

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



**UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA 1  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**



***Mémoire de projet de fin d'étude  
pour l'obtention du diplôme de  
Master en Installation  
Énergétique et Turbomachines***

***THEME : ÉTUDE DE L'EFFET DU VENT SUR UN CAPTEUR SOLAIRE  
CYLINDRO-PARABOLIQUE EN UTILISANT LA MECANIQUE DES FLUIDES  
NUMÉRIQUE CFD***

***Présenté par :***

***MELLAS Anis***

***GUIRAA Riadh***

***TABET Mohamed Islem***

***Proposé et encadré par :***

***Encadrant : Dr S.DANOUNI C.U.Tipaza***

***Co Encadrant : Dr S.BENSEDIRA USDB***

***ANNÉE UNIVERSITAIRE: 2021/2022***

# Remerciements

*En premier, nous souhaitons remercier dieu le tout puissant qui nous a aidé et donné la force d'en arriver jusqu'ici et de finir ce travail. Pour cela nous utilisons un seul mot qui est El Hamdoulillah.*

\*\*\*

*Nos plus grands remerciements vont à notre promoteur de ce projet de fin d'études Monsieur **S.DANOUNI**, Maitre de conférence A au centre universitaire Morsli Abdellah de Tipaza qui a été notre guide sur le sentier de la recherche et qui nous a toujours soutenus et encouragés durant la durée de notre projet, et aussi pour ses conseils qui ont été très précieux lors des explications et interprétations des différents phénomènes et problèmes que nous avons rencontrés tout au long de ce projet.*

\*\*\*

*Nos sincères remerciements s'adresse également à notre co promoteur Monsieur **S.BENSEDIRA** Maitre de conférence B à l'université Saad Dahleb de Blida pour l'aide, le suivi et le grand intérêt accordé à notre travail ; ainsi pour la patience dont il nous a fait part à notre égard, et pour toutes les orientations qu'il nous a transmis .*

\*\*\*

*Nous tenons à remercier vivement l'ensemble des enseignants du département de Génie Mécanique, pour leur disponibilité et leurs judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion et surtout sur la qualité des enseignements qui nous ont été dispensés. Nous devons remercier également toutes les personnes qui ont exprimé à un moment ou à un autre leurs encouragements, nos amis avec qui nous avons partagé les plus beaux moments de ce cursus universitaire, ainsi que l'ensemble des étudiants de notre promotion.*

# *Dédicaces*

*A Mes Très chers parents, Aucune dédicace ne saurait exprimer leur amour qui m'ont toujours encouragé et soutenue durant tout mon cursus et qui ont tant sacrifié pour m'offrir un climat de travail agréable.*

*A ma mère qui a été à mes côtés et m'a soutenu durant toute ma vie, et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis, que dieu les protèges.*

*A celui qui m'a encouragé et soutenu depuis toujours et ce à qui je dois tant pour Haithem.*

*A mes Très chers frères et sœurs Nacim, Tinhinen, Chanez et leurs petits Ilyan, Rayan, Aylan et Enzo et l'ensemble de ma famille.*

*A tous mes amis et à toute ma promotion du Génie Mécanique .*

« **ANIS** »

*Je dédie ce travail à mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur soutien et leurs prières tout au long de mes années d'études*

*Ainsi qu'à mon frère Ahmed et mes sœurs, et toutes ma famille et mes amis leur encouragement.*

« **ISLEM** »

*Tout d'abord, je tiens à remercier DIEU De m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.*

*Je tiens à dédier cet humble travail : A ma tendre mère et mon très cher père ainsi qu'à mes sœurs.*

*A tous mes amis et frères, et à l'ensemble de ma promotion de mécanique.*

« **RIADH** »

**ملخص:** يتم استغلال الطاقة الشمسية بشكل عام على أراضي مفتوحة و في نفس الوقت معزولة, حيث أن سرعة الرياح تشكل عقبة. للتغلب على هذا ، تم تنفيذ العديد من الدراسات للاستفادة من موثوقية المجمع الشمسي. تم استخدام ميكانيكا السوائل الحاسوبية في هذه الأطروحة كنفق رياح "افتراضي" بواسطة برنامج محاكاة لحساب بدقة جيدة ملامح سرعة جسيمات الهواء حول النموذج الحالي. أظهرت النتائج توافقًا كبيرًا مع البيانات التجريبية والرقمية الأخرى للمعاملات الديناميكية الهوائية.

**الكلمات المفتاحية:** الطاقة الشمسية ، مجمع الطاقة الشمسية الأسطواني - مكافئ ، الديناميكا الهوائية ، CFD ، Ansys.

**Abstract:** The exploitation of the solar energy is generally done on open and isolated grounds where the wind speed is an obstacle. To overcome this obstacle, several studies have been carried out to take advantage of the reliability of the parabolic trough solar collector.

In this thesis, CFD was used as a "virtual" wind tunnel by Ansys simulation software to calculate with good accuracy the velocity profiles of the air particles around the present model. The results show a high agreement with other experimental and numerical data of aerodynamic coefficients.

**Keywords :** Solar energy, parabolic trough, aerodynamics, CFD, Ansys.

**Résumé :** L'exploitation de l'énergie solaire se fait généralement sur des terrain ouvert à la fois isolé ou la vitesse du vent s'avère être un obstacle. Pour le surmonter plusieurs études ont été mise en œuvre pour en profiter d'avantage de la fiabilité du capteur solaire cylindro-parabolique.

Dans ce mémoire, la mécanique des fluides numériques CFD a été utilisée comme une soufflerie "virtuelle" par un logiciel de simulation Ansys pour calculer avec une bonne précision les profils de vitesses des particules d'air autour du modèle present.

Les résultats révèlent une grande concordance avec d'autres données expérimentales et numériques des coefficients aérodynamiques.

**Mots clés :** Énergie solaire, capteur solaire cylindro-parabolique, aérodynamique, CFD, Ansys.

# Contents

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Introduction générale.....</b>                                   | <b>2</b>  |
| <b>1 Chapitre 1 : Généralités et gisement solaire .....</b>         | <b>4</b>  |
| <b>1.1 Energies Renouvelables.....</b>                              | <b>4</b>  |
| 1.1.1 Introduction .....  | 4         |
| 1.1.2 Définition .....  | 4         |
| 1.1.3 Ressources des énergies renouvelables.....                    | 5         |
| 1.1.3.1 Énergie des océans.....                                     | 5         |
| 1.1.3.2 Énergie hydraulique.....                                    | 5         |
| 1.1.3.3 Énergie géothermique .....                                  | 5         |
| 1.1.3.4 Énergie de la biomasse.....                                 | 5         |
| 1.1.3.5 Énergie éolienne .....                                      | 6         |
| 1.1.3.6 Hydrogène .....   | 6         |
| 1.1.3.7 Énergie solaire .....                                       | 6         |
| 1.1.3.7.1 La conception solaire passive .....                       | 7         |
| 1.1.3.7.2 La conception solaire active .....                        | 7         |
| <b>1.2 Énergie solaire et rayonnement .....</b>                     | <b>8</b>  |
| 1.2.1 Rayonnement.....  | 8         |
| 1.2.1.1 Loi de Stephan-Boltzmann.....                               | 10        |
| 1.2.1.2 Loi de Wein.....  | 10        |
| 1.2.1.3 Loi de l'inverse du carré.....                              | 11        |
| 1.2.2 Effets atmosphériques sur le rayonnement solaire entrant..... | 11        |
| 1.2.2.1 Effet de serre. ....  | 11        |
| 1.2.2.2 Nombre de masse d'air .....                                 | 12        |
| 1.2.3 Bilan énergétique de la terre.....                            | 14        |
| 1.2.3.1 Réflectivité .....  | 14        |
| 1.2.3.2 Relations Soleil-Terre .....                                | 16        |
| 1.2.3.2.1 Angle du soleil et l'intensité de l'énergie.....          | 17        |
| 1.2.3.2.2 Graphique de l'intensité et de l'énergie .....            | 23        |
| <b>1.3 Rayonnement solaire en Algerie .....</b>                     | <b>24</b> |
| 1.3.1 Energie Solaire en Algerie .....                              | 27        |

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| 1.3.2      | Centrales Solaires .....   | 27        |
| 1.3.2.1    | Centrale Solaire Ain Skhouna, Saida.....   | 29        |
| 1.3.2.2    | Centrale Solaire de OuedNechou, Ghardaïa .....                                   | 30        |
| 1.3.2.3    | Centrale CSP hassi Rmel, Laghouat.....   | 31        |
| 1.3.2.3.1  | Motivation du choix du lieu d'implantation.....                                  | 32        |
| 1.3.2.3.2  | Le champ solaire.....  | 32        |
| 1.3.2.3.3  | Le cycle combine.....  | 33        |
| <b>1.4</b> | <b>Les Différents types de systèmes solaire .....</b>                            | <b>33</b> |
| 1.4.1      | Système solaire photovoltaïque .....   | 33        |
| 1.4.1.1    | Groupes de système photovoltaïque .....  | 34        |
| 1.4.1.1.1  | Systèmes photovoltaïques non connectés au réseau, systèmes autonomes (off-grid)  | 34        |
| 1.4.1.1.2  | Systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique public (on-grid)         | 34        |
| 1.4.2      | Systèmes Solaires Thermiques .....   | 35        |
| 1.4.3      | Refroidissement solaire.....   | 36        |
| 1.4.3.1    | Systèmes de refroidissement solaire actifs.....                                  | 36        |
| 1.4.3.2    | Refroidissement solaire passif.....  | 36        |
| 1.4.4      | Concentrateurs solaires thermiques .....   | 36        |
| 1.4.4.1    | Technologies Concentrateurs solaires thermiques .....                            | 37        |
| 1.4.4.1.1  | Parabole solaire.....  | 37        |
| 1.4.4.1.2  | Système de capteurs Fresnel linéaires.....                                       | 37        |
| 1.4.4.1.3  | Récepteur ou Tour centrale solaire .....   | 38        |
| 1.4.4.1.4  | Capteur solaire cylindro-parabolique.....  | 39        |
| <b>1.5</b> | <b>Conclusion .....</b>  | <b>40</b> |
| <b>2</b>   | <b>Chapitre 2 : Modélisation d'un capteur solaire cylindro-parabolique..</b>     | <b>42</b> |
| <b>2.1</b> | <b>Introduction.....</b>   | <b>42</b> |
| <b>2.2</b> | <b>Modélisation de la géométrie .....</b>  | <b>42</b> |
| 2.2.1      | Caractéristiques Principales géométriques d'une PTC.....                         | 42        |
| 2.2.2      | Relation distance focale et angle de bord pour une largeur d'ouverture constante | 46        |
| 2.2.3      | Effet de l'angle de bord sur les performances du PTC.....                        | 46        |
| 2.2.4      | Rapport de concentration .....   | 47        |
| 2.2.4.1    | rapport de concentration géométrique .....                                       | 48        |
| 2.2.5      | Type de matériau des miroirs .....   | 49        |
| 2.2.5.1    | Miroirs en verre argenté.....  | 49        |
| <b>2.3</b> | <b>Modélisation thermique .....</b>  | <b>50</b> |

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| 2.3.1      | Récepteur à tube absorbant ou HCE (Heat Collector Element) .....            | 51        |
| 2.3.2      | Modèle de bilan énergétique unidimensionnel.....                            | 51        |
| <b>2.4</b> | <b>Modélisation aérodynamique.....</b>                                      | <b>54</b> |
| 2.4.1      | Rappels de mécanique des fluides .....                                      | 54        |
| 2.4.1.1    | Variables fondamentales .....   | 54        |
| 2.4.1.2    | Equations de Navier-Stokes .....  | 56        |
| 2.4.1.3    | Equation de Bernoulli .....   | 57        |
| 2.4.2      | Forces aérodynamiques.....  | 57        |
| 2.4.2.1    | Coefficient de traînée.....   | 57        |
| 2.4.2.2    | Coefficient de portance .....   | 58        |
| 2.4.2.3    | Coefficient de la force total.....  | 58        |
| <b>2.5</b> | <b>Modélisation du vent .....</b>   | <b>58</b> |
| 2.5.1      | Caractéristiques du vent .....  | 58        |
| 2.5.1.1    | La Vitesse moyenne.....   | 59        |
| 2.5.1.2    | Coefficient de rugosité.....  | 59        |
| 2.5.1.3    | Coefficient orographique .....  | 60        |
| 2.5.2      | Catégories de terrain .....   | 61        |
| <b>2.6</b> | <b>Conclusion .....</b>   | <b>62</b> |
| <b>3</b>   | <b>Chapitre 3 : Effet du Vent sur un Capteur cylindro-Parabolique .....</b> | <b>64</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Introduction.....</b>  | <b>64</b> |
| <b>3.2</b> | <b>Présentation du logiciel .....</b>                                       | <b>65</b> |
| <b>3.3</b> | <b>Configuration et modèle numérique.....</b>                               | <b>66</b> |
| <b>3.4</b> | <b>Validation du modèle numérique.....</b>                                  | <b>68</b> |
| <b>3.5</b> | <b>Resultats et discussion .....</b>  | <b>71</b> |
| 3.5.1      | Vitesse d'écoulement pour $Re = 85000$ .....                                | 71        |
| 3.5.2      | Vitesse d'écoulement pour $Re = 4.850 \times 10^6$ .....                    | 77        |
|            | .....   | <b>82</b> |
|            | <b>Conclusion générale .....</b>  | <b>83</b> |
|            | <b>Références bibliographiques.....</b>                                     | <b>85</b> |

## Liste des tableaux

|  |    |
|--|----|
| Tableau 1. 1 Valeurs de réflectivité de diverses surfaces. [24] .....  | 15 |
| Tableau 1. 2 Déclinaison solaire. [31] .....   | 20 |
| Tableau 1. 3 Pourcentage du rayonnement incident réfléchi par une surface d'eau (albédo de l'eau). [31]..... | 22 |
| Tableau 1. 4 Potentiel Solaire en Algerie ; Samedi 2 Juin 2018/Parc ENR Actuel.[40] .....                    | 27 |
| Tableau 1. 5 Puissance intallée sur chaque centrale d'Algérie.[41] .....                                     | 28 |
| Tableau 1. 6 Caractéristiques électriques des modules PV de la centrale d'Ain Skhouna.[44] .....             | 30 |
| Tableau 1. 7 Caratéristiques de la Centrale de Ghardaïa.[46] .....   | 31 |
|  |    |
| Tableau 2. 1 Définitions des flux de chaleur[CAR] .....  | 53 |
| Tableau 2. 2 Catégories de rugosité.[KAL] .....  | 61 |
| Tableau 2. 3 Paramètres de rugosité pour différents types de terrain uniforme.[PIC] .....                    | 61 |



## Listes des figures

|  |    |
|--|----|
| Figure 1. 1 Aperçu sur les sources d'énergie actuelles.[13] .....  | 4  |
| Figure 1. 2 Masse thermique dans la conception solaire passive. [11] .....   | 7  |
| Figure 1. 3 Conception de l'énergie solaire active. [12].....  | 8  |
| Figure 1. 4 Le spectre électromagnétique.[14] .....  | 9  |
| Figure 1. 5 Le spectre solaire. [14] .....   | 9  |
| Figure 1. 6 Comparaison des spectres de rayonnement solaire et terrestre. [16] .....                                       | 11 |
| Figure 1. 7 Le spectre du rayonnement solaire au sommet de l'atmosphère (jaune) et au niveau de la mer (rouge) [18]. ..... | 12 |
| Figure 1. 8 La variation de la masse d'air au zénith du soleil. [21] .....   | 13 |
| Figure 1. 9 Schéma du budget énergétique global. [14] .....  | 14 |
| Figure 1. 10 Albédo/Réflexion globale [25]. .....  | 16 |
| Figure 1. 11 Schéma de la relation soleil-terre [13].....  | 17 |
| Figure 1. 12 Carte des ressources solaires. [26] .....   | 17 |
| Figure 1. 13 L'orbite de la Terre autour du soleil. [28].....  | 18 |
| Figure 1. 14 Soleil à quatre positions différentes (angles zénithaux). [29].....   | 18 |
| Figure 1. 15 Angles du soleil. [31] .....  | 20 |
| Figure 1. 16 Angle d'altitude solaire pour Boston,MA au solstice d'hiver, à midi. [33] .....                               | 21 |
| Figure 1. 17 Angle d'altitude solaire pour Boston, MA au solstice d'été, à midi [33]. .....                                | 21 |
| Figure 1. 18 Effet de l'angle d'incidence sur le rendement. [19] .....   | 22 |
| Figure 1. 19 Graphique de l'intensité solaire mondiale. [30] .....   | 23 |
| Figure 1. 20 Graphique de l'énergie solaire mondiale. [30] .....   | 23 |
| Figure 1. 21 Graphique des heures de lumière du jour dans le monde [30].....   | 24 |
| Figure 1. 22 Irradiation solaire globale reçue sur plan incliné à la latitude du lieu : moyenne annuelle.[38] .....        | 25 |
| Figure 1. 23 Densité de puissance moyenne récupérable annuelle à 10 m.[39].....  | 25 |
| Figure 1. 24 Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontal au mois de Décembre. 25                             |    |
| Figure 1. 25 Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontal au mois de Juillet. ....                            | 26 |
| Figure 1. 26 Irradiation directe journalière reçue sur plan normal au mois de Décembre.....                                | 26 |
| Figure 1. 27 Irradiation directe journalière reçue sur plan normal au mois de Juillet. ....                                | 26 |
| Figure 1. 28 Centrales solaires sur Carte d'Algerie.[41] .....   | 29 |
| Figure 1. 29 Les champs photovoltaïques de la centrale d'Ain Skhouna.[44].....   | 29 |
| Figure 1. 30 Panneaux solaires centrale Ghardaïa.[47] .....  | 31 |
| Figure 1. 31 Capteurs solaires cylindro-parabolique hassi Rmel.[48].....   | 32 |
| Figure 1. 32 Schéma montrant l'effet photovoltaïque. [52].....   | 34 |
| Figure 1. 33 Système solaire thermique [55] .....  | 35 |
| Figure 1. 34 Modes de fonctionnement des cheminées solaires. [58] .....  | 36 |
| Figure 1. 35 Diagramme schématique de la parabole [66]. .....  | 37 |
| Figure 1. 36 Angles associés à la performance optique de la technologie des collecteurs Fresnel linéaires [68]......       | 38 |
| Figure 1. 37 Diagramme de l'énergie solaire à tour concentrée. [70].....   | 39 |
| Figure 1. 38 Composants des capteurs cylindro-paraboliques [73].....   | 40 |
| <br>   |    |
| Figure 2. 1 Paramètres géométriques paraboliques [79].....   | 43 |
| Figure 2. 2 principaux paramètres d'un PTC [81] modifié.....   | 43 |

|  |    |
|--|----|
| Figure 2. 3 La longueur focale comme paramètre de forme [82].  | 44 |
| Figure 2. 4 Relation entre l'angle de bord et la valeur $a/f$ . [79].  | 46 |
| Figure 2. 5 Segment d'une parabole ayant un point focal et un angle de bord communs avec la même largeur d'ouverture [83] Modifié.   | 46 |
| Figure 2. 6 Effet des angles de bord sur la distance focale pour une même largeur d'ouverture [79].  | 47 |
| Figure 2. 7 Surface d'ouverture du collecteur et surface d'ouverture du récepteur [79].  | 48 |
| Figure 2. 8 Réflectance des revêtements de miroirs métalliques. [85]   | 50 |
| Figure 2. 9 Schéma d'un HCE. [87].   | 51 |
| Figure 2. 10 (a) Bilan énergétique unidimensionnel en régime permanent ; (b) modèle de résistance thermique pour une section transversale d'un HCE [88].   | 53 |
| Figure 2. 11 Modèles d'écoulement observés lors de l'injection d'un flux de colorant dans un fluide en circulation. [90].  | 56 |
| Figure 2. 12 Profil de vitesse moyenne et profil de turbulence de terrain avec différentes rugosité [92].  | 58 |
| Figure 2. 13 Influence de la hauteur et de la catégorie du site. La rugosité du sol engendre des frottements qui ralentissent le vent à basse altitude [93].   | 60 |
| Figure 2. 14 Influence de l'orographie; la présence de reliefs engendre une modification de la vitesse du vent. [93]   | 60 |
|  |    |
| Figure 3. 1 Domaine de calcul de l'étude de l'écoulement du vent autour d'un capteur solaire. [TIP] modifiée   | 66 |
| Figure 3. 2 Exemple de distribution de maillage à la position $\theta = 90^\circ$ : (a) vue 3D, (b) autour du PTC.   | 68 |
| Figure 3. 3 Coefficient de traînée en fonction du nombre de Reynolds pour un cylindre circulaire dans un écoulement transversal : Comparaison avec des données expérimentales.   | 69 |
| Figure 3. 4 Exemple d'un cylindre circulaire dans un écoulement transversal à $Re = 100$ : (a) Ligne de vitesse, (b) contour de vitesse d'écoulement, (c) contour de pression.   | 70 |
| Figure 3. 5 Ligne de vitesse pour $Re = 85000$ : (a) $\theta = 0^\circ$ , (b) $\theta = 45^\circ$ , (c) $\theta = 90^\circ$ .  | 71 |
| Figure 3. 6 Ligne de vitesse pour $Re = 85000$ : (d) $\theta = 135^\circ$ , (e) $\theta = 180^\circ$ , (f) $\theta = 270^\circ$ .  | 72 |
| Figure 3. 7 Vitesse de l'écoulement du PTC pour $Re = 85000$ : (a) $\theta = 0^\circ$ , (b) $\theta = 45^\circ$ , (c) $\theta = 90^\circ$ , (d) $\theta = 135^\circ$ , (e) $\theta = 180^\circ$ , (f) $\theta = 270^\circ$ .             | 73 |
| Figure 3. 8 Contour de pression du PTC pour $Re = 85000$ : (a) $\theta = 0^\circ$ , (b) $\theta = 45^\circ$ , (c) $\theta = 90^\circ$ , (d) $\theta = 135^\circ$ , (e) $\theta = 180^\circ$ , (f) $\theta = 270^\circ$ .                 | 74 |
| Figure 3. 9 Comparaison des présents résultats avec ceux de M. Mier-Torrecilla et al [6856] Résultats numériques et expérimentaux pour un PTC à $Re = 85000$ : (a) coefficient de traînée moyen, (b) coefficient de portance moyen.      | 75 |
| Figure 3. 10 Ligne de vitesse pour $Re = 4.85 \times 10^6$ : (a) $\theta = 0^\circ$ , (b) $\theta = 45^\circ$ , (c) $\theta = 90^\circ$ .  | 77 |
| Figure 3. 11 Ligne de vitesse pour $Re = 4.85 \times 10^6$ : (d) $\theta = 135^\circ$ , (e) $\theta = 180^\circ$ , (f) $\theta = 270^\circ$ .  | 78 |
| Figure 3. 12 Vitesse de l'écoulement du PTC pour $Re = 4.85 \times 10^6$ : (a) $\theta = 0^\circ$ , (b) $\theta = 45^\circ$ , (c) $\theta = 90^\circ$ , (d) $\theta = 135^\circ$ , (e) $\theta = 180^\circ$ , (f) $\theta = 270^\circ$ . | 79 |
| Figure 3. 13 Contour de pression du PTC pour $Re = 4.85 \times 10^6$ : (a) $\theta = 0^\circ$ , (b) $\theta = 45^\circ$ , (c) $\theta = 90^\circ$ , (d) $\theta = 135^\circ$ , (e) $\theta = 180^\circ$ , (f) $\theta = 270^\circ$ .     | 80 |
| Figure 3. 14 Résultats numériques du coefficient de traînée et de portance pour le PTC pour $Re = 4.85 \times 10^6$ .  | 81 |

## Liste des abréviations

**CFD** : computational fluid dynamics (mécanique des fluides numérique)

**PTC** : parabolic trough collector (collecteur cylindro-parabolique)

**HCE** : heat collector element (élément du capteur de chaleur)

**HTF** : heat transfer fluid (fluide caloporteur)

**SCA** : Solar collector assemblies (rangées de capteurs solaires)

**Re** : nombre de Reynolds

## Nomenclatures

$\lambda_{\max}$  : Longueur d'onde

**I** : Intensité du rayonnement

**D** : Distance parcourue

**G<sub>sc</sub>** : Énergie du soleil

**G<sub>on</sub>** : Rayonnement mesuré sur le plan normal

$\Phi$  : Latitude

$\alpha$  : Angle d'azimuth solaire

$\delta$  : Déclinaison

$\Omega$  : Angle horaire

$\theta$  : Angle zénithal

**f** : Distance focale de la parabole

**d** : Diamètre de l'absorbeur

**a** : Largeur du collecteur

**r** : Distance entre le foyer et le point d'extrémité du profil

$\Psi$  : Angle de bord

**h** : Hauteur de la parabole

**C** : rapport de concentration

**C<sub>d</sub>** : Coefficient de traînée

**C<sub>l</sub>** : Coefficient de portance

# **Introduction générale**

### Introduction générale

L'énergie solaire à concentration est apparue comme un candidat réaliste pour répondre à la demande croissante d'énergie dans le monde. L'un des principaux défis dans la conception de ces centrales est l'évaluation des charges de vent sur les structures des capteurs. Une évaluation précise de ces charges permettrait d'optimiser la structure, d'augmenter la fiabilité et de réduire les coûts, ce qui peut entraîner des économies importantes dans l'investissement dans la centrale.

La modélisation de ces dispositifs est un aspect clé dans l'amélioration de leur conception et de leurs performances, ce qui peut représenter une augmentation considérable de l'efficacité globale des centrales solaires. L'étude aérodynamique de l'écoulement des fluides et du transfert de chaleur est un outil puissant pour optimiser le rendement du champ solaire et augmenter les performances de la centrale solaire.

Notre simulation se base sur deux nombres de Reynolds différents, Le premier nombre a été déjà utilisé dans un test expérimental à la fois numérique. On se basant sur ces derniers on peut comparer et valider nos résultats. dans une autre étape on a choisie une vitesse de vent élevée afin qu'on puisse observer les phénomènes créés par les forces aérodynamiques.

# Chapitre 1

# 1 Chapitre 1 : Généralités et gisement solaire

## 1.1 Energies Renouvelables

### 1.1.1 Introduction

Aujourd'hui, nous utilisons principalement les combustibles fossiles pour chauffer et alimenter nos maisons et nos voitures. Il est commode d'utiliser le charbon, le pétrole et le gaz naturel pour répondre à nos besoins en énergie, mais nous ne pouvons pas nous permettre d'en faire autant. naturel pour répondre à nos besoins énergétiques, mais l'offre de ces combustibles est limitée sur la Terre. Nous les utilisons beaucoup plus rapidement qu'ils ne sont créés. Même-finalement, ils seront épuisés.[1]

### 1.1.2 Définition

L'énergie renouvelable utilise des sources d'énergie qui sont continuellement renouvelées par la nature - le soleil, le vent, l'eau, la chaleur de la Terre et les plantes. Les technologies d'énergie renouvelable transforment ces combustibles en formes d'énergie utilisables, le plus souvent en électricité, mais aussi en chaleur, en produits chimiques ou en énergie mécanique. l'énergie mécanique.[1]

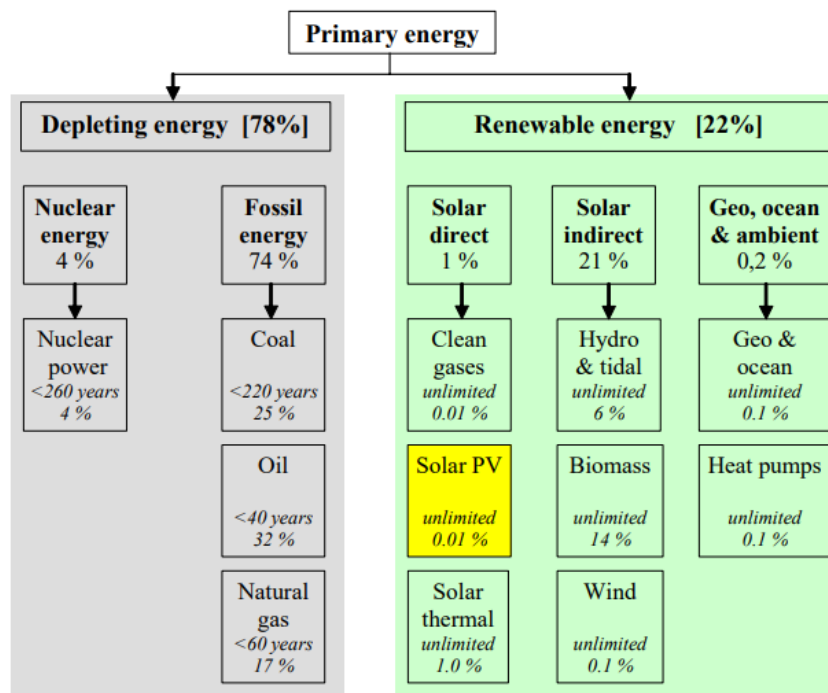


Figure 1. 1 Aperçu sur les sources d'énergie actuelles.[13]

### 1.1.3 Ressources des énergies renouvelables

#### 1.1.3.1 Énergie des océans

L'océan peut produire deux types d'énergie : l'énergie thermique provenant de la chaleur du soleil et l'énergie mécanique provenant des marées et des vagues. L'énergie thermique des océans peut être utilisée pour de nombreuses applications, notamment pour la production d'électricité. Les systèmes de conversion de l'électricité utilisent l'eau de surface chaude ou font bouillir l'eau de mer pour faire tourner une turbine, qui active un générateur [1].

#### 1.1.3.2 Énergie hydraulique

Les centrales hydroélectriques convertissent l'énergie de l'eau qui coule en électricité. La forme la plus courante d'hydroélectricité utilise un barrage sur une rivière pour retenir un grand réservoir d'eau. L'eau est libérée à travers des turbines pour générer de l'électricité. "Les systèmes au fil de l'eau, quant à eux, détournent l'eau de la rivière et la dirigent vers une turbine via un pipeline. Les centrales hydroélectriques ne produisent pas d'émissions atmosphériques, mais peuvent affecter la qualité de l'eau et les habitats fauniques.[1]

#### 1.1.3.3 Énergie géothermique

L'énergie géothermique est la chaleur de la Terre. C'est une énergie propre et durable. Les ressources d'énergie géothermique vont du sol peu profond à l'eau chaude et aux roches chaudes trouvées à quelques quelques kilomètres sous la surface de la Terre, et encore plus profondément jusqu'aux les températures extrêmement élevées de la roche en fusion appelée magma. Presque partout, le sol peu profond ou les trois mètres supérieurs de la surface de la Terre maintiennent une température presque constante entre 10 et 16 °C (50 et 60 °F). Les pompes à chaleur géothermiques peuvent exploiter cette ressource pour chauffer et refroidir les bâtiments. [2]

#### 1.1.3.4 Énergie de la biomasse

La biomasse est la source la plus importante de production d'énergie fournie par l'agriculture. L'exploitation efficace de la bioénergie peut dynamiser l'ensemble du milieu rural dans un pays où la nature offre différents types de biomasse. Cette énergie est



également disponible sous la forme de déchets biodégradables, qui constituent le composant rejeté de la biomasse disponible [3]. L'énergie de la biomasse fait référence aux combustibles fabriqués à partir de plantes et de déchets animaux [4]. L'effluent et les résidus de digestion sont riches en azote et en phosphore. azote et de phosphore, qui peuvent être recyclés dans le sol comme le sol comme engrais [5].

### **1.1.3.5 Énergie éolienne**

Le vent, en fin de compte poussé par l'air atmosphérique, est juste une autre façon de collecter de l'énergie. Le soleil chauffe l'atmosphère, ce qui produit du vent. Cela fonctionne les jours nuageux et la saison des pluies également. L'emplacement des turbines éoliennes est un facteur très important, qui influence la performance de la machine. Les moulins à vent sont généralement situés au sommet d'une tour à des hauteurs d'environ 30 m. Pour éviter que les turbulences d'une éolienne n'affectent pas le flux du vent aux d'autres, elle est située à 5-15 fois le diamètre des pales. Les moulins à vent fonctionnent aussi bien à axe horizontal qu'à axe vertical.[6]

### **1.1.3.6 Hydrogène**

Pour produire de l'hydrogène, il faut le séparer des autres éléments dans les molécules où il se trouve. Il existe de nombreuses sources d'hydrogène et de nombreux moyens de le produire pour l'utiliser comme carburant. Les deux méthodes les plus courantes pour produire de l'hydrogène sont le reformage vapeur-méthane et l'électrolyse (division de l'eau par l'électricité).[7]

### **1.1.3.7 Énergie solaire**

L'énergie solaire possède l'un des meilleurs potentiels d'énergie propre au monde. Elle présente plusieurs avantages par rapport au charbon, au pétrole et à l'énergie nucléaire. Par conséquent, les technologies et les applications de l'énergie solaire sont l'un des objectifs du développement de l'énergie humaine. L'énergie solaire thermique, en particulier, est la plus abondante. L'énergie émise par le soleil est de  $3,8 \times 10^{23}$  kW et environ 60% de cette énergie ( $1,08 \times 10^{14}$  kW) atteint la surface de la terre. Depuis 1980, l'utilisation de la technologie solaire augmente à un rythme d'environ 30% par an [8,9].

On peut distinguer deux classes de technologies : la **conversion passive** et la **conversion active** de l'énergie solaire.[10]

### 1.1.3.7.1 La conception solaire passive

Elle fait référence à l'utilisation de l'énergie solaire pour le chauffage, le refroidissement et l'éclairage naturel des espaces de vie. Dans cette approche, le bâtiment lui-même tire parti des caractéristiques énergétiques naturelles des matériaux et de l'air créés par l'exposition au soleil. Les systèmes passifs sont simples, comportent peu de pièces mobiles, aucun système mécanique et nécessitent un entretien minimal. En revanche, les technologies d'énergie solaire active nécessitent le transport de la chaleur à travers un milieu et ont donc besoin de composants pour transformer et transférer l'énergie solaire.[10]

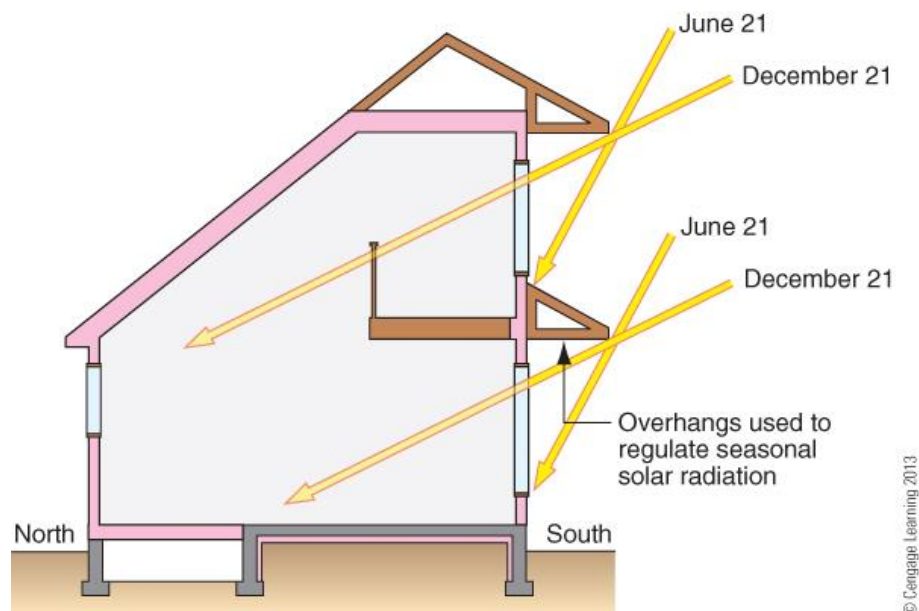


Figure 1. 2 Masse thermique dans la conception solaire passive. [11]

### 1.1.3.7.2 La conception solaire active

Elle réduit les besoins en énergie fossile d'un bâtiment et les coûts de combustible associés. L'énergie provenant de sources solaires actives a deux applications ou utilisations principales pour les maisons et les bâtiments. La première est la production d'électricité et la seconde est la production de chaleur pour l'eau chaude sanitaire et le chauffage des locaux. Des capteurs simples, généralement placés sur le toit d'une maison ou d'un bâtiment, absorbent l'énergie du soleil et transfèrent ensuite la chaleur à un

support qui l'achemine vers les points d'utilisation. Dans de nombreux climats, un système de chauffage solaire peut fournir un pourcentage élevé (50 à 75 %) de l'énergie nécessaire à la production d'eau chaude sanitaire. Étant donné qu'en moyenne, le chauffage de l'eau représente environ 15 à 25 %, voire plus, de la consommation d'énergie d'une habitation et 30 % de ses émissions de CO<sub>2</sub>, un chauffe-eau solaire peut réduire de plus de 20 % les émissions totales d'une habitation.[10]

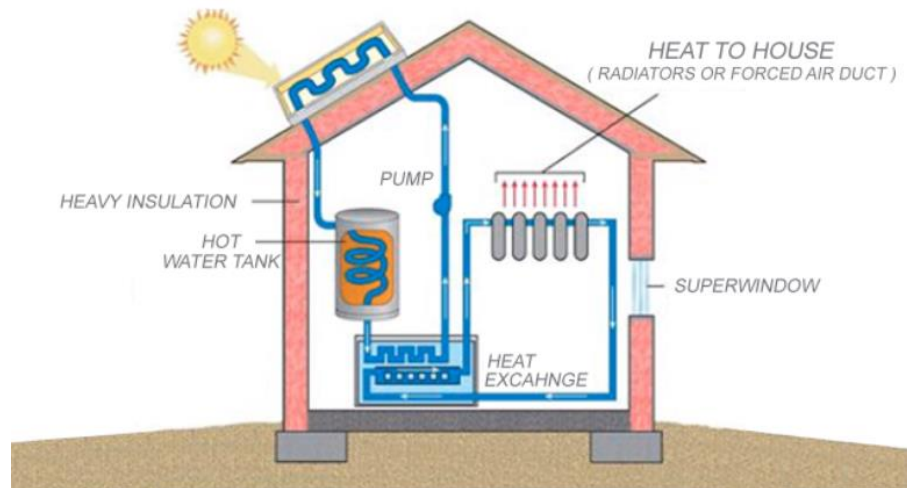


Figure 1. 3 Conception de l'énergie solaire active. [12]

## 1.2 Énergie solaire et rayonnement

### 1.2.1 Rayonnement

Le transfert d'énergie par des ondes électromagnétiques qui se déplacent à la vitesse de la lumière. La vitesse de la lumière dans le vide est d'environ  $3 \times 10^8$  m/s. Le temps que met la lumière du soleil pour atteindre la Terre est de 8 minutes et 20 secondes. Le transfert de chaleur par rayonnement électromagnétique peut se faire dans le vide. Tout corps dont la température est supérieure au zéro absolu ( $-273,150$  C) rayonne de l'énergie vers son environnement. Les différents types de rayonnement sont définis par leur longueur d'onde. Le rayonnement électromagnétique peut varier considérablement. [13]

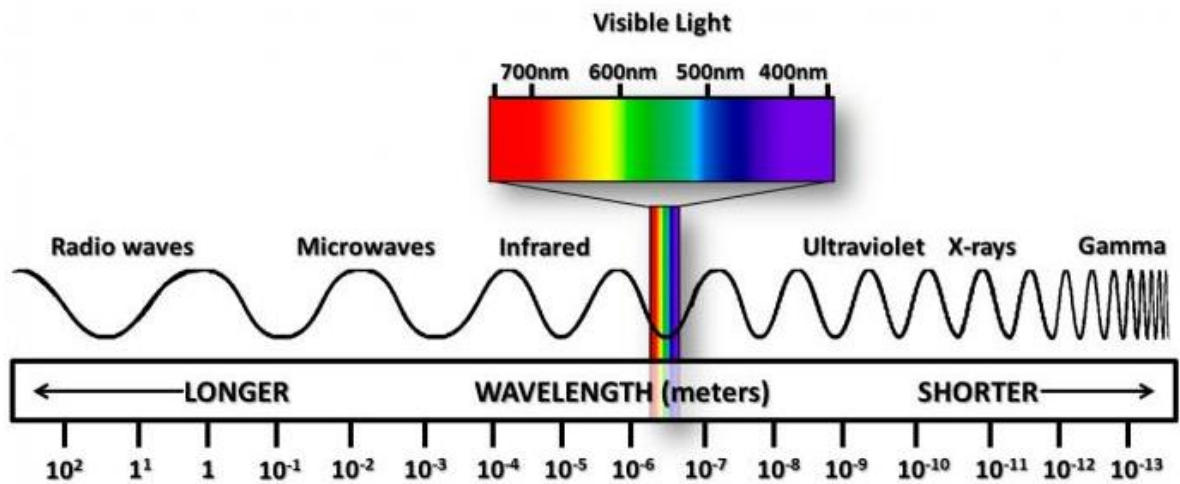


Figure 1. 4 Le spectre électromagnétique.[14]

Bien que le soleil produit des petites quantités d'ondes radio, de rayons X et de rayons gamma, la grande majorité du rayonnement émis se situe dans des longueurs d'onde comprises entre 0,25 et 2,4  $\mu\text{m}$  (microns ou micromètres, soit un millionième de mètre). Le spectre solaire (le rayonnement solaire qui frappe la haute atmosphère de la Terre) comprend l'infrarouge (52-55%), la lumière visible (42-43%) et l'ultraviolet (3-5%)[14].

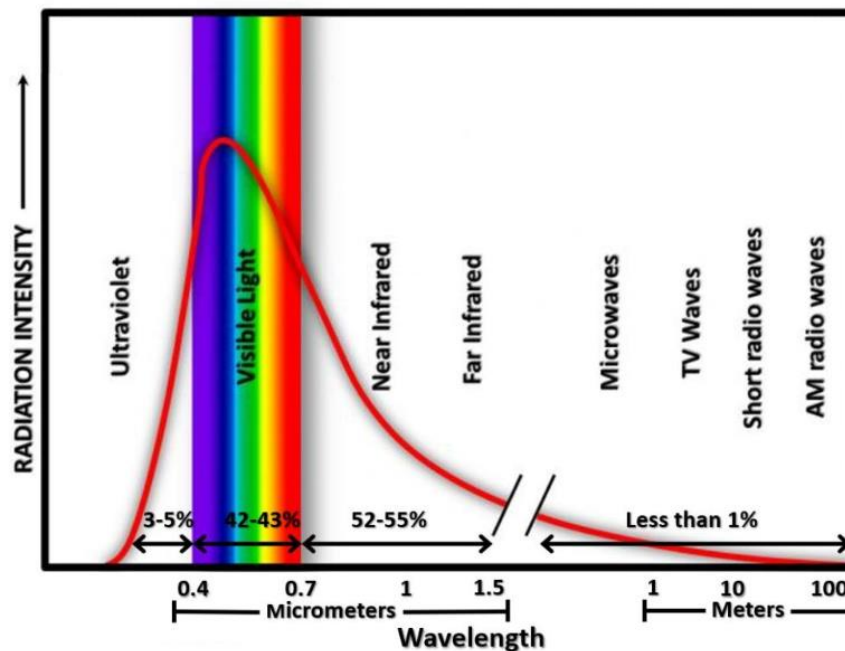


Figure 1. 5 Le spectre solaire. [14]

### 1.2.1.1 Loi de Stephan-Boltzmann

La quantité de rayonnement électromagnétique émise par un corps est directement liée à sa température. Si le corps est un émetteur parfait (corps noir), la quantité de rayonnement émise est proportionnelle à la 4e puissance de sa température mesurée en degrés Kelvin. Ce phénomène naturel est décrit par la loi de Stephan-Boltzmann : [13]

$$E = \sigma \times T^4 \quad 1.1$$

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{k}^{-4} \quad 1.2$$

D'où T en °K

En général, les bons émetteurs de rayonnement sont également de bons absorbeurs de rayonnement dans des bandes de longueur d'onde spécifiques. C'est notamment le cas des gaz à effet de serre. Certains objets dans la nature ont des capacités presque parfaites d'absorption et d'émission de rayonnement. Nous appelons ces objets des corps noirs. Les caractéristiques de rayonnement du soleil et de la Terre sont très proches de celles des corps noirs[13].

### 1.2.1.2 Loi de Wein

Relation entre la température d'un corps noir (une substance idéale qui émet et absorbe toutes les fréquences de la lumière) et la longueur d'onde à laquelle il émet le plus de lumière. La loi de Wein stipule que la longueur d'onde du pic d'émission est inversement proportionnelle à la température de l'objet émetteur. Les objets de températures différentes émettent des spectres qui culminent à des longueurs d'onde différentes. Par conséquent, les objets plus chauds émettent la plupart de leur rayonnement à des longueurs d'onde plus courtes, ce qui les fait paraître plus bleus, et les objets plus froids émettent la plupart de leur rayonnement à des longueurs d'onde plus longues, ce qui les fait paraître plus rouges. Formellement, la loi de Wien stipule que la radiance spectrale du rayonnement d'un corps noir par unité de longueur d'onde, culmine à la longueur d'onde  $\lambda_{\text{max}}$  donnée par : [15]

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{c}{T} \quad 1.3$$

d'où  $C = 2,8983 \times 10^{-3} \text{K}^\circ\text{m}$

Où T est exprimé en Kelvin. Selon l'équation ci-dessus, la longueur d'onde d'émission maximale pour le soleil (5800 K) est d'environ 0,5 µm, tandis que la longueur d'onde d'émission maximale pour la Terre (288 K) est d'environ 10,0 µm [13].

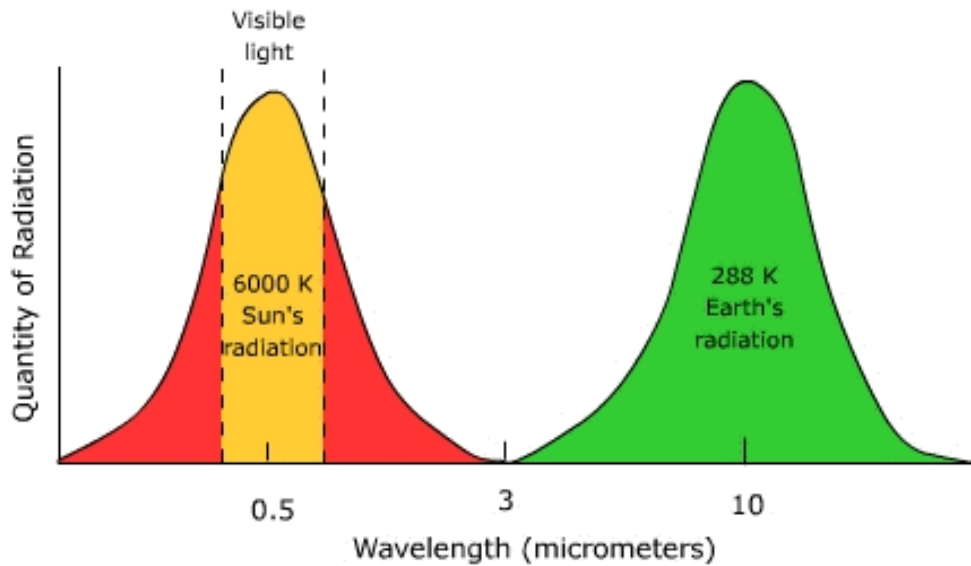


Figure 1. 6 Comparaison des spectres de rayonnement solaire et terrestre. [16]

### 1.2.1.3 Loi de l'inverse du carré

La quantité de rayonnement traversant une zone spécifique est inversement proportionnelle au carré de la distance de cette zone à la source d'énergie. Ce phénomène est appelé la loi du carré inverse. Grâce à cette loi, nous pouvons modéliser l'effet de la distance parcourue sur l'intensité du rayonnement émis par un corps comme le soleil [13].

$$\text{Intensity} = \frac{I}{d^2} \tag{1.4}$$

Où I est l'intensité du rayonnement à un d et d est la distance parcourue.

### 1.2.2 Effets atmosphériques sur le rayonnement solaire entrant

La transmission de l'énergie solaire à travers l'atmosphère est principalement influencée par : l'heure de la journée, le moment de l'année, l'atmosphère, les aérosols la poussière et nuages.

#### 1.2.2.1 Effet de serre.

L'atmosphère réchauffe la Terre en "piégeant" le rayonnement, ce qui permet à la surface de se réchauffer jusqu'à 300°K. À cette température, le rayonnement de surface

du corps noir est suffisamment important pour assurer une condition d'équilibre. L'atmosphère piège le rayonnement grâce à l'action de certains gaz, appelés gaz à effet de serre. Ces gaz (par exemple, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, NO, CFC, CO) sont très efficaces pour absorber et réémettre le rayonnement infrarouge [17].

Le rayonnement solaire qui frappe le sol (c'est-à-dire le niveau de la mer) (représenté en rouge) représente environ 70 % du rayonnement qui frappe le sommet de l'atmosphère (représenté en jaune). Comme on peut le voir sur la figure, l'ozone atmosphérique (O<sub>3</sub>), les molécules d'oxygène (O<sub>2</sub>), la vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O) et le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) (appelés bandes d'absorption atmosphérique sur la figure) réfléchissent 30 % de ce rayonnement solaire entrant vers l'espace et l'empêchent d'atteindre le sol [14].

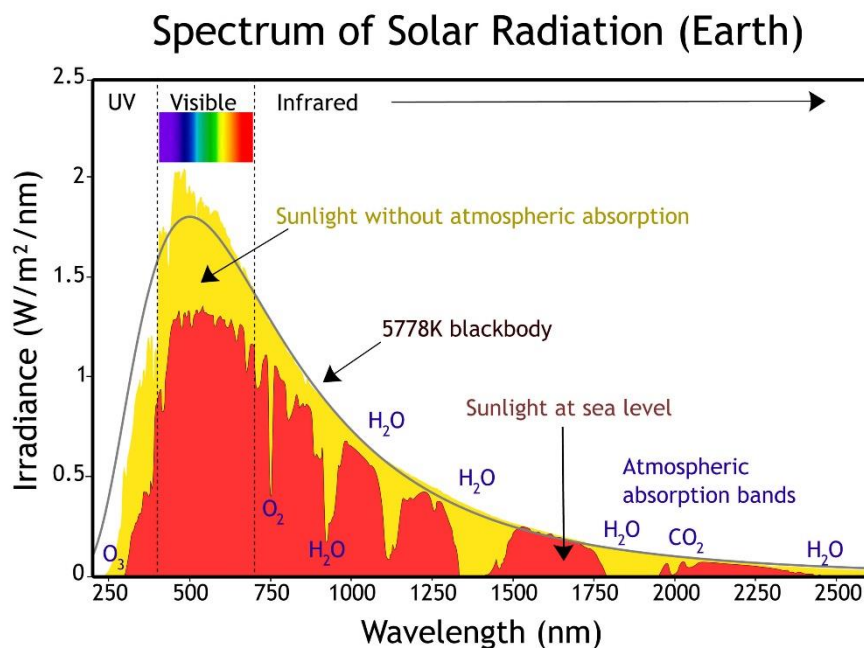


Figure 1. 7 Le spectre du rayonnement solaire au sommet de l'atmosphère (jaune) et au niveau de la mer (rouge) [18].

D'autres facteurs incluent **le nombre de masse d'air**.

### 1.2.2.2 Nombre de masse d'air

Le nombre de masse d'air tient compte de la perte d'énergie solaire due à l'atmosphère, tandis que les autres variables sont empiriques, basées sur la pollution et le temps dans un endroit donné, et leurs effets peuvent être estimés à l'aide de l'équation ci-dessous. Cette équation donne la transmission totale de l'énergie solaire à travers l'atmosphère (alias l'intensité d'insolation)[19].

Lorsque la lumière du soleil atteint la surface de la terre, elle a une intensité qui dépend de la trajectoire qu'elle a suivie dans l'atmosphère. La masse d'air optique est le

rapport entre la longueur réelle du trajet de la lumière solaire et la longueur minimale du trajet (lorsque le soleil est directement au-dessus de la tête). Lorsque le soleil fait un angle  $\theta$  avec l'horizon et que  $s$  est la longueur de l'ombre projetée par une structure verticale de hauteur  $h$ , la masse d'air est donnée par [20] :

$$Air\ Mass = \frac{1}{\cos \theta} = \sqrt{1 + \left(\frac{s}{h}\right)^2} \quad 1.5$$

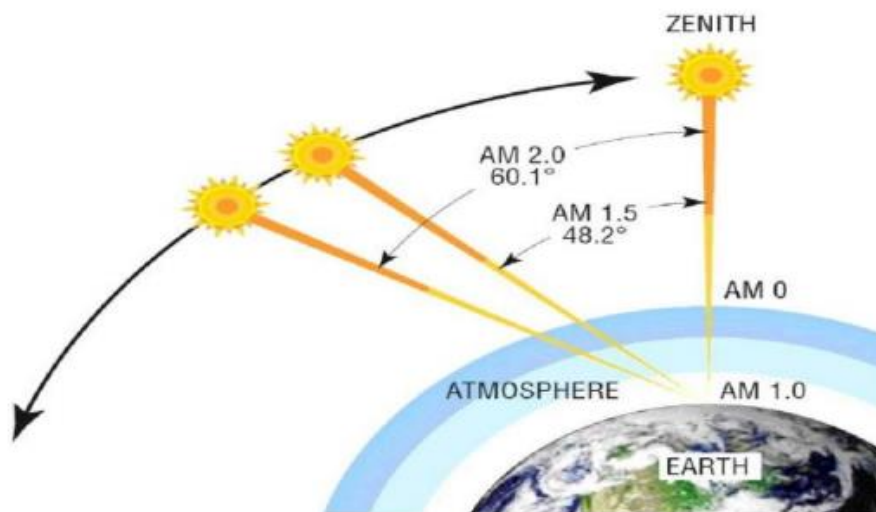


Figure 1. 8 La variation de la masse d'air au zénith du soleil. [21]

le rayonnement **AM0** n'est pratiquement utilisé que pour la capture de la lumière du soleil en dehors de notre atmosphère ; nous ne recevons jamais de rayonnement **AM0** une fois que la lumière a atteint la surface de la terre. Le rayonnement **AM1** est donné lorsque le soleil est directement au-dessus de la tête, tandis que la condition de rayonnement **AM1.5** est remplie lorsque le soleil est à un angle de **41,8°** au-dessus de l'horizon (ou **48,2°** à partir de la verticale). Le rayonnement **AM1.5** correspond à une irradiance moyenne d'environ **900 W/m2**, mais a été normalisé à **1000 W/m2** ou **1 kW/m2**. De nombreuses informations sur les cellules solaires, comme l'efficacité, seront exprimées en fonction de cette norme, car **AM1.5** représente le spectre idéal de la lumière solaire reçue aux latitudes tempérées, où se déroule une grande partie de la recherche solaire [22].



### 1.2.3 Bilan énergétique de la terre

Le bilan énergétique de la Terre est un modèle scientifique qui quantifie l'énergie que la Terre reçoit du Soleil et les chemins que prend cette énergie lorsqu'elle interagit avec la géosphère terrestre et la traverse avant de retourner dans l'espace [14].

Dans ce modèle, 30 % (atmosphère (6 %) + nuages (20 %) + surface de la Terre (4 %)) du rayonnement solaire entrant (rayonnement à ondes courtes) est réfléchi dans l'espace avant d'être converti en chaleur (rayonnement thermique ou rayonnement à ondes longues). Après avoir pénétré dans l'atmosphère terrestre, les 70% restants de ce rayonnement solaire sont absorbés (et convertis en chaleur) par les terres et les océans (51%), l'atmosphère (16%) et les nuages (3%). Après la conversion en chaleur, toute cette chaleur (qui est le produit total de la conversion des 70 % du rayonnement solaire entrant) est renvoyée dans l'espace par plusieurs voies. Ce modèle, en substance, montre que toute l'énergie qui entre dans la géosphère de la Terre en ressort [14].

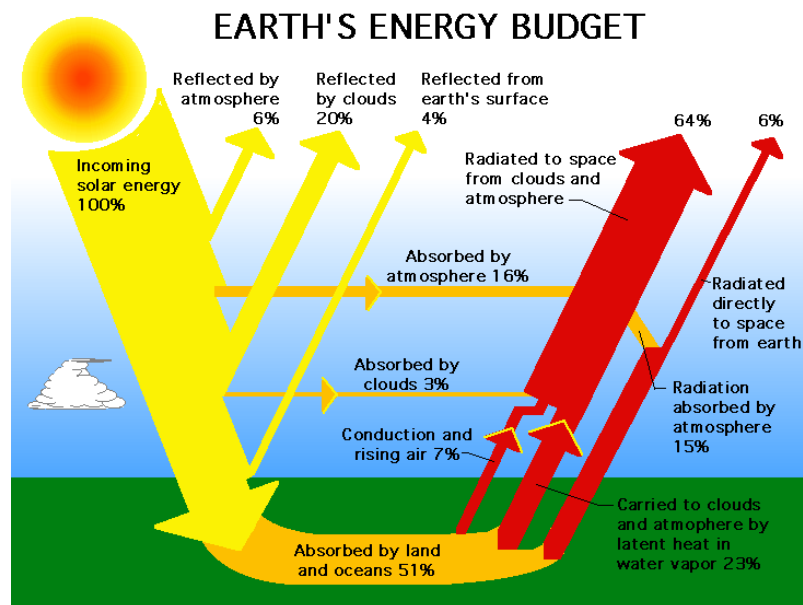


Figure 1. 9 Schéma du budget énergétique global. [14]

#### 1.2.3.1 Réflectivité

Le rayonnement solaire qui atteint la surface de la Terre sans être modifié par aucun des processus atmosphériques est appelé rayonnement solaire direct. Le rayonnement solaire qui atteint la surface de la Terre après avoir été modifié par le processus de diffusion est appelé rayonnement solaire diffus. Tous les rayonnements

directs et diffus ne sont pas disponibles à la surface de la Terre. Une partie du rayonnement reçu à la surface de la Terre est redirigée vers l'espace par réflexion[13].

**L'albédo** est l'expression de la capacité des surfaces à réfléchir la lumière du soleil (chaleur du soleil). Les surfaces claires renvoient une grande partie des rayons du soleil vers l'atmosphère (albédo élevé). Les surfaces sombres absorbent les rayons du soleil (albédo faible).[23]

Tableau 1. 1 Valeurs de réflectivité de diverses surfaces. [24]

| Surface          | Détails                          | Albedo    |
|------------------|----------------------------------|-----------|
| Sol              | Sombre et humide ou clair et sec | 0.05-0.4  |
| Sable            |                                  | 0.15-0.45 |
| Herbe            | Longues & versus courtes         | 0.16-0.26 |
| Champs agricoles |                                  | 0.18-0.25 |
| Toundra          |                                  | 0.18-0.25 |
| Forêts           | Feuilles caduques                | 0.15-0.20 |
|                  | Conifères                        | 0.05-0.15 |
| Eau              | Petit angle zénithal             | 0.03-0.1  |
|                  | Grand angle zénithal             | 0.1-1     |
| Neige            | Vieux versus frais               | 0.4-0.95  |
| Glace            | Mer                              | 0.3-0.45  |
|                  | Glacier                          | 0.20-0.40 |
| Nuages           | Épais                            | 0.60-0.90 |
|                  | Mince                            | 0.30-0.50 |

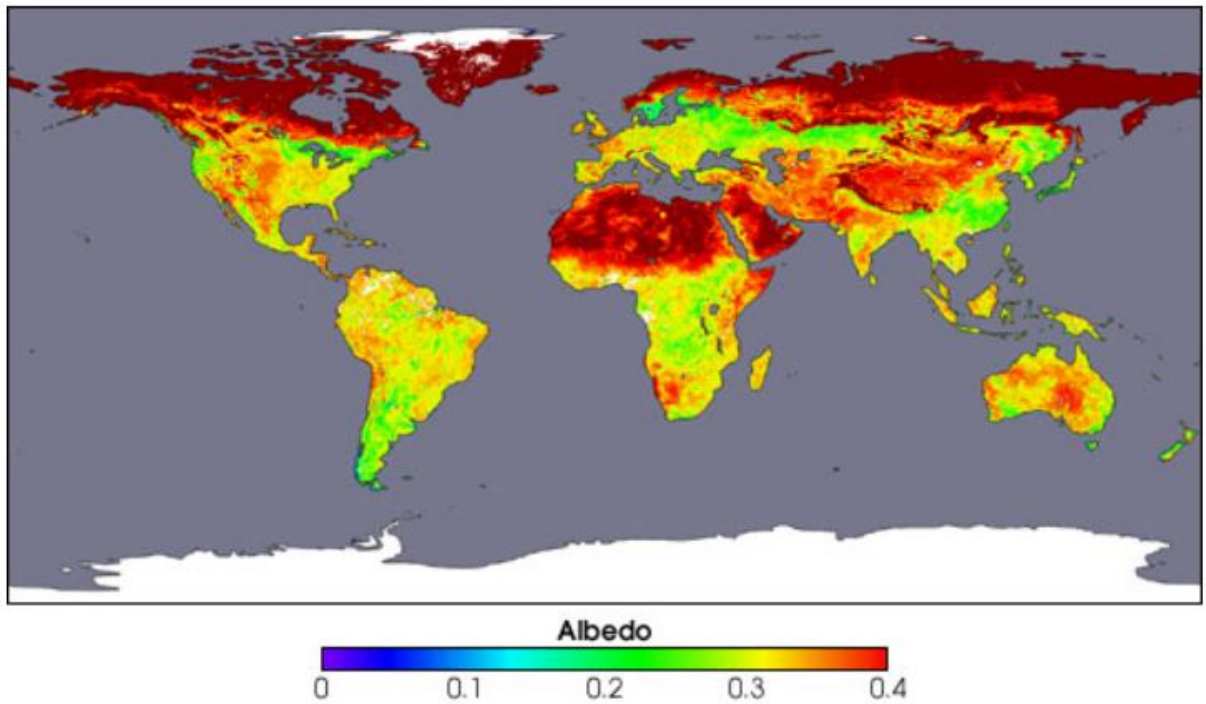


Figure 1. 10 Albédo/Réflexion globale [25].

### 1.2.3.2 Relations Soleil-Terre

La constante solaire,  $G_{sc}$  est l'énergie du soleil, par unité de temps, reçue sur une unité de surface perpendiculaire à la direction de propagation du rayonnement, à la distance moyenne terre-soleil, en dehors de l'atmosphère, même si ce n'est pas vraiment une valeur constante. Ce nombre varie avec les changements de la surface du soleil, tels que les éruptions solaires et les taches solaires, mais il est principalement affecté par la distance entre le soleil et la terre qui change continuellement lorsque la terre se déplace sur son orbite. La constante solaire journalière est déterminée par l'équation (1.6). L'orbite elliptique de la Terre La trajectoire elliptique ne provoque que de faibles variations ( $\pm 3\%$ ) de la quantité de rayonnement solaire atteignant la Terre [13,19].

$$G_{on} = 1367[1 + 0,033 \cos(360N / 365)] \quad 1.6$$

Où  $G_{on}$  est le rayonnement mesuré sur le plan normal au rayonnement le Nième jour de l'année.

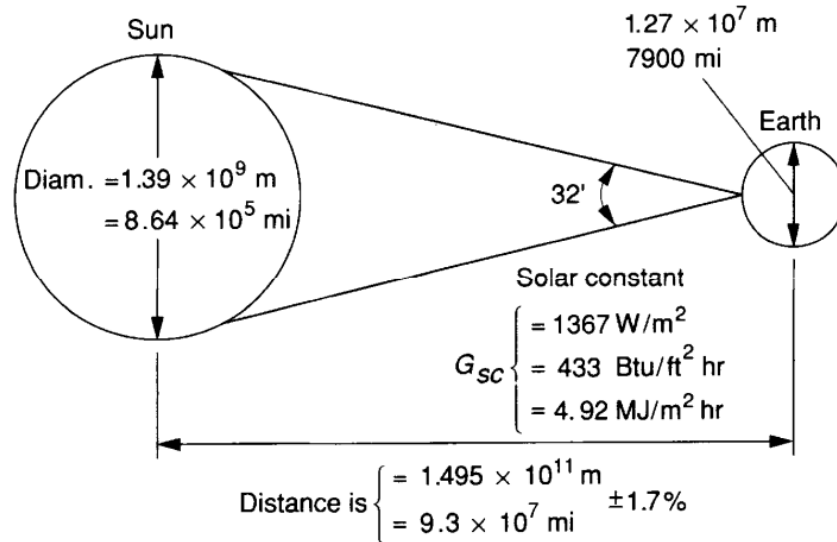


Figure 1. 11 Schéma de la relation soleil-terre [13].

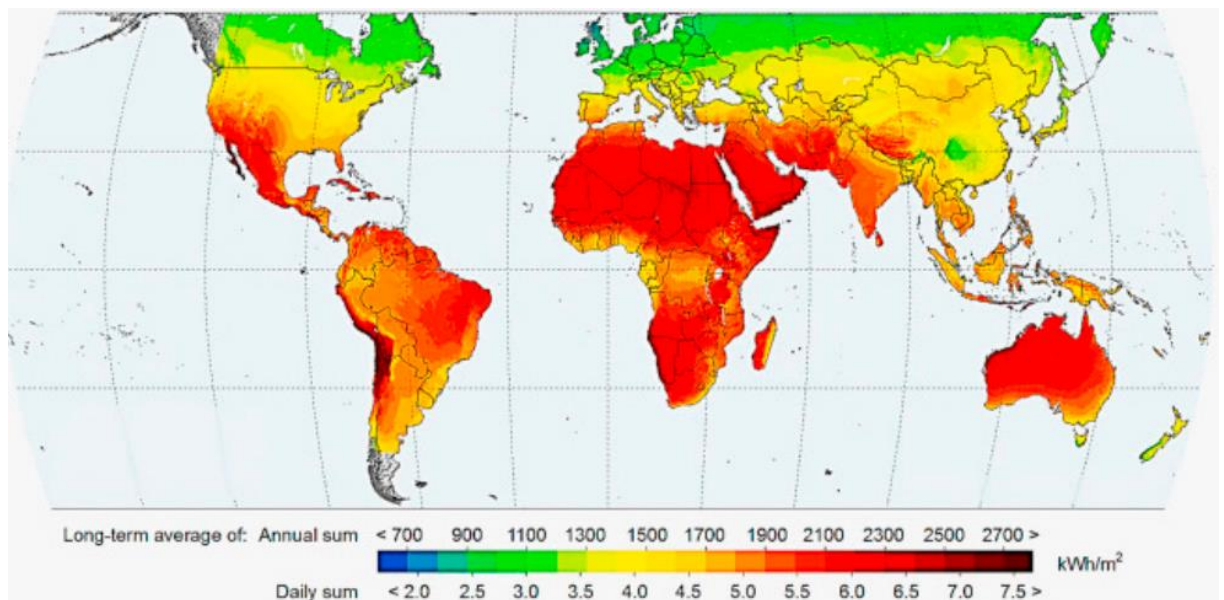


Figure 1. 12 Carte des ressources solaires. [26]

### 1.2.3.2.1 Angle du soleil et l'intensité de l'énergie.

L'inclinaison axiale de la Terre (également connue sous le nom d'obliquité de l'écliptique) est d'environ 23,5 degrés. En raison de cette inclinaison axiale, le soleil brille sur différentes latitudes à des angles différents tout au long de l'année. Cela provoque les saisons[27].

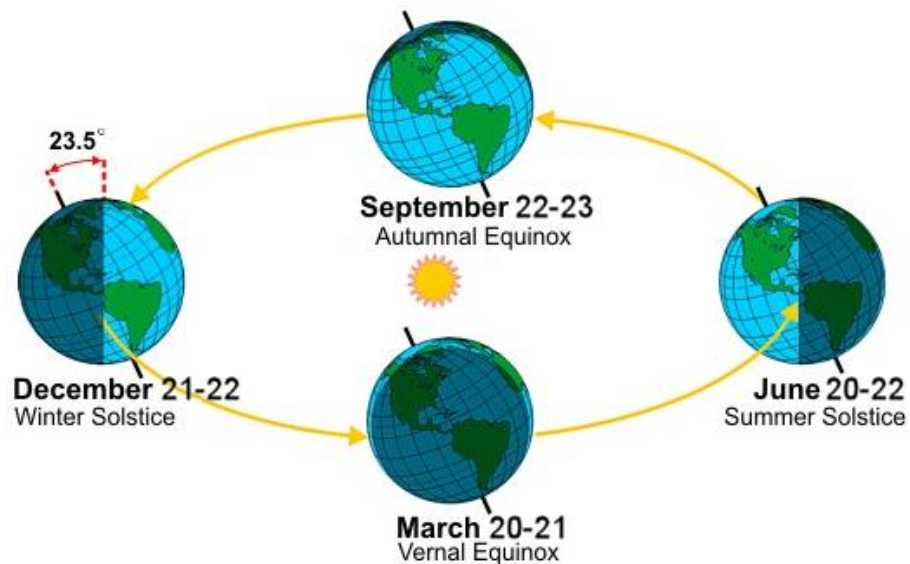


Figure 1. 13 L'orbite de la Terre autour du soleil. [28]

Le rayonnement solaire entrant le plus intense se produit là où les rayons du soleil frappent la Terre à l'angle le plus élevé. Au fur et à mesure que l'angle du soleil diminue, le faisceau de lumière est réparti sur une plus grande surface et son intensité diminue. Pendant les mois d'été, la Terre est inclinée vers le Soleil, ce qui donne des angles solaires élevés. Pendant l'hiver, la Terre est orientée à l'opposé du Soleil, ce qui crée des angles solaires faibles[13].

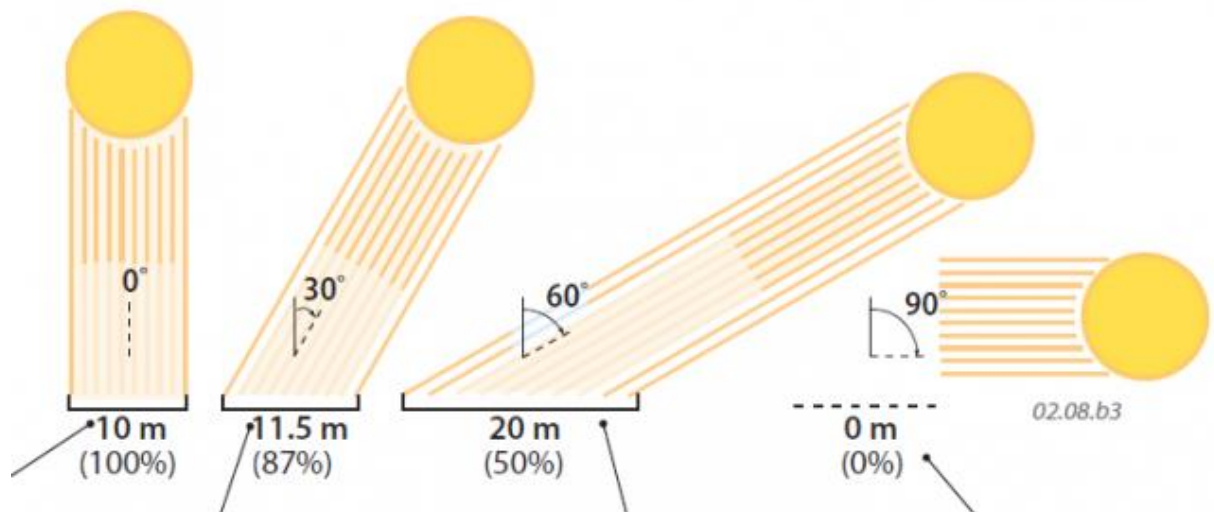


Figure 1. 14 Soleil à quatre positions différentes (angles zénithaux). [29].

La position du soleil est dictée à la fois par l'heure de la journée et par la période de l'année. En termes simples, les calculs d'angle solaire sont effectués en heure solaire. L'heure solaire est ajustée par rapport à l'heure standard de sorte que le soleil soit plein sud à midi. L'heure solaire est synchrone avec l'heure standard locale, mais elle est en

avance ou en retard sur l'heure standard en raison de deux facteurs. Le premier facteur est la différence entre la longitude locale et la valeur de la longitude standard qui définit le fuseau horaire local. L'autre facteur est l'équation du temps (ET), qui existe du fait que la trajectoire de la terre autour du soleil est une ellipse et non un cercle. Les longitudes standard sont mesurées par incréments de **15°**, **0°** étant situé à Greenwich, en Angleterre[19].

Pour mieux comprendre la géométrie solaire, nous devons considérer les termes géométriques suivants :

- **altitude solaire** : c'est l'angle du soleil au-dessus de l'horizon.
- **Latitude  $\varphi$**  : pour les lieux autres que l'équateur, la latitude modifie davantage l'angle zénithal.
- **Surface** : est l'angle entre la direction de la surface et le plein sud.
- **Angle d'azimuth solaire  $\alpha$**  : est l'angle entre la direction du soleil et le plein sud, varie de  $-90^\circ$  au lever du soleil (est) à  $+90^\circ$  au coucher du soleil (ouest).
- **la déclinaison  $\delta$**  : est la position angulaire du soleil à midi solaire par rapport au plan de l'équateur. Elle varie de  $-23,45^\circ$  au solstice d'hiver à  $+23,45^\circ$  au solstice d'été selon :

$$\delta = 23,45 \frac{\pi}{180} \sin\left(2\pi \frac{284 + n}{365}\right) \quad 1.7$$

**n** désigne le jour de l'année **n = 1...365**

- **L'angle horaire  $\Omega$**  : est la rotation quotidienne de la terre. Comme la terre tourne sur  $360^\circ$  en 24 heures, chaque heure ajoute  $15^\circ$  à l'angle horaire solaire. Lorsque le soleil est à son point le plus haut dans le ciel, l'angle horaire solaire est nul. Les angles avant midi comptent négativement, après midi ils comptent positivement.
- **Angle zénithal  $\theta$**  : c'est l'angle entre une ligne partant du soleil et une ligne orthogonale à la surface horizontale. L'orientation d'une zone par rapport au soleil est mieux décrite par l'angle zénithal qui est lié à la latitude, au jour et à l'heure via :

$$\cos(\theta) = \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\Omega) \quad 1.8$$

Pour obtenir l'intensité, il faut multiplier l'intensité maximale par le cosinus de l'angle zénithal. L'équation ci-dessus n'est vraie que lorsque le soleil peut être observé, ce qui nous permet de déterminer les heures de lumière du jour sur une surface horizontale comme suit :

$$Hours = \frac{24}{\pi} \arccos(-\tan(\phi) \tan(\delta)) \quad 1.9$$

Évidemment, en moyenne sur l'année, chaque endroit de la planète dispose du même nombre d'heures de lumière du jour. Toutefois, la répartition annuelle varie en fonction de la latitude. Si les villes situées à une latitude plus élevée bénéficient de plus d'heures de lumière du jour en été, l'intensité maximale reste plus faible en raison de l'angle zénithal plus important [30].

Tableau 1. 2 Déclinaison solaire. [31]

| Date       | Degree de Déclinaison | Date         | Degree de Déclinaison |
|------------|-----------------------|--------------|-----------------------|
| 21 Janvier | -20.90                | 21 Juillet   | 20.50                 |
| 21 Fevrier | -10.83                | 21 Aout      | 12.38                 |
| 21 Mars    | 0.0                   | 21 Septembre | 1.02                  |
| 21 Avril   | 11.58                 | 21 Octobre   | -10.42                |
| 21 Mai     | 20.03                 | 21 Novembre  | -19.75                |
| 21 Juin    | 23.45                 | 21 Decembre  | -23.43                |

Deux angles sont utilisés pour définir la position du soleil, par rapport à un observateur sur Terre; Les angles d'azimuth et d'altitude solaires sont utilisés pour décrire l'emplacement du soleil dans le ciel.

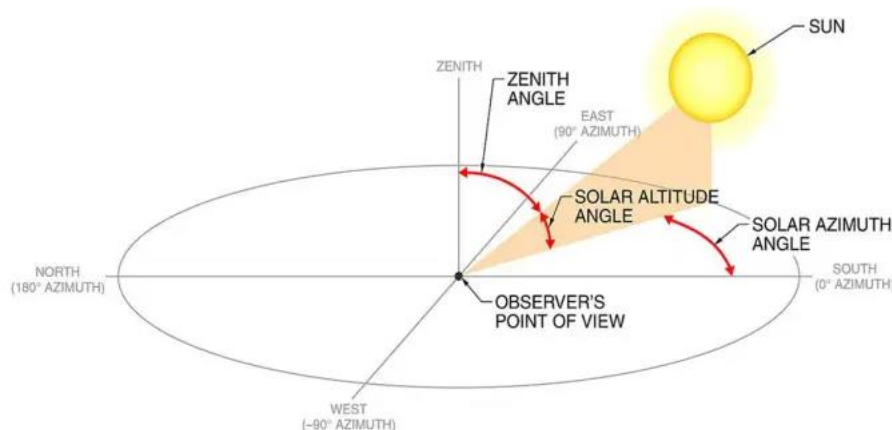


Figure 1. 15 Angles du soleil. [31]



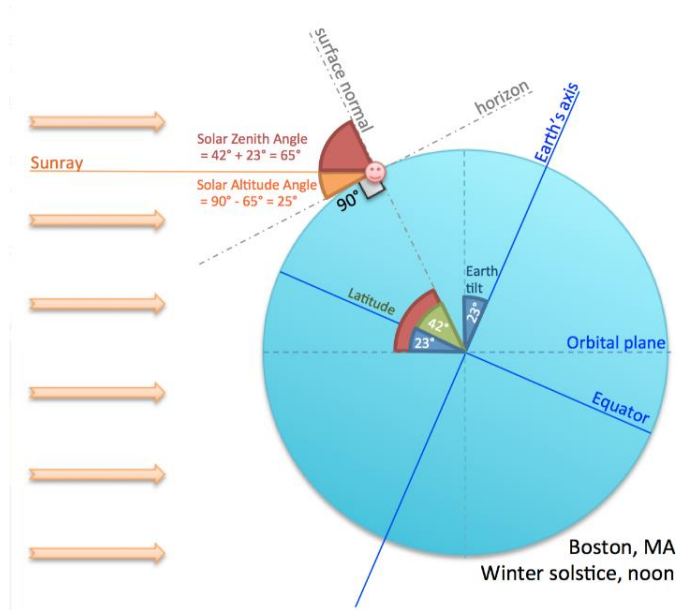


Figure 1. 16 Angle d'altitude solaire pour Boston,MA au solstice d'hiver, à midi. [33]

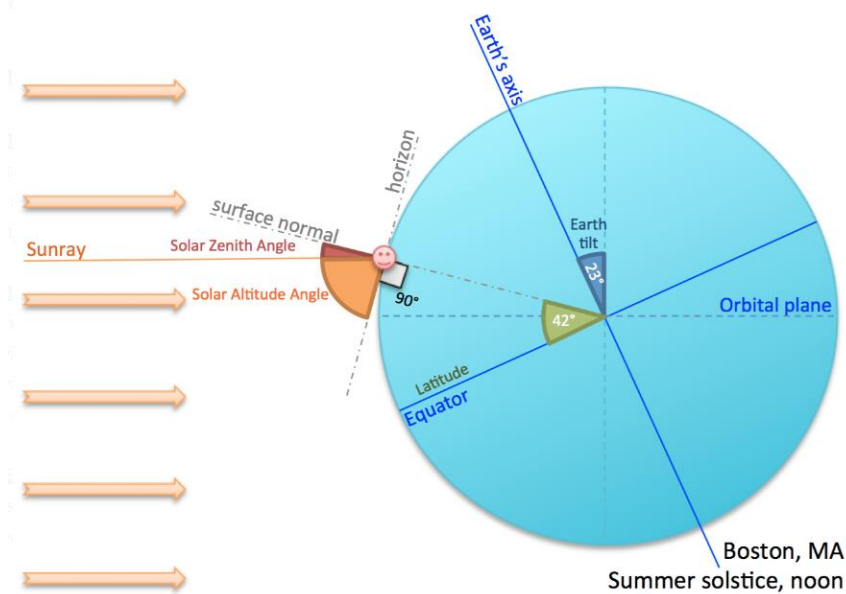


Figure 1. 17 Angle d'altitude solaire pour Boston, MA au solstice d'été, à midi [33].

Lorsque l'on considère la surface d'un dispositif solaire, la relation entre cette surface et la position du soleil peut nous donner la proportion de l'énergie entrante qui est disponible pour le dispositif. Par conséquent, l'orientation du dispositif devient un facteur important. L'orientation du dispositif dépend essentiellement de deux facteurs : l'angle d'incidence et l'angle d'inclinaison.



- angle d'incidence : est l'angle entre un faisceau de lumière solaire et la direction normale à la surface.
- angle d'inclinaison (b) : c'est l'angle entre le dispositif et l'horizontale ; cependant, l'angle d'incidence est fonction de l'angle d'inclinaison.

L'efficacité d'un dispositif de collecte solaire dépend grandement de son orientation par rapport au soleil. Lorsque l'angle d'incidence est réduit, la quantité de lumière solaire qui frappe le capteur augmente simplement parce que la surface projetée orthogonale à la lumière solaire entrante augmente. Un diagramme simple de cette corrélation est présenté ci-dessous dans la figure [19].

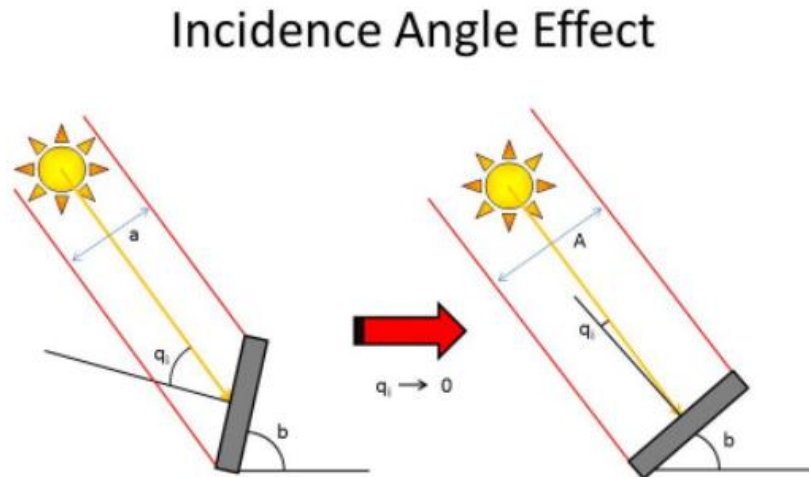


Figure 1. 18 Effet de l'angle d'incidence sur le rendement. [19]

Tableau 1. 3 Pourcentage du rayonnement incident réfléchi par une surface d'eau (albédo de l'eau). [31]

| Angle of incidence | Percent reflected | Percent absorbed |
|--------------------|-------------------|------------------|
| 90                 | 2.0               | 98.0             |
| 70                 | 2.1               | 97.9             |
| 50                 | 2.5               | 97.5             |
| 40                 | 3.4               | 96.6             |
| 30                 | 6.0               | 94.0             |
| 20                 | 13.0              | 87.0             |
| 10                 | 35.0              | 65.0             |
| 5                  | 58.0              | 42.0             |

1.2.3.2.2 Graphique de l'intensité et de l'énergie

En appliquant les formules précédentes, nous avons établi quelques graphiques pour démontrer l'impact de la latitude sur les heures de lumière du jour, l'intensité et l'énergie quotidienne. Les valeurs d'intensité et d'énergie doivent être considérées comme des valeurs maximales qui ne seront atteintes que si le ciel est très clair.[30]

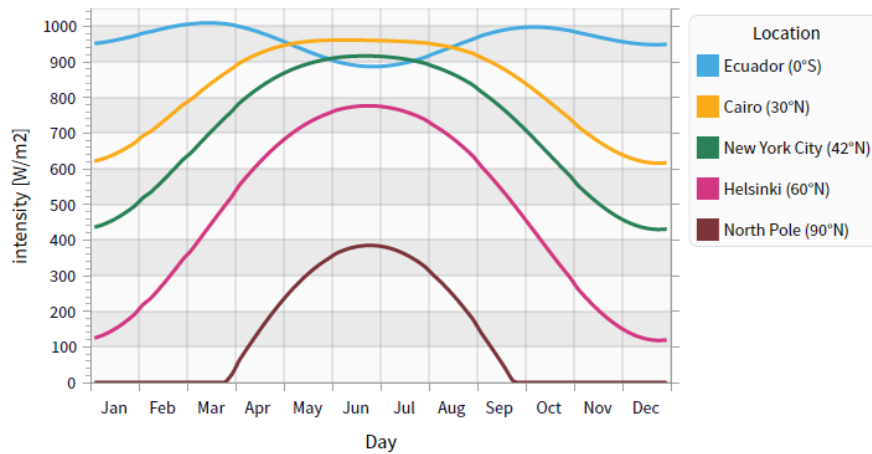


Figure 1. 19 Graphique de l'intensité solaire mondiale. [30]

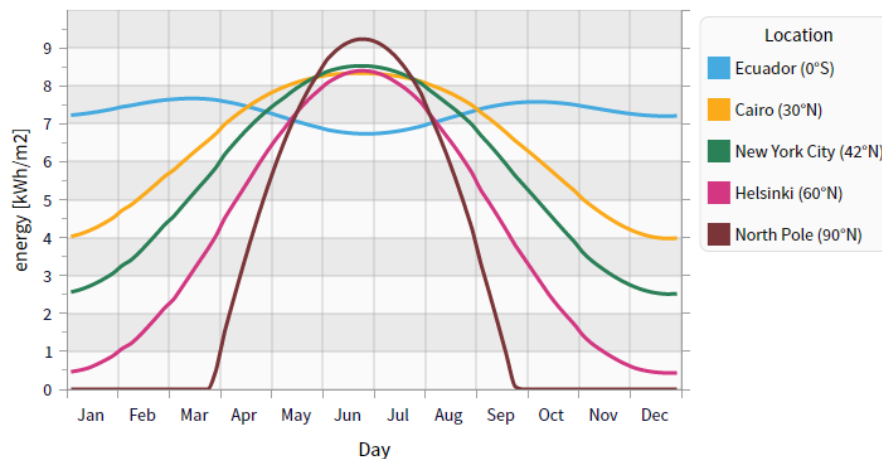


Figure 1. 20 Graphique de l'énergie solaire mondiale. [30]

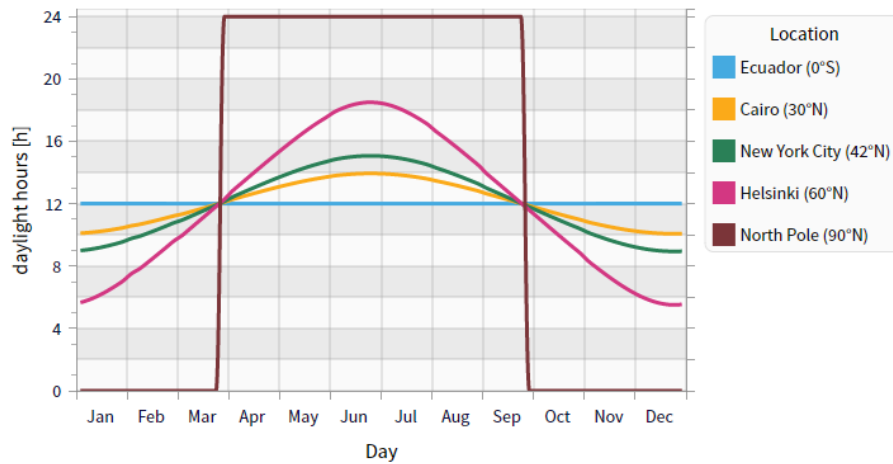


Figure 1. 21 Graphique des heures de lumière du jour dans le monde [30].

### 1.3 Rayonnement solaire en Algerie

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Son évolution peut se faire à partir des données de l'irradiation solaire globale. Elle est utilisée pour simuler le fonctionnement probable d'un système énergétique solaire et donc faire le dimensionnement le plus exact possible compte tenu des demandes à satisfaire.[34,35].

L'Algérie de par sa situation géographique (située entre le 19ème et le 38ème parallèle nord), constitue sur le globe terrestre une zone particulièrement bien ensoleillée. Aussi les moyennes annuelles d'ensoleillement varient entre 2600 h/an dans le Nord à 3500 h/an dans le Sud.[37] L'irradiation moyenne annuelle atteint 2 000 kWh/m<sup>2</sup>, ce qui est un niveau acceptable par rapport aux voisins régionaux : Maroc (2 200 kWh/m<sup>2</sup>), Egypte (1 300 kWh/m<sup>2</sup>) et Tunisie (1 905 kWh/m<sup>2</sup>. [37]

Dans ce cadre , l'équipe de recherche en gisement solaire du laboratoire « Evaluation du potentiel énergétique », s'est assignée pour objectif le développement d'une méthodologie qui a permis une estimation réaliste du gisement solaire pouvant être exploité à des fins énergétiques par les concepteurs de systèmes solaires[38]. Les figures sont présentées ci-dessous :

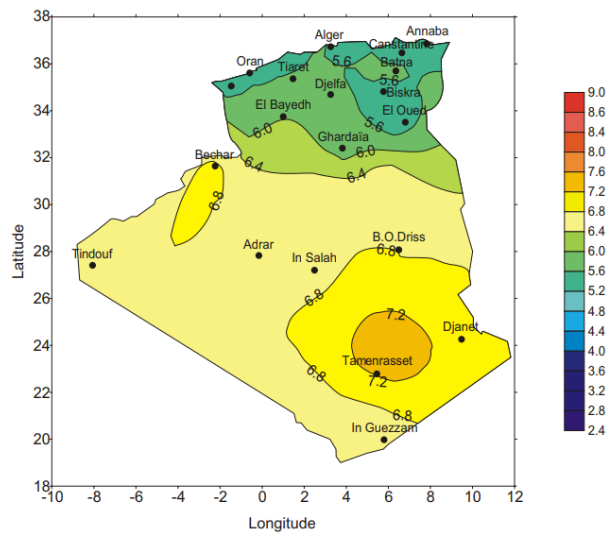


Figure 1. 22 Irradiation solaire globale reçue sur plan incliné à la latitude du lieu : moyenne annuelle.[38]

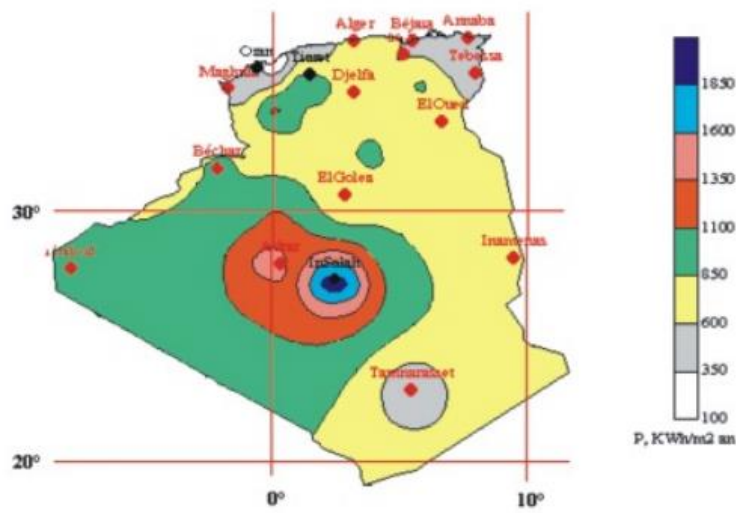


Figure 1. 23 Densité de puissance moyenne récupérable annuelle à 10 m.[39]

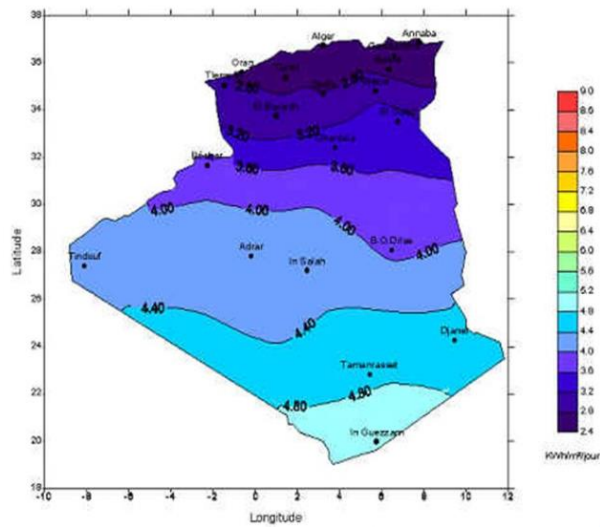


Figure 1. 24 Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontal au mois de Decembre.

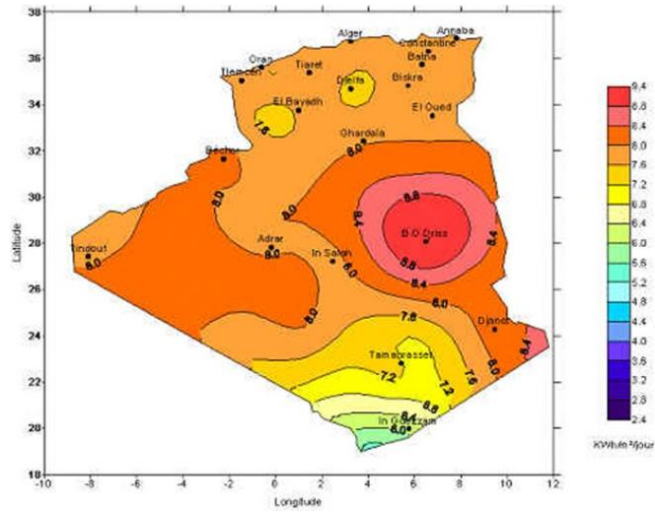


Figure 1. 25 Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontal au mois de Juillet.

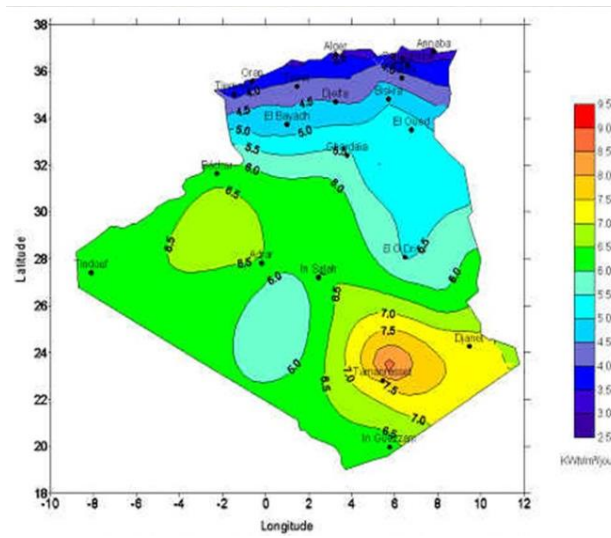


Figure 1. 26 Irradiation directe journalière reçue sur plan normal au mois de Décembre.

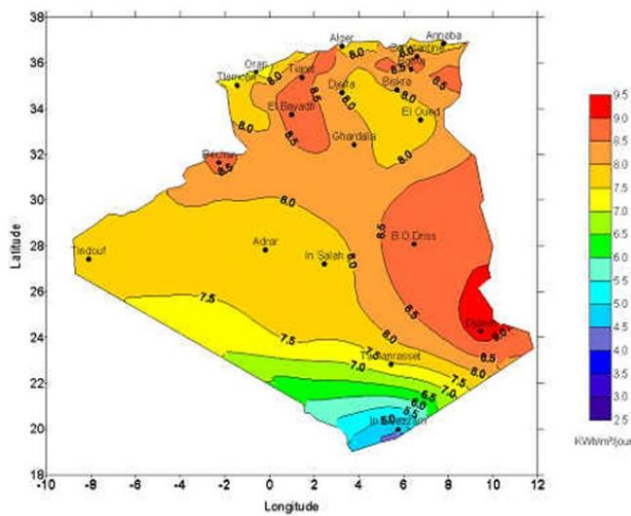


Figure 1. 27 Irradiation directe journalière reçue sur plan normal au mois de Juillet.

### 1.3.1 Energie Solaire en Algerie

L'Algérie joue un rôle clé sur les marchés mondiaux de l'énergie en tant que principal producteur et exportateur de gaz naturel et de gaz naturel liquéfié. Le mix énergétique de l'Algérie en 2010 était presque exclusivement basé sur les combustibles fossiles, en particulier le gaz naturel (93%). Cependant, l'Algérie dispose d'un énorme potentiel d'énergies renouvelables, principalement solaire, que le gouvernement tente d'exploiter en lançant un ambitieux programme d'énergies renouvelables et d'efficacité énergétique.[40]

Le Potentiel réellement exploitable en Algérie :

1. Productible CSP : estimé à 169 440 TWh/an.
2. Productible PV : estimé à 14 TWh/an.

Tableau 1. 4 Potentiel Solaire en Algerie ; Samedi 2 Juin 2018/Parc ENR Actuel.[40]

| Régions  | Région cotière | Hauts plateaux | Sahara |
|--|----------------|----------------|--------|
| Superficie (%)                                 | 4              | 10             | 86     |
| Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)     | 2650           | 3000           | 3500   |
| Energie moyenne reçue (Kwh/m <sup>2</sup> /an) | 1700           | 1900           | 2650   |

### 1.3.2 Centrales Solaires

Afin de préserver les réserves énergétiques actuelles (pétrole et gaz), le pays a opté pour le développement et l'exploitation de l'énergie solaire.[42] A ce jour, la part de l'électricité renouvelable représente 2% du mix énergétique du pays. L'Algérie dispose d'une capacité installée d'ER estimée à 354 mégawatts (MW), dont 344 MW d'énergie photovoltaïque, produite par 24 centrales électriques. En outre, un appel d'offres pour produire 150 MW d'énergie solaire (plusieurs centrales solaires photovoltaïques de 10MW chacune) a été lancé par la Commission de régulation de l'électricité et du gaz (CREG) en novembre 2018.[43]

Tableau 1. 5 Puissance installée sur chaque centrale d’Algérie.[41]

| Centrales          | P.Installée (MWc) | Centrales                      | P.Installée (MWc) |
|--------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------|
| 1-Réseau PIAT      |                   | 3-Réseau RIN                   |                   |
| Eolienne Kabertène | 10.2              | Oued Nechou PV (Ghardaia)      | 1.1               |
| Adrar              | 20                | Sedret Leghzel (Naàma)         | 20                |
| Kabertène          | 03                | Oued El Kebrit ( Souk Ahras)   | 15                |
| In Salah           | 05                | Ain Skhouna (Saida)            | 30                |
| Timimoune          | 09                | Ain El Bel (Djelfa) 1 et 2     | 53                |
| Regguen            | 05                | Lekhneg ( Laghouat) 1et 2      | 60                |
| Zaouiat Kounta     | 06                | Telagh ( Sidi-Bel-Abbes)       | 12                |
| Aoulef             | 05                | Labiodh Sidi Chikh (El-Bayadh) | 23                |
| 2-Réseau RIS       |                   | El Hdjira (Ouargla)            | 30                |
| Tamanrasset        | 13                | Ain-El-Melh (M’sila)           | 20                |
| Djanet             | 03                | Oued El Ma (Batna)             | 02                |
| Tindouf            | 09                | Total SKTM (EnR)               | 354.3             |



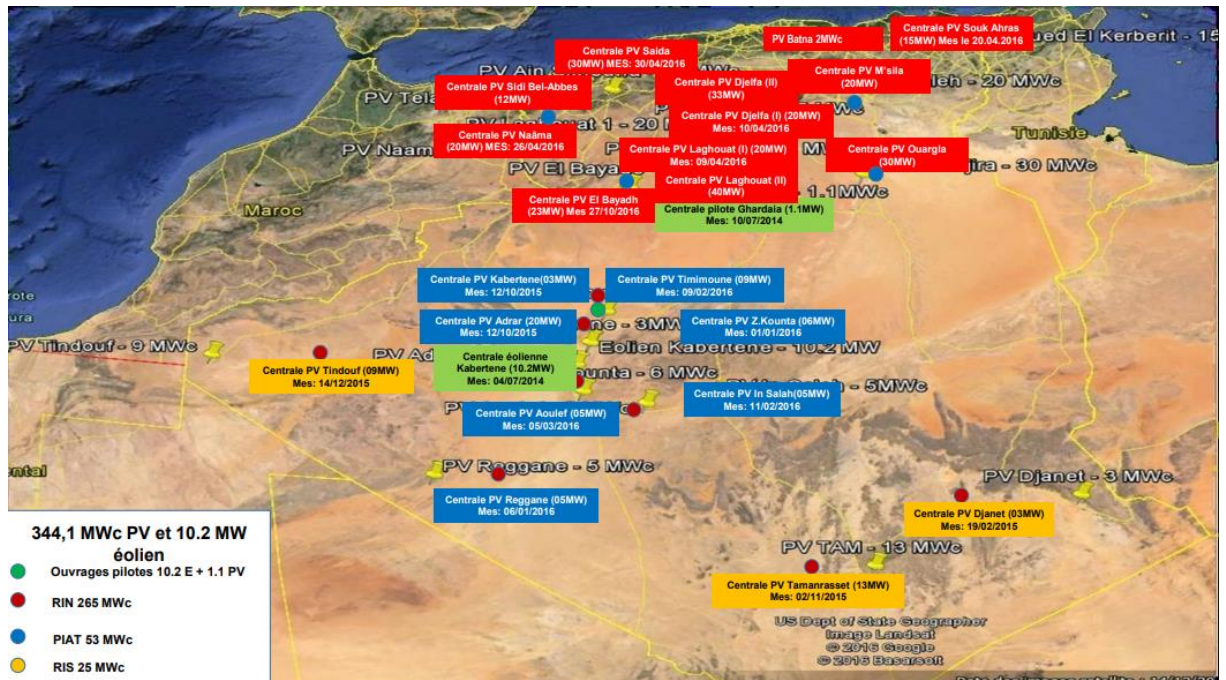


Figure 1. 28 Centrales solaires sur Carte d'Algérie.[41]

1.3.2.1 Centrale Solaire Ain Skhouna, Saida

La centrale solaire photovoltaïque d'Ain Skhouna a été mise en service en 2018, elle fait partie de 23 stations similaires construites à travers les hauts plateaux et le sud du pays pour produire 400 mégawatts. Tous les champs solaires de la centrale d'Ain Skhouna occupent une superficie de 42.3 ha avec 119520 panneaux photovoltaïques (CS6P-250P-silicium poly-cristallin) [44]. Avec sa capacité de 30 mégawatts, cette centrale solaire photovoltaïque pour la production d'énergie électrique est la première du genre dans la région sud-ouest et dont la réalisation a nécessité la mobilisation d'un investissement de près de 3,9 milliards de dinars [45].



Figure 1. 29 Les champs photovoltaïques de la centrale d'Ain Skhouna.[44]



Tableau 1. 6 Caractéristiques électriques des modules PV de la centrale d'Ain Skhouna.[44]

| Type de module            | PV CS6P-250P                 |
|---------------------------|------------------------------|
| Données électriques       |                              |
| Puissance maximale (Pmax) | 250 W                        |
| Dimensions                |                              |
| Longueur                  | 1.638 m                      |
| Largeur                   | 0.982 m                      |
| Poids                     | 18.5 kg                      |
| Cellules                  |                              |
| Nombre par module         | 60                           |
| Technologie de cellule    | poly-cristalline             |
| Taille de cellule (carré) | (0.163*0.163) m <sup>2</sup> |
| Rendement de cellule      | 15.54 %                      |

### 1.3.2.2 Centrale Solaire de OuedNechou, Ghardaïa

La Centrale en panneaux photovoltaïques 1.1 MW sur un site à environ 15 km au Nord de la ville de Ghardaïa, près du village d'OuedNechou. s'inscrit dans le cadre du programme de développement des énergies renouvelables. Cette centrale pilote permettra de tester le comportement de ce genre d'équipements et son adaptation au climat du Sud. La réalisation de cette centrale à aussi pour objectif d'évaluer la rentabilité des panneaux photovoltaïques avant de généraliser cette opération sur le territoire national.[46]



Figure 1. 30 Panneaux solaires centrale Ghardaïa.[47]

Tableau 1. 7 Caractéristiques de la Centrale de Ghardaïa.[46]

| Caractéristiques                                     |                       |
|--|-----------------------|
| Superficie   | 6 Hectares            |
| Puissance Nominale                                   | 1.1 MW                |
| Coordonnées géographiques                            | 32°24N 03°48 E        |
| Température Ambiante maximale                        | 50°                   |
| Nombre de panneaux solaires                          | 6089                  |
| Types de panneaux                                    |                       |
| panneaux en silicium monocristallin                  | 452 kWc/1880 panneaux |
| panneaux en silicium polycristallin                  | 452 kWc/1960 panneaux |
| panneaux en silicium amorphe (a-Si)                  | 100 kWc/988 panneaux  |
| panneaux en couches minces (tellure de cadmium CdTe) | 100 kWc/1261 panneaux |

### 1.3.2.3 Centrale CSP hassi Rmel, Laghouat

La centrale SPP1 est située à 494.5 km au sud de la capitale Alger, a la limite sud de la wilaya de Laghouat. Elle est implantée sur un terrain qui s'étend sur une superficie de 130 hectares. On y accède par la route nationale N° 1. L'existence d'un réseau électrique le long de la RN 1 a favorise le choix de ce site.[38]



Figure 1. 31 Capteurs solaires cylindro-parabolique hassi Rmel.[48]

#### 1.3.2.3.1 Motivation du choix du lieu d'implantation

La région de Hassi R'mel est caractérisée par les conditions météorologiques suivantes :

- Terrain plat.
- 700 m d'altitude.
- Une moyenne de 9,5 heures d'ensoleillement.
- Une humidité relative de 24%.
- Une pression atmosphérique égale à 0.928 bar.
- Des vitesses du vent qui varient entre 2.14 et 4.15 m/s.
- Des températures extrêmes qui varient de  $-10^{\circ}\text{C}$  en hiver à  $+50^{\circ}\text{C}$  en été (Voir Tableau III1).
- Une insolation normale directe DNI (Direct Normal Irradiation) qui peut atteindre un maximum de  $950\text{ W/m}^2$  en été.[49]

Cette centrale est composée de deux parties, le champ solaire et le cycle combine :

#### 1.3.2.3.2 Le champ solaire

Il est constitué de capteurs cylindro-paraboliques, repartis sur deux surfaces. Chaque surface contient 28 boucles de quatre modules, repartis en 2 rangées. Le module est forme de 12 segments comportant chacun plusieurs miroirs. La composante directe du rayonnement solaire incident est concentrée par les miroirs sur un récepteur situe au point focal de la parabole. Un fluide caloporteur HTF (Heat Transfer Fluid) circule a l'intérieur du récepteur. Le fluide chauffé, dont la température peut atteindre  $393^{\circ}\text{C}$ , passe a travers

une série d'échangeurs de chaleur pour céder sa chaleur à l'eau et produire ainsi de la vapeur d'eau (générateur de vapeur solaire).[49]

### **1.3.2.3.3 Le cycle combine**

Il est constitué de 2 turbines à gaz (fonctionnant au gaz naturel) dont la puissance nominale unitaire est de 45 MW. La chaleur de combustion de ces turbines est récupérée dans deux chaudières horizontales à circulation naturelle. Ces dernières font fonctionner une turbine à vapeur d'une puissance nominale de 80.08 MW[49]. Il est à noter que le point fort de cette centrale hybride est l'ajout de la vapeur produite par le champ solaire à celle récupérée des turbines à gaz pour alimenter la turbine à vapeur. La puissance électrique produite par la centrale augmente en conséquence [50].

Le Tableau suivant fournit des informations sur le projet ISCC Hassi R'mel CSP, un projet d'énergie solaire à concentration (CSP), avec des données organisées par contexte, participants, et configuration de la centrale [51].

## **1.4 Les Différents types de systèmes solaire**

### **1.4.1 Système solaire photovoltaïque**

Le photovoltaïque (PV) est la conversion directe de la lumière en électricité. Certains matériaux, comme le silicium, libèrent naturellement des électrons lorsqu'ils sont exposés à la lumière, et ces électrons peuvent ensuite être exploités pour produire un courant électrique. Plusieurs fines tranches de silicium sont câblées ensemble et enfermées dans un boîtier de protection robuste ou panneau. Les panneaux PV produisent de l'électricité en courant continu (CC), qui doit être convertie en courant alternatif (CA) pour faire fonctionner les appareils ménagers standard [45].

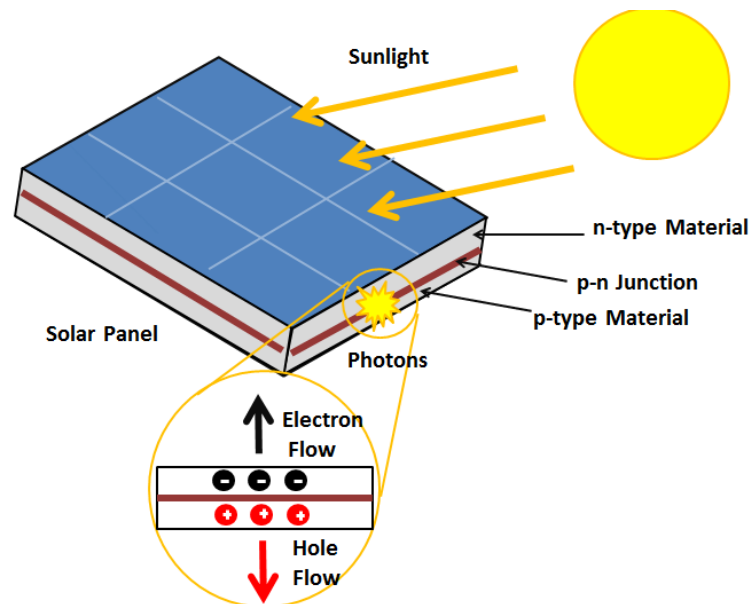


Figure 1. 32 Schéma montrant l'effet photovoltaïque. [52]

#### 1.4.1.1 Groupes de système photovoltaïque

Les systèmes photovoltaïques peuvent généralement être divisés en deux groupes :

##### 1.4.1.1.1 Systèmes photovoltaïques non connectés au réseau, systèmes autonomes (off-grid)

Ces systèmes sont utilisés dans les zones rurales où il n'y a pas de réseau ni d'infrastructure électrique. Les installations photovoltaïques autonomes typiques sont utilisées pour assurer la disponibilité de l'électricité dans les zones reculées (stations de montagne, îles, zones rurales dans les régions en développement) [44].

##### 1.4.1.1.2 Systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique public (on-grid)

Il s'agit des types de systèmes solaires photovoltaïques les plus populaires qui conviennent aux installations domestiques et commerciales dans les zones développées et urbaines. La connexion au réseau électrique local permet de vendre au distributeur local d'énergie électrique tout excédent d'électricité produit et non utilisé dans la consommation du foyer, car le système photovoltaïque est connecté au réseau via une installation domestique fonctionnant en parallèle avec le système de distribution. De plus, le foyer est alimenté en électricité par le réseau lorsqu'il n'y a pas de temps ensoleillé [44]. La capacité requise du système PV (kW de PV) peut être calculée approximativement comme suit : **Consommation annuelle d'électricité = Consommation mensuelle x 12 mois**. La

consommation d'électricité est exprimée en kilowattheures (kWh). La production d'énergie d'un système électrique solaire (PV) est fonction de plusieurs facteurs, dont ceux présentés dans le tableau ci-dessous [45].

### 1.4.2 Systèmes Solaires Thermiques

Les systèmes solaires thermiques comprennent ceux qui sont basés sur des capteurs thermiques à basse température. Ces systèmes utilisent la chaleur du soleil pour la consommation finale de chaleur. Ce système technologique se compose de deux groupes de capteurs solaires plats et d'un capteur solaire à faible concentration (capteurs à concentration). Un système solaire thermique convertit la lumière du soleil en chaleur et se compose des éléments suivants : un capteur, technologie de stockage (par exemple, chaudière, stockage combiné) et un système de régulation solaire (par exemple, contrôle de la différence de température). L'élément clé du système solaire thermique est le capteur solaire thermique, qui absorbe le rayonnement solaire [53,54].

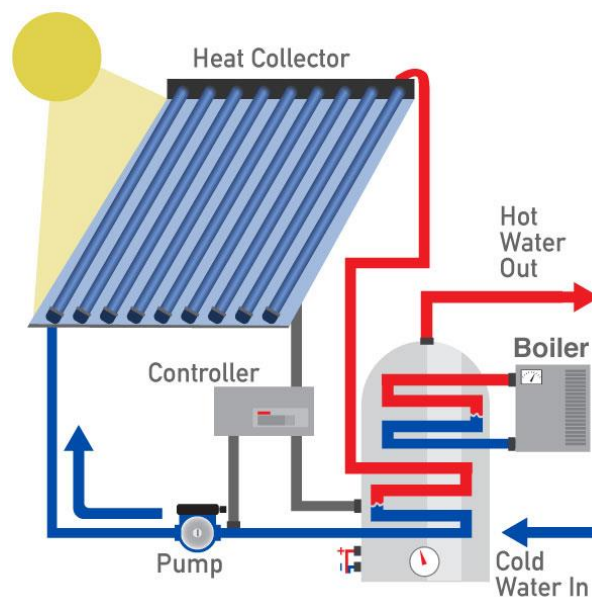


Figure 1. 33 Système solaire thermique [55]

### 1.4.3 Refroidissement solaire

#### 1.4.3.1 Systèmes de refroidissement solaire actifs

Les systèmes de refroidissement solaire actif peuvent être classés en deux grandes catégories ; **réfrigération solaire thermique** et **réfrigération solaire électrique**. Dans le premier cas, des capteurs solaires thermiques sont installés avec le système pour créer un effet de refroidissement. Dans le second, des panneaux photovoltaïques sont utilisés pour alimenter le système conventionnel en électricité.[56]

#### 1.4.3.2 Refroidissement solaire passif

Contrairement au système solaire actif, le flux d'air est obtenu par **l'effet de flottabilité** où l'air chaud à faible densité se déplace vers le haut et l'air froid à forte densité se déplace vers le bas [56]. Le refroidissement solaire passif peut être obtenu par la circulation de l'air dans la pièce par effet de flottaison appelé **ventilation naturelle (Cheminée solaire)** ou par **effet d'évaporation**. [57]

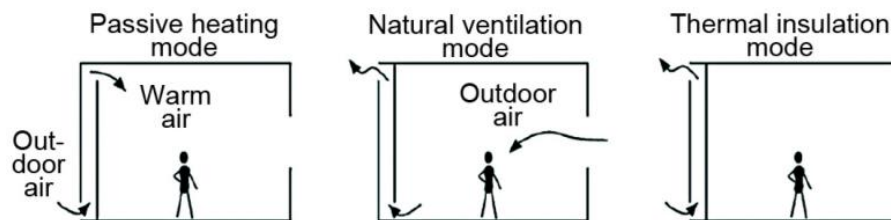


Figure 1. 34 Modes de fonctionnement des cheminées solaires. [58]

### 1.4.4 Concentrateurs solaires thermiques

Ce sont des dispositifs qui permettent de focaliser le rayonnement du soleil sur une surface réduite (foyer), de concentrer l'énergie thermique et la lumière pour l'utiliser facilement dans des dispositifs comme les moteurs Stirling, les systèmes de chauffage, les cuisines solaires, les turbines à vapeur ou les cellules photovoltaïques, entre autres dispositifs qui fonctionnent avec l'énergie thermique ou avec le rayonnement visible du soleil. Ces dispositifs permettent d'utiliser directement l'énergie obtenue ou de la transformer en un autre type d'énergie utile [59,60,61]. Les concentrateurs solaires comprennent trois éléments nécessaires à leur fonctionnement, qui sont mentionnés ci-après : **Récepteur ou absorbeur, Concentrateur ou dispositif optique, Système de suivi solaire** [62]

### 1.4.4.1 Technologies Concentrateurs solaires thermiques

#### 1.4.4.1.1 Parabole solaire

La parabole solaire est l'un des types de technologie solaire concentrée utilisée pour concentrer la lumière du soleil en un seul point fixe appelé point focal. Ce point focal varie d'une parabole à l'autre en raison de différentes tolérances. Elle utilise différents matériaux réfléchissants comme l'aluminium poli, l'argent, les miroirs, etc. pour réfléchir la lumière du soleil sur le cylindre. Elle utilise un système de suivi du soleil à deux axes pour suivre la lumière du soleil [63]. Cette énergie thermique est utilisée pour faire fonctionner le moteur Stirling. Un moteur Stirling utilise le fluide chauffé pour déplacer des pistons et produire de l'énergie mécanique. Ce travail mécanique, sous la forme de la rotation du vilebrequin du moteur, fait tourner un générateur et produit de l'énergie électrique. Les paraboles solaires peuvent atteindre des températures supérieures à 1000 °C [64,65]

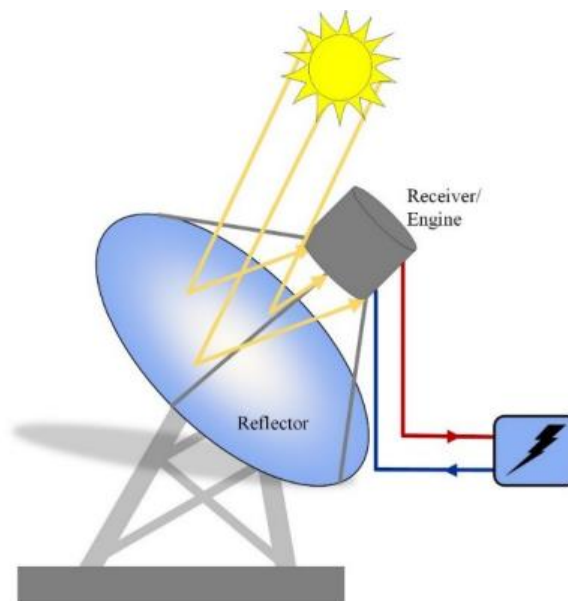


Figure 1. 35 Diagramme schématisé de la parabole [66].

#### 1.4.4.1.2 Système de capteurs Fresnel linéaires

Le rayonnement direct frappe la surface réfléchissante des miroirs qui sont légèrement courbés afin de concentrer les rayons solaires réfléchis. Tous les miroirs sont dans un angle différent car la position relative (soleil - miroir - tube absorbeur) est différente. Les rayons solaires réfléchis frappent le tube absorbeur. Le rayonnement qui manque le tube absorbeur frappe le réflecteur secondaire qui concentre à nouveau le



rayonnement sur le tube absorbeur. Un fluide caloporteur circule dans le tube absorbeur et le chauffe. Le fluide transporte la chaleur vers un processus où il la transfère via des échangeurs de chaleur. Il est ensuite remis en circulation dans le tube absorbeur. Grâce à l'absorbeur à vide, la performance thermique est indépendante de la vitesse du vent. La Température maximale de fonctionnement : 400°C. [67]

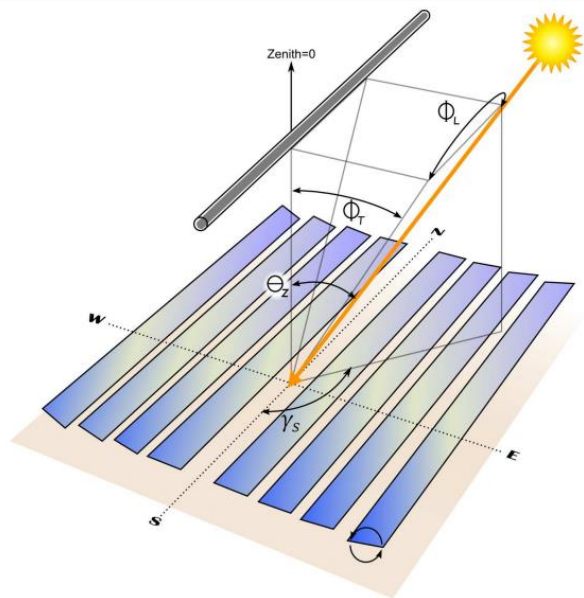


Figure 1. 36 Angles associés à la performance optique de la technologie des collecteurs Fresnel linéaires [68].

#### 1.4.4.1.3 Récepteur ou Tour centrale solaire

Les systèmes de tours électriques ou de récepteurs centraux utilisent des miroirs de poursuite du soleil appelés héliostats pour concentrer la lumière du soleil sur un récepteur au sommet d'une tour. Un fluide caloporteur chauffé dans le récepteur jusqu'à environ 600°C est utilisé pour générer de la vapeur qui, à son tour, est utilisée dans un turbo-générateur conventionnel pour produire de l'électricité [69].

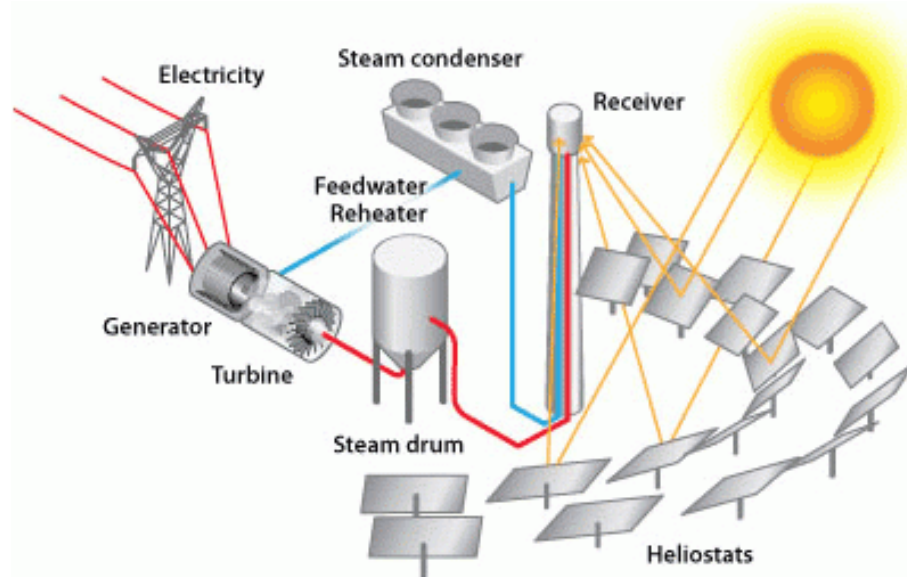


Figure 1. 37 Diagramme de l'énergie solaire à tour concentrée. [70]

L'un des avantages de ce système par rapport aux autres est qu'il permet de stocker une partie de l'énergie obtenue pendant la journée pour une utilisation ultérieure, pendant les heures de nuit ou les jours de faible rayonnement solaire [62].

#### 1.4.4.1.4 Capteur solaire cylindro-parabolique

Les capteurs paraboliques de forme cylindrique permettent de capter le rayonnement direct du soleil le long d'une structure semi-cylindrique ou parabolique placée horizontalement, qui possède un tube récepteur de capteurs situé sur la ligne focale de la parabole le long de la structure [71,72]. A l'intérieur de ce tube capteur circule le fluide qui absorbe l'énergie thermique obtenue en chauffant jusqu'à atteindre la température désirée. La température du fluide augmente au fur et à mesure qu'il circule dans les tubes. Cette technologie est utilisée dans des applications dont la plage de température est comprise entre 125 et 400 °C. Habituellement, elle est utilisée dans les installations de production d'énergie électrique de grande capacité. Le fluide de travail utilisé dans ce type de collecteur est généralement de l'eau déminéralisée ou de l'éthylène glycol. Dans les cas où la température dépasse 200 °C, des huiles synthétiques sont utilisées car elles présentent des températures d'ébullition plus élevées. Le fluide chaud est acheminé vers un échangeur de chaleur où l'énergie thermique est utilisée pour générer de la vapeur d'eau, qui propulse une turbine à vapeur reliée à un générateur électrique [62].

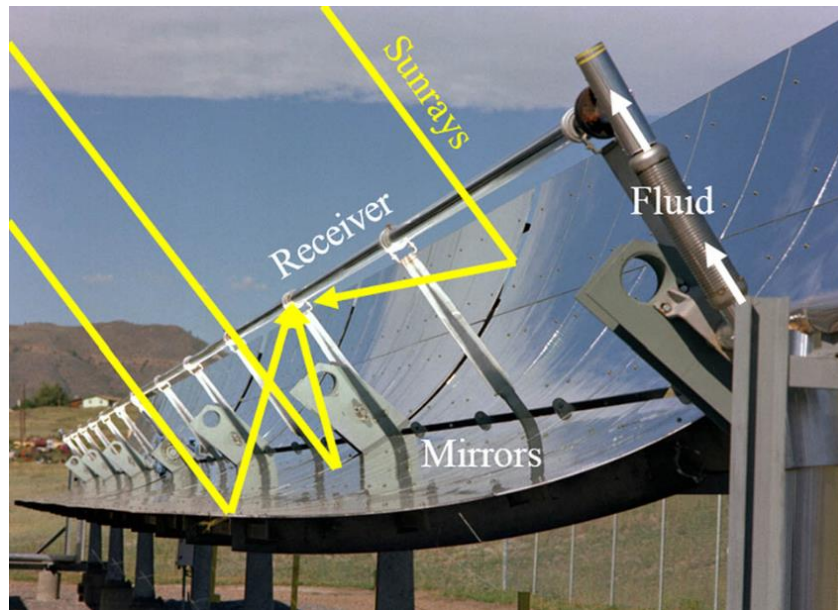


Figure 1. 38 Composants des capteurs cylindro-paraboliques [73].

## 1.5 Conclusion

En raison de l'augmentation des prix du pétrole, la hausse du prix du gaz est devenue un phénomène courant dans le monde entier. L'exploitation et la mauvaise utilisation de nos ressources naturelles épuisent rapidement notre pétrole et gaz naturel. Ce type de détérioration n'est pas seulement évident pour le gaz naturel, mais aussi pour de nombreuses autres sources communes d'énergie. Bien que beaucoup soient conscients de la diminution de la quantité de pétrole, la plupart des gens supposent qu'il existe une réserve infinie de charbon, d'énergie nucléaire et d'autres sources d'énergie [73].

Même si nous disposions d'un approvisionnement illimité en combustibles fossiles, l'utilisation des énergies renouvelables est meilleure pour l'environnement. Nous qualifions souvent les technologies d'énergie renouvelable de "propres" ou "vertes" parce qu'elles produisent peu ou pas de polluants. La combustion de combustibles fossiles, en revanche, émet des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, qui piègent la chaleur du soleil et contribuent au réchauffement de la planète. Les climatologues s'accordent généralement à dire que la température moyenne de la Terre a augmenté au cours du siècle dernier. Si cette tendance se poursuit, le niveau des mers augmentera et les scientifiques prévoient que les inondations, les vagues de chaleur, les sécheresses et d'autres conditions météorologiques extrêmes pourraient être plus fréquentes.[1]

# **Chapitre 2**

### **2 Chapitre 2 : Modélisation d'un capteur solaire cylindro-parabolique**

#### **2.1 Introduction**

Actuellement, le PTC est l'une des technologies les plus matures et les plus importantes de l'énergie solaire pour la production d'électricité. La majorité des centrales à miroirs paraboliques déployées fonctionnent à des températures allant jusqu'à 400 °C en utilisant de l'huile synthétique comme fluide caloporteur (HTF) [74]. Les capteurs cylindro-paraboliques ( PTC ) sont largement utilisés comme dispositif de récupération de l'énergie solaire, l'énergie solaire concentrée et réfléchi étant focalisée sur un seul tube cylindrique qui est positionné le long de la ligne focale de la cuvette. Parfois, un tube en verre transparent enveloppe le tube récepteur pour réduire les pertes de chaleur [75]. Le PTC est aligné sur l'axe nord-sud et suit le soleil d'est en ouest lorsqu'il se déplace dans le ciel à l'aide d'un système de mécanisme de suivi. En pratique, le champ de capteurs solaires est situé sur un terrain ouvert et il est sensible aux vents forts [76].

#### **2.2 Modélisation de la géométrie**

Les conceptions commerciales de PTC pour les centrales solaires thermiques sont généralement de 100 m à 150 m de long et ont une largeur de parabole d'environ 6 m, tandis que les conceptions de PTC pour l'utilisation de la chaleur industrielle sont remarquablement plus petites. Les capteurs cylindro-paraboliques nécessitent des systèmes de suivi solaire pour modifier leur position en fonction de la position apparente du soleil dans le ciel, du lever au coucher du soleil. Le mouvement de ce type de capteur solaire n'a qu'un seul degré de liberté, la rotation sur l'axe [77,78].

##### **2.2.1 Caractéristiques Principales géométriques d'une PTC**

Pour décrire géométriquement une cuvette parabolique, il faut déterminer la parabole, la section de la parabole qui est couverte par les miroirs et la longueur de la cuvette. Les quatre paramètres suivants sont couramment utilisés pour caractériser la forme et la taille d'une cuvette parabolique : la longueur de la cuvette, la distance focale, la largeur de l'ouverture, c'est-à-dire la distance entre un bord et l'autre, et l'angle du bord, c'est-à-dire l'angle entre l'axe optique et la ligne entre le point focal et le bord du miroir [79].

## CHAPITRE 2 Modélisation d'un capteur solaire cylindro-parabolique

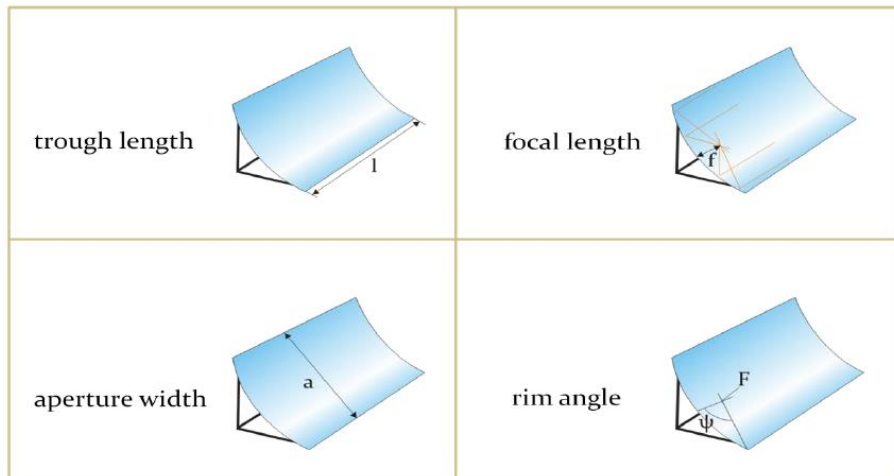


Figure 2. 1 Paramètres géométriques paraboliques [79].

**NB** : Les paramètres PTC les plus importants sont le rapport de concentration géométrique, l'angle de bord ou d'acceptation, l'angle de rebord et l'efficacité optique maximale [80].

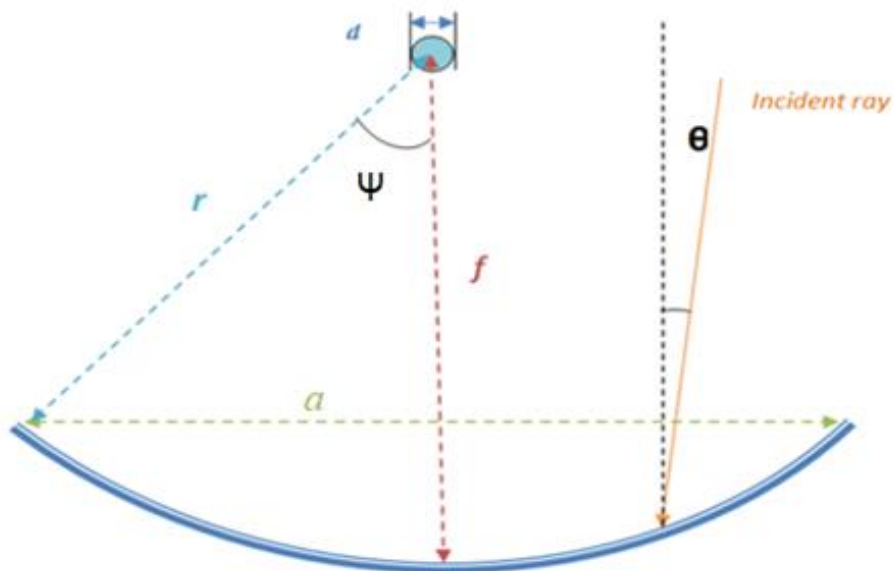


Figure 2. 2 principaux paramètres d'un PTC [81] modifié

- **f** est la distance focale de la parabole ;
- **d** est le diamètre de l'absorbeur ;
- **a** est la largeur du collecteur ;
- **r** est la distance entre le foyer et le point d'extrémité du profil ;
- **$\Psi$**  est l'angle de bord du collecteur formé par l'axe normal et la droite allant du foyer au point d'extrémité du profil ;
- **$\theta$**  est l'angle des rayons entrants par rapport à l'axe de la parabole (l'angle d'incidence);

## CHAPITRE 2 Modélisation d'un capteur solaire cylindro-parabolique

- **h** est la hauteur ou la profondeur de la parabole, elle est mesurée du haut vers le bas de la courbe ;
- **La longueur du parabole** ; est une mesure non problématique et ne nécessite aucune explication.
- **La distance focale** ; c'est-à-dire la distance entre le point focal et le sommet d'une parabole, est un paramètre qui détermine complètement la parabole. (dans l'expression mathématique mentionnée d'une parabole, la distance focale  $f$  est le seul paramètre). [79]

$$y = \frac{1}{4f} x^2 \quad 2.1$$

d'où

$$f = \frac{a}{4 \cdot \tan(\psi/2)} \quad 2.2$$

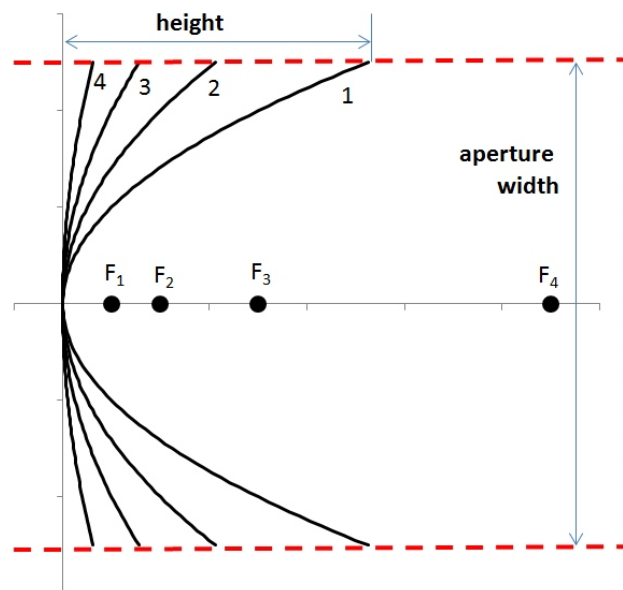


Figure 2. 3 La longueur focale comme paramètre de forme [82].

- **L'angle de bord** ; c'est-à-dire l'angle entre l'axe optique et la ligne entre le point focal et le bord du miroir, présente la caractéristique intéressante de déterminer à lui seul la forme de la section transversale d'une cuvette parabolique. Cela signifie que les sections transversales des miroirs paraboliques ayant le même angle de bord sont géométriquement similaires. Les sections transversales d'une auge parabolique avec un angle d'ouverture donné peuvent être rendues congruentes à la section transversale d'une autre auge parabolique avec le même angle d'ouverture par une mise à l'échelle uniforme

## CHAPITRE 2 Modélisation d'un capteur solaire cylindro-parabolique

(agrandissement ou rétrécissement). Deux des trois paramètres angle d'ouverture, largeur d'ouverture et distance focale sont suffisants pour déterminer complètement la section transversale d'une auge parabolique, c'est-à-dire la forme et la taille. Cela signifie également que deux d'entre eux sont suffisants pour calculer le troisième. peut être exprimée en fonction du rapport entre la largeur d'ouverture et la distance focale [79] :

$$\tan \psi = \frac{\frac{a}{f}}{2 - \frac{1}{8} \cdot \left(\frac{a}{f}\right)^2} \quad 2.3$$

Où bien

$$\psi = \arctan \left[ \frac{8 \left(\frac{f}{a}\right)}{16 \left(\frac{f}{a}\right)^2 - 1} \right] = \sin^{-1} \left( \frac{a}{2r_r} \right) \quad 2.4$$

ou, alternativement, le rapport entre la largeur d'ouverture et la distance focale peut être exprimé en fonction de l'angle d'ouverture [JJJ].

$$\frac{a}{f} = -\frac{4}{\tan \psi} + \sqrt{\frac{16}{\tan^2 \psi} + 16} \quad 2.5$$

Le rayon du miroir local ( $\mathbf{r}$ ) en tout point est calculé comme suit [JJJ].

$$r = \frac{2f}{1 + \cos \psi} \quad 2.6$$

et le rayon de bord est obtenu lorsque  $\Psi = \Psi_r$  [JJJ]

$$r_r = \frac{2f}{1 + \cos \Psi_r} \quad 2.7$$

La surface d'ouverture du collecteur

$$A_{ap} = a \cdot l \quad 2.8$$

La surface d'une cuve parabolique peut être importante pour déterminer les besoins en matériaux de la cuve. La surface se calcule comme suit :

$$A = \left( \frac{q}{2} \sqrt{1 + \frac{a^2}{16f^2}} + 2f \cdot \ln \left( \frac{a}{4f} + \sqrt{1 + \frac{a^2}{16f^2}} \right) \right) \cdot l \quad 2.9$$



## CHAPITRE 2 Modélisation d'un capteur solaire cylindro-parabolique

La surface du tube récepteur est

$$A_{r_0} = \pi \cdot d_{r_0} \cdot L \quad 2.10$$

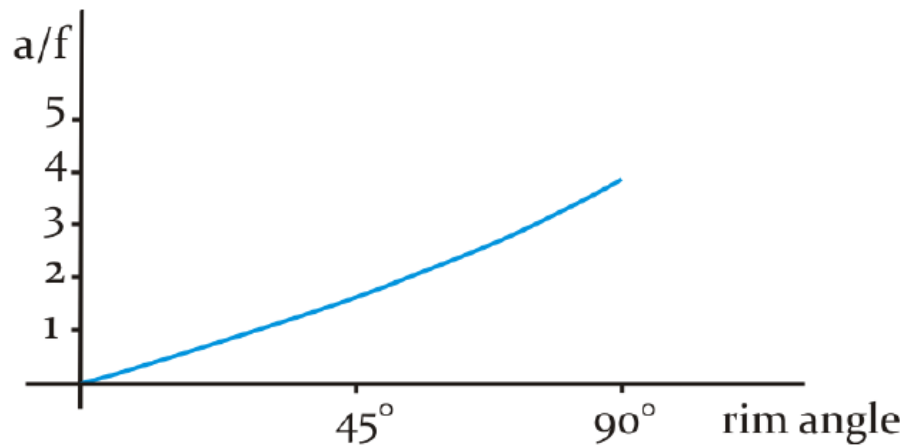


Figure 2. 4 Relation entre l'angle de bord et la valeur  $a/f$ . [79]

### 2.2.2 Relation distance focale et angle de bord pour une largeur d'ouverture constante

L'angle de bord est lié à la distance entre les différentes parties des miroirs et la ligne focale. l'angle de bord ne doit être ni trop petit ni trop grand.

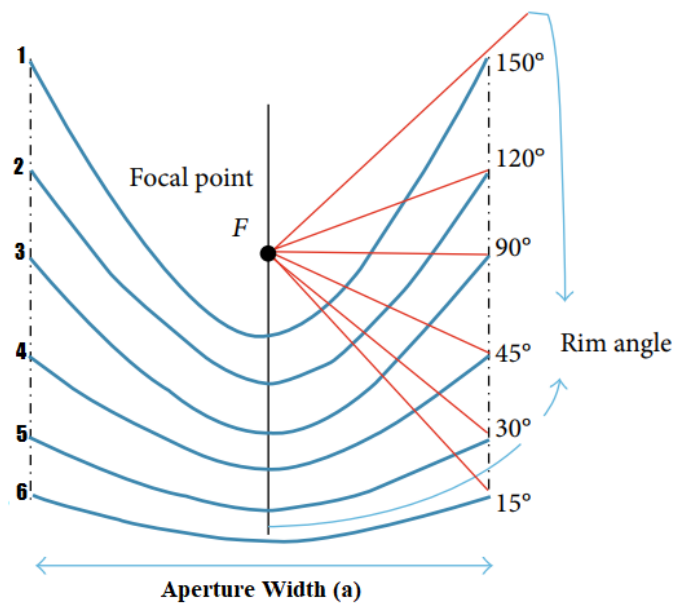


Figure 2. 5 Segment d'une parabole ayant un point focal et un angle de bord communs avec la même largeur d'ouverture [83] Modifié.

### 2.2.3 Effet de l'angle de bord sur les performances du PTC

Si nous considérons des miroirs réels avec un certain degré d'inexactitude géométrique, il est alors important de maintenir une faible distance à l'absorbeur également à cause de l'effet de ces erreurs géométriques du miroir. Plus la distance à l'absorbeur est grande, plus l'aberration

## CHAPITRE 2 Modélisation d'un capteur solaire cylindro-parabolique

de rayonnement due aux erreurs de pente du miroir a de poids. Une fois de plus, à une largeur d'ouverture donnée, de très petits angles de bord ainsi que de très grands angles de bord impliquent de grandes distances entre le miroir et la ligne focale (dans le cas de très grands angles de bord pour les parties extérieures du miroir) et doivent être évités [79].

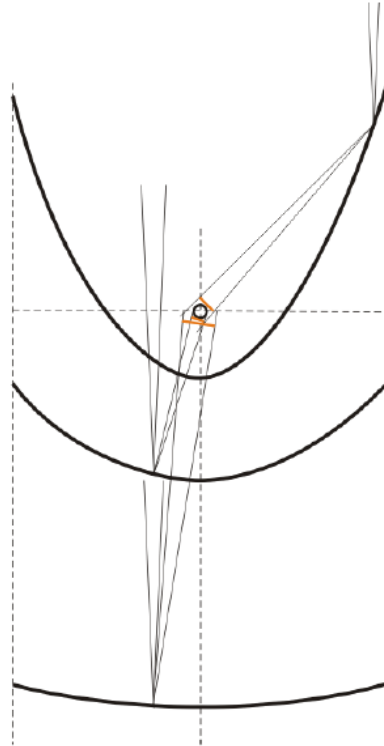


Figure 2. 6 Effet des angles de bord sur la distance focale pour une même largeur d'ouverture [79].

### 2.2.4 Rapport de concentration

Le taux de concentration est l'un des paramètres centraux du collecteur. Il est déterminant pour les températures de fonctionnement possibles de la centrale à miroirs cylindro-paraboliques. Le rapport de concentration **C** est défini comme le rapport entre la densité de flux de rayonnement au niveau de la ligne focale ou, ce qui revient au même, au niveau de l'image du soleil, **G<sub>im</sub>**, et le rayonnement direct au niveau de l'ouverture du collecteur, **G<sub>b,ap</sub>** :

$$c = \frac{G_{im}}{G_{b,ap}} \quad 2.11$$

Or, l'éclairement énergétique est différent en différents points de l'image du Soleil. C'est pourquoi nous pouvons considérer, en premier lieu, un rapport de concentration ponctuel. Dans ce cas, **G<sub>im</sub>** doit être déterminé en un point de la ligne focale afin de déterminer le rapport de concentration par rapport à ce point spécifique. Ou bien nous pouvons considérer, en second

## CHAPITRE 2 Modélisation d'un capteur solaire cylindro-parabolique

lieu, un rapport de concentration moyen en prenant  $C$  comme le rapport entre l'irradiance moyenne à la ligne focale et l'irradiance normale directe. Le rapport de concentration moyen (contrairement au rapport ponctuel) peut être facilement spécifié sans aucune mesure [79].

### 2.2.4.1 rapport de concentration géométrique

Il s'agit d'une approximation utile. Il est défini comme le rapport entre l'aire d'ouverture du collecteur et l'aire d'ouverture du récepteur. L'aire d'ouverture du récepteur  $A_{ap,r}$  est un rectangle de surface  $d \times l$ , où  $d$  est le diamètre du tube absorbeur.[79]

$$C_G = \frac{A_{ap,c}}{A_{ap,r}} \quad 2.12$$

Le rapport de concentration est donc :

$$C_G = \frac{A_{ap,c}}{A_{ap,r}} \quad 2.13$$

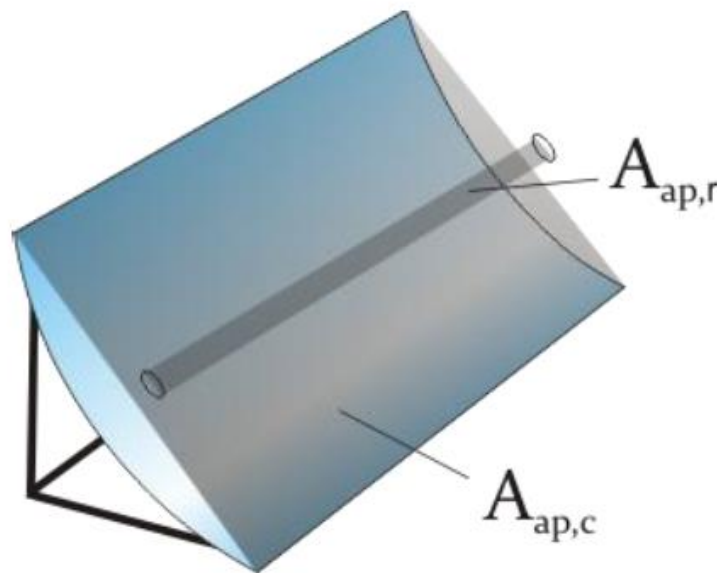


Figure 2. 7 Surface d'ouverture du collecteur et surface d'ouverture du récepteur [79].

Une autre possibilité consiste à prendre la surface de l'absorbeur irradié comme surface d'ouverture du récepteur. Dans les concentrateurs paraboliques réelles, cela signifierait que toute la surface du tube absorbeur  $d \times l \times \pi$  est l'aire d'ouverture du récepteur.

$$c_G = \frac{a \cdot l}{\pi \cdot d \cdot l} = \frac{a}{\pi \cdot d} \quad 2.14$$

### **2.2.5 Type de matériau des miroirs**

Les principales exigences pour les matériaux de miroir appropriés sont leurs propriétés de réflexion. La réflectivité doit être élevée. La réflectivité d'une surface est un nombre qui indique la fraction du rayonnement incident qui est réfléchi par la surface. En général, la réflectivité est différente pour différentes longueurs d'onde, de sorte qu'elle doit être spécifiée pour une longueur d'onde donnée ou une gamme de longueurs d'onde donnée, par exemple pour la gamme de lumière visible. Dans le cas des applications solaires, c'est le spectre solaire qui est intéressant. En général, on indique une "réflectivité pondérée par le soleil" qui tient compte du fait qu'il existe différents contenus énergétiques à différentes longueurs d'onde dans le spectre solaire. La réflectivité pondérée par le soleil indique donc la fraction de l'énergie solaire qui est réfléchi sur un miroir [79].

Idéalement, le miroir parfait est celui pour lequel chaque rayon du rayonnement solaire entrant est réfléchi - sans perte d'intensité et sans déviation de l'état idéal ; cependant, aucun miroir n'est parfait. Dans tous les miroirs, une certaine quantité de rayonnement solaire provenant d'une partie du spectre solaire sera absorbée par les matériaux qui composent le réflecteur. Les irrégularités normales de la surface feront que les rayons d'un faisceau dévieront d'une trajectoire idéale dans tous les miroirs. De plus, les miroirs - même ceux en argent massif avec des surfaces ultra-propres - possèdent une couche diélectrique qui provoque une réfraction. La plupart des miroirs utilisent actuellement des films d'argent (applications domestiques et décoratives) ou d'aluminium (applications automobiles) pour leurs surfaces réfléchissantes. Les miroirs en argent doivent être protégés contre la détérioration chimique et physique de l'argent, alors que les miroirs en aluminium sont plus résistants à la dégradation. Dans de nombreuses applications solaires, cependant, l'argent est préféré en raison de sa réflectivité élevée : 97 %-98 % contre 88 %--92 % pour l'aluminium [84].

#### **2.2.5.1 Miroirs en verre argenté**

Dans le passé, la plupart des miroirs étaient fabriqués à partir d'une structure d'argent collée sur du verre - le verre étant la barrière protectrice, le transmetteur de lumière et, en partie, le support structurel. Ces miroirs dits de seconde surface (car l'argent est collé sur la face du verre la plus éloignée de la source de lumière) comprennent également un film de cuivre pour protéger la surface arrière de l'argent et des couches de peinture pour protéger le cuivre. Les avantages de l'utilisation du verre comme superstrat sont sa clarté (transmission solaire élevée), son faible coût, sa surface lisse, sa solidité physique, sa résistance à l'abrasion, son

## CHAPITRE 2 Modélisation d'un capteur solaire cylindro-parabolique

imperméabilité, sa résistance aux salissures, sa facilité de nettoyage et son inertie. Ainsi, le verre se rapproche du matériau idéal pour protéger l'argent. Comparés à d'autres miroirs, ceux en verre et en argent sont préférés pour leur haute réflectance (82%-97%), leur bonne specularité (généralement 52 mrad [0,10 deg.]), leur durabilité et leur résistance aux déformations dues aux charges [84].

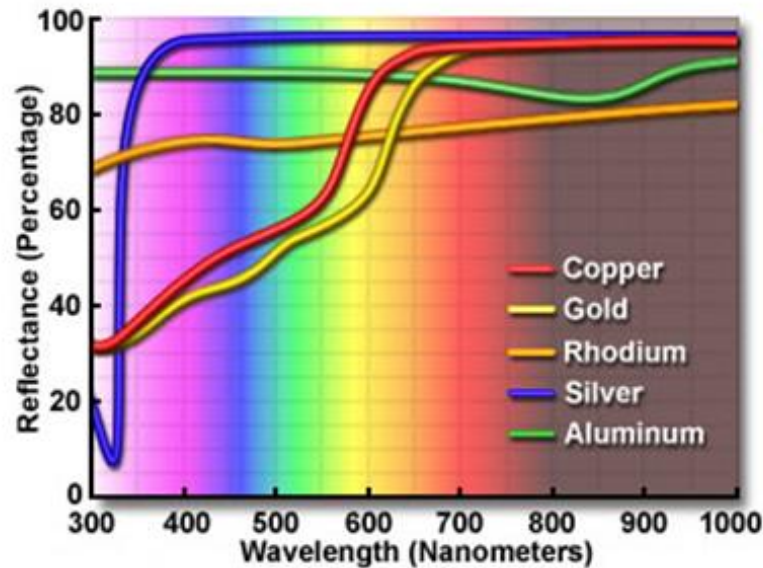


Figure 2. 8 Réflectance des revêtements de miroirs métalliques. [85]

### 2.3 Modélisation thermique

La centrale est constituée de rangées de capteurs solaires (également appelés solar collector assemblies **SCA**), d'un système de stockage de l'énergie thermique (facultatif), d'échangeurs de chaleur qui produisent de la vapeur surchauffée et d'un cycle électrique standard qui convertit l'énergie thermique en électricité. Il peut également y avoir un système de chaudière supplémentaire (une chaudière à gaz dans ce cas). L'énergie solaire est captée par un HTF - qui peut être une huile synthétique ou un sel fondu - et transférée à des échangeurs de chaleur pour le stockage thermique ou la production de vapeur. Le stockage thermique recueille l'énergie solaire pendant les périodes de fort ensoleillement et complète l'apport de chaleur pendant les périodes de faible ensoleillement. La chaudière au gaz naturel est utilisée pour moduler davantage l'apport de chaleur et permettre à la centrale de fonctionner 24 heures sur 24. En règle générale, le champ en auge est conçu pour fournir un apport de chaleur suffisant pour porter la température d'un HTF à environ 400°C, soit une température suffisamment élevée pour générer de la vapeur surchauffée pour une centrale à vapeur Rankine standard. La température de sortie est maintenue par le débit du HTF, le stockage thermique (le cas échéant) et le chauffage au gaz naturel (le cas échéant). Le réflecteur en auge fournit une ouverture

## CHAPITRE 2 Modélisation d'un capteur solaire cylindro-parabolique

d'environ 5 m de large qui peut s'étendre sur plusieurs milliers de mètres en fonction du nombre de SCA dans une usine particulière. Le HCE mesure environ 115 mm de diamètre et 4 m de long entre les supports qui le soutiennent à la ligne focale. [86]

### 2.3.1 Récepteur à tube absorbant ou HCE (Heat Collector Element)

Le HCE se compose d'un absorbeur à l'intérieur d'une enveloppe en verre avec des soufflets à chaque extrémité. L'absorbeur est généralement un tube en acier inoxydable d'environ 70 mm de diamètre dont la surface extérieure est recouverte d'un revêtement spécial (revêtement sélectif) qui lui confère les propriétés optiques requises. Le revêtement sélectif présente une forte absorbance pour le rayonnement dans le spectre de l'énergie solaire, et une faible émittance dans le spectre de l'énergie des grandes ondes afin de réduire les pertes par rayonnement thermique. [86]

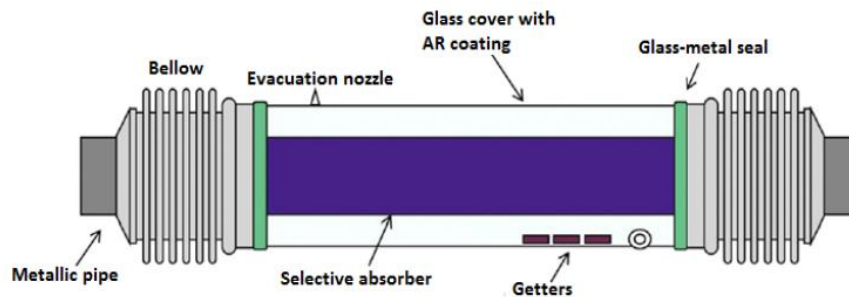


Figure 2. 9 Schéma d'un HCE. [87]

### 2.3.2 Modèle de bilan énergétique unidimensionnel

L'énergie solaire entrante et les pertes optiques ont été omises du modèle de résistance. Les pertes optiques sont dues aux imperfections des miroirs des capteurs, aux erreurs de suivi, à l'ombrage et à la propreté des miroirs et du HCE. L'énergie solaire entrante effective (énergie solaire moins les pertes optiques) est absorbée par l'enveloppe de verre  $\dot{q}'_{5SolAbs}$  et le revêtement sélectif de l'absorbeur  $\dot{q}'_{3SolAbs}$ . Une partie de l'énergie qui est absorbée dans le revêtement sélectif est conduite à travers l'absorbeur  $\dot{q}'_{23cond}$  et transférée au HTF par convection  $\dot{q}'_{12conv}$  ; l'énergie restante est transmise à l'enveloppe de verre par convection  $\dot{q}'_{34conv}$  et rayonnement  $\dot{q}'_{34rad}$  et perdue à travers le support du HCE par conduction  $\dot{q}'_{cond,bracket}$ . L'énergie provenant du rayonnement et de la convection traverse ensuite l'enveloppe de verre par conduction  $\dot{q}'_{45cond}$  et avec l'énergie absorbée par l'enveloppe de verre  $\dot{q}'_{5SolAbs}$  est perdue dans l'environnement par convection  $\dot{q}'_{56conv}$  et rayonnement  $\dot{q}'_{57rad}$ . On suppose que toutes les températures, les flux de chaleur et les propriétés thermodynamiques du modèle sont uniformes autour de la circonférence du HCE. Toutes les directions de flux indiquées dans la figure ci-dessous sont positives, les équations du bilan énergétique sont

## CHAPITRE 2 Modélisation d'un capteur solaire cylindro-parabolique

déterminées en conservant l'énergie à chaque surface de la section transversale du HCE, à la fois avec et sans l'enveloppe de verre [88].

Avec l'enveloppe en verre :

$$\dot{q}'_{12conv} = \dot{q}'_{23cond} \quad 2.15$$

$$\dot{q}'_{3SolAbs} = \dot{q}'_{34conv} + \dot{q}'_{34rad} + \dot{q}'_{23cond} + \dot{q}'_{cond, bracket} \quad 2.16$$

$$\dot{q}'_{34conv} + \dot{q}'_{34rad} = \dot{q}'_{45cond} \quad 2.17$$

$$\dot{q}'_{45cond} + \dot{q}'_{5SolAbs} = \dot{q}'_{56conv} + \dot{q}'_{57rad} \quad 2.18$$

$$\dot{q}'_{HeatLoss} = \dot{q}'_{56conv} + \dot{q}'_{57rad} + \dot{q}'_{cond, bracket} \quad 2.19$$

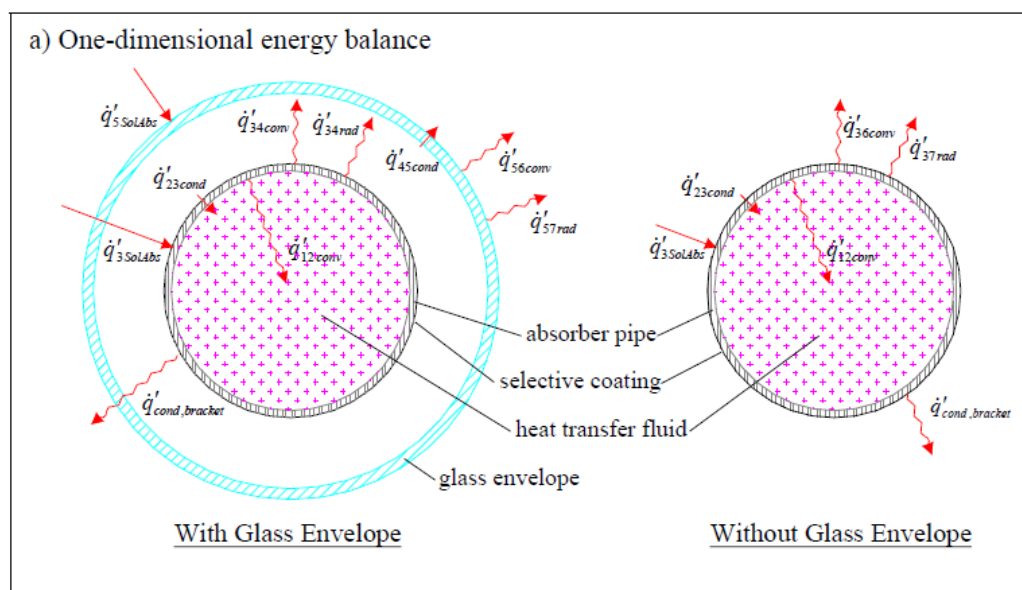
Dans le cas sans enveloppe vitrée et les indices 4 pour la convection et le rayonnement de l'absorbeur deviennent 6 et 7, respectivement, puisque la perte de chaleur de la surface extérieure de l'absorbeur s'échappe directement dans l'environnement.

Sans l'enveloppe en verre :

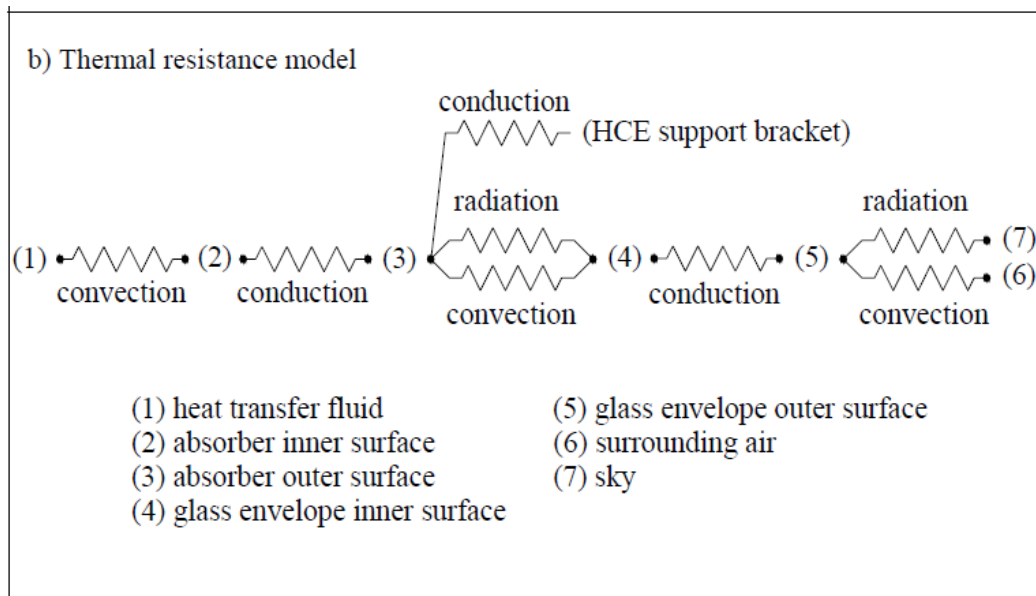
$$\dot{q}'_{12conv} = \dot{q}'_{23cond} \quad 2.20$$

$$\dot{q}'_{3SolAbs} = \dot{q}'_{36conv} + \dot{q}'_{37rad} + \dot{q}'_{23cond} + \dot{q}'_{cond, bracket} \quad 2.21.2.22$$

$$\dot{q}'_{HeatLoss} = \dot{q}'_{36conv} + \dot{q}'_{37rad} + \dot{q}'_{cond, bracket}$$



(a)



(b)

Figure 2. 10 (a) Bilan énergétique unidimensionnel en régime permanent ; (b) modèle de résistance thermique pour une section transversale d'un HCE [88].

Tableau 2. 1 Définitions des flux de chaleur [88]

| Flux de chaleur (W/m) | Mode de transfert                   | Chemin de transfert de chaleur             |  |
|-----------------------|-------------------------------------|--|--|
|                       |                                     | De   | Vers                                       |
| $\dot{q}'_{12conv}$   | convection                          | surface intérieure du tuyau de l'absorbeur | fluide caloporteur                         |
| $\dot{q}'_{23cond}$   | conduction                          | surface extérieure du tuyau de l'absorbeur | surface intérieure du tuyau de l'absorbeur |
| $\dot{q}'_{3SolAbs}$  | absorption de l'irradiation solaire | rayonnement solaire incident               | surface extérieure du tube absorbeur       |
| $\dot{q}'_{34conv}$   | convection                          | surface extérieure du tube absorbeur       | surface intérieure de l'enveloppe en verre |
| $\dot{q}'_{34rad}$    | rayonnement                         | surface extérieure du tube absorbeur       | surface intérieure de l'enveloppe en verre |
| $\dot{q}'_{45cond}$   | conduction                          | surface de l'enveloppe de verre intérieure | surface extérieure de l'enveloppe en verre |
| $\dot{q}'_{5SolAbs}$  | absorption de l'irradiation solaire | rayonnement solaire incident               | surface extérieure de l'enveloppe en verre |
| $\dot{q}'_{56conv}$   | convection                          | surface extérieure de l'enveloppe en verre | Atmosphère ambiante                        |



## CHAPITRE 2 Modélisation d'un capteur solaire cylindro-parabolique

|                                     |                           |  |                             |
|-------------------------------------|---------------------------|--|-----------------------------|
| $\dot{q}'_{57rad}$                  | rayonnement               | surface de l'enveloppe extérieure en verre | Ciel                        |
| $\dot{q}'_{36conv}$                 | convection                | surface extérieure du tuyau de l'absorbeur | Atmosphère ambiante         |
| $\dot{q}'_{37rad}$                  | radiation                 | surface extérieure du tuyau de l'absorbeur | Ciel                        |
| $\dot{q}'_{cond, bracket}$          | conduction                | surface extérieure du tube absorbeur       | Support HCE                 |
| $\dot{q}'_{HeatLoss}$               | Convection et rayonnement | élément collecteur de chaleur              | Atmosphère ambiante et Ciel |
| * Par unité de longueur d'ouverture |                           |  |                             |

### 2.4 Modélisation aérodynamique

La modélisation des forces aérodynamiques est une étape cruciale dans la chaîne d'évaluation de la réponse d'une structure sous charges de vent. Elle permet de caractériser la fonction de transfert entre les champs de vitesse et la force mécanique exercée sur une géométrie bien définie. Elle permet donc de modéliser les effets complexes de fluide pour les introduire dans un modèle structural mécanique.[89]

#### 2.4.1 Rappels de mécanique des fluides

##### 2.4.1.1 Variables fondamentales

Les variables fondamentales de la mécanique des fluides, sont: La pression, la masse volumique, la viscosité et le régime d'écoulement.

- **Pression** : La pression est la force normale exercée sur une surface unitaire. Il s'agit d'une propriété qui dépend du point considéré, elle peut donc être différente d'un point à l'autre dans le fluide.

$$P = \lim_{ds \rightarrow 0} \left( \frac{dF}{ds} \right) \quad 2.23$$

Où:

**dS** : surface élémentaire autour d'un point dans le fluide.

**dF** : force élémentaire appliquée à la surface dS.

## CHAPITRE 2 Modélisation d'un capteur solaire cylindro-parabolique

- **Masse volumique** : On définit la masse volumique comme la quantité de masse par unité de volume.

$$\rho = \lim_{d\mathcal{V} \rightarrow 0} \left( \frac{dm}{d\mathcal{V}} \right) \quad 2.24$$

Où ;

**d $\mathcal{V}$** : volume élémentaire autour d'un point.

**dm**: masse du fluide à l'intérieur de **d $\mathcal{V}$** .

- **Viscosité** : est la propriété d'un fluide qui exprime sa résistance à une force tangentielle de frottement. Son effet se manifeste principalement au voisinage des parois. Dans le cas d'un fluide Newtonien en mouvement, la relation entre la contrainte de cisaillement,  $\tau$ , et le gradient de vitesse est linéaire (la direction de l'axe des y est perpendiculaire et la vitesse de l'écoulement,  $V$ , est parallèle à la paroi) :

$$\tau = \mu \frac{dV}{dy} \quad 2.25$$

L'expression de la viscosité cinématique est:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad 2.26$$

Où

**$\mu$**  : viscosité dynamique; en (N.s/m<sup>2</sup> ).

**$\nu$**  : la viscosité cinématique; en (m<sup>2</sup> /s).

**$\tau$**  : contrainte de cisaillement; en (N/m<sup>2</sup> ).

- **Régime d'écoulement et nombre de Reynolds** : Des expériences avec une variété de fluides aux propriétés physiques variables et une gamme de diamètres de tuyaux et de débits ont démontré que la nature de l'écoulement dépendait de la densité  $\rho$ , de la viscosité  $\mu$  du fluide, de sa vitesse moyenne à travers le tuyau  $u$ , et du diamètre du tuyau  $D$ . Des tuyaux plus grands, des vitesses plus rapides et des densités plus élevées ont tendance à donner plus d'inertie à l'écoulement et à le rendre turbulent, alors que des petits tuyaux, un écoulement lent et des viscosités élevées ont tendance à donner des écoulements laminaires. En outre, on a découvert que ces paramètres pouvaient être arrangés pour former un groupe sans dimension, qui a ensuite été appelé le nombre de

## CHAPITRE 2 Modélisation d'un capteur solaire cylindro-parabolique

Reynolds,  $Re$ . Il détermine la nature de l'écoulement du fluide et est défini comme [90]

:

$$Re = \frac{Dv\rho}{\mu} \quad 2.27$$

Pour des valeurs de Reynolds inférieures à environ 2100, l'écoulement est laminaire. Pour  $Re > 10\,000$ , l'écoulement est presque toujours turbulent. Pour  $2100 < Re < 10000$ , l'écoulement est transitoire entre laminaire et turbulent.

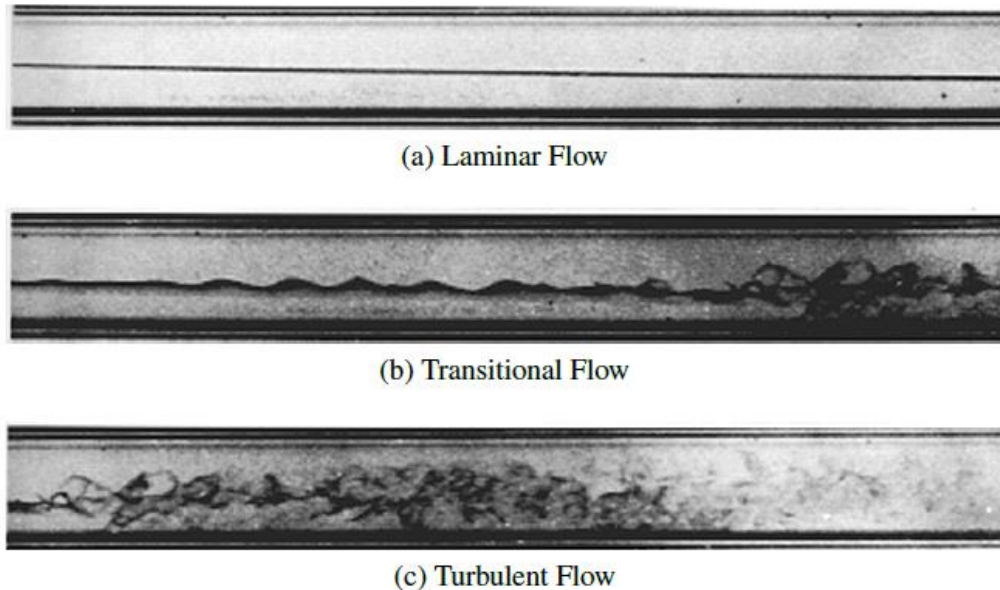


Figure 2. 11 Modèles d'écoulement observés lors de l'injection d'un flux de colorant dans un fluide en circulation..[90]

### 2.4.1.2 Equations de Navier-Stokes

La mécanique des fluides est régie au plan macroscopique par les équations de Navier-Stokes issues des principes de conservation habituels de la mécanique : conservation de la masse et de la quantité de mouvement. Dans le contexte aérodynamique et du vent à basse altitude, ces équations se simplifient :

- les vitesses rencontrées sont largement inférieures à la vitesse du son et la masse volumique de l'air est supposée constante. C'est l'hypothèse d'incompressibilité ;
- la température de l'air est constante ;
- l'air est un gaz léger dont le poids propre est négligé devant les autres forces [91].

Toutes ces hypothèses permettent d'obtenir les équations de l'aérodynamique basse vitesse. Les équations de Navier-Stokes sont réduites alors à l'équation de continuité et de la quantité de mouvement [91].

$$\nabla \cdot u = 0 \quad 2.28$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + \rho f \quad 2.29$$

- **u** est la vitesse.
- **p** la pression.
- **ρ** la masse volumique.
- **f** l'accélération due aux forces de volume et de surface.
- **t** le temps.

### 2.4.1.3 Equation de Bernoulli

La relation de Bernoulli est une équation de conservation de l'énergie mécanique du fluide au cours de son mouvement. Formes de l'équation de Bernoulli.

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + gz_2 \quad \left(\frac{J}{Kg}\right) \quad 2.2.30$$

$$P_1 + \rho \frac{v_1^2}{2} + \rho gz_1 = P_2 + \rho \frac{v_2^2}{2} + \rho gz_2 \quad (Pa) \quad 2.31$$

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \quad (m)$$

## 2.4.2 Forces aérodynamiques

### 2.4.2.1 Coefficient de traînée

Tout corps en déplacement dans l'air subit des forces de frottement s'opposant à son mouvement, dû à la viscosité du fluide. Donc le coefficient de traînée définit par le rapport entre ces deux forces.

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho \cdot U^2 \cdot A} \quad 2.32$$

## CHAPITRE 2 Modélisation d'un capteur solaire cylindro-parabolique

### 2.4.2.2 Coefficient de portance

La portance aérodynamique est la composante de la force subie par un corps en mouvement dans un fluide qui s'exerce perpendiculairement à la direction du mouvement.

$$C_L = \frac{2F_L}{\rho \cdot U^2 \cdot A} \quad 2.33$$

### 2.4.2.3 Coefficient de la force total

$$C_F = \frac{2F_{total}}{\rho \cdot U^2 A} \quad 2.34$$

- **FD** : Force de traînée.
- **FL** : Force de portance.
- **Ftotal** : Force total.
- **U** : la vitesse d'écoulement de l'objet par rapport au fluide.
- **A** : surface de référence.
- **$\rho$**  : la masse volumique.

## 2.5 Modélisation du vent

### 2.5.1 Caractéristiques du vent

Les paramètres caractéristiques du vent dans un lieu donné et sur un intervalle de temps bien défini sont la distribution verticale de la vitesse de vent et l'intensité de turbulence.[89]

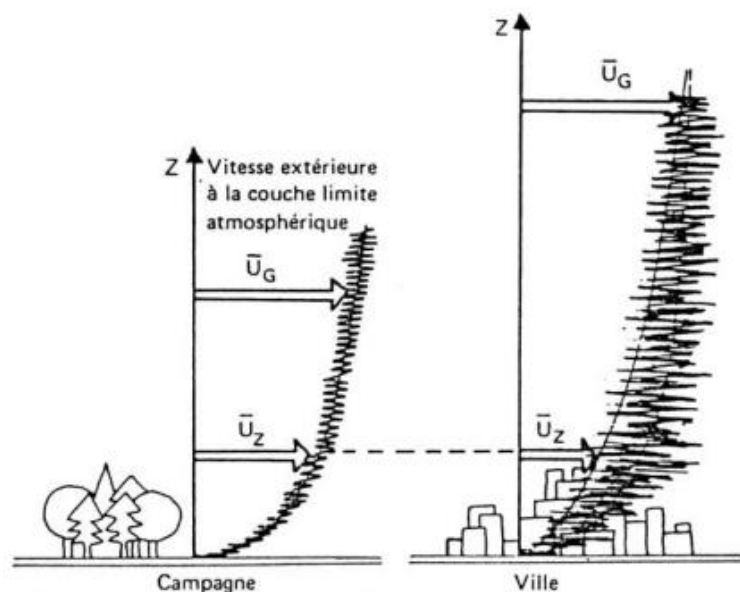


Figure 2. 12 Profil de vitesse moyenne et profil de turbulence de terrain avec différentes rugosité [92]

## CHAPITRE 2 Modélisation d'un capteur solaire cylindro-parabolique

### 2.5.1.1 La Vitesse moyenne

La vitesse moyenne du vent est celle qui sera observée sur la construction étudiée. Elle doit donc tenir compte de l'environnement de la construction, c'est-à-dire des turbulences observées à la hauteur ( $z$ ) de l'élément recevant le vent. L'équation de la vitesse moyenne sera notée  $V_m(z)$  tel que [93] :

$$V_m(Z) = V_b \times C_r(Z) \times C_o(Z) \quad 2.35$$

$V_b$  : vitesse de base.

$C_r$  : coefficient de rugosité

$C_o$  : coefficient d'orographie.

### 2.5.1.2 Coefficient de rugosité

Le coefficient de rugosité  $C_r(z)$  tient compte de la variabilité de la vitesse du vent sur le site du projet en fonction de La hauteur du corps au-dessus du niveau du sol ( $z$ ) et La rugosité du terrain en amont de la construction dans la direction du vent considérée ( $kr$ ). Dans l'atmosphère, le profil de vitesse du vent étant logarithmique, le coefficient de rugosité suit la formule [94] :

$$C_r(Z) = K_r \ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right) \quad \text{pour } z_{min} \leq z \leq 200m \quad 2.36$$

$$C_r(Z) = C_r(z_{min}) \quad \text{pour } z \leq z_{min} \quad 2.37$$

Le facteur de terrain  $kr$  est calculé suivant la formule :

$$K_r = 0,19 \times \left(\frac{Z_0}{Z_{0,II}}\right)^{0.007} = 0,19 \times \left(\frac{Z_0}{0.05}\right)^{0.007} \quad 2.38$$

Les valeurs  $Z_0$  et  $Z_{min}$  dépendent de la catégorie de terrain.

et  $Z_{0,II}$  : longueur de rugosité pour un site de catégorie II.

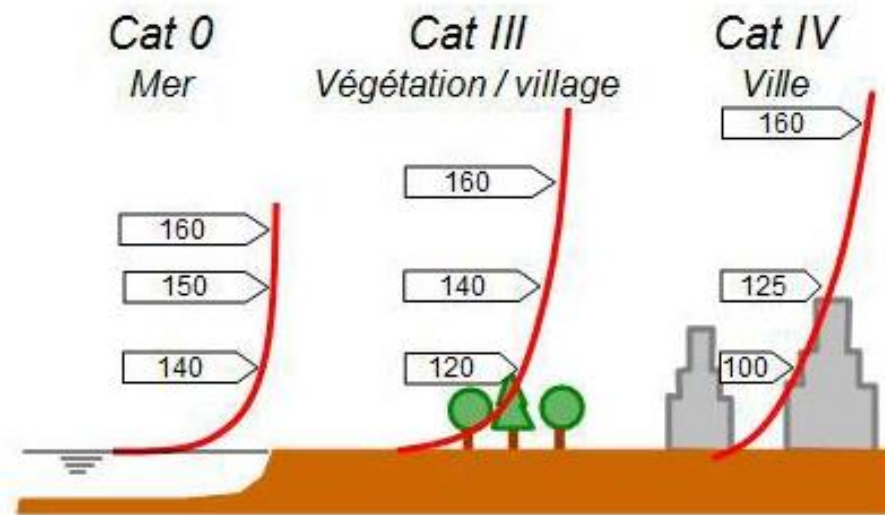


Figure 2. 13 Influence de la hauteur et de la catégorie du site. La rugosité du sol engendre des frottements qui ralentissent le vent à basse altitude [93].

### 2.5.1.3 Coefficient orographique

Le coefficient orographique  $C_o(z)$  est là pour ajuster la vitesse du vent en fonction des obstacles aux alentours de l'ouvrage. En effet, ces obstacles peuvent avoir un effet d'accélération [93].

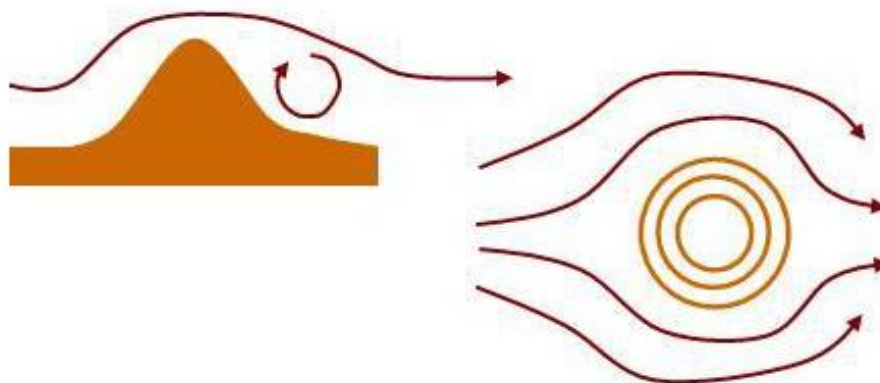


Figure 2. 14 Influence de l'orographie; la présence de reliefs engendre une modification de la vitesse du vent.[93]

## CHAPITRE 2 Modélisation d'un capteur solaire cylindro-parabolique

### 2.5.2 Catégories de terrain

Tableau 2. 2 Catégories de rugosité.[95]

| Catégories de terrain |   | Z <sub>o</sub> (en m) | Z <sub>min</sub> (en m) | kr    |
|-----------------------|---|-----------------------|-------------------------|-------|
| 0                     | Mer, ou zone côtière, exposée aux vents de mer ; lacs et plans d'eau parcourus par le vent sur une distance d'au moins 5 km               | 0,005                 | 1                       | 0,162 |
| II                    | Rase campagne, avec, ou non, quelques obstacles isolés (arbres, bâtiments,...) séparés les uns des autres de plus de 40 fois leur hauteur | 0,05                  | 2                       | 0,190 |
| IIIa                  | Campagne avec des haies ; vignobles ; bocage ; habitat dispersé   | 0,20                  | 5                       | 0,209 |
| IIIb                  | Zones urbanisées ou industrielles ; bocage dense ; vergers  | 0,5                   | 9                       | 0,223 |
| IV                    | Zones urbaines, dont au moins 15 % de la surface est recouvert de bâtiments dont la hauteur moyenne est supérieure à 15 m                 | 1,0                   | 15                      | 0,234 |

Tableau 2. 3 Paramètres de rugosité pour différents types de terrain uniforme.[96]

| Type de Terrain                           | z <sub>o</sub> (m) |
|---|--------------------|
| Océan, sable lâche et neige               | 0.0002             |
| Béton, désert sans relief ou wadden       | 0.0002–0.0005      |
| Plat, couvert de neige                    | 0.0001–0.0007      |
| Couvert de glace rugueuse                 | 0.001–0.012        |
| Terrain agricole non cultivé              | 0.001–0.004        |
| Herbes courtes et mousse                  | 0.008–0.03         |
| Herbes longues et bruyère                 | 0.02–0.06          |
| Terrain agricole avec des cultures basses | 0.04–0.09          |
| Terrain agricole avec des cultures hautes | 0.12–0.18          |
| Brousse continue                          | 0.35–0.45          |
| Forêt mature de conifères                 | 0.8–1.6            |
| Forêt tropicale                           | 1.7–2.3            |
| Bâtiments rapprochés et à faible hauteur  | 0.4–0.7            |
| Centre-ville                              | 0.7–1.5            |



### **2.6 Conclusion**

Afin de mettre un ou plusieurs PTC en phase de production ou d'interception du rayonnement solaire, plusieurs facteurs ont un effet majeur sur leurs performances, tous ces facteurs généralement naturels ne sont pas négligeables et doivent être pris en compte.

L'objectif de ce chapitre est essentiellement d'expliquer l'approche de cette modélisation (géométrique, thermique, aérodynamique ainsi que la modélisation du vent) et de fournir les différentes formules à utiliser.

# **Chapitre 3**

### 3 Chapitre 3 : Effet du Vent sur un Capteur cylindro-Parabolique

#### 3.1 Introduction

La CFD est l'une des méthodes de simulation informatique utilisées pour caractériser le comportement de l'écoulement des fluides sous certaines géométries avec des conditions aux limites [97,98]. Le critère de performance de la CFD est le degré d'alignement des résultats de la simulation numérique sur les résultats expérimentaux obtenus dans des conditions spécifiques, ainsi que la capacité des simulations à prédire des processus extrêmement complexes qui ne peuvent être analysés dans le monde réel [99]. La CFD a été reconnue comme une science émergente dans le monde entier, en particulier depuis la fin des années 2000, lorsqu'il y a eu une augmentation significative du développement et de l'application de la CFD à tous les domaines liés aux comportements des fluides associés au transfert de quantité de mouvement, de chaleur et de masse [100]. En raison de sa capacité à anticiper le succès des conceptions ou des systèmes modernes avant qu'ils ne soient fabriqués ou appliqués, la CFD a joué un rôle important dans de nombreuses industries dans les environnements de conception technique et de recherche [101].

Les données ont été obtenues à l'aide du logiciel de dynamique des fluides numérique (CFD) ANSYS CFX 2022 R1 et validées par rapport à différentes données expérimentales comme M. Henderson et Wieselberger [107,108]

Les deux principaux effets du vent sur les installations PTC sont les charges aérodynamiques sur les collecteurs et le refroidissement du tube récepteur par convection forcée du flux d'air autour du tube. Une série de simulations en vue latérale a été réalisée sur le capteur solaire LS-2. Plusieurs études numériques qui ont étudié les effets du vent sur les centrales PTC se sont concentrées sur une géométrie spécifique de l'auge solaire. Les charges et les effets thermiques du vent ont été étudiés par J.Paetzold et al [102], A.A.Hachicha [103] sur l'exemple du capteur Eurotrough.

Cette étude examine l'effet aérodynamique et analyse l'écoulement de l'air autour d'un PTC, l'accent étant mis sur la comparaison de six angles différents de 0° à 270° et sur la façon dont ils affectent les forces du vent sur la structure du PTC, qu'elle fonctionne ou non, ainsi que sur les propositions qui peuvent affecter le système de suivi pour optimiser l'efficacité du PTC en raison des conditions météorologiques, en particulier la vitesse du vent.

### 3.2 Présentation du logiciel

ANSYS est un éditeur de logiciels spécialisé en simulation numérique. L'entreprise a son siège à Canonsburg en Pennsylvanie aux États-Unis . ANSYS Workbench est une plateforme de simulation qui permet aux utilisateurs de modéliser et de résoudre un large éventail de problèmes d'ingénierie à l'aide de l'analyse par éléments finis (FEA). Il donne accès à la famille de modules de conception et d'analyse ANSYS dans un environnement de simulation intégré. Où Workbench est un progiciel conçu pour construire et mailler des modèles pour la dynamique des fluides numérique (CFD) et d'autres applications scientifiques. Workbench est utilisé comme pré-processeur par défaut pour le solveur ANSYS Fluent CFD. CFD-Post est l'interface pour le post-traitement. Nous pouvons en citer quelques-uns tels que :

Ansyp Mechanical : permet de résoudre des problèmes complexes d'ingénierie structurelle et de prendre des décisions de conception meilleures et plus rapides. Grâce aux solveurs d'analyse par éléments finis (FEA) disponibles dans la suite, il peut personnaliser et automatiser les solutions aux problèmes de mécanique des structures et les paramétrer pour analyser de multiples scénarios de conception. Ansys Mechanical est un outil dynamique qui dispose d'une gamme complète d'outils d'analyse.

Ansyp Fluent : Ce logiciel est un solveur : il n'inclut pas de maillage (le maillage doit être fait avec un logiciel de maillage, Gambit par exemple, qui est produit par le même éditeur). Le paramétrage du modèle se fait à travers une interface graphique. Il dispose d'une interface de scripting pour automatiser les processus de calcul. L'un des intérêts de ce logiciel de simulation généraliste est qu'il dispose d'un nombre relativement important de modèles, permettant de traiter divers aspects de la mécanique des fluides : écoulements diphasiques (miscibles, immiscibles, cavitation, solidification), turbulence (LES, KE, Kw, SA, contrainte de Reynolds...), combustion (pré-mélangée et non-pré-mélangée), transport de particules, écoulements en milieux poreux, maillages mobiles et dynamiques avec reconstruction du maillage, entre autres. . Fluent est intégré dans la suite logicielle de simulation ANSYS.

Ansyp CFX : Il s'agit d'un code général de dynamique des fluides numérique (CFD). Il fournit une grande variété de modèles physiques pour les écoulements turbulents, l'acoustique, la modélisation des écoulements multiphasiques eulériens et lagrangiens, le rayonnement, la combustion et les réactions chimiques, le transfert de chaleur et de masse, y compris le CHT (transfert de chaleur conjugué dans des domaines solides). Il est surtout utilisé pour simuler les

turbomachines, telles que les pompes, les ventilateurs, les compresseurs et les turbines à gaz et hydrauliques.

### 3.3 Configuration et modèle numérique

Le domaine de calcul est défini par  $5W$  dans la direction amont,  $20W$  dans la direction aval (direction  $x$ ),  $9W$  dans la direction transversale (direction  $y$ ), et  $\pi W$  dans la direction de l'envergure (direction  $z$ ), où la distance focale = 1.84 et  $W=5$  m est la largeur d'ouverture du capteur solaire LS-2 Eurotrough. La longueur et l'épaisseur de la parabole sont respectivement de 7,8 m et 0,05 m. L'écoulement dans la direction de l'envergure (direction  $z$ ) peut être considéré comme spatialement périodique dans cette direction. Notez que l'utilisation d'un domaine spatialement périodique implique que la taille de l'envergure doit être suffisamment grande pour contenir les plus grandes échelles de l'écoulement [103]. la longueur de  $\pi \cdot W$  pour les directions de l'envergure n'est pas utilisée dans les cas présentés. Les calculs sont effectués pour 1m dans la direction  $z$ . Le HCE n'a pas été considéré dans les simulations aérodynamiques.

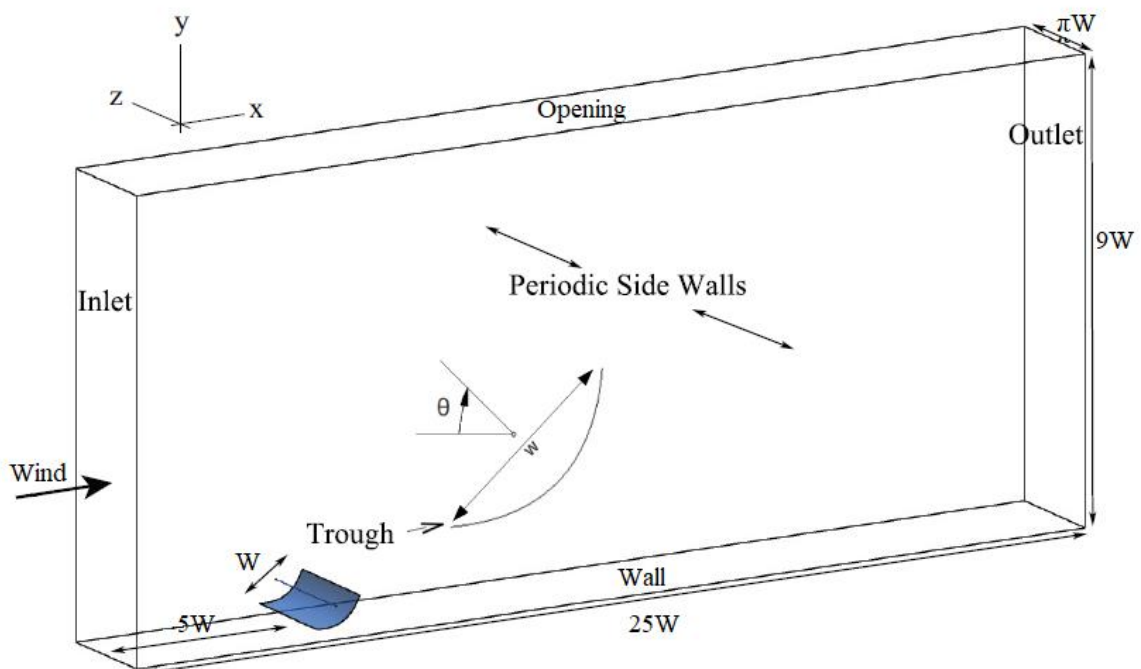


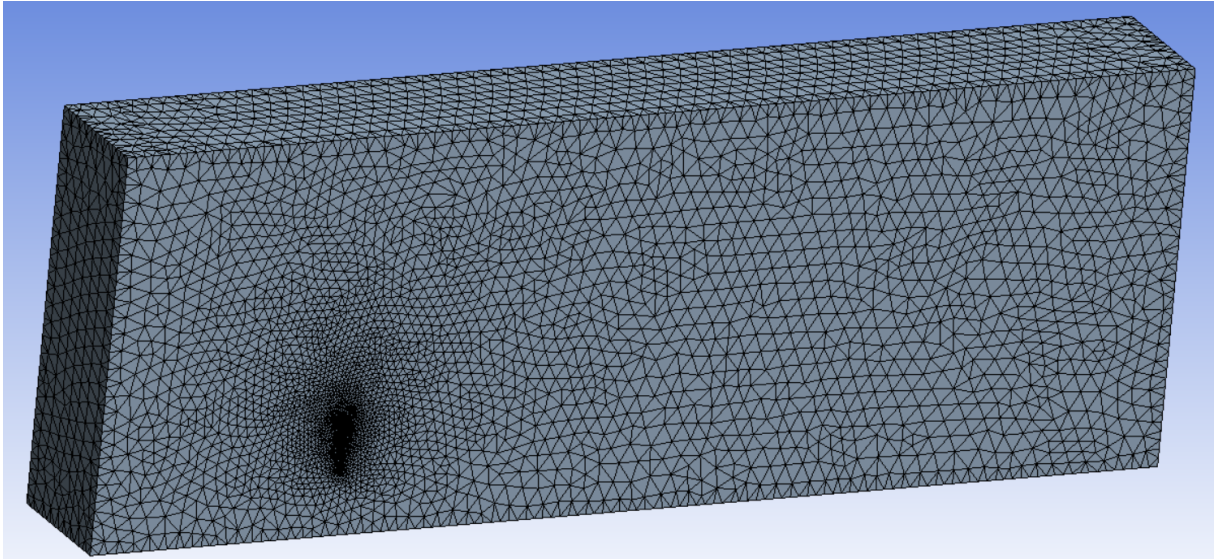
Figure 3. 1 Domaine de calcul de l'étude de l'écoulement du vent autour d'un capteur solaire.[TIP] modifiée

Deux vitesses d'écoulement d'air à l'entrée ont été prises uniformes à 0,033m/s (0,12 km/h) et 14 m/s (50 km/h) correspond à un nombre de Reynolds de  $8,5 \times 10^4$  et  $4,4862 \times 10^6$  respectivement, l'hypothèse de vitesse uniforme représente le pire scénario pour le chargement structurel et pourrait être incorporée comme un facteur de sécurité de conception [104]. Les

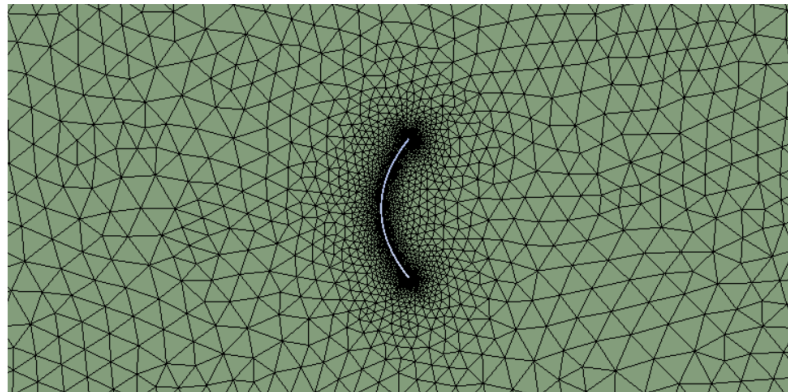
conditions aux limites ont été définies, comme l'entrée comme indiqué ci-dessus, des parois latérales périodiques ont été appliquées aux côtés latéraux du domaine, l'ouverture au sommet avec une pression relative de 0, la limite du sol comme une paroi sans glissement et une sortie avec une pression relative de 0 tout comme l'ouverture. Le domaine par défaut utilisait de l'air incompressible à 1 bar, une température fixée à 25°C avec une densité de 1,185 kg/m<sup>3</sup> et une viscosité dynamique de 1,849 x 10<sup>-5</sup> kg/m.s, tandis que l'intensité de la turbulence était fixée comme paramètre par défaut à 0,05.

La méthode de structure de maillage Tetrahedron a été appliquée pour le processus de qualité du maillage. Un dimensionnement des arêtes a été appliqué pour chaque arête des conditions limites du domaine et des raffinements pour les 4 arêtes de la parabole, plus un maillage des faces. La taille maximale des éléments du maillage était de 100 mm. Le maillage comprenait environ 79080 nœuds et 46039 éléments.

Six angles d'orientation différents ont été examinés (rotation autour de l'axe xy). Les angles appliqués étaient de 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 270° et ont été comparés aux résultats expérimentaux et numériques de M. Mier-Torrecilla et al [105]. Deux graphiques de suivi des coefficients de traînée et de portance ont été créés dans les simulations pour calculer le coefficient moyen des deux, ainsi que le contour de pression et de vitesse et la ligne de courant de la parabole choisie.



(a)



(b)

Figure 3. 2 Exemple de distribution de maillage à la position  $\theta = 90^\circ$  : (a) vue 3D, (b) autour du PTC.

### 3.4 Validation du modèle numérique

L'étude de la parabole précédente a été vérifiée et validée en utilisant des résultats numériques avec des données expérimentales et théoriques issues de la bibliographie de la recherche scientifique. Une simulation transitoire a été effectuée sur un cylindre circulaire d'un diamètre de 50 mm dans un écoulement transversal pour tester la précision du modèle numérique. Les résultats moyens transitoires et la distribution des forces de traînée autour de la circonférence du cylindre étaient en accord avec les mesures expérimentales de Posdziech et Grundmann [106], Henderson [107], Wieselberger [108] et Khan et al [109]. Afin de comparer les présents résultats avec les expériences précédentes, le nombre de Reynolds a également été choisi parmi (10, 100, 400 et 1000) pour l'écoulement transversal autour d'un cylindre horizontal. La qualité du maillage et la distribution des conditions aux limites ont été considérées de la même manière que pour le modèle précédent. Le domaine de calcul est généré

à  $[0, 125W]$  ;  $[0, 45W]$  ;  $[0, \pi W]$  dans les directions de l'écoulement, du croisement et de l'envergure respectivement, et le cylindre avec un diamètre  $D$  est placé à  $(25,15,15.7)$ .

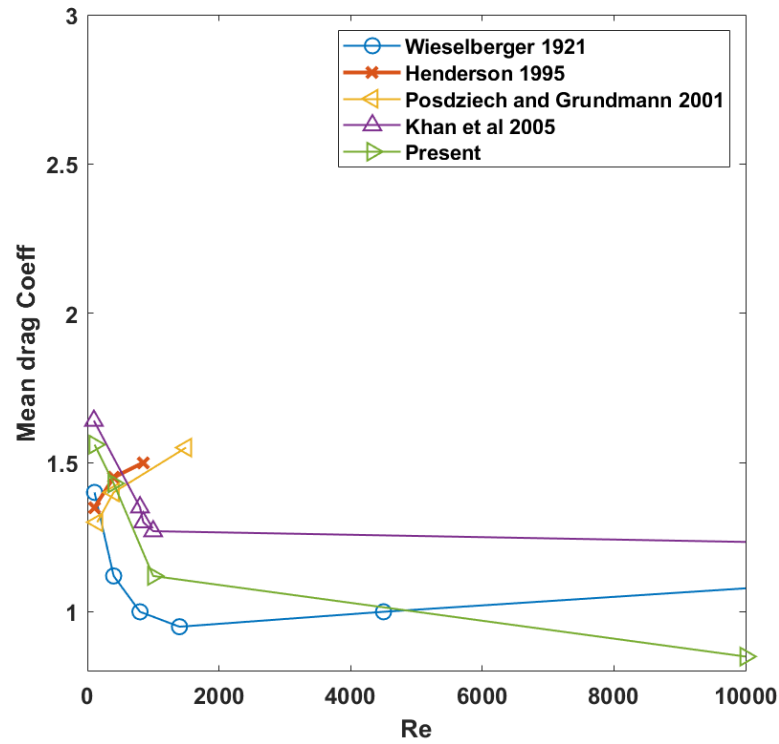
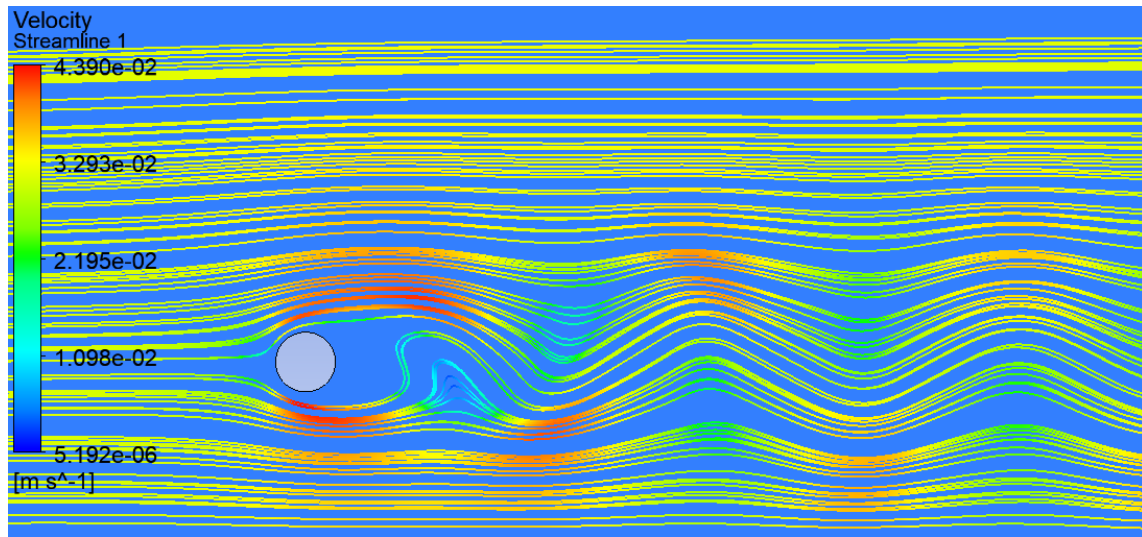
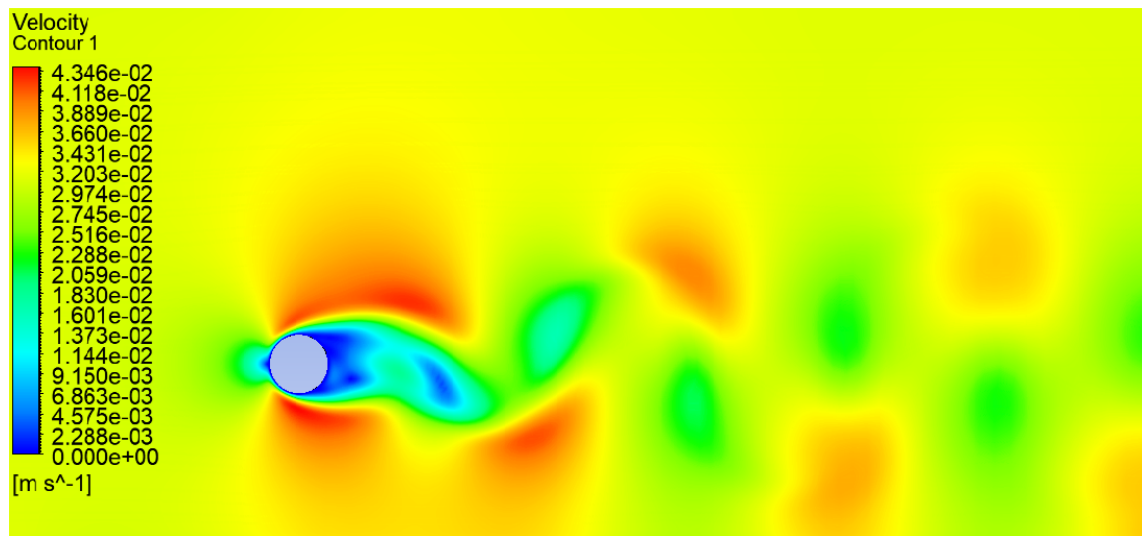


Figure 3. 3 Coefficient de traînée en fonction du nombre de Reynolds pour un cylindre circulaire dans un écoulement transversal : Comparaison avec des données expérimentales.

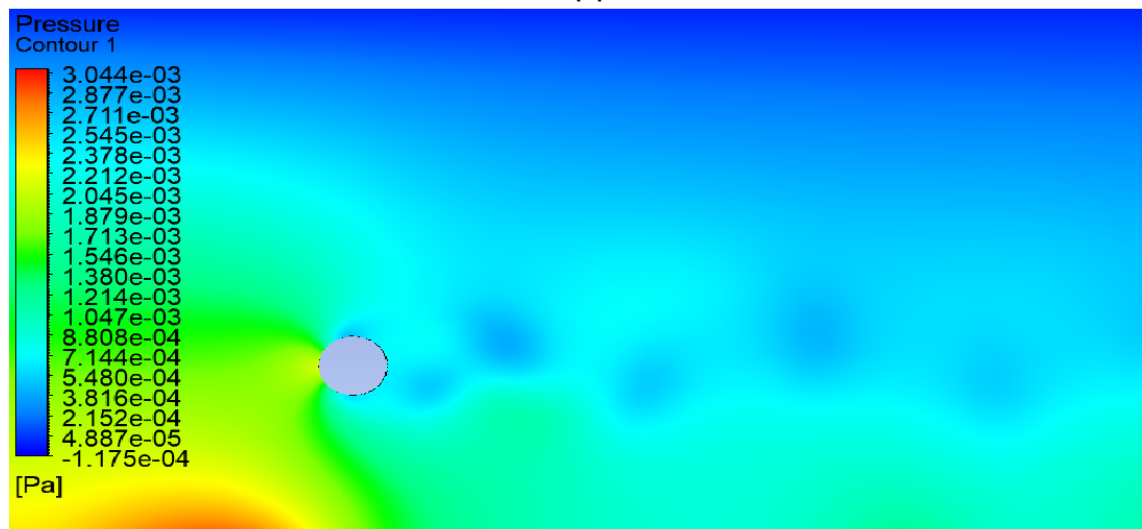




(a)



(b)

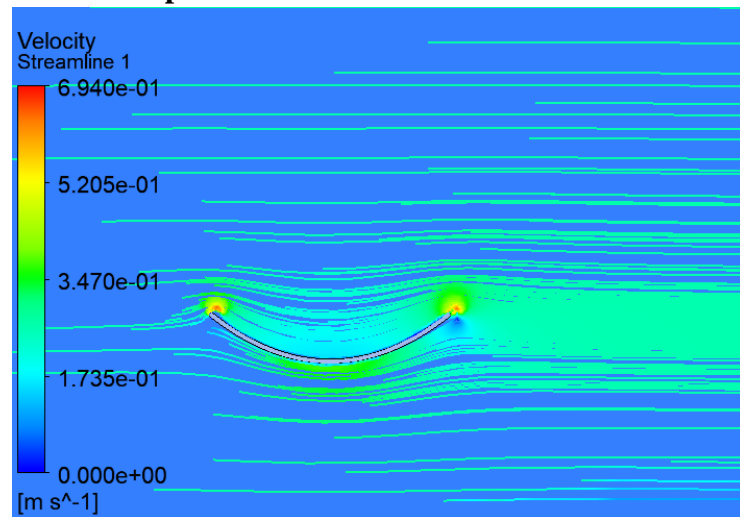


(c)

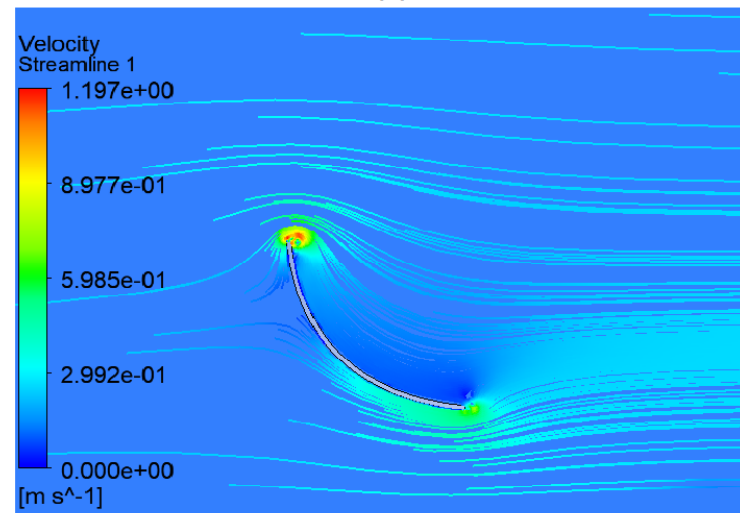
Figure 3. 4 Exemple d'un cylindre circulaire dans un écoulement transversal à  $Re = 100$  : (a) Ligne de vitesse, (b) contour de vitesse d'écoulement, (c) contour de pression.

3.5 Resultats et discussion

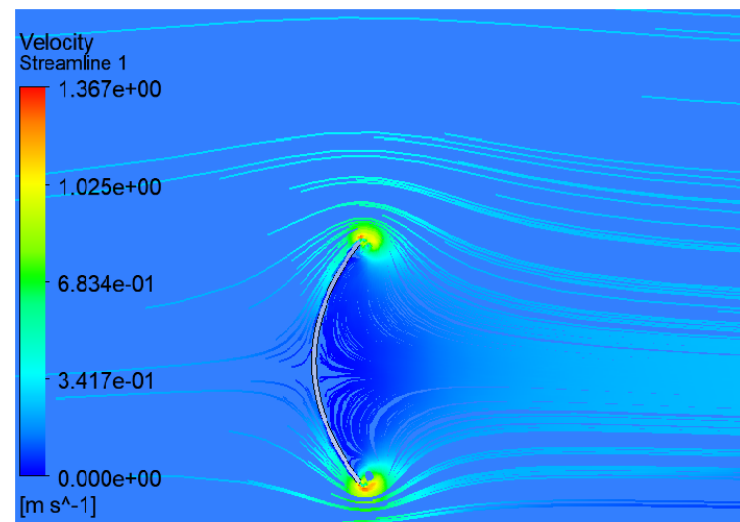
3.5.1 Vitesse d'écoulement pour  $Re = 85000$



(a)



(b)



(c)

Figure 3. 5 Ligne de vitesse pour  $Re = 85000$  : (a)  $\theta = 0^\circ$  , (b)  $\theta = 45^\circ$  , (c)  $\theta = 90^\circ$ .

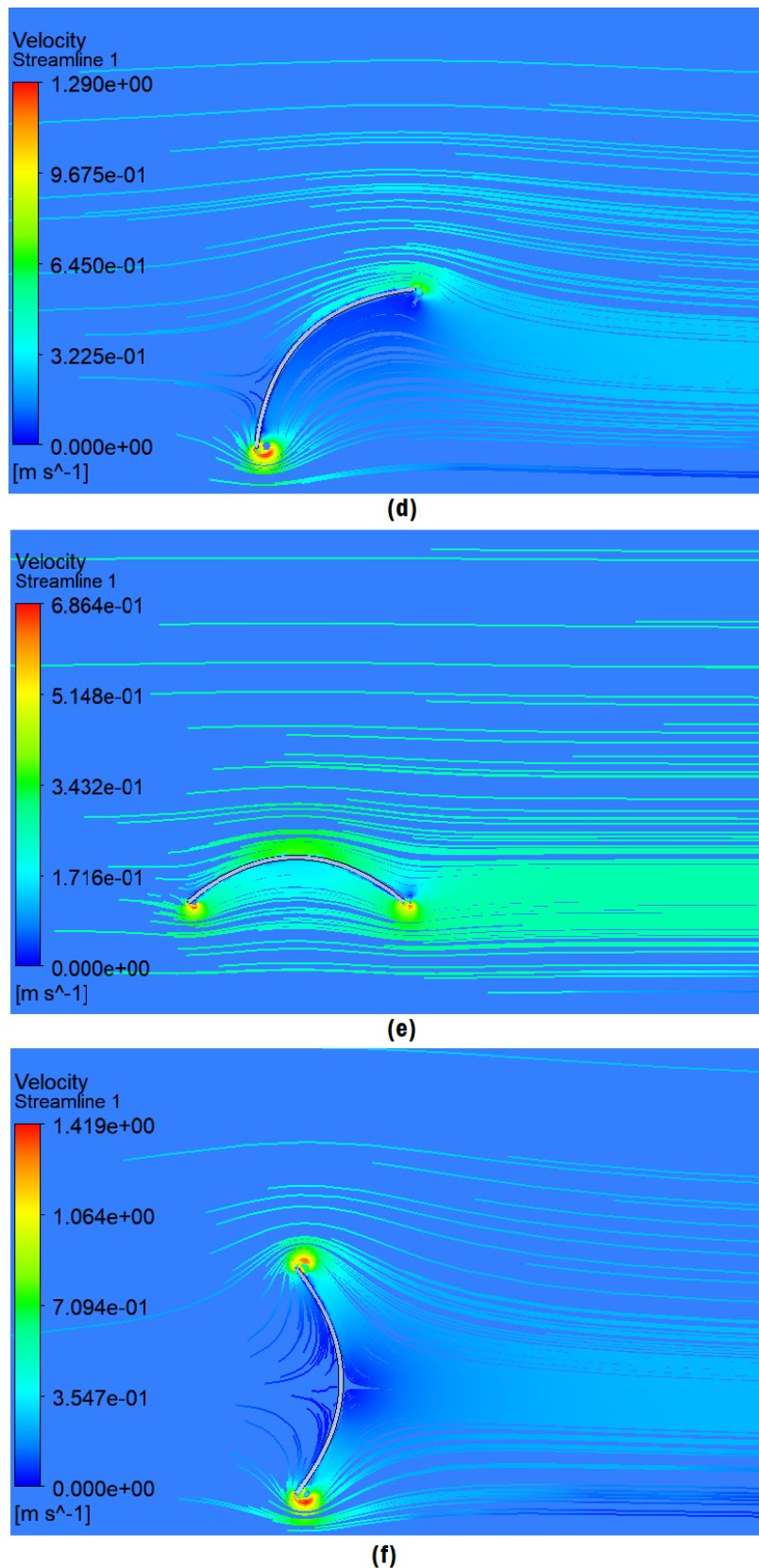


Figure 3. 6 Ligne de vitesse pour  $Re = 85000$  : (d)  $\theta = 135^\circ$  , (e)  $\theta = 180^\circ$  , (f)  $\theta = 270^\circ$ .

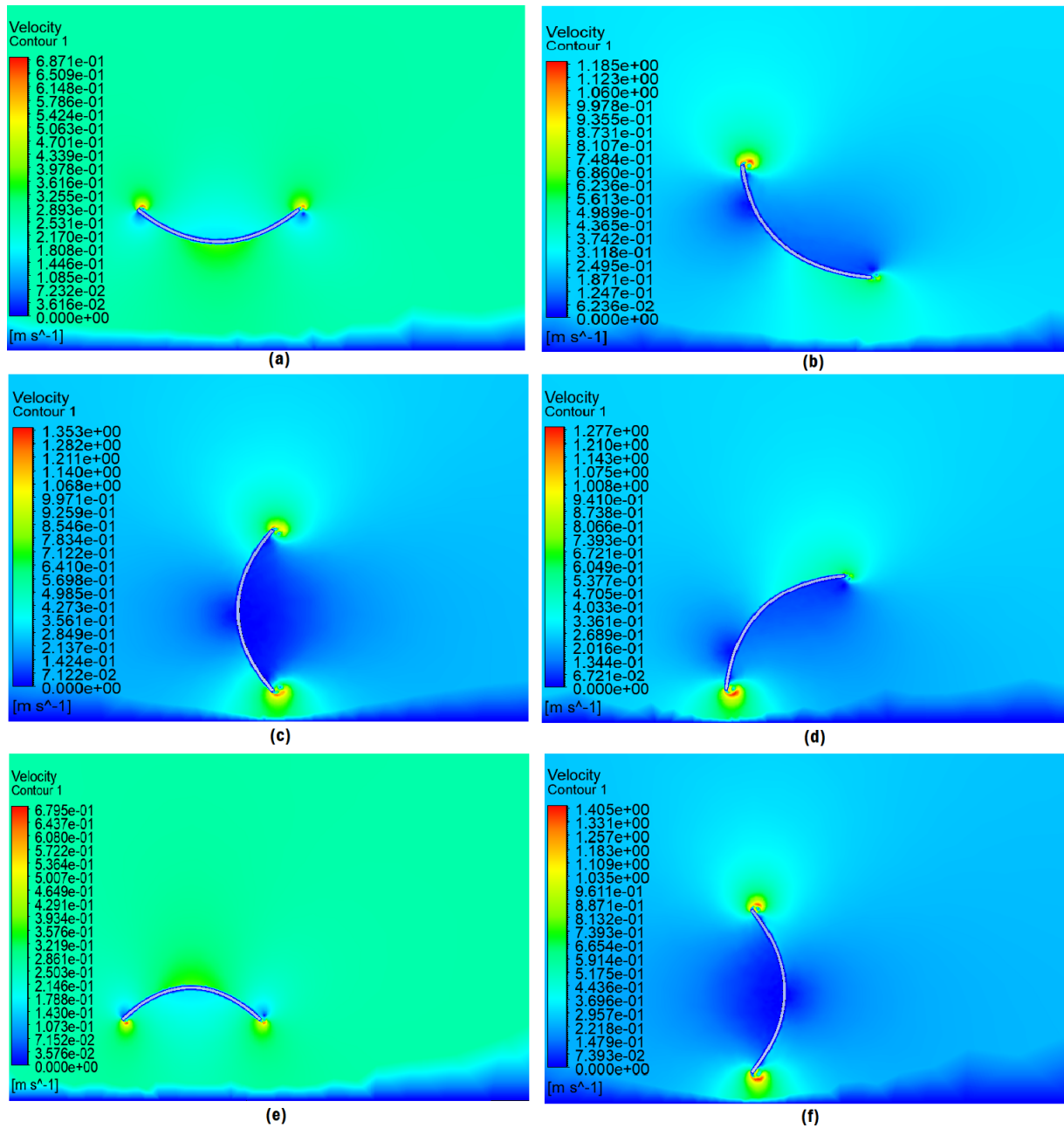


Figure 3. 7 Vitesse de l'écoulement du PTC pour  $Re = 85000$  : (a)  $\theta = 0^\circ$  , (b)  $\theta = 45^\circ$  , (c)  $\theta = 90^\circ$  , (d)  $\theta = 135^\circ$  , (e)  $\theta = 180^\circ$  , (f)  $\theta = 270^\circ$ .

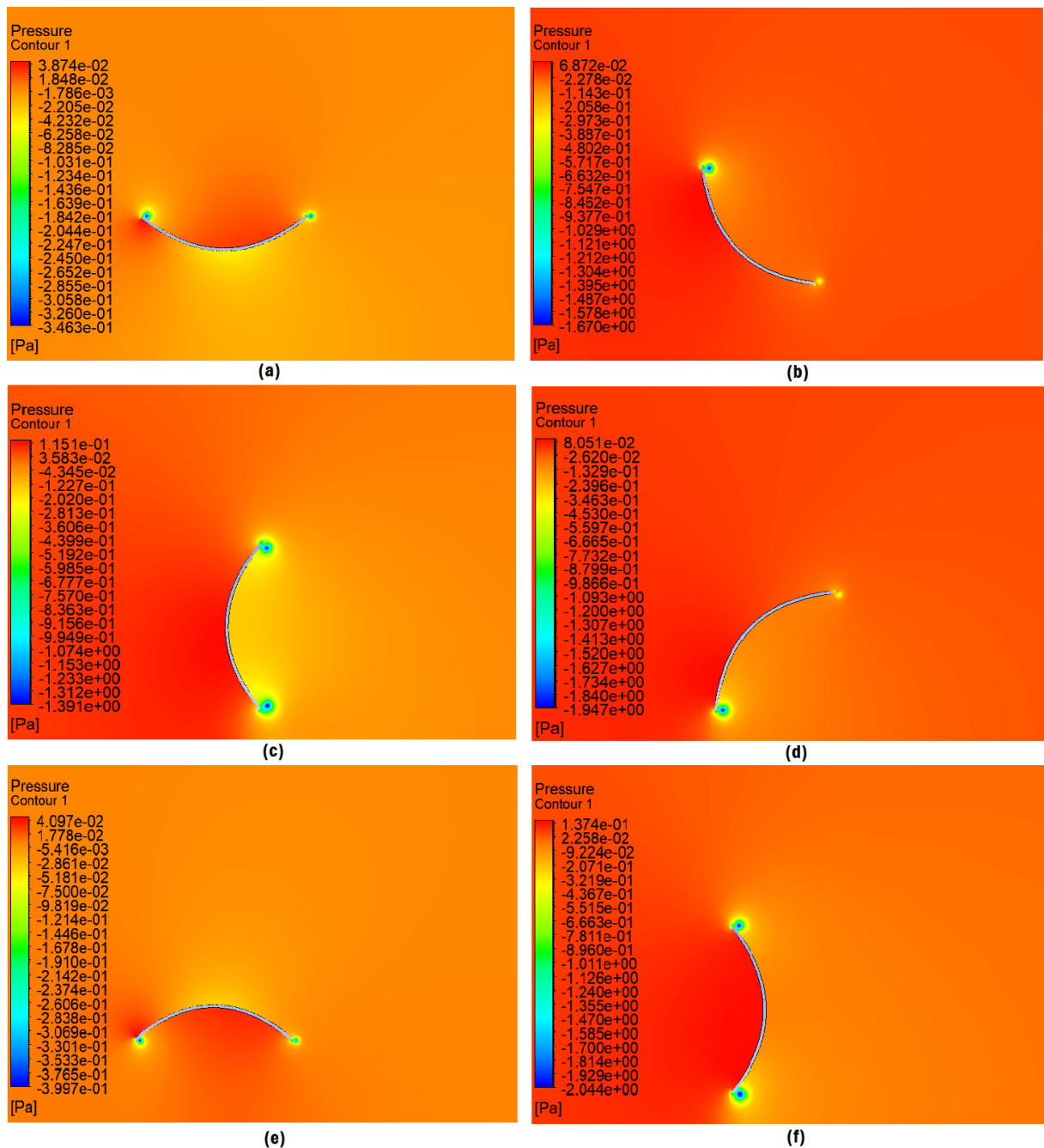
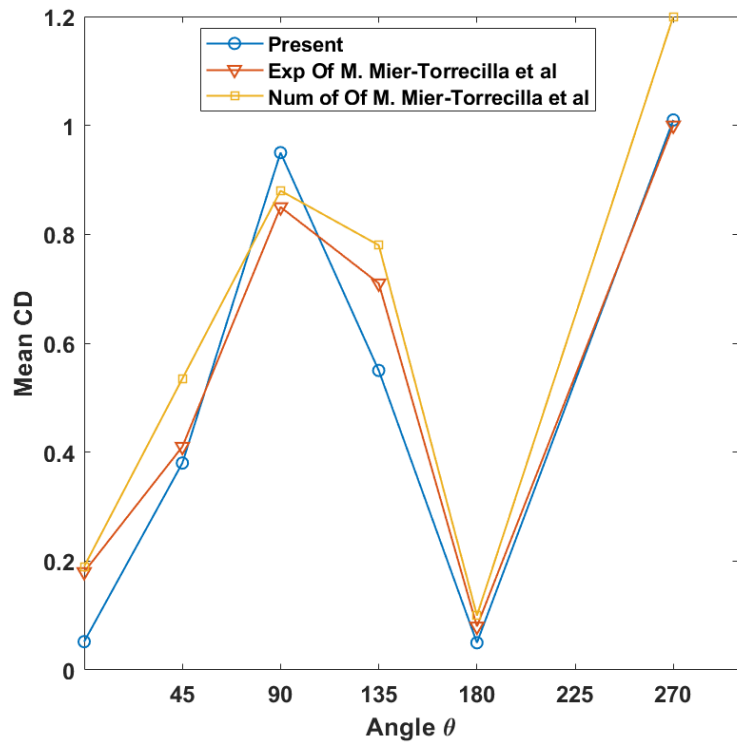
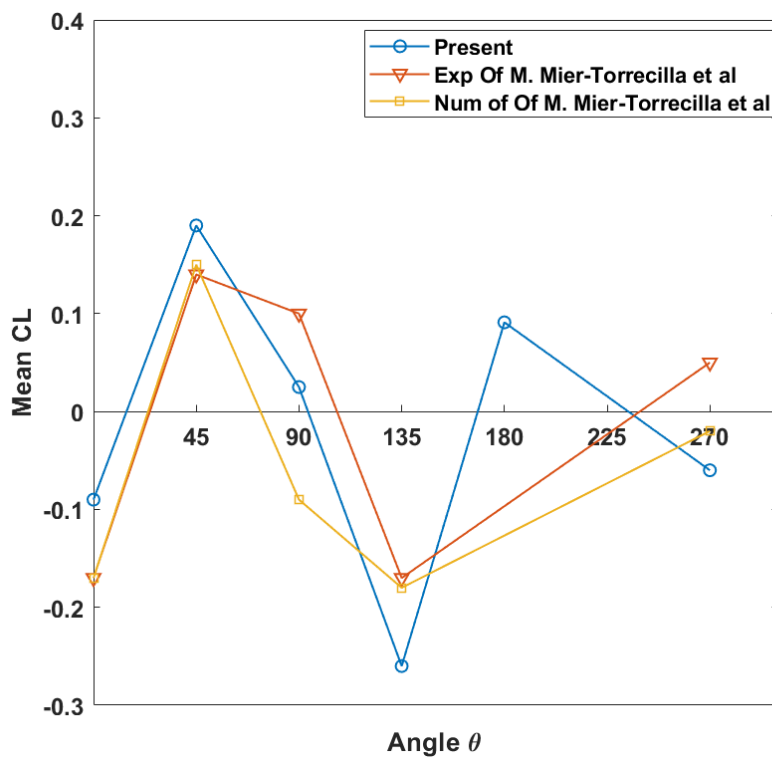


Figure 3. 8 Contour de pression du PTC pour  $Re = 85000$  : (a)  $\theta = 0^\circ$  , (b)  $\theta = 45^\circ$  , (c)  $\theta = 90^\circ$  , (d)  $\theta = 135^\circ$  , (e)  $\theta = 180^\circ$  , (f)  $\theta = 270^\circ$ .

Depuis la figure 3.7 on peut noter des tourbillons de pointe négligeable sur toutes les positions en place. La vitesse la plus importante se présente en dessous du LS-2 ( 1.4 m/s). Le collecteur atteint son rendement maximale vers  $\theta = 0^\circ$  et  $\theta = 45^\circ$ , du coup on s'intéresse à la pression à l'intérieur de notre silhouette. Aucune sous-pression s'est présentée à l'intérieur ni à l'extérieur du PTC ce qui favorise en occurrence le transfert de chaleur vers le HCE.



(a)



(b)

Figure 3. 9 Résultats numériques et expérimentaux pour un PTC à  $Re = 85000$  : (a) coefficient de traînée moyen, (b) coefficient de portance moyen.

Les résultats de notre simulation pour le même nombre de Reynolds sont validés et montrent une grande concordance dans un premier temps avec les résultats numériques de M. Mier-Torrecilla et al mais également expérimentaux (par soufflerie) de ce dernier. Vers  $\theta = 270^\circ$  le coefficient de traînée atteint une valeur maximale autour de 1 et 1.2. Pour  $\theta = 45^\circ$  ce dernier n'atteint pas la valeur 1 mais joue sur des valeurs de 0.8 et 0.9. En se décalant pour  $\theta = 0^\circ$  la traînée reste comprise 0.06 et 0.17. L'angle  $\theta = 135^\circ$  montre une valeur minimale de traînée pour les trois résultats.

La position fonctionnelle du parabole en  $\theta = 45^\circ$  et non fonctionnelle  $\theta = 180^\circ$  subit une force de traînée modérée (0.2 et 0.1 respectivement) par rapport aux angles qui restent. La force de portance étant négative en  $\theta = 135^\circ$  car la position du PTC sert à dissiper l'écoulement du vent à travers sa face arrière ce qui provoque une poussée opposée à l'axe Y. Une valeur négative peut être observée en  $\theta = 0^\circ$  du coefficient de portance ce qui convient parfaitement pour la stabilité du collecteur.



3.5.2 Vitesse d'écoulement pour  $Re = 4.850 \times 10^6$

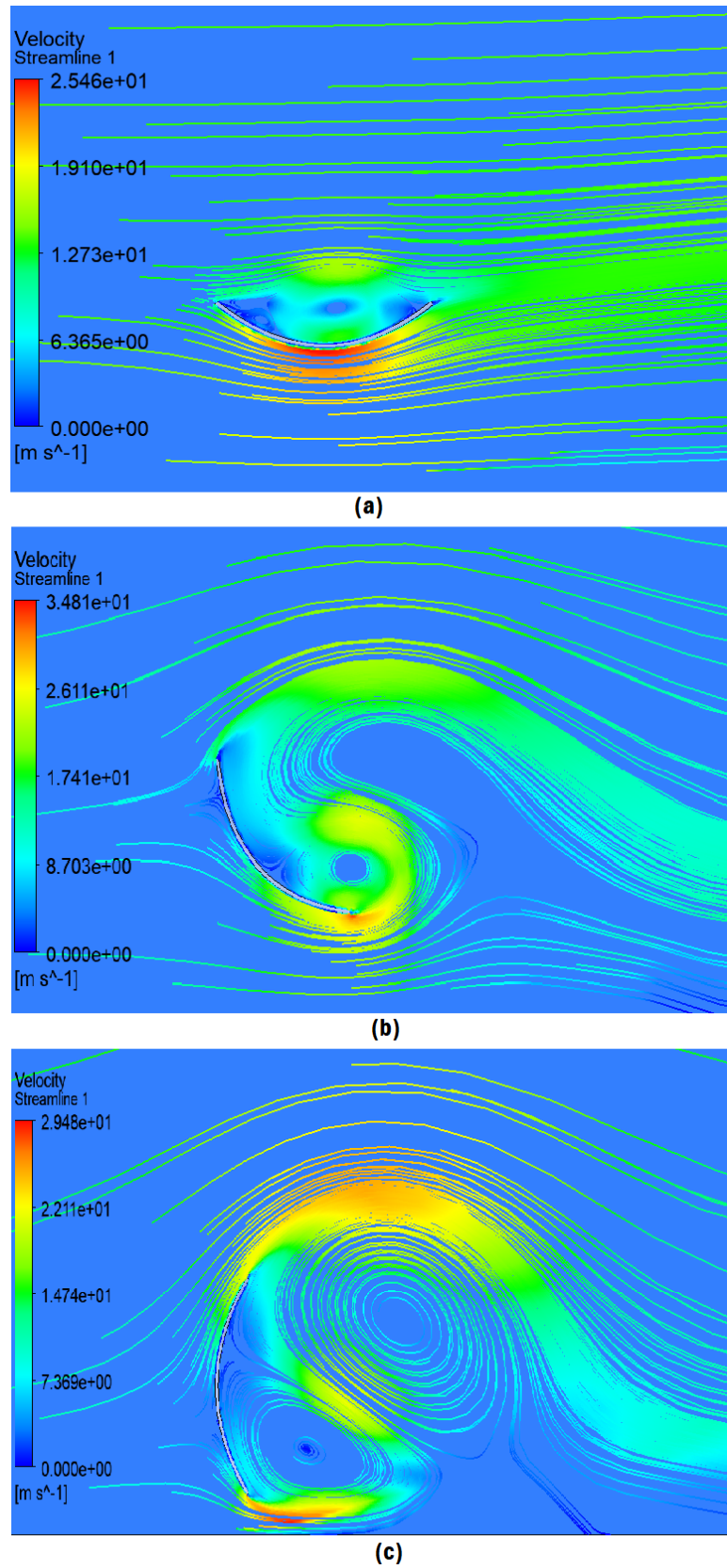


Figure 3. 10 Ligne de vitesse pour  $Re = 4.85 \times 10^6$  : (a)  $\theta = 0^\circ$  , (b)  $\theta = 45^\circ$  , (c)  $\theta = 90^\circ$ .



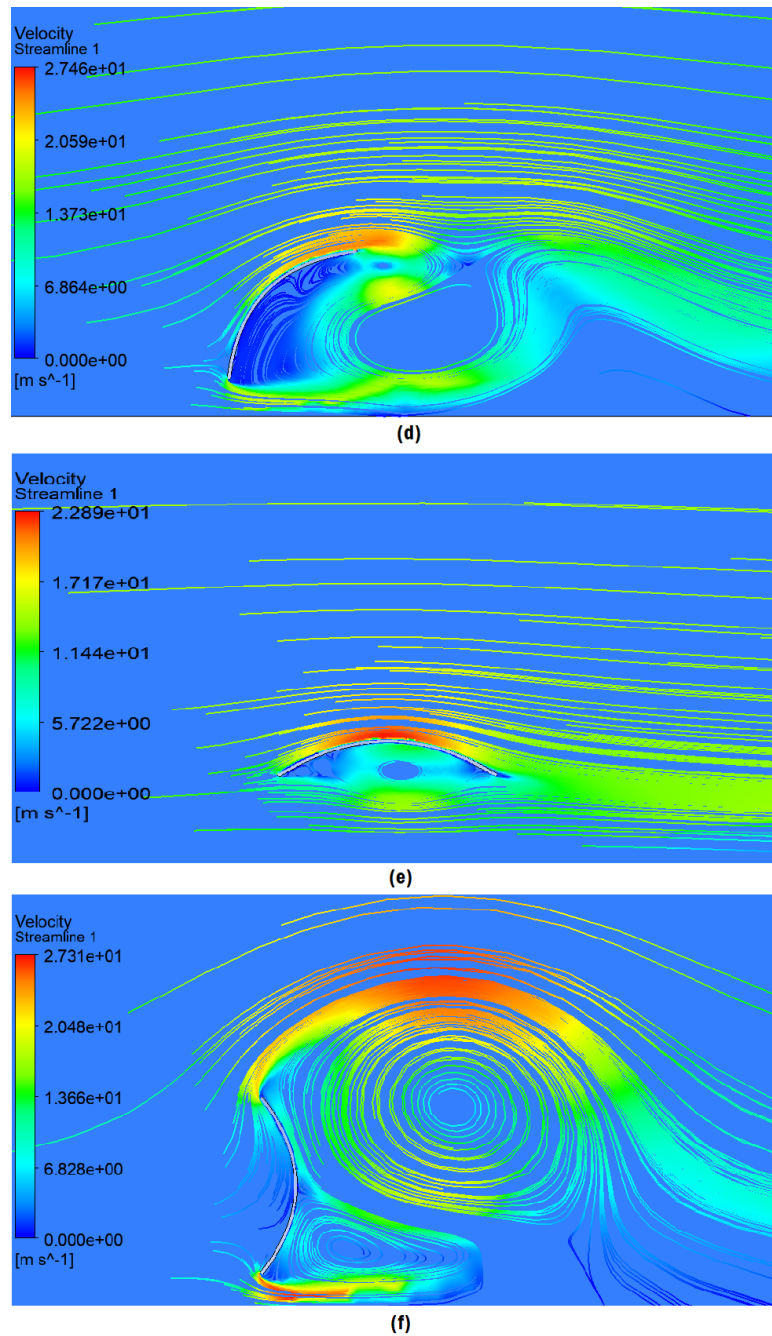


Figure 3. 11 Ligne de vitesse pour  $Re = 4.85 \times 10^6$  : (d)  $\theta = 135^\circ$  , (e)  $\theta = 180^\circ$  , (f)  $\theta = 270^\circ$ .

Les deux figures au dessus représentent les lignes de courant à travers le parabole dans différents angles de rotation. Vers  $\theta = 45^\circ$  on peut observer un premier tourbillon peu intense attaché au bord inférieur du capteur qui se développe finissant par devenir deux tourbillons contrarotatifs vers  $\theta = 90^\circ$ . De même pour  $\theta = 135^\circ$  et  $\theta = 270^\circ$ . Notre PTC reste stable et n'influence pas la circulation en position  $\theta = 0^\circ$  et  $\theta = 180^\circ$  bien que les deux cas créent respectivement une accélération au-dessous et au-dessus de la parabole, ce qui explique les forces de traînée minimales.

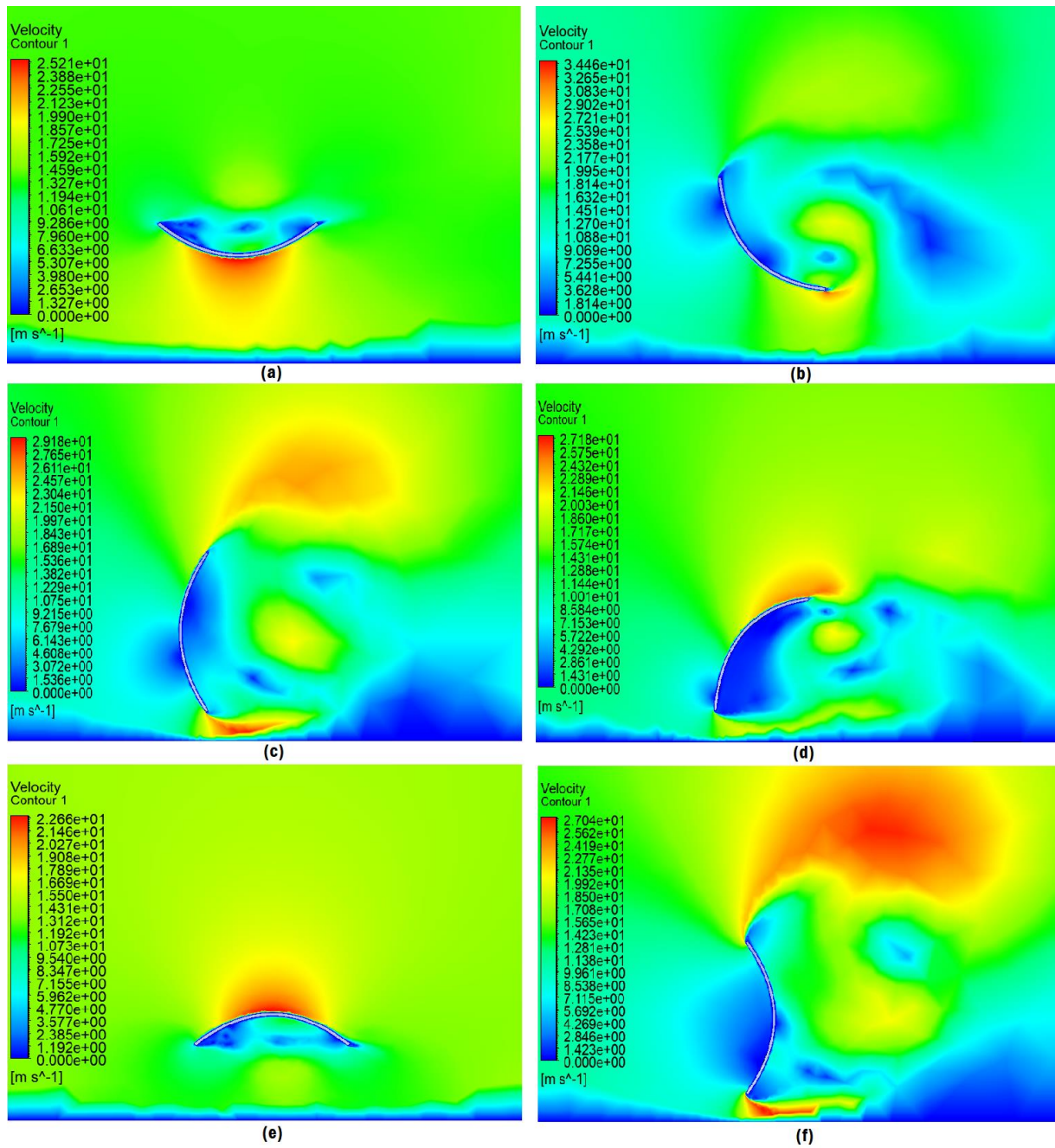


Figure 3. 12 Vitesse de l'écoulement du PTC pour  $Re = 4.85 \times 10^6$  : (a)  $\theta = 0^\circ$  , (b)  $\theta = 45^\circ$  , (c)  $\theta = 90^\circ$  , (d)  $\theta = 135^\circ$  , (e)  $\theta = 180^\circ$  , (f)  $\theta = 270^\circ$ .

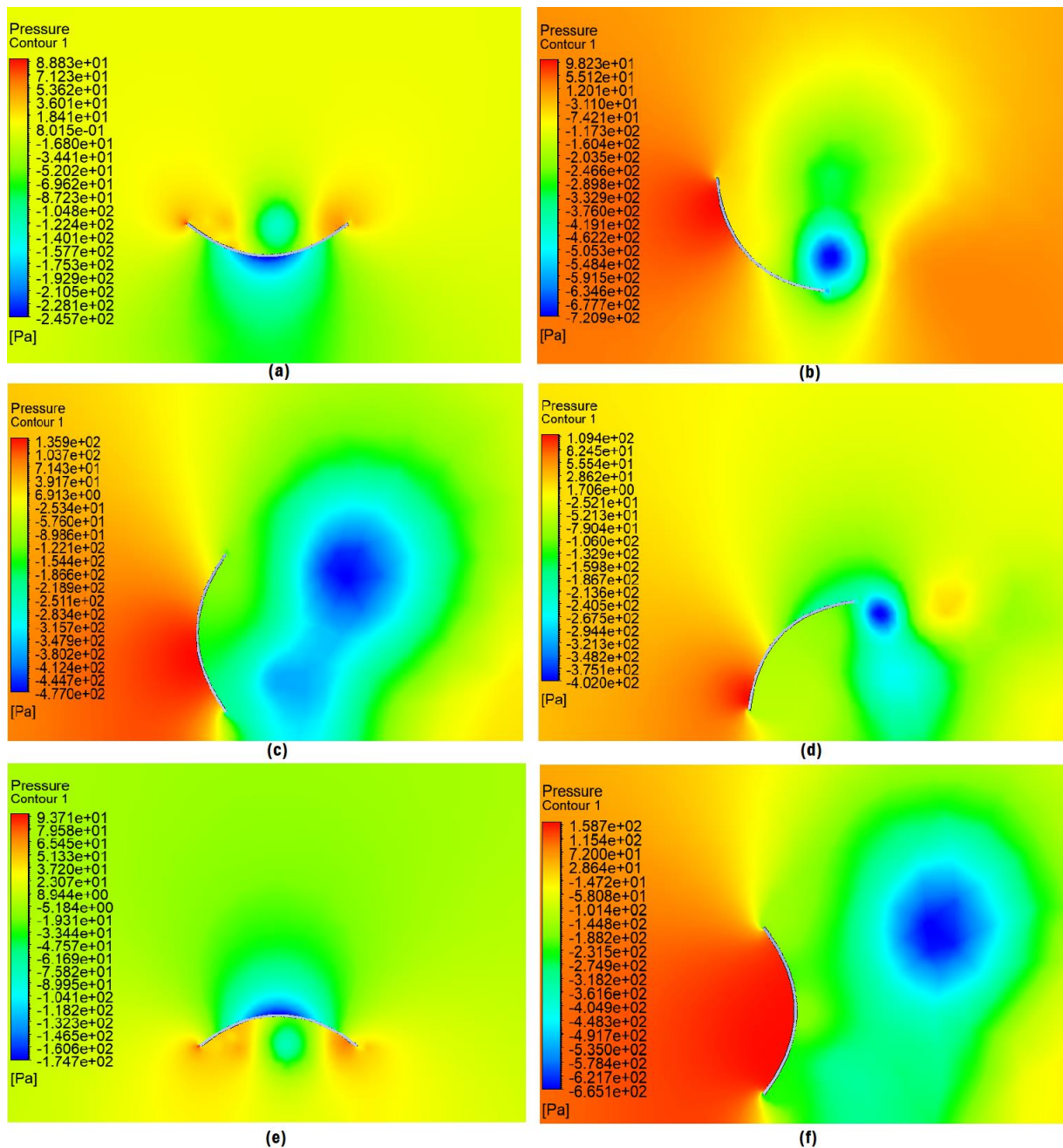


Figure 3. 13 Contour de pression du PTC pour  $Re = 4.85 \times 10^6$  : (a)  $\theta = 0^\circ$  , (b)  $\theta = 45^\circ$  , (c)  $\theta = 90^\circ$  , (d)  $\theta = 135^\circ$  , (e)  $\theta = 180^\circ$  , (f)  $\theta = 270^\circ$ .

La figure 3.13 représente les contours de pression qui atteint une valeur maximale d'environ 160 pa à l'intérieur du PTC pour  $\theta = 270^\circ$  et sur la face arrière pour  $\theta = 90^\circ$  où des pressions négatives sont observées en aval ce qu'il faut prendre en considération quand on installe plusieurs collecteur en parallèle ce qui fait réduire l'absorption de chaleur par le HCE. En déplaçant le collecteur vers  $\theta = 45^\circ$  on constate qu'une bulle de grande sous-pression apparaisse a l'extrémité basse et a l'extrémité haute pour  $\theta = 270^\circ$  du parabole qui a été engendrée par la ligne de courant.

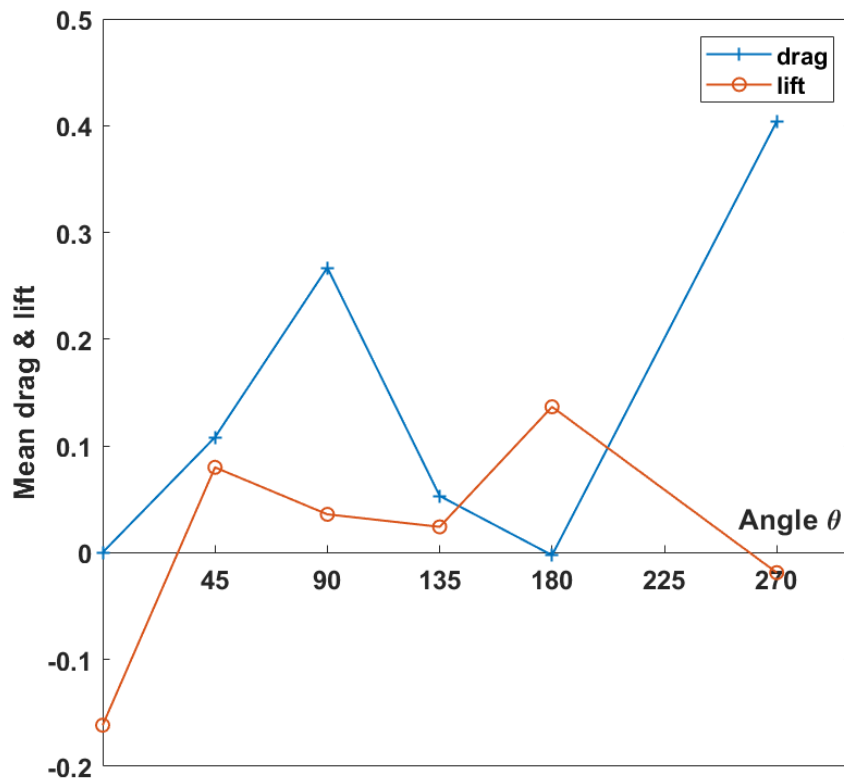


Figure 3. 14 Résultats numériques du coefficient de traînée et de portance pour le PTC pour  $Re = 4.85 \times 10^6$ .

Nous pouvons remarquer que pour des angles verticales tels que  $\theta = 270^\circ$  et  $\theta = 90^\circ$  le coefficient de trainée est d'une valeur importante en comparant avec les positions semi-horizontales ( $\theta = 135^\circ$  et  $\theta = 45^\circ$ ), sauf que dans les cas où la parabole fait face au courant les valeurs s'améliorent encore plus. Tandis que lorsque nous orientons notre profil pour  $\theta = 0^\circ$  et  $\theta = 180^\circ$  la trainée est nulle. Le coefficient de portance démontre des données négatives en  $\theta = 270^\circ$  et  $\theta = 0^\circ$ . La valeur atteinte en  $\theta = 0^\circ$  est égale à -0.16 et de -0.02 vers  $\theta = 270^\circ$ . En allant vers  $\theta = 135^\circ$ ,  $\theta = 90^\circ$  et  $\theta = 45^\circ$  les résultats augmentent de 0.036, 0.025 et 0.08 respectivement en réduisant l'angle theta par rapport à l'axe (xy). L'angle non fonctionnelle  $180^\circ$  indique la valeur la plus importante d'environ 0.14, malgré que le collecteur n'est pas fonctionnel à cette position mais il faut prendre en compte la fiabilité et robustesse du gabarit en acier qui maintient ce dernier.

# **Conclusion générale**

### Conclusion générale

Un modèle numérique basé sur le modèle Eurotech LS-2 pour simuler l'écoulement du fluide autour d'un capteur solaire cylindro-parabolique est présenté dans ce travail. Cette étude fournit une évaluation quantitative des lignes d'écoulement, vitesse du vent et des domaines de pression autour d'un capteur solaire parabolique isolé. Comme première étape, la précision du modèle numérique a été vérifiée sur un cylindre circulaire dans un écoulement transversal pour différents nombre de Reynolds avec des données expérimentales et théorique disponible.

Les coefficients aérodynamiques sont calculés autour du PTC et étaient en accord avec des mesures expérimentales et numérique du modèle, bien que certaines divergences soient observées en raison du comportement instationnaire de l'écoulement et des effets de sol. Dans une deuxième étape pour observer l'écoulement instantané autour de la parabole, six différentes positions ont été testées pour des angles de  $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ . Pour un nombre de Reynolds égal à 85000 ou la vitesse du vent est quasiment nulle, Les forces aérodynamiques impliquées sont faibles pour les orientations qui sont dans le contre-courant mais peuvent atteindre des valeurs plus élevées dans la direction opposée comme  $\theta = 270^\circ$ . Par déduction le fait qu'une vitesse de vent aussi faible ne génère pas des forces de trainée significatif on peut se permettre d'installer plusieurs capteurs solaires en parallèle sans laisser une grande distance entre ces derniers pour obtenir une puissance nominale du champ très élevée.

Un second type d'écoulement est généré en régime transitoire turbulent l'équivalent d'un nombre d'un Reynolds égal à  $4.85 \times 10^6$ , la vitesse du flux à l'entrée est de 14m/s. La parabole génère des forces de trainée importante dans le cas où elle est verticale à la normale d'où  $\theta = 90^\circ$  et  $\theta = 270^\circ$ . La géométrie provoque des forces de portance élevées en faisant face au sol ( $\theta = 180^\circ$ ) et négative quand  $\theta = 0^\circ$  ce qui fait pousser vers le bas.

Enfin, nous affirmons que l'outil CFD testé est approprié pour prédire les charges de vent sur les capteurs paraboliques et qu'il est complémentaire aux essais en soufflerie. La CFD permet de surmonter de nombreuses difficultés inhérentes à la soufflerie, notamment la soufflerie, y compris la limitation de l'échelle (et donc du nombre de Reynolds) et la restriction du nombre de modules pouvant être testés dans un réseau. modules qui peuvent être testés dans une configuration en réseau. Les charges de vent dans les champs solaires paraboliques sont complexes, et doivent être Les charges de vent dans les champs solaires paraboliques sont complexes et doivent être calculées en tant qu'écoulement transitoire tridimensionnel, incluant plusieurs rangées de capteurs, et doivent tenir compte de l'intensité de la turbulence l'intensité de la turbulence du vent.

# **Références Bibliographiques**



## Références bibliographiques

- [1] document produced for the U.S. Department of Energy (DOE) by the National Renewable Energy Laboratory (NREL).
- [2] *Renewable Energy World*. [Online]. Available:<http://www.renewableenergyworld.com/rea/tech/geothermal-energy>, 2012.
- [3] *Popular Mechanics Magazine*, pp. 10- 12, September 2005.
- [4] *Time Magazine*, pp. 32-33, August 2005.
- [5] *Journal of Innovations in Renewable Energy*, vol. 2, pp. 24-25, June 2005.
- [6] *Journal of Clean Energy Technologies, Vol. 2, No. 1, January 2014*.
- [7] U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, **Hydrogen Production Pathways**.
- [8] Garg, H.P. and Prakash, J. 2000. Solar energy fundamentals and applications. India: Tata McGraw-Hill.
- [9] Thirugnanasambandam, M., Iniyan, S. and Goic, R. 2010. A review of solar thermal technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14: 312–322.
- [10] **[https://www.nj.gov/dep/opsc/docs/Active\\_Solar.pdf](https://www.nj.gov/dep/opsc/docs/Active_Solar.pdf)** new jersey department of environmental protection.
- [11] **<https://www.networx.com/article/thermal-mass-is-passive-solar-design>**.
- [12] **<http://solarenergy.solaren-power.com/what-solar-energy/active-solar-energy-design/>**.
- [13] **<https://esc.fsu.edu/>** Sustainable Energy Science and Engineering Center. Florida State university.
- [14] Geoengineering.global **<https://geoengineering.global/solar-radiation-management/>** by Nasa gpm at **<https://gpm.nasa.gov/>**.
- [15] **<http://www.rnlkwc.ac.in/>** THE FOUR LAWS OF RADIATION Dr. Pravat Kumar Shit Assistant Professor of Geography, Raja N.L.Khan Women's College (Autonomous), Midnapore.
- [16] **[https://www.thephysicalenvironment.com/Book/energy/nature\\_of\\_electromagnetic\\_radiation.html](https://www.thephysicalenvironment.com/Book/energy/nature_of_electromagnetic_radiation.html)** The Physical Environment, Energy and Radiation.



- [17] “Sources and impacts of greenhouse gases” <https://www.ldeo.columbia.edu/>
- [18] Geoengineering.global <https://geoengineering.global/solar-radiation-management/>  
By Robert A. Rohde and the Global Warming Art Project.
- [19] Vanek, Francis M. and Albright, Louis D., Energy Systems Engineering - Evaluation and Implementation, McGraw Hill, New York, 2008.  
<http://mcensustainableenergy.pbworks.com/>
- [20][https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials\\_Science/Supplemental\\_Modules\\_\(Materials\\_Science\)/Solar\\_Basics/B. Basics of the Sun/V. Air Mass](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials_Science/Supplemental_Modules_(Materials_Science)/Solar_Basics/B._Basics_of_the_Sun/V._Air_Mass)
- [21] A. Rogalski, and M. Razeghi, "Semiconductor ultraviolet photodetectors", Optoelectronics Review, 13-30, (1996).
- [22] Nelson, Jenny. The Physics of Solar Cells. London: Imperial College Press, 2003.
- [23] <https://energyeducation.ca/encyclopedia/Albedo>
- [24] Oke, 1998; Ahrens, 2001
- [25] NASA Earth Observatory. <https://earthobservatory.nasa.gov/images/2599/global-albedo>  
Source : Crystal Schaaf, Boston University, based upon data processed by the MODIS Land Science Team.
- [26] Kannan, N.; Vakeesan, D. Solar energy for future world: - A review. Renew. Sustain. Energy Rev. 2016, 62, 1092–1105, doi:10.1016/j.rser.2016.05.022.
- [27] [www.nationalgeographic.org](http://www.nationalgeographic.org)
- [28] National Oceanic and Atmospheric Administration/National Weather Service. (NOAA) (Public Domain) at <https://www.weather.gov/cle/Seasons>.
- [29] <https://geography.name/why-does-insolation-vary-from-place-to-place/>
- [30] <http://www.greenrhinoenergy.com/solar/radiation/geometry.php>
- [31] The Physics of the Atmosphere, DANIEL A. VALLERO, in Fundamentals of Air Pollution (Fourth Edition), 2008.
- [32] <https://solargyaan.com/solar-altitude-angle-and-solar-azimuth-angle/>
- [33] Jie Chao, Learning Scientist at the Concord Consortium. Article “How to Determine Solar Altitude Angle” at <https://medium.com/>.
- [34]: M.E.M- Brahimi « Situation des énergies renouvelables en Algérie » Conférence sur la maîtrise de l'énergie et de l'environnement dans un contexte d'économie. Mai 2001.

- [35] F.youcef .Ettoumi, L.nacet, A. Adane, H. Sauvageot « Génération du Gisement Quotidien en Algérie » 3ème Séminaire National en Génie électrique 29.31 PP25 1, 256, 2001.
- [36] M. Capderou, 'Atlas Solaire de l'Algérie', Tomes 1, 2 et 3. Office des Publications Universitaires, 1987.
- [37] Algeria - Algeria Renewable Energy Program (AREP) - Green Baseload - SEFA Appraisal Report [www.afdb.org](http://www.afdb.org) Groupe de la banque africaine de développement.
- [38] Centre de développement des Energies Renouvelables CDER « Evaluation du potentiel énergétique solaire » Bulletin des énergies renouvelables No 2, Décembre 2002.
- [39] Centre de développement des Energies Renouvelables CDER , « 21 juin la journée nationale du soleil » Bulletin des énergies renouvelables N°1, Juin 2002.
- [40] Renewable Energy in Algeria, By Salman Zafar | October 20, 2020 | Africa, Biomass Energy, Renewable Energy, Solar Energy, Wind Energy at <https://www.ecomena.org/renewables-algeria/>
- [41] [www.sktm.dz](http://www.sktm.dz) Shariket Kahraba wa Taket Moutadjadida, SKTM.spa, the Sonelgaz holding's electricity generation subsidiary.
- [42] Algérie: Énergie solaire - Une filière prometteuse [archive], Samira Imadalou, La Tribune, 18 juillet 2011
- [43] Algeria - Algeria Renewable Energy Program (AREP) - Green Baseload - SEFA Appraisal Report [www.afdb.org](http://www.afdb.org) Groupe de la banque africaine de développement.
- [44]. Hneini Mema Babe « Etude de la centrale photovoltaïque de Skhouna (Saida).», mémoire de master en génie mécanique option énergétique. Université de Mohamed Boudiaf M'sila, 2019.
- [45] «Basics of Solar Energy », the Green Schools Programme (GSP) Workshop on Renewable Energy (6 to 7 September 2019).
- [46] ALI SLIMANE Mohand/ TIGRINE Bachir.Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE/Filière : Electrotechnique Spécialité : Réseaux Electriques/UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU/Etude Théorique et simulation de la centrale photovoltaïque de GHARDAÏA.
- [47] <http://lecourrier-dalgerie.com/> Ghardaïa : 400 hectares pour la réalisation de stations d'énergie solaire.
- [48] <https://sarpi-dz.net/> montage-electrique-et-piping-de-la-centrale-hybride-solaire-gaz-au-niveau-de-hassi-rmel/

[49] \*MEKHLOUFI Mohammed Lamine \* SALHI Messaoud/ Mémoire :MASTER/ Université Kasdi Merbah Ouargla/ Filière : Energies Renouvelables Spécialité :Energies Renouvelables en Mécanique/ Etude Technico-économique et Environnementale de la Centrale Hybride de Hassi R'mel.

[50] EL GHARBI Najla . La centrale hybride de Hassi R'mel. Bulletin des ENR N°21-11 CDER 2011

[51] <https://solarpaces.nrel.gov/project/iscc-hassi-rmel>

[52] Created internally by a member of the Energy Education team. Adapted from: Ecogreen Electrical. (August 14, 2015). Solar PV Systems [Online]. Available: <http://www.ecogreenelectrical.com/solar.htm>

[53] Global Energy Network Institute; November, 2014 , Solar Electric and Solar Thermal Energy: A Summary of Current Technologies.

[54] TramStore21 Report/ Building sustainable and efficient tram depots for cities in the 21st century “Solar Thermal Systems

[55] North Carolina Sustainable Energy Association ( NCSEA) <https://energync.org/solar/>

[56] MERON MULATU MENGISTU, « Study of Solar Cooling Alternatives for Residential Houses in Bahir Dar City”, KTH School of Industrial Engineering and Management.

[57] Hoy-Yen Chan, S. B. Riffat, J. Zhu, (2010), “Review of passive solar heating and cooling technologies”, Renewable and sustainable energy reviews, vol.14, October 2009.

[58] Naci KALKANA\* and Ihsan DAGTEKINb,” PASSIVE COOLING TECHNOLOGY BY USING SOLAR CHIMNEY FOR MILD OR WARM CLIMATES”.

[59] G. T. Machinda, S. P. Chowdhury, S. Chowdhury y S. Kibaara, «Concentrating Solar Thermal Power Technologies: A review,» de India Conference (INDICON), Hyderabad, 2011.

[60] D. Mills, «Advances in solar thermal electricity technology,» de Solar Energy, ELSEVIER, 2004, pp. 19-31.

[61] A. Steinfield y R. Palumbo, «Solar Thermochemical Process Technology,» de ENCYCLOPEDIA OF PHYSICAL SCIENCE & TECHNOLOGY, R. A Meyers, Academic Press, 2001, pp. 237-256.

[62] Alexander Alarcón Villamil<sup>1</sup>, Jairo Eduardo Hortúa<sup>2</sup>, Andrea López<sup>3</sup>. Comparison of thermal solar collector technologies and their applications / Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.

- [63] Mancini, T. R. (1997). Solar-electric dish Stirling system development. Sandia National Laboratories, USA, SAND- 97-2924C.
- [64] Engines, S., & Walker, G. (1980). Stirling Cryocoolers. Oxford: Clarendon Press.
- [65] Dickinson, W. C., & Cheremisinoff, P. N. (1980). Solar Energy Technology Handbook. New York: Marcel Dekker Co.
- [66] Performance and Economic Analysis of Concentrated Solar Power Generation for Pakistan, Processes 2019, 7, 575.
- [67] Lloyds Steel, Industrial solar renewables onsite, "Fresnel collector" <http://cdn.cseindia.org/>
- [68] National Renewable Energy Laboratory, Michael J. Wagner "Results and Comparison from the SAM Linear Fresnel Technology Performance Model" at <https://www.nrel.gov/>
- [69] <https://www.solarpaces.org/> SolarPaces, solar power & Chemical Energy Systems.
- [70] Office of Energy Efficiency & Renewable Energy at <https://www.energy.gov/>
- [71] D. Mills, «Advances in solar thermal electricity technology,» de Solar Energy, ELSEVIER, 2004, pp. 19-31.
- [72] Parabolic trough solar collectors: A general overview of technology, industrial applications, energy market, modeling, and standards** Green Processing and Synthesis Pablo D. Tagle-Salazar, Krishna D.P. Nigam and Carlos I. Rivera-Solorio
- [73] Scott Barber, East Carolina University "History of Passive Solar Energy".
- [74] R.M. Smith and A.G. Hutton. The numerical treatment of advection: a performance comparison of current methods. *Numerical Heat Transfer*, 5:439–461, 1982.
- [75] "Investigation of Heat Transfer Enhancement in a Parabolic Trough Collector with a Modified Absorber", A. Kajavali, B. Sivaraman and N. Kulasekharan / International Energy Journal 14 (2014) 177-188
- [76] U. Chia, K.N. Ghia, and C.T. Shin. High-Re solutions for incompressible flow using the Navier-Stokes equations and a multigrid method. *Journal of computational physics*, 48:378–411, 1982.
- [77] M. Borunda, O. A. Jaramillo, R. Dorantes, and A. Reyes, "Organic Rankine Cycle coupling with a Parabolic Trough Solar Power Plant for cogeneration and industrial processes," *Renew. Energy*, 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.08.041.
- [78] A. Lokurlu and F. Richarts, "High efficient utilisation of solar energy with newly developed parabolic trough collectors (SOLITEM PTC ) for chilling and steam production in a hotel at

theMediterranean coast of Turkey Ahmet Lokurlu \* and Fritz RichartsDirk Krüger,” int. J. Energy Tech Policy, vol. 3, pp. 137–146, 2005.

[79] Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt, Advanced CSP Teaching Materials, "Chapter 5 Parabolic Trough Technology".

[80] E. Zarza, “Parabolic trough concentrating solar power (CSP) systems,” Woodhead Publ. Ltd., 2012, doi: 10.1533/9780857096173.2.197

[81] Shape Optimization of A Parabolic Trough Collector, Geometrical Considerations, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT),ISSN: 2278-0181,Vol. 10 Issue 01, January-2021.

[82] PennState,Department of Energy and Mineral Engineering,EME 812 Utility Solar Power and Concentration.

[83] Thermal Performance Analysis of Solar Dryer Integrated with Heat Energy Storage System and a Low-Cost Parabolic Solar Dish Concentrator for Food Preservation, Hindawi Journal of Energy Volume 2020, Article ID 9205283, 10 pages at <https://doi.org/10.1155/2020/9205283> .

[84] Silver/Glass Mirrors for Solar Thermal Systems, Solar Energy Research Institute Operated for the U.S. Department of Energy.

[85] Introduction to Mirrors <https://www.olympus-lifescience.com/>

[86] Duffie, J. A.; Beckman, W. A. (1991). *Solar Engineering of Thermal Processes, Second Edition*. New York, NY: John Wiley and Sons.

[87] Ahmed Bilal Awan1,\*, MN Khan2 , Muhammad Zubair1 , Evangelos Bellos3 “Commercial parabolic trough CSP plants: Research trends and technological advancements”.

[89] « Méthodes avancées d’évaluation des charges de vent sur les structures de concentrateurs solaires », Bassem Kaabia, UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE.

[90] “ Fluid Flow 2013 “by Thomas Rodgers.

[91] « Notions d’aérodynamique » at <https://www.editions.polytechnique.fr/>

[88] E. H Dowell and Kenneth C hall,: “Modeling of Fluid-Structure Interaction“, Ann Rev. Fluid Mech, 33:445-90,2001.

[92] « ACTIONS DU VENT SUR LES OUVRAGES EFFETS DYNAMIQUES », Olivier Flamand ,Maîtrise de Mécanique - Université de Nantes - décembre 2003.

[93] « Eurocode 1 - étude du vent sur les ouvrages » mecanique des structures sur public.iutenligne.net

[94] « Le vent #4 - Rugosité de terrain », <https://metaletech.com/>

[95] « Actions du vent sur les bâtiments selon l'Eurocode 1 – Partie 1-4 » par Danielle CLAVAUD ; Réf. : C3306 V1.

- [96] Wieringa, J. (1993). Representative Roughness Parameters for Homogeneous terrain. *Boundary-Layer Meteorology*, volume 63 :, numéro 4, p. 323–363.
- [97] Duggleby, A.; Ball, K.; Sewall, E. Computational Fluid Dynamics (CFD) Coprocessor-Enhanced System and Method. U.S. Patent 20070219766 A1, 20 September 2007.
- [98] Emin, M.A.; Köhler, K.; Schlender, M.; Schuchmann, H.P. Characterization of Mixing in Food Extrusion and Emulsification Processes by Using CFD. In *High Performance Computing in Science and Engineering '10*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2011; pp. 443–462. [CrossRef]
- [99] Oyinloye, T.M.; Yoon, W.B. Stability of 3D printing using a mixture of pea protein and alginate: Precision and application of additive layer manufacturing simulation approach for stress distribution. *J. Food Eng.* 2021, 288, 110127. [CrossRef]
- [100] Xia, B.; Sun, D.W. Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the food industry: A review. *Comput. Electron. Agric.* 2002, 34, 5–24. [CrossRef]
- [101] Schaldach, G.; Berger, L.; Razilov, I.; Berndt, H. *Computer Simulation for Fundamental Studies and Optimisation of ICP Spray Chambers; Current Research Reports; Institute of Spectrochemistry and Applied Spectroscopy: Berlin, Germany, 2000.*
- [102] J. Paetzold et al. / *Energy Procedia* 69 ( 2015 ) 168 – 177.
- [103] “Numerical modelling of a parabolic trough solar collector “Ahmed Amine Hachicha, Doctoral Thesis.
- [104] S.A. Orszag. Numerical methods for the simulation of turbulence. *Physics of Fluids*, 12(12):250–257, 1969.
- [105] M. Mier-Torrecilla et al / *Energy Procedia* 49 ( 2014 ) 163 – 173
- [106] Chauhan & Gupta / *Journal of Energy and Environmental Sustainability*
- [107] Henderson R D, 1995, Details of the drag curve near the onset of vortex shedding, *Physics of Fluids* (1994-present), 7(9), 2102-2104.
- [108] Wieselsberger C, 1921, Neuere Feststellungen über die Gesetze des Flüssigkeitsund Luftwiderstands, *Phys. Z.*, 22, 321–8.
- [109] Khan W A, Culham R J and Yovanovich M M, 2005, Fluid flow around and heat transfer from elliptical cylinders: analytical approach, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 19(2), 178-185.