

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**UNIVERSITÉ de BLIDA 1**

**Faculté de Technologie**

**Département de Génie des Procédés**



# **Mémoire**

En vue de l'obtention du diplôme de

**MASTER EN GENIE DES PROCEDES**

**Spécialité : GENIE CHIMIQUE**

Intitulé du mémoire :

**Modélisation du Transfert de Chaleur d'un  
Concentrateur Solaire Cylindro-Parabolique pour  
la Stérilisation des Instruments Médicaux**

Présenté par :

**Lawan Abdou Ali**

Encadré par :

**Dr Cheknane Benamar**

**Mme Chafa Malika**

Année universitaire 2017/2018

# الخلاصة

هذا العمل يتمثل في نمذجة التحولات الحرارية لمستقبل شمسي على شكل قطع مكافئ اسطواني من اجل تعقيم الادوات الطبية بواسطة الطاقة الشمسية الحرارية استعملنا هذا نوع من المستقبل الشمسي لإنتاج بخار الماء الساخن عند درجة حرارة متوسطة و عالية الضرورية لتعقيم الادوات الطبية.

أولاً قمنا بدراسة نظرية حول المعادلات الموافقة لمختلف أنماط التحول الحراري ثم وضعنا جمل المعادلات على شكل مصفوفات و قمنا بحل المعادلات بواسطة طريقة قوس سيدال باستعمال برنامج ماتلاب ثم مثلنا تغيرات درجات الحرارة بدلالة الزمن ثم بدلالة قطر الأنبوب الممتص و الكتلة الحجمية للمائع الحامل للحرارة و أخيراً بدلالة سرعة الرياح و تدفق المائع كما درسنا تأثير المردود و الطاقة الحرارية المفقودة بدلالة العوامل المذكورة سابقاً.

النتائج المتحصل عليها من هذا البرنامج بينت ان درجة حرارة المائع تزداد بزيادة التدفق و الكتلة الحجمية و تتناقص مع زيادة قطر الأنبوب و سرعة الرياح أما المردود فانه يزداد بزيادة كمية الإشعاع الاجمالي .

## كلمات المفاتيح

الطاقة الشمسية الحرارية، لمستقبل شمسي على شكل قطع مكافئ اسطواني، نمذجة، تحول حراري، تعقيم.

## RESUME :

Ce travail concerne la modélisation de transferts thermiques d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique pour la stérilisation des instruments médicaux. Afin de stériliser les instruments médicaux à l'aide de l'énergie solaire thermique, on a opté sur le capteur CCP du fait de sa performance pour la production de l'eau chaude et de la vapeur à des moyennes et hautes températures. Une étude théorique du CCP a été faite en établissant les équations de transferts thermiques et en les mettant sous forme matricielle après les avoir discrétisés. Ainsi, une résolution du système matricielle par la méthode de résolution de Gauss Seidel avec le logiciel Matlab. Des simulations de la température du fluide en fonction du diamètre de l'absorbeur, de la masse volumique du fluide caloporteur, de la vitesse du vent et du débit ont été réalisées. Une autre simulation du rendement et des pertes thermiques a été aussi faite.

Les résultats de ces simulations montrent que la température du fluide caloporteur augmente en fonction du débit et de la masse volumique, par contre elle diminue en fonction du diamètre de tube absorbeur et de la vitesse du vent. Les pertes thermiques augmentent avec la vitesse du

vent et de l'émissivité de l'absorbeur. Quant au rendement il augmente avec l'irradiation globale.

**Mot clés :** Energie solaire thermique, Modélisation, CCP, transferts thermiques, stérilisation

## **Abstact :**

The main objective of this work is heat transfer analysis and modelling parabolic through solar collector for medical sterilization.

We selected parabolic through solar collector for the sterilization medical instruments and equipment because it has high concentration ratio and efficiency, in which this concentrating type collector heated the fluid at high temperatures.

We established and resolved thermal transfer equations, we used Gauss Seidel's method to resolve matrix's system, and the proposed model used MATLAB software for equations resolutions.

Therefore, the results of various simulations of fluid's temperatures are reported, and allow the acquisitions of system parameters, absorber diameter, fluid density, wind speed.

The results of these simulations show that fluid's temperature increased with the increase of the flow and the density, but it decreased with the increase of absorber diameter and the wind speed.

Thermal losses increase with the wind speed and with absorber emissivity and the efficiency increase with the global irradiation.

### **Keywords:**

Thermal solar energy, modelling, parabolic through solar collector, thermal transfer, sterilization.

## **REMERCIEMENTS :**

*Tout d'abord, je remercie le Bon Dieu, le Tout Puissant, qui par sa Miséricorde, m'a donné le courage et la patience d'accomplir ce modeste travail.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes encadreurs **Dr Cheknane Benamar et Mme Chafa Malika** qui m'ont accompagné, soutenu et conseillé dans le cadre de ce travail.*

*Mes très vifs remerciements aux enseignants qui m'ont enseigné en Master Génie Chimique de l'Université Saad Dahleb de Blida*

*Mes sincères remerciements vont à l'encontre de tous les personnels et enseignement des départements de Génie des procédés de l'Université Saad Dahleb et de l'Université Djilali Bounaama de Khemis Miliana qui m'ont formé dans tout mon cursus universitaire.*

*Enfin, mes remerciements aux honorables membres du jury qui se sont consacrés pour examiner mon travail.*

*Je ne peux pas oublier de remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

## **DEDICACES :**

*Je dédie ce travail à mes très chers parents pour leur soutien et tous les efforts  
qu'ils ont consentis le long de mon parcours.*

*Je leur souhaite bonne santé et longue vie.*

*A mon oncle qui a toujours été là pour moi, Que la paix et la Miséricorde  
d'Allah soient sur lui*

*A mes frères et sœurs qui répondent toujours présents pour moi*

*A toute la famille **Abdou Jah***

*A toute la famille **Kanna***

*A tous mes frères et sœurs de lutte*

*A tous mes ami(e)s de tous bords*

# TABLE DES MATIERES :

|                                                                               |          |
|-------------------------------------------------------------------------------|----------|
| INTRODUCTION.....                                                             | 1        |
| <b>1 GENERALITE SUR L'ENERGIE SOLAIRE THERMIQUE :</b> .....                   | <b>3</b> |
| <u>1.1 Introduction:</u> .....                                                | 3        |
| <u>1.2 Travaux réalisés sur le CCP et sur la stérilisation solaire:</u> ..... | 4        |
| <u>1.3 Potentiel solaire algérien :</u> .....                                 | 7        |
| <u>1.4 Paramètres influençant l'énergie solaire :</u> .....                   | 9        |
| <u>1.4.1 Le temps solaires :</u> .....                                        | 9        |
| <u>1.4.2 Constante solaire :</u> .....                                        | 10       |
| <u>1.4.3 Azimut du soleil :</u> .....                                         | 10       |
| <u>1.4.4 Hauteur angulaire du soleil :</u> .....                              | 11       |
| <u>1.4.5 Latitude <math>\varnothing</math> :</u> .....                        | 11       |
| <u>1.4.6 Longitude <math>\lambda</math> :</u> .....                           | 11       |
| <u>1.4.7 Angle horaire :</u> .....                                            | 11       |
| <u>1.4.8 Angle d'incidence <math>\theta_i</math> :</u> .....                  | 12       |
| <u>1.4.9 Déclinaison solaire :</u> .....                                      | 12       |
| <u>1.4.10 Durée du jour:</u> .....                                            | 13       |
| <u>1.4.11 Fraction d'insolation:</u> .....                                    | 13       |
| <u>1.5 Le Rayonnement Solaire :</u> .....                                     | 13       |
| <u>1.5.1 Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire :</u> .....     | 14       |
| <u>1.5.2 Type du rayonnement solaire :</u> .....                              | 14       |
| <u>1.6 Les capteurs solaires :</u> .....                                      | 15       |
| <u>1.6.1 Capteurs plans :</u> .....                                           | 16       |
| <u>1.6.1.1 Capteurs plan vitrés :</u> .....                                   | 16       |
| <u>1.6.1.2 Capteurs plans non vitrés :</u> .....                              | 16       |
| <u>1.6.1.3 Capteurs à air :</u> .....                                         | 17       |
| <u>1.6.1.4 Capteur sous vide :</u> .....                                      | 17       |
| <u>1.6.2 Les concentrateurs :</u> .....                                       | 18       |
| <u>1.6.2.1 Les concentrateurs cylindro-paraboliques :</u> .....               | 19       |
| <u>1.6.2.2 Concentrateur parabolique :</u> .....                              | 19       |
| <u>1.6.2.3 Les centrales à tour :</u> .....                                   | 20       |
| <u>1.7 Conclusion :</u> .....                                                 | 20       |

|          |                                                                                                        |           |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>2</b> | <b><u>CONCENTRATEUR CYLINDRO-PARABOLIQUE ET STERILISATION SOLAIRE :</u></b>                            | <b>22</b> |
| 2.1      | <u>Introduction :</u>                                                                                  | 22        |
| 2.2      | <u>Concentrateur cylindro parabolique CCP:</u>                                                         | 23        |
| 2.2.1    | <u>Description :</u>                                                                                   | 23        |
| 2.2.2    | <u>La poursuite solaire :</u>                                                                          | 24        |
| 2.2.3    | <u>Les Caractéristiques géométriques du CCP :</u>                                                      | 25        |
| 2.2.4    | <u>Taux de concentration :</u>                                                                         | 26        |
| 2.2.5    | <u>Les composantes d'un CCP:</u>                                                                       | 27        |
| 2.2.5.1  | <u>Le collecteur :</u>                                                                                 | 27        |
| 2.2.5.2  | <u>Le réflecteur :</u>                                                                                 | 27        |
| 2.2.5.3  | <u>L'absorbeur (récepteur):</u>                                                                        | 28        |
| 2.2.5.4  | <u>La surface sélective : [32]</u>                                                                     | 28        |
| 2.2.5.5  | <u>Les fluides caloporteurs :</u>                                                                      | 29        |
| 2.2.6    | <u>Domaine d'application de l'énergie solaire thermique :</u>                                          | 29        |
| 2.3      | <u>Stérilisation solaire :</u>                                                                         | 30        |
| 2.3.1    | <u>Généralités sur la Stérilisation médicale :</u>                                                     | 30        |
| 2.3.1.1  | <u>Définition :</u>                                                                                    | 30        |
| 2.3.1.2  | <u>Les différentes méthodes de stérilisation :</u>                                                     | 30        |
| 2.3.1.3  | <u>Paramètres influençant la stérilisation à la vapeur d'eau :</u>                                     | 31        |
| 2.3.2    | <u>Problématique :</u>                                                                                 | 31        |
| 2.3.3    | <u>Le principe du fonctionnement du collecteur cylindro parabolique pour la stérilisation solaire.</u> | 32        |
| 2.4      | <u>Conclusion :</u>                                                                                    | 34        |
| <b>3</b> | <b><u>MODELISATION MATHEMATIQUE DU CCP :</u></b>                                                       | <b>35</b> |
| 3.1      | <u>Introduction :</u>                                                                                  | 35        |
| 3.2      | <u>Modélisation mathématique du CCP :</u>                                                              | 35        |
| 3.2.1    | <u>Description du CCP :</u>                                                                            | 35        |
| 3.2.2    | <u>Les différents types de transfert de chaleur :</u>                                                  | 36        |
| 3.2.2.1  | <u>Le transfert de chaleur par conduction :</u>                                                        | 36        |
| 3.2.2.2  | <u>Le transfert de chaleur par convection :</u>                                                        | 37        |
| 3.2.2.3  | <u>Le transfert de chaleur par rayonnement :</u>                                                       | 37        |
| 3.3      | <u>Etablissement des équations caractéristiques du problème :</u>                                      | 38        |
| 3.3.1    | <u>Bilan Thermique :</u>                                                                               | 38        |
| 3.3.1.1  | <u>Bilan thermique du fluide :</u>                                                                     | 40        |
| 3.3.1.2  | <u>Bilan thermique de l'absorbeur :</u>                                                                | 40        |

|         |                                                                                                                      |    |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.3.1.3 | <u>Bilan thermique de la vitre :</u> .....                                                                           | 41 |
| 3.3.2   | <u>Echanges de chaleur entre les éléments du tube absorbeur :</u> .....                                              | 41 |
| 3.3.2.1 | <u>Echange thermique entre le fluide et l'absorbeur :</u> .....                                                      | 42 |
| 3.3.2.2 | <u>Echange thermique entre l'absorbeur et la vitre :</u> .....                                                       | 43 |
| 3.3.2.3 | <u>Echange thermique entre la vitre et l'environnement :</u> .....                                                   | 44 |
| 3.3.2.4 | <u>Energie solaire globale absorbée :</u> .....                                                                      | 46 |
| 3.3.2.5 | <u>Rendement thermique du CCP :</u> .....                                                                            | 47 |
| 3.3.2.6 | <u>Les pertes thermiques :</u> .....                                                                                 | 47 |
| 3.4     | <u>Résolution numérique :</u> .....                                                                                  | 48 |
| 3.4.1   | <u>Discretisation des Equations :</u> .....                                                                          | 49 |
| 3.4.1.1 | <u>Equation caractéristique du fluide :</u> .....                                                                    | 49 |
| 3.4.1.2 | <u>Equation caractéristique de l'absorbeur :</u> .....                                                               | 49 |
| 3.4.1.3 | <u>Equation caractéristique de la vitre :</u> .....                                                                  | 49 |
| 3.4.2   | <u>Le système sous forme matricielle :</u> .....                                                                     | 50 |
| 3.5     | <u>Conclusion :</u> .....                                                                                            | 51 |
| 4       | <u>RESULTATS ET DISCUSSIONS :</u> .....                                                                              | 52 |
| 4.1     | <u>Méthode de résolution :</u> .....                                                                                 | 52 |
| 4.1.1   | <u>Les données du problème :</u> .....                                                                               | 52 |
| 4.1.1.1 | <u>Les caractéristiques géométriques :</u> .....                                                                     | 52 |
| 4.1.1.2 | <u>Les paramètres optiques.....</u>                                                                                  | 52 |
| 4.1.2   | <u>Description du programme :</u> .....                                                                              | 53 |
| 4.2     | <u>Résultats et discussions :</u> .....                                                                              | 53 |
| 4.2.1   | <u>Influence du diamètre interne de l'absorbeur <math>D_{ai}</math> sur la température du fluide</u><br><u>.....</u> | 54 |
| 4.2.2   | <u>Effet de la masse volumique du fluide sur la température du fluide :.....</u>                                     | 54 |
| 4.2.3   | <u>Influence de la vitesse du vent sur la température du fluide :.....</u>                                           | 55 |
| 4.2.4   | <u>Effet du débit de fluide sur la température du fluide :.....</u>                                                  | 56 |
| 4.2.5   | <u>Variation du rendement en fonction de l'irradiation globale <math>G</math> :.....</u>                             | 57 |
| 4.2.6   | <u>Influence de la vitesse du vent sur le coefficient des pertes thermiques :.....</u>                               | 58 |
| 4.2.7   | <u>Effet de l'émissivité de l'absorbeur sur le coefficient des pertes thermiques :..</u>                             | 59 |
|         | CONCLUSION.....                                                                                                      | 60 |
|         | PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS.....                                                                                 | 62 |

# LISTE DES FIGURES :

|                                                                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1.1 : Différents types d'énergie solaire et son utilisation .....                                                                                                                   | 4  |
| Figure 1.2 : (a) Distribution de flux sur le tube, (b) Distribution de température sur le tube ....                                                                                        | 5  |
| Figure 1.3 : Distribution de la densité du flux et l'angle circonférentiel, (a) pour les différents taux de concentration géométrique et (b) pour les différentes angles de la jante ..... | 6  |
| Figure 1.4 : Distribution de température dans l'espace annulaire du tube. (a) sous vide, (b) avec défaillance du vide .....                                                                | 6  |
| Figure 1.5 : Carte d'irradiation globale directe annuelle moyenne.....                                                                                                                     | 8  |
| Figure 1.6 : Variation de l'Equation de Temps .....                                                                                                                                        | 9  |
| Figure 1.7 : Evaluation annuelle de la constance solaire .....                                                                                                                             | 10 |
| Figure 1.8 : Variation annuelle de déclinaison solaire .....                                                                                                                               | 12 |
| Figure 1.9 : Type de rayonnement solaire.....                                                                                                                                              | 15 |
| Figure 1.10 : Capteur plan vitré .....                                                                                                                                                     | 16 |
| Figure 1.11 : Capteur plan à air.....                                                                                                                                                      | 17 |
| Figure 1.12 : Capteur sous vide.....                                                                                                                                                       | 18 |
| Figure 1.13 : Schéma d'un capteur cylindro-parabolique .....                                                                                                                               | 19 |
| Figure 1.14 : Concentrateur parabolique.....                                                                                                                                               | 19 |
| Figure 1.15 : Centrale à tour.....                                                                                                                                                         | 20 |
| Figure 2.1 : Capteur à concentration cylindro-parabolique .....                                                                                                                            | 24 |
| Figure 2.2 : Orientations possibles d'un CCP .....                                                                                                                                         | 25 |
| Figure 2.3 : Différentes surfaces caractérisant un CCP .....                                                                                                                               | 26 |
| Figure 2.4 : Variation du taux de concentration en fonction de la température de l'absorbeur.....                                                                                          | 27 |
| Figure 2.5 : Structure de l'absorbeur.....                                                                                                                                                 | 28 |
| Figure 2.6 : Schéma synoptique du système .....                                                                                                                                            | 33 |
| Figure 2.7 : Schéma d'un autoclave.....                                                                                                                                                    | 34 |
| Figure 3.1 : Schéma du tube absorbeur .....                                                                                                                                                | 35 |
| Figure 3.2 : Transferts thermiques entre les différentes parties du CCP.....                                                                                                               | 36 |
| Figure 3.3 : Bilan thermique d'un élément de surface du CCP (coupe axiale).....                                                                                                            | 39 |
| Figure 3.4 : Les différents modes d'échanges de chaleur .....                                                                                                                              | 41 |
| Figure 4.1 : Influence du diamètre interne de l'absorbeur sur la Température du fluide.....                                                                                                | 54 |

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 4.2 : Variation des températures $T_f$ en fonction de la masse volumique du fluide ..... | 55 |
| Figure 4.3 : Influence de la vitesse du vent sur la température du fluide.....                  | 56 |
| Figure 4.4 : Effet du débit de fluide sur la température du fluide .....                        | 57 |
| Figure 4.5 : Effet d'irradiation globale sur le rendement .....                                 | 58 |
| Figure 4.6 : Influence de la vitesse du vent sur le coefficient des pertes thermiques.....      | 59 |
| Figure 4.7 : Effet de l'émissivité de l'absorbeur sur le coefficient des pertes thermiques..... | 60 |

# LISTE DES TABLEAUX :

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <u>Tableau 1.1 : Répartition spectrale du rayonnement thermique</u> .....                                               | 14 |
| <u>Tableau 3.1 : Les valeurs de C et m pour une valeur de <math>Re_{Dve}</math></u> .....                               | 45 |
| <u>Tableau 4.1 : Les caractéristiques géométriques du collecteur utilisé</u> .....                                      | 52 |
| <u>Tableau 4.2 : Les paramètres optiques des matériaux utilisés</u> .....                                               | 53 |
| <u>Tableau 4.3 : Variation du rendement en fonction de l'irradiation globale</u> .....                                  | 57 |
| <u>Tableau 4.4 : Variation du coefficient des pertes thermiques en fonction de de la vitesse du vent</u><br>.....       | 58 |
| <u>Tableau 4.5 : la variation du coefficient des pertes thermiques en fonction de l'émissivité de l'absorbeur</u> ..... | 59 |

# INTRODUCTION :

L'Algérie, comme tous les pays du monde, s'est engagée sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile à travers le lancement d'un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique. Cette vision s'appuie sur une stratégie axée sur la mise en valeur des ressources inépuisables comme le solaire et leur utilisation pour diversifier les sources d'énergie et préparer l'Algérie de demain. [1]

En effet, l'énergie solaire se manifeste par le rayonnement de la terre par le soleil. Ce rayonnement se propage suivant trois modes différents : direct, diffus et global. La technologie employée dans ce domaine doit permettre de collecter cette énergie suivant ces trois modes de rayonnement. Dans notre cas, la technologie de concentrateur cylindro-parabolique a été adoptée pour convertir cette énergie sous forme de chaleur.

Les concentrateurs cylindro-paraboliques concentrent les rayons du soleil sur un tube récepteur, situé le long de la ligne focale du réflecteur, au sein duquel circule un fluide caloporteur. La chaleur concentrée sera transférée au le fluide caloporteur.

L'objectif de ce travail est de faire une modélisation des transferts de chaleur d'un CCP que l'on va utiliser pour la stérilisation des instruments médicaux. Ainsi, des équations de transferts thermiques seront établies, discrétisées et ramenées sous forme matricielle. La résolution du système d'équations sera faite sous le logiciel Matlab avec une des méthodes de résolution des systèmes d'équation.

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

- Le premier chapitre concerne les généralités sur l'énergie solaire thermique : il comporte des informations sur les travaux de recherches antérieurs, les paramètres importants intervenants dans le domaine de l'énergie solaire, le potentiel solaire algérien et les capteurs utilisés pour la conversion du rayonnement solaire en énergie thermique.

- La technologie de concentrateur cylindro-parabolique et la stérilisation médicale solaire ont été abordés dans le deuxième chapitre.
- Le troisième chapitre est basé sur la modélisation mathématique du CCP : dans ce chapitre une étude théorique approfondie sur le CCP a été faite, la discrétisation des équations de chaleur et la remise de ces équations en un système d'équation sous forme matricielle. Ainsi, l'utilisation d'un code de programmation Matlab a été utilisée pour la résolution du système.
- La présentation des résultats et discussions sera faite dans le quatrième chapitre.

Enfin, une conclusion résumant les résultats obtenus a été présentée avec quelques perspectives et recommandations.

# 1 GENERALITE SUR L'ENERGIE SOLAIRE

## THERMIQUE :

### 1.1 Introduction :

Avec un diamètre 109 fois que celui de la Terre, le Soleil est une immense sphère de plasma avec une densité de  $1,41\text{kg/m}^3$ ; Il est situé à une distance moyenne de 149 598 000 km de la terre et émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0.22 à 10  $\mu\text{m}$ . La pression qui y règne à sa surface est de plusieurs milliards de fois plus forte que celle observée au niveau de la surface terrestre, le constituant principal du soleil est l'hydrogène, des réactions thermonucléaires se produisent alors en permanence provoquant la fusion de l'hydrogène en Hélium. La température à la surface du soleil est de 5800K et peut atteindre  $20.10^6$  à son centre. A chaque seconde, le soleil perd 45.106 tonnes de matières sous forme de rayonnement électromagnétique se propageant à la vitesse de 300.000 km/s. Notons toutefois que la perte de matière est infime vis-à-vis de la masse totale du soleil. Ce rayonnement solaire est équivalent au rayonnement qui serait émis par un corps noir à 5800K. [2]

En effet, pour exploiter ou stocker cette énergie solaire il faut la convertir en une autre forme d'énergie, pour cela on utilise les capteurs solaires. Il existe deux grandes familles des capteurs solaires selon la nature de conversion : les capteurs solaires photovoltaïques qui transforment le rayonnement solaire en électricité et les capteurs solaires thermiques qui produisent de la chaleur. Aussi, la quantité d'énergie solaire disponible sur la surface terrestre dépend fortement des paramètres astronomiques, météorologiques et géographiquement.

La figure 1.1 montre les différents types d'énergie solaire et son utilisation :

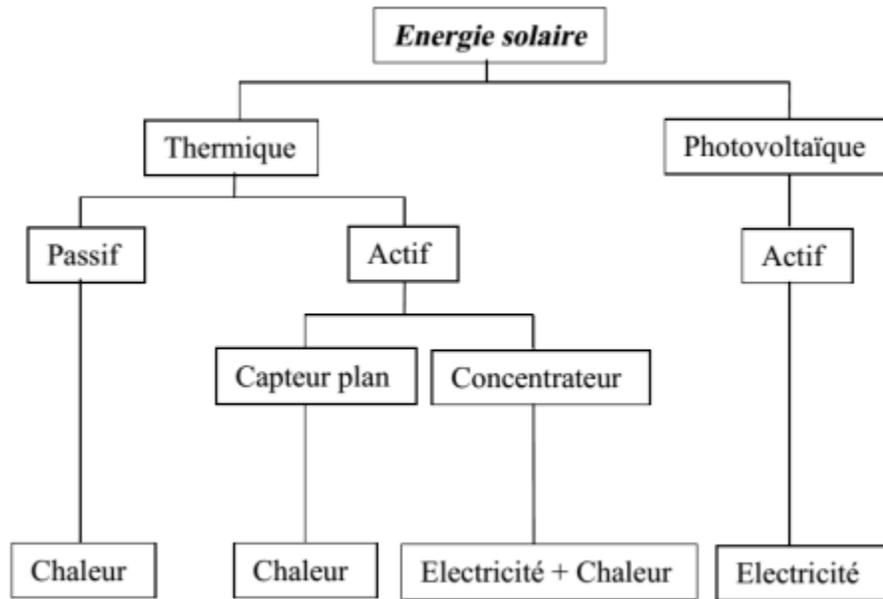


Figure 1.1 : Différentes types d'énergie solaire et son utilisation [3]

## 1.2 Travaux réalisés sur le CCP et sur la stérilisation solaire :

En 1986, Sheldon et M. Jeter ont fait une analyse mathématique du modèle optique d'un CCP, ils sont parvenus à des solutions analytiques de la distribution de la densité du flux concentré sur un récepteur plan et un autre cylindrique et ainsi que le taux de concentration local qui possède la même signification que le facteur de forme entre le miroir et l'absorbeur local, ce dernier dépend de la distribution de l'intensité solaire incidente et il reste supérieur pour un angle d'acceptation de  $16^\circ$  que pour un angle de  $32^\circ$ . [4]

En 2010, Z.D. Cheng et al [5] ont travaillé sur l'identification de la distribution de la température à la surface externe du tube absorbeur d'un CCP, Figure 1.3. Cette distribution de la température qui reste fonction de la distribution du flux de rayonnement, Figure 1.2 (a), perçu à la surface et déterminé à son tour en exploitant la technique de Monte Carlo MCRT (Monte Carlo Ray Tracing) d'un aspect irrégulier comme on le perçoit sur la Figure 1.2(b). Combinant la méthode de MCRT et la méthode des volumes finis via le code de calcul Fluent, ils élaborent une multitude de simulations. Prenant le fait de la dépendance des propriétés physiques du fluide caloporteur (huile Syltherm 800) avec la température, la validation du modèle mathématique et de la modélisation par comparaison avec des données des études expérimentales antérieures de

Dudley et al [6] fut poussé jusqu'à une différence de 2% sur la température du fluide caloporteur à la sortie de l'absorbeur.

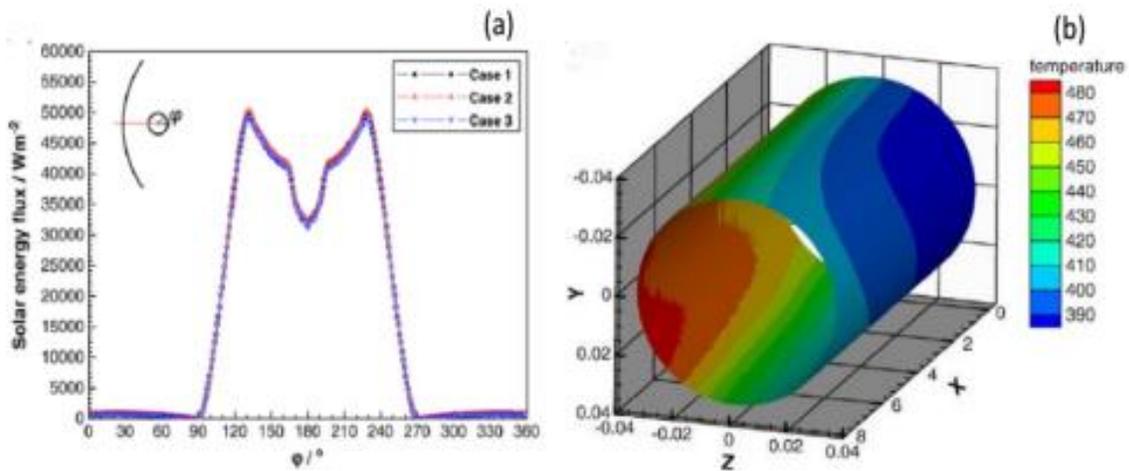


Figure 1.2 : (a) Distribution de flux sur le tube, (b) Distribution de température sur le tube

En 2011, Ya-Ling He et al[7] ont réalisés une multitude de simulations sur différentes configurations de CCP étudiées expérimentalement avant par Dudley et al (1994). L'objectif principal de leur travail est l'approfondissement de la compréhension des paramètres influençant l'efficacité thermique des CCP. Pour cela, deux cas de figures ont été présentés :

- 1<sup>er</sup> cas : en diminuant le diamètre du tube absorbeur, ils augmentent le taux de concentration géométrique et améliorent ainsi la distribution du flux.
- 2<sup>e</sup> cas : en variant l'angle de la jante de la parabole (angle de Rim) tout en gardant la même ouverture et le même diamètre de tube absorbeur.

Les résultats de cette étude sont représentés sur la Figure 1.3 :

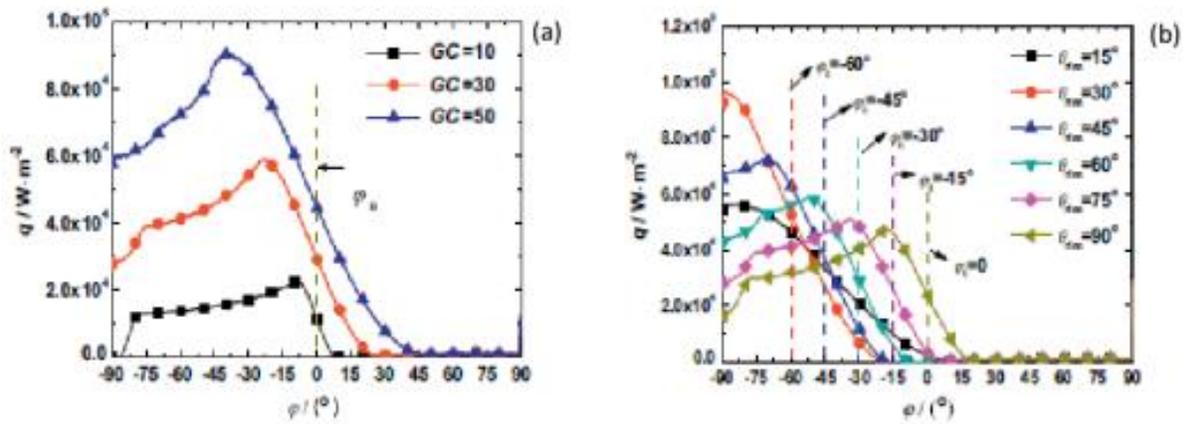


Figure 1.3 : Distribution de la densité du flux et l'angle circonférentiel, (a) pour les différents taux de concentration géométrique et (b) pour les différents angles de la jante

En 2013 M. Yaghoubi et al [8] ont concentrés leurs études sur les pertes thermiques à travers l'espace annulaire qui existe entre l'absorbeur et la vitre en verre. Par une simple comparaison de leurs résultats numériques pour trois cas, ils ont constaté que les pertes de chaleur dans un tube où il y a défaillance du vide sont 40% plus qu'un tube comportant du vide à 100%. Dans le cas d'un tube avec une enveloppe en verre brisée, les performances thermiques diminuent de 12 à 16%, voir la Figure 1.4.

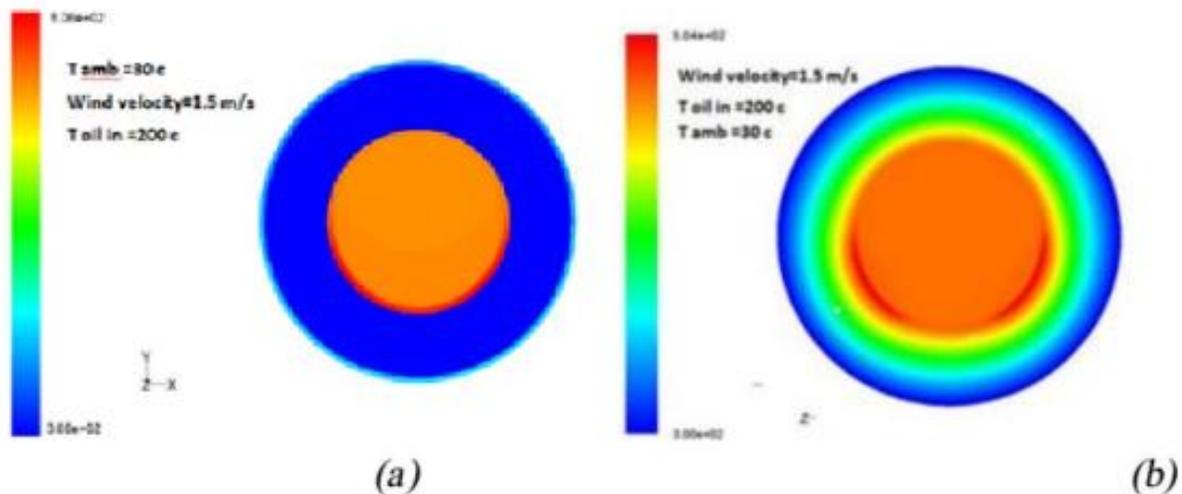


Figure 1.4 : Distribution de température dans l'espace annulaire du tube. (a) sous vide, (b) avec défaillance du vide

Abhat. A était le premier à avoir identifié la chaleur latente transférée par différents types de fluide vers les matériaux, cette chaleur est liée aux propriétés thermodynamiques, cinétiques et chimiques du fluide caloporteur. [9]

Oara Neumann et al [10] ont conçu un autoclave solaire pour la stérilisation médicale basée sur la génération de la vapeur utilisant un haut débit d'un fluide caloporteur enrichi par des nanoparticules pour favoriser le transfert thermique par l'augmentation de l'absorbance de la lumière. Le système maintient la température entre 115°C et 132 °C pour un temps de stérilisation d'environ de 15 minutes et un volume de l'autoclave de 14.2l. Il existe une variété de nanoparticules comme les corps métalliques, à base de carbone qui par leur dispersion dans une solution aqueuse, favorisent la conversion de l'énergie solaire absorbée vers la vapeur, ce phénomène appelé effet photothermique.

Osama Bany Mousa [11] a étudié la performance de la stérilisation solaire par une analyse comparative entre quatre types de collecteurs solaires de géométrie différentes, en utilisant le logiciel TRNSYS, qui est un modèle numérique prédéfinie pour différents composants et qui permet de déterminer et de simuler les paramètres thermiques et thermodynamiques des échangeurs de chaleurs dans deux sites différents ( Sydney et Alice Springs), l'étude montre que la géométrie du collecteur, les dimensions et le design du réservoir de stockage (utilisation d'un réservoir stratifié ou à étages au lieu d'un réservoir mixte ) influe sur la température de sortie du fluide.

Malgré les avancées technologiques et scientifiques dans divers domaines industriels, il y a un manque de disponibilité de documentations liées aux études et expérimentations dans le domaine de la stérilisation médicale solaire.

### **1.3 Potentiel solaire algérien :**

Avec 2.381.741 km<sup>2</sup> de surface, l'Algérie est le pays le plus vaste du méditerranéen. Selon une étude de l'agence aérospatiale allemande, l'Algérie offre de plus grandes possibilités intéressantes, à long terme, pour investir dans les centrales thermiques solaires. En effet, l'Algérie est l'un des pays de la méditerranée qui dispose d'un potentiel solaire énorme. Selon les données d'ensoleillement [12], l'Algérie est comptée parmi les meilleurs pays ensoleillé dans

le monde. Son potentiel des ressources solaires est optimal pour l'exécution des projets des concentrateurs solaires. [13]

En effet, la durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures dans les hauts plateaux et Sahara. L'énergie moyenne reçue annuellement sur une surface horizontale est de : 1700 kWh/m<sup>2</sup>/an dans les Régions côtières, 1900 kWh/m<sup>2</sup>/an dans les Hauts plateaux et 2650 kWh/m<sup>2</sup>/an dans le Sahara.

La figure 1.8 donne l'irradiation globale directe annuelle moyenne du solaire algérien : [1]

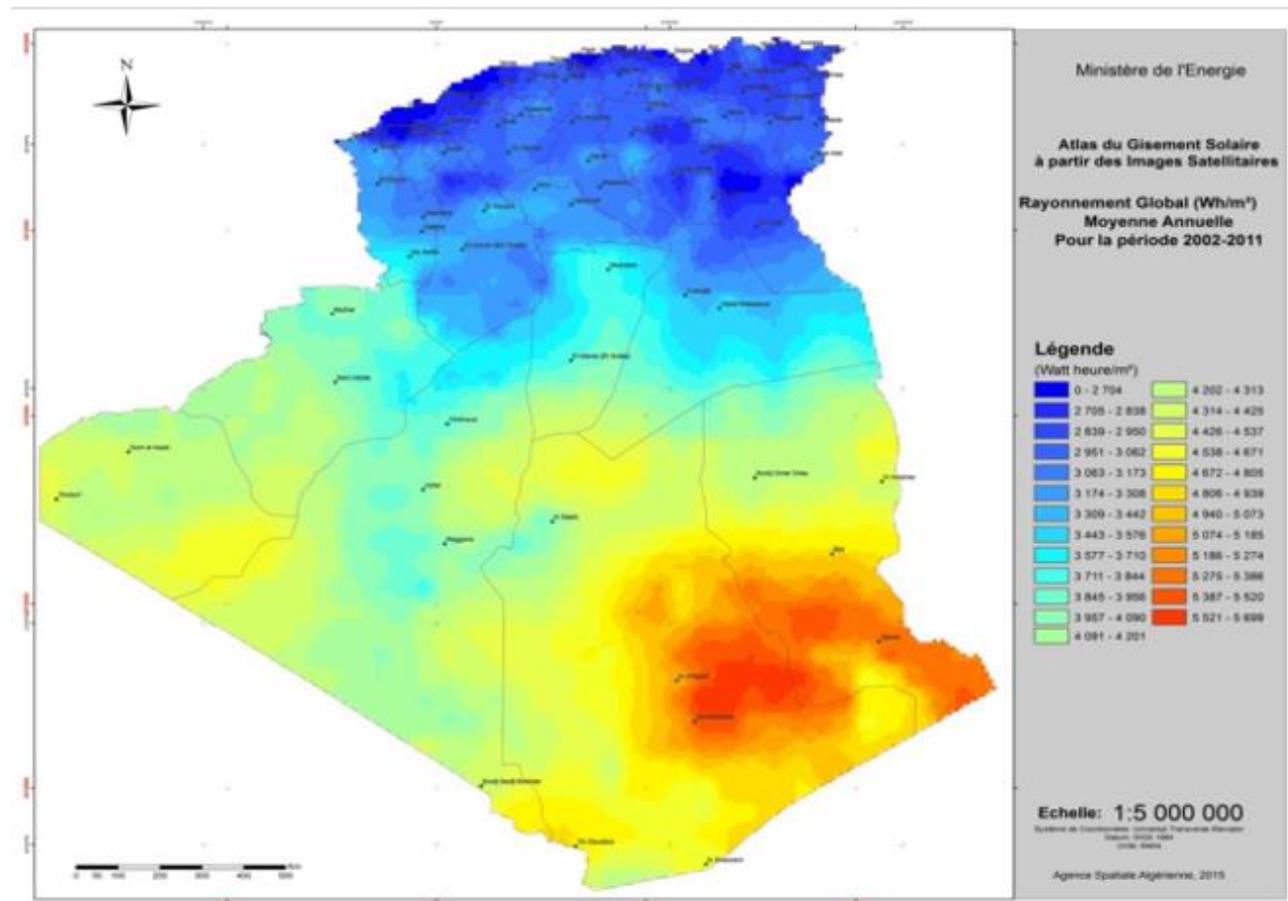


Figure 1.5 : Carte d'irradiation globale directe annuelle moyenne [1]

## 1.4 Paramètres influençant l'énergie solaire :

### 1.4.1 Les temps solaires :

Le Temps Solaire Vrai TSV est directement lié à la rotation de la terre sur elle-même, il est défini par l'angle horaire  $\omega$  :

$$TSV = 12 + \frac{\omega}{15} \quad (1-1)$$

Temps Solaire Moyenne TSM est le temps qui correspond à la rotation uniforme de la terre autour du soleil :

$$TSM = TSV + ET \quad (1-2)$$

Où ET est l'Equation de Temps donné par : [14]

$$ET = 0,0072 \cos J - 0,0528 \cos 2J - 0,0012 \cos 3J - 0,1229 \sin J - 0,1565 \sin 2J - 0,0041 \sin 3J \quad (1-3)$$

Avec :  $J = 0.984j$ ,  $j$  étant le nombre du jour de l'année à partir de janvier.

La figure 1.6 montre la variation de l'Equation de Temps en fonction des mois de l'année :

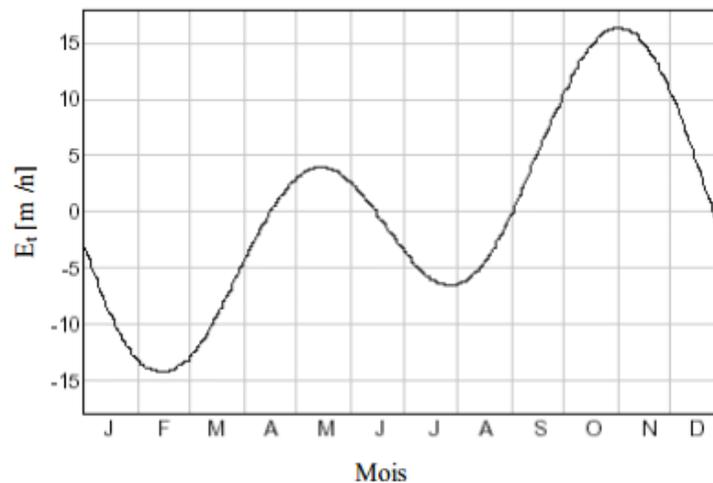


Figure 1.6 : Variation de l'Equation de Temps [14]

### 1.4.2 Constante solaire :

On appelle constante solaire, la quantité d'énergie totale envoyée par le soleil à la limite de l'atmosphère terrestre sur une surface perpendiculaire au rayonnement solaire. La variation de la constante solaire suit la relation suivante : [15] [16]

$$C^* = C_o^* + 0.033 \times \cos(0.948 \times n) \quad (1-4)$$

$C^*$  : la constante solaire ;

$C_o^* = 1353 \text{ W/m}^2$  est la valeur moyenne de la constante solaire actuellement retenue ;

$n$  : le nombre du jour de l'année ;

La figure 1.7 présente l'évolution annuelle de la constante solaire :

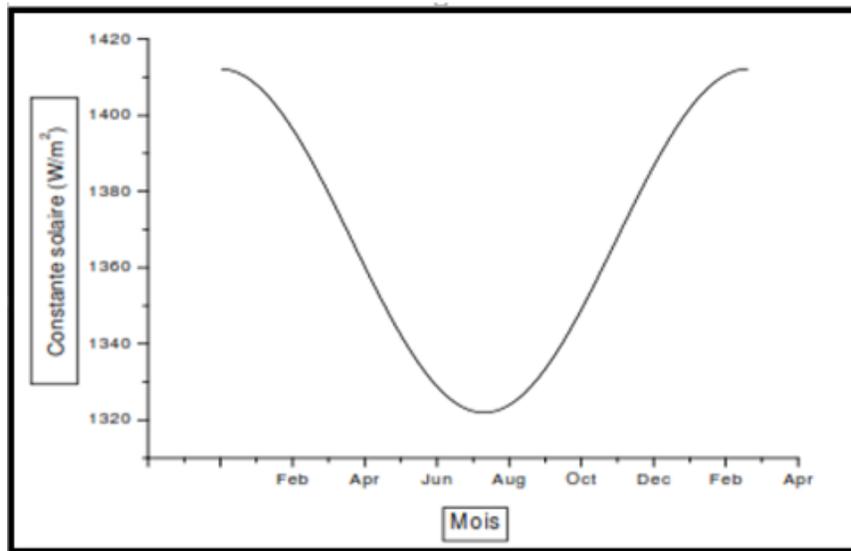


Figure 1.7 : Evaluation annuelle de la constante solaire

### 1.4.3 Azimut du soleil :

L'azimut est défini par l'angle compris entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil. La connaissance de l'azimut est essentielle pour déterminer l'angle d'incidence des rayons sur une surface non horizontale. L'orientation Est correspond à l'azimut  $\alpha = -90^\circ$ , et l'orientation Ouest à  $\alpha = +90^\circ$ . L'azimut est estimé par la relation suivante : [17]

$$\sin \alpha = \frac{\cos \delta \cdot \sin \omega}{\cos h} \quad (1-5)$$

Ou bien :

$$\cos a = \frac{\sin \varnothing \sin h - \sin \delta}{\cos \varnothing \cos h} \quad (1-6)$$

Une autre formule a été donnée :

$$\cos a = \frac{\sin \varnothing \cos \delta \cos \omega - \cos \varnothing \sin \delta}{\cos h} \quad (1-7)$$

$\varnothing$  : Latitude

$\delta$  : Déclinaison solaire

$\beta$ : Inclinaison de la surface.

$\gamma$ s: Angle extérieur d'azimut.

$\omega$  : Angle horaire du soleil

$h$  : Hauteur angulaire du soleil

#### 1.4.4 Hauteur angulaire du soleil :

La hauteur angulaire est définie par l'angle qui est formé par le plan horizontal du lieu d'observation avec la direction du soleil. Cette hauteur peut varier de  $0^\circ$  (soleil à l'horizon) à  $90^\circ$  (soleil au zénith) durant le jour. [17]

$$\sin h = \sin \varnothing \sin \delta + \cos \varnothing \cos \delta \cos \omega \quad (1-8)$$

#### 1.4.5 Latitude $\varnothing$ :

C'est une valeur angulaire qui définit l'expression du positionnement Nord-Sud d'un point sur terre. [17]

#### 1.4.6 Longitude $\lambda$ :

C'est une valeur angulaire qui définit l'expression du positionnement Est-Ouest d'un point sur terre. [17]

#### 1.4.7 Angle horaire :

L'angle horaire du soleil est l'angle formé par le plan méridien du lieu et celui qui passe par la direction du soleil si l'on prend comme origine le méridien de Greenwich, l'angle horaire est compris entre  $0^\circ$  et  $360^\circ$ . La valeur de l'angle horaire est nulle à midi solaire, négative le

matin, positive dans l'après-midi, et augmente de  $15^\circ$  par heure. Il est calculé comme suite [18] [19]:

$$h = 15^\circ (\text{TSV} - 12) \quad (1-9)$$

Avec TSV : temps solaire vrai

#### 1.4.8 Angle d'incidence $\theta_i$ :

L'angle d'incidence est défini par l'angle entre le rayon solaire direct et la normale extérieure de la surface du plan, il est donné par l'équation suivante [18]:

$$\begin{aligned} \cos(\theta_i) = & (\sin(\delta) \times \sin(\varphi) \times \cos(\beta)) - (\sin(\delta) \times \cos(\varphi) \times \sin(\beta) \times \cos(\gamma_s)) + \\ & (\cos(\delta) \times \cos(\varphi) \times \cos(\beta) \times \cos(h)) + (\cos(\delta) \times \sin(\varphi) \times \sin(\beta) \times \cos(\gamma_s) \times \\ & \cos(h)) \end{aligned} \quad (1-10)$$

#### 1.4.9 Déclinaison solaire :

On appelle, déclinaison solaire  $\delta$ , l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre. Cet angle varie au cours des saisons : [19]

La figure 1.11 montre la variation annuelle de la déclinaison solaire : [17]

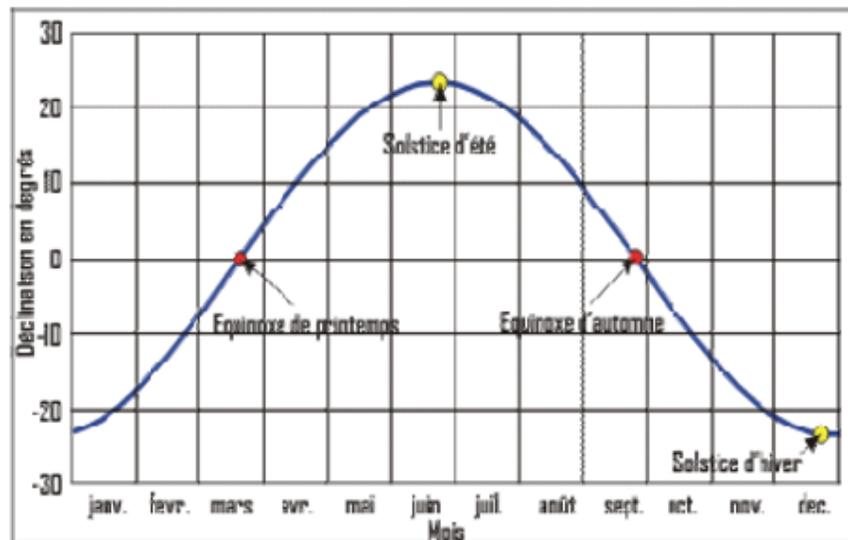


Figure 1.8 : Variation annuelle de déclinaison solaire

Sa valeur peut être calculée par la formule de Cooper (1969): [19]

$$\delta = 23,45 \left( \frac{360}{365} (J + 284) \right) \quad (1-11)$$

Avec :  $J = 0.984j$ ,  $j$  étant le nombre du jour de l'année à partir de janvier.

#### 1.4.10 Durée du jour :

La durée du jour ( $d$ ) est donnée par l'expression suivante : [20]

$$d = \frac{2}{15} \arccos(-\operatorname{tg}\delta \cdot \operatorname{tg}L) \quad (1-12)$$

#### 1.4.11 Fraction d'insolation :

La durée d'insolation est une variable qui présente une grandeur non stationnaire, celle-ci trouve son explication dans la variation de sa moyenne au cours de l'année, à cause de la saisonnalité du processus, elle varie d'un jour à l'autre. L'ensoleillement d'un site est exprimé par la fraction d'insolation ( $\Omega$ ) définie par le rapport : [20]

$$\Omega = \frac{n}{d} \quad (1-13)$$

Où ( $n$ ) est le nombre d'heures ensoleillées ou durées d'insolation, et ( $d$ ) la durée du jour.

- Pour un jour très clair  $\Omega = 1$
- Pour un jour totalement couvert de (nuage)  $\Omega = 0$

### 1.5 Le Rayonnement Solaire :

Le rayonnement est un mode d'échange d'énergie par émission et absorption des radiations électromagnétiques. L'échange thermique par rayonnement se fait suivant trois processus :

- Emission : Il y a conversion de l'énergie fournie à la source en énergie électromagnétique.
- Transmission : La transmission de l'énergie électromagnétique se fait par propagation des ondes avec éventuellement absorption par le milieu traversé.
- Réception : A la réception, il y a conversion du rayonnement électromagnétique incident en énergie thermique (absorption) [21].

Les réactions thermonucléaires produites au cœur du soleil génèrent des rayonnements corpusculaires et électromagnétiques se propageant dans toutes les directions du vide intersidéral

avec une vitesse de 3.108 m/s et couvrant toutes les longueurs d'ondes depuis les rayons X et gamma jusqu'à l'infrarouge lointain. Cependant 99.9% de l'énergie se situe entre 0.2 et 8 $\mu$ m [22].

La répartition de l'énergie solaire dans les bandes du spectre du rayonnement thermique est donnée dans le tableau 1.1 ci-dessous :

Tableau 1.1 : Répartition spectrale du rayonnement thermique [16]

| Longueur d'onde<br>( $\mu$ m)                      | 0 - 0,38 | 0,38 – 0,78 | 0,78 |
|----------------------------------------------------|----------|-------------|------|
| Pourcentage (%)                                    | 6,4      | 48          | 45,6 |
| Densité du flux<br>énergétique (W/m <sup>2</sup> ) | 87       | 656         | 623  |

### 1.5.1 Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire :

Sur la surface terrestre, le rayonnement solaire subit des modifications considérables dues principalement aux phénomènes d'absorption et/ou de diffusion causés par les aérosols (poussière de diverses origines) ainsi que par les molécules d'eau et différents gaz (azote, oxygène, gaz carbonique...etc.) présents dans la couche atmosphère enveloppante [23] [24]

### 1.5.2 Type du rayonnement solaire :

Comme nous l'avons mentionné précédemment, le rayonnement solaire subit d'importantes modifications avant d'arriver à la surface terrestre. Cependant, il y'a trois modes de rayonnement solaire : direct, diffus et global. [25] [26]

- Le rayonnement direct : est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications, il provient du disque solaire seulement à l'exclusion de tout rayonnement diffusé, réfléchi ou réfracté par l'atmosphère.

- Le rayonnement diffus : est la part du rayonnement solaire provenant de toute la voûte céleste, à l'exception du disque solaire, et diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Il n'a pas de direction privilégiée.
- Le rayonnement global : est le rayonnement reçu sur une surface horizontale provenant du soleil et de la totalité de la voûte céleste. Il est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus.

La figure 1.12 illustre les différents composants du rayonnement solaire au niveau du sol.

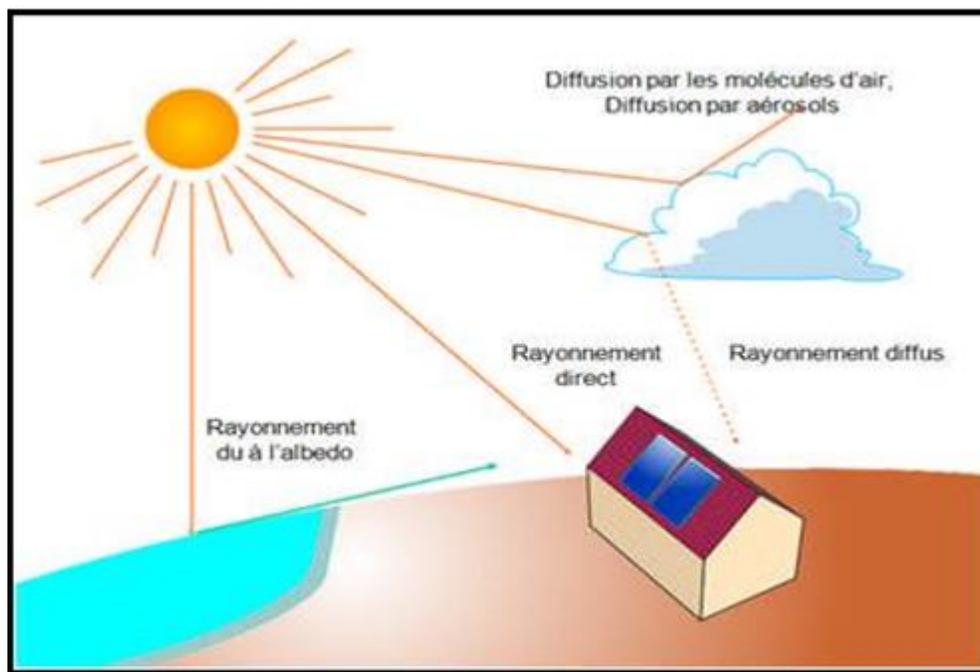


Figure 1.9 : Type de rayonnement solaire

## 1.6 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 des capteurs diffèrent considérablement en qualité, en rendement, en conception et en coût.

### 1.6.1 Capteurs plans :

Les capteurs plans sont utilisés pour des applications à basses et à moyennes températures. De ce type des capteurs on peut citer :

#### 1.6.1.1 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. La figure 1.13 présente la structure d'un capteur plan vitré. [27]

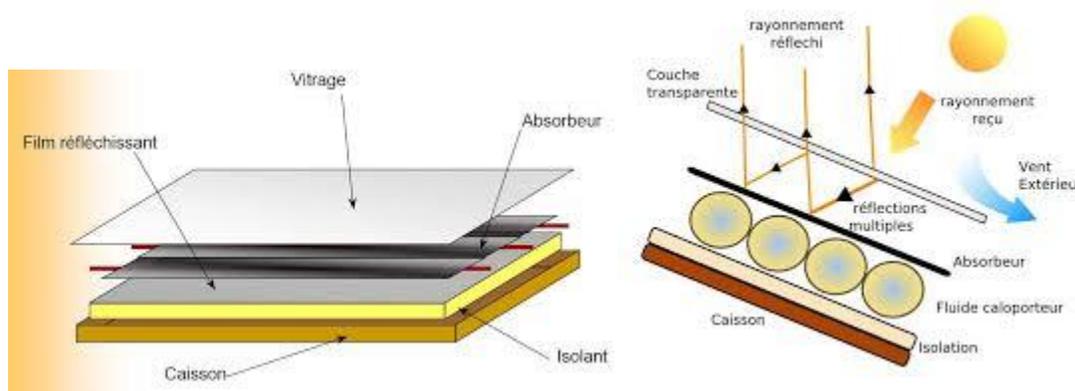


Figure 1.10 : Capteur plan vitré

#### 1.6.1.2 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. [27]



### 1.6.1.3 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. La figure 1.14 illustre le capteur plan à air. [28]

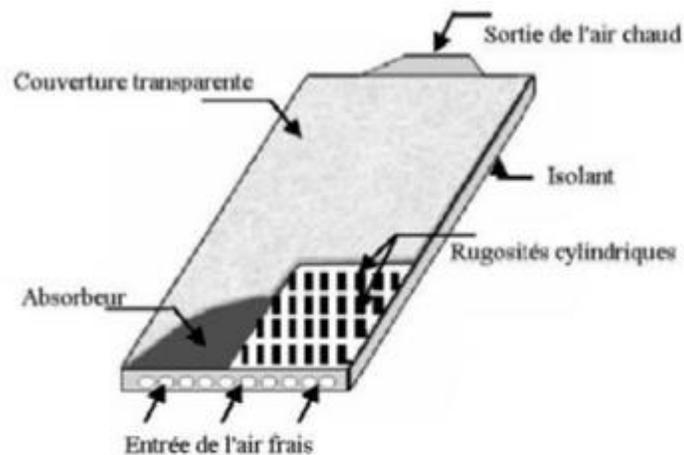


Figure 1.11 : Capteur plan à air

### 1.6.1.4 Capteur sous vide :

Le capteur sous vide est composé d'une série 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 tubes. La Figure 1.12 présente le capteur sous vide. [27]

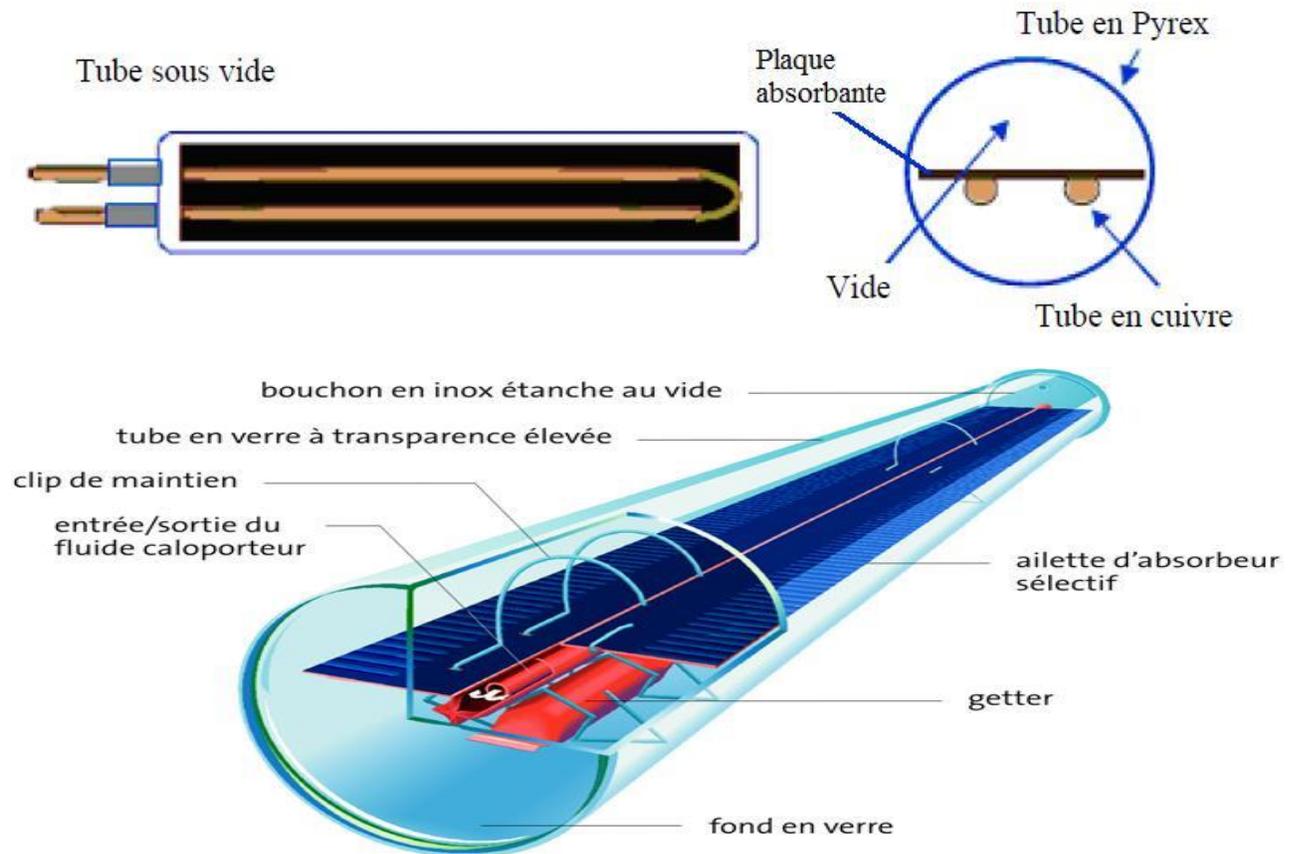


Figure 1.12 : Capteur sous vide

### 1.6.2 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.

### 1.6.2.1 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 figure 1.15 représente le concentrateur cylindro-parabolique. [28]

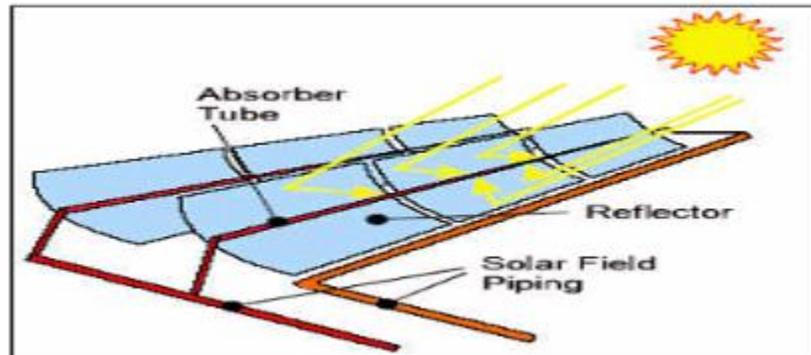


Figure 1.13 : Schéma d'un capteur cylindro-parabolique

### 1.6.2.2 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 figure 1.13 donne le schéma de concentrateur parabolique. [29]

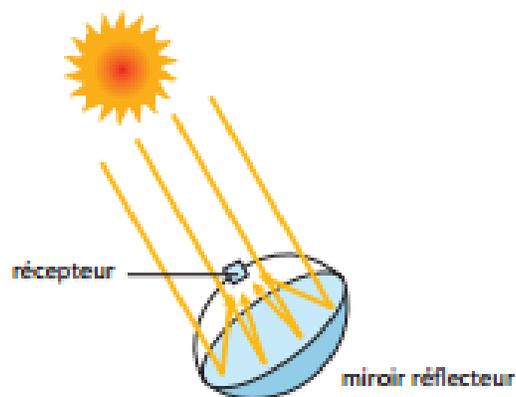


Figure 1.14 : Concentrateur parabolique

### 1.6.2.3 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. [28]

La figure 1.17 présente une centrale à tour [29]

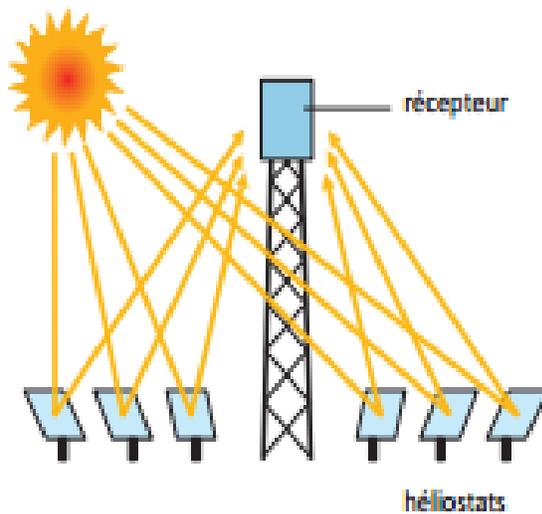


Figure 1.15 : Centrale à tour

## 1.7 Conclusion :

De par ses caractéristiques physiques, le soleil est une immense source d'énergie en plus d'être renouvelable. Dans ce chapitre nous avons vu que l'Algérie a un potentiel solaire énorme, de par sa situation géographique, qu'il faudrait bien exploiter. En effet, cette énergie solaire est récupérée grâce à des capteurs que nous avons aussi étudiés précédemment. Ces derniers diffèrent l'un à l'autre suivant leurs modes d'utilisation et leurs rendements.

Nous allons voir, dans le chapitre qui suit, le type de capteur utilisé dans notre travail en l'occurrence le concentrateur cylindro-parabolique.

## **2 CONCENTRATEUR CYLINDRO- PARABOLIQUE ET STERILISATION SOLAIRE :**

### **2.1 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.

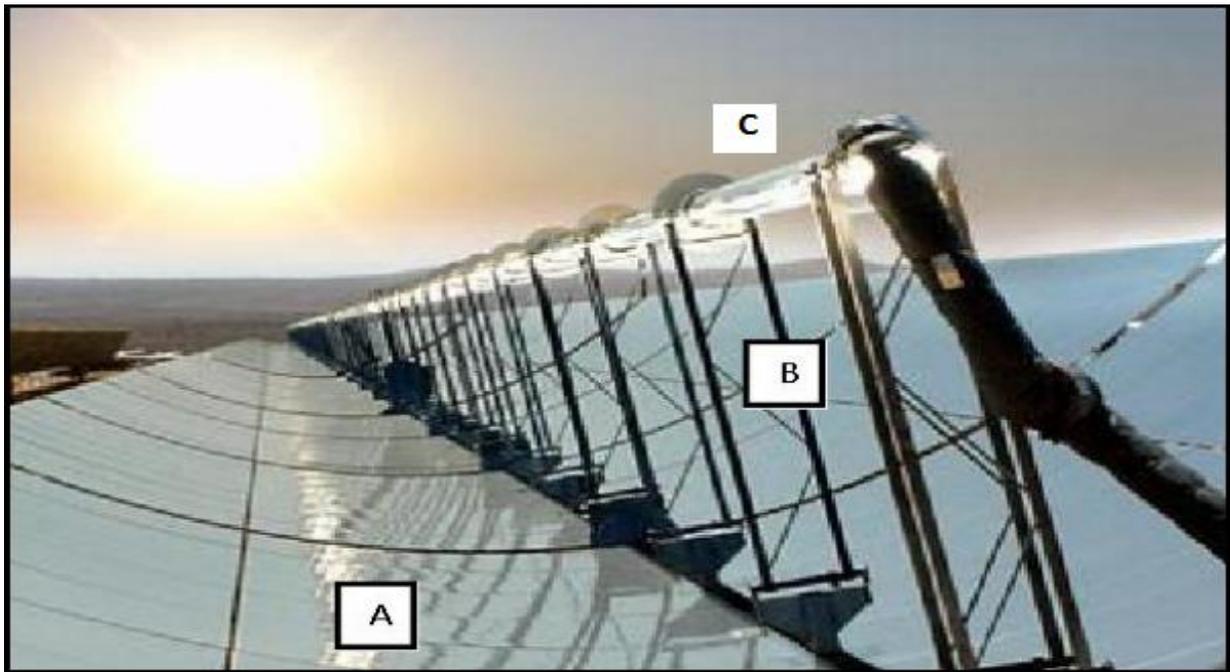
Dans ce chapitre nous allons parler de cette technologie de capteur cylindro-parabolique et aussi sur la stérilisation solaire basée sur cette technologie.

## 2.2 Concentrateur cylindro parabolique CCP :

### 2.2.1 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. [30]

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.



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

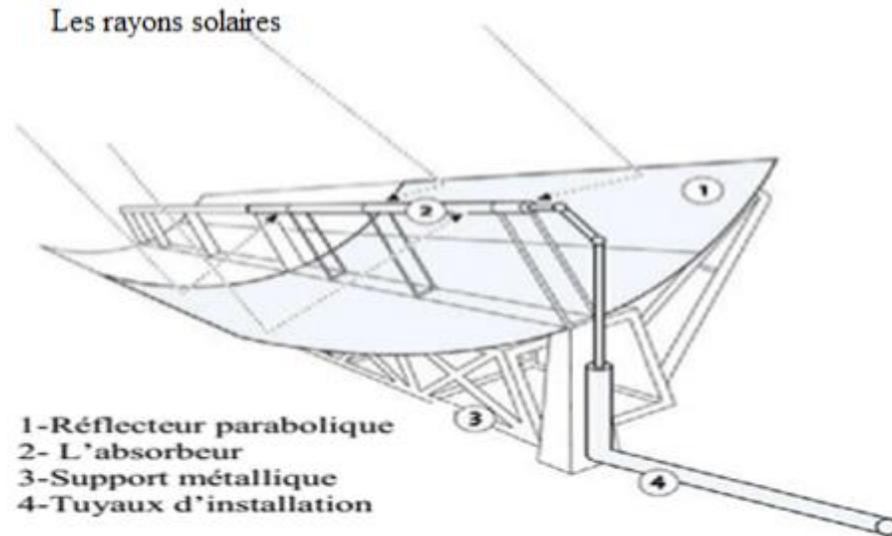


Figure 2.1 : Capteur à concentration cylindro-parabolique [3]

### 2.2.2 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 : [31]

- Poursuite N-S à traction E-W :

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

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

- Poursuite E-W à traction N-S :

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

La figure 2.2 présente deux orientations possibles :

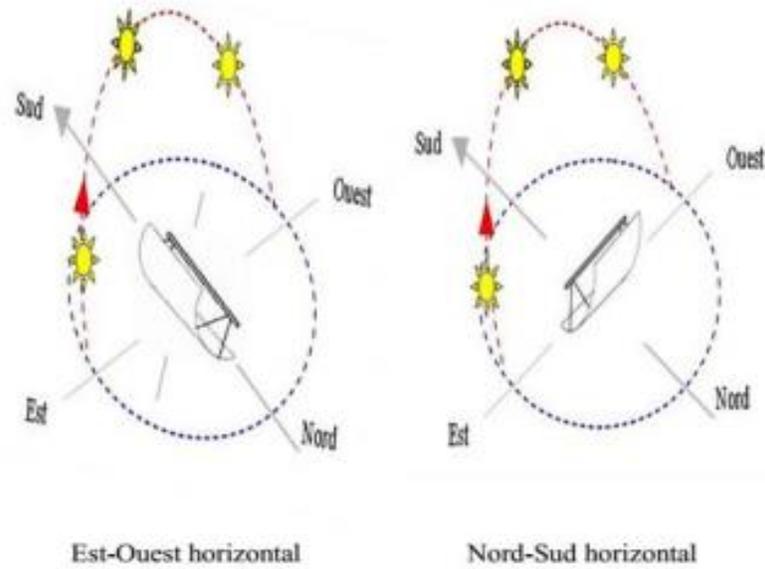


Figure 2.2 : Orientations possibles d'un CCP [3]

### 2.2.3 Les Caractéristiques géométriques du CCP :

La figure 2.3 nous donne les différentes surfaces caractérisant un CCP :

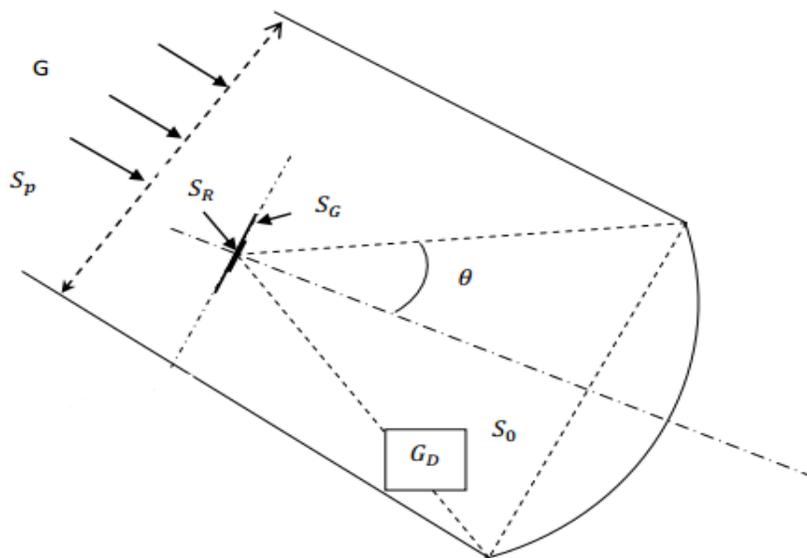


Figure 2.3 : Différentes surfaces caractérisant un CCP

$\Theta$  : Angle d'ouverture du concentrateur ;

$G$  : Eclairement 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,  $S_p$  se confond avec  $S_o$  quand l'axe optique du concentrateur est dirigé vers le soleil ;

$S_G$  : 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 ;

#### 2.2.4 Taux de concentration :

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

$$C = \frac{S_o}{S_r} \quad (2-4)$$

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 :

$$C = \frac{I_o}{I_a} \quad (2-5)$$

Avec :

$S_r$  : 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 ;

La figure 2.4 montre la variation du taux de concentration en fonction de la température de l'absorbeur.

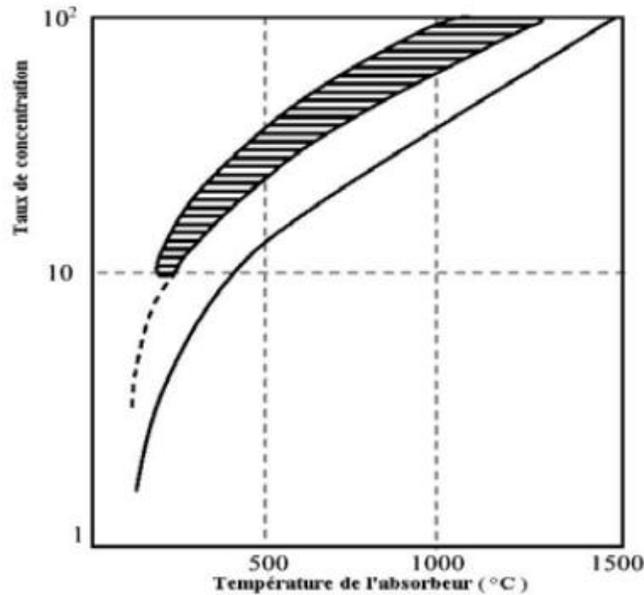


Figure 2.4 : Variation du taux de concentration en fonction de la température de l'absorbeur [31]

## 2.2.5 Les composantes d'un CCP :

### 2.2.5.1 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. [3]

### 2.2.5.2 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. [3]

**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.

### 2.2.5.3 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 2.5 présente la structure de l'absorbeur :

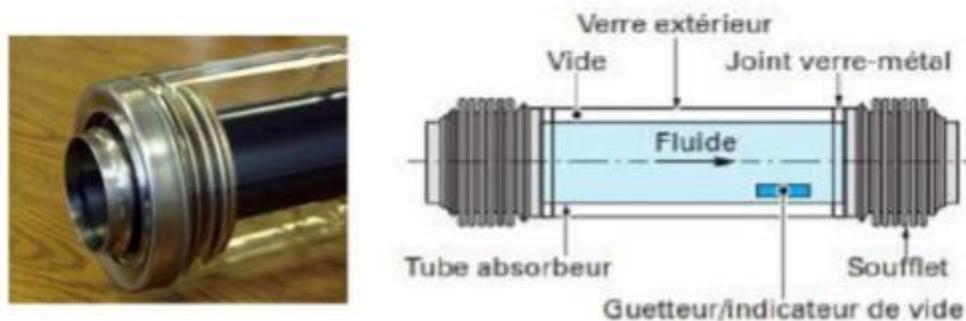


Figure 2.5 : Structure de l'absorbeur

La surface de l'absorbeur doit avoir des caractéristiques suivantes : [3]

- 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.

### 2.2.5.4 La surface sélective : [32]

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 :

- 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 ;

### **2.2.5.5 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: [3]

- 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.

### **2.2.6 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.

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. [33]

Dans notre cas, la chaleur produite par le CCP sera utilisée pour la stérilisation des instruments médicaux. La méthode de stérilisation utilisée doit tenir compte du rendement de capteur utilisé et donc du CCP.

## **2.3 Stérilisation solaire :**

### **2.3.1 Généralités sur la Stérilisation médicale :**

#### **2.3.1.1 Définition :**

La stérilisation est une opération permettant d'éliminer ou de tuer les micro-organismes portés par des milieux inertes contaminés. Selon la norme NF T 72 101, la stérilisation est la mise en œuvre d'un ensemble de méthodes et de moyens visant à éliminer tous les micro-organismes vivants de quelque nature et sous quelque forme que ce soit, portés par un objet parfaitement nettoyé et séché. C'est une opération permettant d'éliminer ou de tuer les micro-organismes portés par des milieux inertes contaminés, le résultat de l'opération, non limité à la durée de l'application, étant l'état de stérilité.

#### **2.3.1.2 Les différentes méthodes de stérilisation :**

Les différentes méthodes de stérilisation peuvent être classées suivant les moyens mis en œuvre et le mode d'action utilisée :

- Les traitements thermiques : à la chaleur sèche, à la vapeur d'eau (autoclave)
- Les traitements dits « à basse température » comme :
  - Le traitement chimique souvent par l'oxyde d'éthylène
  - Le traitement par des rayonnements UV ou par rayonnements ionisants.

- Le traitement par élimination des micro-organismes basé sur la filtration stérilisante. [12]

**NB :** Selon AFNOR, la stérilisation par la méthode de la vapeur d'eau saturée (autoclave) est la méthode de référence, sauf lorsque les conditions physiques régnant au cours des cycles de stérilisation sont susceptibles de compromettre l'intégralité du dispositif médical.

### 2.3.1.3 Paramètres influençant la stérilisation à la vapeur d'eau :

La stérilisation à la vapeur d'eau est l'action de la vapeur d'eau à pression supérieure à la pression atmosphérique. La LOI de REGNAULT nous donne, par le tableau suivant, la relation entre la température et la pression de vapeur d'eau saturée :

**Tableau 2.1 :** Relation entre la température et la pression de vapeur saturée

|                   |       |        |        |        |        |
|-------------------|-------|--------|--------|--------|--------|
| Pression relative | 0     | 1      | 2      | 3      | 4      |
| Température °C    | 99.63 | 120.23 | 133.54 | 143.62 | 151.84 |

N.B : Cette loi est valable uniquement pour la vapeur saturée. Dans le cas d'un mélange air/vapeur d'eau, les pressions partielles s'additionnent.

Selon la norme NF EN 285, la pression résiduelle dans l'autoclave doit être au maximum à 70mbar avant l'admission de la charge à réaliser, concernant la qualité de la vapeur, le taux de vapeur saturée doit être supérieur à 97%.

L'effet bactéricide est proportionnel à la durée du traitement, selon la Norme NF EN 554 les conditions de références sont : 15 minutes à 121°C, il est possible d'adopter d'autres couples de durée et de température si le matériel peut supporter par exemple on peut atteindre 134°C pendant 15 à 30 minutes. [34]

### 2.3.2 Problématique :

La stérilisation et hygiène hospitalière sont indissociables et complémentaires visant la prévention des infections nosocomiales, d'où le mauvais déroulement de la stérilisation des instruments médicaux en médecine et en pratique dentaire est un facteur majeur pour la propagation des maladies.

Actuellement, le procédé de stérilisation médicale le plus utilisé et le plus efficace consiste en un système d'autoclave alimenté par l'énergie électrique, le concept fondamental est d'exposer les microorganismes à une vapeur d'eau saturée et à des températures très élevées, la vapeur d'eau saturée condensée de la phase gazeuse vers la phase liquide va transférer sa chaleur latente aux instruments à stériliser pour détruire les microbes qui se trouvent en surface, tel que le transfert de chaleur est extrêmement rapide et efficace qu'il permet de détruire la grande partie des différents types d'agents infectieux bactériens, viraux ou sous forme de spores.

La stérilisation par vapeur d'eau est le procédé le plus répandu pour la désactivation microbienne, elle permet l'élimination de  $10^4$  de Bacilles (*Bacillus Subtilis* spores) et la mort de  $10^6$  de *Bacillus Stearo-thermophilus* sports. Ces dernières sont considérées comme les plus résistantes à la vapeur d'eau qui représente le niveau le plus haut pour le rendement de la désactivation microbienne, pour assurer la neutralisation irréversible de tous les microorganismes, surtout les endospores qui sont particulièrement stables thermiquement qui peuvent engendrer des maladies affectueuses dangereuses.

Ce procédé est couteux vu la fréquence de stérilisation des établissements sanitaires par jour qui peut atteindre des dizaines de fois voir plus par jour, en plus presque le quart de la population mondiale n'a pas accès à l'électricité, en général un stérilisateur électrique consomme en moyenne 4KW, en conséquence le problème des ressources énergétique dans le domaine de stérilisation médicale dans les zones rurales est liée indirectement à l'état de santé des individus. [35]

Il existe d'autres procédés moins couteux qui consistent à alimenter l'autoclave de stérilisation à partir de l'énergie solaire, ou autre énergie renouvelable, qui permet non seulement de réduire la consommation en énergie mais aussi l'autonomie du système.

### **2.3.3 Le principe du fonctionnement du collecteur cylindro parabolique pour la stérilisation solaire**

Le concentrateur cylindro-parabolique reflète le rayonnement solaire au tube absorbeur recouvert par un tube en verre étanche pour minimiser les pertes thermiques, le tube se situe sur la ligne focale de la parabole, cette dernière dépend des dimensions du concentrateur (le diamètre

d'ouverture de la parabole), la chaleur est transférée ensuite vers le fluide caloporteur, dans notre cas il s'agit de la vapeur d'eau qui circule dans le tube et l'autoclave grâce à une pompe, la chaleur latente de la vapeur d'eau dans l'autoclave permet la stérilisation des instruments à une température d'environ 134 °C. L'autoclave est représenté dans la figure 2.6 par la cuve de stockage qui contient l'échangeur de chaleur.

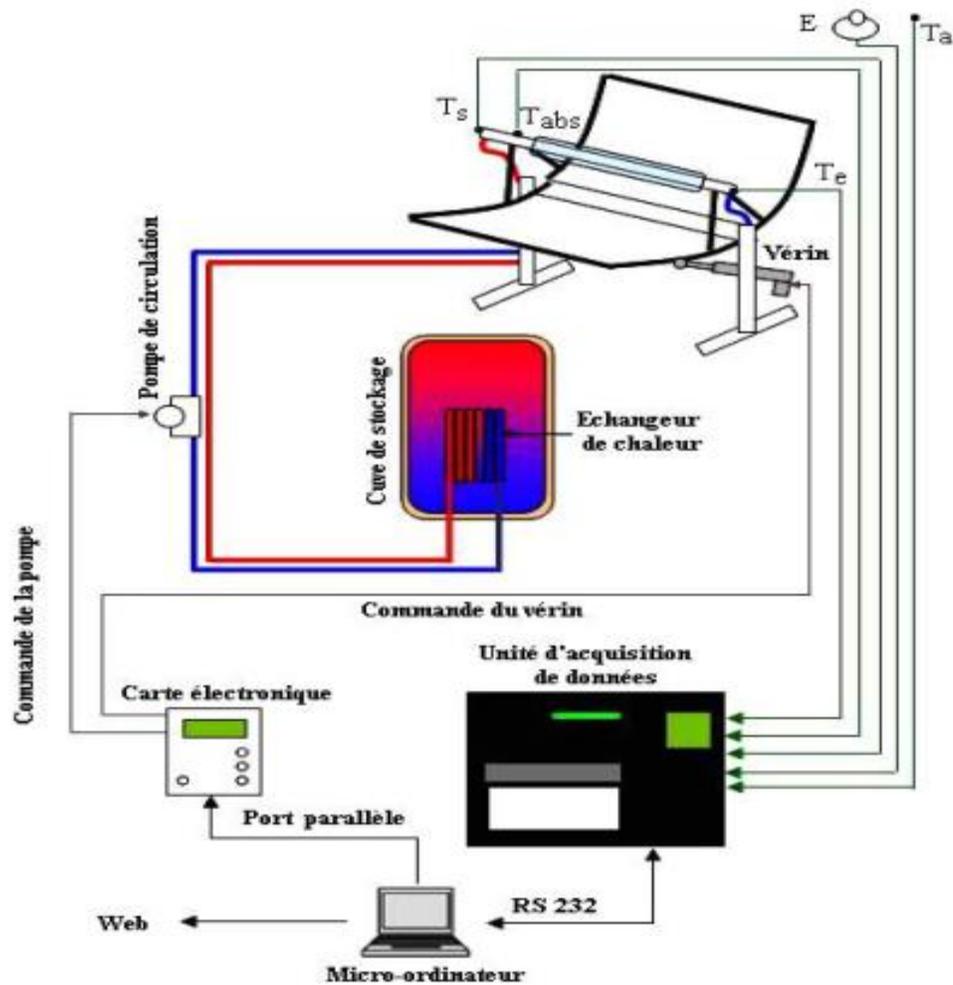


Figure 2.6 : Schéma synoptique du système [31]



Figure 2.7 : Schéma d'un autoclave

## 2.4 Conclusion :

Le concentrateur cylindro-parabolique se distingue des autres capteurs solaires thermiques par sa simplicité et un cout réduit ainsi que se performances dans la production des hautes températures, surtout dans le domaine de la production de l'eau chaude et de la vapeur. C'est cette optique que nous l'avons choisi afin de produire de la vapeur pour la stérilisation des instruments médicaux.

Nous avons vu dans ce chapitre les différentes parties d'un CCP et leurs caractéristiques ainsi que la Stérilisation solaire. Le chapitre qui suit abordera la modélisation mathématique du CCP.

# 3 MODELISATION MATHÉMATIQUE DU CCP :

## 3.1 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 discrétiser pour la permettre la résolution du système.

## 3.2 Modélisation mathématique du CCP :

### 3.2.1 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 3.1 présente la structure du tube absorbeur.

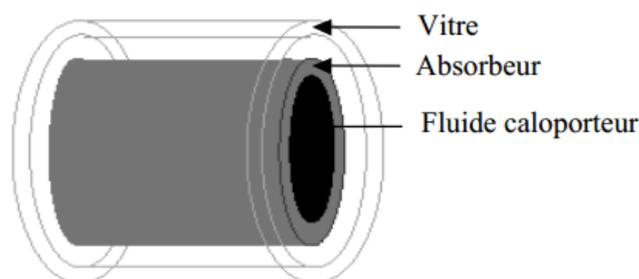


Figure 3.1 : Schéma du tube absorbeur [20]

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 figure 3.2 montre les différents types des échanges thermiques :

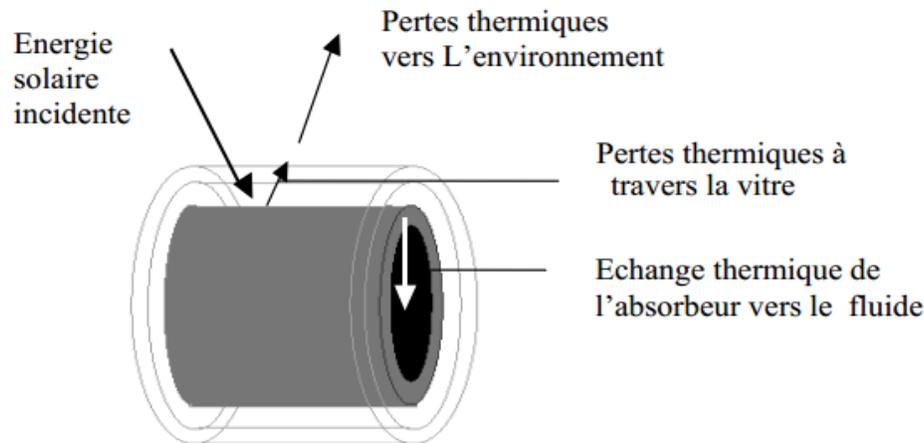


Figure 3.2 : Transferts thermiques entre les différentes parties du CCP [20]

### 3.2.2 Les différents types de transfert de chaleur :

#### 3.2.2.1 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 :

$$Q = -\lambda \cdot S \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3-1)$$

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)

### 3.2.2.2 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 :

$$Q_{cv} = h.S (T_p - T_{\infty}) \quad (3-2)$$

$Q_{cv}$  : 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)

### 3.2.2.3 Le transfert de chaleur par rayonnement :

Le transfert de chaleur par rayonnement à 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 intermédiaire suffisamment transparent pour les ondes électromagnétiques.

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

$$Q_r = \varepsilon . \sigma . S (T_p^4 - T_{\infty}^4) \quad (3-3)$$

$Q_r$  : Flux de chaleur émis par rayonnement (W)

$\varepsilon$  : Emissivité thermique du matériau

$\sigma$  : Constante de Stefan-Boltzmann évaluée à 5,6.10<sup>-8</sup> 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 ( $m^2$ )

### **3.3 Etablissement des équations caractéristiques du problème :**

#### **3.3.1 Bilan Thermique :**

Afin de faire un bilan thermique, des hypothèses simplistes doivent être posées : [30]

- Le fluide caloporteur est incompressible ;
- La forme de parabolite 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) ;

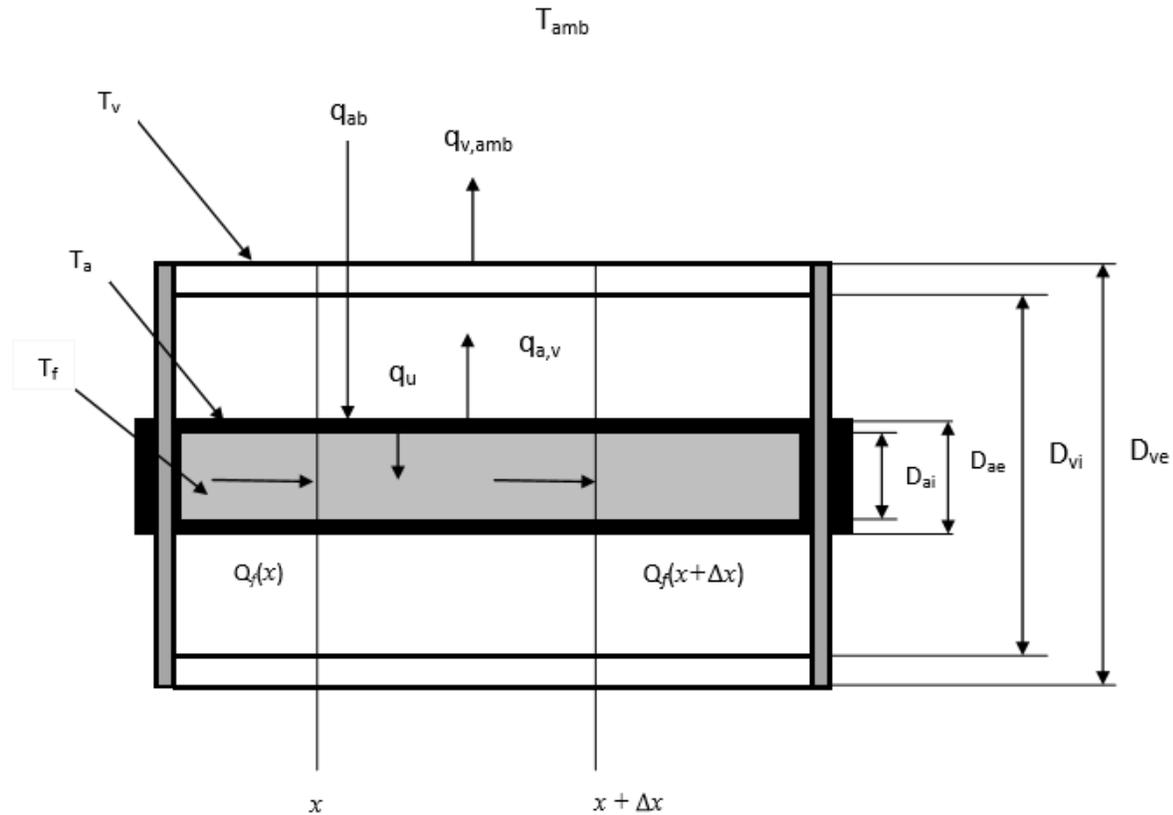


Figure 3.3 : Bilan thermique d'un élément de surface du CCP (coupe axiale) [36]

$q_{ab}$  : 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 ;

$q_{v,amb}$  : 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) ;

### 3.3.1.1 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 :

$$Q_f(x+\Delta x) - Q_f(x) = q_u(x) \cdot \Delta x \quad (3-4)$$

D'où :

$$Q_f(x) = \rho_f C_{p_f} \dot{m}_f T_f(x) \quad (3-5)$$

$$Q_f(x+\Delta x) = \rho_f C_{p_f} \dot{m}_f T_f(x+\Delta x) \quad (3-6)$$

$\rho_f$  : 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 (3-5) et (3-6) dans (3-4), alors on aura :

$$\rho_f C_{p_f} \dot{m}_f T_f(x+\Delta x) - \rho_f C_{p_f} \dot{m}_f T_f(x) = q_u(x) \cdot \Delta x \quad (3-7)$$

$$[\rho_f C_{p_f} \dot{m}_f T_f(x+\Delta x) - \rho_f C_{p_f} \dot{m}_f T_f(x)] / \Delta x = q_u(x) \quad (3-8)$$

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

$$\rho_f C_{p_f} \dot{m}_f \frac{\partial T_f(x)}{\partial x} + q_u(x) = 0 \quad (3-10)$$

### 3.3.1.2 Bilan thermique de l'absorbeur :

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

$$q_u(x) + q_{a,v}(x) = q_{ab} \quad (3-11)$$

### 3.3.1.3 Bilan thermique de la vitre :

Le bilan énergétique pour la vitre est :

$$q_{a,v}(x) - q_{v,amb}(x) = 0 \quad (3-12)$$

$q_{a,v}(x)$  : c'est la quantité de chaleur échangée par convection naturelle entre l'absorbeur et la vitre à 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'air ambiant ;

### 3.3.2 Echanges de chaleur entre les éléments du tube absorbeur :

Des échanges de chaleur se produisent entre les différents éléments du tube absorbeur. La figure suivante illustre ces échanges :

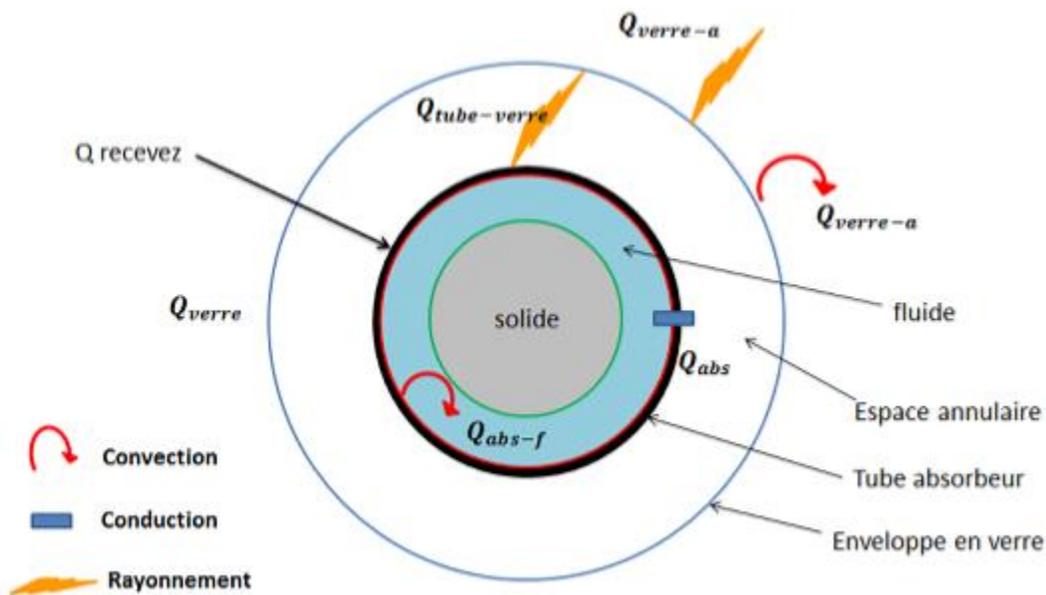


Figure 3.4 : Les différents modes d'échanges de chaleur [3]

### 3.3.2.1 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 : [37]

$$q_u = h_{a,f} \cdot S_{ai} (T_a - T_f) \quad (3-13)$$

tel que :

$$h_{a,f} = \frac{K_f \cdot Nu_{Dai}}{D_{ai}} \quad (3-14)$$

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

$Nu_{Dai}$  : 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 [38]:

$$Nu_{Dai} = 0,023 Re_{Dai}^{4/5} Pr_f^n \quad (3-15)$$

$n = 0,3$  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  $D_{ai}$

$$Re_{Dai} = \frac{4 \cdot \rho_f \dot{m}_f}{\pi D_{ai} \mu_f} \quad (3-16)$$

$Pr_f$  : nombre de Prandtl pour le fluide :

$$Pr_f = \frac{\mu_f C_{p_f}}{K_f} \quad (3-17)$$

$\mu_f$  : la viscosité dynamique du fluide

$K_f$  : la conductivité thermique du fluide

### 3.3.2.2 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 par rayonnement on a donc : [37]

- Une convection naturelle de l'absorbeur vers la vitre qui dépend de la pression annuaire (plus de 0,013Pa) ;
- 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 ;

$$q_{a,v} = q_{a,v/conv} + q_{a,v/ray} \quad (3-18)$$

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 :

$$q_{a,v/con} = \frac{2\pi K_{eff}}{\ln \frac{D_{vi}}{D_{ae}}} (T_a - T_v) \quad (3-19)$$

Pour la détermination de la conductivité effective  $K_{eff}$ , une corrélation a été proposée : [36]

$$K_{eff} = 0,386 \cdot K_{air} \left( \frac{Pr_{air}}{0,861 + Pr_{air}} \right)^{\frac{1}{4}} (Ra_C)^{1/4} \quad (3-20)$$

On a:

$$Ra_C = \frac{[\ln \left( \frac{D_{vi}}{D_{ae}} \right)]^4}{L_c^3 (D_{ae}^{-\frac{1}{5}} + D_{vi}^{-\frac{3}{5}})^5} Ra_L \quad (3-21)$$

D'où :

$$L_c \text{ est la longueur critique donnée par : } L_c = 0.5 (D_{vi} - D_{ae}) \quad (3-22)$$

$Ra_L$  est le nombre de Rayleigh :

$$Ra_L = \frac{g \beta_{air} (T_a - T_v) L_c^3}{\alpha_{air} \vartheta_{air}} \quad (3-23)$$

$\beta_{air}$  : 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 annuaire, telles que  $\beta_{\text{air}}$ ,  $\alpha_{\text{air}}$ ,  $\rho_{\text{air}}$ ,  $K_{\text{air}}$ ,  $C_{p\text{air}}$  et  $Pr_{\text{air}}$  sont en fonction de la température moyenne entre l'absorbeur et la vitre :  $T_m = 0,5(T_a + T_v)$ .

- L'échange par rayonnement est donné par :

$$q_{a,v/\text{ray}} = \frac{\sigma \pi D_{ae} (T_a^4 - T_v^4)}{\frac{1}{\varepsilon_a} + \frac{1 - \varepsilon_v}{\varepsilon_v} \left(\frac{D_{ae}}{D_{vi}}\right)} \quad (3-24)$$

Avec  $\sigma$  : la constante de Stefan Boltzmann,  $\sigma = 5,67.10^{-8} \text{ W/m}^2.\text{K}^4$

$\varepsilon_v$  : est l'émissivité de la vitre,  $\varepsilon_v = 0,935$

$\varepsilon_a$  : 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.

$$\varepsilon_a = f(T) = 0,000327.T_a - 0,065971 \quad (3-25)$$

### 3.3.2.3 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 : [36]

$$q_{v,\text{amb}} = q_{v,\text{amb}/\text{conv}} + q_{v,\text{amb}/\text{ray}} \quad (3-26)$$

- **Echange par convection :**

$$q_{v,\text{amb}/\text{conv}} = h_{v,\text{amb}} S_{ve} (T_v - T_{\text{amb}}) \quad (3-27)$$

Pour calculer le  $h_{v,\text{amb}}$ , des corrélations ont été proposées afin de déterminer le nombre de Nusselt. :

- Pour un vent calme :

A défaut du vent qui souffle, le transfert de chaleur par convection entre le verre et l'environnement se fait par convection naturelle et la corrélation développée par Churchill et Chu est utilisée : [39]

$$Nu_{D_{ve}} = \left[ 0,6 + \frac{0,387 \cdot Ra_{D_{ve}}^{1/6}}{(1 + (0,559 \cdot Pr_{v,amb})^{16})^{8/27}} \right]^2 \quad (3-28)$$

Avec  $Ra_{D_{ve}}$  : le nombre de Rayleigh pour le diamètre  $D_{ve}$

$$Ra_{D_{ve}} = \frac{g\beta(T_v - T_{amb})D_{ve}^3}{\nu_{airamb}^2} \cdot Pr_{airamb} \quad (3-29)$$

On a:

$$\beta = \frac{1}{0,5(T_v + T_{amb})} \quad (3-30)$$

$Pr_{v,amb}$  : nombre du Prandtl pour l'air annulaire entre la vitre et le milieu ambiant

$Pr_{airamb}$  : nombre de Prandtl pour l'air ambiant

$K_{airamb}$  : la conductivité de l'air estimé à la température moyenne entre la vitre et l'air ambiant.

➤ Pour un vent de surface :

Quand le vent souffle, le transfert de chaleur entre l'enveloppe en verre et l'environnement se fait par convection forcée. Alors le nombre de Nusselt est estimé par la corrélation de Zhukauskas : [40]

$$Nu_{D_{ve}} = C \cdot Re_{D_{ve}}^m \cdot Pr_{amb}^n \left( \frac{Pr_{amb}}{Pr_{ve}} \right)^{1/4} \quad (3-31)$$

$Pr_{amb}$  : nombre de Prandtl évalué à la température ambiante ;

$Pr_{ve}$  : nombre de Prandtl évalué à la température de la surface extérieure de la vitre ;

$$0,7 \leq Pr_{amb} \leq 500$$

$$1 \leq Re_{D_{ve}} \leq 10^6$$

$$n = 0,37 \text{ pour } Pr \leq 10$$

$$n = 0,36 \text{ pour } Pr > 10$$

Tableau3.1 : Les valeurs de C et m pour une valeur de  $Re_{D_{ve}}$

| Re <sub>D</sub>  | C     | m   |
|------------------|-------|-----|
| 1 – 40           | 0,75  | 0,4 |
| 40 – 1000        | 0,51  | 0,5 |
| 1000 – 200000    | 0,26  | 0,6 |
| 200000 - 1000000 | 0,076 | 0,7 |

Une autre corrélation peut être utilisée dans notre cas (écoulement convective autour d'un cylindre). Churchill et Bernstein nous proposent : [37] [40]

$$\text{Nu} = 0,3 + \frac{0,62 \text{Re}^{1/2} \text{Pr}^{1/3}}{[1 + (\frac{0,4}{\text{Pr}})^{2/3}]^{1/4}} \cdot [1 + (\frac{\text{Re}}{282})^{5/8}]^{4/5} \quad (3-32)$$

- **Echange par rayonnement :**

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

$$q_{v, \text{amb}/\text{ray}} = \varepsilon_v \cdot \sigma \cdot S_{ve} (T_v^4 - T_{\text{amb}}^4) \quad (3-33)$$

**3.3.2.4 Energie solaire globale absorbée :**

L'énergie solaire globale absorbée est donnée par la relation : [36]

$$q_{\text{ab}} = \varphi_{\text{select}} \alpha_{\text{ab}} \tau_v S_e G \quad (3-34)$$

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

$\alpha_{\text{ab}}$  : 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 (W/m<sup>2</sup>)

### 3.3.2.5 Rendement thermique du CCP :

Le rendement thermique du CCP est défini par : [36]

$$\eta = \frac{\int_0^t q_u dt}{\int_0^t GS_e dt} \quad (3-35)$$

Pour un régime permanent, on aura :

$$\int_0^t q_u dt = q_u = \dot{m}_f C_{p,f} (T_{f,s} - T_{f,e}) \quad (3-36)$$

$$\int_0^t GS_e dt = GS_e \quad (3-37)$$

Alors :

$$\eta = \frac{\dot{m}_f C_{p,f} (T_{f,s} - T_{f,e})}{GS_e} \quad (3-38)$$

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

### 3.3.2.6 Les pertes thermiques :

Pour la détermination des pertes thermiques, Mullick nous propose une formule semi-empirique dans le calcul du coefficient global des pertes thermiques au niveau du tube absorbeur et de l'enveloppe transparente et qui donne des résultats remarquables et satisfaisantes avec une erreur de 1% par rapport à la méthode numérique pour une gamme de température de l'absorbeur de 380 à 580K avec une émittance de l'absorbeur de 0,1 à 0,95. Il est exprimé par : [14]

$$U_L = \left[ \frac{1}{C \left[ \frac{T_a - T_v}{1+f} \right]^{0,25}} + \frac{D_{ai}}{D_{ae} \cdot h_v} \right]^{-1} + \left[ \frac{\sigma (T_a^2 + T_{amb}^2) (T_a + T_{amb})}{\left[ \varepsilon_a - 0,04(1 - \varepsilon_a) \left( \frac{T_a}{450} \right) \right]^{-1} - \left( \frac{D_{ai}}{D_{ae}} \right) \left( \frac{1}{\varepsilon_v} - 1 \right) + \frac{f}{\varepsilon_v}} \right] \quad (3-39)$$

Avec :

- C : est une constante donnée par la relation :

$$C = \frac{1,45+0,96(\varepsilon_a-0,5)^2}{D_{ai} \left( \frac{1}{D_{ai}^{0,6}} + D_{ai}^{0,6} \right)^{1,25}} \quad (3-40)$$

- $f$  : est un facteur qui prend en considération la vitesse du vent à l'extérieur, il est donné par la relation :

$$f = \frac{D_{ai}}{D_{ai}^{1,4}} (0,61 + 1,3\varepsilon_a) h_{vent}^{-0,9} \cdot e^{[0,00325(T_a-273)]} \quad (3-41)$$

- $h_{vent}$  : est le coefficient de convection du vent évalué par :

$$h_{vent} = 4 \cdot V_{vent}^{0,58} \cdot D_{ae}^{-0,42} \quad (3-42)$$

Avec  $V_{vent}$  : vitesse du vent

Une autre relation semi-empirique a été proposée : [14]

$$U_L = \left[ \frac{1}{C(T_a - T_v)^{0,25} + \frac{\sigma(T_a^2 - T_{amb}^2)(T_a + T_{amb})}{\frac{1}{\varepsilon_a} - \left(\frac{D_{ai}}{D_{ae}}\right)\left(\frac{1}{\varepsilon_v} - 1\right)}} + \left(\frac{D_{ai}}{D_{ae}}\right) \frac{1}{h_{vent} + \sigma\varepsilon_v(T_a^2 + T_{amb}^2)(T_a + T_{amb})} + \left(\frac{D_{ai}}{D_{ae}}\right) \frac{e_v}{K_v} \right]^{-1} \quad (3-43)$$

Avec :

$$C = \frac{17,74}{(T_a + T_v)^{0,4} \cdot D_{ai} (D_{ai}^{-0,75} + D_{ae}^{-0,75})} \quad (3-44)$$

$e_v$  : épaisseur de l'enveloppe transparente

$K_v$  : conductivité du verre

### 3.4 Résolution numérique :

La résolution numérique nous permet de déterminer les températures de fluide, de l'absorbeur et celle de la vitre. En effet, pour résoudre ce type de problème régi par des équations du bilan thermique non linéaires, on doit faire recours à la discrétisation des différences finies. Ainsi, nous aboutissons d'un système non linéaire à un système linéaire qui, grâce au approche concernant

les termes du rayonnement de l'absorbeur vers la vitre et la vitre vers le milieu extérieur, nous permet d'avoir un système linéaire des trois équations à trois inconnus :  $T_f$ ,  $T_a$ ,  $T_v$ .

### 3.4.1 Discrétisation des Equations :

#### 3.4.1.1 Equation caractéristique du fluide :

Elle est donnée par :

$$\rho_f C p_f \dot{m}_f T_{f,j-1} - \rho_f C p_f \dot{m}_f T_{f,j} + h_{af} S_{ai} T_{a,j} \Delta x - h_{af} S_{ai} T_{f,j} \Delta x = 0 \quad (3-45)$$

Avec la condition aux limites :  $T_{f,0} = T_e$

#### 3.4.1.2 Equation caractéristique de l'absorbeur :

Elle est donnée par :

$$\begin{aligned} \varphi_{select} \alpha_{ab} \tau_v S_{ae} G = h_{af} S_{ai} (T_{a,j} - T_{f,j}) + \frac{2\pi K_{eff}}{\ln\left(\frac{D_{vi}}{D_{ve}}\right)} (T_{a,j} - T_{v,j}) + \\ \frac{\sigma S_{ai} (T_{a,j-1}^2 + T_{v,j-1}^2) (T_{a,j-1} + T_{v,j-1}) (T_{a,j} - T_{v,j})}{\frac{1}{\varepsilon_a} + \frac{1-\varepsilon_v}{\varepsilon_v} \left(\frac{D_{ae}}{D_{vi}}\right)} \end{aligned} \quad (3-46)$$

Avec la condition aux limites :  $T_{a,0} = T_{a,e}$

**NB :** On simplifie le terme  $(T_{a,j-1}^4 - T_{v,j-1}^4)$  par  $(T_{a,j-1}^2 + T_{v,j-1}^2)(T_{a,j-1} + T_{v,j-1})(T_{a,j} - T_{v,j})$

On remplace le terme  $(T_{a,j}^2 + T_{v,j}^2)(T_{a,j} + T_{v,j})$  par le terme  $(T_{a,j-1}^2 + T_{v,j-1}^2)(T_{a,j-1} + T_{v,j-1})$  pour rendre le système linéaire.

#### 3.4.1.3 Equation caractéristique de la vitre :

Elle est donnée par :

$$\begin{aligned} \frac{2\pi K_{eff}}{\ln\left(\frac{D_{vi}}{D_{ve}}\right)} (T_{a,j} - T_{v,j}) + \frac{\sigma S_{ai} (T_{a,j-1}^2 + T_{v,j-1}^2) (T_{a,j-1} + T_{v,j-1}) (T_{a,j} - T_{v,j})}{\frac{1}{\varepsilon_a} + \frac{1-\varepsilon_v}{\varepsilon_v} \left(\frac{D_{ae}}{D_{vi}}\right)} - h_{vent} S_{ve} (T_{v,j} - T_{amb}) - \\ [\varepsilon_v \sigma S_{ve} (T_{v,j-1}^2 + T_{amb}^2) \times (T_{v,j-1} + T_{amb})(T_{v,j} - T_{amb})] = 0 \end{aligned} \quad (3-47)$$

Avec la condition aux limites :  $T_{v,e} = T_{v,e} = T_{amb}$

### 3.4.2 Le système sous forme matricielle :

Après la discrétisation des équations caractéristiques du problème, le système peut être mis sous forme d'un système matriciel de trois équations. Cette approche nous permettra de résoudre le problème en utilisant l'une des méthodes de résolution du système d'équations comme celle de Gauss, Cholesky ou Gauss Seidel.

$$[A] [T] = [B] \iff \begin{cases} a_{11}T_{f,j} + a_{12}T_{a,j} + a_{13}T_{v,j} = b_1 \\ a_{21}T_{f,j} + a_{22}T_{a,j} + a_{23}T_{v,j} = b_2 \\ a_{31}T_{f,j} + a_{32}T_{a,j} + a_{33}T_{v,j} = b_3 \end{cases}$$

Les coefficients  $a_{ij}$  sont sous la forme :

$$a_{11} = -\rho_f C_{p,f} \dot{m}_f - h_{a,f} S_{ai} \Delta x$$

$$a_{12} = h_{a,f} S_{ai} \Delta x$$

$$a_{13} = 0$$

$$a_{21} = -h_{a,f} S_{ai}$$

$$a_{22} = \frac{2\pi K_{eff}}{\ln\left(\frac{D_{vi}}{D_{ve}}\right)} + \sigma S_{ae} [(T_{a,j-1}^2 + T_{v,j-1}^2)(T_{a,j-1} + T_{v,j-1}) \cdot \epsilon_{TOT} + h_{a,f} S_{ai}]$$

$$\epsilon_{TOT} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_a} + \frac{1-\epsilon_v}{\epsilon_v} \left(\frac{D_{ae}}{D_{vi}}\right)}$$

$$a_{23} = -\frac{2\pi K_{eff}}{\ln\left(\frac{D_{vi}}{D_{ve}}\right)} - \sigma S_{ae} [(T_{a,j-1}^2 + T_{v,j-1}^2)(T_{a,j-1} + T_{v,j-1}) \cdot \epsilon_{TOT}]$$

$$a_{31} = 0$$

$$a_{32} = \frac{2\pi K_{eff}}{\ln\left(\frac{D_{vi}}{D_{ve}}\right)} + \sigma S_{ae} [(T_{a,j-1}^2 + T_{v,j-1}^2)(T_{a,j-1} + T_{v,j-1}) \cdot \epsilon_{TOT}]$$

$$a_{33} = -\frac{2\pi K_{\text{eff}}}{\ln\left(\frac{D_{vi}}{D_{ve}}\right)} - \sigma S_{\text{ae}}[(T_{a,j-1}^2 + T_{v,j-1}^2)(T_{a,j-1} + T_{v,j-1}) \cdot \varepsilon_{\text{TOT}} - h_{\text{vent}} S_{\text{ve}} - \varepsilon_v \sigma S_{\text{ve}}(T_{v,j-1}^2 + T_{\text{amb}}^2)(T_{v,j-1} + T_{\text{amb}})]$$

$$b_1 = -\rho_f C_{p,f} \dot{m}_f T_{f,j-1}$$

$$b_2 = \varphi_{\text{select}} \alpha_{\text{ab}} \tau_v S_{\text{ae}} G$$

$$b_3 = -h_{\text{vent}} S_{\text{ve}} T_{\text{amb}} - \varepsilon_v \sigma S_{\text{ve}}(T_{v,j-1}^2 + T_{\text{amb}}^2)(T_{v,j-1} + T_{\text{amb}})$$

### 3.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons abordé principalement les différentes équations de transferts thermiques qui régissent le CCP. Ainsi, une discrétisation de ces équations a été faite et qui nous a permis d'avoir un système d'équation sous forme matricielle. Ainsi, le système sera résolu par l'une des méthodes de résolution du système d'équations à l'aide du logiciel Matlab.

Les résultats sont présentés dans le chapitre qui suit.

## 4 RESULTATS ET DISCUSSIONS :

### 4.1 Méthode de résolution :

La discrétisation et la remise des équations caractérisant le problème sous forme d'un système matriciel nous permet de résoudre le problème avec l'une des méthodes de résolution de trois systèmes d'équations. Dans notre cas la résolution de ce système d'équation a été effectuée avec le logiciel Matlab en utilisant la méthode de Gauss Seidel.

#### 4.1.1 Les données du problème :

##### 4.1.1.1 Les caractéristiques géométriques :

Les caractéristiques géométriques du collecteur utilisé sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 4.1 : Les caractéristiques géométriques du collecteur utilisé

| Caractéristiques géométriques     | valeur  |
|-----------------------------------|---------|
| Diamètre intérieur de l'absorbeur | 0,022 m |
| Diamètre extérieur de l'absorbeur | 0,025 m |
| Diamètre intérieur de la vitre    | 0,033 m |
| Diamètre extérieur de la vitre    | 0,035 m |
| Largeur du collecteur             | 1.5 m   |
| Longueur du collecteur            | 2 m     |
| Nombre du collecteur              | 1       |

##### 4.1.1.2 Les paramètres optiques

Les paramètres optiques des matériaux utilisés sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau4.2 : Les paramètres optiques des matériaux utilisés

| Les paramètres optiques                | valeur |
|----------------------------------------|--------|
| Coefficient de réflexion $\rho_{sel}$  | 0,85   |
| Coefficient d'absorption $\alpha$      | 0,9    |
| Transmissivité de la vitre $\tau$      | 0,85   |
| Emissivité de la vitre $\epsilon_v$    | 0,88   |
| Emissivité de l'absorbeur $\epsilon_a$ | 0,15   |

#### 4.1.2 Description du programme :

Le programme utilisé pour la résolution de ce système est en un seul bloc :

- a) Introduction des propriétés thermo-physiques, géométriques et optiques ;
- b) Détermination des nombres adimensionnels ;
- c) Calcul des coefficients d'échanges thermiques de tous les modes de transfert :
  - Coefficient de convection du fluide et de l'absorbeur ;
  - Conductivité effective de l'air dans l'espace annulaire à travers une formule empirique ;
  - Coefficient de convection entre l'enveloppe et l'air ambiant ;
- d) Détermination de la matrice du problème ;
- e) Résolution du système d'équation par le code de programmation de la méthode de Gauss Seidel ;

#### 4.2 Résultats et discussions :

La résolution du système d'équation par la méthode de Gauss Seidel sous Matlab nous donne les résultats suivants :

- La température du fluide :  $T_f = 431,0398 \text{ K}$  ; soit  $T_f = 157,8898 \text{ °C}$
- La température du tube absorbeur :  $T_a = 304,2725 \text{ K}$  ;  $T_a = 31,1225 \text{ °C}$
- La température de la vitre :  $T_v = 305,5587 \text{ K}$  ; soit  $T_v = 32,4087 \text{ °C}$

Nous avons procédé à des simulations de la température du fluide caloporteur en fonction du diamètre de l'absorbeur, de la masse volumique, de la vitesse du vent et en fonction du débit.

#### 4.2.1 Influence du diamètre interne de l'absorbeur $D_{ai}$ sur la température du fluide :

Nous avons simulé la variation de la température du fluide en fonction du diamètre de l'absorbeur, le résultat est donné par la figure 4.1 :

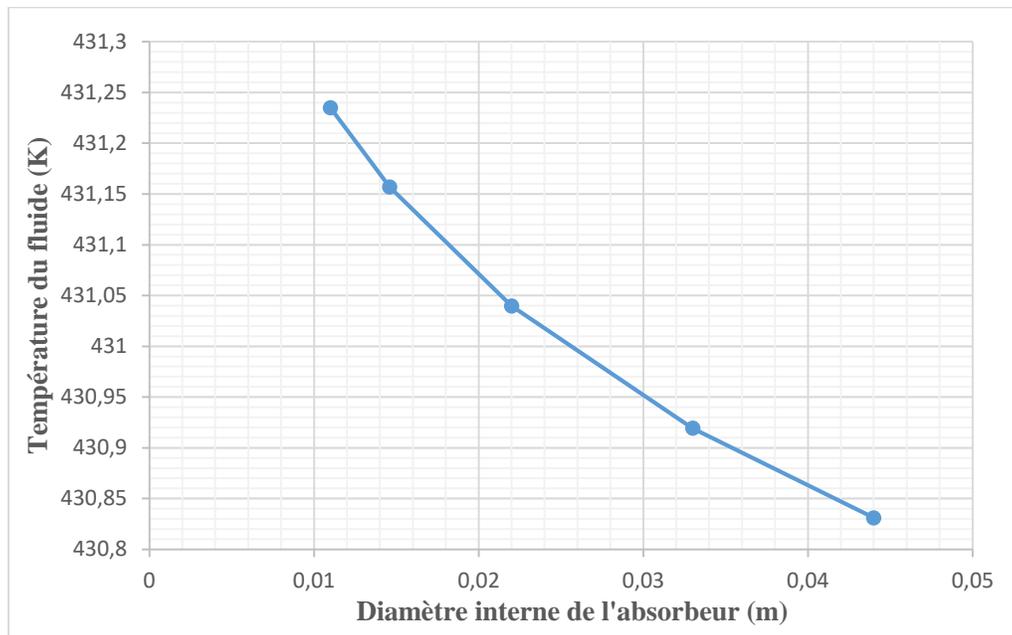


Figure 4.1 : Influence du diamètre interne de l'absorbeur sur la Température du fluide

En analysant la figure 4.1, on remarque une diminution de la température du fluide en fonction du diamètre interne de l'absorbeur. Donc plus le diamètre de l'absorbeur est grand plus la température diminue.

Cela s'explique par le fait que quand le diamètre augmente la pression qui règne autour l'intérieur du tube absorbeur va diminuer. Or la température est fonction de la pression, par conséquent, si la pression diminue la température va diminuer aussi.

#### 4.2.2 Effet de la masse volumique du fluide sur la température du fluide :

Nous avons simulé la variation de la température du fluide en fonction de la masse volumique du fluide, le résultat est donné par la figure 4.2 :

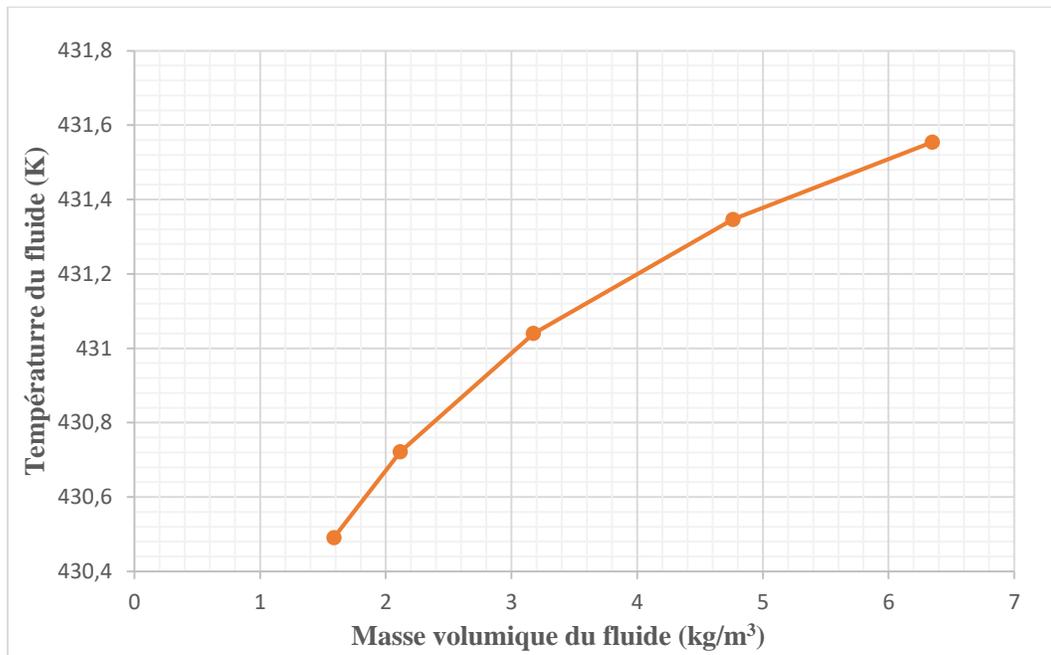


Figure 4.2 : Variation des températures  $T_f$  en fonction de la masse volumique du fluide

D'après la figure 4.2, on remarque une augmentation de la température du fluide en fonction de la masse volumique du fluide. Donc plus la masse volumique augmente plus la température augmente.

On peut déduire que si on change le fluide caloporteur avec un autre qui a une masse volumique plus élevée que celle du fluide précédent, on aura de température élevée, donc un très bon rendement.

#### 4.2.3 Influence de la vitesse du vent sur la température du fluide :

La simulation de la variation de température du fluide en fonction de la vitesse du vent nous donne comme résultat la figure 4.3 :

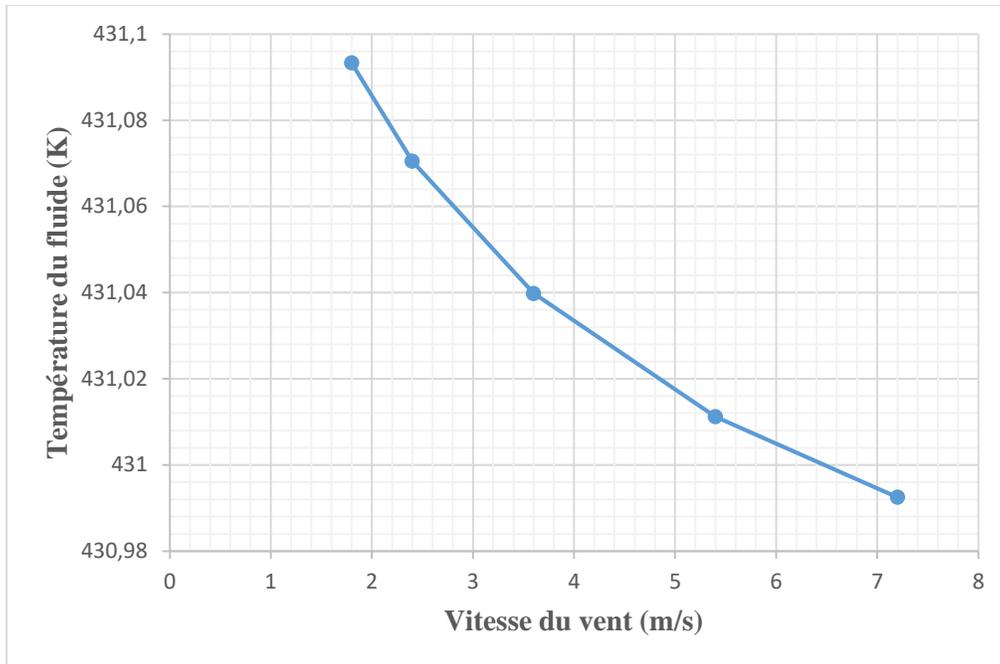


Figure 4.3 : Influence de la vitesse du vent sur la température du fluide

De la figure 4.3, on constate une légère diminution de la température du fluide en fonction de la vitesse du vent, l'augmentation de la vitesse du vent influe sur la température du fluide.

Cela est dû principalement à l'augmentation des pertes thermiques au niveau de la vitre par le vent. Donc plus la vitesse du vent est importante, plus les pertes thermiques sont importantes et plus le rendement sera réduit.

#### 4.2.4 Effet du débit de fluide sur la température du fluide :

La simulation de la variation de la température du fluide en fonction du débit de fluide nous donne comme résultat la figure 4.4 :

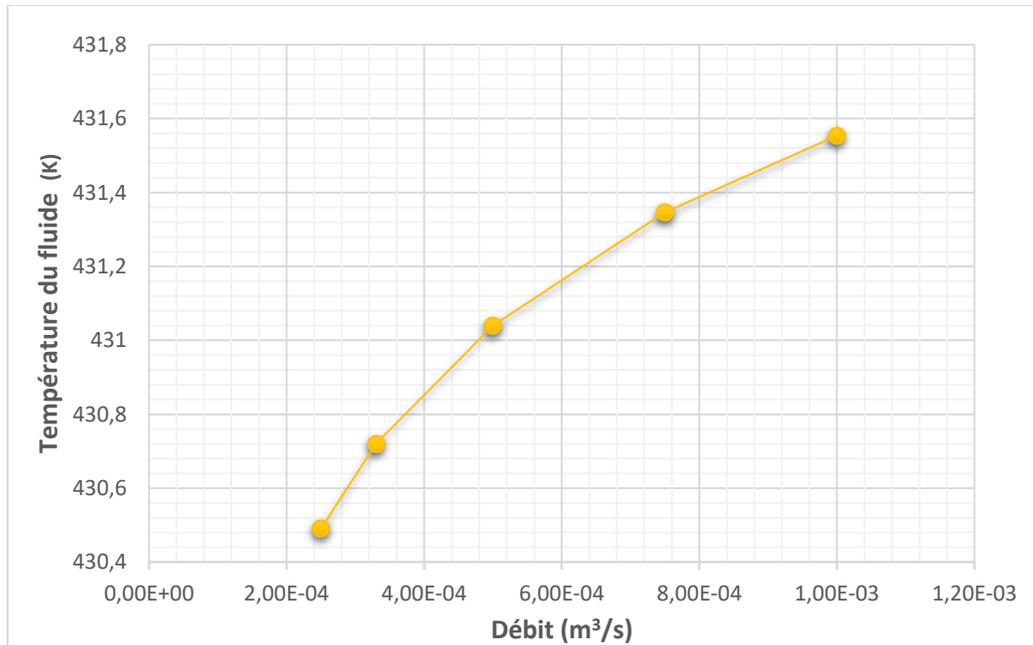


Figure 4.4 : Effet du débit de fluide sur la température du fluide

La figure 4.4 montre une légère augmentation de la température du fluide en fonction du débit du fluide caloporteur. On peut en déduire quand le débit du fluide caloporteur augmente, la quantité d'énergie emportée par le fluide sera importante, donc logiquement la température va aussi augmenter.

#### 4.2.5 Variation du rendement en fonction de l'irradiation globale $G$ :

Dans le tableau 4.3, on présente la variation du rendement en fonction de l'irradiation globale reçue.

Tableau 4.3 : Variation du rendement en fonction de l'irradiation globale

| $G$ (W/m <sup>2</sup> ) | 400    | 533,33 | 800    | 1200   | 1600   |
|-------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $\eta$                  | 0,5185 | 0,5515 | 0,5844 | 0,6063 | 0,6173 |

La figure 4.5 montre l'effet d'irradiation globale sur le rendement :

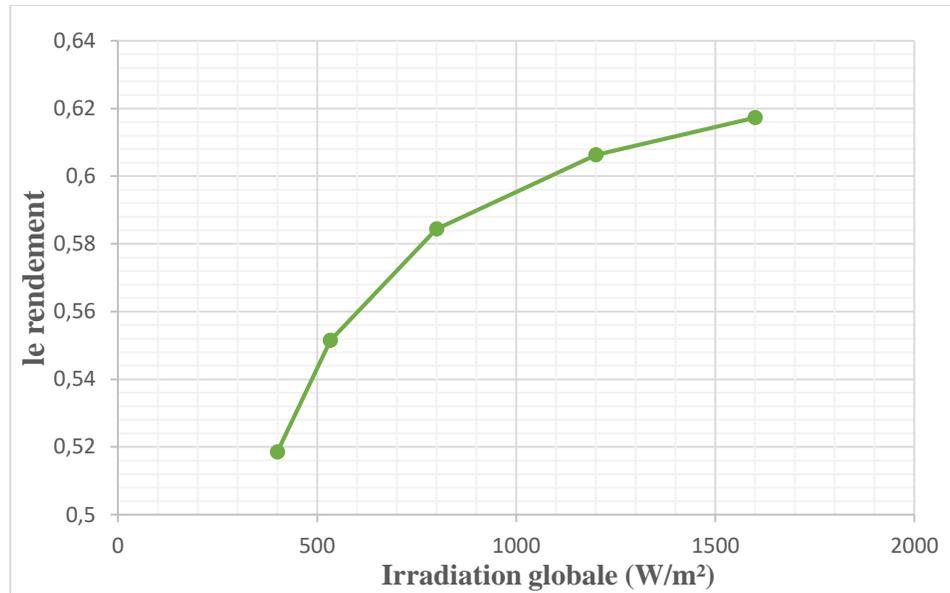


Figure 4.5 : Effet d'irradiation globale sur le rendement

De ma la figure 4.5, on constate que plus l'irradiation globale augment plus le rendement augmente aussi. Donc on peut déduire que le rendement est ainsi fonction de l'irradiation globale, plus l'environnement reçoit de l'énergie plus le rendement est important.

#### 4.2.6 Influence de la vitesse du vent sur le coefficient des pertes thermiques :

La variation des pertes thermiques en fonction de de la vitesse du vent a été présentée dans le tableau 4.4 :

Tableau4.4 : La variation du coefficient des pertes thermiques en fonction de de la vitesse du vent

| <b>Vv (m/s)</b> | 1,8     | 2,4     | 3,6     | 5,4     | 7,2     |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <b>UL</b>       | 31,3350 | 36,6471 | 45,8009 | 57,3397 | 67,2897 |

La figure 4.6 montre l'influence de la vitesse du vent sur le coefficient des pertes thermiques :

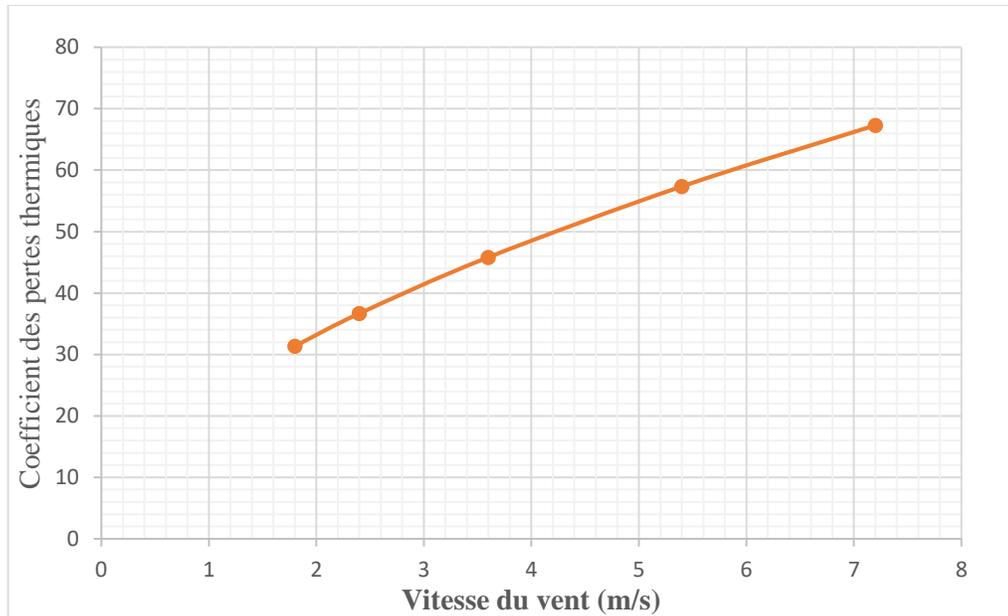


Figure 4.6 : Influence de la vitesse du vent sur le coefficient des pertes thermiques

On remarque que le coefficient des pertes thermiques croît avec la vitesse du vent. Donc plus le vent souffle plus les pertes thermiques sont importantes. La courbe est une droite, alors on peut déduire que les pertes thermiques sont proportionnelles à la vitesse du vent.

#### 4.2.7 Effet de l'émissivité de l'absorbeur sur le coefficient des pertes thermiques :

Le tableau 4.5 montre la variation du coefficient des pertes thermiques en fonction de l'émissivité de l'absorbeur  $\epsilon_a$  :

Table 4.5 : la variation du coefficient des pertes thermiques en fonction de l'émissivité de l'absorbeur

| $\epsilon_a$ | 0,075   | 0,1     | 0,15    | 0,225   | 0,3     |
|--------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $U_L$        | 44,9570 | 45,2308 | 45,8009 | 46,6473 | 47,4972 |

La figure 4.7 donne l'effet de l'émissivité de l'absorbeur sur le coefficient des pertes thermiques :

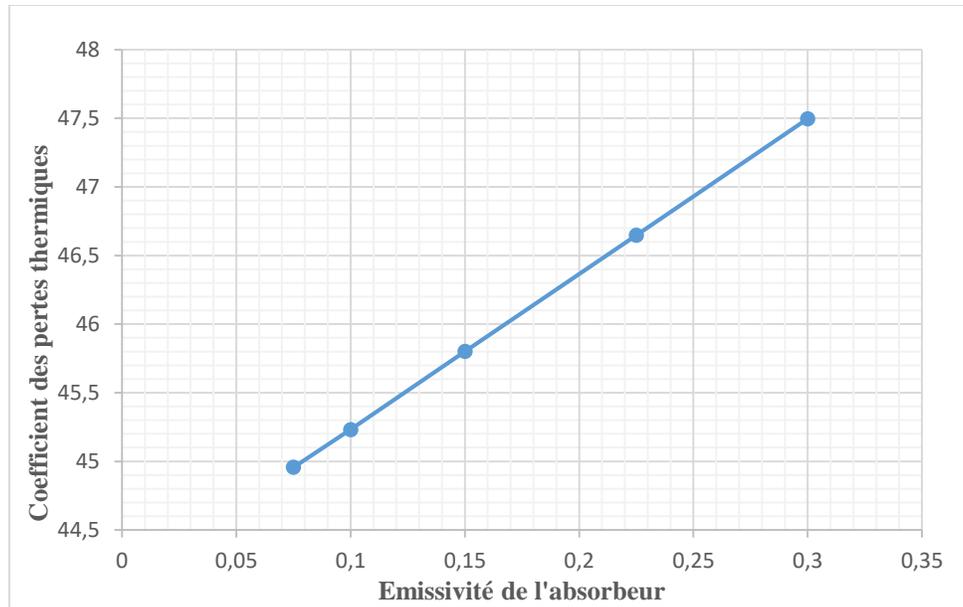


Figure 4.7 : Effet de l'émissivité de l'absorbeur sur le coefficient des pertes thermiques

Dans la figure 4.7, on remarque aussi que le coefficient des pertes thermiques croît avec l'émissivité de l'absorbeur. Donc plus l'émissivité est grande plus les pertes thermiques sont importantes. La courbe est une droite, alors on peut déduire que les pertes thermiques sont proportionnelles à l'émissivité de l'absorbeur. Ainsi, le coefficient des pertes thermiques dépend fortement de la nature des matériaux utilisés.

## CONCLUSION

De toutes les ressources énergétiques renouvelables, l'énergie solaire est la plus importante car disponible, gratuite et facile à exploiter. Cependant, l'utilisation des capteurs solaires s'avère impérative afin de convertir le rayonnement solaire en énergie utile (de la chaleur ou de l'électricité). Ces capteurs diffèrent du point de vue performance et mode d'utilisation. Dans notre cas, il s'agit de la stérilisation solaire, donc un capteur solaire thermique qui produit de l'eau chaude et de la vapeur à moyennes et hautes températures serait idéal. C'est pourquoi notre choix s'est porté sur le concentrateur cylindro-parabolique. En effet, une présentation détaillée de différentes parties du CCP a été faite et les différentes équations de transferts thermiques qui le régissent. Nous avons procédé à la discrétisation de ces équations et les remettre en un système d'équations sous forme matricielle. Le système a été résolu par l'une des méthodes résolution des systèmes d'équations en l'occurrence la méthode de Gauss Seidel sous le logiciel Matlab.

Aussi, nous avons procédé à une simulation pour voir les variations de la température en fonction des diamètres interne et externe de l'absorbeur, de la masse volumique et du débit du fluide caloporteur et en fonction de la vitesse du vent. Les résultats de la simulation montrent que la température du fluide diminue quand le diamètre interne de l'absorbeur augmente ; par elle augmente avec la masse volumique du fluide. Aussi, l'augmentation de la vitesse du vent fait diminuer la température du fluide caloporteur mais l'augmentation du débit l'a fait augmenter.

## **PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS :**

Ce travail consiste à modéliser les différents types de transfert thermiques afin d'obtenir les profils des températures de sortie du fluide caloporteur, de l'absorbeur et du tube en verre, ainsi les pertes thermiques afin de les minimiser et enfin le rendement thermique pour l'améliorer.

Dans l'objectif de compléter ce travail nous suggérons :

- 1- De compléter cette étude thermique par l'étude de la puissance utile du système en fonction :
  - De la variabilité géographique.
  - De la variation saisonnière et climatique.
  - L'angle de l'orientation solaire.
- 2- De faire une étude sur la simulation de l'efficacité optique pour améliorer l'énergie solaire absorbée.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- [1] Ministère Algérien de l'Énergie « programme national des Énergies Nouvelle et Renouvelables » [En ligne] [Citation : 6 Juin 2018.] <http://www.energy.gov.dz>
- [2] Bessemoulin. P., Olivieri. J., « Le rayonnement solaire et sa composante », La Météorologie 8e série n° 31, p.42-59, septembre 2000
- [3] Ouarghi. I., Tria. H., « contribution et modélisation d'un capteur solaire cylindro-parabolique », Mémoire de Master en Génie Mécanique Option Énergétique, Université Larbi Tébessi de Tebessa, 2016
- [4] Jeter. M. "The Distribution of Concentrated Solar Radiation in Paraboloidal Collectors", Journal of Solar Energy Engineering, p.108, 1986
- [5] Cheng, He, Xiao, Tao and Xu "Three-dimensional numerical study of heat transfer characteristics in the receiver tube of parabolic trough solar collector", International Communications in Heat and Mass Transfer, 2010
- [6] Dudley, Kolb, Mahoney, Mancini, Matthews, Sloan and Kearney "Test results: SEGS LS-2 solar collector", Sandia National Laboratories, Albuquerque, 1994
- [7] He. Y., Xiao. J., Cheng. Z., Tao. Y., "A MCRT and FVM coupled simulation method for energy conversion process in parabolic trough solar collector", Renewable Energy (36), p.976-985, 2011
- [8] Yacine. M. « Caractérisation d'un concentrateur cylindro-parabolique de dimensions réelles au sud de l'Algérie : Région d'Ouargla », Thèse de doctorat, Université d'Ouargla, 2015
- [9] Abhat. A., "Low Temperature Latent Heat Thermal Energy Storage: Heat Storage Materials", Solar Energy, vol. 4, n° 130, p.313-332, 1983.
- [10] Neumann. O., al "Solar vapor generation enabled by nanoparticles", ACS Nano, vol 7, p.42-49, 2013
- [11] Osama. B. M., "Solar Thermal Sterilization: A TRNSYS Performance Analysis", Asia-pacific Solar Research Conference, At Canberra, 2016,
- [12] DRL Document, "Concentrating Solar Power for the Mediterranean Region", 2005

- [13] Geyer. M., "Eport on the Solarpaces", Start Mission to Algeria, 2003
- [14] Mullick. S.C., Nanda. S., "An improved technique for computing the heat loss factor of tubular absorber", Solar Energy Vol.42, N°1, p.1-7, 1989
- [15] Sotehi. O., « Etude des caractéristiques de fonctionnement et de la performance d'un distillateur solaire », Thèse de magistère, Université de Constantine, 2009
- [16] Duffie. J.A., Beckman. W.A., "Solar engineering of thermal processes" edition John Wiley and Sons, 1980
- [17] Braun. J.E., Mitchell. J.C., "Solar geometry for fixed and tracking surface" edition solar energy laboratory, 1983
- [18] Duffie. J.A., Beckman. W.A., "Solar engineering of thermal process", 2nd edition. John Wiley & Sons, New York, États Unis, 1991.
- [19] Goswami. D.Y., Kreith. F., Kreider. J.F., "Principles of solar engineering", 2nd edition Taylor & Francis, Philadelphia, États Unis, 2000
- [20] Hamani. N., « 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
- [21] Fayçal. K., « Conversion thermodynamique de l'énergie solaire : Etude et modélisation d'un capteur solaire », mémoire de magistère en Mécanique Option : Energétique, Université de Batna, 2014
- [22] Sfeir. A., Guarracino. G., « Ingénierie des systèmes solaires », Technique et Documentation, Paris, 1981
- [23] Nacira. T., « Optimisation des systèmes photovoltaïques connectes au réseau par la logique floue », Mémoire de magister, Université de Biskra, 2004
- [24] Achour. B., « Optimisation d'un système de pompage photovoltaïque au fil soleil », mémoire de magister, Centre universitaire de Biskra, 1997
- [25] Chassériaux. J. M., « Conversion thermique du rayonnement solaire », édition Dunod, 1984

- [26] Duffie. J. A., Beckman. W. A., “Solar Energy Thermal Processes”, 2nd edition Wiley Interscience New York, 1974
- [27] GUIDEnR SOLAIRE THERMIQUE, [En ligne] <http://www.solairethermique.guidenr.fr/>
- [28] INES., Institut National de l'Energie Solaire. [En ligne] <http://www.ines-solaire.org>
- [29] Syndicat des Energies Renouvelables « Principe de fonctionnement du solaire thermodynamique », Agence International pour l’Energie, 2012
- [30] Sidiyakoub. M. A. A., « 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
- [31] Gama A., Haddadi M., Malek. A., « Etude et réalisation d’un concentrateur cylindro parabolique avec poursuite solaire aveugle », Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°3, p.437 – 451, 2008
- [32] Meinel B., Marjorie. P.M., “Applied solar”, Edition ADDISON – WESLEY IN PHISICS, 1976
- [33] Bouhadda M., « Conception et Réalisation d’un Capteur d’énergie solaire à lit fluidisé », Thèse de Doctorat en Génie des Procédés, Université de Ouargla, 2017
- [34] CCLIN Sud-Est, « Guide Technique d'hygiène hospitalière », CCLIN Sud-Est, 2014
- [35] Goulet. D., Valence. B., « La stérilisation des dispositifs médicaux à l'hopital », Rapport médical CHU, Grenoble, 1996
- [36] Madani. S. « 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
- [37] Chekirou. W., Boukheit. N., Kerbache. T., « Différents modes de transfert de chaleur dans un absorbeur d’un concentrateur solaire cylindro-parabolique », Revues des Energies Renouvelables ICRES-07 Tlemcen, p.21-28, 2007
- [38] Kalogirou. S. A., “solar thermal collectors and applications progress in energy and combustion science”, edition London, Washington DC, 2004
- [39] Cengel. Y. A., “Heat transfer and mass transfer: a practical approach”, 3rd edition McGraw Hill Book Company, 2006

[40] Incropera. F., DeWitt. D., Bergman. T. L., Lavine. A. S. “Fundamentals of heat and mass transfer”. 6th edition John Wiley and Sons, New York, 2007

# ANNEXE A :

## Les méthodes de discrétisation :

### 1) La méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis permet de résoudre de manière discrète une EDP dont on cherche une solution approchée suffisamment fiable. De manière générale, cette EDP porte sur une fonction  $u$ , définie sur un domaine. Elle comporte des conditions aux bords permettant d'assurer existence et unicité d'une solution.

La méthode des éléments finis présente les avantages suivants :

- Traitement possible de géométries complexes.
- Détermination plus naturelle des conditions aux limites.
- Possibilité de démonstrations mathématiques de convergence et de majoration d'erreurs.

Mais également quelques inconvénients dont :

- Complexité de mise en œuvre.
- Coût en temps de calcul et en mémoire.

Quelques formules d'approximation des dérivées partielles par des différences finies pour les dérivées partielles premières :

- Différences divisées progressives :

$$\frac{\partial u}{\partial x}(x_i, y_j) \approx \frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{\Delta x}$$

$$\frac{\partial u}{\partial y}(x_i, y_j) \approx \frac{u_{i,j+1} - u_{i,j}}{\Delta y}$$

- Différences divisées régressives :

$$\frac{\partial u}{\partial x}(x_i, y_j) \approx \frac{u_{i,j} - u_{i-1,j}}{\Delta x}$$

$$\frac{\partial u}{\partial y}(x_i, y_j) \approx \frac{u_{i,j} - u_{i,j-1}}{\Delta y}$$

- Différences divisées centrées :

$$\frac{\partial u}{\partial x}(x_i, y_j) \approx \frac{u_{i+1,j} - u_{i-1,j}}{2 * \Delta x}$$

$$\frac{\partial u}{\partial y}(x_i, y_j) \approx \frac{u_{i,j+1} - u_{i,j-1}}{2 * \Delta y}$$

## 2) La méthode des différences finies :

Elle consiste à remplacer les dérivées apparaissant dans le problème continu par des différences divisées ou combinaisons de valeurs ponctuelles de la fonction en un nombre fini de points discrets ou nœuds du maillage.

La méthode des différences finies présente des avantages à savoir, une grande simplicité d'écriture, et un faible coût de calcul, et quelques inconvénients tels que une limitation de la géométrie des domaines de calcul, des difficultés de prise en compte des conditions aux limites portant sur les dérivées ou les gradients de l'inconnue ainsi que l'absence de résultats de majorations d'erreurs.

Nous donnons dans ce qui suit quelques formules d'approximation des dérivées par des différences finies pour la dérivée première :

- Différence divisée progressive d'ordre 1 :

$$\frac{du}{dx} \approx \frac{u_{i+1} - u_i}{h}$$

- Différence divisée progressive d'ordre 2 :

$$\frac{du}{dx} \approx \frac{-u_{i+2} + 4u_{i+1} - 3u_i}{2h}$$

- Différence divisée régressive d'ordre 1 :

$$\frac{du}{dx} \approx \frac{u_i - u_{i-1}}{h}$$

- Différence divisée régressive d'ordre 2 :

$$\frac{du}{dx} \approx \frac{3u_i - 4u_{i-1} + 3u_{i-2}}{2h}$$

- Différence divisée centrée :

$$\frac{du}{dx} \approx \frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{h}$$

## ANNEXE B :

### 1) Propriétés optiques et thermiques de quelques surfaces transparentes :

| Matériau                    | Épaisseur<br>(mm) | Transmissivité<br>(%) | Masse<br>Volumique<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Chaleur<br>Massique<br>(j/kg.K) | Conductivité<br>Thermique<br>(W/m.K) |
|-----------------------------|-------------------|-----------------------|--------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| Verre à vitre               | 3                 | 85-92                 | 2700                                       | 840                             | 0.93                                 |
| Polycarbonate               | 3.2               | 82-89                 | 1200                                       | 1260                            | 0.2                                  |
| Polyméthacrylate            | 3.2               | 89-92                 | 1200                                       | 1460                            | 0.2                                  |
| Polyester armé              | 1                 | 77-90                 | 1400                                       | 1050                            | 0.21                                 |
| Polyfluoéthyle<br>Propylène | 0.05              | 97                    | 2.51                                       | 1170                            | 0.25                                 |
| Polyfluorure<br>vinyle      | 0.1               | 93                    | 1.5                                        | 1380                            | 0.12                                 |

### 2) Propriétés thermiques de quelques matériaux pouvant servir d'isolants :

| Matériau               | Conductivité<br>Thermique<br>(W/m.K) | Masse<br>volumique<br>(kg /m <sup>3</sup> ) | Chaleur<br>Massique<br>(J/kg.K) | Diffusivité<br>Thermique<br>10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> /s |
|------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Air à 20 °C            | 0.025                                | 1.2                                         | 1003                            | 208                                                            |
| Mousse de polyuréthane | 0.029                                | 30                                          | 1600                            | 6                                                              |
| Laine de verre         | 0.036                                | 40                                          | 840                             | 10.7                                                           |
| Polystyrène expansé    | 0.04                                 | 20                                          | 1500                            | 13.3                                                           |
| Laine de roche         | 0.04                                 | 40                                          | 840                             | 11.9                                                           |
| Laine (vêtement)       | 0.04                                 | 450                                         | 1880                            | 0.47                                                           |
| Feutre d'amiante       | 0.047                                | 116                                         | 800                             | 5.1                                                            |
| Liège expansé          | 0.048                                | 120                                         | 1380                            | 2.9                                                            |

|                         |       |      |      |      |
|-------------------------|-------|------|------|------|
| Perlite                 | 0.048 | 60   | 840  | 9.5  |
| Silicate de calcium     | 0.052 | 200  | 920  | 2.8  |
| Magnésie                | 0.055 | 200  | 880  | 3.1  |
| Béton cellulaire        | 0.075 | 280  | 800  | 3.3  |
| Vermiculite             | 0.09  | 80   | 880  | 12.8 |
| Papier journal comprimé | 0.105 | 130  | 1340 | 6    |
| Bois de pain            | 0.118 | 500  | 1210 | 1.95 |
| Papier                  | 0.14  | 700  | 1340 | 1.5  |
| Bois de sapin           | 0.144 | 535  | 272  | 9.9  |
| Caoutchouc              | 0.153 | 1200 | 2170 | 0.6  |
| Pvc                     | 0.166 | 1380 | 1000 | 1.2  |
| Bois de chêne           | 0.198 | 825  | 2400 | 1.0  |
| Plâtre                  | 0.35  | 800  | 800  | 5.5  |
| Brique                  | 0.697 | 1700 | 900  | 4.6  |

### 3) Propriétés de quelques couches selectives :

| Couches sélectives           | Matériaux                  | Absorptivité | Emissivité |
|------------------------------|----------------------------|--------------|------------|
| Noir de nickel               | Cuivre                     | 0.96         | 0.12       |
| Noir de chrome sur nickel    | Cuivre , acier , aluminium | 0.95         | 0.07       |
| Noir de cuivre sur aluminium | Cuivre , nickel, aluminium | 0.88         | 0.15       |
| Aluminium oxyde de molébdène | N'importe                  | 0.93         | 0.35       |
| Oxyde de fer                 | Acier                      | 0.85         | 0.08       |