

N° d'ordre :

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de L'enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique

جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب

Universite Ain Témouchent-Belhadj Bouchaib



Faculté : Sciences et de la Technologie  
Departement : Génie Mécanique  
Laboratoire : Laboratoire des Structures Intelligentes



## THESE

Présentée pour l'obtention du **diplôme de DOCTORAT**

**Domaine** : Sciences et Technologies

**Filière** : Génie Mécanique

**Spécialité** : Mécanique

**Par** : MOUSSA BOUDJEMA Fethi

### Intitulé

**Contribution à l'amélioration des performances thermique  
d'un convertisseur thermo solaire destiné pour le séchage**

Soutenue publiquement, le / / , devant le jury composé de :

Nom & Prénom(s)	Grade	Qualité	Etablissement de rattachement
<b>Soufyane BELHENINI</b>	Prof	Président	Université Ain Temouchent.
<b>Hamidou BENZENINE</b>	MCA	Rapporteur	Université Ain Temouchent.
<b>Tayeb NEHARI</b>	MCA	Examineur	Université Ain Temouchent.
<b>Rachid SAIM</b>	Prof	Examineur	Université de Tlemcen
<b>Hocine GUELLIL</b>	MCA	Examineur	Université de Tlemcen

Année Universitaire : 2023/2024

## *Dédicaces*

Je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude envers mes parents et ma famille bien-aimée, qui m'ont constamment soutenu dans ma quête de connaissances, faisant preuve d'une patience inestimable tout au long de mes années d'études et m'apportant leur précieuse aide et leur soutien.

Mes dédicaces vont à toute l'équipe technique -ingénieurs et techniciens- des laboratoires pédagogiques de l'UBBAT pour leurs soutiens et leurs encouragements.

Aussi Mes dédicaces vont à Ouled Amar Abdaziz et belabdelli Amine.

Pour finir, j'aimerais exprimer ma gratitude et mes dédicaces à mes amis de la région de Oulhaça en particulier M houari ahmed bouziane et belhadj youcef ,kada mohamed miloud , lahcen ben cherif bilalal et jalil .

*MOUSSA BOUDJEMA FETHI*

## Remerciements

En premier lieu, nous exprimons notre gratitude envers Dieu pour nous avoir permis de compléter notre thèse de doctorat en bonne santé et sans rencontrer de difficultés.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements, accompagnés de ma profonde gratitude, en premier lieu à mon directeur de thèse, le Professeur **Hamidou BENZENINE** de l'Université d'Ain Temouchent Algérie, pour avoir initié ce sujet de recherche, avoir supervisé mon travail, et pour sa précieuse assistance et ses conseils tout au long de la réalisation de cette étude.

Je souhaite exprimer ma gratitude à Monsieur **Soufiane BELHENINI**, Professeur à l'Université de Belhadj BOUCHAIB Ain Temouchent, en Algérie, pour avoir accepté de présider le jury. Je lui suis reconnaissante pour son précieux soutien et sa grande patience.

Je souhaite exprimer ma sincère gratitude envers Monsieur **Tayeb NEHARI**, professeur à l'Université de Belhadj BOUCHAIB Ain Temouchent en Algérie, pour avoir accepté de faire partie de ce jury. Je lui exprime mon reconnaissance et profond respect pour son engagement.

Je tiens à exprimer ma gratitude envers Monsieur **Rachid SAIM**, Professeur à l'Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, en Algérie, pour avoir consacré du temps à la lecture de mon manuscrit et pour avoir accepté de faire partie du jury.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude envers Monsieur **Hocine GUELLIL**, Professeur à l'Université de Tlemcen, pour avoir généreusement accepté d'évaluer ce travail.

Je souhaite exprimer ma gratitude envers les ingénieurs et techniciens du laboratoire de la Faculté des sciences et de la technologie de l'Université d'Ain Temouchent pour leur précieuse contribution à la réalisation de ce projet.

J'adresse mes remerciements envers mes parents bien-aimés pour leur soutien constant et leurs encouragements.

En conclusion, nous souhaitons exprimer notre gratitude envers tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'achèvement de ce modeste projet, notamment le doctorant **ZAWWI Mohamed**, **HADJ SAID Jamel**, **KADEAU Adel**, **BELABDLI Amine** et le chef du département **MHAMEDI MOHAMED Walid**.

## Résumé

Cette thèse présente une étude numérique et expérimentale d'un capteur solaire plan à air destiné au séchage solaire. La première partie se concentre sur une analyse numérique d'un écoulement d'air laminaire à convection forcée. Des simulations ont été effectuées pour déterminer et analyser les champs dynamique et thermique de différentes configurations du capteur. Deux cas de géométrie de capteur solaire « avec un rétrécissement à la sortie et avec un élargissement à l'entrée » ont été étudiés et comparés à un capteur solaire uniforme, en se basant sur les variations de température et de vitesse à la sortie. L'étude a révélé que l'amélioration du transfert de chaleur peut être obtenue en utilisant une forme en zigzag pour l'absorbeur et du point de vue dynamique, la vitesse de sortie du modèle de rétrécissement de la section de passage à la sortie du capteur peut être augmentée jusqu'à 250% par rapport à la vitesse d'entrée, ce qui assure un fort écoulement au niveau de la chambre de séchage.

La deuxième partie de cette thèse vise à une étude expérimentale sur un capteur solaire destiné au séchage. Un nouveau modèle de capteur comportant un absorbeur fabriqué par des conduites à cannette usagées en aluminium et munis des ailettes à l'intérieur a été réalisé et étudié au laboratoire de mécanique à l'université d'Ain Temouchent. L'effet du nombre de rangée de canettes a été également traité et comparé avec un capteur à absorbeur simple, en se basant sur la variation de la température de sortie et le rendement thermique. L'étude a montré qu'un collecteur à 14 rangées présente une différence de température de sortie de 24 °C par rapport au collecteur simple et un rendement de 54%.

**Mots clés :** capteur solaire, convection forcé, laminaire, cannette, ailette, simulation numérique

## Abstract

This thesis presents a numerical and experimental study of a flat air solar collector intended for solar drying. The first part focuses on a numerical analysis of a laminar airflow with forced convection. Simulations were carried out to determine and analyze the dynamic and thermal fields of different configurations of collector. Two cases of solar collector geometry “with a narrowing at the exit and with a widening at the entrance” were studied and compared to a uniform solar collector, based on the variations of temperature and velocity at the exit. The study revealed that the improvement in heat transfer can be achieved by using a zigzag shape for the absorber and from the dynamic point of view, the exit velocity of the shrinkage pattern of the pass section at the exit of the collector can be increased by up to 250% over the input velocity, which ensures a strong flow at the drying chamber.

The second part of this thesis aims at an experimental study on a solar collector intended for drying. A new model of collector comprising an absorber made by used aluminum can pipes and fitted with fins inside was produced and studied in the mechanical laboratory at the University of Ain Temouchent. The effect of the number of rows of cans was also treated and compared with a simple absorber collector, based on the variation of the outlet temperature and the thermal efficiency. The study showed that a 14-row collector has an outlet temperature difference of 24°C compared to the single collector and an efficiency of 54%.

**Keywords:** solar collector, forced convection, laminar, can, fin, numerical simulation

## ملخص

تقدم هذه الرسالة دراسة عددية وتجريبية لمجمع شمسي بهواء مسطح مخصص للتجفيف الشمسي. يركز الجزء الأول على التحليل العددي لتدفق الهواء الرقائقي بالحمل القسري. تم إجراء عمليات محاكاة لتحديد وتحليل المجالات الديناميكية والحرارية لتكوينات أجهزة الاستشعار المختلفة. تمت دراسة حالتين لهندسة المجمعات الشمسية "مع تضيق عند المخرج مع اتساع عند المدخل" ومقارنتهما بمجمع شمسي موحد، بناءً على التغيرات في درجة الحرارة والسرعة عند المخرج. أوضحت الدراسة أن التحسن في نقل الحرارة يمكن تحقيقه باستخدام شكل متعرج للممتص ومن وجهة النظر الديناميكية يمكن زيادة سرعة الخروج لنمط الانكماش لقسم المرور عند خروج المستشعر بمقدار أعلى. إلى 250% من سرعة الإدخال، مما يضمن تدفقاً قوياً في حجرة التجفيف.

يهدف الجزء الثاني من هذه الرسالة إلى دراسة تجريبية على مجمع شمسي مخصص للتجفيف. نموذج جديد من المستشعرات يشتمل على ممتص مصنوع من أنابيب عبوات الألمنيوم المستعملة ومزود بزعانف بالداخل تم تصنيعه ودرسته في المختبر الميكانيكي بجامعة عين تموشنت. كما تمت معالجة تأثير عدد صفوف العلب ومقارنته بمستشعر امتصاص بسيط، بناءً على اختلاف درجة حرارة المخرج والكفاءة الحرارية. أظهرت الدراسة أن المجمع المكون من 14 صفًا له فرق في درجة حرارة المخرج يبلغ 24 درجة مئوية مقارنة بالمجمع الفردي وكفاءة 54%.  
**الكلمات المفتاحية:** المجمع الشمسي، الحمل القسري، الصفيح، العلب، الزعنف، المحاكاة العددية

# *Table des Matières*

---

## Table des Matières

<b>Dédicace</b>	<b>I</b>
<b>Remerciements</b>	<b>II</b>
<b>Résumé</b>	<b>III</b>
<b>Abstract</b>	<b>IV</b>
<b>ملخص</b>	<b>V</b>
<b>Table des Matières</b>	<b>VI</b>
<b>Liste des Figures</b>	<b>X</b>
<b>List des Tables</b>	<b>XIV</b>
<b>Nomenclature</b>	<b>XV</b>
<b>Introduction Générale</b>	<b>01</b>

### **CHAPTER I : Généralités sur les Capteurs Solaires**

<b>I.1.</b>	<b>Introduction</b>	<b>4</b>
<b>I.2.</b>	<b>Énergie renouvelable (non fossile)</b>	<b>4</b>
<b>I.3.</b>	<b>La classification de l'énergie renouvelable(ENR)</b>	<b>5</b>
<b>I.3.1.</b>	<b>La biomasse</b>	<b>5</b>
<b>I.3.2.</b>	<b>L'énergie solaire</b>	<b>6</b>
<b>I.3.3.</b>	<b>L'énergie hydraulique</b>	<b>7</b>
<b>I.3.4.</b>	<b>L'énergie éolienne</b>	<b>8</b>
<b>I.3.5.</b>	<b>L'énergie géothermie</b>	<b>8</b>
<b>I.4.</b>	<b>Le soleil</b>	<b>9</b>
<b>I.4.1.</b>	<b>Gisement solaire en Algérie</b>	<b>10</b>
<b>I.5.</b>	<b>Transfert thermique</b>	<b>11</b>
<b>I.5.2.</b>	<b>La chaleur</b>	<b>12</b>
<b>I.5.3.</b>	<b>Effet de serre</b>	<b>12</b>
<b>I.5.4.</b>	<b>Les modes principaux de transfert thermique</b>	<b>12</b>
<b>I.5.4.1.</b>	<b>Conduction</b>	<b>12</b>
<b>I.5.4.2.</b>	<b>Convection</b>	<b>13</b>
<b>I.5.4.3.</b>	<b>Rayonnement</b>	<b>14</b>
<b>I.5.4.4.</b>	<b>Spectre solaire</b>	<b>15</b>

<b>I.6.</b>	Facteur des matériaux	<b>14</b>
<b>I.6.1.</b>	Grandes classes des matériaux	<b>14</b>
<b>I.6.1.1.</b>	Matériaux métalliques	<b>15</b>
<b>I.6.1.2.</b>	Matériaux organiques	<b>15</b>
<b>I.6.1.3.</b>	Matériaux minéraux	<b>15</b>
<b>I.6.1.4.</b>	Matériaux composites	<b>15</b>
<b>I.7.</b>	Propriétés thermo-physique	<b>17</b>
<b>I.8.</b>	Capteur solaire	<b>17</b>
<b>I.8.1.</b>	Définition	<b>17</b>
<b>I.8.2.</b>	Composant d'un capteur solaire	<b>18</b>
<b>I.9.</b>	Condition de fonctionnement pour le capteur solaire	<b>18</b>
<b>I.10.</b>	Types de capteurs solaires	<b>20</b>
<b>I.11.</b>	Centrale thermique solaire à concentration	<b>22</b>
<b>I.11.1.</b>	Les centrales linéaires Fresnel	<b>22</b>
<b>I.11.2.</b>	Les centrales cylindro-paraboliques	<b>22</b>
<b>I.11.3.</b>	Les centrales à concentrateur parabolique	<b>23</b>
<b>I.11.4.</b>	Les centrales à tour	<b>23</b>
<b>I.12.</b>	Classification de capteur plan	<b>23</b>
<b>I.12.1.</b>	Capteur non vitré	<b>23</b>
<b>I.12.2.</b>	Capteur plan à vitre	<b>24</b>
<b>I.12.3.</b>	Capteur à tube sous vide	<b>24</b>
<b>I.13.</b>	Séchage solaire	<b>25</b>
<b>I.13.1.</b>	Définition	<b>25</b>
<b>I.13.2.</b>	Classification de sécheur solaire	<b>26</b>
<b>I.14.</b>	Mode et Principe de séchage	<b>27</b>
<b>I.15.</b>	Conclusion	<b>29</b>

## **CHAPITRE II: Etude Bibliographique**

<b>II.1.</b>	Introduction	<b>30</b>
<b>II.2.</b>	Capteur à absorbeur de forme plat, zigzag et à ailette	<b>30</b>

<b>II.3.</b>	Capteur plan simple muni des obstacles et à rugosité artificielle	<b>42</b>
<b>II.4</b>	Capteur avec matériau de stockage thermique	<b>49</b>
<b>II.5</b>	Capteur hybride PV/T : intégré par panneau photovoltaïque	<b>52</b>
<b>II.6</b>	Conclusion	<b>54</b>

## **CHAPITRE III : Modélisation Numérique Et Formulation**

### **Mathématique**

<b>III.1.</b>	Introduction	<b>55</b>
<b>III.2.</b>	Méthode de volume finis MVF	<b>55</b>
<b>III.3.</b>	Discrétisations des équations	<b>55</b>
<b>III.3.1.</b>	Discrétisation des termes de l'équation de transport	<b>57</b>
<b>III.3.2.</b>	Choix des schémas de discrétisation	<b>58</b>
<b>III.3.3.</b>	Schéma de discrétisation UPWIND	<b>59</b>
<b>III.3.4.</b>	Schéma amont du second ordre (SOUS)	<b>60</b>
<b>III.3.5.</b>	Choix de la méthode de couplage Pression-Vitesse	<b>61</b>
<b>III.3.6.</b>	Algorithme SIMPLE	<b>62</b>
<b>III.4.</b>	Facteur de sous- relaxation	<b>63</b>
<b>III.5.</b>	Approche numérique	<b>64</b>
<b>III.5.1.</b>	Présentation des code de calcule	<b>64</b>
<b>III.5.1.1.</b>	solveur Fluent	<b>64</b>
<b>III.5.1.2.</b>	Gambit	<b>65</b>
<b>III.5.1.3.</b>	Fonctionnalités de Gambit	<b>65</b>
<b>III.5.1.4.</b>	Fonctionnalités Solveur Fluent	<b>65</b>
<b>III.6.</b>	Choix de maillage	<b>66</b>
<b>III.6.1.</b>	Géométrie et topologie	<b>66</b>
<b>III.6.2.</b>	Qualité d'un maillage	<b>67</b>
<b>III.7.</b>	Critère de convergence	<b>68</b>
<b>III.9.</b>	<b>Conclusion</b>	<b>68</b>

**CHAPITRE IV : Résultats et Interprétations : Partie Numérique**

<b>IV.1</b>	Introduction	<b>70</b>
<b>IV.2</b>	Configuration géométrique	<b>70</b>
<b>IV.3</b>	<b>IV.3.1</b> Formulation mathématique	<b>72</b>
	<b>IV.3.2</b> Équations gouvernantes	<b>73</b>
<b>IV.4</b>	Conditions aux limites	<b>74</b>
<b>IV.5</b>	Paramètres caractéristiques	<b>74</b>
<b>IV.6</b>	Etude de sensibilité du maillage	<b>75</b>
<b>IV.7</b>	Validation du modèle	<b>76</b>
<b>IV.8</b>	Résultats et interprétations	<b>77</b>
	<b>IV.8.1</b> Aspect thermique de l'écoulement	<b>77</b>
	<b>IV.8.2</b> Aspect dynamique de l'écoulement	<b>83</b>
<b>IV.9</b>	Conclusion	<b>90</b>

**CHAPITRE V : Résultats et Interprétations : Partie Expérimentale**

	Avant-propos	<b>91</b>
<b>V.1.</b>	Introduction	<b>93</b>
<b>V. 2.</b>	Dispositif expérimental du capteur solaire	<b>93</b>
<b>V.3.</b>	Étapes pour la fabrication d'un capteur solaire	<b>96</b>
<b>V.4.</b>	Description générale de la procédure expérimentale	<b>98</b>
<b>V.5.</b>	Méthode et instrumentations de mesure	<b>98</b>
<b>V.6.</b>	Théorie	<b>103</b>
<b>V.7.</b>	Résultat et discussion	<b>105</b>
	<b>V.7.1.</b> Traitement des images par caméra thermique	<b>109</b>
<b>V.8.</b>	<b>Conclusion</b>	<b>111</b>
	<b>Conclusion générale et perspectives</b>	<b>112</b>
	<b>Références</b>	<b>114</b>

**Liste des figures**

<b>Figure I.1</b>	Part de l'énergie solaire du total installé en énergies renouvelables en 2018	<b>5</b>
<b>Figure I.2</b>	Energie de la biomasse	<b>6</b>
<b>Figure I.3</b>	Énergie solaire	<b>7</b>
<b>Figure I.4</b>	Energie hydraulique	<b>7</b>
<b>Figure I.5</b>	Energie éolienne	<b>8</b>
<b>Figure I.6</b>	Manifestation thermique sous forme de géothermie	<b>9</b>
<b>Figure I.7</b>	Coupe du Soleil	<b>10</b>
<b>Figure I.8</b>	La durée insolation et l'irradiation globale en Algérie	<b>11</b>
<b>Figure I.9</b>	Centrale hybride de Hassi R'mel	<b>11</b>
<b>Figure I.10</b>	Schéma montré l'effet de serre	<b>13</b>
<b>Figure I.11</b>	Eléments du rayonnement solaire au sol.	<b>15</b>
<b>Figure I.12</b>	Interactions présidant à la réalisation d'un objet fini	<b>16</b>
<b>Figure I.13</b>	Collecteur solaire plan a air	<b>17</b>
<b>Figure I.14</b>	coefficient d'absorption $\alpha$ et coefficient d'émission $\varepsilon$	<b>20</b>
<b>Figure I.15</b>	Diffèrent type de capteur solaire	<b>21</b>
<b>Figure I.16</b>	Exemple d'une centrale thermique	<b>22</b>
<b>Figure I.17</b>	Capteur non vitre	<b>23</b>
<b>Figure I.18</b>	Capteur plan à air et à eau	<b>24</b>
<b>Figure I.19</b>	Collecteur tubulaire sous vide	<b>24</b>
<b>Figure I.20</b>	Sèche plantes-aromatiques	<b>25</b>
<b>Figure I.21</b>	Les conditions de séchage par convection.	<b>26</b>
<b>Figure I.22</b>	Sécheur direct	<b>26</b>
<b>Figure I.23</b>	Schéma descriptif de sécheur solaire indirect	<b>27</b>
<b>Figure I.24</b>	Sécheur mixte	<b>28</b>
<b>Figure I.25</b>	Séchage traditionnel a l'air libre	<b>29</b>
<b>Figure II.1</b>	Vue de capteur solaire de prototype de	<b>31</b>
<b>Figure II.2</b>	Image et schéma du collecteur d'air solaire étudié par	<b>32</b>

<b>Figure II.3</b>	Capteur de modèle d'ailettes	<b>32</b>
<b>Figure II.4</b>	Schéma descriptif de l'absorbeur adopté par l'étude de	<b>33</b>
<b>Figure II.5</b>	Collecteur solaire schématisé en CFD	<b>34</b>
<b>Figure II.6</b>	Configuration de l'intégration d'un capteur solaire avec la serre	<b>35</b>
<b>Figure II.7</b>	(a) Schéma de montage expérimental. (b) collecteur zigzag solaire	<b>35</b>
<b>Figure II.8</b>	Quatre types de capteur solaires étudié par Shuilian Li	<b>36</b>
<b>Figure II.9</b>	Schéma descriptif de l'absorbeur adopté par l'étude de Rajesh Kumar et al.	<b>37</b>
<b>Figure II.10</b>	Capteur solaire à air simple et ondulé	<b>38</b>
<b>Figure II.11</b>	Prototype schématique de capteur solaire mené par	<b>39</b>
<b>Figure II.12</b>	Photo du capteur solaire à absorbeur tubulaire et simple	<b>39</b>
<b>Figure II.13</b>	Les trois types de la plaque d'absorption	<b>40</b>
<b>Figure II.14</b>	représentation d'un collecteur doté d'un absorbeur à ailettes	<b>41</b>
<b>Figure II.15</b>	Vue schématique de capteur solaire	<b>42</b>
<b>Figure II.16</b>	Prototype de capteur solaire à chicane conique	<b>43</b>
<b>Figure II.17</b>	Capteur solaire avec plusieurs types d'obstacles	<b>44</b>
<b>Figure II.18</b>	Vue schématique de collecteur utilisé par Biplas	<b>45</b>
<b>Figure II.19</b>	Schéma de capteur solaire muni d'une rugosité artificielle	<b>45</b>
<b>Figure II.20</b>	(a) Vue schématique de capteur et (b) répartition des champs de température dans un capteur solaire	<b>46</b>
<b>Figure II.21</b>	La configuration expérimentale des quatre types de capteur solaire	<b>47</b>
<b>Figure II.22</b>	Capteur solaire à des boucles semi-circulaires creuses	<b>48</b>
<b>Figure II.23</b>	Capteur modélisé par ANSYS	<b>49</b>
<b>Figure II.24</b>	Dispositif expérimental d'un séchoir solaire	<b>50</b>
<b>Figure II.25</b>	Schéma de capteur intégré par PCM	<b>51</b>
<b>Figure II.26</b>	Capteur solaire à MCP	<b>51</b>
<b>Figure II.27</b>	Capteurs solaires avec matériau de stockage	<b>52</b>
<b>Figure II.28</b>	Banc d'essai de capteur solaire hybride PV/T	<b>53</b>
<b>Figure II.29</b>	Différentes configurations : (a) système simple (b) système avec une feuille de métal (c) système avec ailettes	<b>53</b>
<b>Figure II.30</b>	Schéma et image de capteur solaire utilisé par	<b>54</b>

<b>Figure III.1</b>	Volume de contrôle bidimensionnel	<b>59</b>
<b>Figure III.2</b>	Quelques types d'éléments de maillage	<b>66</b>
<b>Figure III.3</b>	Maillages structurés et non structurés	<b>67</b>
<b>Figure IV.1</b>	Représentation schématique du séchoir solaire indirect et capteur solaire à air	<b>71</b>
<b>Figure IV.2</b>	Géométrie du système étudié (a) : modèle de section uniforme SU, (b) : modèle de l'élargissement à l'entrée SE et (c) : modèle de rétrécissement à la sortie SR.	<b>72</b>
<b>Figure IV.3</b>	Maillage généré du capteur solaire.	<b>75</b>
<b>Figure IV.4</b>	La température à la sortie du collecteur en fonction de flux solaire : comparaison avec résultat d' <b>Abhay Lingayat</b> et al.	<b>77</b>
<b>Figure IV.5</b>	Répartition de champs de température obtenus pour l'ensemble des cas étudiés.	<b>78</b>
<b>Figure IV.6</b>	La variation de la température journalière en fonction du flux solaire.	<b>80</b>
<b>Figure IV.7</b>	Evolution de la température à la sortie du capteur en fonction de la vitesse d'entrée pour tous les cas à étudié.	<b>81</b>
<b>Figure IV.8</b>	Evolution de la température le long de la section de passage pour les différents cas.	<b>82</b>
<b>Figure IV.9</b>	Répartition de champs de vitesse obtenus pour les différentes formes à une vitesse d'entrée $U_{in} = 0.04\text{m/s}$	<b>83</b>
<b>Figure IV.10</b>	Vecteur de la vitesse résultante	<b>85</b>
<b>Figure IV.11</b>	Variation de la vitesse moyenne en fonction de la distance pour les différents cas.	<b>86</b>
<b>Figure IV.12</b>	Impact de la vitesse d'entrée sur la vitesse et la température de sortie pour le cas : (a) cas 1 , (b) cas 4 , (c) cas 5.	<b>87</b>
<b>Figure IV.13</b>	Comparaison de rapport de la vitesse de sortie et la vitesse d'entrée pour tous les cas étudiés	<b>89</b>
<b>Figure V.1</b>	Représentation schématique du : (a) conduite en aluminium cannette à ailette et (b) capteur solaire à air	<b>94</b>
<b>Figure V.2</b>	Rassemblement de canette pour former une conduite cylindrique à ailette.	<b>94</b>
<b>Figure V.3</b>	Collecteur solaire muni d'un absorbeur à cannettes ailletées.	<b>95</b>
<b>Figure V.4</b>	Photos du capteur solaire en cours de fabrication.	<b>96</b>
<b>Figure V.5</b>	Capteur solaire sans vitre l'absorbeur.	<b>97</b>
<b>Figure V.6</b>	Emplacements du cadre et les cannettes au niveau de l'absorbeur du capteur.	<b>97</b>
<b>Figure V.7</b>	Solarimètre.	<b>99</b>
<b>Figure V.8</b>	Anémomètre multifonction	<b>100</b>

<b>Figure V.9</b>	Étalonnage de thermocouples type K.	<b>101</b>
<b>Figure V.10</b>	Thermocouples type K.	<b>101</b>
<b>Figure V.11</b>	Ecran typique du logiciel VDAS.	<b>102</b>
<b>Figure V.12</b>	Caméra thermique.	<b>102</b>
<b>Figure V.13</b>	Flux d'irradiation et la température d'entrée pour l'ensemble des cas étudiés.	<b>105</b>
<b>Figure V.14</b>	Evolution de température d'entrée et de sortie pour les différents cas étudiés.	<b>106</b>
<b>Figure V.15</b>	Rendement thermique du capteur pour les différentes configurations étudiées.	<b>109</b>
<b>Figure V.16</b>	Variation de température de sortie en fonction du temps pour différentes vitesses d'entrées pour config 5.	<b>110</b>
<b>Figure V.17</b>	Image par caméra thermique de différent cas étudiés.	<b>110</b>
<b>Figure V.18</b>	Température de Point M sur le capteur solaire (config5).	<b>110</b>
<b>Figure V.19</b>	Vue Graphique du champ thermique par IR soft.	<b>111</b>

**Liste des tableaux**

<b>Tableau I.1</b>	Valeurs physiques des régions décrites	<b>10</b>
<b>Tableau I.2</b>	Décomposition en longueurs d'onde	<b>15</b>
<b>Tableau I.3</b>	Propriétés thermo-physiques des matériaux utilisés dans le capteur solaire.	<b>17</b>
<b>Tableau I.4</b>	Revêtement sélectif de l'absorbeur	<b>20</b>
<b>Tableau III.1</b>	Différents termes de l'équation de transport	<b>56</b>
<b>Tableau III.2</b>	Schémas de discrétisation utilisés	<b>58</b>
<b>Tableau III.3</b>	Valeurs des facteurs de sous relaxation utilisés	<b>64</b>
<b>Tableau IV .1</b>	Dimensions de différents modèles de capteur étudiés	<b>72</b>
<b>Tableau IV .2</b>	Test de sensibilité de maillage	<b>76</b>
<b>Tableau IV .3</b>	Les valeurs de vitesse et température de sortie pour les cas 1,4 et 5	<b>88</b>
<b>Tableau V .1</b>	Matériaux utilisée dans le capteur d'AbhayaLingayat	<b>91</b>
<b>Tableau V .2</b>	Quelques caractéristiques du cuivre	<b>91</b>
<b>Tableau V .3</b>	Propriétés de matériau d'aluminium de cannette	<b>92</b>
<b>Tableau V .4</b>	Les propriétés thermo physiques	<b>95</b>
<b>Tableau V .5</b>	Les caractéristiques optiques	<b>95</b>
<b>Tableau. V.6</b>	Ecarts de température pour chaque heure et la moyenne journalière de ces écarts pour les différents cas étudiés	<b>107</b>

## Nomenclature et abréviations

- *Symbole*

$C_f$	Coefficient de frottement	[-]
$D_h$	Diamètre hydraulique	[m]
$D_K$	Terme de diffusivité turbulente	[-]
$e$	Epaisseur	[m]
$G(i, \gamma)$	Flux incident sur le capteur	W/m <sup>2</sup>
$\dot{m}$	Le debit massique	[kg/ s]
$Nu$	Nombre de Nusselt	[-]
$P$	Pression	[Pa]
$Pr$	Nombre de Prandtl	[-]
$Re$	Nombre de Reynolds	[-]
$S_k, S_\omega$	Termes sources	[-]
$S$	Surface de la paroi absorbante	[m <sup>2</sup> ]
$T$	Température	[°C]
$T_{amb}$	Température ambiante	[°C]
$T_{abs}$	Température de l'absorbeur	[°C]
$u$	Vitesse du fluide suivant l'axe X	[m/s]
$U_{entr}$	Vitesse entrée	[m/s]
$U_{sort}$	Vitesse sortie	[m/s]
$v$	Vitesse du fluide suivant l'axe Y	[m/s]
$x$	Coordonnée horizontale	[m]
$X$	Longueur du capteur solaire	[m]
$y$	Coordonnée verticale	[m]

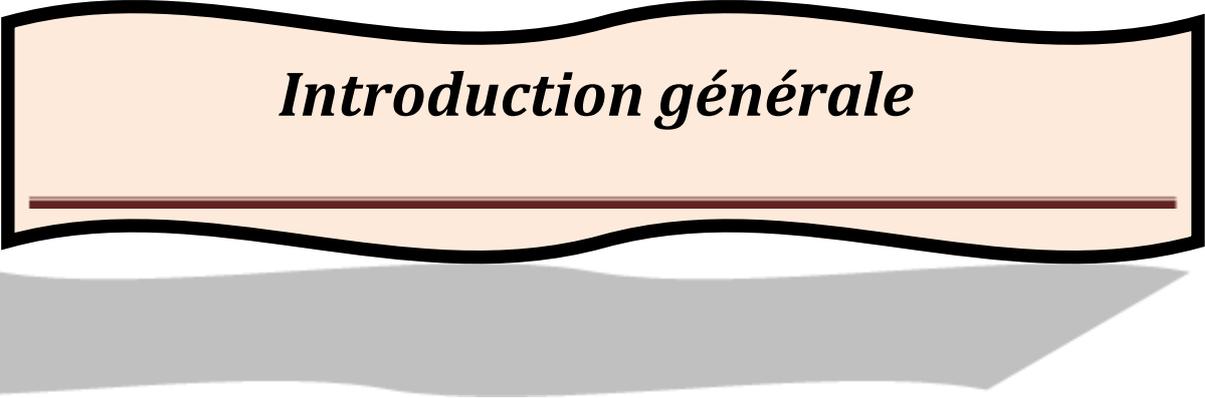
- *Symboles grecs*

$\rho$	Masse volumique	[Kg/m <sup>3</sup> ]
--------	-----------------	----------------------

$\delta$	Epaisseur de la couche limite	[m]
$\nu$	Viscosité cinématique du fluide	[m <sup>2</sup> /s]
$\mu_t$	Viscosité turbulente	[kg/ (m·s)]
$\mu$	Viscosité dynamique	[kg/ (m·s)]
$\lambda$	Conductivité thermique	[W/(m.C)]
$\lambda_f$	Conductivité thermique du fluide	[W/m.C]
<b>Cp</b>	Capacité calorifique	J/kg. °C
$\alpha_{ps}$	Coefficient d'absorption de la paroi absorbante	[-]
$\tau$	Coefficient de transmission.	[-]
$\epsilon$	Coefficient d'émissivité	[-]
$\sigma$	Constante Stefan Boltzmann	[W/m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup> ]
$\eta$	Rendement global	%
$\eta_i$	Rendement interne	%
$\eta_o$	Rendement optique (radiatif)	%

• **Liste des abréviations**

<b>CFD</b>	Computation Fluid Dynamic
<b>MVF</b>	Méthode des volumes finis
<b>V</b>	Forme zigzag
<b>VDAS</b>	Versatile data acquisition system



*Introduction générale*

### Introduction générale

La croissance de la population et l'exploitation accrue des hydrocarbures entraînent une demande croissante en énergie dans toutes ses formes. Cependant, la technologie des énergies solaires a progressé au fil des années, devenant ainsi une source d'énergie accessible à tous les secteurs industriels. Grâce à cette technologie, il est désormais possible de produire de la chaleur élevée en utilisant des installations de capteurs solaires, ainsi que de générer de l'électricité au moyen de systèmes de panneaux photovoltaïques.

L'usage de l'énergie solaire, une source principale et gratuite, offre une alternative prometteuse dans diverses applications thermiques et permet d'économiser les combustibles fossiles. Actuellement, cette forme d'énergie est devenue un outil essentiel pour réduire les coûts liés aux énergies non renouvelables et pour répondre aux besoins en ressources énergétiques tels que le gaz et le pétrole.

Par ailleurs, l'énergie solaire a été largement utilisée depuis longtemps dans différents domaines tels que le chauffage de l'eau sanitaire et le séchage des produits alimentaires. Notamment, dans le domaine de la conservation alimentaire, elle joue un rôle crucial en assurant la sécurité alimentaire pour une population mondiale en croissance, tout en contribuant à réduire les pertes et le gaspillage de nourriture pendant et après la récolte. Dans de nombreux pays, d'importantes quantités de produits alimentaires sont malheureusement perdues.

À cet égard, diverses solutions sont proposées pour réduire ce problème de conservation alimentaire, telles que la congélation et le séchage. Parmi celles-ci, le séchage se révèle être une solution simple, facile à alimenter en énergie solaire, permettant ainsi le stockage d'un large éventail de produits alimentaires. Compte tenu de cet intérêt pratique considérable, il existe un intérêt scientifique marqué dans l'étude de méthodes visant à améliorer considérablement les performances de ce système.

Les séchoirs solaires sont généralement classés en trois modes : direct, indirect et mixte, selon que la circulation d'air à travers le capteur est assurée de manière naturelle ou forcée. Des études ont révélé que l'amélioration de ce capteur solaire peut non seulement améliorer l'écoulement d'air à travers la chambre du séchoir solaire, mais aussi accélérer le temps de séchage. Cette technique est devenue le véritable moteur thermique dans les séchoirs solaires indirects, ainsi que pour le chauffage des habitats.

Le capteur solaire utilisé au séchage constitue une catégorie particulière d'échangeur de chaleur conçu pour optimiser les performances thermiques du rayonnement solaire et la circulation de l'air. De plus, il offre une protection contre diverses conditions défavorables telles que la poussière et les attaques d'insectes sur le produit, contribuant ainsi à garantir la production d'un produit de haute qualité.

L'étude du comportement du transfert de chaleur et de l'écoulement d'air dans le collecteur solaire constitue des facteurs essentiels qui influencent l'efficacité du système de séchage. Il est crucial d'avoir une bonne compréhension des lois de transfert de chaleur et de masse, en effectuant des recherches numériques, analytiques et expérimentales détaillées sur les différents types de capteurs. De plus, il est important de noter que l'amélioration des performances du capteur solaire dépend du choix judicieux des matériaux utilisés pour sa fabrication.

Ainsi, l'emploi des logiciels de simulation numérique de la dynamique des fluides (CFD) devient l'approche la plus pratique pour évaluer le comportement thermique et l'écoulement d'air afin d'améliorer les performances thermiques et dynamiques des capteurs solaires. Cela permet de réaliser des expériences pratiques et d'optimiser leur fonctionnement de manière efficace.

Cette thèse se concentre principalement sur l'étude du comportement thermique et dynamique d'un écoulement thermo-convectif à l'intérieur d'un capteur solaire de type air vitré utilisé spécifiquement pour le séchage. Cette étude sera réalisée à la fois numériquement et expérimentalement. Afin de mieux comprendre l'étendue du sujet abordé, cette thèse est organisée en cinq chapitres.

Le premier chapitre aborde les concepts généraux, les définitions et les notions fondamentales concernant l'énergie et les capteurs solaires. Une section de cette étude est consacrée aux mécanismes de transfert de chaleur et aux propriétés thermo-physiques des matériaux utilisés dans la fabrication des collecteurs solaire.

Le deuxième chapitre propose une étude bibliographique approfondie qui retrace les recherches menées dans le domaine du séchage, en mettant l'accent sur les types de capteurs à air qui ont été développés et testés à l'échelle mondiale.

Dans le troisième chapitre, nous examinons en détail le problème physique étudié, sa modélisation mathématique, les conditions aux limites adoptées, ainsi que la résolution numérique effectuée à l'aide de Fluent. Ce chapitre se concentre également sur les lois et les

relations mathématiques décrivant les mécanismes de transfert de chaleur dans les capteurs mentionnés précédemment, ainsi que sur les différentes équations relatives aux bilans thermiques qui régissent le fonctionnement du système solaire.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons les résultats et les discussions de l'étude paramétrique du capteur solaire. Nous exposons comment l'optimisation du capteur a été réalisée en utilisant la méthode des plans numériques, en étudiant l'influence des différentes géométries de capteurs solaires sur les performances.

Le dernier chapitre est consacré à l'étude expérimentale. Dans cette partie, différentes expériences ont été menées sur un capteur solaire à air utilisant des cannettes, et elles ont été entièrement réalisées au sein de la faculté des sciences et de la technologie de l'université d'Ain Temouchent.

En conclusion, nous résumons l'importance de l'ensemble des résultats obtenus et mettons en évidence les points forts de cette étude sur les capteurs solaires. Nous proposons également des perspectives de recherche pour améliorer les performances des capteurs étudiés.



*Chapitre I*  
Généralités sur les Capteurs Solaires

## I.1.Introduction

Dans le cadre de la diminution des énergies fossiles et des changements de climat, il est rappelé que les deux demandes les plus difficiles à satisfaire sont la fourniture d'électricité aux mégapoles et celle de carburants pour les transports. Les énergies renouvelables sont une filière à privilégier, mais elles ne semblent pas pouvoir remplacer les combustibles fossiles dans un futur proche. Les prévisions pour ce siècle incitent à la prudence pour l'avenir de l'homme et de son environnement[1].

L'exploitation de l'énergie solaire, la principale source gratuite, représente une alternative intéressante dans plusieurs applications thermiques et pour pouvoir économiser les combustibles des fossiles. De plus, aujourd'hui, cette énergie est devenue un outil important pour réduire les couts de l'énergie non renouvelable et accompagner les besoins des ressources d'énergie comme le gaz et le pétrole.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons en général à l'étude de collecteur solaire destiné au séchage, aux bases de transfert de chaleur et aux matériaux de collecteur avec des recherches détaillées sur les types des capteurs solaires et le séchage. Ce dernier est l'un des processus fondamentaux, il est basé sur la génération de rayonnement solaire pour augmenter le temps de stockage de produit alimentaire.

Le séchage des produits agricoles qui dépend directement du soleil est une application très ancienne ; pendant cette période de séchage, les produits sont soumis à toutes les circonstances naturelles comme la pluie et la poussière et à l'attaque des insectes; tous ces problèmes entraînent une obligation d'utiliser un capteur solaire relié à une armoire de séchage. Ce capteur représente un type spécial des échangeurs de chaleur qui servent à améliorer les performances thermiques de rayonnement solaire et l'écoulement de l'air, il permet également de lutter contre toutes les mauvaises circonstances citées ; par conséquent il fournit un produit de qualité.

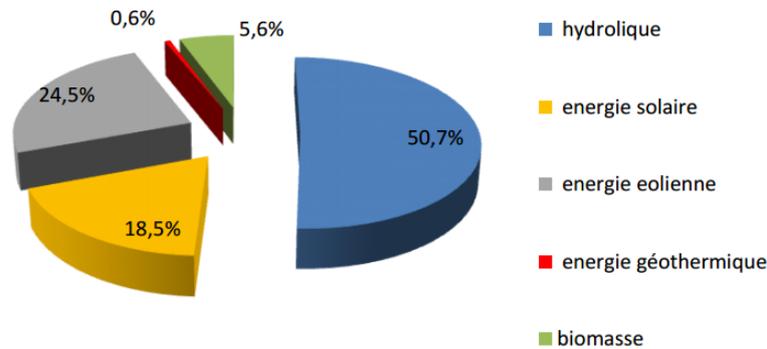
## I.2.Énergie renouvelable (non fossile)

L'énergie renouvelable (énergie verte ou énergie propre) provient des sources théoriquement intermittentes et produites à partir du rayon du soleil, le vent et la mer ; elle a des avantages écologiques qui diminuent la pollution ; ce qui assure un environnement propre.

Depuis quelques années, vu les crises de pétrole et du gaz, le développement des énergies renouvelables a connu une forte croissance telle que la biomasse, l'énergie solaire (thermique et photovoltaïque), l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne et la géothermie. L'énergie

renouvelable est devenue de plus en plus importante et fait l'objet de nombreux travaux dans les domaines de séchage, de chauffage et d'électricité.

Avant de détailler les classes d'énergie renouvelable par des définitions, il est important de donner un rapport global sur l'usage des énergies renouvelables en général.



**Figure I.1** : Part de l'énergie solaire du total installé en énergies renouvelables en 2018[2].

### I.3.La classification de l'énergie renouvelable(ENR)

#### I.3.1. La biomasse

Le terme biomasse recouvre la production (naturelle ou assistée par l'homme) de matière organique résultant de la photosynthèse. Dans un tel processus, la nature produit de la matière organique à partir de dioxyde de carbone provenant de l'atmosphère, l'eau et grâce au rayonnement solaire. La biomasse intervient directement ou indirectement dans des procédés énergétiques comme sur le bilan de gaz à effet serre sous la forme suivante :

- Bois, taillis, etc., pour la combustion.
- Méthane, produit de la putréfaction des déchets végétaux et qui peut soit contribuer à l'émission de gaz à effet serre, soit être valoriser comme combustible (biogaz).
- cultures énergétique(ou éventuellement certains déchet végétaux), conduisant à des biocarburants[3].



**Figure I.2 :**Énergie de la biomasse[4].

### **I.3.2. L'énergie solaire**

L'énergie solaire est une énergie inépuisable qui vient du soleil, elle est obtenue à partir du rayonnement solaire sur terre. Cette énergie est la source de la plupart des énergies renouvelables qui sont disponibles et surtout l'énergie de biomasse et l'énergie éolienne.

L'énergie solaire permet de fournir de la chaleur élevée et propre grâce à des capteurs solaires ou d'électricité à partir des panneaux photovoltaïques.

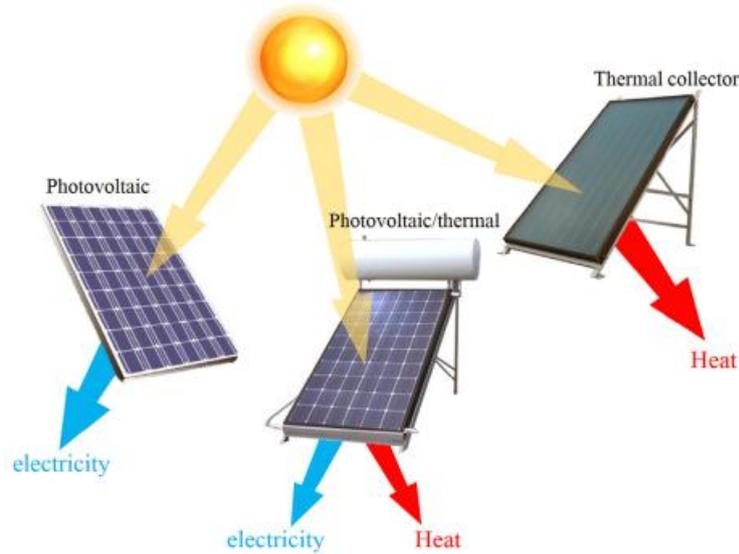


Figure I.3 : Énergie solaire[5].

### I.3.3. L'énergie hydraulique

L'énergie hydraulique est produite à partir de la force de l'eau. À l'époque, les moulins à roue horizontale ou bien verticale tournaient les meules qui étaient dans des chambres en utilisant l'eau de fleuve. Suivant le même principe des moulins à roue dans le développement technologique, des turbines à générateurs ont été installés à la sortie des barrages pour la production de l'électricité. Plusieurs milliers de mégawatts d'électricités pourraient être produits dans certains pays comme la Suède et la France.

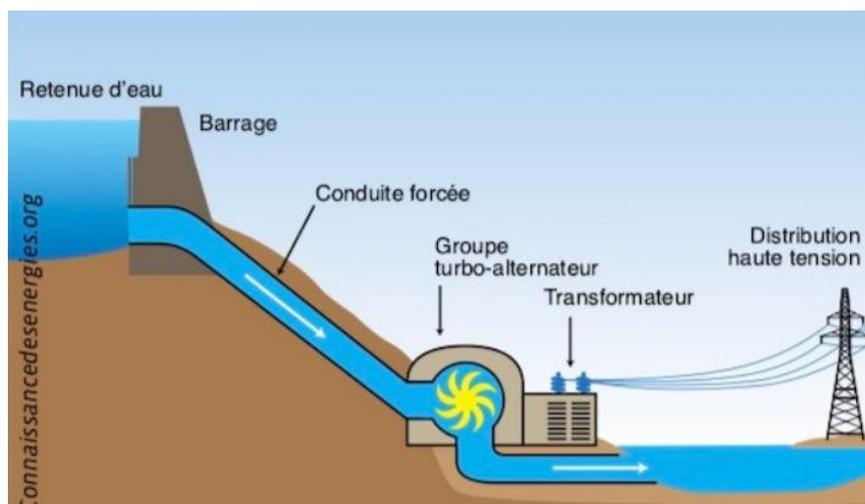


Figure I.4 :Energie hydraulique[6].

### I.3.4. L'énergie éolienne

L'énergie éolienne repose sur le vent comme source principale. Elle est captée par un dispositif appelé une éolienne qui convertit une partie de l'énergie cinétique du vent (le mouvement de l'air) en énergie mécanique. Par la suite, cette énergie mécanique est transformée en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice[7].

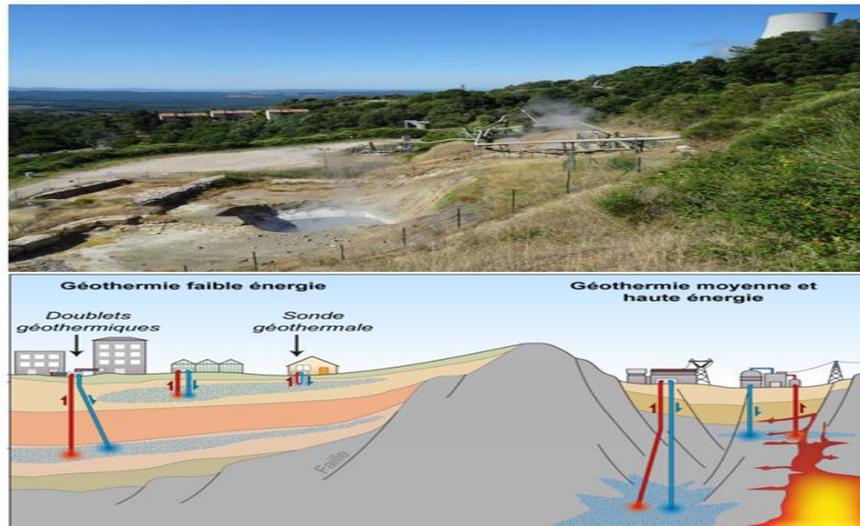


**Figure I.5 :** Energie éolienne.

### I.3.5. L'énergie géothermie

L'énergie géothermie était utilisée depuis des milliers d'années par les Romains pour la cuisson et le chauffage. Elle est produite par la chaleur interne de la terre. On distingue deux classes suivant le mode d'exploitation de la chaleur extraite du sous-sol :

- Production d'électricité (centrale thermique et turbine à vapeur).
- Production de chaleur (chauffage de locaux).



**Figure I.6** :Manifestation thermique sous forme de géothermie[8].

#### I.4.Le soleil

Le soleil est une étoile de grande chaleur, fournit à la Terre de l'énergie et de la lumière. Il se présente sous la forme d'une sphère de gaz ayant un diamètre de  $1,39. 10^9$  mètres, de surface de  $6,09.10^{12}$  km<sup>2</sup> et de volume de  $1,41. 10^{18}$  m<sup>3</sup>. Le soleil est, en effet, une fusion continue de ses gaz constitutifs ; sa lumière a une vitesse de  $300000$  km/s et de température qui décroît vers l'extérieur jusqu'à un palier d'environ  $5800$  K. D'après la relation d'**Einstein**  $E=mc^2$ , l'énergie émise par soleil est donc d'environ  $3,85.10^{26}$  W[9, 10].

Outre les informations précédentes sur le soleil, certaines valeurs physiques des régions décrites se trouvent résumées dans le tableau I. 1 et la figure I.7 ci-dessous :

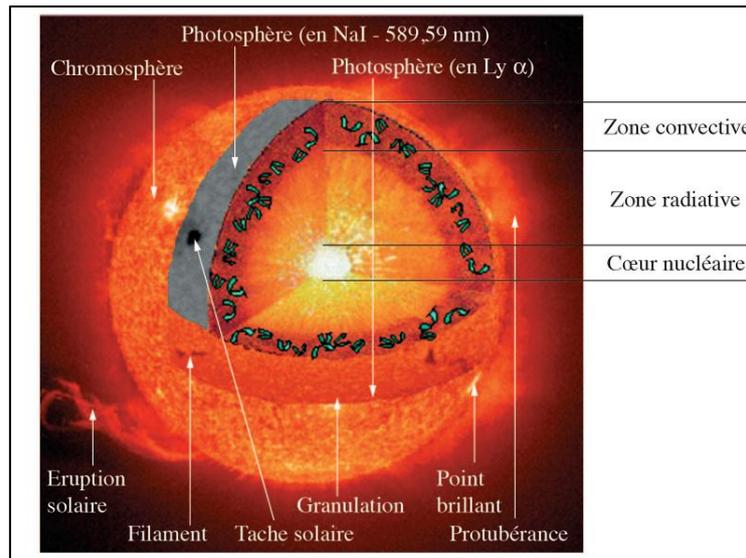


Figure I.7 : Coupe du Soleil [11].

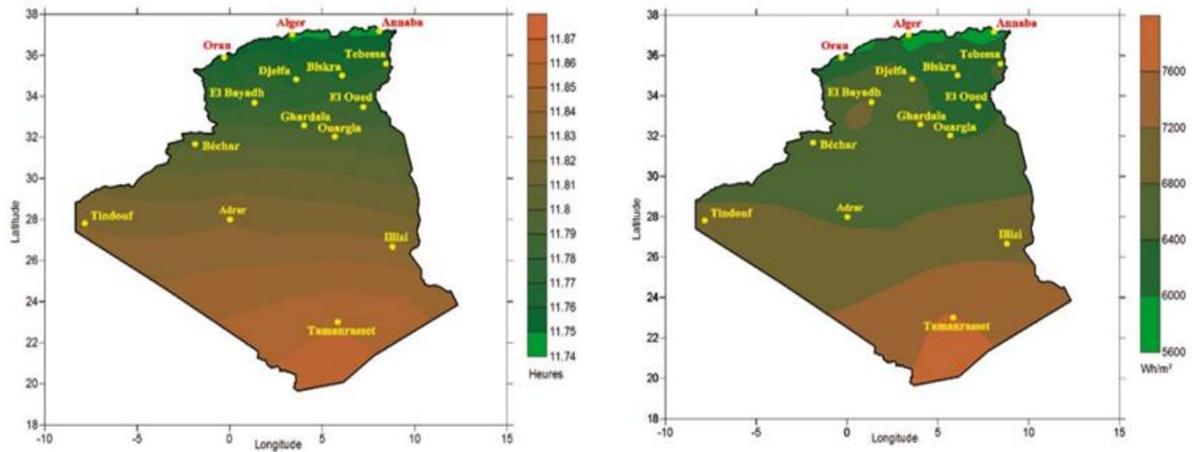
	Concentration ( $m^3$ )	Pression (atm)	Température (k)	Altitude (km)
Photosphère	$6,6 \cdot 10^{19}$	0,12	$5,8 \cdot 10^3$	0
Interface	$1,7 \cdot 10^{28}$	$6 \cdot 10^6$	$1,3 \cdot 10^6$	-1500
Convective radiative				
Interface zone	$1,410^{31}$	$3 \cdot 10^{10}$	$8 \cdot 10^6$	-500000
Radiative /cœur				
Centre	$5 \cdot 10^{31}$	$2,2 \cdot 10^{11}$	$15 \cdot 10^6$	-700000

Tableau I. 1 : Valeurs physiques des régions décrites [11].

#### I.4.1. Gisement solaire en Algérie

Un gisement solaire représente une compilation d'informations détaillant la variation du rayonnement solaire disponible sur une période spécifique. Il est utilisé dans des domaines tels que l'agriculture, la météorologie, les utilisations énergétiques et la préservation de la sécurité publique [12].

La géographie et le climat de notre pays l'Algérie sont un important gisement solaire au monde surtout dans le sud (Sahara) avec un maximum potentiel solaire total est estimé à 169 440 TWh par an dans une durée d'ensoleillement atteint en moyenne de 2500 heures par an.



**Figure I.8 :**La durée insolation et l’irradiation globale en Algérie [13].

Cette quantité d’énergie solaire devrait être bien utilisée dans plusieurs domaines d’industrie. Parmi l’expérience algérienne dans le domaine de développement d’énergie solaire pour économiser les énergies de pétrole et de gaz, des sociétés locales comme Sonelgaz et Sonatrach sont engagée dans des grands projets d’énergie qui donnent une place à l’énergie solaire comme la centrale thermique combinée hybride solaire/gaz de Hassi R’mel en 2018 qui fonctionne au gaz naturel avec un apport solaire qui atteint 20% de la puissance totale ( 30 MW).



**Figure I.9 :** Centrale hybride de Hassi R’mel.

### I.5. Transfert thermique

En l'absence de variation de température, aucun transfert de chaleur ne se produit, car il se manifeste naturellement du corps chaud vers le corps froid. Les observations de Newton en 1701 et de Jean-Baptiste Biot (1774-1862) en 1804 ont montré que l'intensité d'un transfert de chaleur par conduction est directement proportionnelle à la différence de température[14].

Le transfert thermique étant d'énergie, son unité SI est le joule (j). Pendant longtemps cependant, une unité spécifique lui fut associée dont le nom lui-même, la calorie (cal) démontre qu'elle est issue de la théorie dépassée du calorique. Nicolas Glement-Desormes (1779-1841) a défini en 1824 la calorie comme la quantité de transfert thermique requise pour augmenter la température d'un kilogramme d'eau d'un degré Celsius. Ce qui est maintenant appelé la "grande calorie" (cal). De nos jours, le terme "calorie" désigne en réalité une quantité d'énergie mille fois plus petite, soit le transfert thermique nécessaire pour augmenter d'un degré Celsius la température d'un gramme d'eau pure sous la pression atmosphérique standard, soit environ 14,5 fois moins.

#### I.5.2. La chaleur

La thermodynamique définit la chaleur comme une grandeur de trajectoire qui représente une forme temporaire d'énergie se propageant en réponse à une différence de température, c'est-à-dire :

- Entre deux parties d'un système quelconque ;
- Entre le système et son environnement ;
- Entre deux systèmes séparés par un milieu matériel ou pas (vide)[15].

#### I.5.3. Effet de serre

L'effet de serre est un phénomène naturel résultant de la présence dans l'atmosphère de molécules capables d'absorber le rayonnement infrarouge émis par la Terre[3].

Dans le système de capteur solaire, l'effet de serre est renforcé par l'activité humaine. Les longueurs d'ondes de rayonnement qui ont traversé la vitre sont piégées entre la vitre et le corps noir (absorbeur). Cet acte assure un échauffement de l'air à une température élevée.

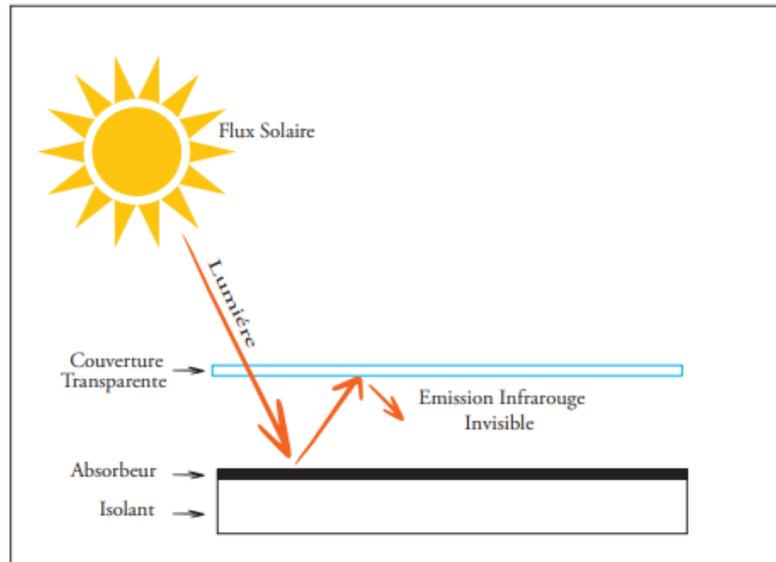


Figure I.10 : Schéma montré l'effet de serre.

## I.5.4. Les modes principaux de transfert thermique

### I.5.4.1. Conduction

La conduction thermique est le processus par lequel la chaleur se propage à travers la diffusion. La diffusion est une vision macroscopique de ce qui au niveau microscopique est la propagation de proche en proche par chocs de l'énergie cinétique d'agitation des molécules atomes ou électrons. La variable intensive "température" quantifie le niveau moyen d'agitation moléculaire, tandis que le flux d'énergie cinétique à une échelle microscopique est assimilé à un flux de chaleur à une échelle macroscopique.[16].

### I.5.4.2. Convection

La convection est un transfert d'énergie thermique qui résulte du déplacement des particules élémentaires d'un fluide- liquide ou d'un gaz, entre des régions de température différente. Ce mouvement entraîne un mélange significatif des particules du fluide. Ce déplacement entraîne un échange d'énergie sous forme de chaleur[15].

Il existe deux types de convection :

- **La convection naturelle (libre) :** Le fluide se déplace librement, comme dans ce cas où l'air chauffé monte en raison de la différence de température, créant ainsi un mouvement de la circulation de l'air.

- **La convection forcée** : On accélère le mouvement du fluide en utilisant des dispositifs externes tels que le ventilateur ou la soufflerie pour augmenter le débit d'air.

### **I.5.4.3. Rayonnement**

Le rayonnement est un transfert d'énergie thermique à travers des ondes électromagnétiques émis par le soleil, et Il est présent partout sur la surface de la terre.

#### **a) Le rayonnement direct**

Le rayonnement direct correspond au flux de rayons solaires qui parviennent directement à la surface de la Terre depuis le soleil, sans être diffusés par l'atmosphère. Ces rayons sont alignés de manière parallèle les uns aux autres[10].

#### **b) Le rayonnement diffus**

Le rayonnement diffus est une forme de rayonnement solaire qui n'arrive pas directement à la surface terrestre depuis le soleil, car il est dispersé dans l'atmosphère en raison de divers facteurs tels que la présence de nuages et d'aérosols [10].

#### **c)Le rayonnement global**

Le rayonnement global représente la somme totale du rayonnement direct et du rayonnement diffus atteignant la Terre comme le montre la figureI.11.

Quand nous étudions le rayonnement solaire direct, nous utilisons le terme "rayonnement direct normal" pour décrire le rayonnement direct mesuré de manière perpendiculaire aux rayons du soleil. Le même rayonnement solaire est réparti sur une surface plus grande, ce qui le rend moins intense. Cet effet est connu sous le nom de "cosinus d'incidence"[10].

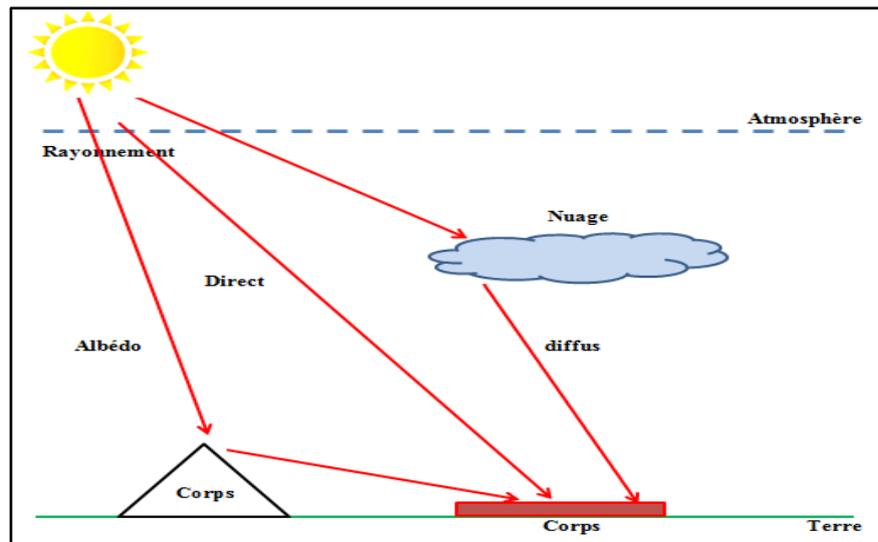


Figure I.11 : Eléments du rayonnement solaire au sol.

#### I.5.4.4. Spectre solaire

Le spectre solaire est la répartition de la lumière solaire en différentes longueurs d'onde ou couleurs comme décrit précédemment. La lumière du soleil est en réalité un mélange de diverses radiations de couleurs variées, chacune étant définie par sa plage de longueurs d'onde[10].

Ultraviolet (UV)	$0,20 < \lambda < 0,38 \mu\text{m}$	6,4 %
Visible	$0,38 < \lambda < 0,78 \mu\text{m}$	48,0 %
Infrarouge(IR)	$0,78 < \lambda < 10 \mu\text{m}$	45,6 %

Tableau I. 2 : Décomposition en longueurs d'onde[10].

### I.6.Facteur des matériaux

#### I.6.1. Grandes classes des matériaux

De nombreuses propriétés physico-chimiques et propriétés d'usage des matériaux sont étroitement liées à la nature des liaisons chimiques entre les atomes qui les constituent. C'est sur cette base qu'est établie la distinction entre les principales classes de matériaux.

**I.6.1.1 Matériaux métalliques :** Il s'agit des métaux purs ainsi que de leurs combinaisons ou mélanges, généralement dominés par les liaisons métalliques[17].

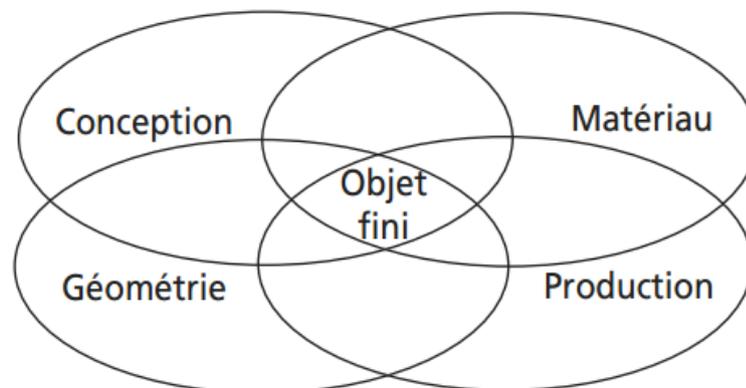
**I.6.1.2. Matériaux organiques :** Ces matériaux d'origine biologique, ainsi que les polymères et élastomères synthétiques, qui présentent à la fois des liaisons covalentes et des liaisons faibles[17].

**I.6.1.3. Matériaux minéraux :** Ce sont les roches, oxydes, verres minéraux, céramiques comportant des liaisons ioniques et/ou des liaisons covalentes[17].

**I.6.1.4. Matériaux composites :** Ils combinent de manière organisée à une échelle très fine différents matériaux, parfois issus de catégories différentes parmi celles mentionnées précédemment[17].

L'exigence de choix de matériaux prend une place importante à la conception et la fabrication de collecteur solaire. Les caractéristiques thermiques et mécaniques de matériau à chaque composant présentent plusieurs avantages pratiques ; ces caractéristiques permettent de diminuer les pertes thermiques et par conséquent une amélioration de rendement thermique.

Les objets que nous utilisons au quotidien sont tous fabriqués à partir de matériaux spécifiquement choisis en fonction de leur adéquation à la fonction de l'objet en question et au processus de fabrication nécessaire pour lui donner la forme souhaitée. Ainsi, la sélection du matériau est intrinsèquement liée à l'importance de la substance pour la création d'un objet final. (Figure I.12).



**Figure I.12 :** Interactions présidant à la réalisation d'un objet fini[17].

## I.7. Propriétés thermo-physiques

Pour améliorer la précision des résultats dans une étude sur le capteur solaire, on sélectionne des propriétés thermo-physiques spécifiques pour chaque composant de ce système. Ces propriétés dépendent principalement du vitrage, de l'isolation et de l'absorbeur.

Dans le tableau ci-dessous, diverses caractéristiques de matériaux utilisés dans la fabrication de collecteurs solaires à air sont listées.

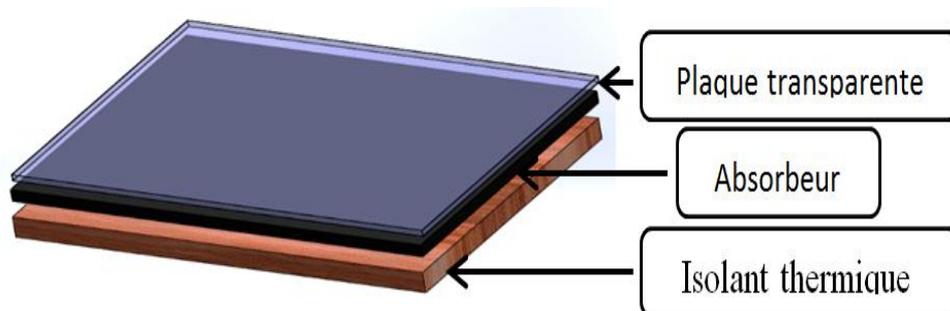
Matériaux	Masse volumique $\text{kg.m}^{-3}$	Température de fusion( $^{\circ}\text{C}$ )	Chaleur massique Cp ( $\text{Kj/kg.k}$ )	Conductivité thermique $\text{W/m.k}$
Acier	7850	1400-1540	0,48	45
Aluminium	2700	660	0,90	237
Cuivre	8930	1083	0,39	385
Bois	90 à 1400	-	1.5 à 2.0	0.10 à 0.65
Polystyrène	1100	150 a170	1.5	0.042
Verre	2400 à 2500	580 a1600	3 à 9	0.75 à 0.80
Plexiglas	1.2	150	1.44	0.18
Air	1,292	-	1.005	0.026

**Tableau I. 3** : Propriétés thermo-physiques des matériaux utilisés dans les capteur solaire[18].

## I.8. Capteur solaire

### I.8.1. Définition

Le capteur ou collecteur solaire plan est un système d'échangeur thermique qui permet de convertir l'énergie solaire en chaleur à température élevée ; cette chaleur reçue de cette conversion est utilisée pour plusieurs applications thermiques comme le chauffage de l'eau sanitaire et locaux ou sécher des produits agricoles. Leur principe de fonctionnement est basé sur le phénomène de l'effet de serre entre la plaque transparente et l'absorbeur (capteur plan vitré) ; chaque composante joue un rôle important pour fournir une transformation possible de l'énergie de rayonnement solaire.



**Figure I.13** : Collecteur solaire plan a air.

### I.8.2. Composant d'un capteur solaire

Le capteur plan est composé essentiellement de trois parties :

#### a) Plaque transparente

L'utilisation d'une couverture transparente sur le capteur solaire sert à garantir une protection efficace de l'absorbeur, tout en créant un effet de serre à l'intérieur. La plaque transparente doit aussi assurer les propriétés suivantes :

- Réduire les pertes thermiques vers l'extérieur.
- Bonne résistance aux sollicitations mécaniques.
- Bonne qualité physique.
- Résister aux risques de charges thermiques et au choc thermomécanique.
- Les matériaux de la plaque transparente doit être en verre, psi-glass et polycarbonates.

#### b) L'absorbeur

L'absorbeur est L'élément principal du capteur solaire qui a pour rôle de capturer le rayonnement solaire global, puis de le transférer sous forme de chaleur vers l'extérieur par convection, qu'elle soit naturelle ou forcée. Généralement, la surface de l'absorbeur en forme plat, zigzag et à ailette où ces formes sont constituées d'une plaque de matière conductrice peinte en noir mat (corps noire) comme le cuivre et l'aluminium ou laine de roche.

#### c) Isolant thermique

Le capteur solaire peut équiper à un ou plusieurs couches isolantes thermiques d'épaisseurs qui varient de 1 à 10 cm pour minimiser les pertes d'énergie vers l'extérieur. Les matières plus utilisés sont le bois, polystyrène et la laine de verre. Ces matériaux isolants doivent garantir une résistance efficace aux températures élevées, pouvant même atteindre jusqu'à 200°C.

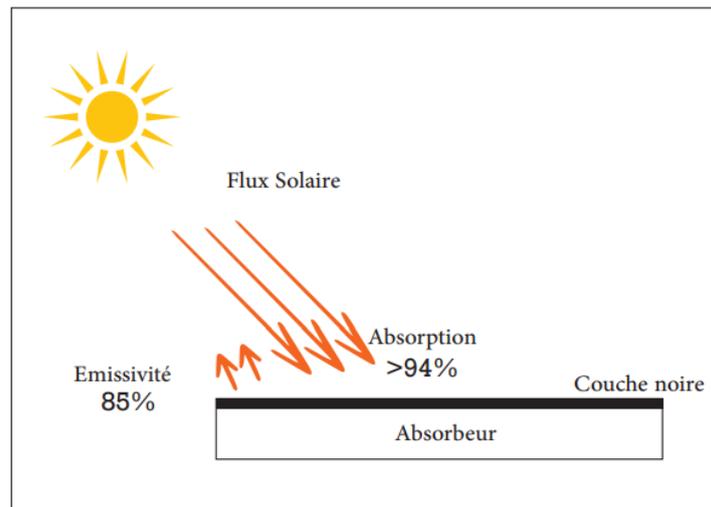
### I.9. Condition de fonctionnement pour le capteur solaire

Il est noté que l'amélioration de rendement de capteur solaire dépend du choix des conditions climatiques et des techniques appliquées. Ces facteurs jouent un rôle important dans les études de collecteur.

Les conditions suivantes peuvent être tirées :

- **Flux incident** : le flux solaire global incident est la source d'énergie principale pour le fonctionnement de capteur ; sa valeur varie entre 0 et 1200 w/m<sup>2</sup>.

- **L'angle d'inclination** : cet angle est compris entre  $35^\circ$  et  $45^\circ$ , ce paramètre permet d'obtenir un maximum de rayonnement et assure une bonne distribution de chaleur dans l'écoulement d'air.
- **Orientation de capteur** : le choix de position vers sud –absence d'ombre au cours de journée est pour capter le maximum de rayonnement solaire.
- **Débit d'air**: une grandeur important pour améliorer la distribution de température et l'écoulement d'air dans le capteur.
- **Température ambiante**: la température du ciel présente un facteur secondaire d'énergie au capteur solaire.
- **Fluide caloporteur** : l'air ambiant ou l'eau pour transfert de chaleur.
- **Canal** : conduite où circule le liquide caloporteur (cas de capteur à l'eau).
- **Surface du collecteur** : surface d'une longueur de 2 m et de largeur 1m; les chercheurs ont trouvé que cette surface donne une homogénéité de distribution des températures à l'extérieur.
- **Section de passage d'air (lame d'air)** : généralement de hauteur de 5cm et 10cm entre l'absorbeur et la vitre qui facilite le passage de l'air et laisse une place pour intégrer des obstacles (chicanes).
- **Les obstacles (chicanes)** : ils sont des dispositifs métalliques placés sur l'absorbeur lisse ou à la plaque transparente. Il s'agit de mieux contrôler l'écoulement d'air et de contribuer à améliorer les performances thermiques et dynamiques de collecteur.
- **Matériau de stockage** : l'utilisation de la chaleur latente et sensible d'un matériau de stockage thermique dont le but de consommer l'énergie dans les heures non ensoleillées. Exemples : sable, roche et MCP.
- **Ventilateur** : piloté l'air ambiant à l'intérieur pour la convection forcée qui joue un rôle important dans le transfert thermique.
- **La peinture noire mat** : l'utilisation d'une peinture noire mate permet d'obtenir des valeurs très élevées pour le coefficient d'absorption  $\alpha$  et le coefficient d'émission  $\epsilon$  de l'absorbeur.



**Figure I.14 :** coefficient d'absorption  $\alpha$  et coefficient d'émission  $\epsilon$ .

Le tableau I.4 montre les caractéristiques de la peinture noire et quelques exemples de revêtement sélectif.

Revêtement sélectif	Couleur	Matériaux	Coefficient d'absorption $\alpha$	Coefficient d'émission $\epsilon$
Penture	noire mat	Oxyde de plomb, Dioxyde de titane	0,9 à 0,95	> 0,95
Oxyde de chrome	noir	Nickel	0,95	0,12 à 0,18
Traitement sous vide	bleu marine	Titane	> 0,95	<0,05
Cuivre noir	noir	Cuivre, Nickel, Aluminium	0,81 à 0,93	0,11 à 0,17
Oxyde d'Aluminium	noir	Aluminium	0,9	0,1 à 0,4
Oxyde de fer	noir	Acier	0,85	0,08
Nickel noir	noir	Nickel, Acier	0,89-0,96	0,07 -0,17

**Tableau I. 4 :** revêtement sélectif de l'absorbeur[19].

### I.10. Types de capteurs solaires

Plusieurs types de capteurs solaires ont été construits et utilisés dans le monde. Chaque modèle joue un rôle important dans le processus de transformation de l'énergie thermique.

Le classement des collecteurs solaires a été choisi selon la forme géométrique de leurs composants ; on peut voir quelque exemple sur le tableau suivant :

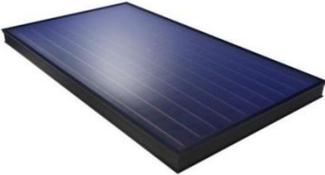
Type de capteur	schéma
capteur plan	
Réflecteur disque parabolique	
Réflecteur cylindro- Parabolique	
Réflecteur de miroir Fresnel	

Figure I.15 : Diffèrent type de capteur solaire<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Images internet /Libre accès

### I.11. Centrale thermique solaire à concentration

Il est nécessaire de concentrer l'énergie solaire (grand échelle) pour augmenter la densité de flux solaire sur une grande surface afin d'atteindre des niveaux élevés de température pour assurer un fonctionnement de centrale thermique.

Une centrale solaire à concentration se compose de trois parties principales : un champ solaire produite l'énergie thermique, une machine thermique servant à convertir de la chaleur en travail (énergie mécanique) et un alternateur qui permet de produire de l'électricité.



**Figure I.16 :**exemple d'une centrale thermique[20].

Actuellement quatre types de centrales solaires thermiques sont utilisés pour la production d'électricité.

#### I.11.1. Les centrales linéaires Fresnel

Le fonctionnement d'un concentrateur de Fresnel repose sur l'utilisation de miroirs plans, également appelés "réflecteurs compacts", qui ont pour rôle de constamment diriger et concentrer les rayons solaires vers un récepteur (absorbeur).

#### I.11.2. Les centrales cylindro-paraboliques

La technologie des centrales cylindro-paraboliques est la plus couramment employée et est actuellement utilisée par les centrales solaires les plus puissantes au monde. Ce type de

centrale est constitué de rangées parallèles de longs miroirs réflecteurs qui pivotent autour d'un axe horizontal.

### I.11.3. Les centrales à concentrateur parabolique

Ce type de centrale se compose d'alignements parallèles de longs miroirs paraboliques. Ces miroirs se déplacent le long d'un axe horizontal afin de suivre rayonnement solaire.

La concentration parabolique permet d'atteindre les facteurs de concentration les plus élevés, et les températures de fonctionnement peuvent atteindre 1500°C.

### I.11.4. Les centrales à tour

La centrale à tour est constituée d'une centaine ou milliers de miroirs solaires motorisés ou les héliostats concentrent les rayons du soleil vers la chaudière thermique qui est située en haut d'une tour.

## I.12. Classification de capteur plan

Notre choix est porté sur les modèles de capteur plan à air. Ce dernier offre généralement une meilleure performance thermique et dynamique plus élevé surtout dans l'application de séchage solaire indirect et échauffement de l'eau sanitaire.

### I.12.1. Capteur non vitré

Les capteurs non vitrés sont des capteurs à grande surface à basse température entre 30 °C et 50 °C où ils sont adaptés pour le chauffage des piscines (**Fig. I.17**).



**Figure I.17** :Capteur non vitre[21].

### I.12.2. Capteur plan à vitre

Généralement, le capteur plan à vitre contient une couverture transparente en verre ou psglass pour piéger le rayonnement solaire à l'effet serre. La couverture transparente et l'absorbeur à couche noire sont rassemblés par un coffre en bois comme le montre la définition précédente de capteur solaire. Ce type de capteur est plus répandu au chauffage où on peut l'installer sur la face latérale de bâtiment, les maisons (chauffe-eau sanitaire) et dans les sécheurs solaires.



Figure I.18 : capteur plan à air et à eau[22-23].

### I.12.3. Capteur à tube sous vide

Ce type de capteur est trouvé dans nombreuse applications de l'industrie et aussi dans la terrasse des maisons pour la production de l'eau chaude. Ce capteur est composé de plusieurs tubes en verre pour faire circuler l'eau (Fig. I.19).

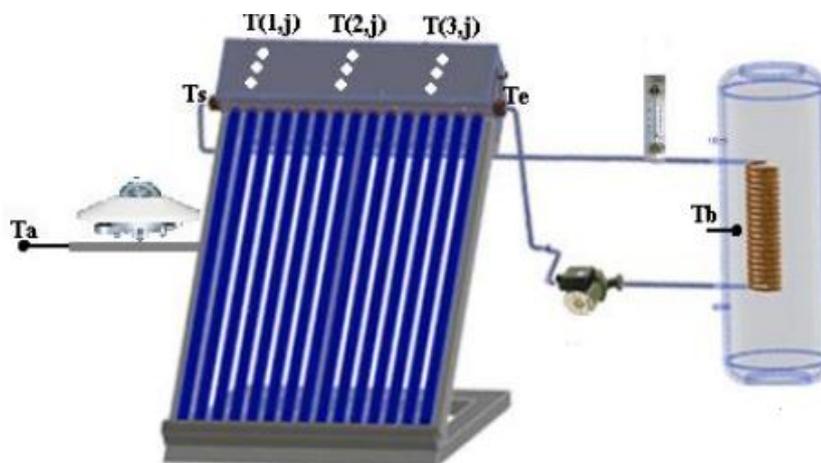


Figure I.19 : Collecteur tubulaire sous vide[24].

### I.13.Séchage solaire

#### I.13.1. Définition

La quantité d'énergie qui est fournie par le capteur solaire sous forme de chaleur est utilisée dans plusieurs processus tels que le chauffage de locaux, l'eau de sanitaire, le dessalement et le séchage. Parmi ces derniers, le séchage solaire est un procédé très ancien de conservation du produit agricole après les récoltes et aussi pour sécher des autres matériaux utiles comme les tissus.

Le séchage solaire est la déshydrations ou la séparation de quantité de liquides (généralement de l'eau) d'un corps solide et humide, donc le séchage est un moyen essentiel d'assurer la sécurité alimentaire.



**Figure I.20** :sèche plantes-aromatiques[25].

Pour avoir un meilleur temps de séchage des produits et afin d'évacuer l'air humide vers l'extérieur de la cheminée, il faut généralement assurer les conditions optimales de la température de chaleur et le débit massique de l'air. La figure I.21 montre la relation et les conditions de séchage par convection.

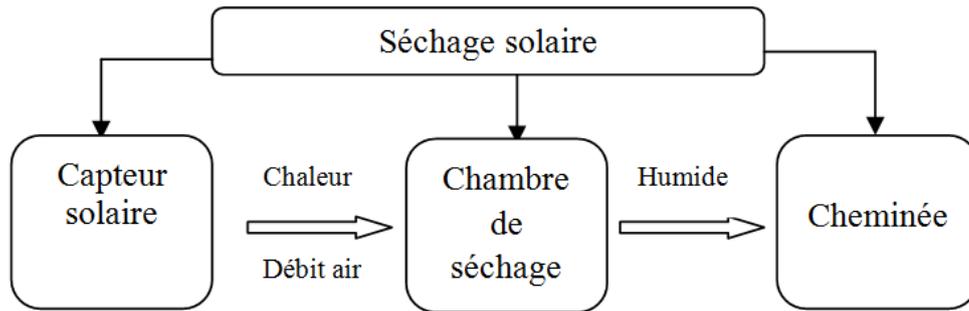


Figure I.21 : Les conditions de séchage par convection.

### I.13.2. Classification de sécheur solaire

Le système de séchage des produits se regroupe à deux modes différents : séchoir solaire passif (à convection naturelle) ou actif (convection forcée). Si en se basant sur la position de capteur solaire et la chambre de séchage, on peut classer les séchoirs solaires en trois types :

#### a) Sécheur solaire direct

Le principe du séchage solaire direct des cultures est illustré par la Fig. I.22, il est aussi appelé sécheur à armoire. Ce type de sécheur se compose d'une seule pièce qui représente la chambre de séchage et le capteur solaire où la surface transparente (capteur) couvre la chambre de séchage. Ce séchoir est simple, avec un faible coût de construction ; le produit à sécher est directement exposé au rayonnement solaire. Ce sécheur est employé pour le séchage de petite quantité de produits à sécher. L'inconvénient de ce modèle est que d'entraîner de l'humidité dans le produit à sécher.

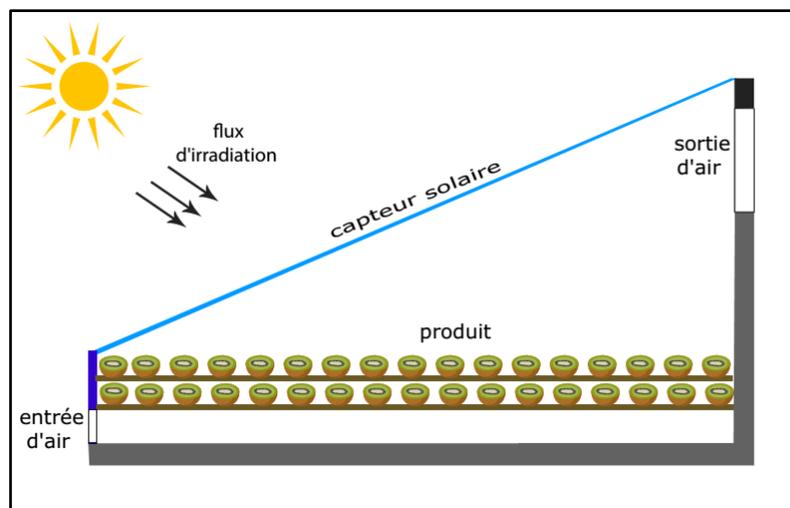


Figure I.22 : Sécheur direct.

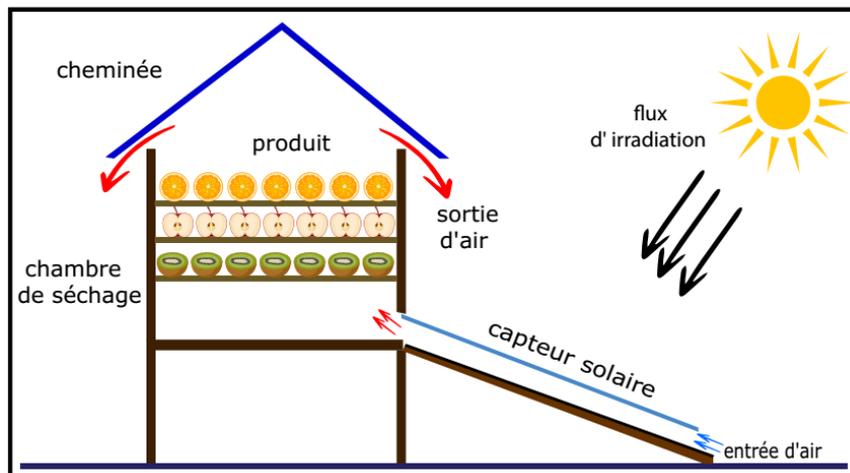
**b) Le séchoir solaire indirect**

Le séchoir solaire indirect est composé de:

- Un collecteur qui capte le rayonnement solaire.
- Une chambre de séchage qui contient le produit à sécher.

Dans ce séchoir, les produits ne sont pas exposés directement au soleil. L'air qui entre est chauffé dans le capteur solaire, puis transféré dans la chambre de séchage à convection libre ou forcée. Cette technique de séchage améliore le séchage traditionnel (libre) et présente plusieurs avantages :

- le produit agroalimentaire peut sécher au temps plus court.
- permet de conserver la valeur nutritive d'aliments tels que les vitamines.
- le produit est mieux protégé de tous les insectes, notamment des mouches.



**Figure I.23 :** Schéma descriptif de séchoir solaire indirect.

**c) Séchoir mixte**

Ce mode rassemble les deux types de séchoir direct et indirect avec une seule chambre de séchage et deux sources de chauffage qui sont : le rayonnement direct du soleil à chambre et la chaleur provenant du capteur solaire.

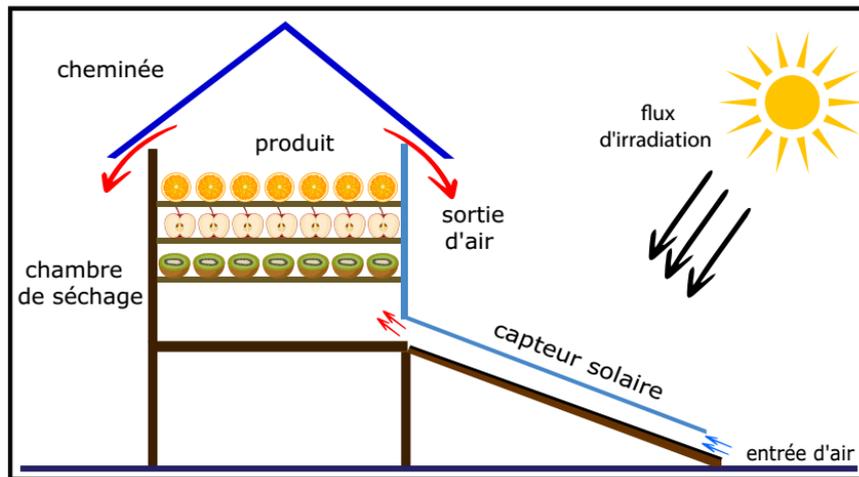


Figure I.24 : Sécheur mixte

#### I.14.Mode et Principe de séchage

Le processus de séchage peut souvent être influencé par la méthode de transfert de chaleur entre la source chaleur et le produit à sécher.

##### a) Séchage par convection

Généralement, on utilise la convection forcée pour accélérer le temps de séchage. L'écoulement de l'air chaud est entraîné vers le produit (masse humide) et va faire vaporiser l'eau de produit vers l'environnement sous l'effet de pression.

##### b) Séchage par conduction (à contact)

L'utilisation de l'échange thermique par conduction au séchage est fort pratique ; elle permet d'évaporer la quantité de l'eau de produit à sécher en direct avec un contact d'une paroi chaude.

##### c) Séchage par rayonnement

La création de rayonnement infrarouge est obtenue à l'aide d'un appareil électromagnétique comme la micro-onde qui apporte une chaleur au corps à sécher.

##### d) Séchage par soleil

Dans le séchage libre au soleil, le produit est exposé directement au rayonnement solaire et disposé sur le sol, la roche plate ou sur les toits des maisons. Ce système de séchage présente plusieurs inconvénients, car les produits soumis à la poussière et aux attaques des

insectes. De plus, le produit sèche prend un grand temps de séchage ; ce qui entraîne une mauvaise qualité nutritionnelle au produit.

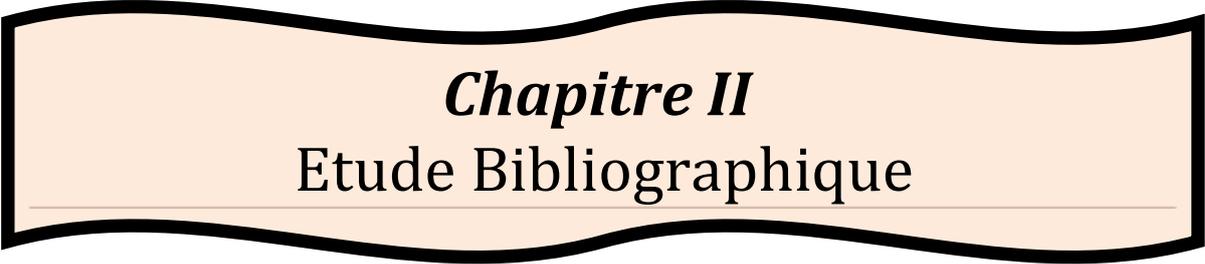


**Figure I.25** :séchage traditionnel a l'air libre [26].

### **I.15.Conclusion**

Ce chapitre présente des définitions et des notions de bases générales sur l'énergie. Une partie de cette étude est consacré aux modes de transfert de chaleur pour montrer l'impact de ces paramètres dans le fonctionnement des capteurs solaires en générale. De plus ; ce chapitre a montré qu'il est nécessaire d'avoir une bonne connaissance sur les propriétés thermo-physiques de matériau de fabrication de collecteur solaire pour améliorer les performances thermiques et dynamiques de séchage solaire.

Notre intérêt dans cette étude bibliographique est de bien connaitre le collecteur solaire à vitre qui représente une des parties principales dans le sécheur solaire.



***Chapitre II***  
Etude Bibliographique

---

## II.1. Introduction

En raison de l'insuffisance de la production de quantité de chaleur dans le capteur solaire plan à air simple destiné au séchage ou à autre application thermique, des recherches principales ont été menées à partir de plusieurs travaux numériques et expérimentaux pour apporter des améliorations thermique et dynamique sur ce capteur thermique solaire et motivent leur rendement avec diverses techniques et des moyens.

Au cours de ce chapitre, on s'intéresse à la présentation d'une revue bibliographique qui traite les résultats des meilleurs travaux concernant des articles scientifiques sur les études de collecteur à air et le sécheur solaire ; ces études ont été basées sur les principales influences telles que :

- L'amélioration de l'écoulement d'air par convection forcé et libre.
- La variation de l'angle d'inclinaison de capteur.
- L'utilisation d'une surface de transfert de chaleur secondaire par des obstacles et rugosité artificielle.
- Le prolongement de la durée de fonctionnement de capteur en utilisant le stockage thermique par l'intégration des matériaux de stockage MCP.
- La création de la turbulence pour une meilleure distribution de d'air chauffé.

Les mécanismes d'amélioration de l'efficacité de chaleur indiqués dans les influences précédentes ont permis de mettre l'accent sur les techniques qui contribuent à l'amélioration du rendement de chaleur surtout dans les systèmes de processus de séchage, ce qui nous a aidé à obtenir une meilleure qualité de produit à séché.

L'ensemble de ces travaux peuvent être divisé en plusieurs classes de collecteur tout dépend de la forme et les techniques qui sont ajoutées au capteur solaire simple.

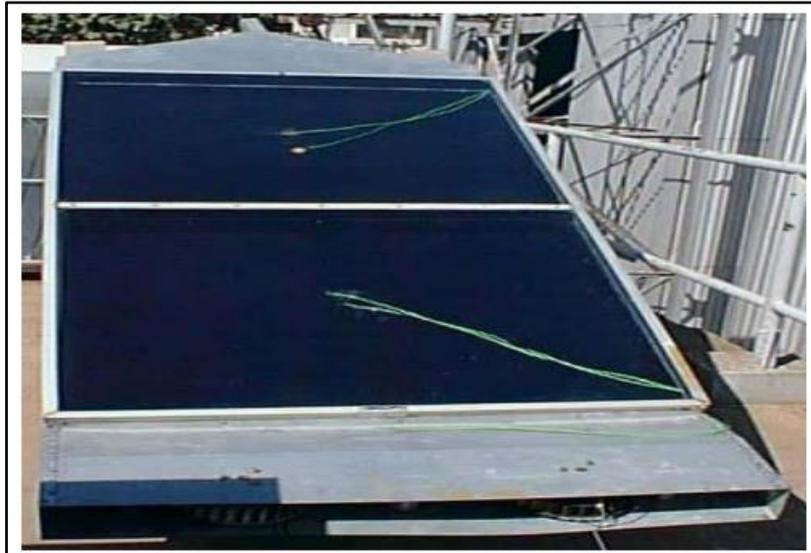
Les types de collecteur solaire suivant peuvent être tirés :

- Capteur à absorbeur de forme plat, zigzag (ondulé) et ailette.
- Capteur plan simple muni des obstacles (chicanes) et rugosité artificielle.
- Capteur avec matériau de stockage thermique.
- Capteur hybride PV/T: intégré par panneau photovoltaïque.

## II.2. Capteur à absorbeur de forme plat, zigzag et à ailette

A ces fins, l'utilisation de capteur solaire pour le séchage est l'objet de plusieurs travaux de recherches. **Mokhtari et al. [27]** ont expérimentalement effectué une étude sur un capteur solaire à air plat simple. Ils ont exposé les étapes suivies dans la réalisation d'un capteur

solaire d'un séchoir indirect avec le choix du matériau et des dimensions. Les résultats ont montré que la température de sortie du fluide varie en fonction du flux solaire à convection libre ou forcée. En plus, les auteurs ont mentionné que l'étude expérimentale donne une éventuelle analyse théorique du système de capteur. Ce type de collecteur donne une température de 75°C.



**Figure II.1 :** Vue de capteur solaire de prototype de [27].

Un capteur solaire a été conçu et développé par **Chabane et al. [28]** pour sécher des produits agricoles, il se compose d'un absorbeur à ailettes longitudinales où la surface totale de collecteur est de 1.8236 m<sup>2</sup>. Des expériences ont été menées pour deux débits massiques d'air de 0,012 et 0,016 kg/s avec cinq ailettes pour améliorer l'efficacité thermique de capteur solaire. Les auteurs ont varié l'angle  $\beta = 25^\circ, 35^\circ$  et  $40^\circ$  dont  $\beta$  est l'angle d'inclinaison de capteur solaire. La différence de température maximale obtenue dans cette étude est de 29,7 °C pour l'angle d'inclinaison de  $35^\circ$  où la température maximale de sortie obtenue est 74 °C.

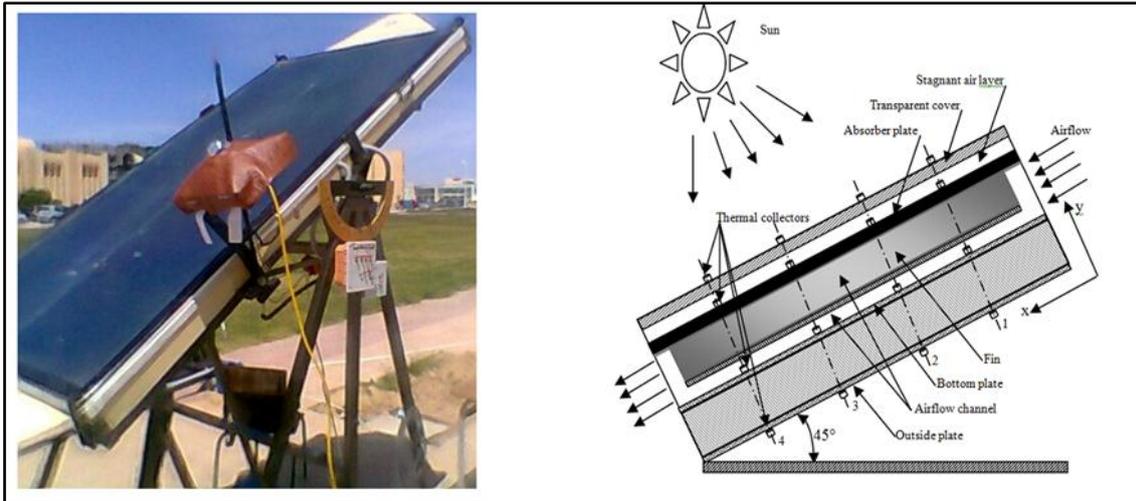


Figure II.2 : Image et schéma du collecteur d'air solaire étudié par [28].

A. Daliran et al. [29] ont mené un travail expérimental et théorique d'un collecteur d'air à plaque plate afin d'augmenter les performances thermiques de ce système pour deux modèles : sans ailettes et avec ailettes rectangulaires. Les auteurs ont montré que l'intégration des ailettes dans le canal d'air réduit non seulement le nombre de Nusselt de 19,67 à 16,23, mais aussi en raison de diminuer le diamètre hydraulique et de création d'un flux d'air turbulence. En comparaison, l'efficacité thermique a été calculée respectivement pour le type à ailettes et celui sans ailettes que 30 % et 51 % dans l'étude expérimentale et 33 % et 55 % pour l'étude théorique.

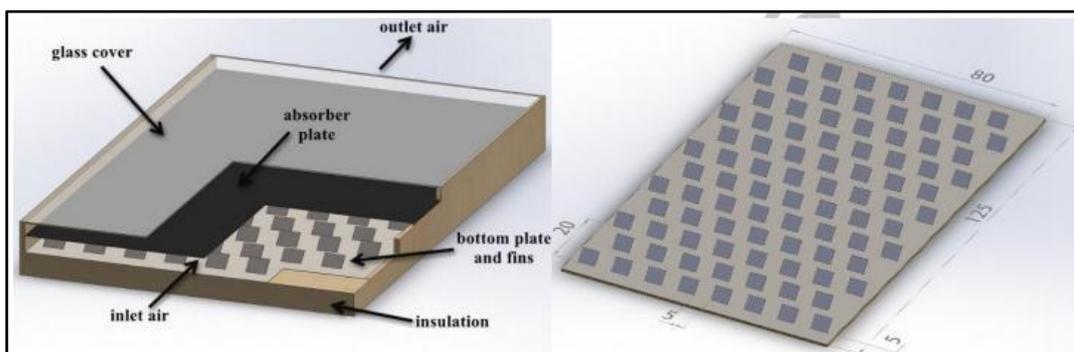
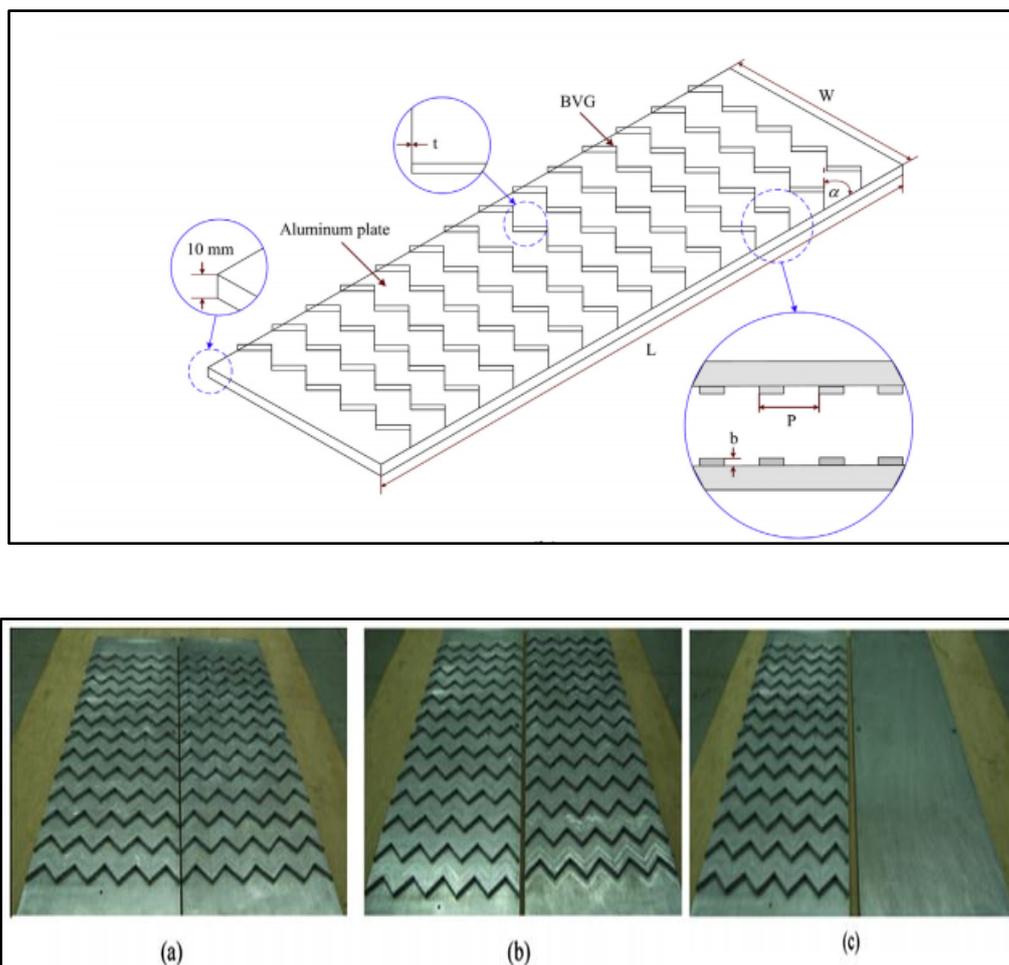


Figure II.3 : Capteur de modèle d'ailettes [29].

Sombat Tamna et al.[30] ont étudié numériquement et expérimentalement une nouvelle conception de capteur solaire afin d'étudier la forme géométrique qui donne la distribution uniforme de l'écoulement de chaleur et de réduire le frottement. Trois géométries de la plaque

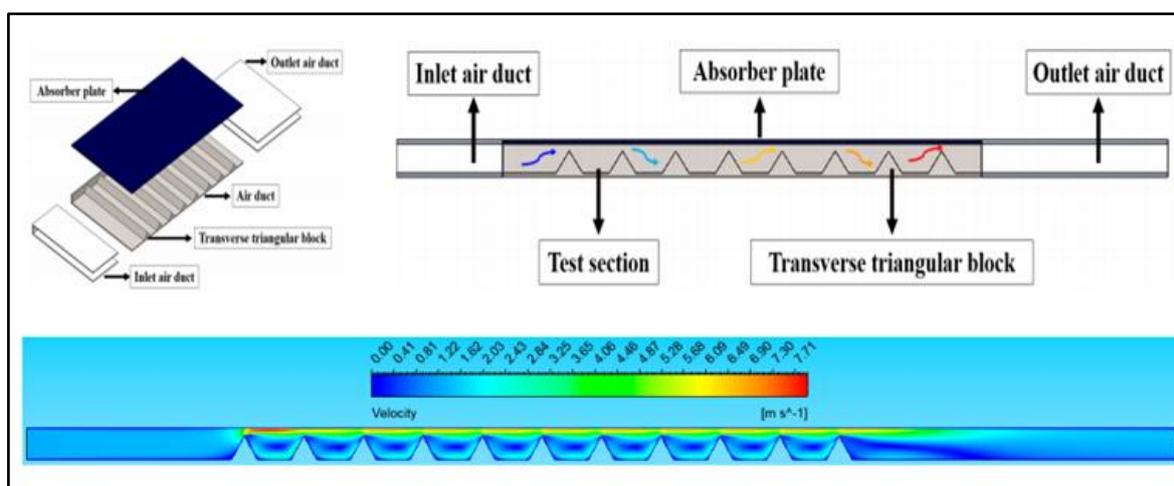
absorbante ont été présentées : de forme multi-V disposées en ligne, en quinconce sur les deux surfaces inférieure et supérieure et une troisième disposition sur une seule surface avec un angle d'attaque  $\alpha = 45^\circ$  comme le montre la **figure II.4**. Pour un nombre de Reynolds allant de 4000 à 21000 , le taux de blocage est de 0.25 et le taux d'espacement varie entre 0.5 et 2 , les résultats montrent que la disposition en ligne a plus d'efficacité thermique que la disposition en quinconce .En plus, la disposition de troisième type sur une surface unique produit une performance thermo hydraulique la plus élevée d'une valeur de 1.83 avec une valeur bas de Reynolds.



**Figure II.4** : Schéma descriptif de l'absorbeur adopté par l'étude de [30].

L'étude de **Hwi-Ung Choi et al .[31]** est une analyse bidimensionnelle qui a été effectuée par CFD pour étudier un collecteur d'air solaire ayant un bloc triangulaire transversal sur l'absorbeur. Cette étude est validée avec un résultat expérimental en vérifiant les valeurs du nombre de Nusselt et du coefficient de frottement. D'après les résultats, il est constaté que la

présence d'un bloc triangulaire transversal produit un nombre de Nusselt important qui varie entre 1,19 à 3,37 supérieur à celui du conduit d'air lisse. Pourtant, ce capteur cause des pertes par frottement nettement plus élevées. Pour une hauteur ( $e$ ) de 60, un pas ( $P$ ) de 150 et un nombre de Reynolds de 8000, l'augmentation du nombre de Nusselt a varié dans la plage de 2,919 à 3,374 ; cette augmentation donne les meilleures performances thermiques par rapport au conduit lisse. En outre, cette étude a permis d'établir des améliorations de nombre de Nusselt et le facteur de frottement en fonction de la configuration du bloc triangulaire transversal et du nombre de Reynolds qui peuvent être utilisés pour prédire la valeur du nombre de Nusselt et du facteur de frottement.



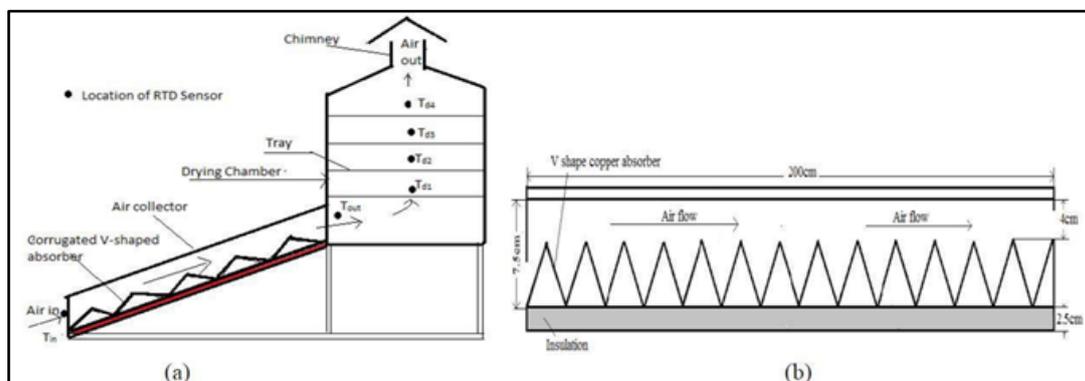
**Figure II.5 :** Collecteur solaire schématisé en CFD [31].

Une étude expérimentale réalisée par **A. ELkhadraoui et al.** [32] afin de trouver la conception optimale d'un séchoir solaire indirect pour le séchage du poivre rouge et raisin sultanine. Cette étude montre un effet positif pour la circulation de l'air et pour l'augmentation de température à l'intérieur de la serre solaire. Des expériences ont été effectuées où les auteurs intégrant un capteur solaire plan simple avec une serre en forme de chapelle. Le temps de séchage du poivron rouge était réduit en 24 h pour un séchage au soleil à l'air libre, alors que le séchoir à effet de serre n'a pris que 17 h et pour le raisin le temps a diminué de 76 à 50 h. Cette opération de séchage a réduit pratiquement le temps de séchage.



**Figure. II.6 :** Configuration de l'intégration d'un capteur solaire avec la serre [32].

De même objectif, **Abhayet et al.** [33] ont mené une étude basée sur une approche expérimentale d'un séchoir solaire indirect destiné au séchage des bananes. Le séchoir comporte un capteur solaire avec absorbeur en forme de zigzag de surface totale de  $2 \text{ m}^2$ , une chambre de séchage et une cheminée pour l'échappement de l'air. Les auteurs ont constaté que ce type de séchage est plus rapide et plus efficace que le séchage à l'air naturel, en plus l'intégration de l'absorbeur de forme zigzag montre une grande différence de performance thermique par rapport à absorbeur plat. Le résultat d'étude montre que le rendement thermique moyen du capteur solaire était de 31,5 %, ce rendement a réduit la masse de la banane de 2kg à 0,5628 kg.



**Figure II.7 :**(a) Schéma de montage expérimental. (b) collecteur zigzag solaire [33].

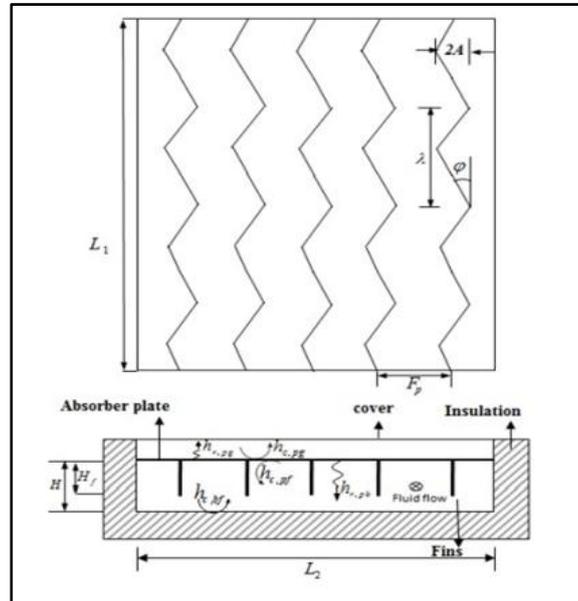
Un travail expérimental à différents types de surface de l'absorbeur d'un capteur solaire à air a été réalisé par **Shuilian Li et al.** [34]. Pour l'amélioration du transfert de chaleur entre l'air et la plaque chauffée, les auteurs utilisent quatre types de capteurs solaires à air ; ondulé sinusoïdal plaque, plaque en saillie, plaque ondulée sinusoïdale et en saillie et une plaque plate. Ce travail a pour but de fournir un remède aux faibles propriétés thermophysiques de l'air en utilisant différentes surfaces d'absorption du collecteur solaire. Les tests des expériences ont été évalués en même temps que les jours avec le même rayonnement solaire. Les résultats ont indiqué que la forme de la surface des absorbeurs de type 1 entraîne une augmentation du coefficient de transfert de chaleur et de la perte de pression, et par conséquent ce collecteur solaire produit un tourbillon, ce qui provoque l'augmentation du coefficient de convection du transfert de chaleur. Pour un débit de  $60 \text{ m}^3/\text{h}$ , ce collecteur peut donner une température élevée de sortie environ de  $101 \text{ C}^\circ$ .



**Figure II.8 :** Quatre types de capteur solaires étudié par Shuilian Li [34].

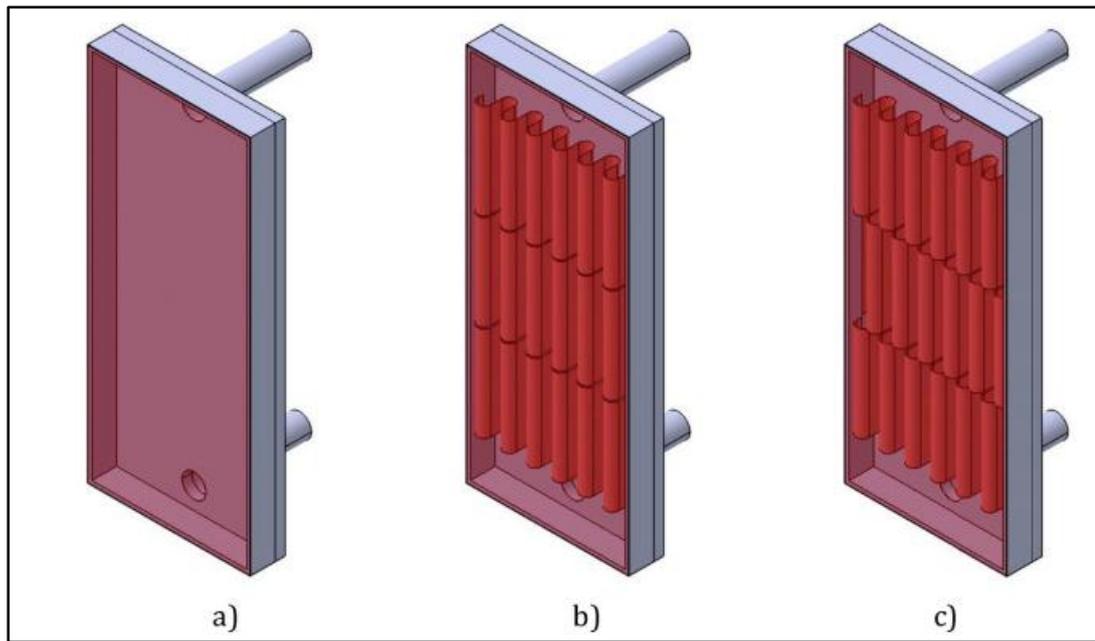
Le modèle de capteur solaire peut être développé sur la base de programmation MATLAB. Pour cela, une étude théorique a été menée par **Rajesh Kumar et al.** [35]. L'étude traite d'ailettes ondulées à chevrons fixées sous la plaque absorbante d'un capteur solaire à air. Le programme MATLAB a été choisi pour avoir plusieurs informations sur l'influence de tous les paramètres étudiés concernant le champ thermique et l'effet de l'exploitation de plusieurs techniques à savoir : le débit massique, pas relatif des ailettes, rapport d'espacement des ailettes et l'intensité de flux solaire sur la performance thermique. Les auteurs ont montré l'influence de l'intensité solaire sur la performance thermique des ailettes ondulées à chevrons. Ils ont prouvé que la présence des ailettes donne une augmentation de recirculation

de fluide et une efficacité thermique du collecteur solaire conventionnel qui passe de 36,2 % à 56,6 % dans la configuration de : un pas d'ailettes de 2,5 cm et un débit massique de 0,026 kg/s.



**Figure II.9** : Schéma descriptif de l'absorbeur adopté par l'étude de **Rajesh Kumar et al [35]**.

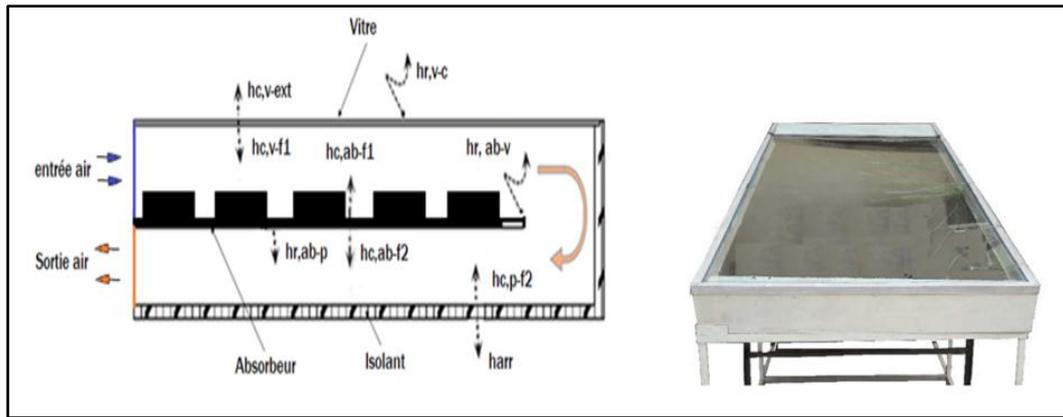
Dans l'article de **J. J Fiuk et al. [36]**, les résultats d'une recherche expérimentale sur les capteurs solaires passifs à air sont présentés où l'impact de l'application de deux conceptions de surface d'absorbeur ondulées a été étudié. Les conceptions de surface d'absorbeur se composent de trois panneaux de tôle d'aluminium en forme de vague à peinture noire. L'expérience a été menée dans des conditions de rayonnement artificiel à l'état d'équilibre dans un environnement de laboratoire ; l'irradiation a été modifiée dans une plage de  $I = 0-990 \text{ W/m}^2$ . Les résultats présentent des mesures de températures enregistrées à l'entrée et à la sortie du capteur solaire, la vitesse moyenne de l'air dans le conduit d'entrée du capteur et l'irradiation à plusieurs points. Les résultats révèlent que l'efficacité thermique est augmentée par l'augmentation de flux solaire et le débit volumétrique de l'air. Les auteurs ont constaté que la conception la plus performante en termes de rendement thermique est celle avec un absorbeur ondulé sans retournement de feuille. Pour l'irradiation  $I = 756 \text{ W/m}^2$ , le rendement thermique est égal à  $\eta = 73,8 \%$ , tandis que pour la même condition énergétique, le rendement de collecteur avec inversion est  $\eta = 58 \%$  et celui du collecteur à plaque plane est  $\eta = 46 \%$ .



**Figure II.10 :** Capteur solaire à air simple et ondulé [36].

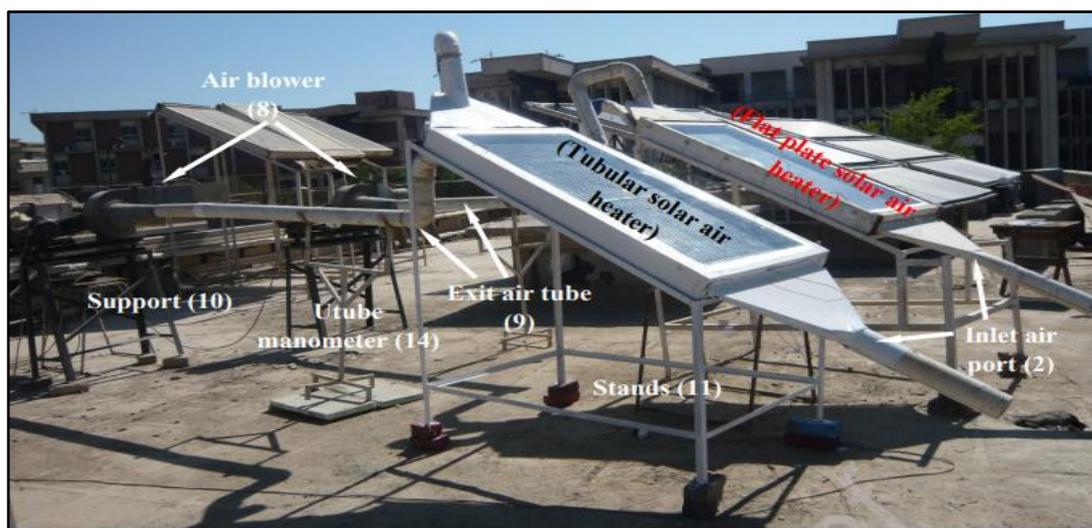
**M.M.D Ndiaye et al.** [37] ont traité une étude numérique et expérimentale sur une plaque absorbante d'un capteur solaire avec et sans ailettes plan à deux passages de l'air. Dans ce contexte, l'auteur présente cet article comme l'objectif pour constituer une nouvelle technique qui permet d'étudier et de maîtriser la distribution de la température de l'écoulement d'air. Les modèles théoriques relatifs au capteur à air avec et sans ailettes ont été établis et résolus numériquement à l'aide de codes élaborés en Fortran pour obtenir une approche globale de leur comportement à l'aide de Comsol. Une approche expérimentale a été développée dans le but de valider l'approche numérique.

Dans l'objectif d'améliorer les performances du capteur solaire, une substance biodégradable locale, élaborée à partir de tiges de mil broyées, a été créée. En outre, ce type de capteurs a montré que la réduction des pertes thermiques peut augmenter le rendement thermique. Le rendement qu'ils ont trouvé est égal à 77 % pour un débit d'air de 0,023 kg/s et flux solaire de  $900 \text{ W/m}^2$ .



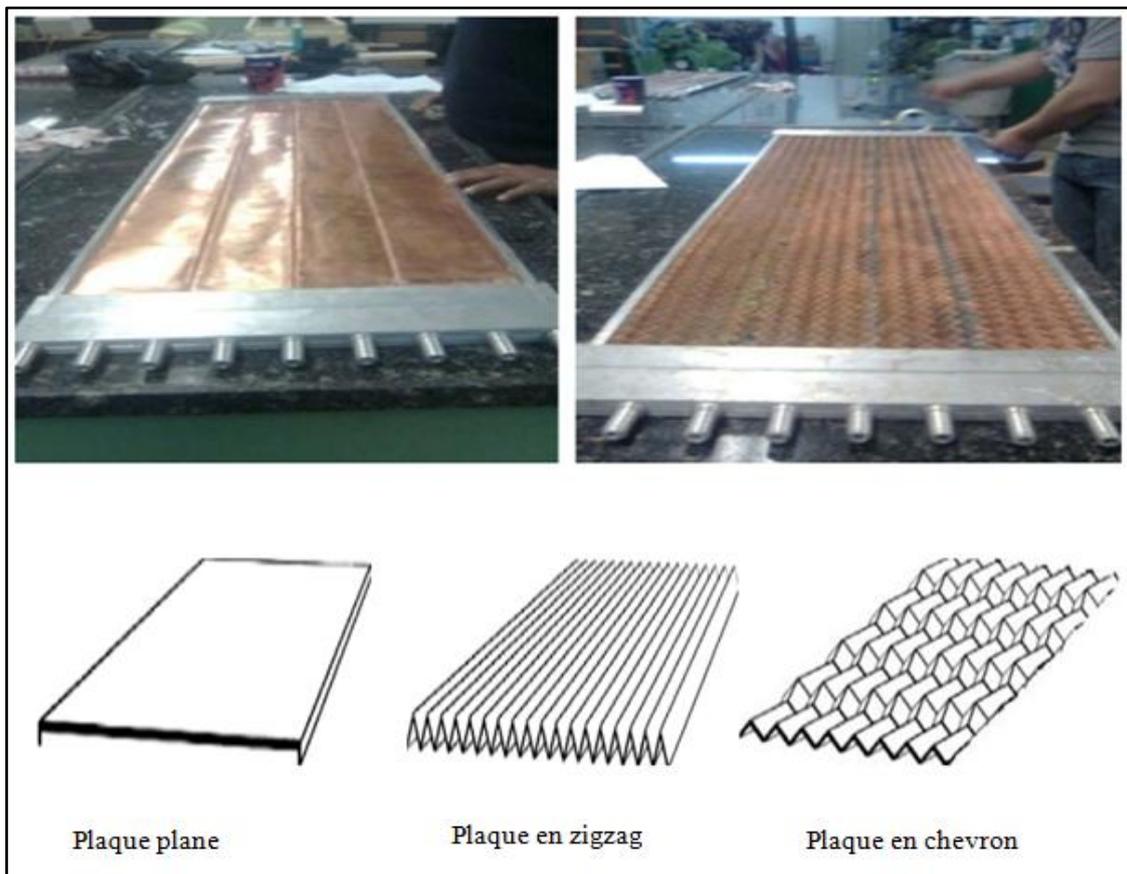
**Figure II.11** : Prototype schématique de capteur solaire mené par [37].

**Hamdy et al.** [38] ont développé une nouvelle conception de l'absorbeur composé de tubes adjacents (tubulaire) qui donne une forme ondulée. L'auteur a comparé les résultats de ce capteur solaire à celle d'un capteur plan expérimentalement à différentes vitesses d'air d'entrée : 3 m /s ,6 m /s et 9 m /s. La tubulaire de ce collecteur solaire est un absorbeur constitué de plusieurs tubes circulaires en aluminium (**Fig. II.12**) où chaque tube à une longueur de 150 cm et un diamètre de 2,5 cm de peinture noire mat. Les résultats montrent que l'efficacité du capteur tubulaire est supérieure à celle du capteur simple pour tous les débits d'air. L'efficacité obtenue du capteur tubulaire est d'environ 83,6%,76,3 % et 59,8 % pour des vitesses d'air de 9 m/s (0,075 kg/s), 6 m/s (0,05 kg/s) et 3 m/s(0,025 kg/s), respectivement et l'efficacité de capteur simple est d'environ 58,6 %, 43,5 %, 28,6 %, respectivement .



**Figure II.12** : Photo du capteur solaire à absorbeur tubulaire et simple[38].

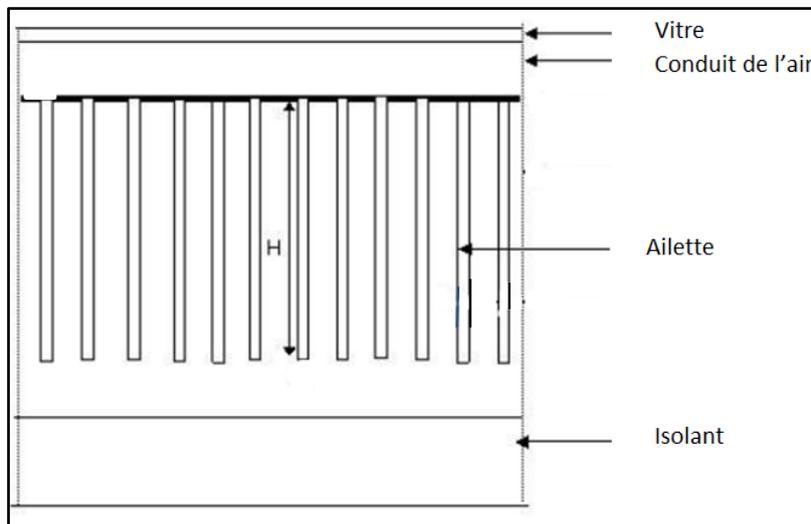
**El Sawi et al.** [39] ont effectué une expérimentation basée sur une nouvelle technologie du procédé sur la plaque absorbante en cuivre d'un capteur solaire. Ils ont plié l'absorbeur en forme zigzag et chevron pour l'effet de mélange d'air suite de création d'écoulement tourbillon, ce qui permet une bonne distribution de l'air. Deux débits différents 0,015 et 0,040 kg/s ont été testé lors de l'expérimentation. Les chercheurs ont constaté qu'en utilisant un absorbeur en forme de chevron, le rendement thermique s'améliorait et la température augmentait par rapport à l'utilisation d'un capteur solaire simple (**Fig. II.13**). Les résultats montrent aussi que l'efficacité de capteur muni d'absorbeur à chevron est supérieure de 10% et 20% par rapport à l'absorbeur zigzag et plat respectivement.



**Figure II.13 :**Les trois types de la plaque d'absorption[39].

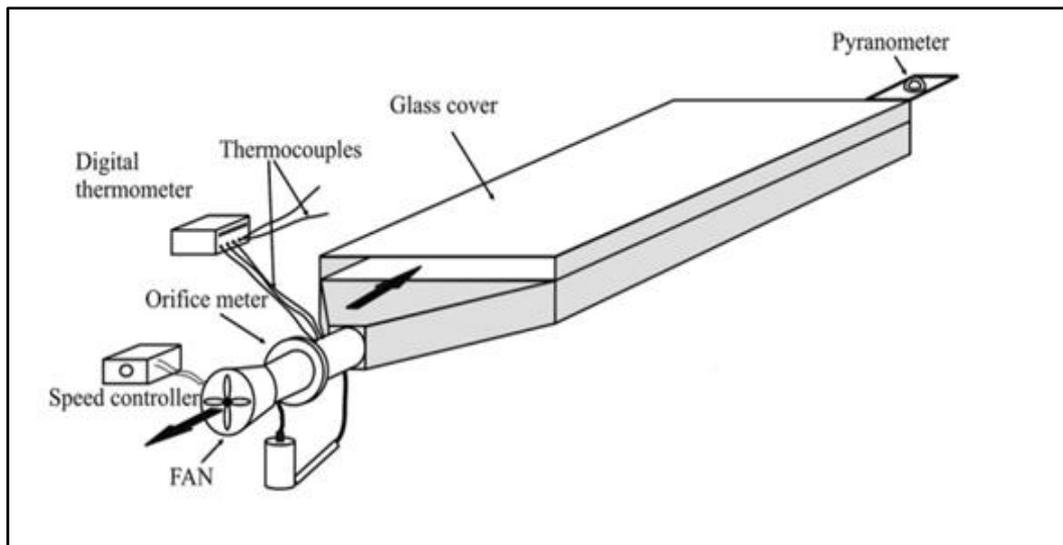
**Bhattacharyya et al.** [40] ont procédé à une analyse du transfert de chaleur dans un capteur solaire à air muni d'ailettes de forme rectangulaire. L'impact du nombre et de la taille des ailettes a été étudié. Les auteurs ont noté que la température du fluide à la sortie augmente

ou diminue avec l'augmentation du nombre des ailettes. L'analyse a montré que le capteur solaire intégré par 80 ailettes avec un rapport hauteur H sur longueur de conduit D où  $H/D = 0,6$  et une épaisseur d'ailette de 2 mm donne les meilleurs résultats pour le séchage du riz.



**Figure II.14** :représentation d'un collecteur doté d'un absorbeur à ailettes [40].

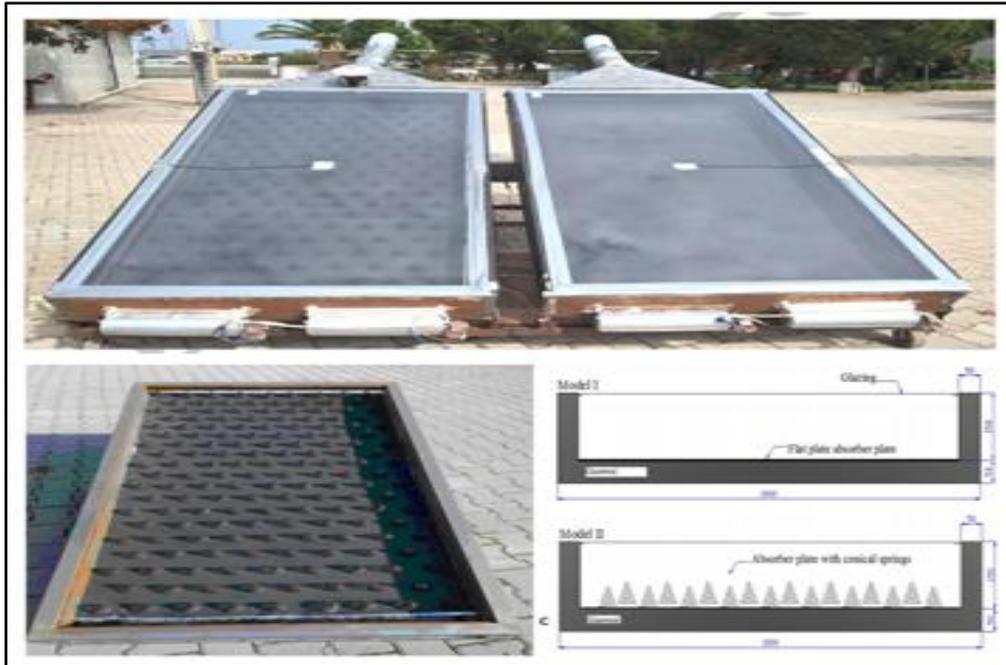
**L.B.Y. Aldabbagh [41]** a conçu et a analysé un capteur solaire dont le passage de l'air peut s'effectuer d'une manière simple et multiple. L'auteur a comparé les performances de capteur à double écoulement avec un capteur simple à différents débits d'air de 0.012 à 0.038 kg/s. Les résultats de l'étude ont montré qu'un maximum d'efficacité peut être obtenu en utilisant un milieu poreux au lieu d'une plaque absorbante plat. Pour le passage unique de l'air le rendement maximal obtenu était de 45,93 % et de valeur de 83.65 % pour collecteur de deux passages pour un débit massique d'air de 0,038 kg/s. Les résultats montrent que le rendement est amélioré avec l'augmentation du débit massique de l'air dans les deux cas. En plus, l'expérience a montré que les différences de température sortie et entrée  $27C^{\circ}$  pour un seul passage et  $38.8 C^{\circ}$  pour deux passages à rayonnement solaire de  $1050w/m^2$ . De plus, pour le même débit massique les différences de température du capteur augmentent parallèlement de l'augmentation du rayonnement solaire.



**Figure II.15.** Vue schématique de capteur solaire [41].

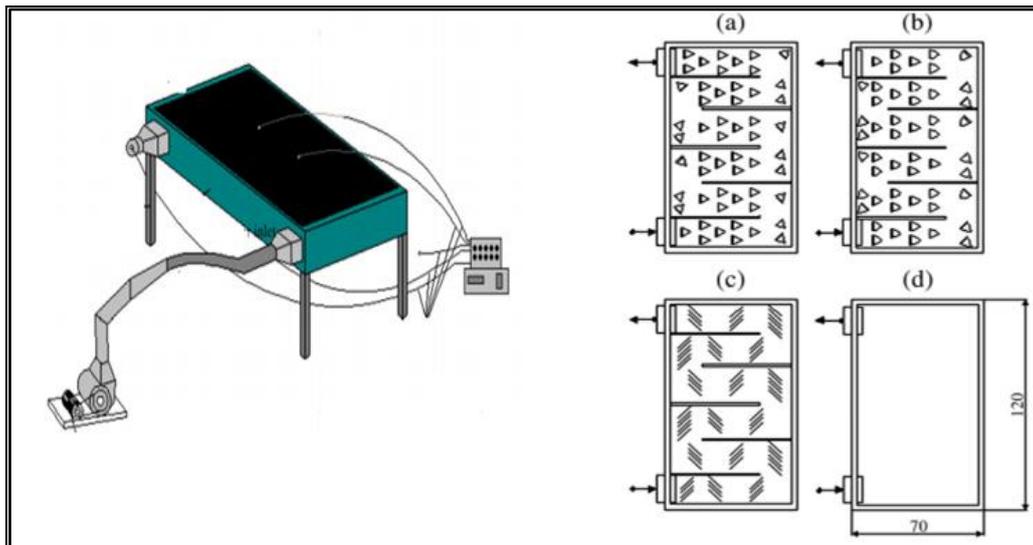
### II.3. Capteur plan simple muni des obstacles et à rugosité artificielle

L'étude de **M. Abuska et al.** [42] est une expérience sur un capteur solaire contenant une plaque absorbante en ajoutant des chicanes ; ces derniers sont des concentrateurs de forme conique d'une hauteur de 5cm (**Fig. II.16**). Ce capteur solaire de type II a été étudié et comparé à une plaque absorbante plate de type I à simple passage de l'air. La forme de chicane, le débit d'air qui varie entre 0,06 et 0,07 kg /s, la géométrie de la surface du collecteur et l'efficacité thermique sont des indicateurs de performances thermique. A partir de ce résultat, les auteurs ont conclu que l'efficacité thermique du capteur était de 50,4 et 65,9 % pour les types I et II, respectivement. L'amélioration du transfert de chaleur est observée pour le type II par rapport au type I. Il est aussi noté que les ressorts de forme conique assurent une bonne distribution de l'écoulement d'air sur la plaque absorbante.



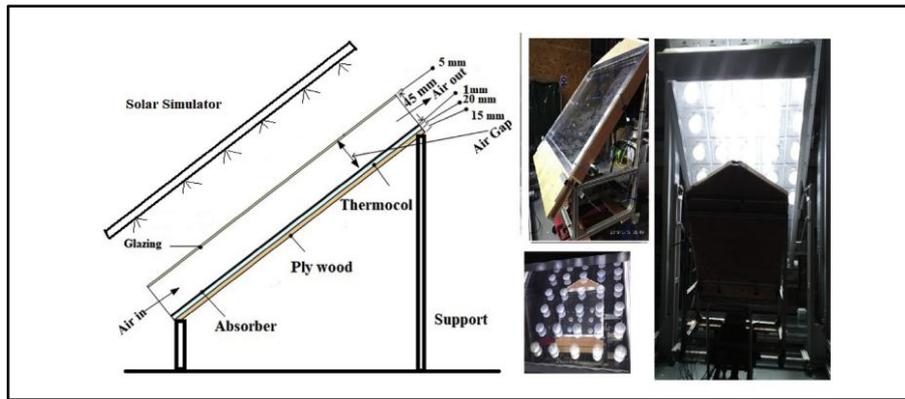
**Figure II.16** : Prototype de capteur solaire à chicane conique[42].

Afin d'améliorer l'échange thermique, plusieurs configurations de capteurs ont été étudiées par **E. K Akpınar et al.** [43]. Cet article concerne une étude expérimentale dans un capteur solaire plate (type **d**) avec plusieurs types d'obstacles (type **a,b,c**) qui entraîne la fabrication de quatre types de capteur solaire (**figure II.17**). Une comparaison était effectuée entre ces configurations pour le choix du modèle le plus approprié. Deux valeurs de débit massique sont utilisées pour chaque type de capteur. A travers les tests d'expériences, les auteurs ont trouvé les rendements maximum suivants : pour type a, type b, type c, et type d : 88 %, 92 %, 66 % et 61 % et 94 au débit massique de 0,0074 kg/s et 97 %, 58 % et 51 % au débit et 0,0052 kg/s respectivement. Les résultats montrent que le rendement le plus élevé a été obtenu est 97 % pour le type **b** et le plus faible rendement pour capteur simple de type **d**. En plus, les résultats indiquent que l'introduction des obstacles sur la plaque d'absorbeur était un facteur important pour améliorer les performances thermiques.



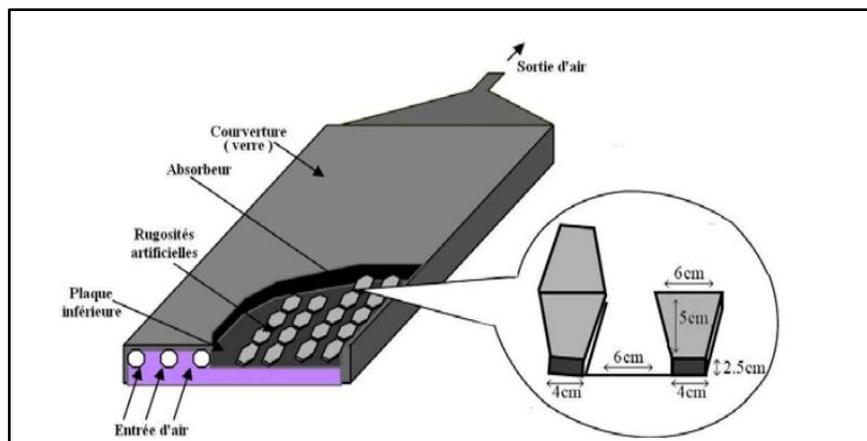
**Figure II.17** : Capteur solaire avec plusieurs types d'obstacles[43].

**Biplas et al.** [44] ont réalisé une étude comparative expérimentale sur l'amélioration de transfert thermique dans un capteur solaire. Les performances thermiques de ce capteur à revêtu sablée sont comparées à celle d'un capteur plan normal. L'expérience fonctionne à l'aide d'un simulateur solaire pour des niveaux de rayonnement de 400, 600 et 800 W/m<sup>2</sup> dans un laboratoire contrôlé. L'étude vise à améliorer la performance d'une plaque plane en modifiant la surface de l'absorbeur pour 0,01 kg/s, 0,015 kg/s et 0,02 kg/s. Les résultats ont montré que l'augmentation du débit d'air et l'intégration de revêtus de sable augmentent le rendement thermique du capteur. En comparaison de l'efficacité thermique, on obtient de 34% pour le capteur simple et 41% au capteur à revêtu de sable au débit de 0,02 kg/s et flux de 800 W/m<sup>2</sup>.



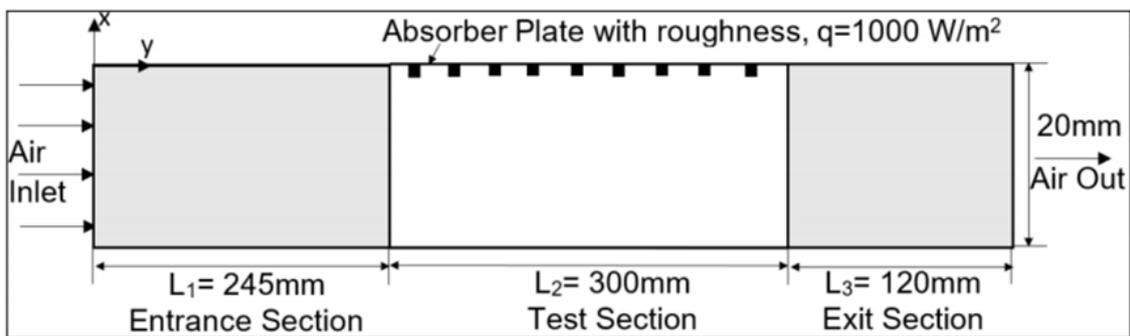
**Figure II.18 :** Vue schématique de collecteur utilisé par Biplas [44].

Selon le travail d'**A. Labed et al. [45]**, L'effet de rugosité artificielle a été étudié dans un capteur solaire plan à air expérimentalement et théoriquement. Dans ce travail, la rugosité artificielle est un corps métallique de forme trapézoïdale fixés sur la plaque absorbante (Figure II. 19) où le fluide passe entre les rugosités artificielles dans la même rangée, ce qui permet une bonne distribution du fluide et réduit ainsi les zones mortes. Les résultats issus du modèle théorique sont comparés avec ceux obtenus expérimentalement après une série d'expériences. Les performances calculées pour le cas d'un capteur avec et sans chicanes pour différents débits  $10 \text{ m}^3/\text{h}$  et  $90 \text{ m}^3/\text{h}$ . Les auteurs ont conclu que l'amélioration du rendement est meilleure lorsque le débit est plus élevé, ils ont remarqué que le rendement de capteur à rugosité est nettement plus important que celui d'un capteur avec absorbeur simple dont le rendement est 55% et 65% respectivement au débit de  $65 \text{ m}^3/\text{h}$ . Leurs résultats indiquent que les rugosités artificielles permettent d'améliorer les performances thermiques du capteur à hauteur de  $20^\circ\text{C}$ .

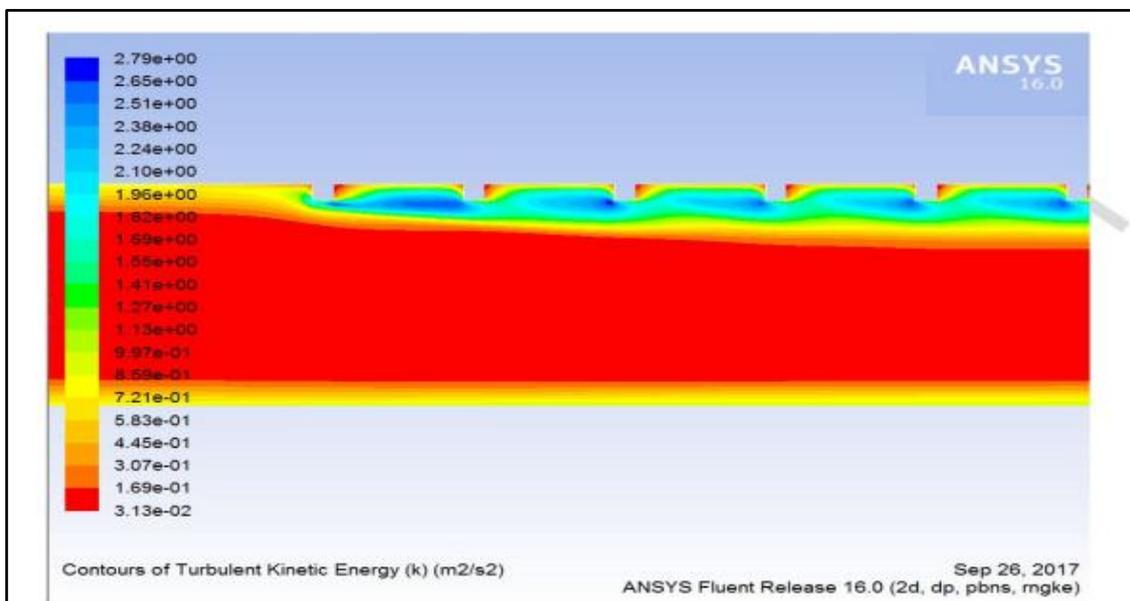


**Figure II.19 :** Schéma de capteur solaire muni d'une rugosité artificielle [45].

Une étude numérique a été réalisée par **Abhay et al. [46]** visant à étudier la répartition de la température sur une surface d'un absorbeur à rugosité artificielle dans un capteur solaire à air. Des simulations numériques 2D sont introduites par des données expérimentales pour un écoulement à air de nombre de Reynolds ( $Re$ ) de 3800 à 18 000. Le nombre de  $Re$ , pas relatif de rugosité ( $P/e$ ), hauteur relative de rugosité ( $e/D$ ) sont des paramètres de performance choisis comme variables de conception. Les résultats de la simulation sont comparés au conduit lisse, ils prouvent que le conduit à surface rugueuse améliore la chaleur et le coefficient de frottement ( $f_r$ ) qui atteint 3,54. Le capteur solaire à air avec la rugosité de la nervure de forme carrée avec  $P/e = 7,14$  cm donne un meilleur résultat de nombre de Reynolds est 15000.



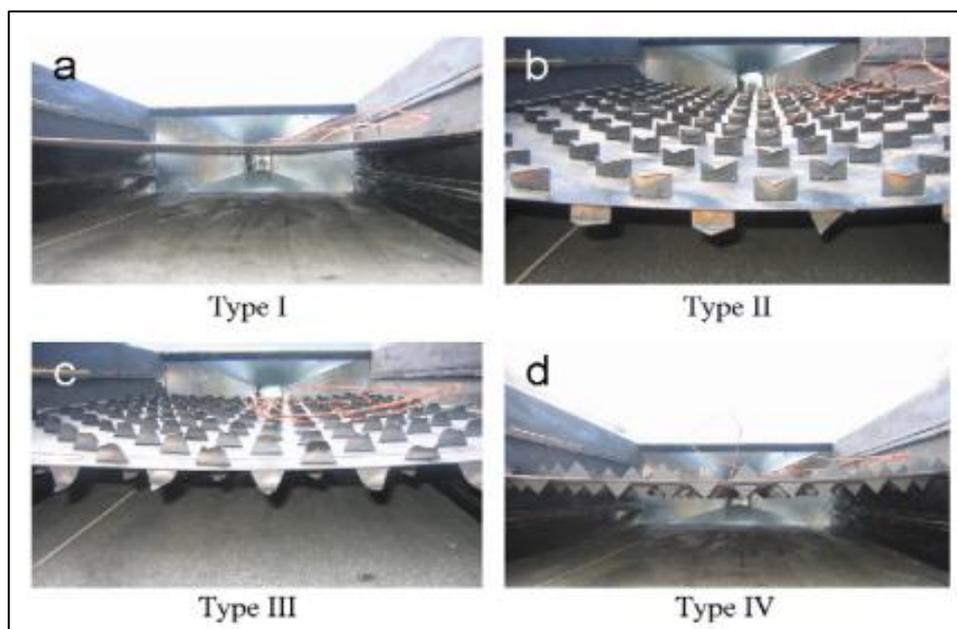
(a)



(b)

**Figure II.20 :** (a) Vue schématique de capteur et (b) répartition des champs de température dans un capteur solaire [46].

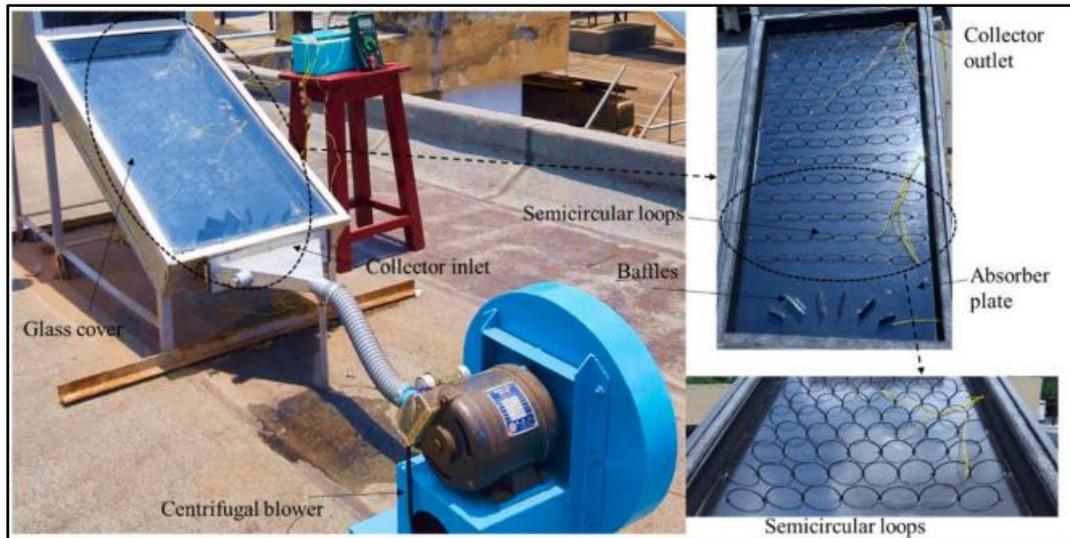
**Hikmet Esen** [47] a étudié un capteur solaire à air à double passage d'écoulement pour développer quatre types de collecteur solaire en considérant plusieurs types d'obstacle.. Les différentes formes étudiées étaient positionnées dans le conduit d'air du capteur comme illustre la **figure II.21**. Les performances thermiques de ces trois types (type II, III, IV) dans cette expérience sont comparées à celle d'un capteur d'absorbeur sans obstacles (type I) ou l'écoulement de l'air se fait à deux passage d'air : un entre l'absorbeur et le vitrage, puis l'autre entre la plaque d'absorption et l'absorbeur. Les résultats expérimentaux ont montré que cette configuration de collecteurs avec des obstacles à double passage donne un meilleur rendement que la plaque d'absorbeur sans obstacles, tandis que le rendement de quatre types est 33.8%, 47.8%, 60.9% et 38.9% respectivement avec un débit d'air de 0.025 kg/s. Il est remarqué que le collecteur de type III avait un rendement supérieur de 27% à celui de collecteur à plaque plate Type I.



**Figure II.21** :La configuration expérimentale des quatre types de capteur solaire[47].

La technique de l'insertion d'ailette en forme de boucles semi-circulaires creuses dans un capteur solaire est l'objectif principal d'étude expérimentale de **Poonam Rani et al.** [48] . La plaque absorbante simple a été modifiée avec l'insertion continue de boucles semi-circulaires de 0,03 m de rayon, construites avec du fil métallique de 0,002 m d'épaisseur. Les expériences ont été basées sur les mesures de l'intensité solaire et la température du capteur à des débits massiques d'air allant de 0,006 à 0,02 kg/s. Les résultats ont indiqué que

l'augmentation de la température de l'air dans le capteur à ailettes variait de 14,08 à 22,78 C° où le débit massique d'air est de 0,02 kg/s. De plus, ce capteur à ailettes a permis d'améliorer considérablement l'efficacité thermique ; il est noté qu'une valeur moyenne de rendement est de 66,05% et pour le capteur solaire à plaque absorbante lisse un rendement de 34,3%.



**Figure II.22 :** Capteur solaire à des boucles semi-circulaires creuses[48].

Le travail numérique de **P.W. Ingle et al.[49]** donne un biais d'étude pour modéliser le comportement hydraulique et thermique d'un écoulement de fluide dans un collecteur solaire. Les auteurs ont exclusivement consacré la simulation au séchage du raisin. Ces conceptions produisent sans doute les meilleures conditions de transfert de chaleur, car la simulation fournit un moyen d'élaborer des stratégies de contrôle et d'analyser les effets des perturbations. Le module CFD (Computational fluid dynamics) a été utilisé pour simuler le capteur solaire par des tests et des calculs en se basant sur des données de débit massique 0,0105 kg/s à 9h de 17 h. Le modèle 3D du collecteur comprenant une plaque absorbante structurée et ondulée où la conception de ce modèle est modélisée par ANSYS Workbench. Pour une température entrée 38,5 C°, les résultats numériques montrent que ce type de collecteur donne une température de sortie de 96,1C°. L'application de CFD dans l'industrie alimentaire aide notamment dans la conception de collecteur solaire à séchage et à utiliser pour bien comprendre les mécanismes physiques complexes qui régissent les propriétés thermiques et physiques de collecteur solaire.

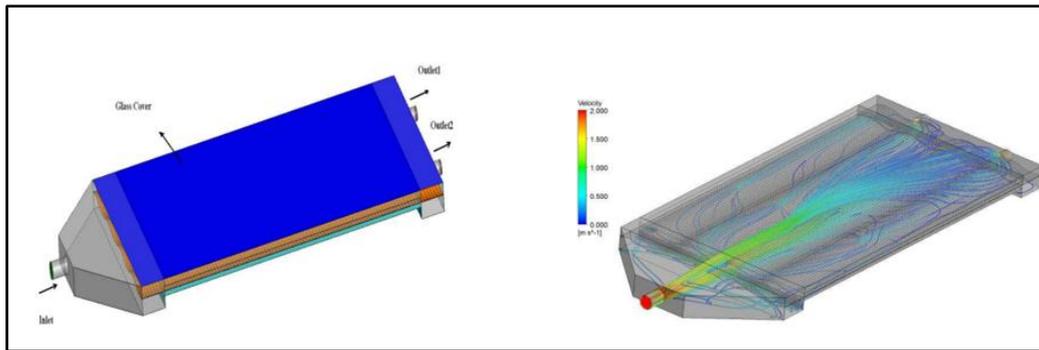


Figure II.23 :Capteur modélisé par ANSYS [49].

#### II.4 Capteur avec matériau de stockage thermique

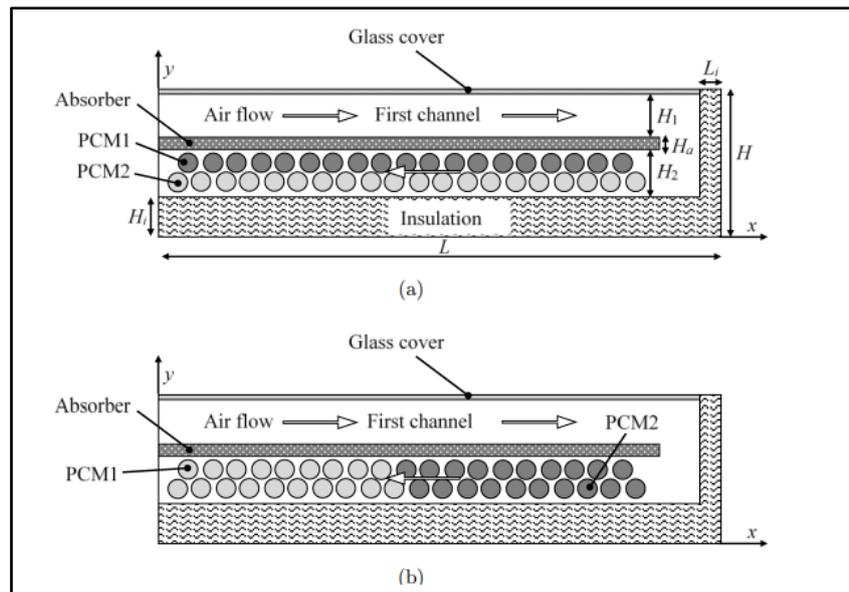
Dans ce type de capteurs, le stockage de l'énergie peut se faire sous forme de chaleur sensible et latente. L'intérêt de stockage d'énergie dans le capteur solaire est important pour assurer un fonctionnement plus continu du sécheur solaire durant les heures non ensoleillées. Pour stocker de l'énergie thermique en chaleur sensible et latente, on utilise les fluides à base d'huile, sel fondu, des pierres, des métaux et les matériaux à changement de phase MCP comme paraffine.

L'effet du matériau de stockage sur le renforcement de rendement de chaleur dans un sécheur solaire a été étudié par **Mohanraj et al.[50]** dans une étude expérimentale du séchage de produit agricole. Les auteurs ont incorporé un dispositif de chauffage supplémentaire dans le collecteur, utilisant un mélange de sable et de déchets d'aluminium. Ce système de stockage thermique solaire permet d'accumuler de la chaleur pendant les périodes ensoleillées et de la libérer pendant les périodes sans soleil, afin de fournir de l'air chaud à la chambre de séchage. Dans cette étude, la chaleur est également utile de prévoir la teneur en humidité qui passe d'une teneur initiale de 72,8 % en humidité à environ de 9,7 %. L'efficacité thermique de ce séchoir solaire a été estimée à environ de 21%.



**Figure II.24 :** Dispositif expérimental d'un séchoir solaire[50].

Un modèle mathématique bidimensionnel 2D a été développé par **Korti [51]** pour analyser un capteur solaire à double passage avec phase des sphères de matériau de changement de phase MCP . Ce modèle de simulation numérique repose sur l'application de principes de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. Pour montrer la présence du PCM, une étude comparative a été traitée entre un collecteur avec différentes sphères PCM, un collecteur sans sphères, et un autre modèle utilisant du gravier pour le stockage thermique. L'étude a conclu que la présence des sphères MCP au fond de l'absorbeur est la meilleure configuration qui permet d'augmenter la température de sortie. De plus, si on combine plusieurs types de PCM dans le capteur solaire, nous pouvons améliorer les performances thermiques.



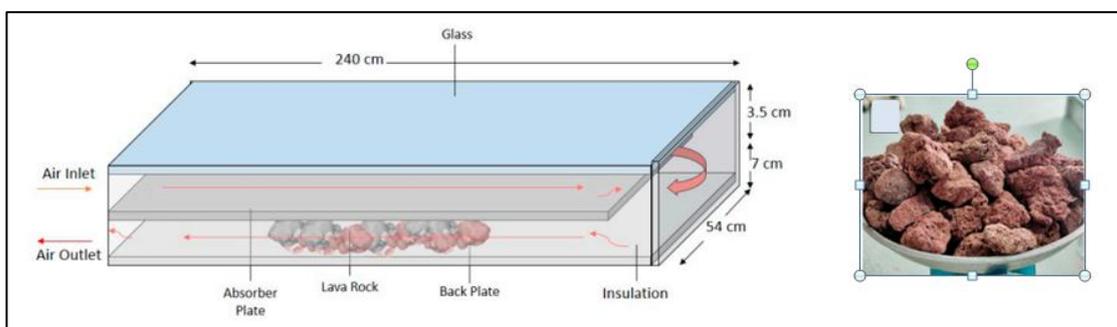
**Figure II.25 :** Schéma de capteur intégré par PCM [51].

**Esakkimuthu et al.** [52] ont développé un séchoir solaire indirect basé sur l'utilisation d'un matériau de changement de phase. Un capteur solaire ondulé à double passe a été utilisé où la plaque d'absorption est en forme de V et l'air s'écoule entre la plaque absorbante ondulée et la surface inférieure éloignée par une hauteur de 15 cm. Les auteurs ont utilisé des capsules sphériques en polyéthylène à haute densité pour remplir le PCM (sel inorganique), ces capsules sont placées à l'intérieur du réservoir de stockage comme le montre la figure II.26. Les résultats indiquent que les matériaux de MCP peuvent contribuer à la réduction des pertes thermiques à l'extérieur.



**Figure II.26 :** Capteur solaire à MCP [52].

L' article de A. **Fahmi et al.**[53] a étudié des capteurs solaires thermiques à air à double passage avec couche poreuse roche volcanique utilisée comme matériau de stockage thermique en court de séchage solaire. De plus, les chercheurs ont élaboré un modèle mathématique fondé sur des équations de bilan énergétique. Ce modèle est résolu numériquement à l'aide de MATLAB afin de traiter divers paramètres tels que l'intensité solaire, les débits massiques d'air variables, la conception du collecteur et le volume des roches volcaniques. Les résultats obtenus ont montré que les efficacités optimales qui ont été obtenues dans la gamme entre les intensités de  $500 \text{ W/m}^2$  et  $800 \text{ W/m}^2$  étaient de 62 % à 64 %, respectivement avec un débit de  $0,035 \text{ kg/s}$ .



**Figure II.27** : Capteurs solaires avec matériau de stockage [53].

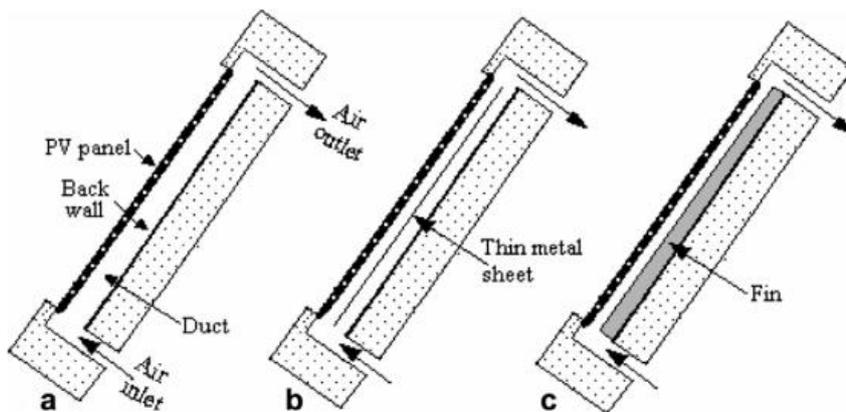
### II.5 Capteur hybride PV/T: intégré par panneau photovoltaïque

**Tiwari et al .**[54] ont analysé et présenté théoriquement une expérience de transfert de chaleur d'un capteur solaire PV/T à air ventilé libre et forcé. Ce capteur solaire est constitué de deux modules panneaux PV dont la surface de chacun est  $0,61 \text{ m}^2$ , connectés en série (**Fig. II.28**). L'objectif de cette étude montre l'utilisation et l'intégration d'un panneau photovoltaïque comme unité d'alimentation électrique qui permet de faire fonctionner le ventilateur en cas de la convection forcée ; par conséquent la consommation d'énergie électrique diminue dans le capteur.



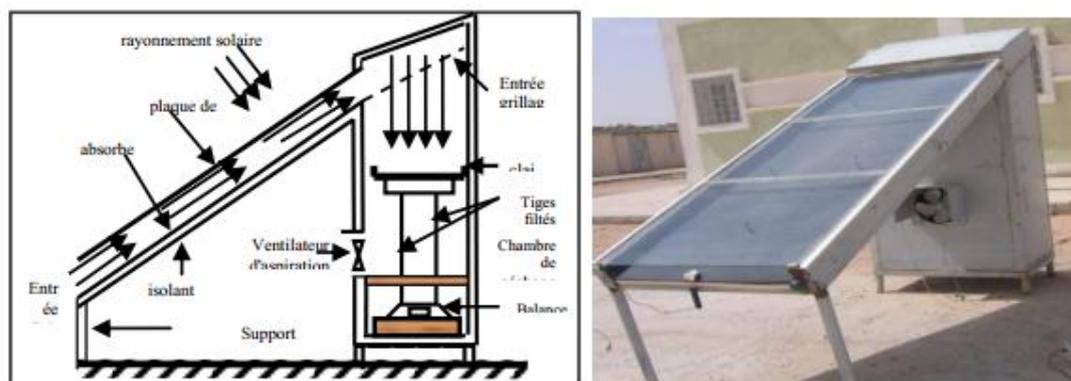
**Figure II.28 :** Banc d'essai de capteur solaire hybride PV/T[54].

L'étude de **J.K Tonui et al. [55]** présente un système de capteur solaire PV/T avec refroidissement à air libre. Un modèle numérique a été validé expérimentalement et développé pour la simulation. Les auteurs proposent d'intégrer un absorbeur à mince feuille métallique et des ailettes dans le canal d'écoulement de l'air pour améliorer l'extraction de la chaleur des modules PV. Trois systèmes de configuration différente ont été utilisés : système conventionnel, système avec une feuille de métal et système avec ailettes. La performance de ces systèmes est comparée avec celle d'un système PV simple. Les résultats numériques attestent d'une amélioration de la production de l'énergie thermique et électrique par rapport à un système classique simple.



**Figure II.29 :** Différentes configurations : (a) système simple (b) système avec une feuille de métal (c) système avec ailettes [55].

Dans ce travail, **S. Chouicha et al. [56]** ont réalisé un séchage solaire sur les pommes de terre coupées en tranches par convection forcée dans un séchoir solaire hybride indirect. Les auteurs utilisent l'énergie électrique des modules photovoltaïques connectés en parallèle. Pour fournir une chaleur secondaire, les résistances électriques internes de capteur sont alimentées par PV ; cette technique utilisée pour augmenter le transfert de chaleur. Les résultats montrent que par une vitesse de l'air 0.51 m/s le séchage de 2,45 devient 1h 15min.



**Figure II.30 :** Schéma et image de capteur solaire utilisé par [56].

## II.6 Conclusion

Au cours de cette recherche bibliographique approfondie, qui synthétise les diverses techniques visant à améliorer les performances thermiques et dynamiques des capteurs solaires à air, nous avons atteint notre premier objectif. Celui-ci se concentre sur l'analyse des performances thermiques sur le rendement des capteurs solaires plans. Cette étude nous permettra d'optimiser au maximum la production d'énergie dans les capteurs solaires, tout en apportant une contribution originale à notre domaine d'expertise.



*Chapitre III*  
Modélisation Numérique Et Formulation  
Mathématique

## Résolution numérique et formulation mathématique

### III.1. Introduction

Le but principal de ce chapitre est de mettre en avant les diverses équations mathématiques ainsi que les approches numériques qui ont été employées afin d'analyser le mouvement de l'air et le transfert de chaleur au sein d'un collecteur solaire d'air.

En utilisant la méthode du volume finis comme base, le processus implique deux étapes essentielles : le maillage et la discrétisation.

La phase de maillage consiste à diviser la région d'intérêt en de petits volumes connus sous le nom de volumes de contrôle et la phase de discrétisation transforme le problème continu en un problème discret, où les équations ainsi que les conditions aux limites sont approximées par des équations et des conditions discrètes.

Dans cette étude particulière, le logiciel Fluent est employé pour résoudre le problème en se basant sur la méthode des volumes finis.

### III.2. Méthode de volume finis MFV

La méthode des volumes finis (MFV) est une approche numérique qui convertit les équations aux dérivées partielles, qui expriment les lois de conservation, en équations discrètes sous forme algébrique appliquées à des volumes finis, également appelés cellules, plutôt qu'à des volumes différentiels. Elle a été initialement mise en œuvre par **McDonald** pour simuler un écoulement bidimensionnel. Le concept fondamental de la méthode des volumes finis réside dans la subdivision du domaine de calcul en un ensemble de volumes élémentaires qui entourent les points du maillage. L'équation différentielle régissant le problème est intégrée sur chaque volume de contrôle, ce qui garantit la préservation des principes de conservation au voisinage des points ou nœuds du maillage discret. Le résultat se traduit par une équation de discrétisation qui renferme les valeurs dans le domaine étudié.

### III.3. Discrétisations des équations

Les équations de conservation ont la possibilité d'être exprimées dans un format uniforme. Cette représentation évite la nécessité de répéter la procédure de discrétisation pour chaque équation individuelle. On peut rendre la discrétisation des équations plus explicite en examinant l'équation de conservation d'une variable scalaire générale  $\phi$ , qui peut être formulée de la manière suivante :

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \phi d\Omega}_T + \underbrace{\int_S \rho \phi v \cdot ndS}_C = \underbrace{\int_S \Gamma \text{grad}\phi \cdot ndS}_D + \underbrace{\int_{\Omega} S_{\phi} d\Omega}_S \quad \text{(III.1)}$$

T : terme transitoire.

C: Terme de convection.

D: Terme de diffusion.

S: Terme source.

L'équation générale pour un écoulement stationnaire en deux dimensions est formulée comme suit :

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho u \phi) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v \phi) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S_{\phi} \quad \text{(III.2)}$$

$\phi$  : une des variables suivantes  $u$ ,  $v$ , et  $T$ .

$\Gamma$  : coefficient de diffusion.

$S_{\phi}$  : terme source relatif à la variable  $\phi$ .

Le tableau qui suit illustre les divers termes de l'équation de transport.

Equations	Variable $\phi$	Coefficient de diffusion $\Gamma$	Terme source $S_{\phi}$
Conservation de masse	1	0	0
Quantité de mouvement selon x	U	$\nu$	$-\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial X}$
Quantité de mouvement selon y	V	$\nu$	$-\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial Y} - \beta(T - T_c)$
Energie	T	$\alpha$	0

**Tableau III.1** : Différents termes de l'équation de transport.

On discrétise l'équation (III.1) en appliquant la méthode des volumes finis pour chaque valeur successive de la variable  $\phi$ . En intégrant cette équation, nous obtenons les équations suivantes en prenant en compte un volume de contrôle :

$$\int \left[ \frac{\partial}{\partial x} (\rho u \phi) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v \phi) \right] dV = \int \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \right] dV + \int S_\phi dV \quad (\text{III.3})$$

$$\int_s^n \int_w^e \left[ \frac{\partial}{\partial x} (\rho u \phi) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v \phi) \right] dx dy = \int_s^n \int_w^e \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \right] dx dy + \int_s^n \int_w^e S_\phi dx dy \quad (\text{III.4})$$

### III.3.1. Discrétisation des termes de l'équation de transport

#### 1-Terme convectif

En intégrant les termes de convection de l'équation (III -4), nous parvenons à :

$$\int_s^n \int_w^e \left[ \frac{\partial}{\partial x} (\rho u \phi) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v \phi) \right] dx dy \quad (\text{III.5})$$

$$\left[ \Delta y \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} (\rho u \phi) dx + \Delta x \int_s^n \frac{\partial}{\partial y} (\rho v \phi) dy \right] = [\Delta y ((\rho u)_e \phi_e - (\rho u)_w \phi_w) - \Delta x ((\rho v)_n \phi_n - (\rho v)_s \phi_s)] \quad (\text{III.6})$$

#### 2-Terme source

En effectuant l'intégration du terme source présent dans l'équation (III -4), le résultat est le suivant :

$$\int_s^n \int_w^e S_\phi dx dy = \bar{S} \Delta x \Delta y \quad (\text{III.7})$$

$\bar{S}$  : est la valeur moyenne du terme source.

En simplifiant les équations algébriques, le terme source est linéarisé pour favoriser la convergence, ce qui se traduit par :

$$\bar{S}_\phi = S_c + S_p \phi_p \quad (\text{III.8})$$

Où

$S_c$  : correspond à la composante invariable qui ne dépend pas directement de  $\phi_p$ .

$S_p$  : la pente de  $\phi_p$ .

### 3-Terme diffusion

En effectuant l'intégration des termes de diffusion présents dans l'équation (III -4), le résultat est le suivant :

$$\begin{aligned} \int_s^n \int_w^e \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \right] dx dy &= \int_s^n \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dx dy + \int_s^n \int_w^e \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) dx dy \\ &= \Delta y \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dx + \Delta x \int_s^n \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) dy = \Delta y \left[ \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e - \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w \right] + \\ &\quad \Delta x \left[ \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_n - \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_s \right] \end{aligned} \quad \text{(III.9)}$$

#### III.3.2. Choix des schémas de discrétisation

Le logiciel Fluent enregistre par défaut les valeurs discrètes de la pression, de la vitesse et de la température. Cependant, étant donné que le calcul de ces grandeurs est requis sur les faces pour exprimer les termes de convection et de pression, Il est nécessaire d'estimer ces valeurs en se basant sur les données situées au centre des cellules. Cela est réalisé en utilisant divers schémas disponibles dans Fluent, tels que le schéma Upwind, le schéma Quick, et d'autres.

<b>Pression</b>	<b>standard</b>
<b>Quantité de mouvement</b>	Quick - Second ordre Upwind
<b>Energie cinétique turbulente</b>	Quick - Second ordre Upwind
<b>Taux de dissipation</b>	Quick - Second ordre Upwind
<b>Energie</b>	Quick - Second ordre Upwind
<b>Couplage vitesse-pression</b>	simple

**Tableau III.2 :** Schémas de discrétisation utilisés.

III.3.3. Schéma de discrétisation UPWIND

Le schéma adopté dans cette étude est le schéma « Upwind ». Dans ce schéma, la valeur de la variable  $\phi$  à l'interface n'est pas extrapolée, mais plutôt calculée en fonction des valeurs de  $\phi$  dans les nœuds adjacents. Le schéma **Upwind** tient compte de la direction de l'écoulement pour calculer les grandeurs convectives.

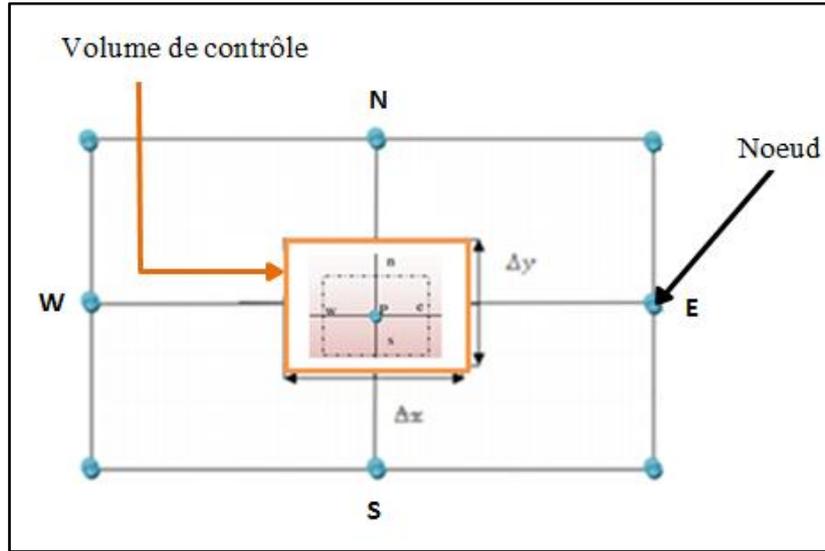


Figure III.1: Volume de contrôle bidimensionnel.

En observant la représentation de la figure III.1, il devient évident que ce schéma attribue de manière directe les valeurs de  $\phi_i$  (où  $i = e, w, s, n$ ) :

$$\begin{cases} \phi_e = \phi_p \text{ Si } F_e > 0 \\ \phi_e = \phi_E \text{ Si } F_e < 0 \end{cases} \tag{III.10}$$

Le schéma Upwind s'écrit donc :

$$\begin{aligned} F_e \phi_e &= \phi_p \|F_{e,0}\| - \phi_E \| -F_{e,0} \| \\ F_w \phi_w &= \phi_w \|F_{w,0}\| - \phi_p \| -F_{w,0} \| \\ F_n \phi_n &= \phi_p \|F_{n,0}\| - \phi_N \| -F_{n,0} \| \\ F_s \phi_s &= \phi_s \|F_{s,0}\| - \phi_p \| -F_{s,0} \| \end{aligned} \tag{III.11}$$

Cette exigence peut être formulée à l'aide de l'opérateur :

$$//A, B// = \max(A, B)$$

L'équation de discrétisation se transforme en :

$$a_p \phi_p = a_E \phi_E + a_w \phi_w + a_N \phi_N + a_s \phi_s + b \quad (\text{III.12})$$

Où

$$a_p = a_E + a_w + a_N + a_s - S_p \Delta x \Delta y ;$$

$$b = S_c \Delta x \Delta y$$

Avec

$$\begin{aligned} a_E &= D_e + \|-F_e, 0\| \\ a_w &= D_w + \|F_w, 0\| \\ a_N &= D_n + \|-F_n, 0\| \\ a_s &= D_s + \|F_s, 0\| \end{aligned} \quad (\text{III.13})$$

### III.3.4. Schéma amont du second ordre (SOUS)

Dans cette situation, la valeur de  $\phi$  sur l'interface est obtenue en réalisant une interpolation linéaire entre les deux voisins en amont de la face (dans le sens de la vitesse). Cette procédure est illustrée dans la figure III.1. La valeur de la propriété  $\phi$  est exprimée par la formule suivante :

$$\begin{cases} \phi_e = \frac{3}{2} \phi_p - \frac{3}{2} \phi_w \text{ et } \phi_w = \frac{3}{2} \phi_w - \frac{3}{2} \phi_{ww} \\ \phi_n = \frac{3}{2} \phi_p - \frac{3}{2} \phi_s \text{ et } \phi_s = \frac{3}{2} \phi_s - \frac{3}{2} \phi_{ss} \end{cases} \text{ si } (F_e > 0, F_w > 0, F_n > 0, F_s > 0) \quad (\text{III.14})$$

$$\begin{cases} \phi_e = \frac{3}{2} \phi_E - \frac{3}{2} \phi_{EE} \text{ et } \phi_w = \frac{3}{2} \phi_p - \frac{3}{2} \phi_E \\ \phi_n = \frac{3}{2} \phi_N - \frac{3}{2} \phi_{NN} \text{ et } \phi_s = \frac{3}{2} \phi_p - \frac{3}{2} \phi_N \end{cases} \text{ si } (F_e < 0, F_w < 0, F_n < 0, F_s < 0) \quad (\text{III.15})$$

Dans ce schéma un point de plus apparaît dans la discrétisation ( $\phi_{EE}, \phi_{WW}$  et  $\phi_{NN}, \phi_{SS}$ ). On écrira donc la relation entre  $\phi_p$  et ses voisins sous la forme :

Si  $(F_e > 0, F_w > 0)$  et  $(F_n > 0, F_s > 0)$  :

$$a_p \phi_p = a_E \phi_E + a_w \phi_w + a_N \phi_N + a_s \phi_s + a_{WW} \phi_{WW} + a_{SS} \phi_{SS} + b$$

Avec  $b = S_c \Delta x \Delta y$

$$\begin{cases} a_E = D_e; a_w = D_w + \frac{3}{2} F_w + \frac{3}{2} F_e \\ a_N = D_n; a_s = D_s + \frac{3}{2} F_s + \frac{3}{2} F_n \end{cases} \text{ et}$$

$$\begin{cases} a_p = a_E + a_w + a_N + a_s + a_{WW} + a_{SS} - S_p \Delta x \Delta y \\ a_{ww} = -\frac{3}{2} F_w; a_{ss} = -\frac{3}{2} F_s \end{cases} \quad (\text{III.16})$$

1) Si ( $F_e < 0, F_w < 0$ ) et ( $F_n < 0, F_s < 0$ )

$$a_p \phi_p = a_E \phi_E + a_w \phi_w + a_N \phi_N + a_s \phi_s + a_{EE} \phi_{EE} + a_{NN} \phi_{NN} + b$$

Avec :  $b = S_c \Delta x \Delta y$

$$\begin{cases} a_E = D_e - \frac{3}{2} F_e - \frac{3}{2} F_w; a_w = D_w \\ a_N = D_n - \frac{3}{2} F_n - \frac{3}{2} F_s; a_s = D_s \end{cases} \text{ et } \begin{cases} a_p = a_E + a_w + a_N + a_s + a_{EE} + a_{NN} - S_p \Delta x \Delta y \\ a_{EE} = \frac{3}{2} F_e; a_{NN} = \frac{3}{2} F_n \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

### III.3.5. Choix de la méthode de couplage Pression-Vitesse

La liaison entre la vitesse et la pression est gérée en résolvant les équations de conservation de la quantité de mouvement ainsi qu'une équation pour la pression dérivée d'une combinaison de l'équation de continuité et des équations de conservation de la quantité de mouvement. Dans le logiciel "Fluent", on retrouve trois algorithmes de couplage (SIMPLE, SIMPLEC, PISO).

- La méthode semi-implicite pour les équations liées à la pression, connue sous le nom "SIMPLE" (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations), est un schéma robuste souvent choisi par défaut. Il repose sur une approche de correction itérative et d'estimation.
- "SIMPLE-Consistent" ou "SIMPLEC" : Cette méthode favorise une convergence plus rapide pour les cas simples.
- "Pressure-Implicit with Splitting of Operators" ou "PISO" : Cette méthode est particulièrement utile pour traiter des écoulements instationnaires ou des maillages comprenant des cellules présentant une obliquité supérieure à la normale.
- Méthode des étapes fractionnaires "FSM" : Conçue pour les écoulements instationnaires, cette méthode est employée conjointement avec le schéma NITA et partage des similitudes avec les caractéristiques du schéma PISO.

**III.3.6.Algorithme SIMPLE**

La discrétisation de l'équation de transport dans le volume de contrôle en utilisant la méthode des volumes finis nécessite les valeurs de vitesses aux interfaces des volumes. Ainsi, il devient intéressant de calculer ces vitesses directement sur les interfaces, évitant ainsi toute interpolation. Parallèlement, en discrétisant l'équation de continuité et le gradient de pression à l'aide d'une interpolation linéaire, des erreurs significatives peuvent surgir, car la distribution de pression ou de vitesse est traitée comme un champ uniforme. Pour surmonter ces obstacles, l'approche privilégiée consiste à employer des grilles décalées. Deux grilles décalées sont mises en œuvre, l'une décalée vers la droite et l'autre vers le haut, pour le calcul respectif des vitesses horizontales et verticales. La discrétisation des équations de conservation de la quantité de mouvement sur ces deux grilles conduit aux expressions suivantes :

$$\begin{cases} a_e u_e = a_{ee} u_{ee} + a_w u_w + a_{ne} u_{ne} + a_{se} u_{se} + b_u + (P_p - P_E) S_e \\ a_n u_n = a_{nn} v_{nn} + a_s v_s + a_{ne} v_{ne} + a_{nw} v_{vw} + b_v + (P_p - P_N) S_n \end{cases} \quad \text{(III.18)}$$

Avec:

$S_e$  : les surfaces de sorte que  $(P_p - P_N)$  ;  $S_n$  : représente la force de pression sur le volume de contrôle de la vitesse  $u$  et  $(b_u, b_v)$  contient tous les termes source de l' équation.

Ceci s'écrit aussi sous la forme condensée classique :

$$\begin{cases} a_e u_e = \sum a_{voisins} u_{voisins} + (P_p - P_E) S_e + b_u \\ a_n v_n = \sum a_{voisins} v_{voisins} + (P_p - P_N) S_n + b_v \end{cases} \quad \text{(III.19)}$$

Le principe de l'algorithme SIMPLE consiste à partir d'un champ de pression estimé  $P^*$  au départ ou à l'itération précédente et d'en déduire un champ de vitesse  $u^*$  et  $v^*$  à l'aide les relations précèdent ; on a donc :

$$\begin{cases} a_e u_e^* = \sum a_{voisins} u_{voisins}^* + (P_p^* - P_E^*) S_e + b_u \\ a_n v_n^* = \sum a_{voisins} v_{voisins}^* + (P_p^* - P_N^*) S_n + b_v \end{cases} \quad \text{(III.20)}$$

Ensuite, une correction est apportée à la pression par une valeur  $P'$ , ce qui entraîne une rectification des vitesses  $u'$  et  $v'$ . En conséquence, les champs sont formulés comme suit :

$$\begin{cases} P = P^* + P' \\ u = u^* + u' \\ v = v^* + v' \end{cases} \quad \text{(III.21)}$$

Les ajustements des vitesses peuvent être aisément obtenus en soustrayant les systèmes de manière équivalente. Cela conduit à l'expression suivante :

$$\begin{cases} a_e u'_e = \sum a_{voisins} u'_{voisins} + (P'_p - P'_E) S_e \\ a_n v'_n = \sum a_{voisins} v'_{voisins} + (P'_p - P'_N) S_n \end{cases} \quad (\text{III.22})$$

Une approximation est introduite : les termes  $\sum a_{voisin} u'_{voisin}$  et  $\sum a_{voisin} v'_{voisin}$  sont négligés pour simplifier l'équation précédente. Cet oubli de ces termes constitue la principale approximation de l'algorithme SIMPLE. Par conséquent, on aboutit à l'équation suivante :

$$\begin{cases} u'_e = d_e (p'_p - p'_E) \\ v'_n = d_n (p'_p - p'_N) \end{cases} \quad (\text{III.23})$$

$$\text{Où : } d_e = \frac{S_e}{a_e}; d_n = \frac{S_n}{a_n}$$

Des expressions similaires sont bien sur obtenues pour  $u_w$  et  $v_s$ . L'équation décrit les ajustements nécessaires aux vitesses à travers les équations de vitesse, aboutissant ainsi à :

$$\begin{cases} u_e = u_e^* + d_e (P'_p - P'_E) \\ v_n = v_n^* + d_n (P'_p - P'_N) \end{cases} \quad (\text{III.24})$$

L'intégration de l'équation de continuité sur le volume de contrôle donne :

$$(puA)_w - (puA)_e + (pvA)_s - (pvA)_n = 0 \quad (\text{III.25})$$

$$\begin{aligned} \rho S_e \cdot d_e (P'_p - P'_E) - \rho S_w \cdot d_w (P'_w - P'_p) + \rho S_n \cdot d_n (P'_p - P'_N) - \rho S_s \cdot d_s (P'_s - P'_p) \\ = m_w - m_e + m_s - m_n \end{aligned} \quad (\text{III.26})$$

En rassemblant les divers termes de cette équation, on peut finalement la représenter sous sa forme standard :

$$b_P P'_p + b_E P'_E + b_W P'_W + b_N P'_N + b_S P'_S = c \quad (\text{III.27})$$

$$\text{Avec } \begin{cases} b_E = \rho S_e \cdot d_e; b_W = \rho S_w \cdot d_w \text{ et } b_P = (b_E - b_W + b_N - b_S) \\ b_N = \rho S_n \cdot d_n; b_S = \rho S_s \cdot d_s \end{cases}$$

$$c = m_w - m_e + m_s - m_n \quad (\text{III.28})$$

#### III.4. Facteur de sous- relaxation

La sous-relaxation est une technique très utile pour les problèmes non linéaires car elle permet d'éviter la divergence des méthodes itératives utilisées pour la résolution. En utilisant la sous-relaxation, on contrôle le changement du scalaire  $\phi$  à chaque itération. Cette technique consiste à réduire le changement de valeur entre les itérations successives. La nouvelle valeur est calculée en fonction de la valeur précédente et de la différence entre les deux.

$$\Phi = \Phi_{old} + \alpha \Delta \Phi \quad (\text{III.29})$$

Les facteurs de relaxation, qui sont utilisés dans notre étude pour améliorer la convergence, sont répertoriés dans le tableau **III.3**.

Variables	Facteurs de Relaxation
Pression	0,3
Densité	1
Forces de volume	1
Quantité de mouvement	0,7
Energie	1

**Tableau III.3** : Valeurs des facteurs de sous relaxation utilisés.

### III.5.Approche numérique

L'avancement des méthodes numériques de résolution, comme les techniques de différences finies, d'éléments finis et de volumes finis, a permis de développer des codes informatiques capables de traiter des problèmes fondamentaux en mécanique des fluides, notamment les transferts de masse et de chaleur, les écoulements monophasiques et multiphasiques, la turbulence, etc.

Dans cette étude, le calcul sera réalisé en utilisant le logiciel Fluent, qui repose sur la méthode des volumes finis, et sera assisté par l'outil préprocesseur Gambit.

#### III.5.1.Présentation des code de calcul

##### III.5.1.1.solveur Fluent

- Le logiciel commercial **Fluent**, qui se fonde sur la méthode des volumes finis, a été employé afin de modéliser l'écoulement de fluide et le transfert de chaleur dans le conduit analysé CFD (Computational Fluid Dynamics). Ce dernier a évolué d'une simple curiosité mathématique pour devenir un outil indispensable dans pratiquement tous les domaines liés à la dynamique des fluides. Il permet de simuler les écoulements de fluides, qu'ils soient compressibles ou incompressibles, offrant ainsi une analyse détaillée et locale de la mécanique des fluides dans de nombreux équipements. De nos jours, le calcul CFD est largement reconnu comme un domaine qui traite de la résolution numérique des phénomènes de transport couplés à la mécanique des fluides. Il est utilisé de manière étendue dans

l'industrie aéronautique et automobile, offrant une interface sophistiquée qui facilite son utilisation.

### III.5.1.2. Gambit

- Le logiciel **Gambit** (Geometry And Mesh Building Intelligent Toolkit) : un préprocesseur de maillage 2D/3D dans les domaines géométriques des problèmes de dynamique des fluides numériques (CFD). Il permet de générer des maillages structurés ou non structurés dans divers systèmes de coordonnées tels que cartésiennes, polaires, cylindriques ou axisymétriques.

Les étapes concernant le processus de simulation avec les deux logiciels, Gambit et Fluent, peuvent être synthétisées de la manière suivante.

### III.5.1.3. Fonctionnalités de Gambit

- ❖ La première étape concerne la géométrie. Ce menu offre la possibilité de construire des volumes, des surfaces, des lignes et des points. Il permet également la modification de géométries importées.
- ❖ La deuxième étape implique le maillage de la géométrie. Ce menu propose la possibilité de générer des maillages pour les volumes, les surfaces et aussi d'effectuer la discrétisation des lignes.
- ❖ La troisième étape consiste à établir les conditions aux limites et à définir les domaines fluides.
- ❖ Le quatrième élément est un menu d'outils : une fois que la géométrie est conçue et que les conditions aux limites sont établies, il est nécessaire d'exporter le maillage au format **<msh>**. Cela permet à Fluent de le lire et de l'utiliser pour la simulation.
- ❖ Enfin, la dernière étape consiste à exporter le maillage depuis Gambit à solveur Fluent.

### III.5.1.4. Fonctionnalités Solveur Fluent

L'utilisation de Fluent est intuitive, il vous suffit de suivre généralement l'ordre des menus, en commençant de la gauche vers la droite. Les principales étapes de la simulation sont les suivantes :

1. Importation de la géométrie **<msh>** (**File** → **Read** → **Case**)
2. Vérification du maillage importé (**Grid** → **Check**)
3. Lissage du maillage (Smooth and swap the grid)
4. Vérification de l'échelle (**Grid** → **Scale**)
5. Choix du solveur (**Define** → **Models** → **Solver...**)

6. Affichage de la grille (**Display** → **Grid**)
7. Définition des caractéristiques du fluide (**Define** → **Materials**)
8. Préciser les conditions aux limites (**Define** → **Operating** → **conditions**)-(**Define** → **Boundary Conditions**)
9. Choix des critères de convergence (**Solve** → **Monitors** → **Residual...**)
10. Initialisation des calculs (**initialize**)
11. Sauvegarde du fichier <cas> (**File** → **Write** → **Case**)
12. La simulation (**Solve** → **iterate**)
13. Traitement de la solution (**Report** → **Display** → **Contours** → **Display** → **Vectors.....**)

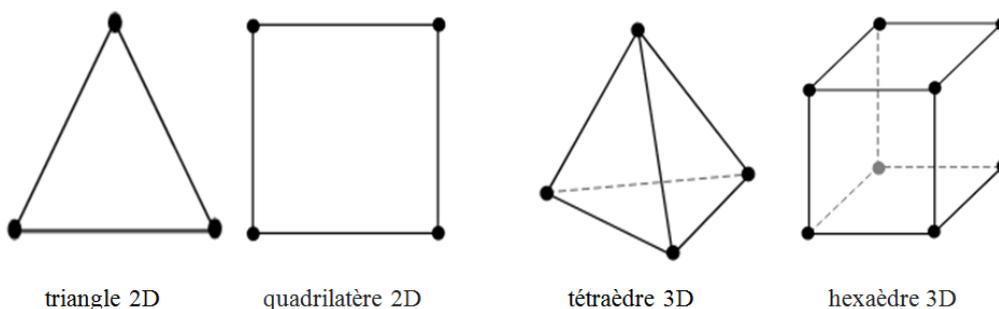
### III.6. Choix de maillage

Dans une simulation par éléments finis ou volume finie, on représente le produit au moyen d'une structure de maillage, qui consiste en un assemblage de nœuds et d'éléments. Le maillage choisi joue un rôle déterminant dans la définition des fonctions fondamentales qui décrivent les champs de déplacement, et par conséquent, il exerce une influence significative sur les résultats obtenus.

#### III.6.1. Géométrie et topologie

De plus, pour obtenir un maillage adéquat de la géométrie de notre étude sur la "veine d'air dynamique", nous avons adopté une approche basée sur la séparation des aspects. Il est primordial de distinguer entre la géométrie, qui détermine la forme du domaine, et la topologie, qui résulte de la partition spatiale du domaine pour la création du maillage. La topologie consiste en une classification des éléments tels que les segments et les faces.

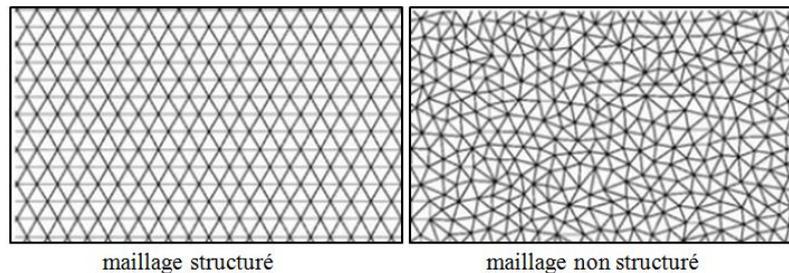
Divers types de maillages existent, caractérisés par le nombre de nœuds associés à chaque élément (comme illustré en Fig. III.2) et le nombre de liaisons pour chaque nœud.



**Figure III.2 :** Quelques types d'éléments de maillage.

Les maillages peuvent être classés en deux catégories distinctes : les maillages structurés et les maillages non structurés.

- **Maillage structuré** : Un maillage structuré est créé en répétant plusieurs fois une maille élémentaire. Dans ce type de maillage, chaque nœud peut être identifié par un doublet ou un triplé de coordonnées.
- **Maillage non structuré** : Dans ce type de maillage, les éléments sont générés de manière arbitraire, sans aucune contrainte concernant leur disposition.



**Figure III.3** : Maillages structurés et non structurés.

### III.6.2. Qualité d'un maillage

Dans la pratique, il n'existe pas de règle rigide pour créer un maillage valable. Cependant, plusieurs approches sont disponibles pour obtenir une grille satisfaisante. Générer un maillage de très bonne qualité est essentiel pour garantir des résultats de calculs précis, robustes et significatifs.

Les bases d'un maillage de qualité reposent sur :

- la pertinence du découpage spatial,
- la régularité des éléments de maillage,
- l'ajustement adéquat aux caractéristiques géométriques,
- la minimisation de la distorsion et de la variation de taille des éléments,
- la conservation du nombre de nœuds raisonnable tout en couvrant le domaine de manière appropriée.

En somme, un maillage de qualité est un élément essentiel pour obtenir des résultats de simulation fiables et informatifs.

Quand le domaine de calcul devient extrêmement complexe, l'utilisation d'un maillage non-structuré se révèle plus pratique. Ce type de maillage peut englober diverses formes d'éléments (hexaèdres, triangles, carrés, prismes, etc.) et ne possède pas de structure

prédéfinie. Contrairement aux maillages structurés, le raffinement du maillage sur une portion du domaine est nettement plus aisé sans affecter le reste du maillage.

La notion de résolution s'applique principalement aux régions exhibant un gradient prononcé. Ainsi, une résolution adéquate permet de mieux décrire les phénomènes physiques présents dans ces zones, tels que les ondes de choc ou les phénomènes associés à la couche limite.

### III.7. Critère de convergence

La convergence est quantifiée par l'intermédiaire de résidus normalisés (définis pour chaque grandeur comme la somme, sur tous les volumes de contrôles, des erreurs sur le bilan de rapportées à la somme des termes de l'équation discrétisée qui concernent le centre des volumes. Ils permettent de suivre la convergence des calculs au fur et à mesure des itérations.) Ce résidu est défini par :

$$R_{\phi} = \frac{\sum |\sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + S_c - a_p \phi_p|}{F_{in\phi}} \quad \text{(III.30)}$$

$R_{\phi}$  : est la somme absolue des résidus correspondant à la variable  $\phi$ .

$F_{in\phi}$  : est le flux total à l'entrée de la variable  $\phi$ .

La convergence des résultats est testée selon deux critères : pour chaque grandeur calculée, les résidus normalisés doivent être inférieurs à et des itérations supplémentaires ne doivent pas modifier les résultats une fois la convergence atteinte.

### III.8. Conclusion

Les principales étapes à suivre lors de la simulation numérique ont été présentées avec les méthodologies du choix des paramètres que nous avons adopté.

Nous avons détaillé la stratégie de la résolution numérique et formulation mathématique. Par la suite, nous avons donné un aperçu de méthodes de discrétisation et les démarches à suivre l'ord de la modélisation numérique par la méthode des volumes finis.

Enfin, la stabilité de la simulation et la qualité des résultats reposent sur plusieurs facteurs qu'on doit choisir soigneusement. Il s'agit maintenant d'approfondir l'analyse dans le prochain chapitre par une étude de test du maillage et une étude comparative sur le capteur solaire à air.

Donc, l'utilisation des méthodes numériques s'avère indispensable pour la résolution des équations du modèle mathématique. Dans cette étude, le logiciel Fluent basé sur la méthode numérique des volumes finis sera utilisé.



***Chapitre IV***  
Résultats et Interprétations :  
Partie Numérique

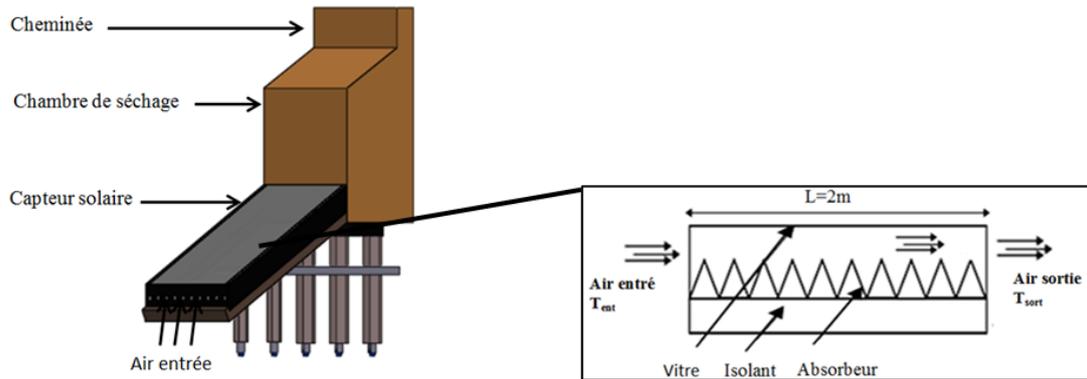
### IV .1.Introduction

Cette première partie de ce chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus numériquement. Des simulations numériques à l'aide d'un code de calcul Fluent basé sur la méthode des volumes finis ont été effectuées afin de déterminer et analyser les champs dynamique et thermique sous l'influence de la variation de géométrie du capteur. Deux géométries du capteur solaire ont été traitées ; la première comporte un rétrécissement de la section de passage à la sortie alors que la deuxième comporte un élargissement à l'entrée du capteur. La comparaison de ces cas avec un capteur solaire uniforme en se basant sur les variations de température et de vitesse de l'écoulement d'air bidimensionnelle dans le collecteur solaire muni d'un absorbeur en forme de zigzag a été également menée.

### IV .2.Configuration géométrique

La représentation graphique de la configuration géométrique du problème étudié est présentée dans **la Figure IV.1**. Les dimensions du canal utilisées dans ce travail ont été dérivées des données expérimentales publiées par **Abhay Lingayat [33]**. Il s'agit d'un composant « capteur solaire à air » qui représente une des parties principales du séchoir solaire indirect, à savoir :

- Un couvercle en verre d'épaisseur  $e = 0.004\text{m}$ .
- Un absorbeur (forme de Zigzag à 42 V) en cuivre peint en noir ayant de conductivité thermique  $\lambda = 387.6\text{ W/m.K}$
- Une boîte rectangulaire pour le collecteur est fabriqué à partir de châssis de fer galvanise d'épaisseur 5mm.
- Une chambre de séchage de dimension (1m\*0.4m\*1m) contient :
  - Quatre plateaux en aluminium empilées à une distance de 0.011m.
  - Une cheminée pour l'air d'échappement à hauteur de 0.25m.

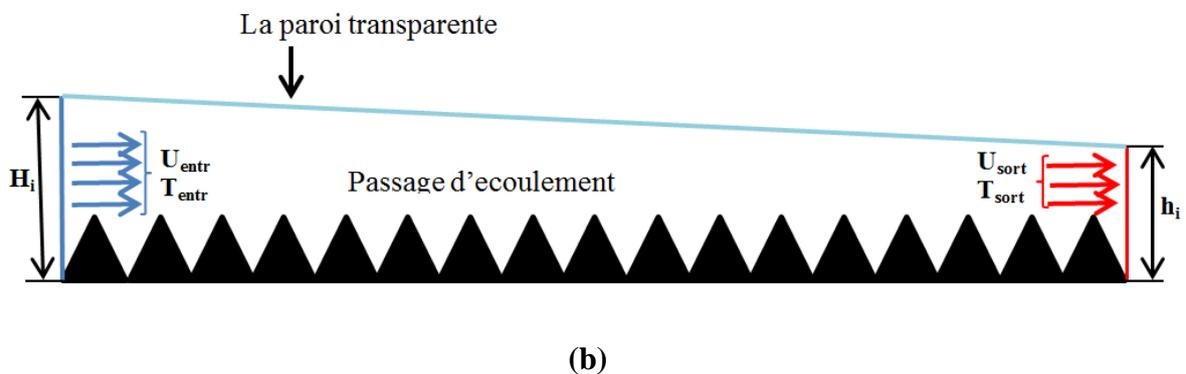
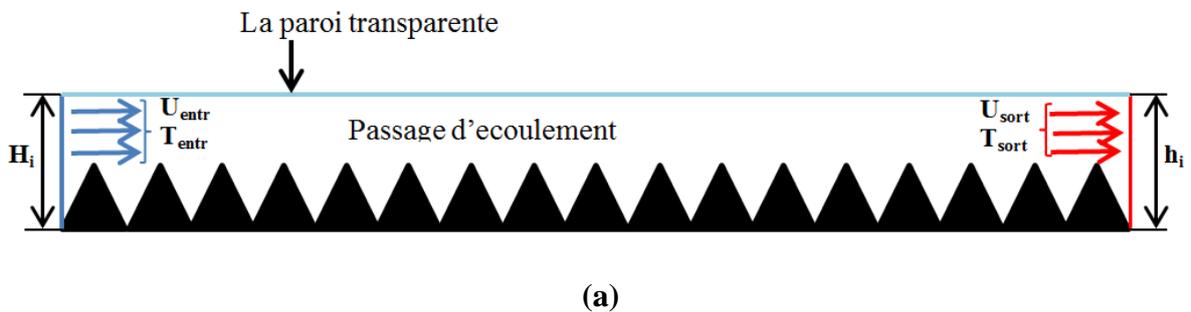


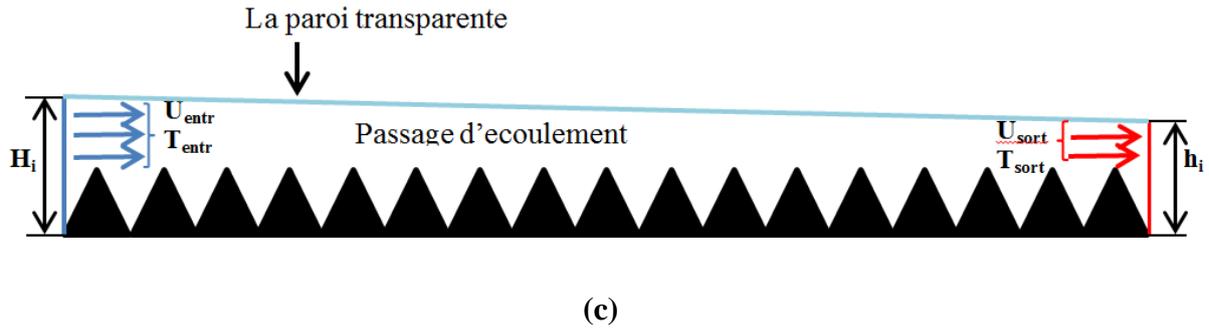
**Figure IV.1** : Représentation schématique du séchoir solaire indirect et capteur solaire à air.

➤ **les modèles étudiés**

Les différents schémas des modèles étudiés montrés sur la **figure IV.2** sont :

- Modèle de l'élargissement de la section de passage à l'entrée du capteur noté **SE**,
- Modèle de section de passage uniforme du capteur noté **SU** et
- Modèle de rétrécissement de la section de passage à la sortie du capteur noté **SR**.





**Figure IV.2** : Géométrie du système étudié (a) : modèle de section uniforme SU, (b) : modèle de l'élargissement à l'entrée SE et (c) : modèle de rétrécissement à la sortie SR.

Les hauteurs entre la vitre et l'absorbeur ont été modifiées à l'entrée ( $H_i$ ,  $i=1$  à 3) et à la sortie ( $h_i$ ,  $i=1$  à 3) du capteur, tel qu'indiqué dans le **tableau IV.1**. Ceci a été fait dans le but d'étudier l'effet de l'élargissement de la section de passage à l'entrée (cas 5, cas 6, cas 7) et du rétrécissement de la section à la sortie (cas 2, cas 3, cas 4), en les comparant avec le cas d'une section uniforme (cas 1).

Modèles	SU	SR			SE		
Cas	Cas 01	Cas 02	Cas 03	Cas 04	Cas 05	Cas 06	Cas 07
$H_i$ [cm]	7.5	7.5	7.5	7.5	8.5	9.5	10.5
$h_i$ [cm]	7.5	6.5	5.5	4.5	7.5	7.5	7.5

**Tableau IV .1** : Dimensions de différents modèles de capteur étudiés.

### IV .3. Formulation mathématique

#### IV .3.1. Hypothèses simplificatrices

Afin de pouvoir résoudre les équations régissant l'écoulement dans cette étude numérique, les hypothèses simplificatrices suivantes sont adoptées :

- ✚ L'écoulement est stationnaire et en régime laminaire.
- ✚ Le fluide est supposé incompressible et newtonien.
- ✚ Les propriétés thermo physiques de fluide et de solide sont considérées constantes.
- ✚ les profils de vitesse et températures à l'entrée du capteur sont supposés constants et uniformes.

- ✚ L'écoulement est supposé bidimensionnel.
- ✚ Le transfert de chaleur par rayonnement est négligeable.

### IV .3.2.Équations gouvernantes

Les équations qui gouvernent le mouvement de l'air dans le cas d'un fluide newtonien ainsi que le transfert de chaleur au sein du collecteur solaire plat se présentent comme suit :

#### ✚ Equation de continuité

Lorsque le mouvement du fluide est régi par la conservation de la masse et qu'il est incompressible, avec une densité constante, l'équation peut être exprimée de la manière suivante :

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{IV.1})$$

Suivant les hypothèses données dans le chapitre suivant, le cas de notre capteur simple à seule passe d'écoulement bidimensionnel, l'équation peut être exprimée sous la forme suivante :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{IV.2})$$

Où : u et v désignent les composantes de la vitesse du fluide dans les directions x et y, respectivement.

#### ✚ Equation de quantité de mouvement

L'équation de quantité de mouvement pour un élément de volume stationnaire et un écoulement incompressible bidimensionnel suivant x et y est donnée par :

Suivant x :

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] \quad (\text{IV.3})$$

Suivant y :

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] \quad (\text{IV.4})$$

#### ✚ Equation d'énergie

L'équation de conservation de l'énergie à travers la paroi est donnée par:

$$\rho C_p \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] \quad (\text{IV.5})$$

#### IV.4. Conditions aux limites

L'incorporation des conditions aux limites dans le système d'équations est nécessaire car une équation aux dérivées partielles n'a pas de solution que si les conditions aux limites pour chaque variable dépendante sont connues.

Les conditions aux limites appliquées dans notre étude sont :

##### 1-À l'entrée du capteur :

- ✚ Toutes les propriétés du fluide sont connues.
- ✚ Une vitesse et une température uniforme ont été appliquées pour tous les modèles

##### 2-à la sortie du capteur :

- ✚ Le régime est établi donc on n'a pas une évolution par rapport à x.
- ✚ La pression atmosphérique a été appliquée pour tous les modèles

##### 3-à la paroi inférieur (isolant)

- ✚ Le champ de vitesses est nul.
- ✚ La condition d'adiabatique est appliquée

##### 4-à la paroi supérieure (vitre)

- ✚ Le champ de vitesses est nul.
- ✚ Le Coefficient d'absorption  $\alpha$  est imposé.

##### 5-à l'obstacle (absorbeur)

- ✚ Le champ de vitesses est nul.
- ✚ Coefficient de transmissivité  $\tau$  est imposé
- ✚ Un flux solaire uniforme est imposé.

#### IV .5.Paramètres caractéristiques

##### a)Nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds, noté **Re**, exprime le rapport entre les forces d'inertie et les forces de viscosité dans le fluide en mouvement étudié. Son équation est la suivante :

$$R_e = \frac{\rho U D}{\mu} \quad (\text{IV.6})$$

##### b) Le coefficient de frottement

L'expression de coefficient de frottement **Cf** est définie comme suit :

$$Cf = \frac{2\tau_w}{\rho.U^2} \quad (\text{IV.7})$$

Où  $\tau_w$  représente le taux de cisaillement à la paroi,  $\rho$  la masse volumique,  $U$  la vitesse axiale moyenne de la section.

### c) Nombre de Prandtl

Le nombre de Prandtl exprime la relation entre la viscosité cinématique et la diffusivité thermique d'un fluide. Sa formulation est la suivante :

$$Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (\text{IV.8})$$

### d) Nombre de Nusselt

Ce paramètre nous fournit une indication de la proportion de chaleur transférée par convection par rapport à celle transférée par conduction.

$$Nu = h \frac{L_c}{\lambda} \quad (\text{IV.9})$$

### e) Le coefficient de perte de charge

Le coefficient perte de charge est calculé par :

$$f = \frac{2\Delta p}{\frac{L}{d_0} \rho u^2} \quad (\text{IV.10})$$

## IV .6. Etude de sensibilité du maillage

Le choix du maillage est très important à cause de sa grande influence sur la précision des résultats et sur le temps de calcul, car l'augmentation de nombre de cellule de calcul tend à augmenter la précision de la solution. En revanche, on ne peut augmenter indéfiniment le nombre de points sans être limité par la capacité de l'ordinateur, donc il s'agit d'un compromis entre la précision et le coût des calculs.

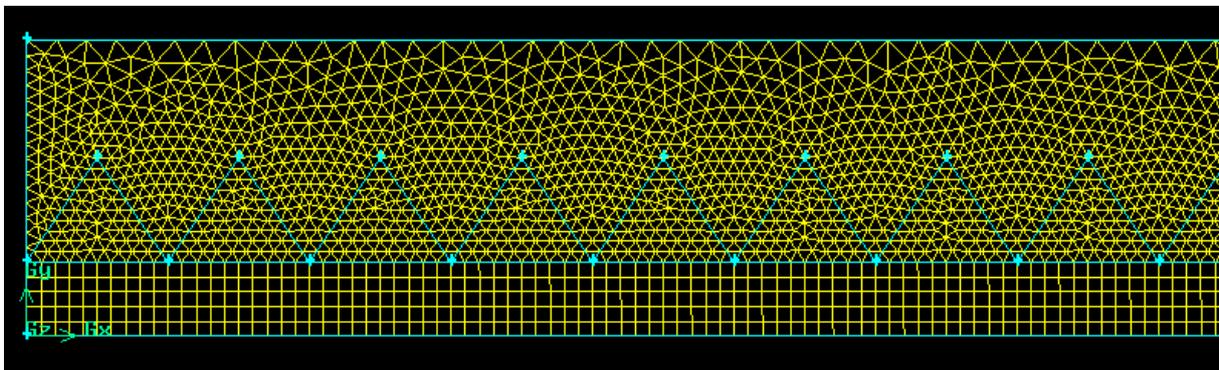


Figure IV .3 : Maillage généré du capteur solaire.

Pour les différentes simulations réalisées, un maillage structuré par bloc variable, comprenant des éléments de volume de type quadrilatère et/ou triangulaire, pour couvrir les domaines de calcul de collecteur solaire. **La figure. IV.3** offre un aperçu de ce maillage utilisé.

Cette grille est fortement concentrée au voisinage de l'absorbeur où la structure du maillage est bien déterminée en fonction des formes géométriques.

L'étude de l'indépendance du maillage est une phase très importante dans une analyse CFD. Pour la satisfaction de ce but on a testé plusieurs essais afin d'assurer de l'indépendance des résultats vis-à-vis du maillage adopté. Pour une vitesse d'entrée égal à 0.08m/s, une série de tests sur les cinq grilles de nombre de cellules 3056,4310, 6966,10984 et 16622 (Tableau **IV .2**) a été effectuée.

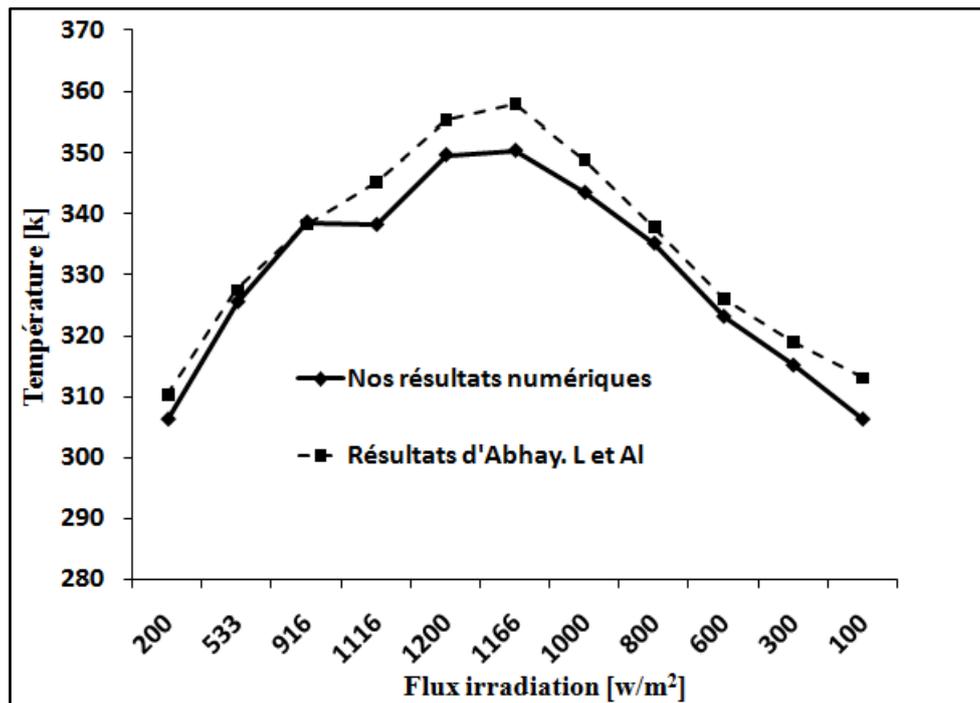
<b>Grilles de maillage</b>	<b>Nœuds</b>	<b>T<sub>sortie</sub></b>	<b>U<sub>sortie</sub></b>
<b>8-40</b>	3056	332.4523	0.07723329
<b>10-60</b>	4310	333.8769	0.08086187
<b>12-100</b>	6966	333.5573	0.08641470
<b>15-200</b>	10984	333.5757	0.08754016
<b>20-250</b>	16622	333.6432	0.09399920

**Tableau IV .2** : Test de sensibilité de maillage.

Il est observé que la grille de maillage comportant 10 984 nœuds offre un équilibre satisfaisant entre la précision et la densité du maillage.

#### **IV .7.Validation du modèle**

Afin d'assurer la validation du modèle utilisé par le code de calcul Fluent, les données expérimentales, obtenues par **Abhay Lingayat et al [33]** sont adoptées. Les paramètres utilisés dans leurs expériences sont également présentés dans la configuration du problème. La comparaison de la variation de la température de l'air à la sortie du collecteur (T<sub>sort</sub>) en fonction du flux solaire obtenue numériquement dans cette thèse et expérimentalement par **Abhay Lingayat et al [33]** a été effectuée et indiqué sur **la Figure IV. 4**.



**Figure IV. 4** : La température à la sortie du collecteur en fonction de flux solaire : comparaison avec résultat d'Abhay Lingayat et al [33].

La figure IV. 4 montre la variation de la température de l'air à la sortie du collecteur ( $T_{\text{sort}}$ ) en fonction du flux solaire concernant le modèle à section de passage uniforme, comportant d'un absorbeur en zigzag (42V) comparées avec les résultats publiés dans le travail d'Abhay Lingayat et al [33]. Le graphique de la figure IV.4 indique que le résultat expérimental s'accorde bien avec le résultat numérique. Par conséquent, on peut dire que le modèle numérique actuel permet de prédire avec précision le comportement de l'écoulement dans le domaine de calcul choisi.

## IV .8.Résultats et interprétations

### IV .8.1. Aspect thermique de l'écoulement

La figure IV .5 présente les champs thermiques de la distribution de la température résultante pour une vitesse d'entrée de  $U_{\text{in}}=0,04$  m/s, en fonction des différentes configurations du capteur solaire.

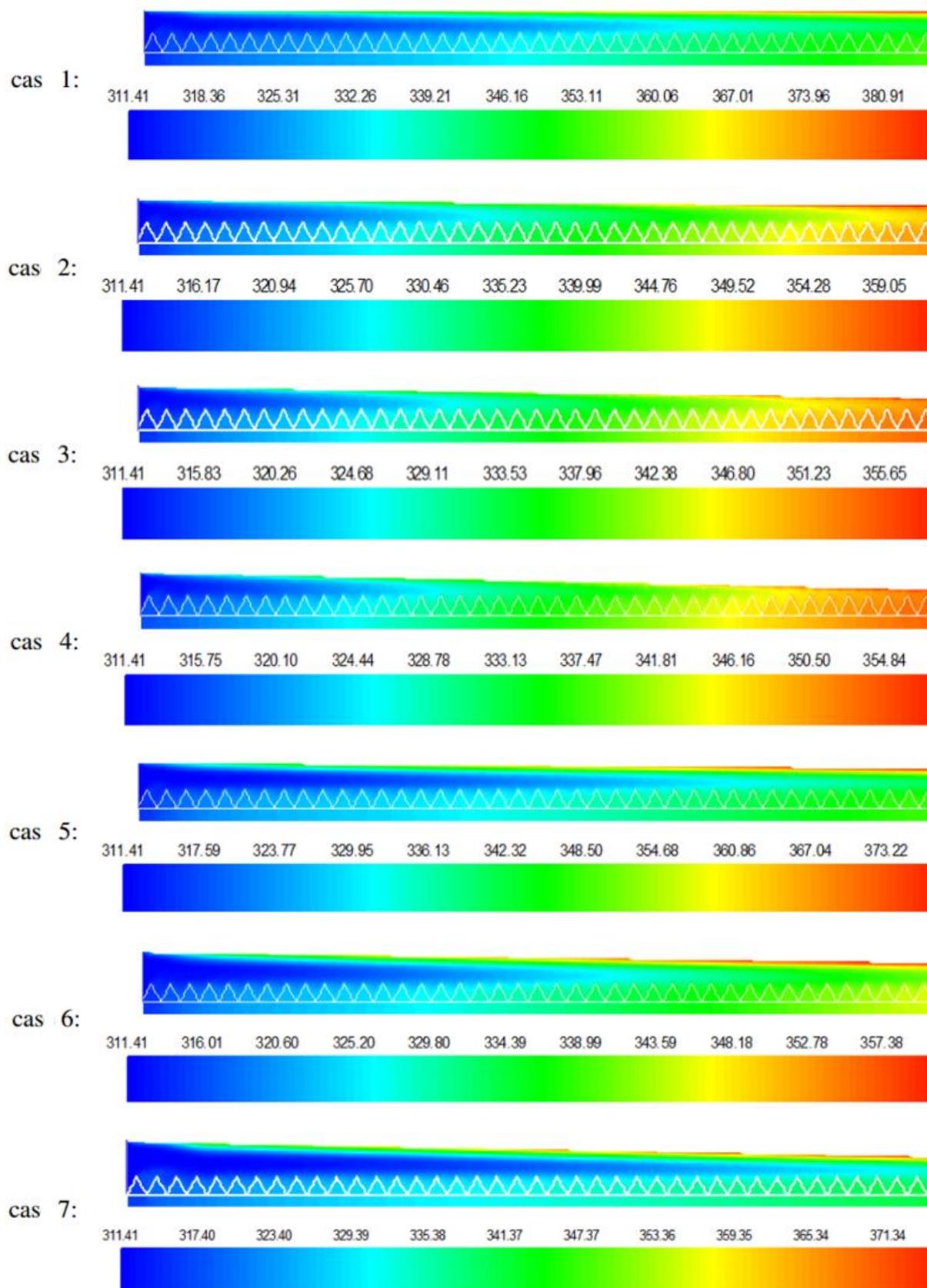


Figure IV.5 : Répartition de champs de température obtenus pour l'ensemble des cas étudiés.

La figure IV .5 illustre la répartition de champ de la température de l'air le long de capteur, pour les différentes configurations étudiées. Les résultats montrent :

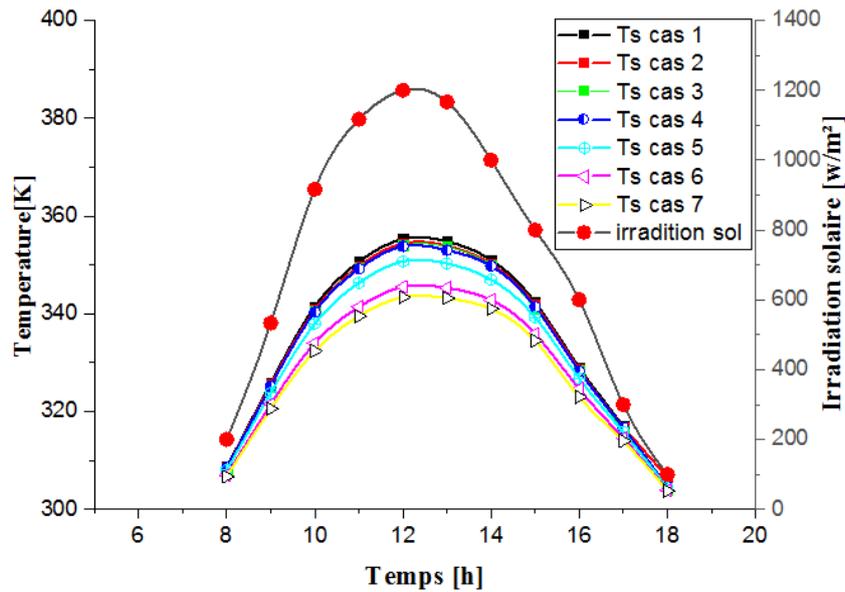
- Le champ thermique de l'écoulement varie d'un cas à un autre, en fonction de la forme du capteur.

- Les champs de température résultent de l'échange thermique convectif de l'écoulement. Il est évident que les zones où la vitesse est faible entraînent généralement des températures élevées, comme cela se produit dans la configuration simple. En revanche, dans les zones où la vitesse est élevée, le niveau de température diminue en s'approchant de la sortie du canal, où la vitesse commence à augmenter, en particulier dans les cas de géométries de rétrécissement à la sortie.

- Les lignes isothermes révèlent que la température à l'intérieur de toutes les configurations du capteur varie longitudinalement le long du flux dynamique du capteur. Les températures les plus basses sont observées à l'entrée et augmentent progressivement à mesure que l'on se rapproche de la sortie.

- L'utilisation d'un absorbeur en forme de zigzag augmente la surface d'échange entre l'air et l'absorbeur et par conséquent améliore le flux de chaleur absorbé. Le flux thermique radiatif reçu par cet absorbeur est transporté par le fluide de manière plus ou moins intense, en fonction de différentes géométries étudiées. Le cas de rétrécissement de la section de passage à la sortie SR (cas 2, 3 et 4) a permis de fournir une surface plus importante avec un flux puissant par rapport au cas de l'élargissement de la section à l'entrée SE (cas 5, 6 et 7) et au cas simple (cas 1).

Il est à noter aussi que l'intensification du transfert de chaleur est proportionnelle avec l'augmentation du taux de rétrécissement ou de l'élargissement de la section de passage de fluide.

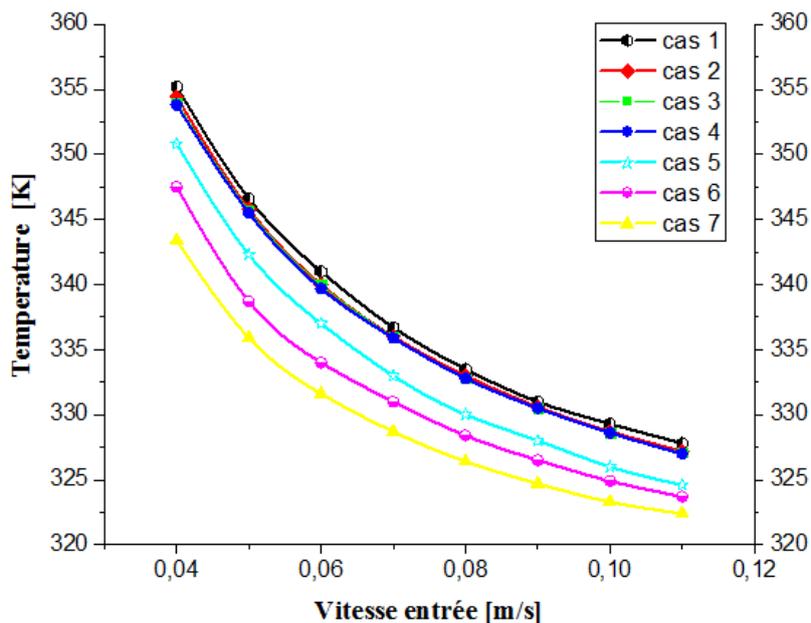


**Figure IV.6.** : La variation de la température journalière en fonction du flux solaire.

Pour bien examiner l'aspect thermique de chaque cas étudié, il est important de comprendre comment le rayonnement solaire influence sur l'amélioration thermique de l'ensemble de configurations étudiée. La variation du rayonnement solaire pendant la journée, de 8h à 18h (**Fig. IV.6**), a une incidence sur la répartition de la température dans chaque cas étudié.

La température de l'air diminue à environ 308 K en moyenne pour tous les cas lorsque l'irradiation atteint 100 W/m<sup>2</sup> à 18 heures. Lorsque nous comparons les différents modèles de notre capteur, nous constatons que la température maximale varie dans l'intervalle 344 K et 355 K à midi, avec une irradiation solaire de 1200 W/m<sup>2</sup>. De plus, nous observons que la température maximale atteint 356 K pour les modèles SU et SR à 1200 W/m<sup>2</sup>, tandis que le modèle SE (cas 6) présente une température minimale de 345 K.

Il est donc clair que le meilleur choix de la géométrie du collecteur solaire et l'augmentation du flux solaire permettent d'améliorer de manière significative les conditions thermiques de notre système.

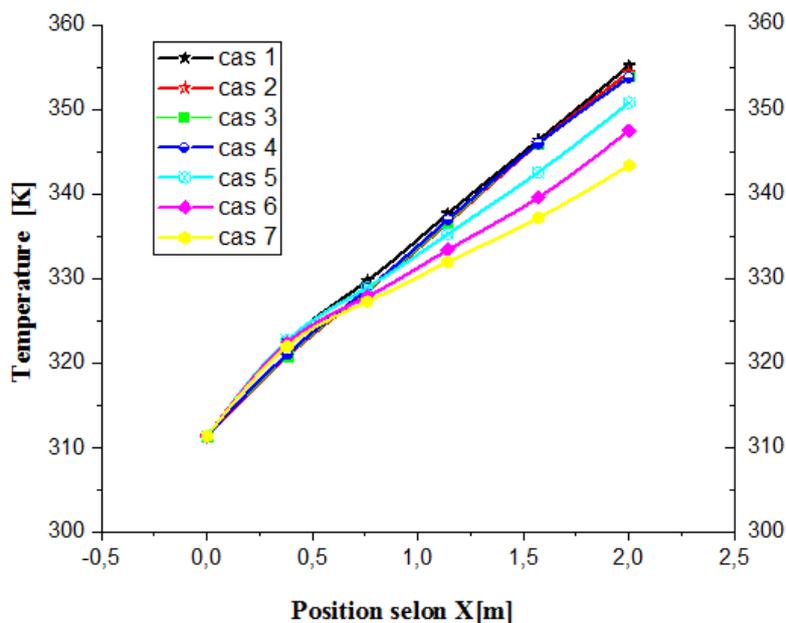


**Figure IV. 7 :** Evolution de la température à la sortie du capteur en fonction de la vitesse d'entrée pour tous les cas à étudié.

La figure IV.7 montre l'évolution de température à la sortie du capteur dans l'intervalle de la vitesse d'entrée 0,04m/s à 0,11m/s et pour les cas de rétrécissement et d'élargissement comparé avec le cas simple.

Dans les sept cas étudiés, la température à la sortie du capteur augmente jusqu'à atteindre son maximum à une vitesse de 0,04 m/s, puis diminue jusqu'à la vitesse maximale de 0,11 m/s. Il convient de noter que le cas simple (SU) et le cas de rétrécissement présentent des valeurs plus élevées que le cas d'élargissement. La courbe indique que les températures du fluide caloporteur atteignent 355,3 K et 354,3°C dans les configurations de type SU (cas 1) et de type SR (cas 2), respectivement, tandis que dans la configuration de type SE (cas 5), la température à la sortie du fluide est de 350 K.

En plus, le rapport de section entrée-sortie ( $H/h$ ) augmente plus, la température à la sortie devient moins importante.



**Figure IV.8 :** Evolution de la température le long de la section d'écoulement pour les différents cas.

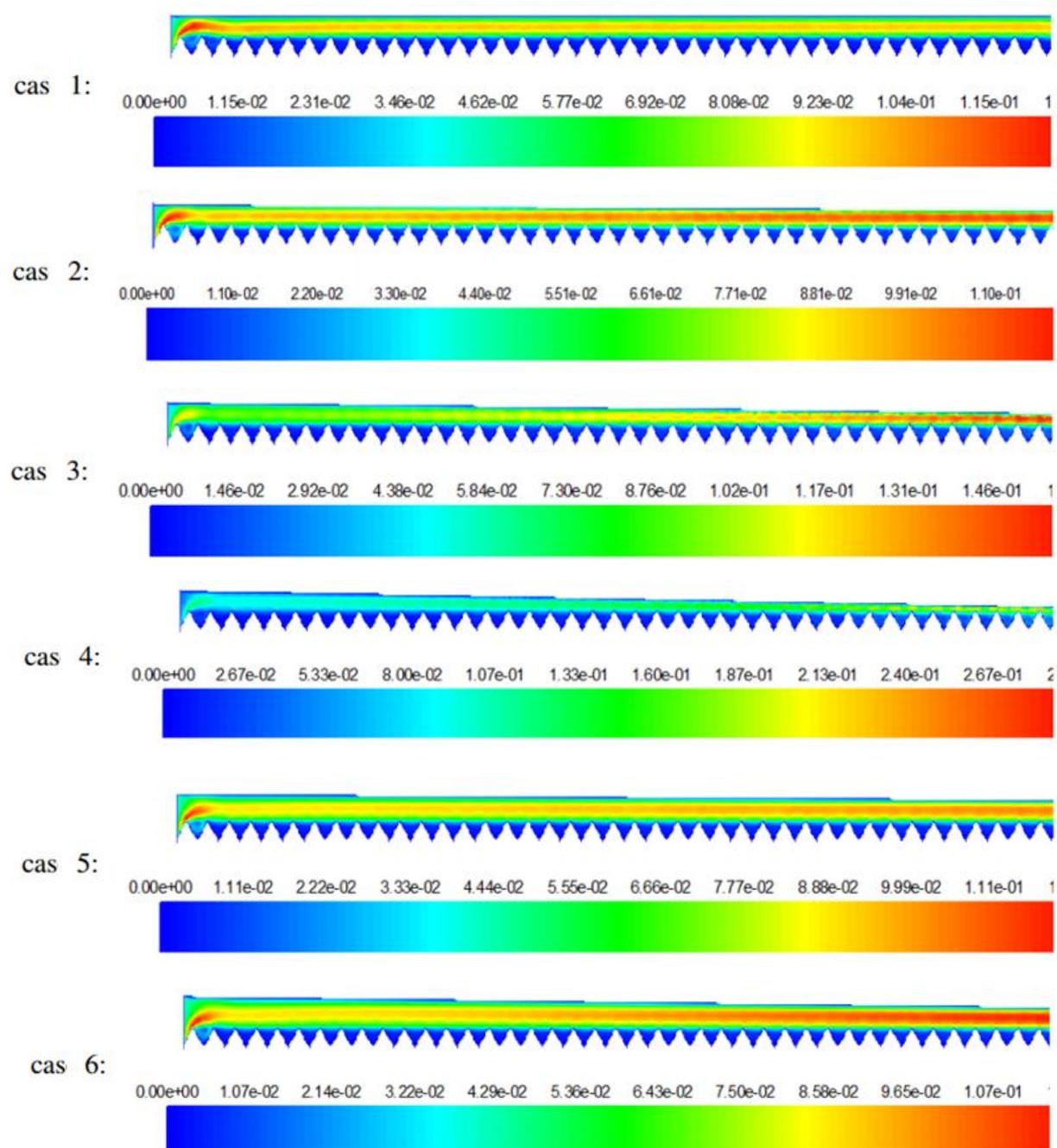
Pour une meilleure évaluation de performances thermique, une compréhension du comportement d'écoulement thermique à l'intérieur de capteur a différent point est essentielle. **La figure IV.8** présente la variation de la température moyenne calculée à des sections transversales localisées à :  $x=0\text{m}$ ,  $x=0,381\text{m}$ ,  $x=0,761\text{m}$ ,  $x=1,142\text{m}$ ,  $x=1,571\text{m}$  et à  $x=2,0\text{m}$  pour tous les cas étudiés et pour une vitesse choisie ( $U_{in}=0,04\text{m/s}$ ).

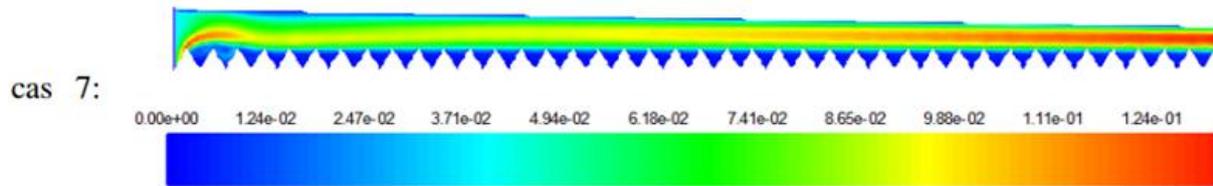
À la section  $x=1,142\text{m}$ , on remarque que les profils de température sont assez similaires pour tous les cas étudiés. La différence de température commence à varier à la section  $x=1,571\text{m}$ , atteignant environ 10 degrés Celsius de différence entre le cas 1 et le cas 07.

À la section  $x=2\text{m}$ , la température la plus élevée est observée parmi les cas étudiés. Cette valeur de température peut s'expliquer par la variation de la géométrie de passage de l'écoulement. Le cas avec une simple contraction et le cas avec un rétrécissement fournissent une température plus élevée par rapport au cas avec un élargissement, avec une différence de température maximale de 2 degrés Celsius entre le cas 04 et le cas 01.

## IV .8.2.Aspect dynamique de l'écoulement

Dans cette partie de l'étude, nous avons examiné et abordé le comportement dynamique de flux d'air afin d'améliorer les performances du capteur solaire. Les profils de vitesse et les lignes de courant à l'intérieur du capteur solaire sont également analysés grâce à ces simulations numériques. **La figure IV.9** présente la distribution des champs de vitesse obtenus.





**Figure IV.9** : Répartition de champs de vitesse obtenus pour les différentes formes à une vitesse d'entrée  $U_{in}= 0.04\text{m/s}$ .

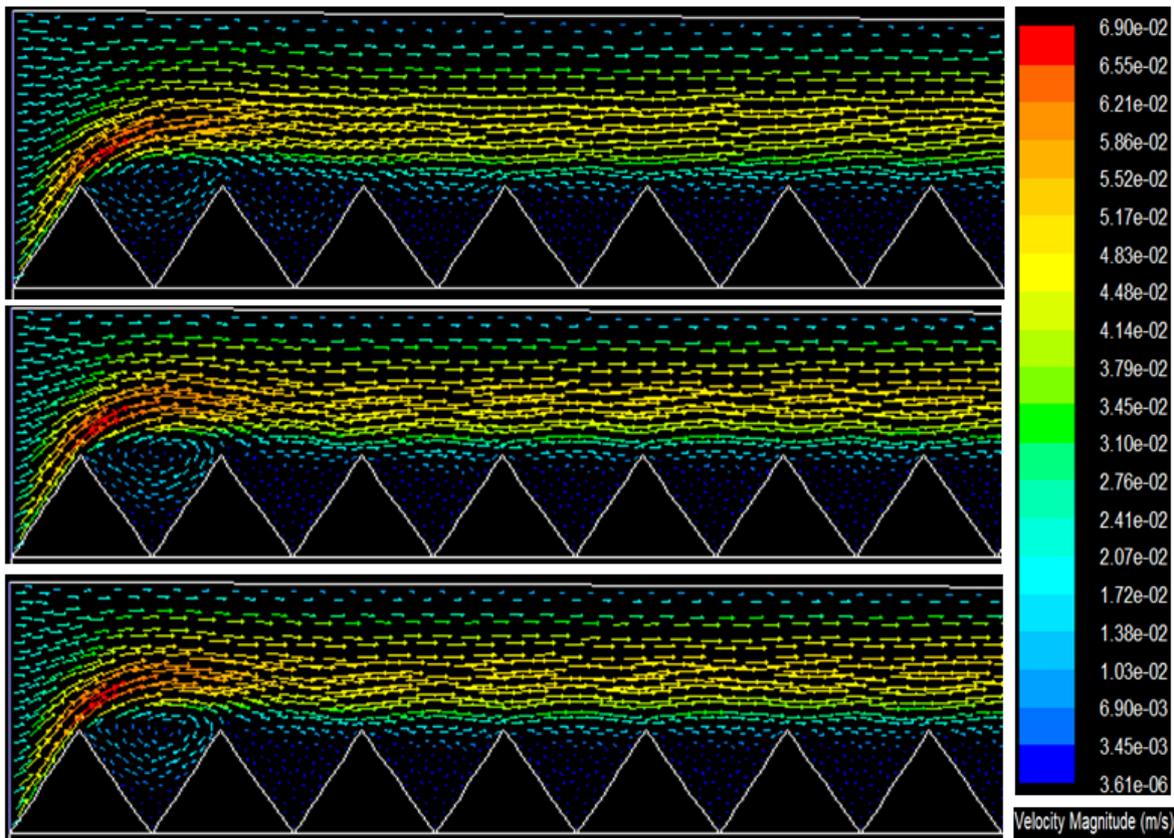
La **figure IV.9** illustre l'évolution des profils des contours de la vitesse résultante dans différentes configurations : le cas simple SU, le cas de rétrécissement SR et le cas d'élargissement SE. Dans ces configurations, la forme d'entrée et de sortie du capteur est modifiée, ce qui entraîne une modification significative de l'écoulement d'air. Lorsque l'air pénètre à travers la section en zigzag de la veine dynamique du capteur, un tourbillon se forme, provoquant des perturbations instantanées et favorisant un passage plus intense du fluide par rapport à une forme uniforme (cas simple). Cela peut directement influencer le coefficient de transfert de chaleur, améliorant ainsi les performances dynamiques de l'écoulement d'air.

De plus, lorsque la hauteur de la veine d'air diminue, cela entraîne une augmentation de la vitesse, ce qui est clairement visible dans la moitié et à la sortie du capteur marquée par la bande rouge (vitesse maximale). Cette augmentation de vitesse varie d'un cas à un autre en fonction de la hauteur d'entrée et de sortie.

Lorsque nous comparons les contours de vitesse obtenus pour les deux cas (rétrécissement et élargissement) à différentes hauteurs, nous observons un comportement similaire de l'écoulement à la fois à l'entrée et à la sortie du canal, ce qui confirme le principe de conservation de la masse.

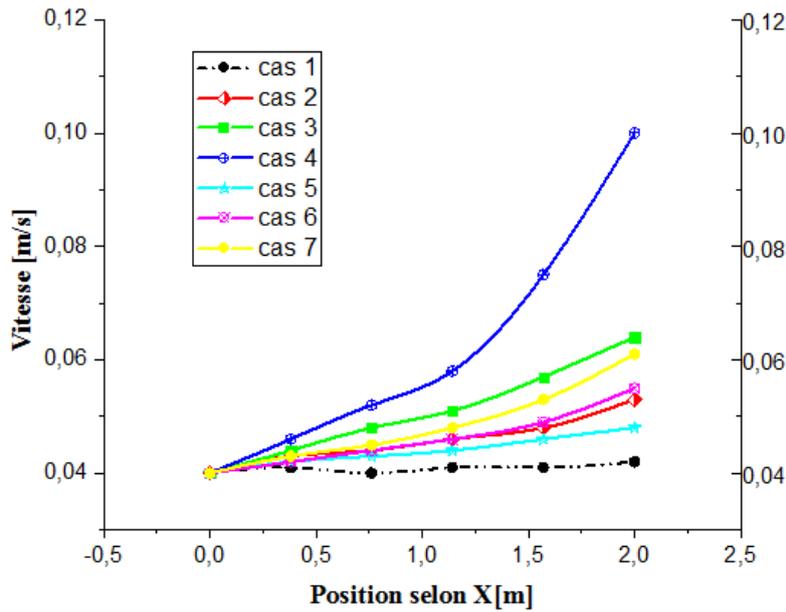
Trouver un équilibre entre la performance thermique et la performance dynamique d'un capteur solaire est essentiel, et cela peut être réalisé en utilisant des configurations en zigzag et en modifiant la géométrie du conduit d'écoulement d'air. Ces ajustements offrent des avantages considérables en termes d'amélioration des échanges de chaleur. Cependant, il convient de noter que ces modifications entraînent également certains inconvénients. Par exemple, elles peuvent entraîner une augmentation des pertes de pression et une diminution du débit d'air, car la forme des parois en zigzag augmente le coefficient de frottement. Par conséquent, il est important de prendre en compte ces facteurs lors de la conception d'un capteur solaire, afin de trouver le bon compromis entre la performance thermique et la performance dynamique.

Afin de procéder à une analyse approfondie des effets de tourbillon, nous examinons les distributions des vecteurs de vitesse à l'entrée du capteur dans quelques cas étudiés.



**Figure IV.10** : Vecteur de la vitesse résultante.

Toutefois, comme indiqué dans le commentaire précédent, la forme en zigzag (V) du capteur et les modifications de sa géométrie permettent de créer un effet tourbillon, ce qui amplifie le flux solaire. En ajustant la taille du capteur, on peut obtenir un passage de fluide plus intense par rapport aux capteurs en zigzag (SU), pour une même vitesse d'entrée, comme le montre la **figure IV .10**. La figure révèle également la présence de perturbations dans les zones de recirculation de l'air dans la forme zigzag de l'absorbeur, ce qui entraîne une vitesse d'écoulement élevée à la sortie du capteur solaire.



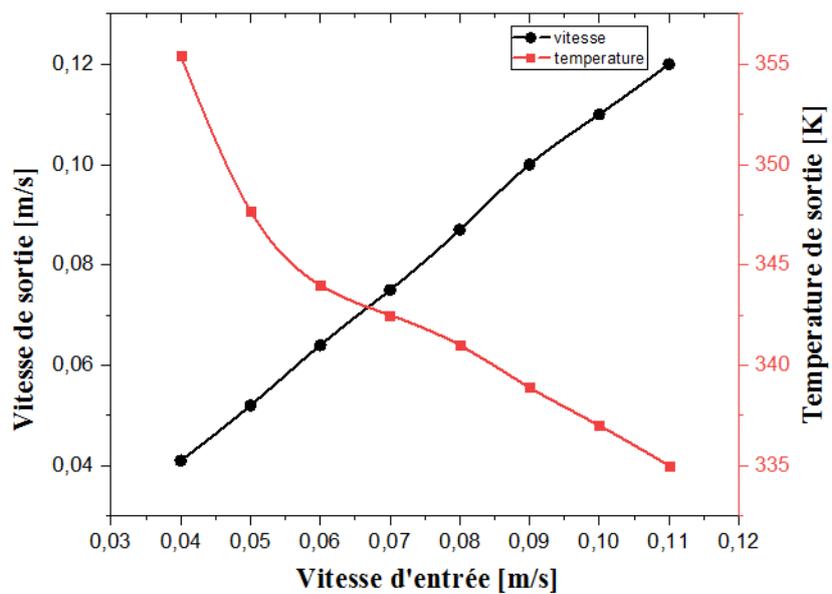
**Figure IV.11** : Variation de la vitesse moyenne en fonction de la distance pour les différents cas.

La **figure IV.11** présente l'évolution de la vitesse moyenne calculée à différentes sections le long de la conduite de capteur solaire pour tous les cas étudiés, avec une vitesse d'entrée choisie  $U_{in} = 0,04$  m/s. Les sections sélectionnées sont situées aux positions suivantes :  $x = 0$  m,  $x = 0,381$  m,  $x = 0,761$  m,  $x = 1,142$  m,  $x = 1,571$  m et  $x = 2,0$  m. Il est évident que, dans tous les cas, la vitesse moyenne augmente progressivement tout au long de la conduite jusqu'à s'approcher de la sortie du collecteur.

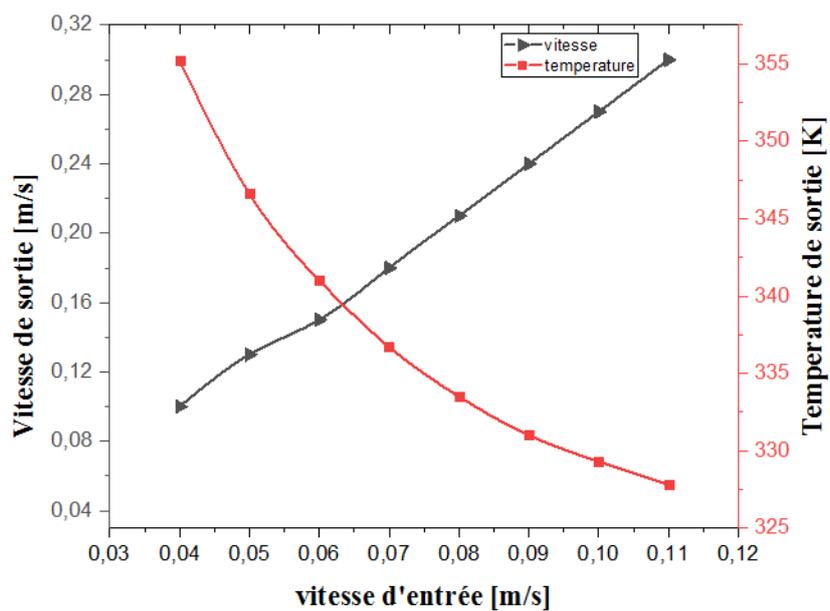
On remarque une augmentation accélérée de la vitesse de l'air entre  $x = 1,142$  m et  $x = 2,0$  m dans les modèles d'élargissement (SE) et de rétrécissement (SR). Ces géométries entraînent une augmentation significative de la vitesse de l'air, atteignant environ 0,10 m/s pour le cas 04 et 0,06 m/s pour le cas 03.

Il est également évident que, dans le cas d'une section de passage uniforme (cas 1), la vitesse moyenne reste constante. Cette stabilisation ou augmentation de la vitesse de l'air à la sortie du capteur est expliquée par le rapport de hauteur ( $H_i$ ) à l'entrée et la hauteur à la sortie ( $h_i$ ) du capteur. La valeur de rapport de 1,6 donne la meilleure performance dynamique de collecteur solaire.

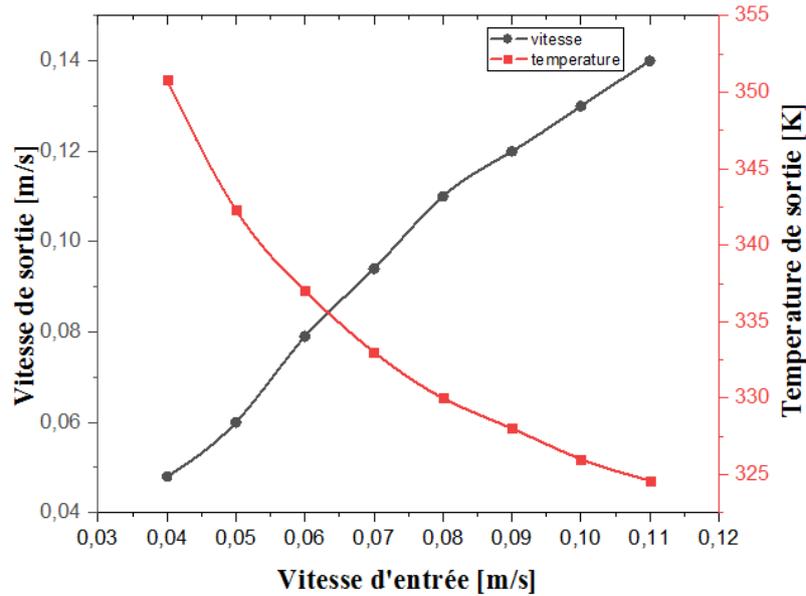
Ensuite, nous avons sélectionné et évalué trois configurations de capteurs différentes : le cas 1 (modèle SU), le cas 4 (modèle SR) et le cas 5 (modèle SE) afin de déterminer la géométrie de collecteur solaire la plus performante.



(a)



(b)



(c)

**Figure IV.12** : Impact de la vitesse d'entrée sur la vitesse et la température de sortie pour le cas : (a) cas 1, (b) cas 4 et (c) cas 5.

Les figures IV.12 a, b et c illustrent les courbes de débit d'air (vitesse de l'air) ainsi que l'évolution de la température à la sortie du collecteur, pour une vitesse d'entrée variant entre 0,04m/s et 0,11 m/s et pour les cas suivant : le cas 1 (modèle SU), le cas 4 (modèle SR) et le cas 5 (modèle SE).

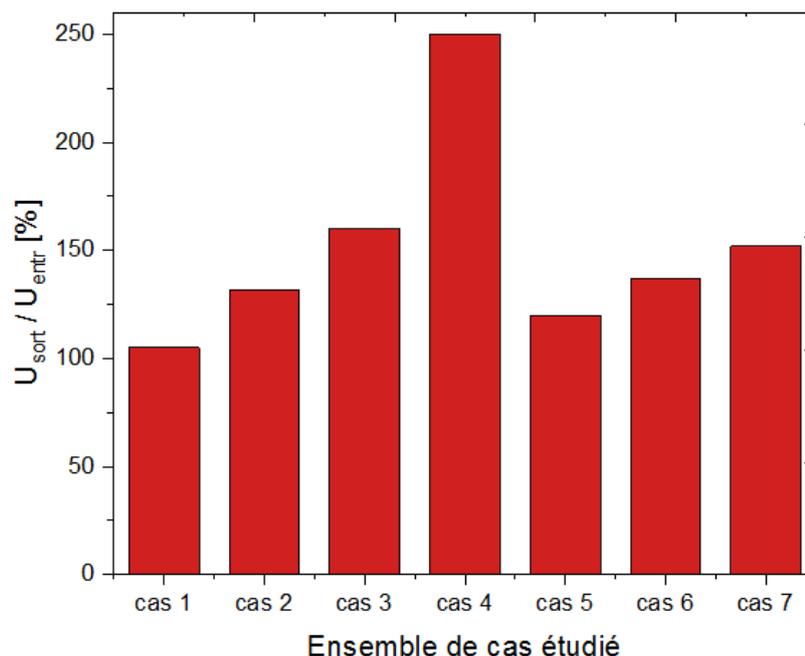
Nous avons observé que la modification de la géométrie du capteur entraîne un changement dans la valeur de la vitesse de l'air à la sortie de ces modèles de capteur. Cette différence atteint une valeur d'environ 0,042 m/s pour le cas 1, 0.10 m/s pour le cas 4 et 0,048 m/s pour le cas 5, par rapport à une vitesse d'entrée de 0,04 m/s. Ainsi, ces résultats montrent que la géométrie optimale du capteur peut fournir une température élevée avec un meilleur débit de sortie. Par exemple, pour le cas 1, le cas 4 et le cas 5, nous constatons que, pour une même vitesse d'entrée, ces modèles de capteur produisent des vitesses de sortie différentes, comme le montrent le tableau suivant.

<i>Configurations</i>	<i>cas 1</i>	<i>cas 4</i>	<i>cas 5</i>
<i>Vitesse entrée (m/s)</i>	0,04	0,04	0,04
<i>Vitesse sortie (m/s)</i>	0,042	0,1	0,048
<i>Température (k)</i>	355,4	353,8	350

**Tableau IV .3** : Les valeurs de vitesse et température de sortie pour les cas 1,4 et 5.

De plus, l'écart maximal de température entre ces configurations est compris entre 1°C et 5°C.

Ainsi, il est possible d'observer que les performances thermiques et dynamiques du capteur de rétrécissement du modèle cas 4 sont supérieures à celles du capteur de cas 1 et cas 5, en comparaison.



**Figure IV.13** : Comparaison de rapport de la vitesse de sortie et la vitesse d'entrée pour tous les cas étudiés.

La **Figure IV.13** présente le rapport de vitesse de sortie du capteur par rapport à la vitesse d'entrée 0,04 m/s pour tous les cas étudiés. Dans toutes les configurations géométriques proposées, les performances sont meilleures pour les cas d'élargissement ou de rétrécissement par rapport au cas simple. Le rapport de vitesse atteint un maximum d'environ 250% et 150% pour les cas 04 et 03 respectivement. On observe cependant un faible rapport pour le cas 01 (SU). Ces résultats montrent et confirment l'amélioration de la performance dynamique de notre nouvelle technique de géométrie de capteur.

L'amélioration de la performance dynamique entraîne une meilleure circulation de l'air dans la chambre de séchage, favorisant ainsi une évacuation plus efficace de l'humidité et réduisant ainsi le temps de séchage.

#### IV. 9. Conclusion

Dans cette étude, nous avons effectué une simulation numérique du comportement thermique et dynamique de l'écoulement d'air par convection forcée dans différentes géométries du capteur solaire à l'aide du code de calcul Fluent. Les résultats présentés montrent les contours de température et de vitesse obtenus pour différents modèles du capteur : le modèle uniforme : SU, le modèle de rétrécissement : SR et le modèle d'élargissement SE et, comparés pour une plage de vitesses d'entrée allant de 0,04 à 0,11 m/s. Les principales conclusions sont résumées comme suit :

- ❖ L'étude a révélé que l'amélioration du transfert de chaleur peut être obtenue en utilisant une forme en zigzag pour l'absorbeur.

- ❖ Les cas avec une section uniforme et le cas de rétrécissement présentent les valeurs de température les plus élevées, tandis que les cas d'élargissement à l'entrée enregistrent les valeurs les plus faibles.

- ❖ Du point de vue dynamique, la vitesse de sortie du modèle SR pour le cas 04 a été augmentée jusqu'à 250% par rapport à la vitesse d'entrée, ce qui assure un fort écoulement jusqu'à l'entrée de la chambre de séchage.

- ❖ Nous avons constaté que la forme en zigzag de l'absorbeur, avec le rétrécissement de la section à la sortie du capteur ou l'élargissement de la section à l'entrée, est un système efficace pour accélérer et améliorer les performances dynamiques de l'écoulement du fluide à travers le collecteur solaire. Cette technique est particulièrement importante pour une évacuation efficace de l'air et de l'humidité dégagés par la chambre de séchage, ce qui permet une meilleure évacuation de l'air humide à la sortie de la cheminée.



***Chapitre IV***  
Résultats et Interprétations :  
Partie Expérimentale

**Avant-propos**

Dans le contexte de l'optimisation des performances des capteurs solaires, notre contribution repose sur la recherche expérimentale menée par **Abhaya Lingayat**.

Dans cette optique, une validation des modèles numériques par l'expérimentation est mise en œuvre pour explorer une nouvelle approche visant à améliorer le rendement et l'efficacité d'un collecteur solaire. Cette approche suggère la modification de la section à l'entrée et à la sortie du capteur puis d'étudier son impact sur les variations de température et de vitesse de l'écoulement d'air.

De plus, cette recherche a permis d'analyser et de mieux maîtriser le fonctionnement de ce capteur solaire notamment en ce qui concerne les matériaux. Les matériaux choisis par **Abhaya Lingayat** dans la conception de son capteur ont été intégrés dans notre approche numérique. Le tableau ci-dessous présente les matériaux utilisés par ce chercheur.

<b>Élément de construction</b>	<b>Matériaux</b>
Un couvercle transparent	Verre
Un absorbeur	cuivre
Boîte rectangulaire (support)	Fer galvanisé
Isolation	bois

**Tableau V .1 : Matériaux utilisée dans le capteur d'AbhayaLingayat.**

Le matériau choisi pour l'absorbeur est le cuivre afin de capturer efficacement une grande quantité d'irradiation solaire et de la convertir en chaleur. Le cuivre occupe une grande surface dans le collecteur (une feuille en forme V de 2m<sup>2</sup>). Cette importante surface en cuivrée entraîne une augmentation des coûts de fabrication du capteur solaire.

#### **✚ Caractéristiques de matériau en cuivre(Cu)**

Masse volumique (Kg/m <sup>3</sup> )	8930
Résistivité électrique ( $\mu\Omega \cdot m$ )	0,0171
Température de fusion (°C)	1083
Module de Young (MPa)	125000
Conductivité thermique (W/m · K)	385
Résistance a la traction (MPa)	230 à 350

Limite Elastique (MPa)	70 à 330
<b>Coût (kg)</b>	<b>7,44 euros</b>

**Tableau V .2 :** quelques caractéristiques du cuivre [17-57].

Afin de diminuer les coûts de la fabrication du capteur, il est nécessaire de rechercher un matériau équivalent ayant des caractéristiques similaires et un coût acceptable.

Nous avons choisi d'utiliser de l'aluminium provenant de cannettes recyclées, ce qui a demandé des expériences visant à améliorer son utilisation afin d'obtenir des résultats comparables à ceux obtenus avec le cuivre. De plus, ce nouvel absorbeur est constitué d'aluminium de cannette usagée, ce qui le rend économique et disponible gratuitement.

#### Propriétés de matériau en aluminium (Al)

Masse volumique ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )	2700
Résistivité électrique ( $\mu\Omega \cdot m$ )	0,0265
Température de fusion ( $^{\circ}\text{C}$ )	1083
Module de Young (MPa)	70000
Conductivités thermique ( $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ )	237
Résistance a la traction (MPa)	70 à 80
Limite Elastique (MPa)	10 à 20
<b>Coût (kg)</b>	<b>1,9 euros</b>

**Tableau V .3 :** Propriétés de matériau d'aluminium de cannette [17-57].

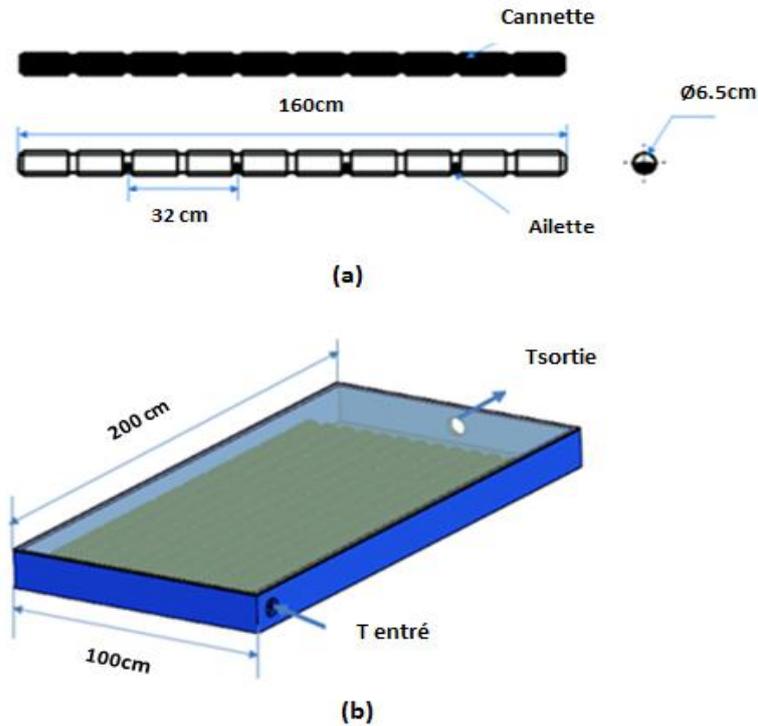
### V.1. Introduction

Dans cette partie, une présentation de la procédure et les détails d'un travail expérimental mené sur un capteur solaire a été effectué. Ce travail consiste à analyser le transfert de chaleur et les caractéristiques d'écoulement d'un fluide dans un capteur solaire muni des conduites de cannette usagées, à ailette et en aluminium. Aussi une description des procédures suivies et les instruments utilisés pour mesurer les paramètres nécessaires de fonctionnement de ce système.

La création de ce banc d'essai représente une méthode de recherche essentielle, fondée sur une planification d'essais visant à évaluer les performances thermiques et dynamique de capteur. Cette évaluation se base sur la mesure des flux solaires ainsi que des températures entrantes et sortantes dans les différentes configurations étudiés.

### V. 2. Dispositif expérimental du capteur solaire

Un capteur solaire à convection forcée destinée au séchage (**Fig. V.1**) a été fabriqué au laboratoire de mécanique et installé à l'université d'Ain Temouchent. Le capteur solaire d'air est la partie principale du système du sécheur solaire ; il se compose d'une boîte rectangulaire en bois de 2m de longueur ,1m de largeur et 15 cm de profondeur. Les dimensions de la veine d'air dynamique du capteur est comme suit : 197cm de longueur, 98cm de largeur et 10 cm d'épaisseur. La plaque transparente en verre d'épaisseur 4mm est placée sur le côté supérieur de cadre avec un matériau d'étanchéité. Sur le côté inférieur de boîtier, un isolant qui se compose de quatre couches : plaque en bois d'épaisseur 2mm ,couche d'un laine de verre d'épaisseur 2mm ,feuille de polystyrène de 40mm d'épaisseur et une plaque de bois d'épaisseur 1mm sur lesquelles on pose une feuille d'aluminium d'épaisseur 2mm a été peinte en noir mat utilisée pour absorber le rayonnement solaire incident.



**Figure V .1 :** Représentation schématique du :(a) conduite en aluminium cannette à ailette et (b) capteur solaire à air.

Une rangée de cannette d'aluminium usagée de boissons gazeuses a été collée les unes aux autres pour former une conduite cylindrique, finalement le système peut contenir en total 14 rangées à chaque rangée 10 cannettes rassemblées dans le collecteur ; l'ensemble des cannettes ont été posées horizontalement sur la plaque absorbante (**Fig V.2**). Chaque cannette de diamètre de 65mm, de longueur de 160mm et d'épaisseur de 0.3 mm est pintée en noir mat, elle a été coupée à l'extrémité pour laisser l'air passer ; tandis que l'un des deux côtés a été coupé en demi-cercle dans le but de créer des ailettes afin d'augmenter le niveau de la turbulence.



**Figure V .2 :** Rassemblement de canette pour former une conduite cylindrique à ailette.

Pour la circulation de l'air dans les cannettes ; l'entrée du collecteur est reliée au ventilateur au côté droit et à la sortie au milieu du capteur produisant un trou qui permet l'évacuation de l'air.



**Figure V .3 :** Collecteur solaire muni d'un absorbeur à cannettes ailletées.

Les propriétés thermo physiques et optiques des matériaux utilisés dans la construction du capteur sont répertoriées dans les tableaux suivants :

<i>Eléments</i>	$\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$C_p$ ( $\text{J/kg.k}$ )	$\lambda$ ( $\text{W/m.K}$ )
<i>Air</i>	1.777	1005	0.02462
<i>Bois</i>	800	2093	0.16
<i>Verre</i>	2530	720	1.2
<i>Aluminium</i>	2719	871	202.4

**Tableau V .4 :** Les propriétés thermo physiques.

<i>Eléments</i>	<i>Emissivité (<math>\mathcal{E}</math>)</i>	<i>Absorption (<math>\alpha</math>)</i>
<i>Plaque transparente (verre)</i>	0.9	0.05
<i>Isolant bois</i>	0.91	0.05
<i>Isolant polystyrène</i>	0.96	0.04

<i>Cannette a peinture noir mat</i>	0.95	0.90
<i>Absorbeur aluminium a peinture noir mat</i>	0.95	0.90

**Tableau V.5** : Les caractéristiques optiques.

### V.3. Étapes pour la fabrication d'un capteur solaire

#### 1. Mise en place du support et de l'isolant

La forme géométrique de support et de l'isolant est indispensable pour maintenir et positionner correctement l'ensemble des éléments constituant le capteur tel que : l'absorbeur, les chicanes et la vitre. Elle doit être mobile horizontalement afin de permettre au capteur de suivre le mouvement du soleil tout au long de la journée, de l'est à l'ouest. Habituellement fabriqué en acier, le support est conçu pour supporter un poids d'environ 30 kg.

L'isolation est réalisée à l'aide de matériaux isolé et résisté à la chaleur tels que le bois, la laine de verre et le polystyrène. Ces matériaux permettent de conserver la forme carrée de la surface de l'absorbeur, comme illustré dans la **figure V.4**.



**Figure V.4** : Photos du capteur solaire en cours de fabrication.

#### 2. Mise en place de l'absorbeur et de la vitre

L'absorbeur est fabriqué par une feuille d'aluminium pintée en noir mat utilisée pour absorber le maximum du rayonnement solaire, le type et la forme spécifique de l'absorbeur est illustré dans la **Figure V .5**.



**Figure V .5 :** Capteur solaire sans vitre l'absorbeur.

La vitre a été encadrée par une cornière en fer et placée sur le caisson par des pommèles afin de faciliter son ouverture. Des conduites cylindriques fabriquées par des cannettes de boissons gazeuses sont posées horizontalement sur la plaque absorbante (**Fig. V.6**). La vitre mobile permet de placer les capteurs de température et de changer l'emplacement de rangée de canette qui peut aller jusqu'à 14 rangée.



**Figure V .6 :** Emplacements du cadre et les cannettes au niveau de l'absorbeur du capteur.

#### V.4. Description générale de la procédure expérimentale

Les séries d'expérience ont été effectuées dans un site ouvert ; en se basant sur les mesures des températures à différentes position et endroit, la vitesse de l'air à l'entrée et le flux d'irradiation solaire. Les mesures de ces grandeurs ont été prises de 9H heure du matin jusqu'à 15 heure du soir. Cette fourchette de temps a permis d'observer et d'évaluer les performances thermiques de notre système étudié selon les étapes suivantes:

- Les mesures de température entrée et sortie au capteur enregistrées chaque 15min.
- Le flux de rayonnement dans le capteur est mesuré toutes les 60min.

Cinq configurations différentes de collecteur solaire ont été étudiées durant ce travail à savoir :

- ✓ Capteur simple sans cannette noté **config 1**.
- ✓ Capteur à 04 rangées de cannette noté **config 2**.
- ✓ Capteur à 08 rangées de cannette noté **config 3**.
- ✓ Capteur à 12 rangées de cannette noté **config 4**.
- ✓ Capteur à 14 rangées de cannette noté **config 5**.

#### V.5. Méthode et instrumentations de mesure

Des expériences sur le capteur solaire ont été réalisées durant le mois de septembre 2021 sur le site de notre laboratoire à l'université d'Ain Temouchent-Algeria ( $35^{\circ} 17' 22''$  nord,  $1^{\circ} 08' 28''$  ouest, altitude: 277 m) ; le convertisseur solaire a été orienté vers le sud, incliné à un angle de  $40^{\circ}$  et exposé au rayonnement solaire. Les températures ont été enregistrées en utilisant des thermocouples de type K connectés à un ordinateur intégré par un logiciel d'acquisition VDAS.

##### ❖ Etalonnage (Calibrages) des thermocouples

Le calibrage des capteurs est une phase importante qui prend place dans la réalisation expérimentale de ce travail ; Le système de capteurs n'a pas été directement utilisé pour les essais, il doit effectivement être calibré. Cette procédure est obligatoire afin de nous permettre d'étalonner l'instrument de mesure. Bien entendu, la qualité et la précision des résultats de nos expériences dépendront largement du soin apporté au calibrage des thermocouples.

##### ❖ Instrumentations de mesure

Afin de mener les essais expérimentaux ;

- ✓ six thermocouples ont été placés sur le capteur ; trois à l'entrée et trois à la sortie du capteur.

- ✓ Un anémomètre a été utilisé pour mesurer la vitesse d'air.
- ✓ La mesure du rayonnement solaire a été faite par un solarimètre.

### 1. Mesure de rayonnement solaire

L'intensité du rayonnement solaire global a été mesurée à l'aide d'un solarimètre de marque Frederiksen, qui a été correctement étalonné avec une précision de  $\pm 10 \text{ W/m}^2$ . Ce dispositif de mesure a été positionné à proximité de la vitre transparente et avec la même inclinaison.

#### -Caractéristiques

- **Affichage** :  $3\frac{1}{2}$  chiffres, 2000 lectures
- **Portée** :  $2000 \text{ W/m}^2$ , 634 BTU / (ft<sup>2</sup>xh)
- **Résolution** :  $0,1 \text{ W/m}^2$ , 0,1 BTU/ (ft<sup>2</sup>xh)
- **Précision** : Typiquement à  $\pm 10 \text{ W/m}^2$  [ $\pm 3 \text{ BTU/ (ft}^2\text{xh)}$ ] ou  $\pm 5\%$  selon la valeur la plus élevée en plein soleil.
- **Erreur de température incluse**  $\pm 0,38 \text{ W/m}^2 / ^\circ\text{C}$  [ $\pm 0,12 \text{ BTU/ (ft}^2\text{xh)} / ^\circ\text{C}$ ] écart par rapport à  $25 ^\circ\text{C}$ .
- **Précision angulaire** : Cosinus corrigé
- **Temps d'échantillonnage** : 0,25 seconde
- **Température et humidité de fonctionnement** :  $0 ^\circ\text{C} \sim 50 ^\circ\text{C}$  en dessous de 80 % d'humidité relative



Figure V .7 : Solarimètre.

## 2. Mesures du débit

La vitesse de l'air a été mesurée à l'entrée et à la sortie du capteur à l'aide d'un anémomètre numérique portatif multifonctionnel (**Fig. V.8**) ; il permet la mesure de la vitesse avec une erreur maximale de 1 %.



**Figure V.8** : Anémomètre multifonction.

### - Caractéristiques

- **Types de capteur** : Hélice de diamètre 100 mm
- **Nombre de canaux** : 2 : Vitesse d'air et température ambiante
- **Etendue de mesure** : 0 à +50°C; Hélice : +0,3 à +20m/s
- **Précision** :  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ ; Hélice :  $\pm 0,1\text{m/s}$
- **Résolution** :  $0,1^{\circ}\text{C}$ ; Hélice :  $0,01\text{m/s}$

## 3. Mesure des températures

Les mesures de températures dans différentes positions de la veine d'écoulement sont effectués à l'aide des sondes thermocouples de types 'K' (**Fig. V.10**), ces instruments ont été vérifiés et étalonnés à une précision de  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ .

### - Caractéristiques

- **Plage** :  $0^{\circ}\text{C}$  à  $200^{\circ}\text{C}$
- **Résolution** :  $0,1^{\circ}\text{C}$

- **Précision** :  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$

La **figure V.9** montre l'étalonnage de thermocouples utilisés dans l'expérience en utilisant un dispositif de conduction, les thermocouples de mesure sont placés avec le thermocouple type de fiche verte comme référence dans un récipient en verre contenant de l'eau chauffée, puis connectés à l'appareil. En quelques minutes, l'affichage atteint une valeur constante de température de l'ensemble de thermocouples. Dans ce cas, lorsque l'affichage se stabilise à une valeur constante, cela indique que l'étalonnage est correct.



**Figure V.9** : Etalonnage de thermocouples type K.



**Figure V.10**: Thermocouples type K.

Les résultats ont été enregistrés à l'aide d'un système d'acquisition VDAS. Ce système permet de surveiller en continu l'évolution de la température du fluide caloporteur, depuis son

entrée jusqu'à sa sortie dans le conduit d'écoulement. Cette acquisition fournit également l'enregistrement des températures mesurées durant la journée et avec un pas du temps choisis.



Figure V.11 : Ecran typique du logiciel VDAS.

#### 4. Caméra thermique

Une caméra infrarouge testo 875-1i a également été utilisée pour visualiser la répartition de la température. Le champ de la température a été réalisé au moyen de l'outil de traitement logiciel (IRsoft) fourni par le fabricant de la caméra.



Figure V.12 : Caméra thermique.

- Caractéristiques
- Taille de l'image : 640 x 480 pixels

- **Distance minimale de mise au point** : 0,4 m
- **Type d'affichage** : LCD 3,5" avec 320 x 240 pixels
- **Option d'affichage** : Image IR uniquement ; image réelle uniquement ; Image IR / image réelle
- **Nombre de couleurs** : 10
- **Sortie vidéo** : USB 2.0
- **Image de format de fichier** : .bmt ; option d'exportation en .bmp ; .jpg; .png; .csv ; .xls
- **Périphérique de stockage** : carte SD 2 Go (environ 2 000 images)
- **Résolution infrarouge** : 160 x 120 pixels
- **Sensibilité thermique** : < 50 mK à +30 °C
- **Champ de vision** : 32° x 23°
- **Distance minimale de mise au point** : 0,1 m (objectif standard)
- **Résolution géométrique (IFOV)** : 3,3 mrad (objectif standard)
- **Super résolution (pixel)** : 320 x 240 pixels
- **Super résolution (IFOV)** : 2,1 mrad (objectif standard)
- **Taux de rafraîchissement des images** : 33 Hz
- **Mise au point** : manuelle
- **Plage de mesure** : -30 à +100°C ; 0 à +350 °C (commutable)
- **Précision** :  $\pm 2$  °C,  $\pm 2$  % v.m. ( $\pm 3$  °C de v.m. à -30 à -22 °C)

## V. 6. Théorie

### ◆ Bilan thermique du capteur

L'équation de bilan énergétique par unité de surface pour le collecteur solaire plat peut être formulée comme suit :

$$\varphi_{sa} = \varphi_p + \varphi_u + \varphi_{st} \quad (\text{V.1})$$

Où :

$\varphi_{sa}$  : Flux solaire absorbé

$\varphi_p$  : Flux perdue par la paroi absorbante

$\varphi_u$  : Flux utile transmis au fluide caloporteur.

$\varphi_{st}$  : Flux stocké dans le capteur.

Le flux solaire absorbé par le capteur s'écrit :

$$\varphi_{sa} = \tau_{cs} \times \alpha_{ps} \times G_{(i,y)} \times S \quad (\text{V.2})$$

En raison des suppositions faites, le flux de chaleur emmagasiné dans le collecteur est considéré comme insignifiant :  $Q_s = 0$ , ce qui conduit à la simplification de l'équation de bilan comme suit :  $\varphi_{sa} = \varphi_p + \varphi_u$

Lorsque le fluide caloporteur ne subit pas de transition de phase, l'expression du flux bénéfique peut être formulée comme suit :

$$\phi_u = \dot{m}C_p(T_{fe} - T_{fs})$$

#### ◆ La convection

$$\phi_{conv} = h_{conv}S_{abs}(T_{abs} - T_{amb}) \quad (\text{V.3})$$

Où :

$h_{conv}$  : Coefficient de convection.

$S_{abs}$  : Surface de la paroi absorbante.

$T_{abs}$  : Température de la paroi absorbante

$T_{amb}$  : Température ambiante.

#### ◆ La conduction

$$\varphi_{cond} = \lambda_{cond} S_{abs}(T_{abs} - T_{amb}) \quad (\text{V.4})$$

Où :

$\lambda_{cond}$  : Conductivité thermique

#### ◆ Le rayonnement

$$\varphi_{ray} = \xi_{abs} \cdot \sigma \cdot (T_{abs}^4 - T_{amb}^4) \quad (\text{V.5})$$

Où :

$\xi_{abs}$  : Facteur d'émissivité de l'absorbeur.

### ◆ Le rendement

Les performances d'un collecteur sont évaluées en relation avec le flux solaire entrant, défini pour le rendement global de la manière suivante :

$$\eta = \frac{\phi_u}{G.(i,y).S} \quad (\text{V.6})$$

Le rendement interne :

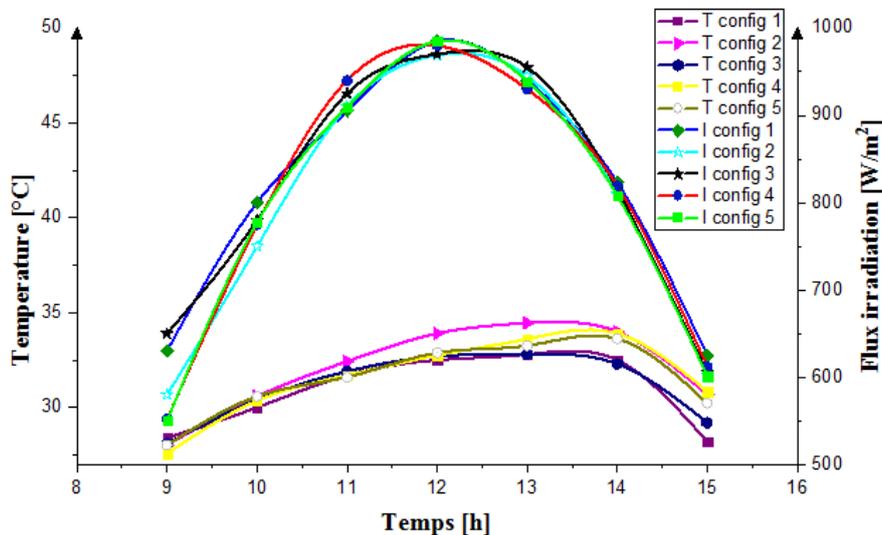
$$\eta_i = \frac{\phi_u}{\phi_a} \quad (\text{V.7})$$

Le rendement optique :

$$\eta_0 = \frac{\phi_a}{G*A} \quad (\text{V.8})$$

### V.7. Résultat et discussion

Pour analyser de manière quantitative les cinq configurations proposées du capteur solaire, il est essentiel de présenter les profils de température ambiante (Température d'entrée) et les flux solaires journaliers. La **figure V.13** présente l'évolution de la température d'entrée et de l'irradiation en fonction du temps pendant les journées du mois de septembre.

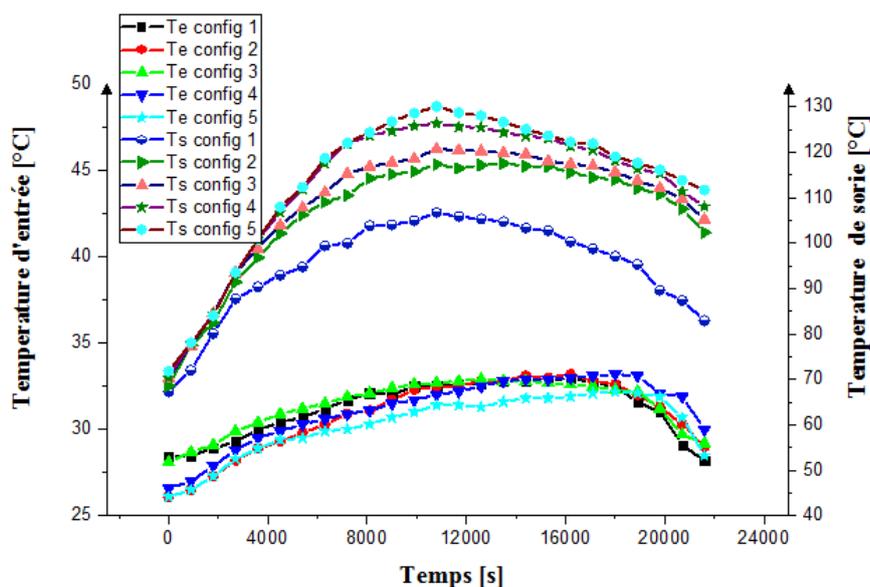


**Figure V.13** : Flux d'irradiation et la température d'entrée pour l'ensemble des cas étudiés.

Les courbes présentées dans la **figure V.13** illustrent l'évolution du flux d'irradiation et de la température d'entrée ( $T_e$ ) pour toutes les configurations étudiées. Comme prévu, les valeurs

de températures et le flux augmentent progressivement jusqu'à atteindre leur valeur maximale à midi, puis ils diminuent par la suite en fin de journée. Il est important de noter que les valeurs maximales enregistrées pour le rayonnement et la température d'entrée au cours de ces jours ont atteint respectivement  $980 \text{ W/m}^2$  et  $33^\circ\text{C}$ .

L'ensemble de ces données climatiques revêt une grande importance pour mener une expérience sur un capteur solaire et obtenir des résultats optimaux.



**Figure V.14** : Evolution de température d'entrée et de sortie pour les différents cas étudiés.

D'après les représentations graphiques montrées dans la **Figure V.14**, une performance thermique considérable a été constatée dans le capteur solaire pour chaque configuration étudiée. Cette figure montre l'influence d'adjonction des conduites de cannettes à ailettes par rapport au cas d'un capteur simple. Il est noté clairement que la température de sortie atteint les valeurs maximales dans l'ensemble des cas à 12h et 13h suivant une évolution logique en fonction de la durée de la journée puisque le rayonnement augmente et diminue.

Il est constaté aussi que l'augmentation de nombre de rangée de conduite augmente la température de sortie de capteur et selon la valeur de flux d'irradiation. En effet, dans le cas d'un capteur simple, la température de sortie atteint  $106 \text{ }^\circ\text{C}$ , tandis que dans le cas d'un capteur à 14 rangées, elle atteint  $130 \text{ }^\circ\text{C}$ , ce qui représente une différence de  $24 \text{ }^\circ\text{C}$ .

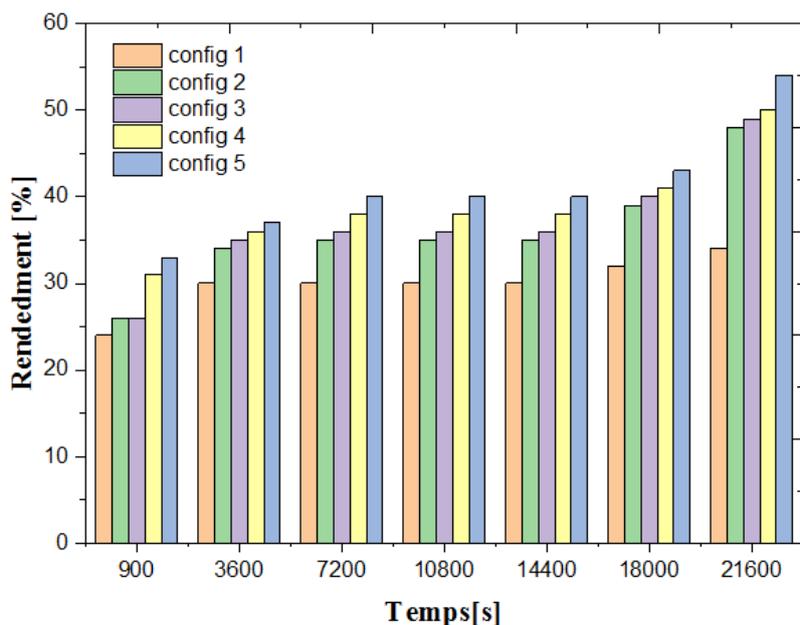
Le tableau ci-dessous présente une comparaison entre les différences de température "entrée-sortie" pour chaque heure et la moyenne journalière de ces différences de température pour les cinq configurations étudiées.

Heure(h)	Config1 (Ts-Te) °C	Config 2 (Ts-Te) °C	Config 3 (Ts-Te) °C	Config 4 (Ts-Te) °C	Config 5 (Ts-Te) °C
9h	38,9	42,5	42,2	43,8	45,7
10h	60,4	67,9	68,4	71,2	71,9
11h	68,3	79,6	83,3	90,9	92,2
12h	74,2	84,8	88	94,3	98,6
13h	70,5	83,8	86,7	90,6	93,2
14h	64,6	81,3	83,3	84,9	86,8
15h	54,7	73,3	76,2	78,0	83,1
<b><math>\Delta T</math> moyenne (°C)</b>	<b><u>61,6</u></b>	<b><u>73,3</u></b>	<b><u>75,1</u></b>	<b><u>79,3</u></b>	<b><u>81,6</u></b>

**Tableau. V. 6 :** Ecarts de température pour chaque heure et la moyenne journalière de ces écarts pour les différents cas étudiés.

Le **tableau V.6** révèle que les écarts de température commencent dès la première heure (9h) pour toutes les configurations étudiées. Une différence de 3.6 °C est observée entre le cas de 4 rangées (config 2) et le cas simple (config 1), ce qui confirme l'efficacité de l'ajout des canettes recyclées dans le système. Bien que les écarts restent presque identiques au cours de la première heure pour les configurations à 4, 8 et 12 rangées (42.5°C, 42.2 °C et 43.8°C respectivement), le cas avec 14 rangées (config 5) présente une différence notable de 45.7°C.

Comparant les moyennes des écarts de températures pour les différents cas d'étudiés, il est observé que la plus grande moyenne est égale à 81,6°C a été obtenus pour la configuration 5 présentant le plus grand nombre de rangé, tandis que la moyenne la plus faible est de l'ordre de 61,6°C obtenue pour le cas simple ce qui montre un gain de 20°C.

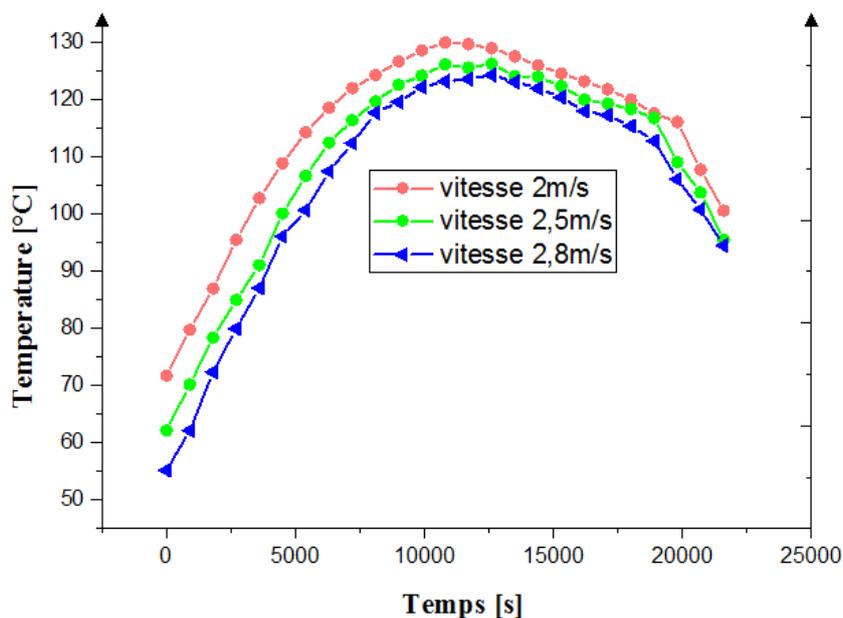


**Figure V.15** : Rendement thermique du capteur pour les différentes configurations étudiées.

La **figure V.15** compare les rendements obtenus à chaque heure de la journée lors de l'expérience (de 9h à 15h) pour les différentes configurations étudiées. On peut clairement observer qu'à chaque ajout de rangée de cannettes, le rendement thermique augmente nettement par rapport au cas simple. Il est intéressant de noter que malgré la diminution du flux solaire pendant les heures 13h et 15h, le rendement du système atteint son maximum en raison de la chaleur stockée et emmagasinée dans les cannettes d'aluminium.

Le rendement thermique dépasse les 30% pour toutes les configurations étudiées, atteignant une valeur de 54% pour la configuration 5 et de 34% pour la configuration 1. Cela représente une amélioration de 20% par rapport au cas simple à 15h.

La comparaison entre les différents cas et moments montre que la cinquième configuration, qui comporte 14 rangées, est la plus performante en termes de rendement thermique. Cette configuration a été sélectionnée pour étudier l'impact de la variation du débit d'air sur les performances thermiques du collecteur solaire dans la **figure V.16**.



**Figure V.16 :** Variation de température de sortie en fonction du temps pour différentes vitesses d'entrées pour **config 5**.

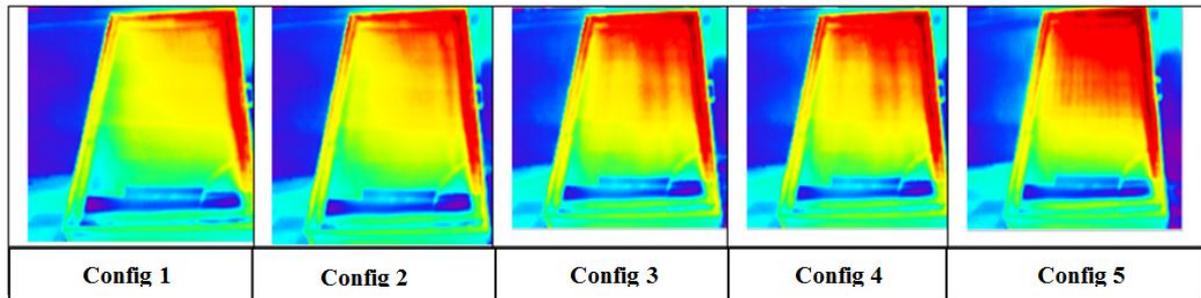
Étant donné que le débit massique joue un rôle essentiel dans l'amélioration des performances thermiques, dynamiques et la circulation d'air dans le capteur, La **figure V.16** montre la comparaison de la variation de température de sortie pour différentes vitesses de l'air à l'entrée pour la configuration 5 et cela dans le but de trouver le meilleur débit. Il est remarqué que les températures de sortie prennent des valeurs élevées pour un débit de 2m/s et diminué à la vitesse de 2.8 m/s, On constate une chute remarquable de la température de sortie pour les deux vitesses 2,5m/s et 2,8m/s, on obtient une différence de 5°C à 6°C de température à chaque mesure. Il est constaté que la température de sortie diminue avec l'augmentation de débit massique.

### V.7.1 Traitement des images par caméra thermique

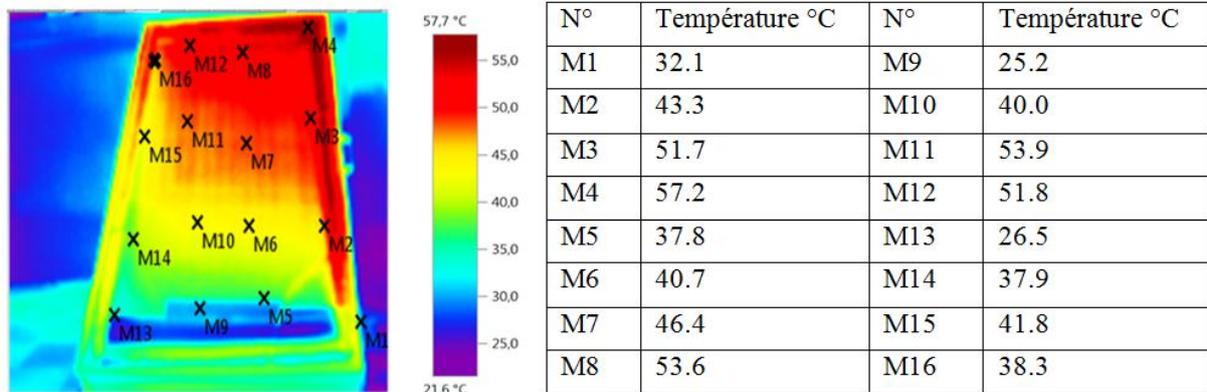
En plus, l'analyse des résultats est effectuée à l'aide d'une caméra thermique qui est basée sur le traitement des images. Cette opération a permis une étude approfondie sur la distribution de la température dans chaque partie du capteur solaire.

Les images de différentes configurations dans la **figure V.17** ont été prises par une caméra thermique qui montre les champs de température dans la vitre du capteur pour les cinq cas étudiés.

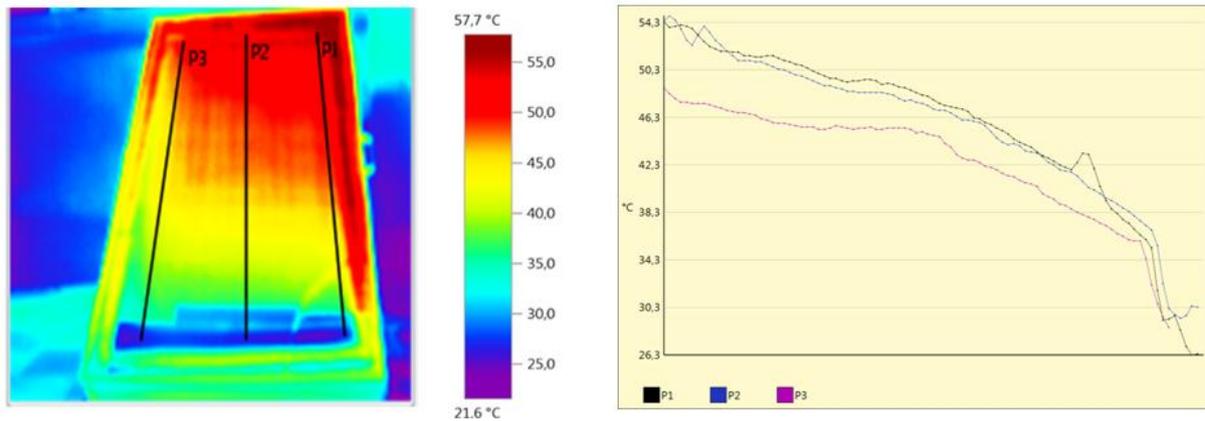
Dans la configuration 5, on observe que la zone de la température la plus élevée (représentée par la bande rouge) est plus intense par rapport aux autres cas étudiés.



**Figure V.17** : Image par caméra thermique de différent cas étudiés.



**Figure V.18** : Température de Point M sur le capteur solaire (config5).



**Figure V.19** : Vue Graphique du champ thermique par IR soft.

Dans la **Figure V.19**, le graphique et schéma obtenus à l'aide de la caméra thermique pour le cas 5 sont présentés. On peut observer que les températures sont faibles près de l'entrée, car le ventilateur évacue l'air ambiant dans le capteur. Cependant, à partir de la moitié du capteur et en se rapprochant de la sortie, les valeurs de température augmentent de manière de plus en plus significative, comme le montrent les points des températures M.

Cette figure présente les valeurs du flux de température obtenues à l'aide du logiciel IR Soft de la caméra thermique sur la vitre. Ils mettent en évidence de manière claire que la température dans le collecteur augmente progressivement près de la sortie de capteur solaire comme montré les repères P1, P2 et P3.

### V.8.Conclusion

Cette deuxième partie de l'étude présente la conception d'un nouveau modèle d'un capteur solaire. Ce modèle comporte un absorbeur fabriqué par des conduites à cannette usagées en aluminium et munis des ailettes à l'intérieur. Une comparaison est effectuée avec un capteur à absorbeur simple, en se basant sur la variation de la température de sortie et le rendement thermique. Cinq cas différents en terme de nombre de rangée de canettes ont été étudié et comparé dans l'objectif de déterminer le meilleur modèle en termes de performances. En comparant nos résultats expérimentaux pour les cinq configurations étudiées, nous constatons que le capteur à 14 rangées (**config 5**) se démarque comme le meilleur choix. Ce collecteur présente une différence de température de sortie de 24 °C par rapport au collecteur simple et un rendement de 54%.

## *Conclusion générale et perspectives*

---

### Conclusion générale et perspectives

Le comportement thermique et l'efficacité du système de fonctionnement d'un capteur solaire sont influencés par divers paramètres. Cependant, expérimenter le contrôle de tous ces paramètres s'avère complexe et coûteux. Par conséquent, dans cette étude, nous avons entrepris une démarche initiale de modélisation du flux solaire, ce qui nous a permis d'analyser numériquement le comportement thermique et dynamique d'un capteur solaire renfermant un absorbeur en forme de zigzag. En appliquant ces études de modélisation au contexte d'un capteur solaire plan avec vitrage, nous avons pu réaliser et mettre en place un capteur intégré dans un système de conduite recyclable en forme de cannette.

Notre contribution majeure dans cette thèse, tant au niveau numérique qu'expérimental, consiste à introduire une nouvelle technique et à apporter une avancée scientifique visant à améliorer les performances thermiques et dynamiques d'un écoulement laminaire au sein d'un capteur solaire plan à air. En effet, nous avons réussi à obtenir une température de sortie élevée pour le capteur plan, grâce à la création d'un tourbillon dans le flux d'air, qui reflète également la température et le débit à l'entrée de la chambre de séchage. Cette réalisation se traduit par une réduction du temps de séchage et une amélioration significative de l'efficacité d'évacuation de l'air humide à la sortie de la chambre de séchage.

En se basant sur les résultats obtenus, on peut déduire les conclusions suivantes :

- ✚ La modélisation numérique des capteurs solaires à l'aide de la mécanique des fluides computationnelle (CFD) s'avère un outil essentiel et incontournable pour éviter des coûts excessifs liés aux essais expérimentaux et pour améliorer le transfert de chaleur au sein de l'écoulement d'air.
- ✚ L'intégration d'un obstacle et l'adoption de formes géométriques différentes du capteur simple sont nécessaires pour améliorer les performances thermiques et garantir une température élevée.
- ✚ Les conditions météorologiques et la sélection appropriée des matériaux de construction jouent un rôle essentiel dans l'amélioration notable des propriétés thermiques de notre système.
- ✚ La configuration en zigzag du capteur ainsi que l'intégration de la conduite en forme de cannette favorisent la génération d'un effet tourbillon et accroissent la surface d'échange entre l'air et l'absorbeur. Par conséquent, cela conduit à une amélioration du flux de chaleur absorbé.

- ✚ Lors de l'étude numérique du capteur, du point de vue dynamique, la vitesse de sortie du modèle de rétrécissement dans le cas 04 a été multipliée par 2,5 par rapport à la vitesse d'entrée, garantissant ainsi un écoulement puissant jusqu'à l'entrée de la chambre de séchage.
- ✚ La configuration en zigzag de l'absorbeur, associée à un rétrécissement de la section à la sortie du capteur ou à un élargissement de la section à l'entrée, se révèle être un système efficace pour accélérer et améliorer les performances dynamiques de l'écoulement du fluide à travers le collecteur solaire.
- ✚ La sélection de ce type de cannette en aluminium est motivée par sa haute conductivité thermique et sa résistance à des températures élevées. De plus, le fait qu'il soit recyclable a permis de construire une chicane à moindre coût, et ce qui est encore plus important, l'utilisation de cannettes usagées contribue à préserver un environnement propre.
- ✚ L'ajout de plusieurs rangées de ces cannettes améliore considérablement les performances thermiques du système par rapport au cas simple du collecteur.
- ✚ L'utilisation de la caméra thermique pour le traitement des images a facilité une analyse détaillée des zones de distribution de températures élevées et basses dans différentes parties du capteur solaire.

En termes de perspectives, le travail actuel ouvre plusieurs possibilités, notamment :

- Pour compléter les aspects numériques de cette étude, il serait intéressant d'envisager une approche expérimentale qui mettrait à disposition des techniques de visualisation de l'écoulement, telles que l'utilisation d'un générateur de fumée, par exemple.
- La fabrication d'un sécheur solaire pourrait être envisagée pour diverses applications de séchage, notamment pour les briques rouges utilisées dans la construction, ainsi que d'autres produits locaux à grande production et consommation, comme les dattes et les figes.
- L'exploration de l'utilisation de matériaux de stockage innovants et plus performants, tels que les matériaux à changement de phase.
- Intégrer d'autres formes d'ondulation pour les chicanes recyclées.

## *Références*

---

---

## Références

- [1] B. Tissot, Sources d'énergie primaires et effet de serre, *Comptes Rendus Geoscience*, 335 (2003) 597-601.
- [2] S. Cherifi, M. Haddad, L'énergie solaire: Un moteur du développement durable en Algérie, *les cahiers du cread*, 35 (2019) 95-127.
- [3] F. Meunier, *Domestiquer l'effet de serre: énergies et changement climatique*, Dunod, 2008.
- [4] J.N. Marien, forêts périurbaines et bois énergie: quels enjeux pour l'Afrique centrale 44, (2008).
- [5] F. Yazdanifard, M. Ameri, Exergetic advancement of photovoltaic/thermal systems (PV/T): A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 97 (2018) 529-553.
- [6] <https://www.missionenergie.goodplanet.org/fiche/les-energies-hydrauliques>.
- [7] F. Poitiers, Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-machine asynchrone a cage autonome-machine asynchrone a double alimentation reliée au réseau, in, Université de Nantes, 2003.
- [8] D. Do Couto, *La géothermie: une énergie ubiquiste sous différentes formes*, Géologues, (2022).
- [9] J.A. Duffie, W.A. Beckman, *Solar engineering of thermal processes*, John Wiley & Sons, 2013.
- [10] P. Bessemoulin, J. Olivieri, Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette, *La météorologie*, 2000 (2000) 42-59.
- [11] J. Lilensten, P.-L. Blelly, *Du soleil à la Terre: Aéronomie et météorologie de l'espace*, in, EDP Sciences, 2020.
- [12] A. Mefti, M. Bouroubi, A.e. Khellaf, Analyse critique du modèle de l'atlas solaire de l'Algérie, *Journal of Renewable Energies*, 2 (1999) 69-85.
- [13] M.R. Yaiche, A. Bouhanik, *Atlas solaire algérien*, Portail des Energies Renouvelables, Centre de Développement des Energies Renouvelables, 16 (2002).
- [14] J.-L. Godet, *Introduction à la thermodynamique*, Vuibert, 2015.
- [15] A.-M. Bianchi, Y. Fautrelle, J. Etay, *Transferts thermiques*, PPUR presses polytechniques, 2004.
- [16] G. Lefèbre, *La méthode modale en thermique: Modélisation, simulation, mise en oeuvre, applications*, Ellipses, 2007.
- [17] D. Michel, *Aide-mémoire science des matériaux*, Dunod, Paris, (2004) 89-130.

- [18] M.F. Ashby, D.R. Jones, Matériaux, T1 Propriétés, applications et conception, (2014).
- [19] J. Spitz, A. Aubert, J. Behaghel, S. Berthier, J. Lafait, J. Rivory, Matériaux sélectifs pour la conversion photothermique de l'énergie solaire, Revue de physique appliquée, 14 (1979) 67-80.
- [20] <https://www.edf.fr/groupe-edf>, in 2023.
- [21] M. Al-Saiydee, A. Alhamadani, W. Allamy, A Series Arrangement of Economizer–Evaporator Flat Solar Collectors as an Enhancement for Solar Steam Generator, Journal of Ecological Engineering, 22 (2021).
- [22] capteur, <https://www.consoglobe.com/chauffe-eau-solaire-cg>, in 2023.
- [23] capteur, in: <https://www.prix-pose.com/chauffe-eau-solaire>, in 2023.
- [24] S.A. YOUNSI, Etude bidimensionnelle d'un capteur solaire à tube sous vide avec un échangeur en épingle, in, Mémoire de Magister en mécanique/Option: Energies renouvelables, 2011.
- [25] <https://permacool.fr/blog/5-astuces-pour-secher-vos-plantes-aromatiques>, (2023).
- [26] <https://ileauxepices.com>, in, 2023.
- [27] F. Mokhtari, D. Semmar, Etude Expérimentale d'un Capteur Solaire à Air, Revue des Energies Renouvelables, 34 (1999).
- [28] F. Chabane, N. Moumami, S. Benmarache, Effect of the tilt angle of natural convection in a solar collector with internal longitudinal fins, (2012).
- [29] A. Daliran, Y. Ajabshirchi, Theoretical and experimental research on effect of fins attachment on operating parameters and thermal efficiency of solar air collector, Information processing in agriculture, 5 (2018) 411-421.
- [30] S. Tamna, S. Skullong, C. Thianpong, P. Promvonge, Heat transfer behaviors in a solar air heater channel with multiple V-baffle vortex generators, Solar Energy, 110 (2014) 720-735.
- [31] H.-U. Choi, K.-H. Choi, CFD analysis on the heat transfer and fluid flow of solar air heater having transverse triangular block at the bottom of air Duct, Energies, 13 (2020) 1099.
- [32] A. ELkhadraoui, S. Kooli, I. Hamdi, A. Farhat, Experimental investigation and economic evaluation of a new mixed-mode solar greenhouse dryer for drying of red pepper and grape, Renewable energy, 77 (2015) 1-8.
- [33] A. Lingayat, V. Chandramohan, V. Raju, Design, development and performance of indirect type solar dryer for banana drying, Energy Procedia, 109 (2017) 409-416.

- [34] S. Li, H. Wang, X. Meng, X. Wei, Comparative study on the performance of a new solar air collector with different surface shapes, *Applied thermal engineering*, 114 (2017) 639-644.
- [35] R. Kumar, P. Chand, Performance enhancement of solar air heater using herringbone corrugated fins, *Energy*, 127 (2017) 271-279.
- [36] J.J. Fiuk, K. Dutkowski, Experimental investigations on thermal efficiency of a prototype passive solar air collector with wavelike baffles, *Solar Energy*, 188 (2019) 495-506.
- [37] M.M.D. Ndiaye, B. Diallo, S. Abboudi, D. Azilinson, Theoretical and Experimental Study of a Double Air-Pass Solar Thermal Collector with an Insulating Rod of Millet, *Energy and Power Engineering*, 10 (2018) 106.
- [38] H. Hassan, S. Abo-Elfadl, M. El-Dosoky, An experimental investigation of the performance of new design of solar air heater (tubular), *Renewable Energy*, 151 (2020) 1055-1066.
- [39] A. El-Sawi, A. Wifi, M. Younan, E. Elsayed, B. Basily, Application of folded sheet metal in flat bed solar air collectors, *Applied Thermal Engineering*, 30 (2010) 864-871.
- [40] T. Bhattacharyya, R. Anandalakshmi, K. Srinivasan, Heat transfer analysis on finned plate air heating solar collector for its application in paddy drying, *Energy Procedia*, 109 (2017) 353-360.
- [41] L. Aldabbagh, F. Egelioglu, M. İlkan, Single and double pass solar air heaters with wire mesh as packing bed, *Energy*, 35 (2010) 3783-3787.
- [42] M. Abuşka, M.B. Akgül, Experimental study on thermal performance of a novel solar air collector having conical springs on absorber plate, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41 (2016) 4509-4516.
- [43] E.K. Akpınar, F. Koçyiğit, Experimental investigation of thermal performance of solar air heater having different obstacles on absorber plates, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37 (2010) 416-421.
- [44] B. Das, J.D. Mondol, S. Debnath, A. Pugsley, M. Smyth, A. Zacharopoulos, Effect of the absorber surface roughness on the performance of a solar air collector: An experimental investigation, *Renewable Energy*, 152 (2020) 567-578.
- [45] A. Labed, N. Moummi, K. Aoues, M. Zellouf, A. Moummi, Etude théorique et expérimentale des performances d'un capteur solaire plan à air muni d'une nouvelle forme de rugosité artificielle, *Journal of Renewable Energies*, 12 (2009) 551–561-551–561.

- [46] L. Abhay, V. Chandramohan, V. Raju, Numerical analysis on solar air collector provided with artificial square shaped roughness for indirect type solar dryer, *Journal of cleaner production*, 190 (2018) 353-367.
- [47] H. Esen, Experimental energy and exergy analysis of a double-flow solar air heater having different obstacles on absorber plates, *Building and Environment*, 43 (2008) 1046-1054.
- [48] P. Rani, P. Tripathy, Experimental investigation on heat transfer performance of solar collector with baffles and semicircular loops fins under varied air mass flow rates, *International Journal of Thermal Sciences*, 178 (2022) 107597.
- [49] P. Ingle, A. Pawar, B. Deshmukh, K. Bhosale, CFD analysis of solar flat plate collector, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3 (2013) 337-342.
- [50] M. Mohanraj, P. Chandrasekar, Performance of a solar drier with and without heat storage material for copra drying, *International Journal of Global Energy Issues*, 31 (2009) 112-121.
- [51] A.I.N. Korti, Numerical heat flux simulations on double-pass solar collector with PCM spheres media, *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, 24 (2016) 1650010.
- [52] S. Esakkimuthu, A.H. Hassabou, C. Palaniappan, M. Spinnler, J. Blumenberg, R. Velraj, Experimental investigation on phase change material based thermal storage system for solar air heating applications, *Solar Energy*, 88 (2013) 144-153.
- [53] A.F. Ismail, A.S. Abd Hamid, A. Ibrahim, H. Jarimi, K. Sopian, Performance Analysis of a Double Pass Solar Air Thermal Collector with Porous Media Using Lava Rock, *Energies*, 15 (2022) 905.
- [54] A. Tiwari, M. Sodha, A. Chandra, J. Joshi, Performance evaluation of photovoltaic thermal solar air collector for composite climate of India, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90 (2006) 175-189.
- [55] J.K. Tonui, Y. Tripanagnostopoulos, Performance improvement of PV/T solar collectors with natural air flow operation, *Solar energy*, 82 (2008) 1-12.
- [56] S. Chouicha, A. Boubekri, D. Mennouche, M.H. Berrbeuh, Solar drying of sliced potatoes. An experimental investigation, *Energy Procedia*, 36 (2013) 1276-1285.
- [57] <https://www.journaldunet.fr/patrimoine/guide-des-finances-personnelles/1146972-prix-des-metaux,in23>.