangeur à plaque et joint [3]

I-3 Echangeurs à plaques soudées ou brasées :

Ils sont utilisés en récupération de chaleur, dans les domaines de la chimie, de la pétrochimie, de l'agro-alimentaire, etc. Parmi leur différent type [3].

II- flux par conduction dans cylindre creux :

On a : $\varphi_e + \varphi_g = \varphi_s + \varphi_{st}$

Avec :

φ_e : Le flux entrant

φ_g : Le flux généré

φ_s : Le flux sortant

φ_{st} : Le flux stocké

Dans ce cas nous avons ni flux généré ni stocké

Donc :

$$r \frac{dT}{dr} = c$$

Avec : c une constante

$$dT = c \frac{dr}{r}$$

En faisant la primitive des deux côtés on aura :

$$T = c \ln(r) + k \quad (1)$$

Avec : k constante d'intégration

En utilisant les conditions aux limites :

$$T(r) = c \ln(r_1) + k = T_1$$

$$T(r) = c \ln(r_2) + k = T_2$$

$$T_2 - T_1 = c \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

$$c = \frac{T_2 - T_1}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

$$T_1 \ln(r_2) - T_2 \ln(r_1) = k (\ln(r_2) - \ln(r_1)) = k \left(\frac{\ln(r_2)}{\ln(r_1)}\right)$$

$$k = \frac{T_1 \ln(r_2) - T_2 \ln(r_1)}{\left(\frac{\ln(r_2)}{\ln(r_1)}\right)}$$

Injectant les constantes dans (1) :

$$T(r) = \frac{T_2 - T_1}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \ln(r) + \frac{T_1 \ln(r_2) - T_2 \ln(r_1)}{\left(\frac{\ln(r_2)}{\ln(r_1)}\right)}$$

Finalement :

$$\boxed{\frac{T(r) - T_1}{T_2 - T_1} = \frac{\ln\left(\frac{r}{r_1}\right)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}}$$

Et par application de la relation $\varphi = -2\pi\lambda \frac{dT}{dr}$ on obtient :

$$\varphi = \frac{2\pi \lambda L (T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

Références :

Bibliographie :

[1] : INSA Rouen Projet de Physique P6-3 STPI/P6-3/2011 – groupe36

Etudiants : Alban MAHON, Lucille BARBULEE, Antoine MARTIN, Priscilla BARBU, Camille HUGUIN William BOISSELEAU, Lucie BAILLIEUX.

[2] Auteur : Adil Ridha, livre : « Transfert de Chaleur et de Masse », Université de Caen (2009/2010), page : 3/20

[3]: livre réalisé par : André BONTEMPS, Alain GARRIGUE, Charles GOUBIER, Jacques HUETZ, Christophe MARVILLET, Pierre MERCIER, Roland VIDIL,

« Description des échangeurs », technique de l'ingénieur [B 2 341].

[4] : Ecole des Mines Nancy , Auteur : Yves JANNOT, nom du livre : transferts thermiques , année :2012, pages : 6 -7- 13-14

Webographie :

http://www.osefrance.fr/?page_id=13 .

http://www.renac.de/fileadmin/user_upload/Download/Projects/ReGrid/Webinar_Brochure/CSP_online_broschure_frz_final_3.pdf .

http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89changeur_de_chaleur .

http://www.grenoble.archi.fr/cours-en-ligne/tixier/M21C_Cours_03.pdf .