

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté des Sciences de L'Ingénieur
Département Génie Mécanique

Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en :

Filière : Energie Renouvelable
Option: Energie Renouvelable en Mécanique

THEME

Etude des performances d'un capteur solaire à air à paroi lisse et rugueuse appliqué au séchage des aliments

Présenté par :

GOURI Farouk

BENHAMOUD Soumeya

Promoteur : M^r M. HACHEMI

Jury: M^r S.OUALI

M^r N.HIMRANE

Promotion 2018- 2019

Remerciement

Je remercie ALLAH de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

J'exprime mes gratitudes, mes reconnaissances et mes sincères remerciements à Mr. HACHEMI.M pour m'avoir aidé tout le long de mon projet.

Merci encore a tous...

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail :
A mes chers parents que dieu les garde
A mes frères et mes sœurs
A toute ma famille
A mon encadreur Ms. HACHEMI.M
A tous mes collègues et mes amis partout
A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science
et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien
et la prospérité de l'humanité.*

SOMMAIRE

<i>Introduction générale.....</i>	<i>1</i>
I. : GENERALITES SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES.....	3
I.1 <i>Historique sur l'énergie solaire :</i>	<i>3</i>
I.2 <i>.Introduction :</i>	<i>4</i>
I.3 <i>définition d'énergie renouvelable :</i>	<i>4</i>
I.4 <i>.Différents types d'énergies renouvelables :</i>	<i>5</i>
I.4.1 <i>Énergie hydraulique :</i>	<i>5</i>
I.4.2 <i>L'éolienne :</i>	<i>5</i>
I.4.3 <i>La biomasse :</i>	<i>6</i>
I.4.4 <i>La géothermie :</i>	<i>7</i>
I.4.5 <i>L'énergie solaire :</i>	<i>7</i>
I.5 <i>Plan de l'utilisation de l'énergie solaire.....</i>	<i>8</i>
I.6 <i>définition du capteur solaire :</i>	<i>9</i>
I.6.1 <i>capteur thermique :</i>	<i>9</i>
I.6.2 <i>.capteur photovoltaïque :</i>	<i>9</i>
I.7 <i>. Les paramètres influant sur le fonctionnement d'un capteur solaire :</i>	<i>14</i>
I.7.1 <i>Les paramètres internes :</i>	<i>14</i>
I.7.2 <i>Les paramètres externes :</i>	<i>15</i>
I.8 <i>Conclusion.....</i>	<i>16</i>
II. :DESCRIPTION DES SECHOIRS SOLAIRES A AIR.	17
II.1 <i>Introduction :</i>	<i>17</i>
II.2 <i>.principe de fonctionnement de capteur plan :</i>	<i>17</i>
II.3 <i>. Caractéristiques techniques des différents composants :</i>	<i>18</i>
II.3.1 <i>L'absorbeur :</i>	<i>18</i>
II.3.2 <i>.La couverture transparente :</i>	<i>19</i>
II.3.3 <i>L'isolant :</i>	<i>19</i>
II.3.4 <i>. Le fluide caloporteur :</i>	<i>19</i>
II.4 <i>. Différents types des capteurs solaires plans à air :</i>	<i>20</i>
II.4.1 <i>Capteurs à absorbeur plan (lisse) :</i>	<i>20</i>
II.4.2 <i>Capteurs à absorbeur perméable :</i>	<i>20</i>
II.4.3 <i>Capteurs à absorbeur à géométrie variable(rugueuse) :</i>	<i>21</i>

II.5	<i>Applications des capteurs solaires plans à air :</i>	21
II.5.1	<i>Chauffages et climatisation des habitations</i>	21
II.5.2	<i>Le séchage :</i>	22
II.6	<i>Conclusion</i>	23
III.	<i>:GENERALITES SUR LE SECHAGE</i>	24
III.1	<i>Introduction :</i>	24
III.2	<i>Définition du séchage :</i>	24
III.3	<i>Principes du séchage :</i>	25
III.4	<i>Vitesse du séchage :</i>	25
III.5	<i>Les caractéristiques de l'air de séchage (Terminologie de séchage) :</i>	25
III.5.1	<i>Humidité :</i>	25
III.5.2	<i>Taux d'humidité :</i>	25
III.5.3	<i>États de siccité :</i>	25
III.5.4	<i>Taux d'humidité à l'équilibre :</i>	26
III.6	<i>les modes de sechage :</i>	26
III.7	<i>.Le choix du procédé de séchage :</i>	28
III.8	<i>.classification des séchoirs solaires :</i>	28
III.8.1	<i>Séchoir solaire direct:</i>	29
III.8.2	<i>.Séchoirs solaires indirects :</i>	29
III.9	<i>Conclusion</i>	31
IV.	<i>: DESCRIPTION DU SECHOIR</i>	32
IV.1	<i>Introduction :</i>	32
IV.2	<i>.Description détaillée du dispositif (Séchoir) utilisé :</i>	32
IV.3	<i>Irradiation Solaire :</i>	35
IV.4	<i>Flux Solaire appliqué :</i>	38
IV.5	<i>Définition du type d'écoulement d'air à l'intérieur du capteur :</i>	40
IV.6	<i>.Séchage de pomme de terre:</i>	42
IV.7	<i>Conclusion :</i>	46
V.	<i>: SIMULATION ET RESULTATS</i>	47
V.1	<i>. Introduction à la simulation :</i>	47
V.2	<i>Présentation:</i>	48
V.2.1	<i>. Domaines :</i>	48
V.2.2	<i>Maillage et volume de contrôle :</i>	52

V.2.3	<i>Jeux des données :</i>	53
V.3	<i>Simulation :</i>	58
V.3.1	<i>Introduction :</i>	58
V.3.2	<i>Capteur Lisse (sans rugosité) :</i>	59
V.3.2.1	<i>Résultats pour différents flux de chaleur de la journée (Capteur lisse) :</i>	59
V.3.2.2	<i>Résumé des Résultats pour le capteur lisse (sans rugosité) :</i>	69
V.3.3	<i>Capteur avec rugosité sur la surface de l'absorbeur :</i>	75
V.3.3.1	<i>Géométrie du volume de contrôle :</i>	75
V.3.3.2	<i>Maillage et volume de contrôle :</i>	76
V.3.3.3	<i>. Résultats de différents flux de chaleur de la journée (Capteur rugueux) :</i>	78
V.3.3.4	<i>Résumé des résultats pour le capteur rugueux :</i>	87
V.4	<i>Etude comparative :</i>	92
V.4.1	<i>Température moyenne à la sortie :</i>	92
V.4.2	<i>Température moyenne à l'intérieur du capteur</i>	93
V.4.3	<i>Vitesse moyenne sur le volume de contrôle :</i>	94
V.4.4	<i>Rendement thermique :</i>	94
V.4.5	<i>Conclusion :</i>	97
	<i>Conclusion générale :</i>	98

Liste Des Figures

Figure I.1 : Exemple sur l'énergie hydraulique.

Figure I.2 : Eolienne à axe horizontale.

Figure I.3 : Exemple sur l'énergie biomasse.

Figure I.4 : Exemple sur l'énergie géothermie.

Figure I.5 : Maison passive.

Figure I.6 : différent filières d'énergie renouvelable.

Figure I.7 : capteur solaire.

Figure I.8 : Plan de l'utilisation de l'énergie solaire.

Figure I.9 : Capteur solaire thermique.

Figure I.10 : Capteur solaire plan.

Figure I.11: Capteur solaire parabolique.

Figure I.12 : Les composants principaux d'un capteur solaire plan.

Figure I.13 : Capteurs solaires thermique à eau.

Figure II.1 : Schéma de principe d'un capteur solaire plan.

Figure II.2: Les types génériques principaux d'écoulements.

Figure II.3 : différents type d'absorbeur.

Figure II.4 : Chauffages des habitations.

Figure II.5 : séchage solaire.

Figure III.1 : Les différents échanges thermiques dans un capteur plan.

Figure. IV.1 : vue de profile du séchoir solaire.

Figure. IV.2: Schéma représente capteur solaire à simple passage.

Figure. IV.3 : Fractions du rayonnement solaire global.

Figure. IV.4 : *quantité du rayonnement solaire qui atteint la surface de la Terre est l'épaisseur d'atmosphère que le rayonnement doit traverser.*

Figure. IV.5 : *Puissance solaire pour différents ciels.*

Figure. IV.6 : *Evolution du flux solaire durant la journée.*

Figure. IV.7 : *onglet d'écoulement turbulent sur le logiciel.*

Figure V.1 : *Interface du simulateur Comsol multiphysics 5.*

Figure V.2 : *Domaines du capteur.*

Figure V.3 : *Contenus du verre.*

Figure V.4 : *Contenus de l'air.*

Figure V.5 : *Contenus de l'Aluminium.*

Figure V.6 : *Contenus de la mousse.*

Figure V.7 : *Isolation thermique dans le capteur.*

Figure V.8 : *Contributeurs lors du maillage.*

Figure V.9 : *Maillage du capteur lisse.*

Figure V.10 : *Ligne de coupe horizontale $Y=0.01$ m.*

Figure V.11 : *Ligne de coupe horizontale $Y = 0.05$ m.*

Figure V.12 : *ligne de coupe horizontale $Y = 0.09$ m.*

Figure V.13 : *Ligne de coupe verticale $x=1$ m.*

Figure V.14 : *Ligne de coupe verticale $x = 2$ m.*

Figure V.15 : *Répartition de la vitesse le long du capteur (flux 100 W/m^2).*

Figure V.16 : *Profile de vitesse à la sortie du capteur (flux 100 W/m^2).*

Figure V.17 : *Courbe d'évolution de la température le long du capteur (flux de 100 W/m^2).*

Figure V.18 : *Répartition de la vitesse (flux de chaleur 500 W/m^2).*

Figure V.19 : *Profile de vitesse (flux solaire 500 W/m^2).*

Figure V.20: Evolution de la température (flux 500 W/m²).

Figure V.21: Répartition de la vitesse pour un flux solaire 950 W/m².

Figure V.22 : Courbe de vitesse à la sortie du capteur (flux solaire 950 W/m²).

Figure V.23 : Courbes des Températures (Flux Solaire : 950W/m²).

Figure V.24 : Evolution la température moyenne à la sortie pour le capteur lisse.

Figure V.25 : Température moyenne à l'intérieur du capteur pendant la journée.

Figure V.26 : Vitesse moyenne à l'intérieur du capteur pendant la journée.

Figure V.27 : Géométrie des rugosités imposées au capteur.

Figure V.28: Maillage complet capteur avec rugosité.

Figure V.29 : Maillage du capteur avec rugosité entre ($x = 0$ m et $x = 1$ m).

Figure V.30 : Maillage du capteur avec rugosité entre ($x = 1$ m et $x = 2$ m).

Figure V.31: Maillage détaillé aux alentours des obstacles.

Figure V.32 : Répartition de la vitesse sur le volume de contrôle.

Figure V.33 : Vitesse à la sortie (ligne de coupe verticale $x = 2$ m).

Figure V.34 : Courbe de vitesse (Ligne de coupe horizontale $y = 0,05$ m).

Figure V.35 : Courbes des températures pour un capteur rugueux (flux solaire 100 W/m²).

Figure V.36 : Température à la sortie (flux solaire 100 W/m²).

Figure V.37 : Répartition de la vitesse de l'air sur le volume de contrôle (500 W/m²).

Figure V.38 : Vitesse à la sortie (500 W/m²).

Figure V.39: Vitesse (horizontale $Y = 0,05$ m).

Figure V.40: Courbe de température (500W/m²).

Figure V.41: La température à la sortie du capteur (500 W/m²).

Figure V.42: Répartition des vitesses (Flux solaire 950 W/m²).

Figure V.43: Vitesse à la sortie (950 W/m²).

Figure V.44 : Vitesse $Y = 0,05$ m, 950 W/m²).

Figure V.45: Evolution de la température (950W/m²).

Figure V.46: Température à la sortie (950 W/m²).

Figure V.47 : Courbe de température à la sortie capteur rugueux.

Figure V.48 : Température moyenne à l'intérieur du capteur (rugueux) pendant la journée.

Figure V.49 : Vitesse moyenne à l'intérieur du capteur pendant la journée.

Figure V.50 : Comparaison entre l'évolution de la température moyenne à la sortie d'un capteur lisse et rugueux pendant la journée.

Figure V.51 : Comparaison entre l'évolution de la température moyenne à l'intérieur d'un capteur lisse et rugueux pendant la journée.

Figure V.52: Comparaison entre l'évolution de la vitesse moyenne à l'intérieur d'un capteur lisse et rugueux pendant la journée.

Figure V.53: Evolution du rendement thermique suivant le flux solaire pour le capteur rugueux et lisse.

Liste des tableaux

Tableau. IV.1 : dimensionnement de capteur pour de bonnes conditions de séchage d'un produit agroalimentaire (pomme de terre).

Tableau. IV.2 : l'évolution du flux de chaleur le long de la journée.

Tableau. IV.3 : quelques travaux sur le séchage thermique de pomme de terre.

Tableau V.1 : l'évolution de la température moyenne de l'air asséchant à la sortie du capteur lisse pendant la journée.

Tableau V.2 : l'évolution de la température et la vitesse moyenne de l'air asséchant à l'intérieur du capteur lisse pendant la journée.

Tableau V.3 : l'évolution de la température moyenne de l'air asséchant à la sortie du capteur rugueux pendant la journée.

Tableau V.4 : l'évolution de la température et la vitesse moyenne de l'air asséchant à l'intérieur du capteur lisse pendant la journée.

Tableau V.5 : Rendement thermique des deux types de capteurs pour les flux solaire imposés.

Nomenclature

<i>T</i>	<i>Température (°C)</i>
<i>μ</i>	<i>Viscosité dynamique de l'air (kg/m·s)</i>
<i>ρ</i>	<i>Masse volumique de l'air (kg/m³)</i>
<i>Re</i>	<i>Nombre de Reynolds</i>
<i>D</i>	<i>Diamètre du volume de contrôle qui l'air (m)</i>
<i>V</i>	<i>Vitesse (m/s)</i>
<i>η</i>	<i>Efficacité thermique (Rendement)</i>
<i>Qu</i>	<i>Quantité de chaleur utile collectée par le capteur (J/s)</i>
<i>I</i>	<i>Irradiation solaire globale incidente sur la surface du capteur (W/m²)</i>
<i>Ac</i>	<i>Surface du capteur (m²)</i>
<i>Cp</i>	<i>Chaleur massique à pression constante de l'air (J/kg.K)</i>
<i>T_{out}</i>	<i>Température moyenne à la sortie du capteur (°C)</i>
<i>T_{in}</i>	<i>Température moyenne à l'entrée du capteur (°C)</i>
<i>Q_m</i>	<i>Débit massique de l'air à l'intérieur du capteur (kg/s)</i>
<i>S</i>	<i>Section de passage de l'air dans le capteur (m²)</i>
<i>α</i>	<i>Coefficient des pertes thermiques du capteur</i>

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale :

L'énergie solaire est une source propre, disponible, inépuisable et c'est la plus dominante de toutes les énergies renouvelables. Elle est à l'origine de presque toutes les sources d'énergie utilisées par l'homme et dont l'importance a poussé les scientifiques à mener de multiples recherches dans ce domaine.

Avec une moyenne dépassant les 2000 heures d'insolation annuellement sur la quasi-totalité du territoire national et pouvant atteindre les 3900 heures (haut plateaux et Sahara), l'Algérie dispose du potentiel solaire le plus élevé de la région du MENA (moyen orient et nord-africain) et c'est l'un des plus importants au monde (166972 TWh/An).

Parmi les secteurs qui utilisent l'énergie solaire : le secteur agroalimentaire dans la production de fruits et légumes séchés. En effet, le séchage des produits agroalimentaires est un procédé pratique depuis longtemps dans le but de réduire leur teneur en eau ce qui permettrait de les stocker dans des meilleures conditions. En outre, les récoltes se font généralement saisonnièrement donc il est nécessaire de conserver les produits pour leur utilisation tout au long de l'année en permettant de convertir des denrées périssables en produits stabilisés sur de longues périodes.

C'est dans un souci d'économie d'énergie que l'utilisation des séchoirs solaires tend à se répandre principalement dans les pays en voie de développement. En effet ceux-ci offrent plusieurs avantages parmi lesquels on peut citer leur simplicité et leur bas prix de revient.

Cependant en Algérie, le séchage solaire et le dimensionnement des séchoirs demeurent au stade expérimental [1].

Le séchoir solaire est destiné pour fonctionner en mode convectif pour le séchage solaire des produits agro-alimentaires locaux afin d'améliorer leur qualité, d'augmenter leur durée de vie et de faciliter leur transport tout en utilisant la technique du séchage solaire, qui allie protection de l'environnement, maîtrise de l'énergie et utilisation d'une énergie naturelle renouvelable qui est le soleil.

Le présent travail n'est pas une étude de dimensions d'un séchoir solaire, au fait elle est orientée vers le capteur thermique qui précède la chambre de séchage dans tous les dispositifs de séchage indirect.

INTRODUCTION GENERALE

Le but de ce travail est la comparaison des performances de deux capteurs thermiques l'un avec et l'autre sans rugosité sur la surface de son absorbeur, pour le but de séchage de la pomme de terre.

On prendra le soin de conditionner l'air chaud à la sortie du capteur pour un bon séchage du produit agro-alimentaire (pomme de terre).

C'est dans cette optique que ce travail a été orienté, notre mission a comme tâche de comparer les deux types capteurs par le biais d'un simulateur software pour avoir des meilleures conditions de séchage pour nos produits, cinq chapitres composent ce mémoire :

Nous avons consacré le premier chapitre pour présenter des généralités sur les énergies renouvelables et l'importance du gisement solaire sur le territoire national.

Dans le deuxième chapitre nous allons parler des différents capteurs solaires, et nous avons détaillé le capteur solaire plan à air et ses composants, afin d'accéder à l'étude théorique de ce dernier.

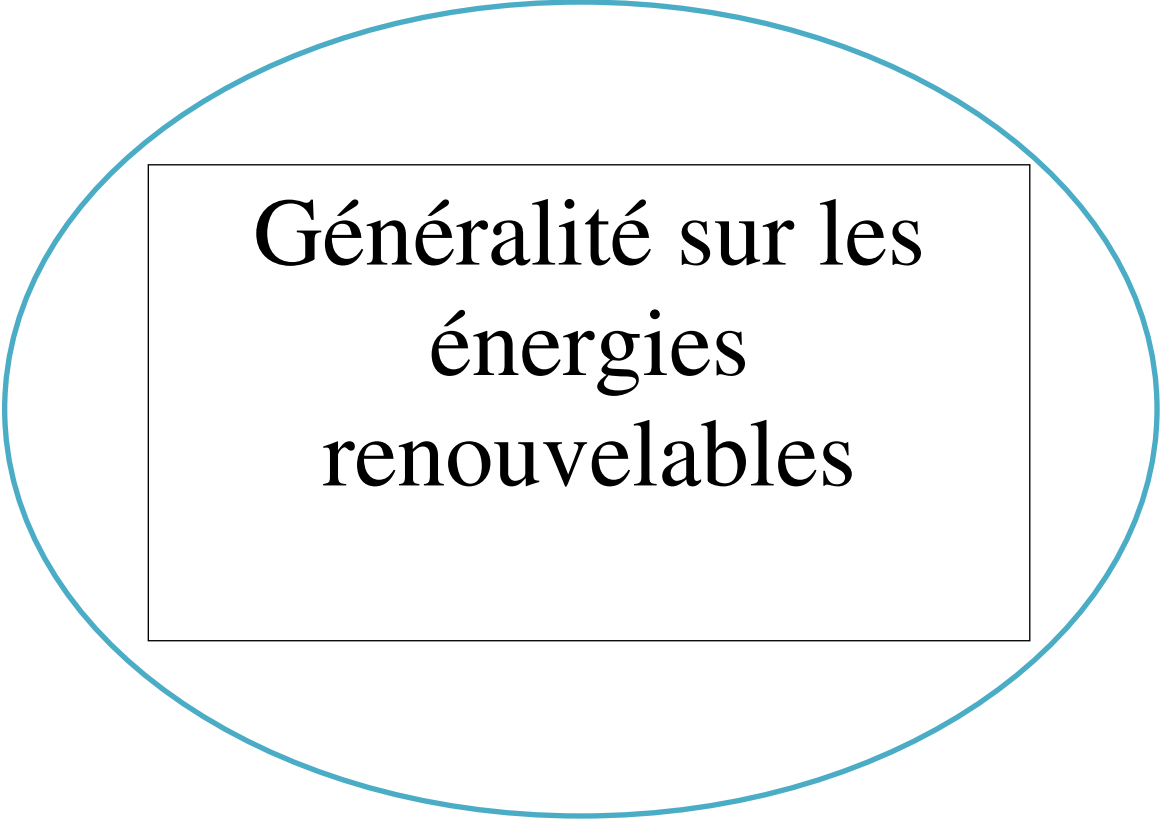
Le troisième chapitre est consacré à l'exposition des différents paramètres physiques qui interviennent durant l'opération du séchage et la classification de tous les types des séchoirs solaires.

Dans le dernier chapitre ; nous allons présenter le séchoir en question et les différents facteurs qui jouent un rôle important pour son bon fonctionnement.

Le dernier chapitre comportera la simulation avec discussion des résultats obtenus pour chaque type de capteur.

Le mémoire se termine par une conclusion générale rassemble une synthèse de différents résultats trouvés pour ce type de capteur, quelques perspectives qui pourraient constituer une suite à notre recherche.

Chapitre 1



Généralité sur les énergies renouvelables

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES

I. Généralités sur l'énergie

I.1. Historique sur l'énergie solaire :

-La première utilisation de l'énergie solaire serait due à Archimède incendiant des vaisseaux romains à Syracuse quelques siècles avant J.C. le véritable essor des études scientifique visant l'utilisation de l'énergie dite « solaire » débute après 1950,et s'est intensifié de puis la dernière décennie les précurseurs français les plus connus dans ce domaine sont :

-A.Mouchot actionnant une imprimerie à partir de vapeur produite dans un capteur à concentration conique ;

-F.Trombe connu principalement pour études menées sur le four solaire de mont lois (Pyrénées orientales) en France, et pour le mur qui porte son nom.

L'énergie solaire a connu un moment d'effervescence en Europe et dans le monde lors des crises pétrolières successives dans les années 80 puis il ya eu une désaffection profonde et brutale de nos pays pour ces énergies.

Il s'avère que le renouveau s'annonce à travers les contraintes environnementales (effet de serre planétaire et pollutions de toutes sortes), ce qui provoque un regain d'intérêt pour l'énergie solaire, mais avec sans doute une approche révisée.

Nos deux universités ont su garder une activité de veille dans le domaine du génie énergétique appliqué au solaire. Nous proposons ici un panorama assez complet de l'énergie solaire thermique surtout en vue d'application durable décentralisée ou cette énergie flux a un rôle à jouer.

L'énergie solaire provient de la fusion d'hydrogène en hélium au sein du noyau de notre étoile. Deux cycles ont été imaginés par les astrophysiciens pour décrire les étapes conduisant à cette fusion.

L'énergie solaire atteignant une surface donnée dépend directement de l'orientation de celle-ci et de la position du soleil. Pour récupérer un maximum d'énergie en provenance du soleil, il est d'orienter au mieux le récepteur par rapport aux rayons lumineux. La connaissance de la position du soleil en fonction du temps donc fondamentale. [1]

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES

1.2. Introduction :

La consommation de l'énergie mondiale dans notre pays ne cesse d'augmenter. La grande partie de l'énergie consommée provient des combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon, etc.) dont l'utilisation massive peut conduire à l'épuisement de ces réserves et menace réellement l'environnement. Cette menace c'est manifesté principalement à travers la pollution et le réchauffement global de la terre par effet de serre.

Ainsi l'augmentation brutale du prix du pétrole survenue en 1973 a conduit une première fois l'homme à s'intéresser à d'autres sources d'énergies inépuisables dites :

Énergies renouvelables.

Les énergies renouvelables (aussi appelées énergies vertes) correspondent à des sources d'énergie qui sont non seulement issues de phénomènes naturels, mais qui se régénèrent également par elles-mêmes, à l'aide de processus naturels indépendants des humains. Le soleil et la chaleur interne de la Terre font partie des sources d'énergie naturelles les plus importantes. Le fait qu'une ressource soit renouvelable ou non dépend aussi de la vitesse à laquelle celle-ci est consommée. Prenons par exemple, le bois tant que le nombre d'arbres coupés n'excède pas le nombre d'arbres qui poussent, le bois peut être considéré comme étant une ressource renouvelable. La question n'est donc pas seulement d'utiliser des énergies vertes, mais aussi de ne pas consommer l'énergie de façon abusive. [2]

1.3. Définition d'énergie renouvelable :

Les énergies renouvelables se sont des sources d'énergies dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain. Elles proviennent de phénomènes naturels cycliques ou constants induits par les astres. [3]

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES

1.4. Différents types d'énergies renouvelables :

1.4.1.Énergie hydraulique :

Les états utilisent l'eau comme source d'énergie depuis des milliers d'années. Environ les deux tiers de la superficie de la terre sont couverts d'eau. Les vents qui soufflent à la surface des océans et des rivières créent des vagues, et des courants aquatiques, la « densité énergétique » est suffisante pour produire de l'électricité de manière rentable, Les marées sont une source d'énergie renouvelable gratuite, disponible 365 jours par année.



Figure I.1 : Exemple sur l'énergie hydraulique. [2]

Mais le plus important que cette énergie est propre et elle ne laisse pas ni de gaz, ni de production de déchets toxiques, et elle représente 23% de la part des énergies renouvelables.

1.4.2.L'éolienne :

Le vent est une source intermittente d'énergie puisqu'il ne souffle pas toujours à la vitesse requise pour produire de l'électricité. En général, les éoliennes captent en moyenne entre 15 et 40 % du total de la capacité nominale de production d'électricité de l'éolienne. Dans la plupart des cas, l'électricité produite par les éoliennes, du moins les éoliennes d'utilité publique, est acheminée au réseau et devient une partie de l'ensemble de l'électricité prête à être mise en service. [4]

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES

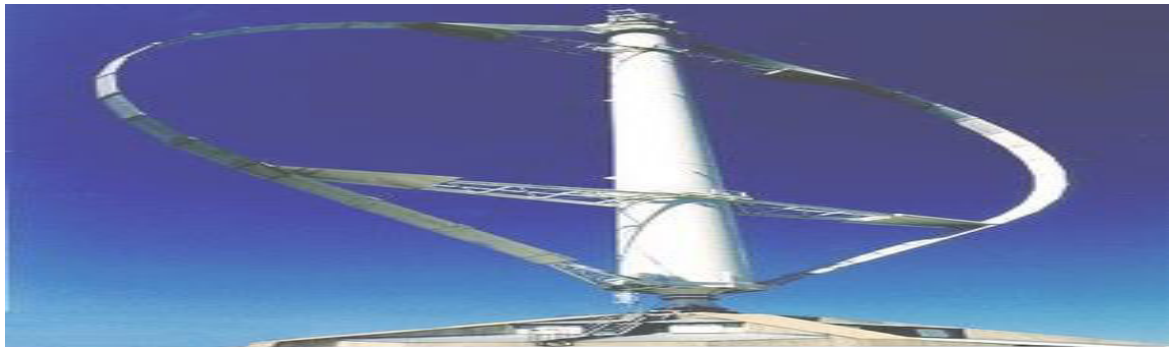
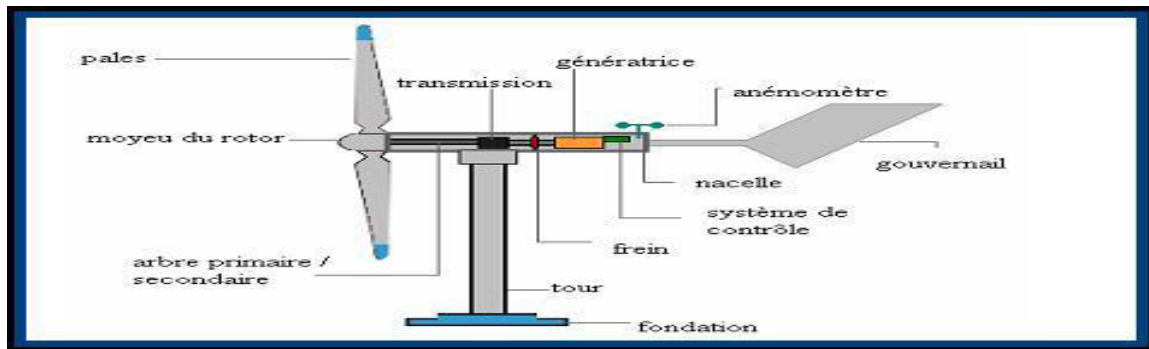


Figure I.2. Eolienne à axe horizontale. [4]

1.4.3. La biomasse :

La « biomasse » est un terme général qui fait référence aux matières organiques et qui englobe les plantes, les arbres, les résidus agricoles tels que les tiges de maïs et la paille de blé, les déchets organiques des municipalités, et les résidus des opérations forestières, y compris la sciure de bois, les rémanents d'exploitation et les résidus de sciage. Il y a plusieurs façons de transformer la biomasse en chaleur et en électricité, dont la combustion directe, la digestion anaérobie, la cuisson simultanée, la pyrolyse et la gazéification.



Figure I.3 : Exemple sur l'énergie biomasse. [2]

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES

1.4.4. La géothermie :

Les systèmes qui utilisent l'énergie terrestre et qui transfèrent la chaleur de zones situées à proximité de la surface de la terre pour chauffer de l'air et de l'eau ne produisent pas d'émissions nocives et leur exploitation est relativement bon marché, tout dépendant de la façon dont l'électricité pour les alimenter est produite.

En outre, L'énergie géothermique est une forme d'énergie constante plutôt qu'intermittente. [2]

L'énergie géothermique est une forme d'énergie thermique qui crée dans la terre.

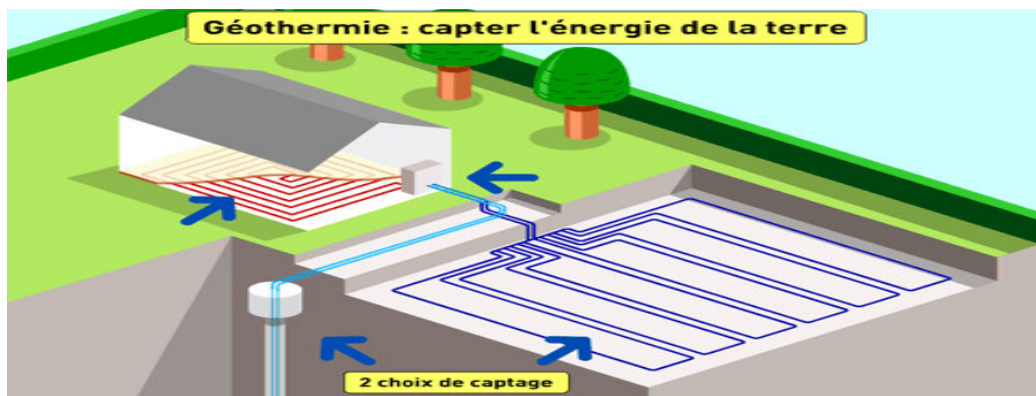


Figure I.4 : Exemple sur l'énergie géothermique. [2]

1.4.5. L'énergie solaire : [5], [2]

L'énergie solaire est l'énergie diffuse qui dispense le soleil. des rayonnement, direct ou indirecte grâce a divers procédés elle peut être transformée en une autre forme d'énergie utile pour l'activité humaine, notamment en chaleur, en électricité ou la biomasse. Par extension, l'expression ENERGIE Solaires souvent employée pour désigne électricité ou l'énergie thermique obtenu a partir de cette dernière.

Le soleil est une source abondante et écologique d'énergie renouvelable.

Aujourd'hui, nous captons l'énergie solaire pour chauffer les maisons et l'eau, et pour produire de l'électricité au moyen de trois différentes méthodes et technologies sont : l'énergie solaire passive, l'énergie solaire active et l'énergie photovoltaïque.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES

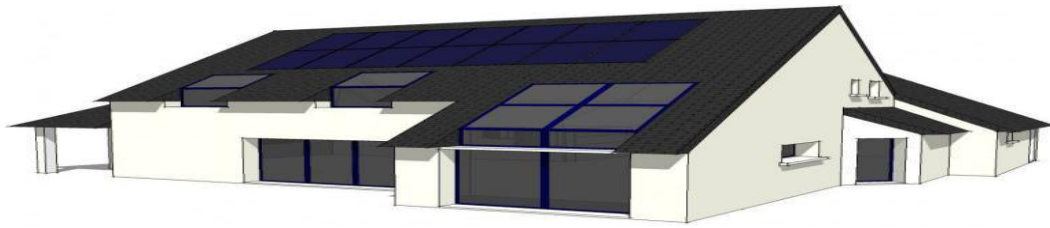


Figure I.5 : Maison passive.

1.5. Plan de l'utilisation des énergies renouvelables :

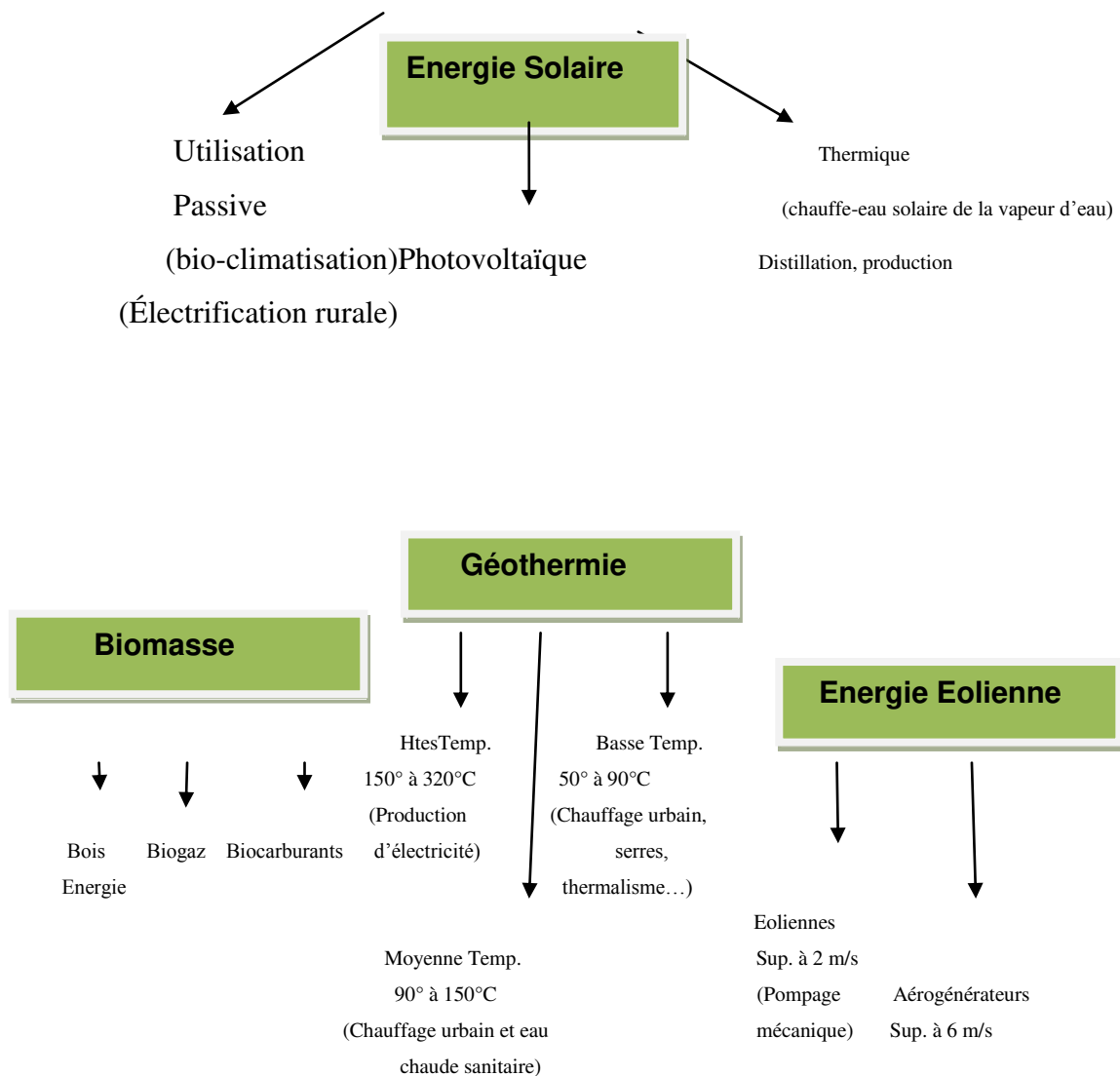


Figure I.6 : différent filières d'énergie renouvelable. [6]

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES

1.6. Définition du capteur solaire :

Le capteur solaire transforme l'énergie du soleil gratuite et disponible. Une énergie utile produire de l'eau chaude ou de l'électricité. Un capteur solaire ou panneau solaire est un élément d'une installation solaire destiné à recueillir l'énergie solaire pour le convertir en énergie thermique et le transférer à un fluide caloporteur (air, eau) ou en énergie électrique.



Figure I.7:capteur solaire.

Nous distinguons principalement deux types de capteurs solaires:

1.6.1. Capteur thermique :

Le solaire thermique consiste à utiliser le rayonnement solaire ou en le transformant en énergie thermique. Il se présente de différentes façons. La production de cette énergie peut être soit utilisée directement ou indirectement.

1.6.1. Capteur photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'électricité produite par transformation d'une partie de rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES

Plan de l'utilisation de l'énergie solaire :

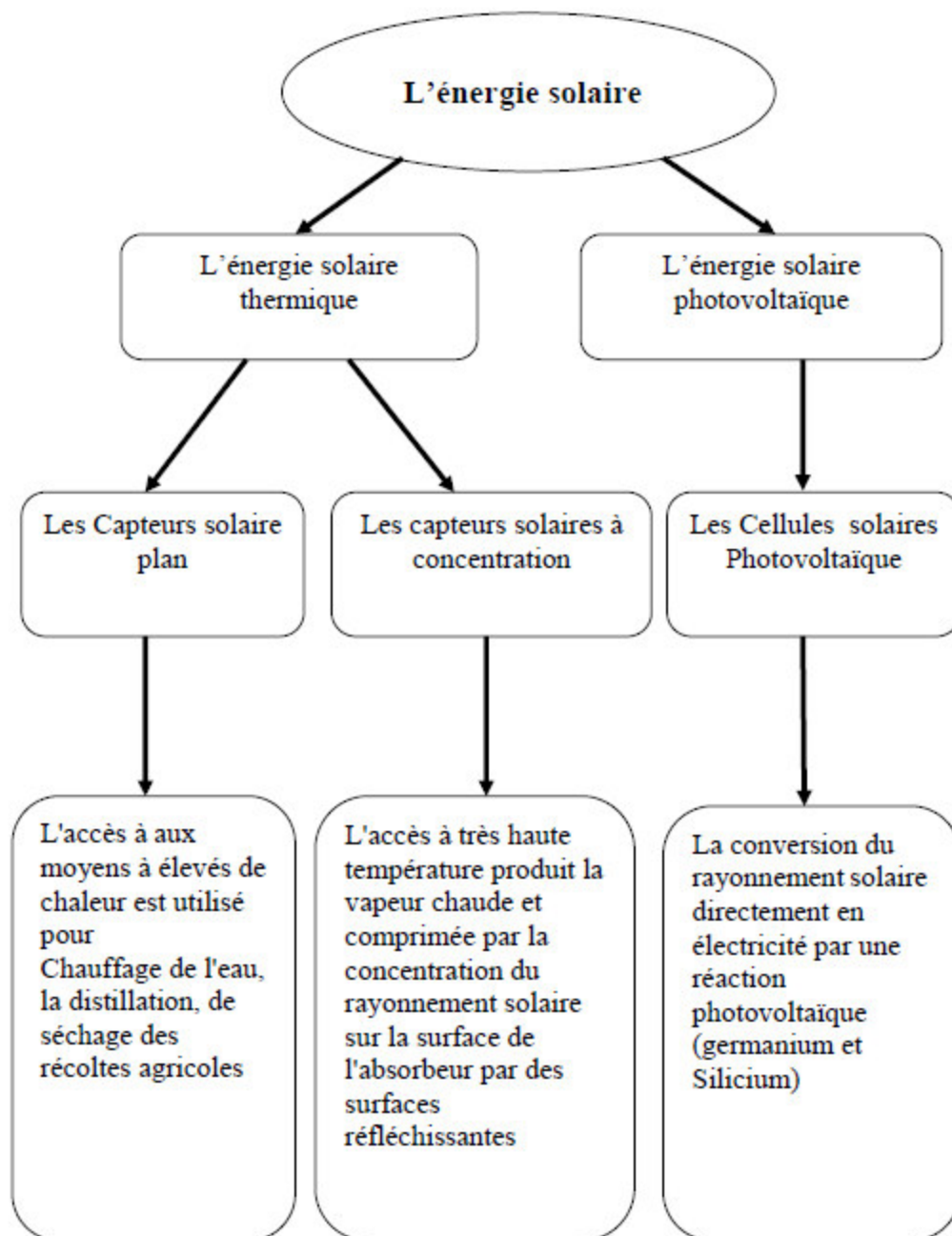


Figure I.8 : Plan de l'utilisation de l'énergie solaire.

I.6.1.a. Capteurs solaires thermiques

Présentation :

Les capteurs solaires thermiques sont des appareils qui transforment l'énergie apportée par le rayonnement solaire en énergie thermique sous forme de chaleur et la

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES

transmettent à un fluide caloporteur (air ou liquide). [7]

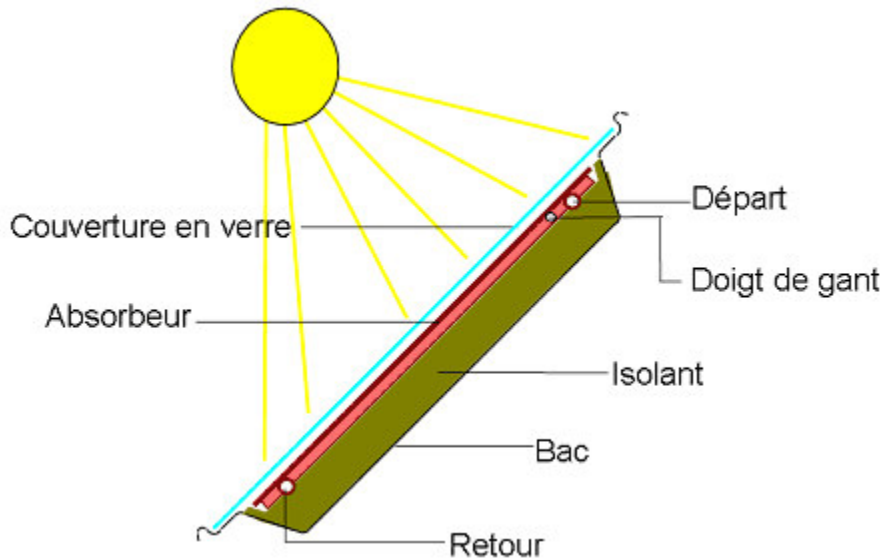


Figure I.9:Capteur solaire thermique. [7]

I.6.1.b. Les différents types des capteurs thermiques :

Les capteurs solaires sont caractérisés par leur mouvement (stationnaire, à poursuite simple et à poursuite double) et par leur température opératoire. Les capteurs stationnaires ont une position du soleil dans le ciel. On en distingue trois types :

- **Capteur solaire plan :**

Ces capteurs peuvent atteindre des températures de chauffe de 50 à 80 °C lorsque les déperditions thermiques sont limitées en face avant du capteur par une protection (vitre, plexiglas, polycarbonate, etc.).



Figure I.10 : Capteur solaire plan. [7]

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES

- **Capteur solaire parabolique composé (a concentration) :**

Ces capteurs sont plutôt utilisés dans le contexte d'applications industrielles, pour l'obtention de températures supérieures à 120 °C. La concentration du rayonnement solaire permet de diminuer la surface de réception et donc de minimiser l'influence des pertes thermiques du récepteur.

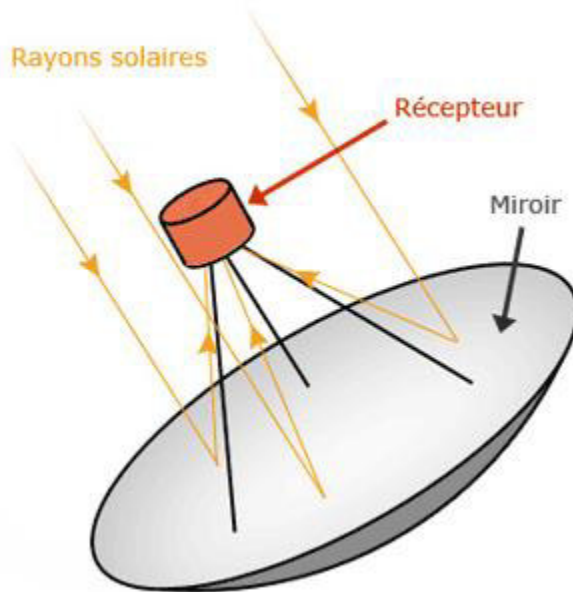


Figure I.11: Capteur solaire parabolique.

I.6.1.c. Les principaux composants d'un capteur solaire plan :

Le capteur solaire comprend les éléments suivants :

- ☐ ☐ Le corps opaque qui absorbe le rayonnement solaire en s'échauffant
- ☐ ☐ Un système de refroidissement par le fluide caloporteur
- ☐ ☐ Un isolant thermique (dos et côtés non exposés)
- ☐ ☐ Une couverture transparente (face avant, exposée au rayonnement) qui assure l'effet de serre
- ☐ ☐ Un coffrage étanche à l'eau et un système de support mécanique de l'ensemble.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES

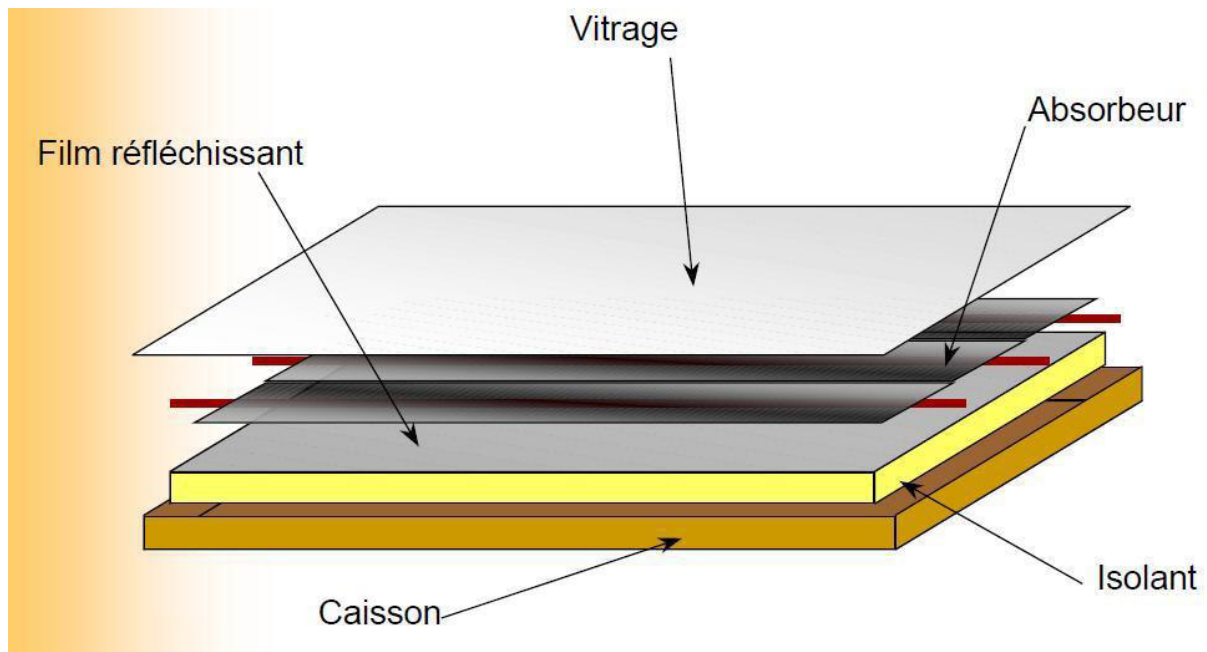


Figure I.12 : Les composants principaux d'un capteur solaire plan. [7]

I.6.1.d. Classification des capteurs solaires plans :

On peut classer les capteurs selon le fluide de travail utilisé [8] :

On peut trouver :

- **Des capteurs solaires à air :**

Ce type de capteurs s'adapte aux appareils de chauffage à air pour le séchage des produits agro-alimentaires, et le chauffage des locaux.

- **Des capteurs solaires à eau :**

Ils s'adaptent aux appareils de chauffage à liquide, y compris ceux dont le liquide entre en ébullition pendant le chauffage (la production de l'eau chaude sanitaire).

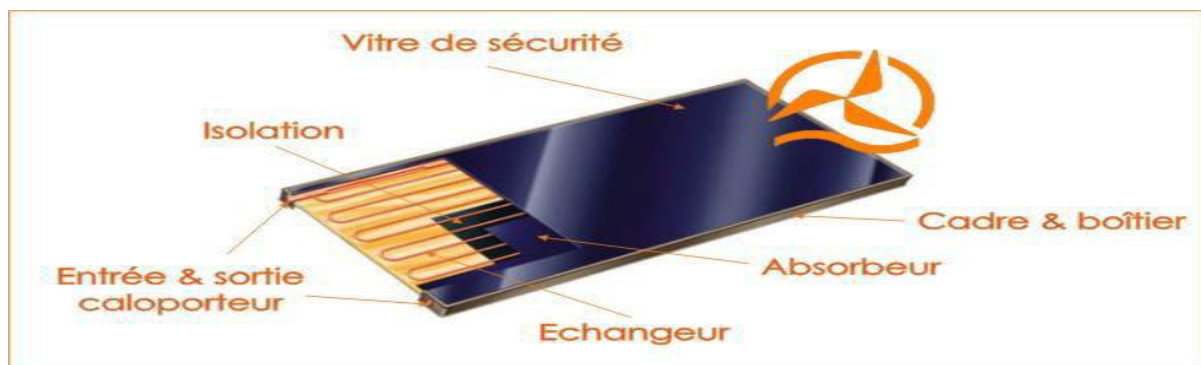


Figure I.13 : Capteurs solaires thermique à eau. [7]

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES

I.6.1.e. L'orientation des capteurs :

Les capteurs solaires peuvent être :

☐ Des capteurs fixes :

Ces capteurs ne bougent pas dans la journée, ce qui est le cas des chauffe-eaux solaires domestiques, et présentent les propriétés suivantes :

- La simplicité et la fiabilité.
- Un faible entretien.
- Ils peuvent faire partie intégrante d'une construction (toit ou mur).

L'angle d'incidence du rayonnement solaire sur l'absorbeur n'est pas très longtemps chaque jour à son maximum d'efficacité.

☐ Des capteurs à poursuite :

Le capteur solaire peut être muni d'un dispositif de guidage automatique dans la direction de provenance du flux lumineux, ce qui va améliorer le rendement du capteur.

I.7. Les paramètres influant sur le fonctionnement d'un capteur solaire :

Le rendement d'un capteur solaire plan est influencé par différents paramètres.

On Distingue [9], [10] :

I.7.1. Les paramètres internes :

☐ La Couverture.

☐ L'absorbeur.

☐ L'isolants.

☐ ☐ ☐ Forme et diamètres des pipes : Un autre facteur influe aussi sur l'efficacité du capteur, c'est bien, la tuyauterie, qui est généralement soudée à la partie inférieure de l'absorbeur et des fois fait partie de l'absorbeur, sa forme diffère d'un capteur à un autre. Parmi ces différentes formes, la forme sinusoïdale est la plus efficace, puisque elle offre la plus grande surface d'échange et réduit les zones mortes.

☐ ☐ ☐ **Le fluide caloporteur** : Le fluide caloporteur est un moyen de transfert de la chaleur collectée par absorbeur à

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES

Un fluide d'échange thermique appelé fluide de travail.

□□ **L'orientation et l'inclinaison du capteur :** L'influence de l'orientation d'un capteur et de son inclinaison avec l'horizontal est due au fait que ces deux dernières changent le rayonnement solaire atteignant la surface du capteur.

La meilleure orientation du capteur solaire est de l'orienter directement au sud

L'angle optimum d'inclinaison est appliqué à une variété de systèmes, tels que, les capteurs plans ou paraboliques, les panneaux photovoltaïques, maisons solaires et serres installées dans une position fixe. Cet angle joue un rôle important en augmentant la collection d'énergie par les capteurs solaires

I.7.2. Les paramètres externes :

□□ **Obstacles :** Il s'agit avant tout des constructions et de la végétation, leur position dans la trajectoire solaire peut créer sur les surfaces captatrices une ombre nuisible au bon fonctionnement de l'installation.

□□ **Rayonnement solaire :** L'efficacité du capteur solaire est influée considérablement par le rayonnement solaire, et l'élévation de la température varie presque linéairement avec le rayonnement solaire incident.

□□ **Température :** La température de l'environnement influe fortement sur le fonctionnement du capteur solaire.

Les capteurs peuvent être endommagés par le gel pendant la nuit couverte.

□□ **Vitesse du vent :** La vitesse du vent apparaît dans le coefficient de convection entre la vitre et l'extérieur qui agit sur la valeur des pertes, c'est pourquoi la connaissance des données météorologiques est importante. Lorsque le coefficient de transfert thermique dû au vent est à son maximum (pour une longueur de 1m d'absorbeur noir installé horizontalement) la réduction maximum de l'efficacité s'avère au plus bas niveau.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES

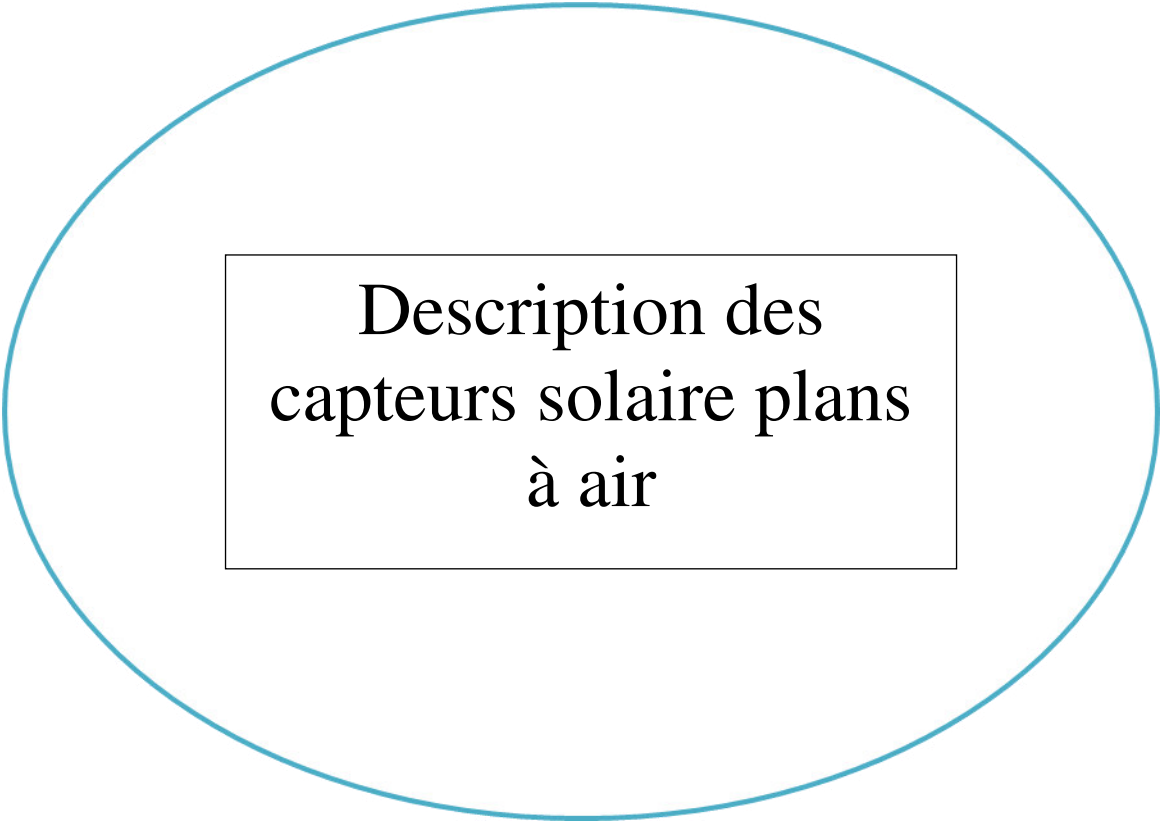
I.8. Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à la présentation du sujet de notre spécialité qui est les énergies renouvelables avec leurs différents types et applications, Le chapitre s'est focalisé sur l'énergie solaire, cette dernière représente un potentiel énorme pour notre pays avec un gisement solaire très important et inépuisable.

Le chapitre a été orienté vers les capteurs thermiques à sa fin pour préparer le deuxième chapitre qui lui se comportera sur les capteurs thermiques en générale et se rapproche de plus en plus à notre simulation.

Nous avons conclu que les énergies renouvelables peuvent être une solution à la problématique énergétique mondiale, surtout en énergie solaire en Algérie avec un champ solaire massive.

Chapitre 11



Description des
capteurs solaire plans
à air

II. Description des capteurs solaires plans à air

II.1 Introduction :

L'énergie émise par le soleil voyage jusqu'à la Terre sous forme de rayonnement électromagnétique.

Ce rayonnement est semblable aux ondes radioélectriques mais il possède une gamme de fréquence différente.

L'intérêt du solaire est sensiblement le même sur tout le territoire. L'ensoleillement est plus fort dans le Sud, mais dans le Nord, les besoins en chauffage sont plus importants et plus étalés sur l'année.

L'énergie peut être récupérée par des capteurs solaires thermiques ou photovoltaïques. Le flux solaire peut être directement converti en chaleur par l'intermédiaire de capteurs solaires thermiques.

Cette technique est applicable au chauffage des habitations, des piscines, à la production d'eau chaude sanitaire, ou encore au séchage des récoltes (fourrage, céréales, fruits).

II.2 Principe de fonctionnement de capteur plan :

Le capteur solaire plan est un système thermique qui permet la conversion de l'énergie solaire en énergie calorifique. Dans un capteur plan, le rayonnement traverse le vitrage du capteur et frappe l'absorbeur. C'est à la surface de celui-ci que le rayonnement solaire est converti en chaleur. Un liquide caloporteur, conduit la chaleur captée vers le consommateur.

Le vitrage a l'avantage d'avoir la propriété de laisser passer le rayonnement solaire et de bloquer le rayonnement infrarouge, émis par l'absorbeur, créant ainsi l'effet de serre. [13]

CHAPITRE II : DESCRIPTION DES CAPTEURS SOLAIRES PLAN A AIR

Le schéma de principe d'un capteur solaire plan est donné sur la figure suivant :

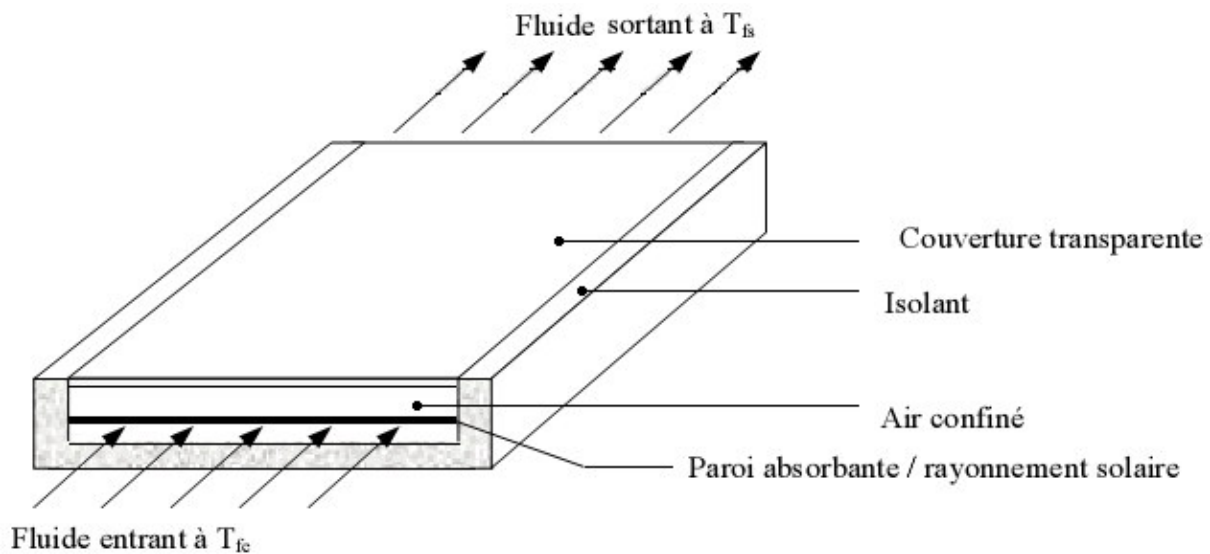


Figure II.1 : Schéma de principe d'un capteur solaire plan. [11]

La paroi absorbante s'échauffe sous l'effet de l'absorption du rayonnement solaire incident. Le fluide qui circule sous cette paroi récupère par convection une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température $T_{fs} - T_{fe}$ à la traversée du capteur.

II.3 . Caractéristiques techniques des différents composants :

Le capteur solaire plan se compose essentiellement des éléments suivants :

- une plaque opaque qui absorbe le rayonnement solaire et transmette au fluide caloporteur.
- une isolation thermique arrière est latérale.
- une couverture transparente généralement en verre à simple ou à double qui assure l'effet de serre et évite le refroidissement de l'absorbeur en protégeant de vent.

II.3.1 L'absorbeur :

Deux fonctions incombent à l'absorbeur [12] :

1. absorber la plus grande partie du rayonnement solaire possible
2. transmettre la chaleur produite vers le fluide caloporteur avec un minimum de pertes.

Le rôle de l'absorbeur est de capter au maximum le rayonnement et d'en réémettre le moins possible.

CHAPITRE II : DESCRIPTION DES CAPTEURS SOLAIRES PLAN A AIR

II.3.2 .La couverture transparente :

La couverture a une fonction de protection de l'absorbeur, mais elle joue aussi un rôle important dans le bilan thermique en réduisant les pertes de chaleur. Habituellement, on utilisera le verre comme couverture transparente [16].

Un tel dispositif représente donc un véritable piège au rayonnement solaire, qui peut être amélioré en munissant le capteur d'une double couverture.

Une appellation « verre solaire » existe et fait l'objet d'exigences toutes particulières :

- le verre doit être trempé pour résister sans risques aux charges thermiques et mécaniques.
- il doit présenter un haut degré de transmission solaire caractérisé par une faible teneur en fer.
- il doit être doté d'une surface structurée permettant de réduire les reflets directs. [14]

II.3.3 L'isolant :

Limiter les pertes de transmission vers l'extérieur est primordial pour optimiser les performances du capteur

Nombreux sont les produits isolants qui peuvent convenir pour l'isolation des capteurs,

Un bon isolant doit les qualités suivantes :

- une faible conductivité thermique.
- une faible densité (pour une faible inertie thermique).
- la chaleur massique doit être basse.
- une résistance thermique dans l'intervalle des températures de service.

II.3.4 . Le fluide caloporteur :

Le fluide caloporteur est utilisé dans le circuit primaire de capteur solaire a pour rôle de véhiculer le chaleur cédée par l'absorbeur

Les fluides caloporteurs plus utilisées sont :

** l'air*

L'air comme agent de transport de calories a un grand avantage par son abondance et sa gratuité, est par l'absence des problèmes de gel et de corrosion ce qui donne au capteur une grande durée de vie est moins de travaux d'entretien.

CHAPITRE II : DESCRIPTION DES CAPTEURS SOLAIRES PLAN A AIR

Mais pour transporter une quantité raisonnable d'énergie il faut utiliser des volumes d'air très importants.

*. *L'eau*

Un excellent fluide caloporteur pour sa chaleur massique mais le risque de gel pendant les nuits d'hiver et le risque d'ébullition en cas haute température pose des problèmes. La naissance des couches de tartre dans les canalisations au fil de temps diminue la quantité de chaleur échangées.

II.4 . Différents types des capteurs solaires plans à air :

Les types de capteurs solaires sont très divers même si leur composition reste approximativement le même [15].

On distingue trois grandes catégories de capteurs plans à air :

- 1- capteurs à absorbeur plan.
- 2- capteurs à absorbeur perméable.
- 3- capteurs à absorbeur à géométrie variable.

II.4.1 Capteurs à absorbeur plan (lisse) :

L'absorbeur est une plaque en tôle plane, leur variété réside dans le nombre des veines d'écoulement d'air.

On distingue quatre types des capteurs selon leurs modes d'écoulement :

- Type 1 avec écoulement d'air au-dessus de l'absorbeur
- Type 3 avec l'écoulement des deux côtés de l'absorbeur de même sens.
- Type 4 avec l'écoulement des deux côtés de l'absorbeur au sens contraire. .
- Type 2 avec écoulement en dessous l'absorbeur.

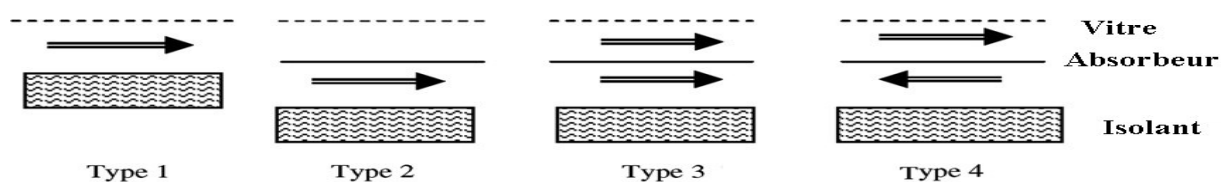


Figure II.2: Les types génériques principaux d'écoulements [16]

II.4.2 Capteurs à absorbeur perméable :

L'amélioration du rapport surface d'échange sur projection de la surface d'absorbeur consiste à utiliser un absorbeur poreux.

On peut utiliser à cet effet du tissu noir, de la fibre de verre noircie, des écrans rainurés et étirés, de la laine d'acier ou des assemblages de lamelles.

CHAPITRE II : DESCRIPTION DES CAPTEURS SOLAIRES PLAN A AIR

II.4.3 Capteurs à absorbeur à géométrie variable (rugueuse) :

Si l'on veut utiliser le vitrage comme une garde pour réduire les pertes de chaleur il faut que le transfert de chaleur ait lieu entre le dos de l'absorbeur et l'air. L'absorbeur constitue alors la paroi frontale du canal d'air et le revêtement intérieur de l'isolation constitue le fond du canal. On peut augmenter la surface d'échange de chaleur soit en donnant un pouvoir émissif élevé au dos de l'absorbeur et à la face interne de l'isolation, soit en donnant à l'absorbeur une surface striée ou rainurée.

Les formes les plus utilisées sont les suivantes :



Figure II.3 : différents type d'absorbeur. [17]

II.5 Applications des capteurs solaires plans à air :

II.5.1 Chauffages des habitations :

Le principe est consisté à chauffer le fluide dans le capteur solaire, l'air est véhiculé par ventilateur vers des points d'utilisations.

- 1- Capteur solaire plan à air
- 2- Filtre
- 3- Ventilateur
- 4- Entrées d'air
- 5- Sorties d'air

CHAPITRE II : DESCRIPTION DES CAPTEURS SOLAIRES PLAN A AIR

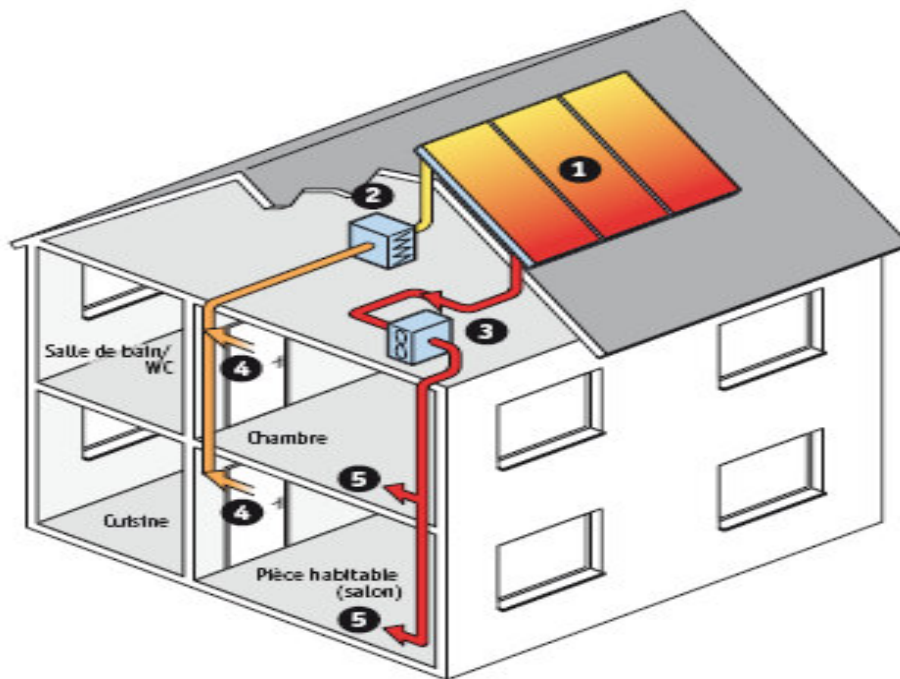


Figure II.4 : Chauffages des habitations [19]

II.5.2 Le séchage :

Utilisation des capteurs solaire à air pour le séchage des récoltes est idéale dans le cas du thé, du café, des fruits, du riz, des épices, du caoutchouc, du cacao et du bois.

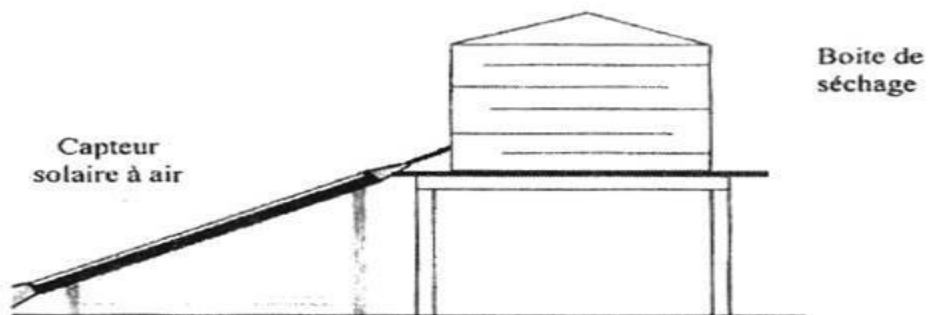


Figure II. 5 : séchoir solaire. [20]

CHAPITRE II : DESCRIPTION DES CAPTEURS SOLAIRES PLAN A AIR

II.6 Conclusion :

Ce chapitre détaille le mode opératoire d'un capteur solaire plan à air avec ses caractéristiques techniques et les composants, les différents paramètres qui agissent sur son bon fonctionnement comme son orientation, inclinaison et quelques paramètres externes (obstacles, rayonnement solaire, température et la vitesse du vent).

Le capteur utilisé sur notre simulation est à simple passe avec passage d'air entre l'absorbeur et le vitrage.

Le capteur thermique sur la deuxième simulation comporte des rugosités en forme U avec une alternance des obstacles entre le vitrage et la plaque en Aluminium.

Le choix entre les types de capteurs solaires est déterminé par le type d'application recherchée, la fiabilité, le prix et les températures souhaitées, cette dernière est un facteur très important pour notre simulation.

Chapitre III

**Généralités
sur le séchage**

III. Généralités sur le séchage

III.1 Introduction :

Le séchage et tout particulièrement le séchage au soleil est l'une des plus anciennes techniques de conservation des produits agroalimentaires utilisée par l'homme. Elle consiste en l'exposition du produit aux rayons du soleil et à l'air libre.

Le séchage solaire, comme moyen de conservation des aliments, a été considéré le système le plus utilisé de l'énergie solaire. Le séchage des fruits, légumes et viandes est l'un des processus des grandes consommations d'énergie dans l'industrie de transformation alimentaire et constitue une meilleure méthode de réduire des dépenses et pertes après les récoltes

III.2 Définition du séchage :

Le séchage solaire est considéré comme l'opération unitaire qui consiste à éliminer par évaporation l'eau d'un corps humide (produit). Ce dernier peut être solide ou liquide, mais le produit final est solide. [21]

L'objectif de sécher un produit est d'abaisser sa teneur en eau, de telle sorte que son activité de l'eau soit portée à une valeur permettant sa conservation à une température ordinaire sur de longues durées (de l'ordre de l'année). [22]

Cette opération ils interviennent deux phénomènes le transfert de chaleur et le transfert de matière. [23]

On peut distinguer divers procédés de séchage : [24]

- □ Les procédés mécaniques (décantation, filtration et compression centrifugation).
- □ Les procédés thermiques par élévation de température et diminution de la pression de vapeur de la phase gazeuse. L'humidité est extraite par évaporation et diffusion.

III.3 Principes du séchage :

La première idée qui vient à l'esprit pour sécher un produit est de le porter à la température d'ébullition de l'eau, qui alors se vaporise. En réalité, ce principe n'est pas le plus employé et l'on préfère souvent opérer à température moins élevée en utilisant l'air comme gaz d'entraînement. [25]

III.4 Vitesse du séchage : [27]

La vitesse de séchage est définie comme le rapport entre la masse de liquide évaporé par unité de temps et par unité de surface de séchage ($\text{kg d'eau/m}^2 \cdot \text{s}$).

Elle est fonction de très nombreux paramètres dont les plus importants sont.

La nature, la porosité, la forme et l'humidité de produit. La température, l'humidité et la vitesse du gaz sécheur.

III.5 Les caractéristiques de l'air de séchage (Terminologie de séchage) :

III.5.1 Humidité :

Ce terme désigne le liquide contenu dans le corps solide, liquide ou pâteux, et devant être éliminé au cours du séchage.

III.5.2 Taux d'humidité :

C'est la masse de liquide contenue par unité de masse de matière à sécher. Bien qu'il soit fait très souvent référence à la matière humide, il est préférable d'exprimer le taux d'humidité par rapport à la matière anhydre.

III.5.3 États de siccité :

Un corps anhydre est un corps dont le taux d'humidité est nul.

Un corps sec ou séché correspond plus généralement au produit tel qu'il est obtenu à la sortie du sécheur.

CHAPITRE III : GENERALITES SUR LE SECHAGE

Dans ce dernier cas, le taux d'humidité n'est pas forcément nul.

III.5.4 Taux d'humidité à l'équilibre :

Un corps humide, placé dans une enceinte de volume important où l'humidité relative et la température sont constantes, voit son taux d'humidité se stabiliser à une valeur dite d'équilibre qui dépend de la nature de l'humidité et de celle du produit qui en est imprégné, mais aussi de la pression partielle et de la température.

III.6 Les modes de séchage :

La vaporisation du solvant contenu dans un produit à sécher peut être effectuée par abaissement de la pression dans l'enceinte contenant le produit. Cependant, dans la plupart des cas, la vaporisation est effectuée en utilisant une source d'énergie extérieure au produit. Le séchage fait appel aux trois modes de transfert de chaleur : convection - conduction - rayonnement : Ceux-ci sont utilisés seuls ou combinés entre eux. [29]

Selon le mode de chauffage de la matière à sécher, il existe :[26]

▪ Séchage par convection :

C'est le mode de séchage le plus utilisé dans l'industrie chimique, l'échange thermique est réalisé grâce à un contact direct entre le solide humide et le gaz caloporteur. [26]

En séchage, il s'agit probablement du mode de transfert d'énergie le plus courant. Il consiste à mettre en contact un gaz (air) s'écoulant en régime. [29]

généralement turbulent autour du corps à sécher qui peut se présenter sous forme de particules, de gouttelettes, de films ou de plaques.

L'application au séchage de cette formule appelle les quelques remarques ci-après :

- La surface d'échange offerte par le produit à sécher n'est pas toujours très bien définie. Dans le cas de solides granulaires dont la granulométrie n'est pas homogène, on définit alors un diamètre moyen des particules.

CHAPITRE III : GENERALITES SUR LE SECHAGE

D'une manière générale, le temps de séchage est réduit lorsque la différence de température entre le gaz et le produit est augmentée. Toutefois, la thermo sensibilité du produit (caractérisée par la température maximale qu'il peut supporter) limite la valeur de l'écart, notamment en fin de séchage.

- **Séchage par conduction** Dans ces procédés l'échange thermique est obtenu par contact entre le solide humide et une paroi métallique chauffée par un fluide caloporteur, à cause du bon transfert de chaleur dans ces procédés. Cette technique est utilisée pour le produit liquide tel que le solide pâteux et le solide en suspension (mélange liquide-solide). [26]

L'énergie thermique nécessaire au séchage est apportée non pas par un gaz en mouvement autour du produit à sécher, mais par contact direct entre le produit et une paroi chauffée. Les vapeurs libérées par le séchage sont aspirées (séchage par ébullition) ou entraînées par un gaz de balayage dont le débit est toujours faible en comparaison de celui nécessaire à un séchage convectif. Plus le gradient de température entre la paroi et le produit sera faible et plus la surface d'échange devra être importante. [29]

- **Séchage par rayonnement**
On peut aussi réaliser des séchages où la transmission de chaleur se fait par rayonnement. Une surface portée à une température suffisamment élevée émet un rayonnement infrarouge qui sera absorbé d'une façon plus ou moins complète par le produit à sécher. [26]
Dans ce mode de séchage, l'énergie nécessaire à l'évaporation est transmise par rayonnement. Ce procédé de séchage est très efficace pour l'élimination de l'eau, surtout lorsque le produit à sécher n'est pas thermosensible. [29]

Les sources chaudes émettrices peuvent être des émetteurs au gaz combustible, des émetteurs électriques, ou le soleil.

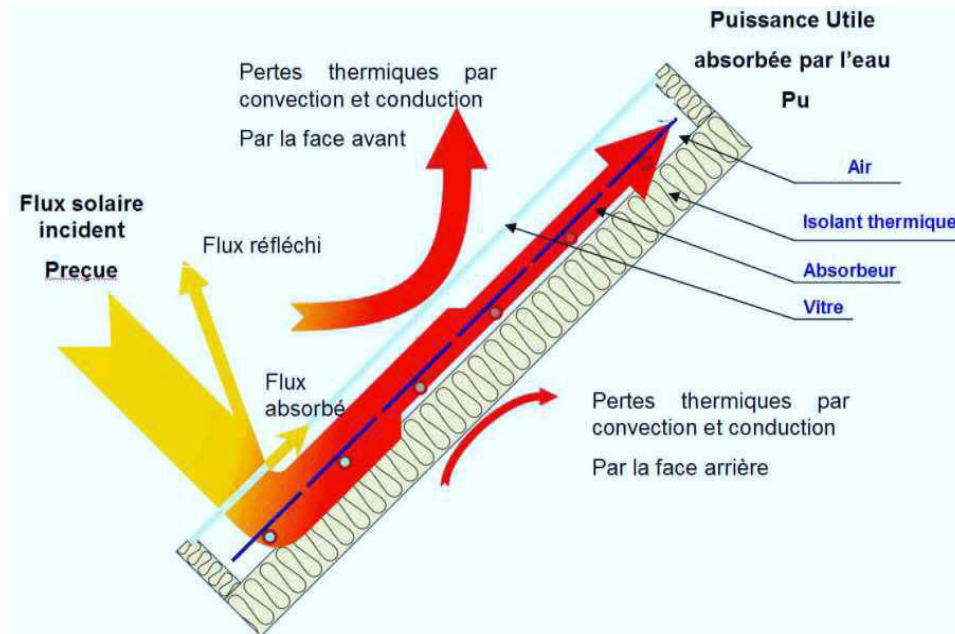


Figure III.1 : Les différents échanges thermiques dans un capteur plan. [30]

III.7 .Le choix du procédé de séchage :

Les types des séchoirs utilisés pour sécher un produit donné est basé sur le choix de

l'appareil adéquat qui se fait alors en fonction de certain facteur : [24]

- La nature du produit (liquide, solide, pâte).
- Le taux d'humidité finale et initiale.
- Débit de produit exigé.
- Sensibilité de produit vis-à-vis de la chaleur.
- Sécurité de l'opération (toxicité, inflammabilité,...).
-

III.8 .classification des séchoirs solaires : [28]

Il existe une très grande diversité de type de séchoirs, aussi grande que la diversité des

produits à sécher. Les débits de produit à sécher et leur temps de séjour dans le séchoir

diffèrent d'un produit à un autre, de même l'opération de séchage peut prendre quelque minute

jusqu'à plusieurs dizaines de jours.

CHAPITRE III : GENERALITES SUR LE SECHAGE

III.8.1 Séchoir solaire direct:

Les rayons solaires frappent directement les produits. Le séchoir solaire direct se compose d'une seule pièce qui fait office à la fois de chambre de séchage et de collecteur solaire. Le fond de la chambre de séchage est peint en noir pour augmenter la capacité d'absorption de chaleur, une feuille de plastique ou polyéthylène transparent sert généralement. [33]

III.8.2 .Séchoirs solaires indirects :

Les rayons solaires ne frappent pas directement les produits. Le séchoir solaire indirect se compose d'une unité de production d'air chaud et une chambre de séchage, les produits sont séchés par un fluide caloporteur qui est l'air.

Ces types en compose en deux catégorie.

- **Les séchoirs actifs (force):** comportent des capteurs placés en amont d'une chambre de séchage et destinés à chauffer l'air avant son envoi dans cette dernière. [34]
Ils peuvent être dotés d'un chauffage d'appoint ou d'un recyclage afin d'améliorer ses performances, comme c'est le cas dans les pays industrialisés.

D'une manière générale, ces séchoirs sont dits indirects et ce genre de séchoir est isenthalpique

- **Les séchoirs passifs(naturelle):** (ou *séchoirs serres*)

Le rayonnement frappe donc directement les produits à sécher qui jouent alors le rôle d'absorbeur. Ces séchoirs sont dits *séchoirs serres directs*.

Si le rayonnement détériore le produit; on interpose alors entre la couverture transparente et le produit une surface opaque servant d'absorbeur. Ce genre de séchoir est dit séchoir serre indirect.

☀ **L'effet de serre [31], [32] :**

Le Soleil émet en permanence un rayonnement (mélange de lumière visible, d'infrarouges et d'ultraviolets) qui se propage dans l'espace. Une partie de ce rayonnement solaire qui traverse l'atmosphère terrestre est absorbée par la surface de la terre. Celle-ci émet en retour un rayonnement infrarouge (de la chaleur) en direction de l'espace. Cependant, une partie de ce rayonnement infrarouge est renvoyée en direction de la surface terrestre par certains gaz de

CHAPITRE III : GENERALITES SUR LE SECHAGE

l'atmosphère appelés « **gaz à effet de serre** » (les principaux gaz à effet de serre sont la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, le méthane, l'ozone et l'oxyde nitreux). Pour schématiser, l'atmosphère et les gaz à effet de serre se comportent comme la vitre qui maintient la chaleur à l'intérieur de la serre d'un jardinier.

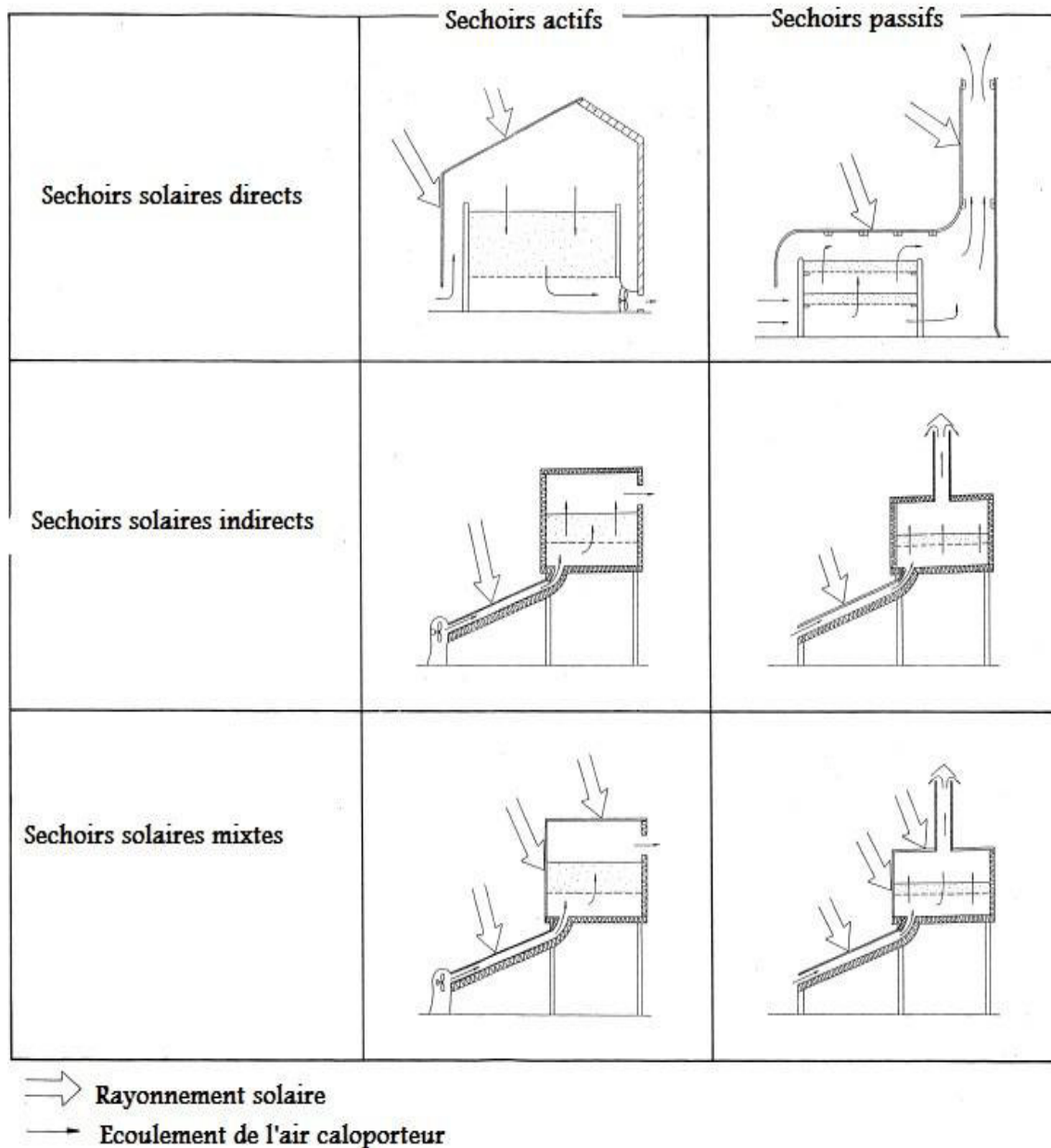


Figure III.2 : les différents types et catégories des Séchoirs solaires.

III.9 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exposé les différents paramètres physiques qui interviennent durant l'opération du séchage, et nous avons fini par une classification des différents types de séchoirs solaires. Dans le chapitre suivant nous allons exposer notre modèle avec une description détaillée des facteurs autour.

Chapitre IV



Description du séchoir

IV. Description du séchoir

IV.1 Introduction :

Dans l'utilisation de l'énergie solaire, la faible densité de l'énergie et la fourniture instable de cette dernière est due aux variations des conditions atmosphériques. La plus grande part de recherche est consacrée au développement du chauffe-eau solaire du point de vue rendement thermique en général, mais rare sont les études sur les capteurs solaires utilisant l'air comme fluide caloporteur, car ce dernier a un coefficient de transfert de chaleur par conduction-convection entre l'absorbeur et le fluide beaucoup plus faible que celui de l'eau. Le rendement d'un capteur solaire, conçu pour convertir l'énergie solaire en énergie thermique dépend de sa forme, de la technique choisie et de la façon dont on réduit les pertes de chaleur à la surface de celui-ci. Il existe une gamme étendue de capteurs solaires à air avec différentes dispositions de l'absorbeur. Pour notre étude, nous avons choisi un capteur avec le passage d'air situé entre l'absorbeur et la vitre. Les capteurs solaires à air sont importants dans les applications nécessitant des températures basses et modérées, telles que le chauffage des locaux, et le séchage qui est une opération souvent nécessaire dans de nombreux processus (agro-alimentaire, matériaux de construction, bois...).

IV.2 .Description détaillée du dispositif (Séchoir) utilisé :

Dans ce chapitre on décrit le séchoir solaire de type indirect, Le séchoir solaire indirect a été réalisé dans le but d'étudier le processus de séchage de produit agroalimentaires locaux surtout, il opère en convection naturelle. Le système est simple, Il ne possède pas de source de chaleur auxiliaire. Le séchage est également possible en couches épaisses comme en couches minces.

Le séchoir solaire se compose essentiellement de deux partie : le capteur solaire plan à air qui converti le rayonnement solaire en chaleur en utilisant l'effet de serre et la chambre de séchage qui contient le produit humide à sécher .l'air chaud est envoyé par ventilation naturelle dans la chambre de séchage.

CHAPITRE IV : DESCRIPTION DU SECHOIR

Le système étudié, présenté sur (Fig. IV. .1) est un séchoir indirect. Il est constitué des éléments suivants :

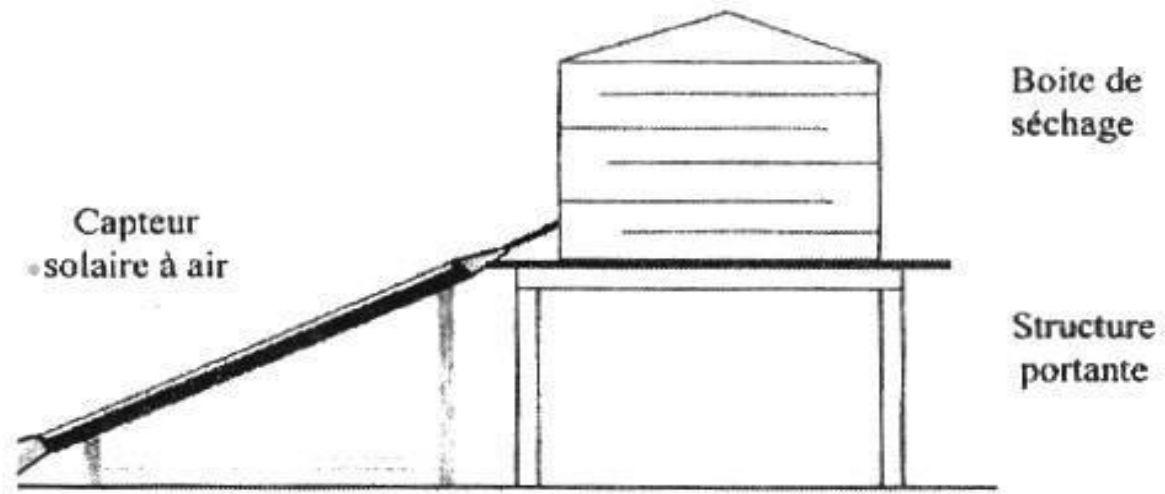


Figure. IV.1 : Vue de profile du séchoir solaire.

➤ **Chambre de séchage :**

- Entièrement en tôle galvanisée 5 /10^e, c'est une boîte de petites dimensions (Hauteur = 1m, largeur = 0.67m et la profondeur = 0.67m).
- Le séchoir comporte 5 claies, sur lesquelles sont posés les produits à sécher (pommes de terre), l'isolation est en éponge et le chargement c'est une porte à double battant située sur l'arrière de la chambre.

➤ **Unité de production d'air chaud :**

Le capteur solaire fait le lien entre le rayonnement solaire incident et le consommateur de chaleur. Il a pour tâche de convertir le plus efficacement possible la lumière solaire en chaleur.

Le capteur utilisé dans cette simulation est à simple passe avec passage d'air entre l'absorbeur et le vitrage comme le montre dans (Fig. IV.2):

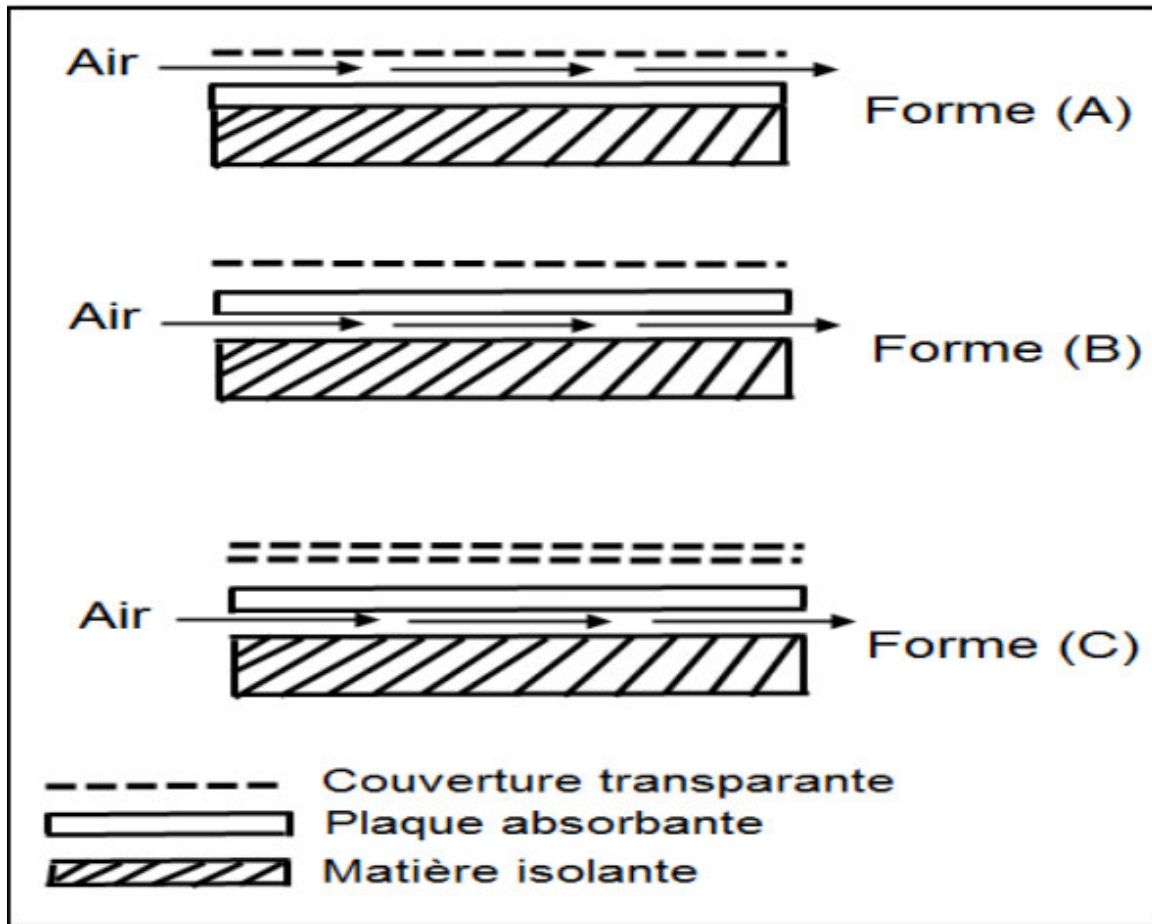


Figure. IV.2: Schéma représente capteur solaire à simple passage.

Le capteur utilisé pour notre simulation est de forme A on prendra la peine d'ajouter des rugosités sur la surface de l'absorbeur pour la deuxième simulation et on finira par étude comparative entre les performances des deux modèles.

Pour l'unité de production d'air chaud on a :

- Constituée d'un capteur solaire à air à simple circulation et à simple vitrage, incliné de 40° (Latitude de la ville de Boumerdes) par rapport au plan horizontal et orienté vers le sud.
- Le capteur comporte un vitrage en verre (glass) d'épaisseur = 10 mm, d'une taule en aluminium d'épaisseur = 10 mm qui joue le rôle de l'absorbeur et d'une couche d'éponge à l'arrière du capteur d'épaisseur de 50 mm considérée comme insulateur.
- Les dimensions du capteur sont Hauteur = 0.1 m la Largeur = 1 m et de longueur 2 m dans cette simulation qui à **2D** en prendra les résultats en considérant que la hauteur et la longueur du capteur.

CHAPITRE IV : DESCRIPTION DU SECHOIR

- L'air qui passe entre l'absorbeur et la vitre est de 100 mm.
- Nous considérons ici un capteur solaire plan à air ayant on a choisit la ville de Boumerdes, son altitude par rapport au niveau de la mer est de 156 m, la pression atmosphérique à cette altitude est de 1.004 Bar. Et comme journée d'étude on a choisit une journée type du mois de juillet avec une température moyenne dans les normes de la saison de 30°C avec une humidité relative HR de 40%.

Le travail présent est le dimensionnement de l'unité de production d'air chaud suite aux travaux proposés par Dr Boulmtafes et Al en 2007 qu'on a pris comme exemple pour dimensionner notre chambre de séchage. Le capteur thermique est le sujet de cette étude, on prendra le soin de dimensionner le capteur pour de bonnes conditions de séchage d'un produit agroalimentaire (pomme de terre).

Absorber	Aluminium 10 mm d'épaisseur.
Covertures	Verre ordinaire de 10 mm d'épaisseur, dimensions (200*100 mm)
La distance entre l'absorbeur et le verre	100 mm
Isolant thermique	éponge de 50 mm d'épaisseur.
Angle d'inclinaison du capteur	40°
Chamber du séchage	taule galvanisé 5 /10°avec 5 mm d'épaisseur, et lesdémentions (1000*670*670 mm)
Claies	5 claies de (670 * 670 mm) de dimensions

Tableau. IV.1 : dimension de capteur pour de bonnes conditions de séchage d'un produit agroalimentaire (pomme de terre).

IV.3 Irradiation Solaire [35] :

En tant que source d'énergie, l'ensoleillement est un facteur climatique dont on a intérêt à tirer parti (de manière passive, via les ouvertures vitrées, et/ou de manière active pour produire de l'énergie) mais dont on doit aussi parfois se protéger pour éviter les surchauffes

CHAPITRE IV : DESCRIPTION DU SECHOIR

en été. La maîtrise de l'énergie solaire nécessite donc de connaître la position correcte du soleil (hauteur et azimut) ainsi que l'intensité du rayonnement à tout moment.

Le soleil est un réacteur à fusion nucléaire qui fonctionne depuis 5 milliards d'années.

Par un processus de transformation d'hydrogène en hélium, il émet ainsi d'énormes quantités d'énergie dans l'espace (sa puissance est estimée à $63\,500\text{ kW/m}^2$). Ces radiations s'échappent dans toutes les directions et voyagent à travers l'espace à la vitesse constante de $300\,000\text{ km}$ à la seconde, dénommée vitesse de la lumière.

Après avoir parcouru une distance d'environ 150 millions de kilomètres, l'irradiation solaire arrive à l'extérieur de l'atmosphère de la Terre avec une puissance d'environ $1\,367\text{ W/m}^2$. C'est ce qu'on appelle la constante solaire. La Terre, une petite boule comparée au Soleil, intercepte une si faible partie de l'énergie radiante du soleil que les rayons du soleil ainsi stoppés paraissent constituer un faisceau parallèle.

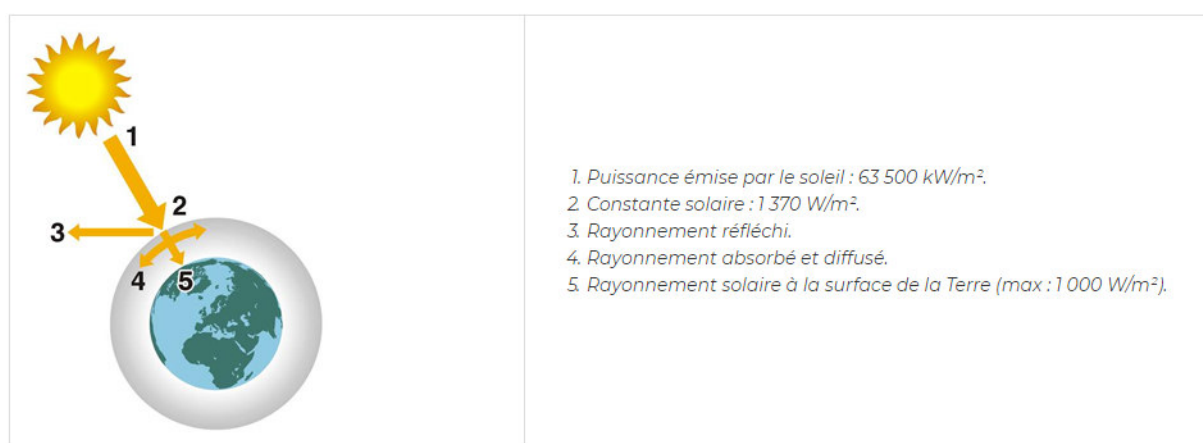


Figure. IV.3: Fractions du rayonnement solaire global.

Outre la composition de l'atmosphère, le facteur le plus important pour évaluer la quantité du rayonnement solaire qui atteint la surface de la Terre est l'épaisseur d'atmosphère que le rayonnement doit traverser.

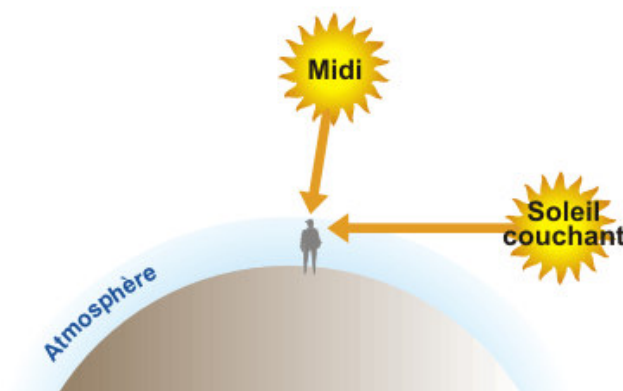


Figure. IV.4: quantité du rayonnement solaire qui atteint la surface de la Terre est l'épaisseur d'atmosphère que le rayonnement doit traverser.

L'épaisseur d'atmosphère traversée influence donc le spectre lumineux reçu. Les normes internationales définissent différents types de spectre : AM1 (pour air mass 1, lorsque le rayonnement a traversé une épaisseur d'atmosphère), AM0 (spectre à la surface externe de l'atmosphère), AM1.5 (spectre utilisé pour les tests standardisés des panneaux solaires correspondant à la traversée d'une atmosphère et demie).

Le rayonnement solaire reçu sur une surface varie donc au cours du temps en fonction de la position du Soleil et de la couverture nuageuse. La puissance solaire maximale à la surface de la Terre est d'environ 1000 W/m^2 pour une surface perpendiculaire aux rayons.

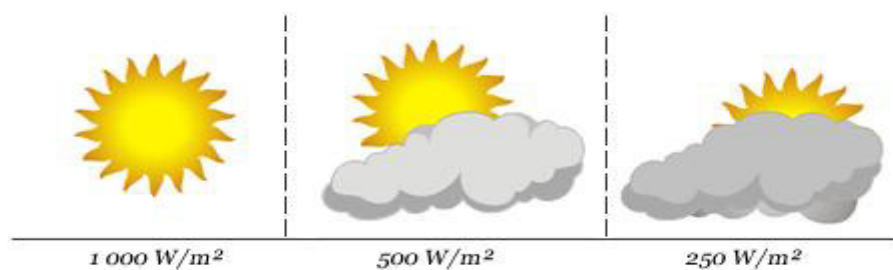


Figure. IV.5 : Puissance solaire pour différents ciels.

IV.4 Flux Solaire appliqué :

La région de notre simulation est la ville de Boumerdes son altitude par rapport à la mer

156 m la pression atmosphérique a cette altitude est de 1.004 Bar. Et comme journée d'étude on va simuler sur une journée qui est dans la température moyenne du mois de juillet avec et ciel dégagé et de bonne condition de séchage, avec une température moyenne de 30°C à l'entrée du capteur solaire pour ce qu'il s'agit de l'humidité relative et le rendement du capteur ils sont considérés 0.5 et 40 % respectivement.

Les flux solaires pour cette journée type :

8h du matin → 100 W/m²

10h du matin → 500 W/m²

13h qui est considéré 12h TSV → 950 W/m²

15h → 500 W/m²

18h → 100 W/m²

Ce tableau montre l'évolution du flux de chaleur le long de la journée :

CHAPITRE IV : DESCRIPTION DU SECHOIR

Heure (h)	6	8	10	13	15	18	20
Flux solaire (W/m ²)	0	100	500	950	500	100	0

Tableau. IV.2 : l'évolution du flux de chaleur le long de la journée.

Ce graphe représente l'évolution du flux solaire pour cette journée :

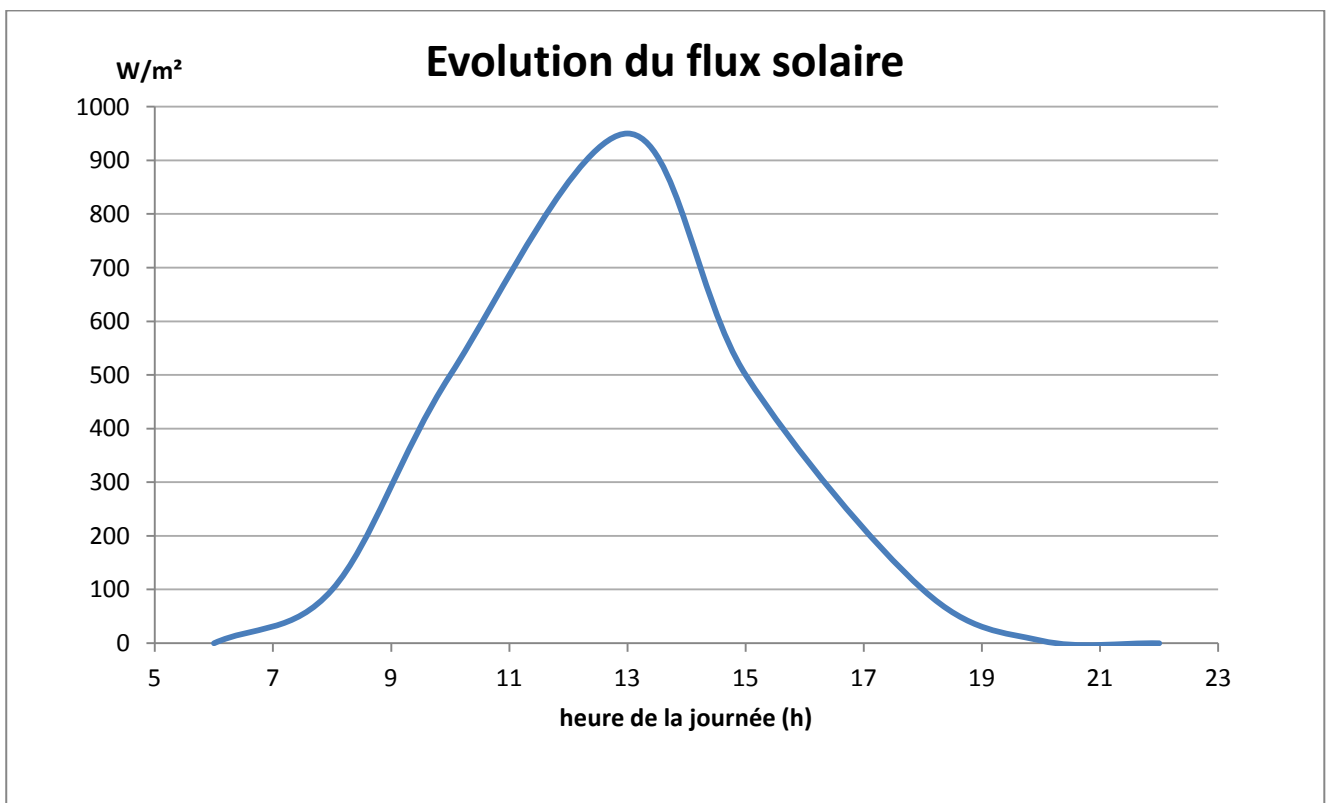


Figure. IV.6 : Evolution du flux solaire durant la journée .

Pour notre simulation on prendra les valeurs Q_s **100 W/m²** qui représente le flux solaire aux Horaires 8h et 18h et **500 W/m²** pour 10h et 15h et enfin la valeur du **950 W/m²** à 13h ou à

12h TSV celle où l'irradiation solaire captée par notre unité de production d'air chaud est maximale et c'est dû à la position du soleil qui soit la plus haute possible et l'épaisseur d'atmosphère traversée par le flux solaire qui soit minimale.

IV.5 Définition du type d'écoulement d'air à l'intérieur du capteur:

L'écoulement à l'intérieur du capteur est monophasique pour pouvoir déterminer le type de cet écoulement (laminaire ou turbulent) on doit calculer le nombre de Reynolds.

Pour que l'écoulement d'air à température donnée T soit laminaire le nombre de Reynolds doit être inférieur à 2300

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

Avec :

μ = Viscosité dynamique de l'air qu'on calculera en utilisant une corrélation.

$$\rho = 1,184 \frac{kg}{m^3}$$

$D = 0,1 \text{ m}$ (représente la hauteur de notre volume de contrôle).

$V = 0,5 \frac{m}{s}$ (vitesse de l'air à l'entrée du capteur).

➤ Calcul de la viscosité dynamique :

La température de l'air à l'entrée du capteur est la température moyenne de la journée qui est de 30 degrés C°.

La relation entre la viscosité dynamique de l'air et la température est établie par cette corrélation :

$$\mu = (8.8848 \times 10^{-15} \times T^3) - (3.2398 \times 10^{-11} \times T^2) + (6.2657 \times 10^{-8} \times T) + (2.3543 \times 10^{-6})$$

$$\mu = 4.2051 \times 10^{-6} \frac{kg}{m.s}$$

➤ Calcul du nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

$$Re = \frac{1,184 \times 0.5 \times 0.1}{4.2051 \times 10^{-6}}$$

$$Re = 14078.17 > 3200$$

L'écoulement étant turbulent à l'intérieur du capteur en utilisera dans notre simulation par **CFD Comsol 5.4** la physique qui suit : Régime turbulent k-ε. [36]

La figure qui suit représente l'onglet sur le logiciel pour l'écoulement :

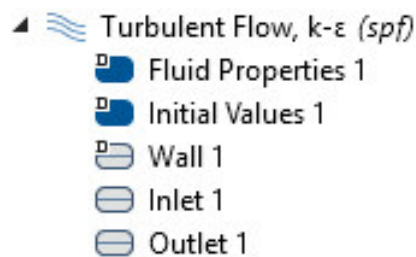


Figure. IV.7 : onglet d'écoulement turbulent sur le logiciel. [36]

IV.6 .Séchage de pomme de terre:

➤ Définition de Pomme de terre :

La pomme de terre est une plante herbacée, de la famille des Solanacées.

Elle est cultivée essentiellement, pour ses tubercules souterrains, charnus, jaunes, roses, rouges, violets ou presque noirs; de formes différentes ; sphériques, longs, ovales, aplatis, en rognon.

Les tubercules sont très riches en amidon, principalement utilisés en alimentation humaine, mais aussi en alimentation animale.

➤ Quelques travaux sur séchage de pomme de terre:

M.SOBRAL et al. (2001) : en étudiant l'effet du séchage sur le rétrécissement des cubes de pomme de terre rapportent que le volume des cubes diminuait linéairement avec la teneur en eau pour des pertes inférieures à 80 %.

L'effet de la température sur le taux de rétraction axiale est important sur les rondelles de petite épaisseur où il décroît proportionnellement à la température. Dans le cas de l'épaisseur moyenne, il est moins important puisque à 70 °C, le taux est le plus élevé suivi par celui de 60 °C et le plus bas est celui de 85 °C.

Quand aux rondelles les plus épaisses, l'effet de la température est plus important.

BIMBENET et al. (2002) : rapportent que l'évolution de la structure physique du matériau est directement liée au mode d'évaporation et de transport interne d'eau. Lorsque le transport d'eau a lieu sous forme liquide vers la surface, le produit a tendance à rétrécir proportionnellement au volume d'eau évaporée, dans la mesure où la résistance mécanique du matériau sec le permet.

Cette résistance est remarquée chez les rondelles les plus épaisses de la pomme de terre séchée à 85 °C. [12]

CHAPITRE IV : DESCRIPTION DU SECHOIR

A. KAVAK (2006) : étudier du séchage en couche mince pour comprendre le comportement de la pomme de terre, pomme et disques de citrouille (potiron). Les expériences de séchage sont conduites à 60; 70 et 80°C avec une vitesse de l'air de 1; 1.5m/s.

Le séchage est maintenu jusqu'à un contenu en humidité finale atteinte de 10 % (b.s); 13 % (b.s), 6 % (b.s) respectivement.

L'auteur rappelle que les phénomènes de séchage des produits biologiques se passent au cours de la phase de séchage à vitesse décroissante et sont contrôlés par les mécanismes de diffusion liquide et/ou de diffusion de vapeur. Ce comportement suggère qu'il est fortement influencé par le transfert interne de diffusion de l'humidité qui contrôle ce phénomène.

Le séchage ne présentant que des périodes de séchage à régime décroissant; les rondelles de 6,3 mm, séchant à deux vitesses (ou sous phases) de décroissance, avec une première sous phase rapide relative au départ de l'eau faiblement liée et une deuxième sous phase ralentie, jusqu'à la fin du séchage relative au départ de l'eau plus fortement liée que la première.

L'effet de la température paraît plus intéressant sur les cinétiques et vitesses de séchage par rapport à la première sous phase qui est délimité par les différents points d'inflexion où la quantité d'eau évaporée correspondant à l'eau moins liée est assurée par la température la plus élevée et la plus fine des épaisseurs. Il est montré aussi que la deuxième sous phase de décroissance, qui correspond à l'eau de plus en plus liée plus difficile à évaporer, est plus lente dont les durées respectives ont montré que les proportions sont comprises entre 75 et 91% par rapport à la durée totale du séchage.

L'influence de l'épaisseur des rondelles de pomme de terre sur la cinétique de séchage est très importante.

La plus fine séchant plus rapidement que celle qui lui est supérieure, et enfin la plus épaisse séchant plus lentement que les deux autres.

A. Boubeghal et al (2007) : Les effets de différents paramètres (diamètre, la masse et la température) sur la cinétique de séchage de produite (pomme de terre). [16]

➤ **Effet de la température de l'air chauffé à l'entrée de l'enceinte de séchage**

La température de l'air d'entrée varie de 50 à 70 °C avec un diamètre du produit de 6 cm et une masse de 8 kg. La teneur en eau pour une température de l'air d'entrée de 50 °C est inférieure à celle de l'air à 70 °C. Ceci explique que l'augmentation de la température de l'air d'entrée, qui permet de diminuer le temps de séchage.

CHAPITRE IV : DESCRIPTION DU SECHOIR

Le tableau suivant présent de quelque travail sur le séchage thermique de pomme de terre.

Chercheur	Paramètre étudié	Type de séchoir	Temps de séchage
E. KavakAkpinar (2005)	Température de l'air 60, 70 et 80 °C vitesse d'air 1 et 1,5 m/s	étuve UnivTurkey	600 à 720 min
L.Hassini et al (2007)	Température de l'air 40, 55,70et 85°C vitesse d'air 1 et 1,5 m/s Humidité relative 5 , 15 et 25 %	Boucle de séchage Univ Tunisie	500 min
D. Fahloul et al (2009)	Température (55, 65, 75 °C), Pression (20, 40, 60 cm Hg) Découpe (rondelle (3,5 mm), cubique(1 cm) et bâtonnet(1 X 3 cm))	Étuve Sous vide Univ Batna	100 à 250 Min
S Chouicha (2013)	vitesse d'air 0.51 m/s Humidité 5,22 et 5,25 Masse d'eau /Masse sèche	séchoir solaire indirect; Univ Ouargla	165 min
O. BADAoui (2013)	Température 65 °C, Epaisseur 0,3 cm	séchoir solaire indirect (UDES,Tipaza)	200 min

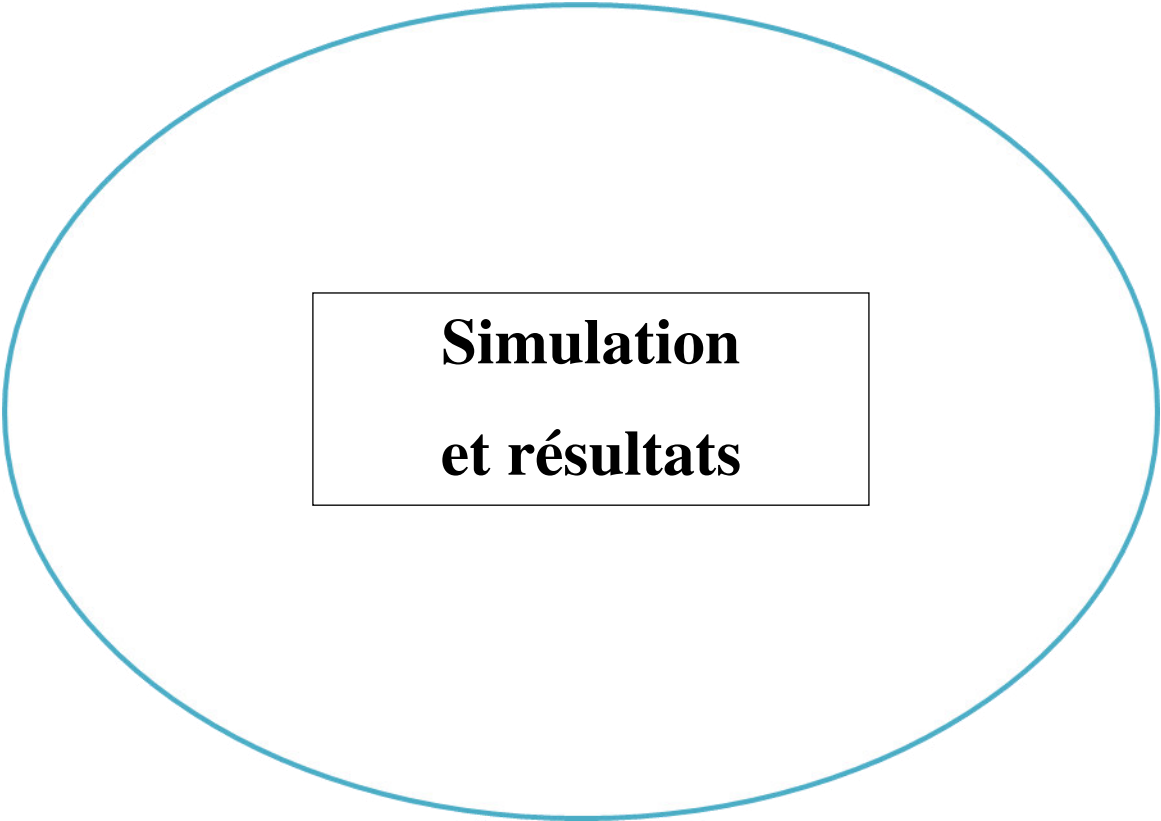
Tableau. IV.3 : quelques travaux sur le séchage thermique de pomme de terre.

IV.7 Conclusion :

Ce chapitre comporte une description de notre séchoir solaire pour une simulation dans la région de boumerdés avec des facteurs prises en compte qui est l'irradiation solaire de la région et le type d'écoulement d'air à l'intérieur du capteur, et le produit séché qui est la pomme de terre.

Dans le prochain chapitre on prendra le soin de bien détaillé notre simulation que nous avons menée sur ce travail avec discussions des résultats obtenus.

Chapitre V



**Simulation
et résultats**

V. SIMULATION ET RESULTATS

V.1 . Introduction à la simulation :

Avant de commencer notre simulation sur **CFD Comsol 5.4 Multiphysics**, il faut d'abord fixer quelques paramètres en définissant les physiques à inclure dans notre simulateur et le type d'étude à mener.

Quelques hypothèses doivent être établies :

- ❖ C'est une étude comparative entre deux capteurs de mêmes dimensions l'un avec et l'autre sans rugosité sur l'absorbeur.
- ❖ On doit définir le type d'écoulement d'air à l'intérieur du capteur solaire.
- ❖ Le capteur est à simple passe.
- ❖ L'étude se fera sur l'air asséchant.
- ❖ L'étude est stationnaire pour des cas bien précis en écoulement d'air et transfert de chaleur.
- ❖ La simulation se fera en 2D en prenant en compte la hauteur et la longueur du capteur.
- ❖ L'étude est par unité de largeur (largeur 1m).
- ❖ L'apport de chaleur en rayonnement (irradiation solaire) est simulé par un flux de chaleur appliqué à la face externe du verre.

La Simulation qu'on va procéder se passe sur l'unité de production d'air chaud qui est notre capteur plan.

L'étude est paramétrique ou en prendra le soin de dimensionner notre capteur pour de besoin de séchage de la pomme de terre.

Cette étude n'est pas une étude de la cinétique de séchage elle est focalisée sur la partie qui précède la chambre de séchage.

On suivra l'évolution de quelque paramètre qui agit sur le capteur (rendement, Température et la vitesse à la sortie et à l'intérieur du volume de contrôle).

V.2 Présentation:

Dans cette partie du travail on se focalisera sur la simulation par l'outil software consol multiphysics 5.4 .

Voici l'interface du simulateur utilisé pour notre étude :

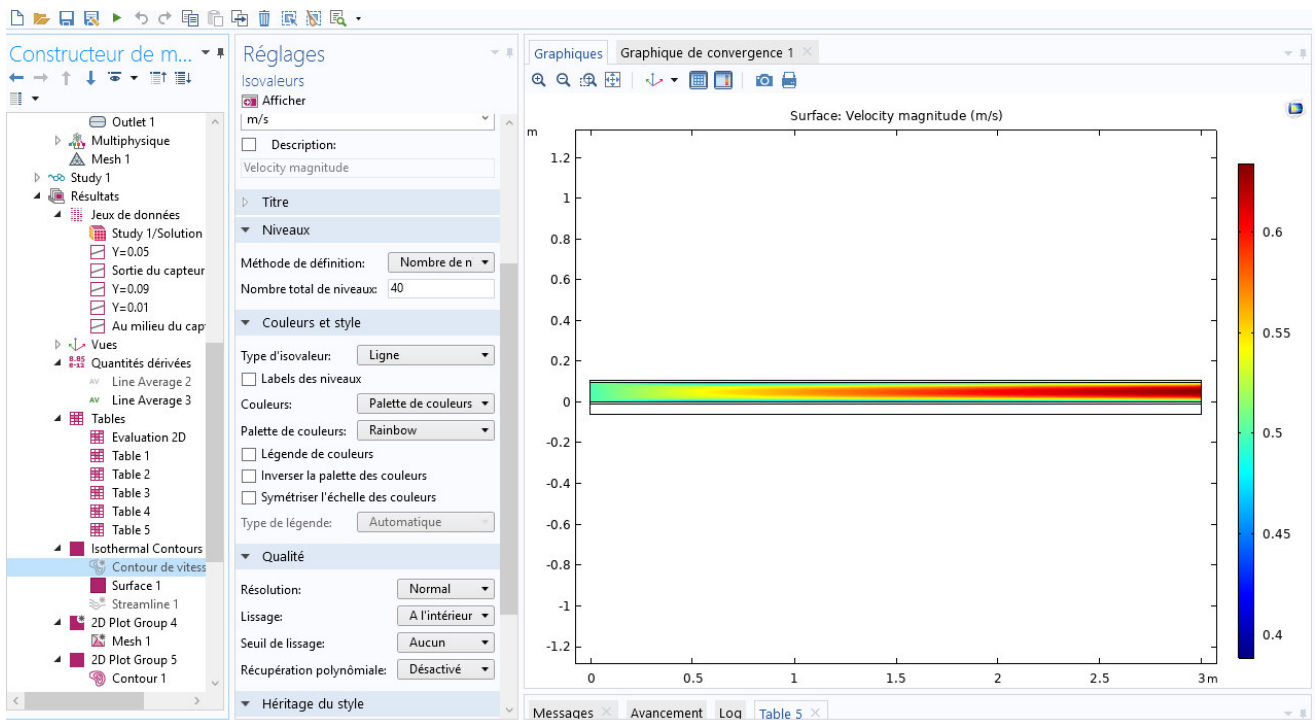


Figure V.1 : Interface du simulateur Comsol multiphysics 5.4.

On commencera par **une petite présentation des composants de notre simulation** .

V.2.1 . Domaines :

Le capteur se composera de quatre domaines superposés chacun est constitué d'un matériau spécifique .

CHAPITRE V : SIMULATION ET RESULTATS

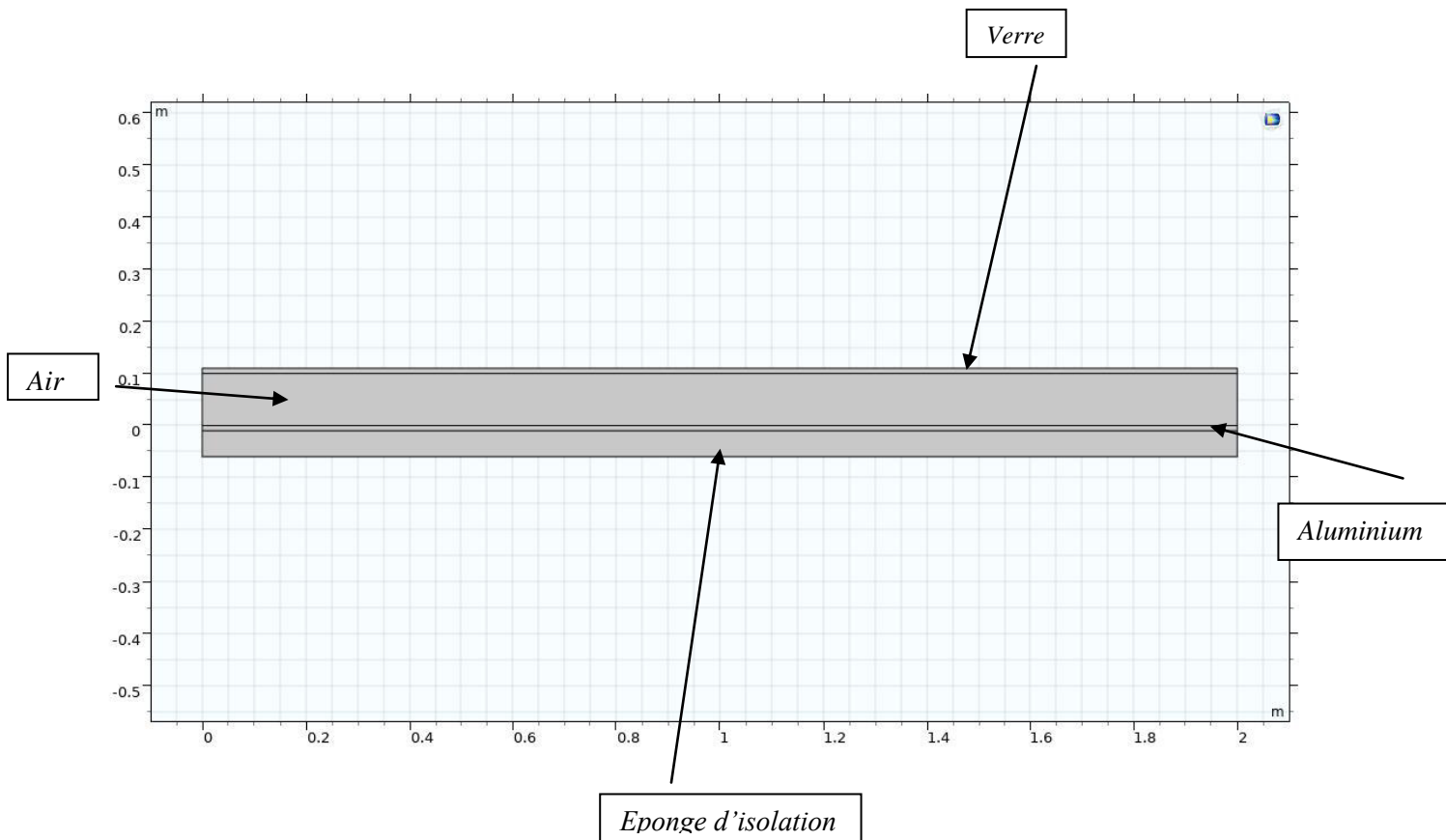


Figure V.2 : Domaines du capteur.

a. Verre (Quartz) :

Les dimensions :

Hauteur	0.01 m
Longueur	2 m

Le tableau suivant représente les propriétés du matériau :

Propriété	Variable	Valeur	Unité
☒ Masse volumique	ρ	2210[kg/m ³]	kg/m ³
☒ Conductivité thermique	k_{iso} ; $k_{ii} = k_{iso}$, $k_{i...}$	1.4[W/(m*K)]	W/(m*K)
☒ Capacité thermique à pression constante	C_p	730[J/(kg*K)]	J/(kg*K)
Perméabilité relative	$\mu_{r_{iso}}$; $\mu_{r_{ii}} = \mu_{r...}$	1	1
Conductivité électrique	σ_{iso} ; $\sigma_{mai...}$	1e-14[S/m]	S/m
Permittivité relative	$\epsilon_{r_{iso}}$; $\epsilon_{r_{ii}} = \epsilon_{r...}$	4.2	1
Rapport des chaleurs spécifiques	γ	1	1
Indice de réfraction, partie réelle	n_{iso} ; $n_{ii} = n_{iso}$, $n_{i...}$	1.5	1
Indice de réfraction, partie imaginaire	$k_{i_{iso}}$; $k_{i_{ii}} = k_{i_{iso}}$, $k_{i...}$	0	1

Figure V.3 : Contenus du verre.

CHAPITRE V : SIMULATION ET RESULTATS

B .Air :

L'air représente notre volume de contrôle c'est sur cette partie du capteur que l'étude est focalisée pour suivre l'évolution de la température et la vitesse

Dimensions :

Hauteur	0.1 m
Longueur	2 m

Propriétés :

»	Propriété	Variable	Valeur	Unité
✓	Masse volumique	rho	rho(pA,T)	kg/m ³
✓	Conductivité thermique	k_iso ; kii = k_iso, ki...	k(T)	W/(m.K)
	Coefficient de dilatation thermique	alpha_iso ; alphaii...	alpha_p(pA,T)	1/K
	Masse molaire moyenne	Mn	0.02897	kg/mol
	Viscosité de volume	muB	muB(T)	Pa.s
	Perméabilité relative	mur_iso ; murii = ...	1	1
	Permittivité relative	epsilonIso ; epsilo...	1	1
	Conductivité électrique	sigma_iso ; sigmaii...	0[S/m]	S/m
	Vitesse du son	c	cs(T)	m/s
	Indice de réfraction, partie réelle	n_iso ; nii = n_iso,...	1	1
	Indice de réfraction, partie imaginaire	ki_iso ; kiii = ki_iso,...	0	1
	Paramètre de non-linéarité	BA	(def.gamma+1)/2	1

Figure V.4 : Contenus de l'air.

c. Aluminium :

Ce matériau joue le rôle de l'absorbeur dans ce dispositif c'est une taule fine en Aluminium peinte en noir pour capter le maximum de l'irradiation solaire

Dimensions :

Hauteur	0.01 m
Longueur	2 m

CHAPITRE V : SIMULATION ET RESULTATS

Les propriétés de l'aluminium utilisé dans ce capteur sont les suivants :

»	Propriété	Variable	Valeur	Unité
✓	Capacité thermique à pression constante	Cp	904[J/(kg·K)]	J/(kg·K)
✓	Masse volumique	rho	2700[kg/m ³]	kg/m ³
✓	Conductivité thermique	k_iso ; kii = k_iso, ki...	237[W/(m·K)]	W/(m·K)
	Conductivité électrique	sigma_iso ; sigmaii...	35.5e6[S/m]	S/m
	Coefficient de dilatation thermique	alpha_iso ; alphaii = ...	23.1e-6[1/K]	1/K
	Rapport des chaleurs spécifiques	gamma	1	1
	Coefficient de dispersion	sigmaS	1	1/m
	Coefficient d'absorption	kappaR	1	1/m
	Module d'Young	E	70.0e9[Pa]	Pa
	Coefficient de Poisson	nu	0.35	1

Figure V.5 : Contenus de l'Aluminium .

d. Eponge d'isolation :

Ce matériau est intitulé (Foam [solid, 101 kPa]) dans le simulateur son intérêt est de limité les pertes thermiques vers l'arrière du capteur par conduction

Dimensions :

Hauteur	0.05 m
Longueur	2 m

Propriétés :

»	Propriété	Variable	Valeur	Unité
✓	Conductivité thermique	k_iso ; kii = k_iso, ki...	k_solid_101_kPa_1(T[1/K...	W/(m·K)
✓	Capacité thermique à pression constante	Cp	C_solid_101_kPa_1(T[1/...	J/(kg·K)
✓	Masse volumique	rho	rho(T[1/K])[kg/m ³]	kg/m ³
	TD	TD	TD_solid_101_kPa_1(T[1...	m ² /s
	Rapport des chaleurs spécifiques	gamma	1	1

Figure V.6 : Contenus de la mousse.

CHAPITRE V : SIMULATION ET RESULTATS

Ce schéma du capteur indique les bornes de l'isolation thermique pour cette simulation :

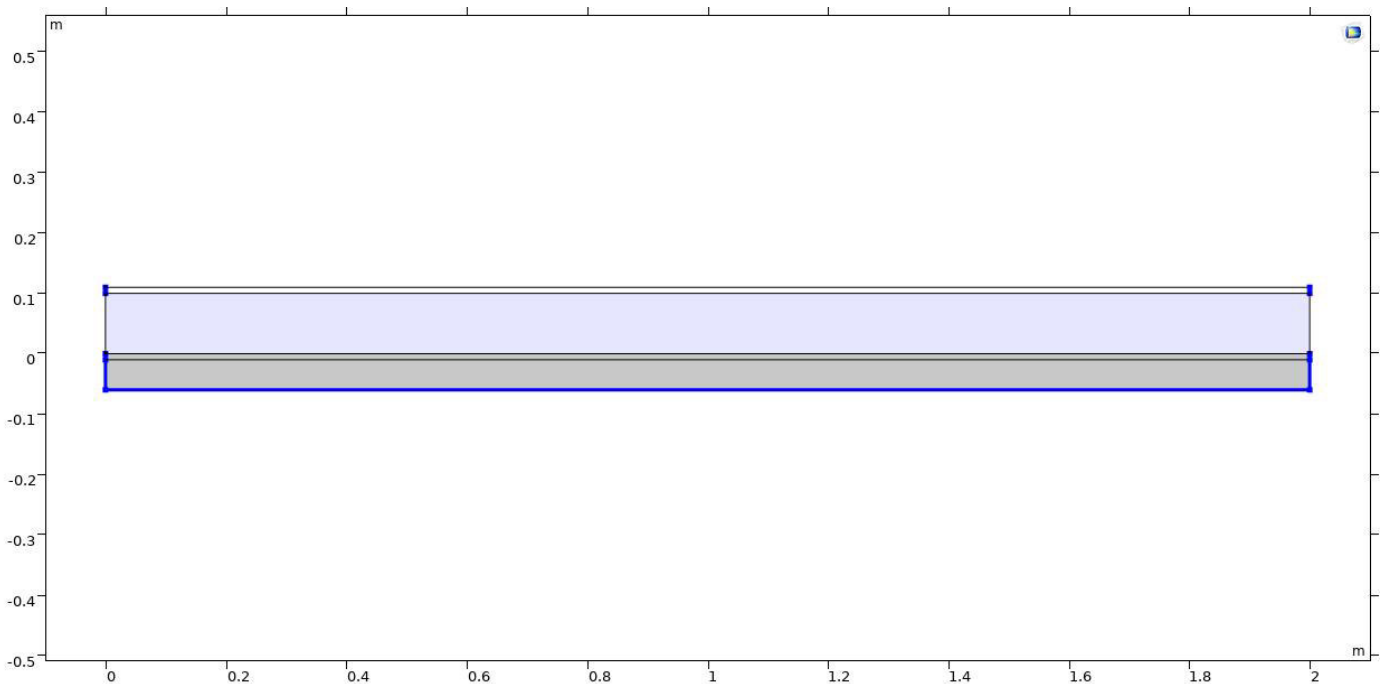


Figure V.7 : Isolation thermique dans le capteur.

Les lignes représentent l'isolation thermique dans le capteur, on les deux parties verticales aux bords du verre ou il se passe pratiquement aucun échange thermique et l'arrière du capteur qui est isolé par l'éponge.

V.2.2 Maillage et volume de contrôle :

Le maillage pour cette étude est contrôlé par la physique selon et suit les trois contributeurs qui sont suivant les physiques imposées au logiciel simulateur :

- Heat Transfer in fluide (ht) [Transfert de chaleur dans les fluide].
- Turbulent flow, k- ϵ (spf) [écoulement turbulent]
- Nonisothermal flow 1 (nitf1) [écoulement non isotherme]

Extrêmement grossier	
Contributeur	Utiliser
Heat Transfer in Fluids (ht)	☒
Turbulent Flow, k- ϵ (spf)	☒
Nonisothermal Flow 1 (nitf1)	☒

Figure V.8 : Contributeurs lors du maillage.

La figure suivante montre le maillage de notre capteur :

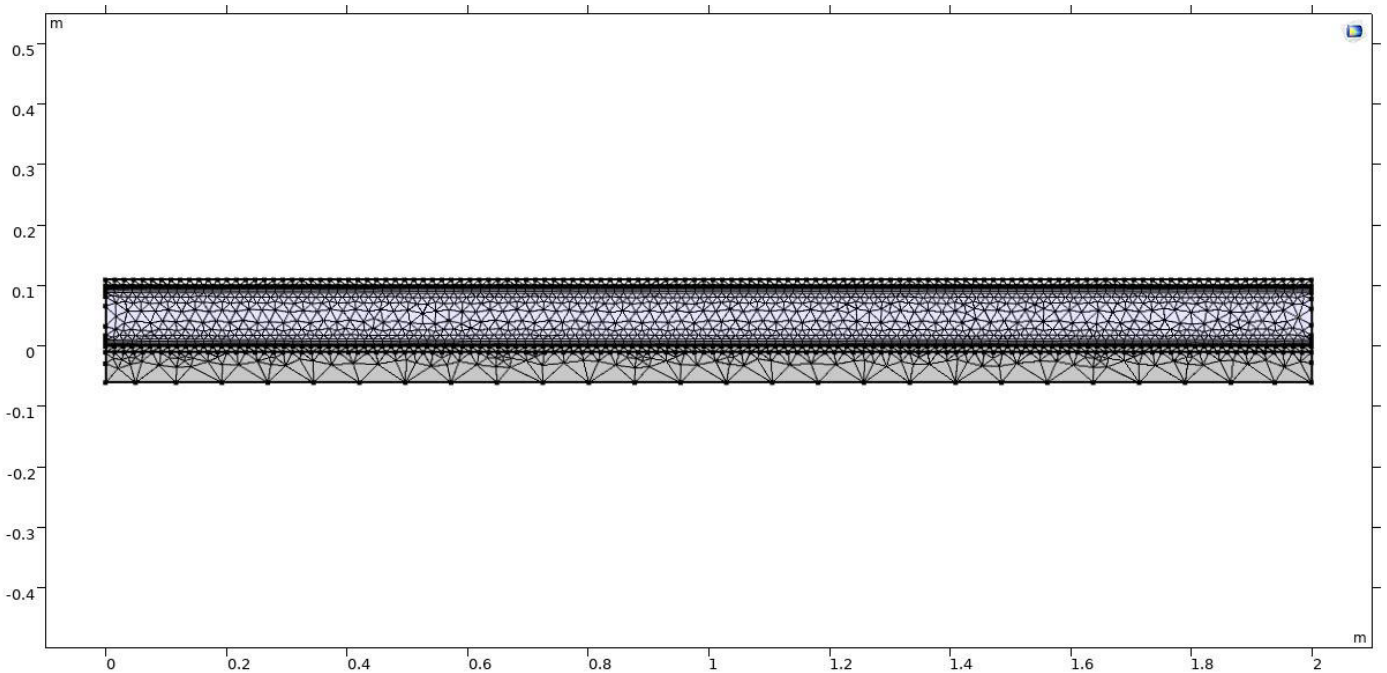


Figure V.9 : Maillage du capteur lisse .

V.2.3 Jeux des données :

a. Lignes de coupes horizontales :

Pour les interprétations des résultats sur l'évolution de la température et la vitesse on utilisera des lignes de coupes qui passent par des points bien précis :

Y = 0.01 m :

Cette ligne de coupe passe par une hauteur de 0.01 m du volume de contrôle (air)

La ligne rouge représente la ligne de coupe entre les deux points :

Point 1	x = 0 m y = 0.01 m
Point 2	x = 2 m y = 0.01 m

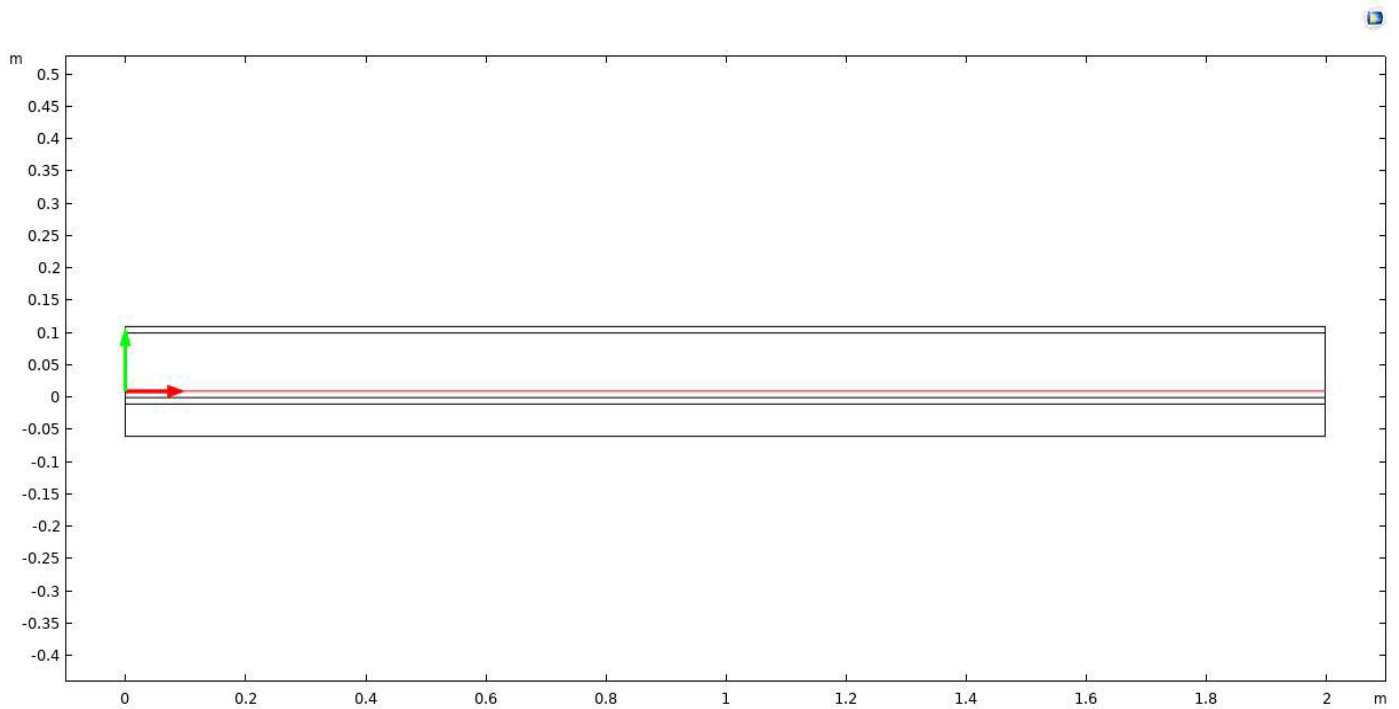


Figure V.10 : Ligne de coupe horizontale $Y=0.01$ m.

$Y = 0.05$ m :

Elle passe par une hauteur de 0.05 m qui représente le milieu du capteur :

Points de passage :

Point 1	$x = 0$ m $y = 0.05$ m
Point 2	$x = 2$ m $y = 0.05$ m

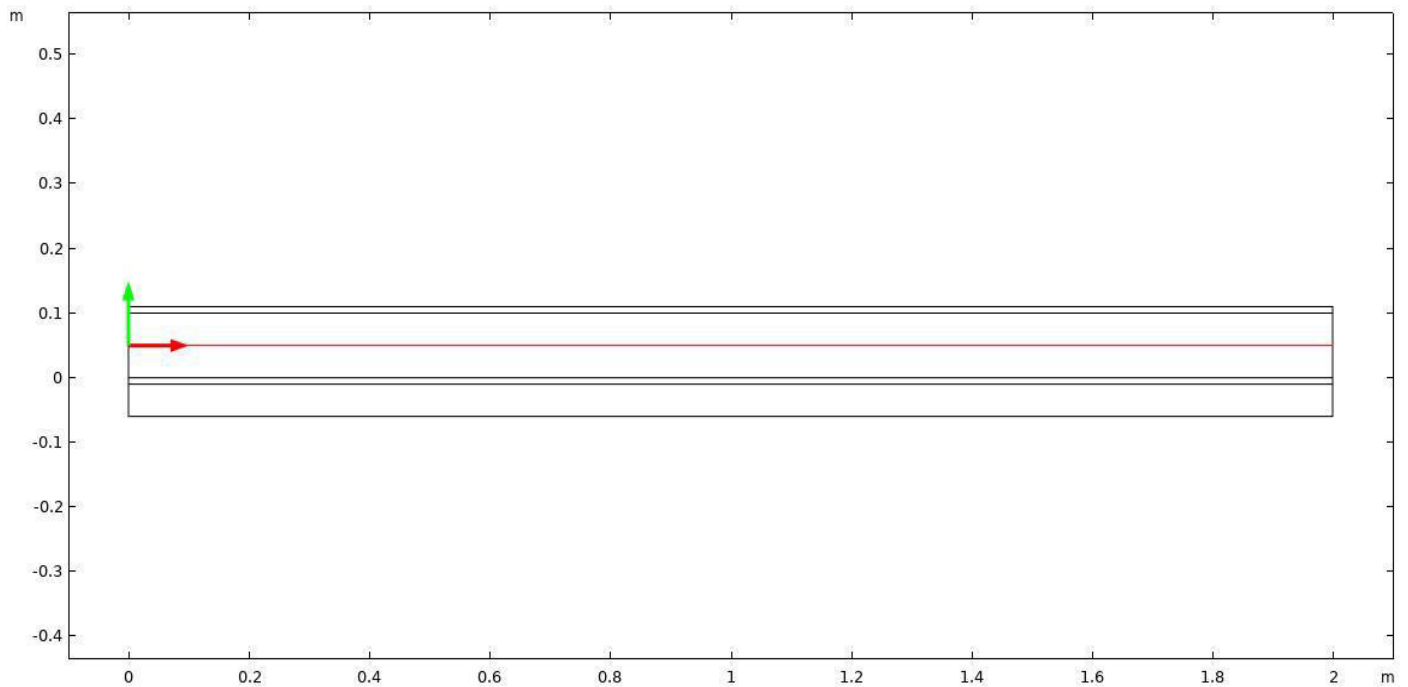


Figure V.11 : Ligne de coupe horizontale $Y = 0.05$ m.

$Y = 0.09$ m :

Celle-ci est la plus proche du flux solaire max qui est appliqué sur la vitre, elle passe à un millimètre près du vitrage, pour la simulation les courbes qui passent par cette ligne ont la plus grande évolution

Point de passage :

Point 1	$x = 0$ m $y = 0.09$ m
Point 2	$x = 2$ m $y = 0.09$ m

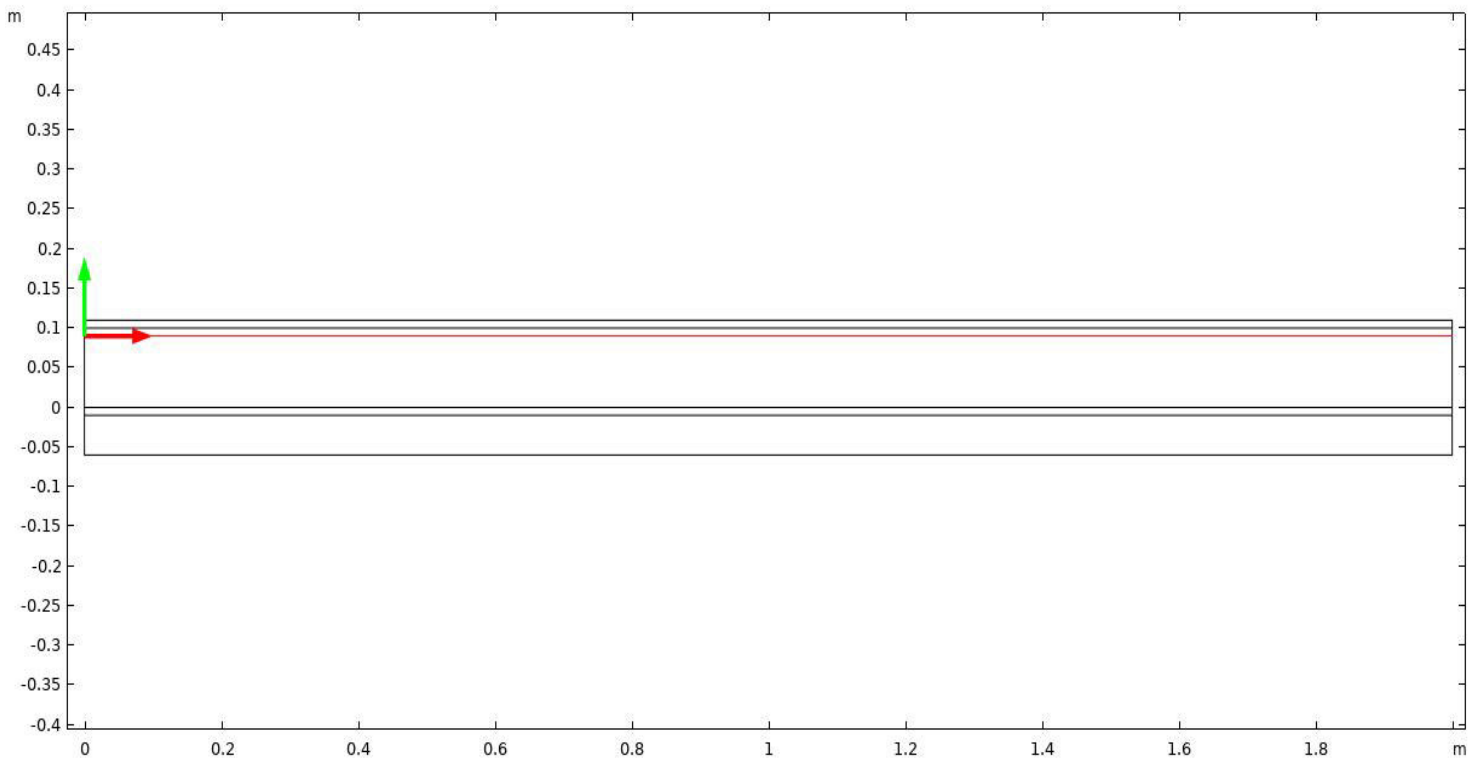


Figure V.12 : ligne de coupe horizontale $Y = 0.09$ m.

Ces lignes de coupes sont horizontales donc elles expriment les grandeurs le long de notre capteur.

On utilisera des lignes de coupes verticales pour suivre l'évolution de la vitesse et la température à la sortie et au milieu du capteur, celle de la sortie nous permet d'évaluer la température moyenne qui est le but de notre étude, elle doit être adaptée afin d'avoir des bonnes conditions de séchages de notre produit agro-alimentaire (pomme de terre), pour rappel ce dernier exige une température de sortie qui varie de 50 à 70 °C.

B.Lignes de coupes verticales :

x = 1 m :

Cette ligne passe par le milieu du capteur on l'utilise pour définir le profil parabolique de la vitesse

CHAPITRE V : SIMULATION ET RESULTATS

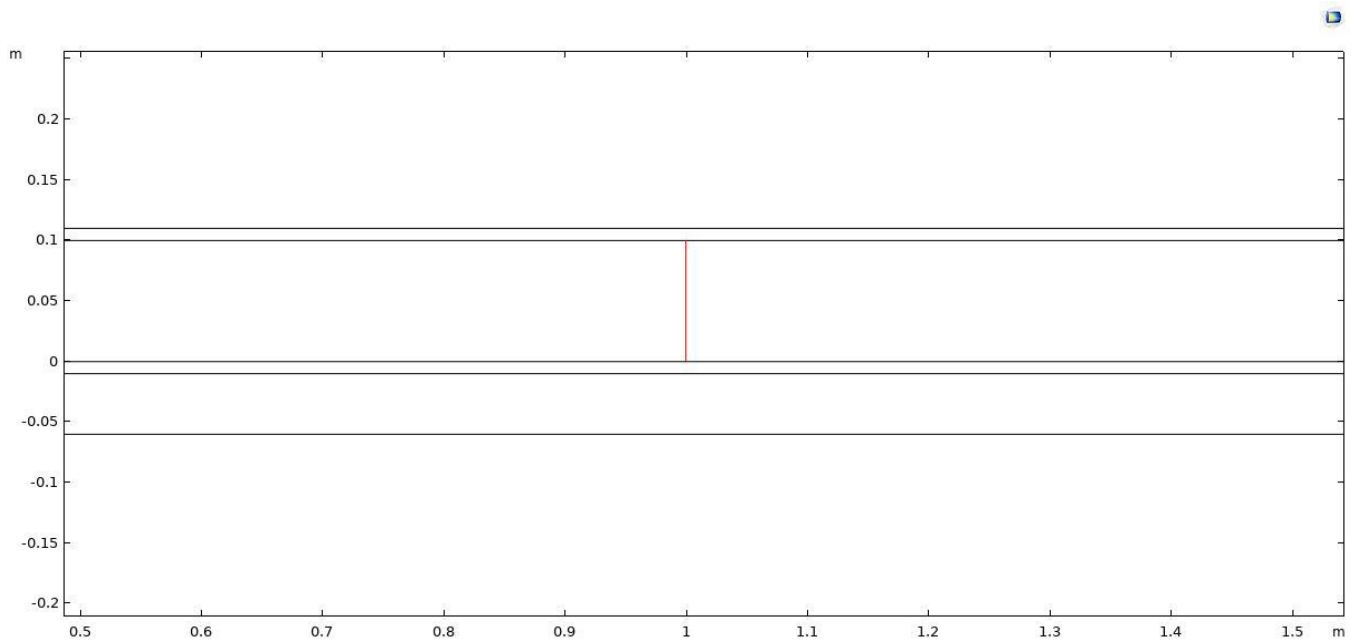


Figure V.13 : Ligne de coupe verticale $x=1\text{m}$.

Point de passage :

Point 1	$x= 1\text{ m}$	$y=0\text{ m}$
Point 2	$x= 1\text{ m}$	$y=0.1\text{ m}$

$x = 2\text{ m}$:

Cette ligne de coupe est très importante pour cette simulation elle permet d'évaluer et la température moyenne et la vitesse à la sortie de l'unité de production d'air chaud et à l'entrée de la chambre de séchage elle passe exactement entre les deux elle représente l'entrée de l'un et la sortie de l'autre.

Point de passe :

Point 1	$x= 2\text{ m}$	$y=0\text{ m}$
Point 2	$x= 2\text{ m}$	$y=0.1\text{ m}$

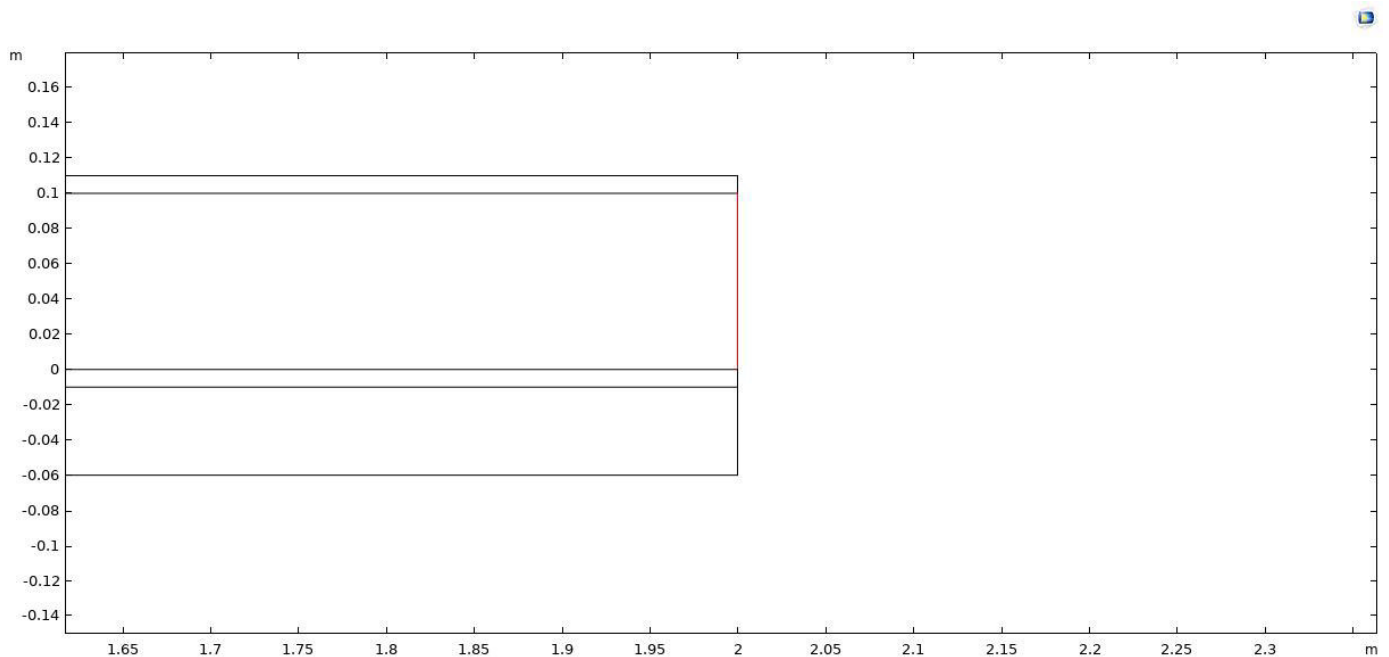


Figure V.14 : Ligne de coupe verticale $x = 2$ m.

V.3 Simulation :

V.3.1 Introduction :

Dans ce chapitre on va mener plusieurs expériences pour déterminer les différents paramètres qui interviennent à l'intérieur du capteur lors de l'opération du séchage qui sont comme suit :

- La température moyenne à la sortie du capteur.
- La répartition de la température et la vitesse le long du capteur.
- La vitesse moyenne sur le volume de contrôle.
 - La température moyenne à l'intérieur du capteur.
 - Le rendement thermique du capteur.

La simulation se composera de deux parties essentielles :

La première est avec un capteur lisse et la deuxième est celle d'un capteur avec rugosité pour les mêmes dimensions et conditions en flux solaire, température et vitesse à l'entrée du capteur thermique.

CHAPITRE V : SIMULATION ET RESULTATS

V.3.2 Capteur Lisse (sans rugosité) :

Le travail que nous proposons se base sur trois flux de chaleur différent le pour un capteur avec des dimensions bien définies.

L'évolution du flux solaire est sur la base d'une journée fictive avec une moyenne de température du mois de juillet de 30°C Celsius à l'entrée du capteur.

Pour la première simulation et interprétation des résultats obtenus le capteur est considéré lisse

V.3.2.1 Résultats pour différents flux de chaleur de la journée (Capteur lisse) :

Les trois flux de chaleur considérés sont :

a.100 W/m² :

Représente le flux de chaleur pour 8H et 18H.

La vitesse : à l'entrée du capteur est de 0.5 m/s la figure suivante montre la répartition de la vitesse dans le volume de contrôle

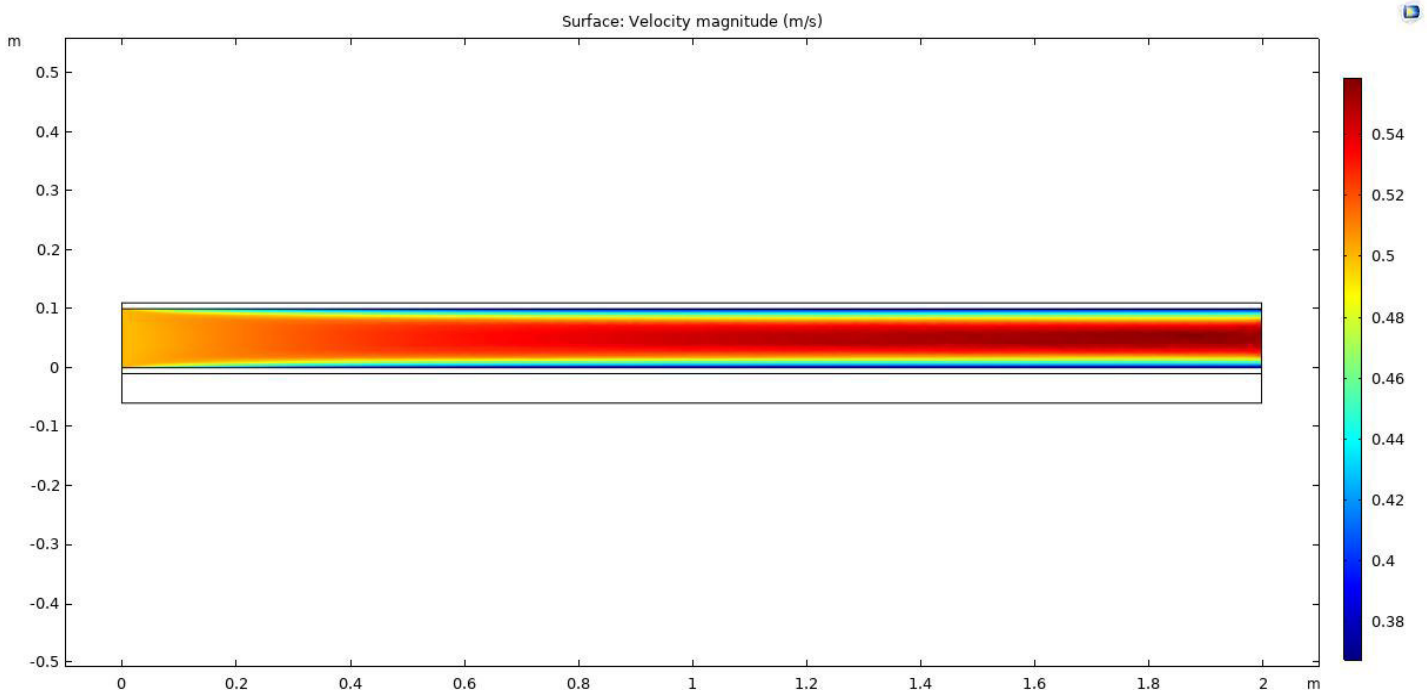


Figure V.15 : Répartition de la vitesse le long du capteur (flux 100 W/m²).

Pour la ligne de coupe verticale à la sortie du capteur on a l'évolution de la vitesse :

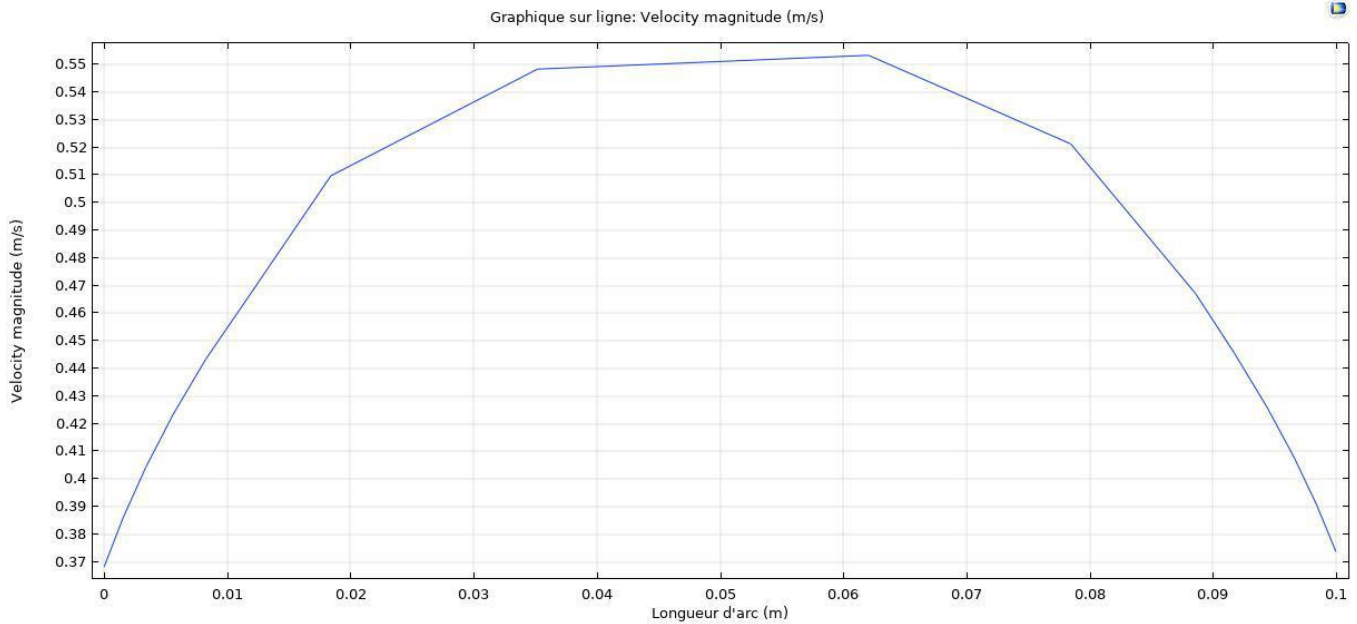


Figure V.16 : Profile de vitesse à la sortie du capteur (flux 100 W/m²).

Température :

La température à l'entrée du capteur est 30 °C et c'est le cas pour tout le capteur avant que l'air entre pour l'interprétation des résultats on suivra l'évolution de la température suivant trois lignes de coupes horizontales présentées auparavant.

Pour des raisons de simulation le flux de chaleur appliquée sur l'air est d'un seul côté c'est le côté de la vitre, l'absorbeur est pas considéré par contre le flux de chaleur totale reçu par l'air et par la vitre et par l'absorbeur est d'un seul côté.

Pour notre simulation le but c'est d'évaluer la température à la sortie du capteur pour un bon dimensionnement de notre dispositif.

CHAPITRE V : SIMULATION ET RESULTATS

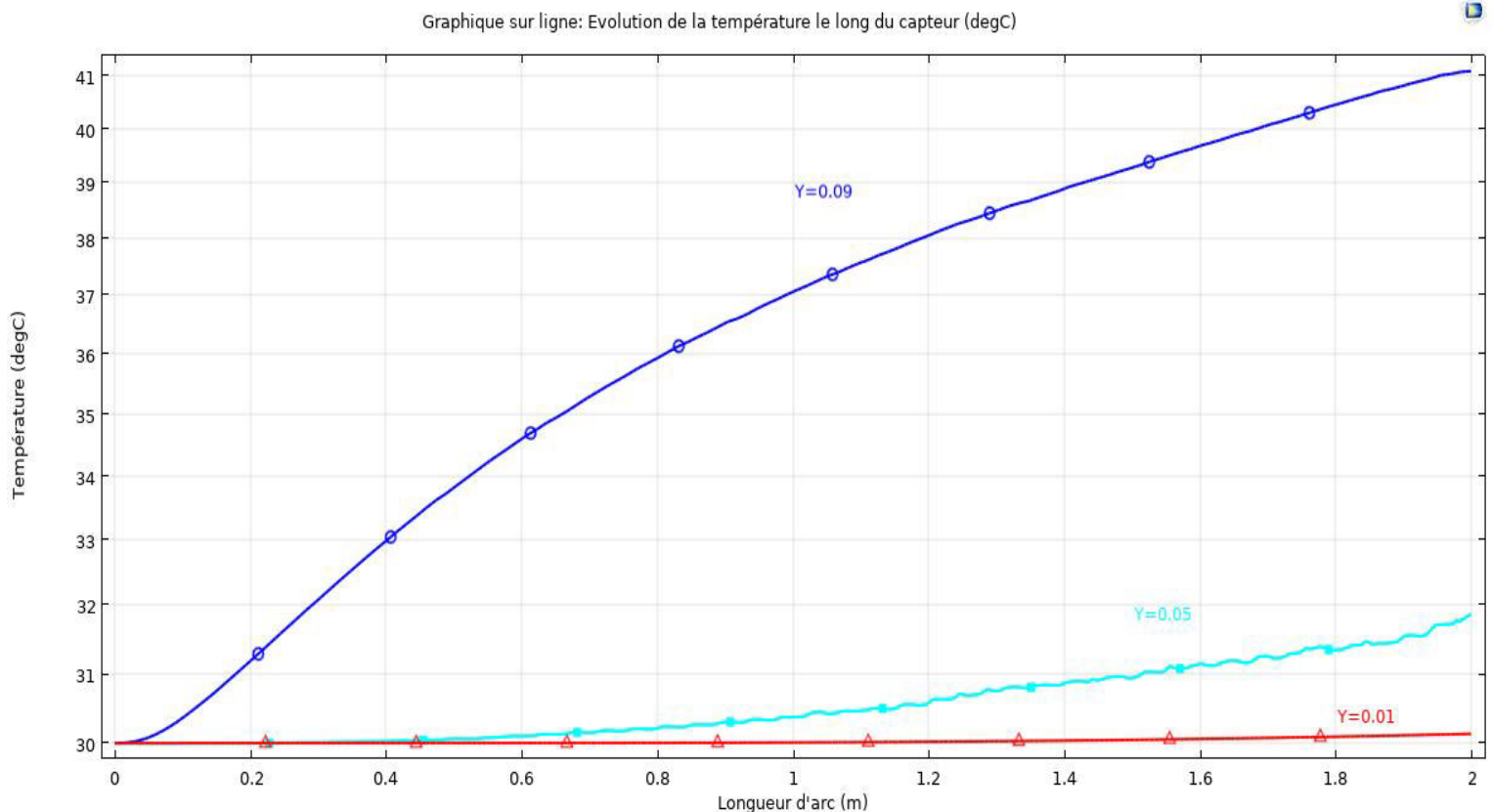


Figure V.17 : Courbe d'évolution de la température le long du capteur (flux de 100 W/m^2).

Interprétation et discussions des résultats obtenus :

*La température moyenne à la sortie du capteur pour un flux solaire de 100 W/m^2 est de

33,650 °C pour une température et une vitesse d'entrée de 30°C et 0.5 m/s .

La différence de la température de l'air asséchant entre l'entrée et la sortie n'est pas considérable et c'est dû au flux solaire qui est de l'ordre de 100 W/m^2 .

Le flux solaire est moins important à ces heures 8H et 18H à cause de la position du soleil dans le ciel qui soit à une hauteur de 36.7° et 13.1° , et une Azimuth de -88.2° et 13.1° respectivement, pour cette position là du ciel le capteur ne perçoit pas la majorité du flux solaire incident.

Nous avons remarqué d'après **Figure V.17** que la courbe d'évolution de la température le long de la ligne de coupe $Y = 0,09 \text{ m}$ est plus importante et cela est dû à sa proximité du vitrage $Y = 0,1 \text{ m}$ qui perçoit la totalité du flux solaire incident donc les particules d'air qui sont proches de la paroi sont les plus exposées à une évolution plus conséquentes de la température, d'où l'évolution moins importantes de la température en s'éloignant de la vitre.

CHAPITRE V : SIMULATION ET RESULTATS

* **Figure V.15** représente la répartition vitesse de l'air à l'intérieur du capteur on remarque que la vitesse est nulle au niveau des deux parois à cause des phénomènes d'adhérences à la paroi dans un écoulement d'un fluide (air) entre deux plaques.

Le profile de vitesse est parabolique sur la ligne de coupe verticale qui passe par la sortie du capteur.

On constate que la vitesse de sortie la plus importante se situe au point $Y = 0.062$ m et elle est de l'ordre de 0.552 m/s.

La vitesse moyenne à l'intérieur du capteur est $0,58233$ m/s calculée par le simulateur et de la on peut déduire le débit

$$Q_v = V_m * S$$

V_s : Vitesse de sortie la plus importante

S : section de passe

$V_m = 0,058233$ m/s

$S = 0.1 * 1 = 0.1$ m²

Donc le débit à l'intérieur du capteur est

$$Q_v = 0,058233 \text{ m}^3/\text{s}$$

On ne va pas calculer le débit de chaque flux solaire vue que le débit est conservé.

b. 500 W/m² :

C'est le flux solaire à 10H et 15H, il représente le deuxième flux le plus important pour cette simulation.

Vitesse :

La répartition et le profile de vitesse sont plus ou moins les mêmes pour tout les flux de chaleur reçu par le capteur les deux figures suivantes le confirme :

CHAPITRE V : SIMULATION ET RESULTATS

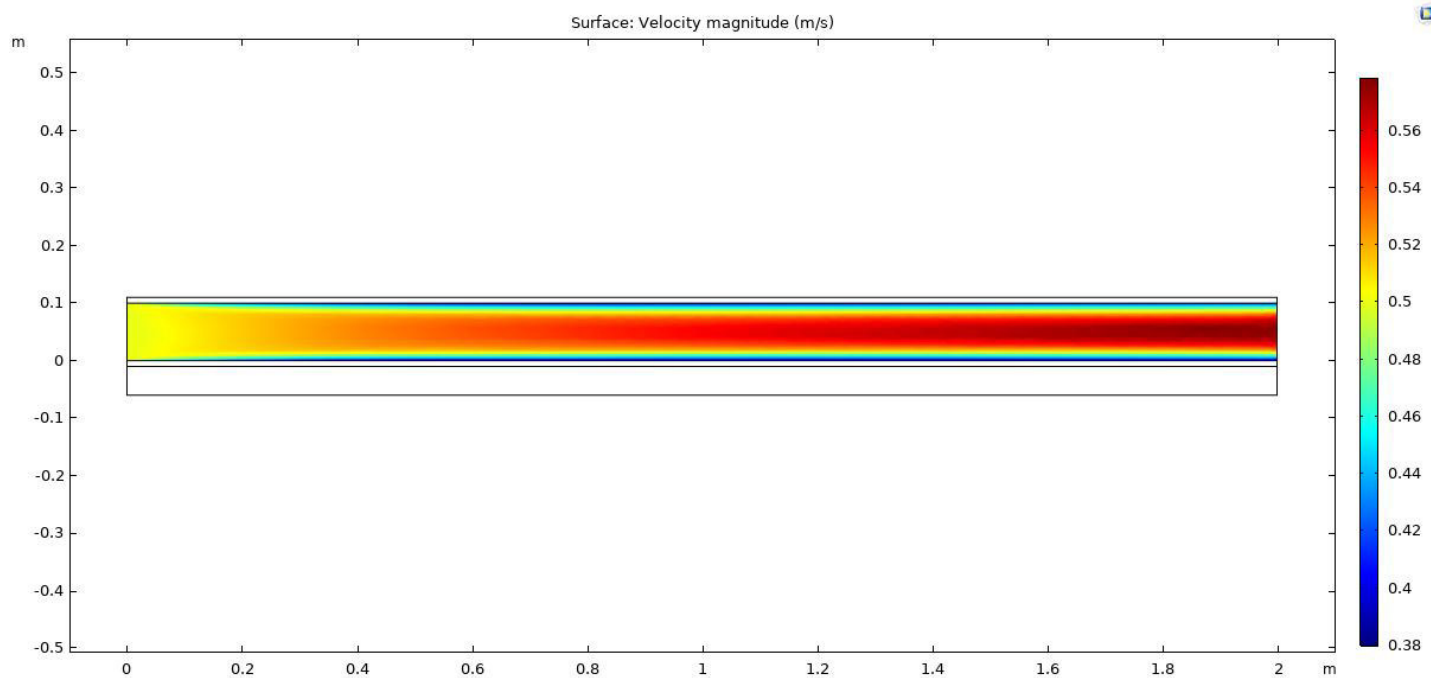


Figure V.18 : Répartition de la vitesse (flux de chaleur 500 W/m²).

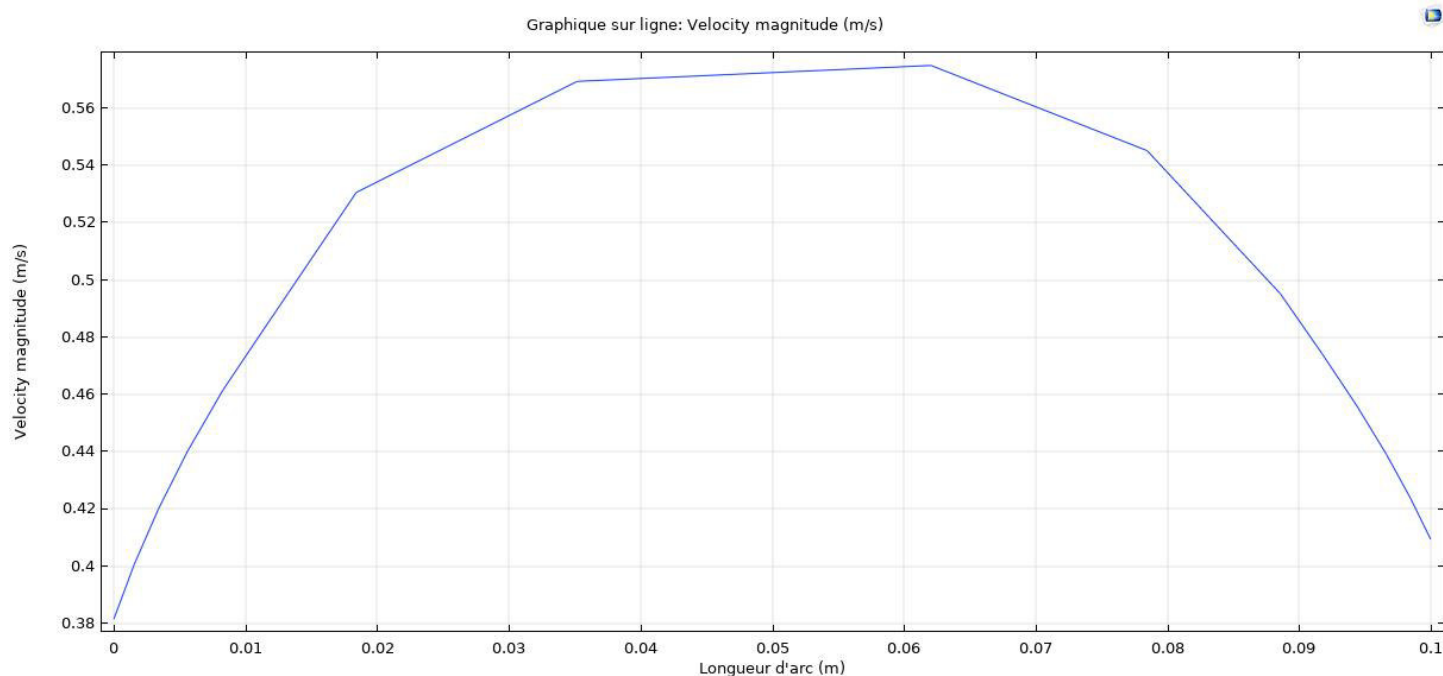


Figure V.19 : Profile de vitesse (flux solaire 500 W/m²).

Température :

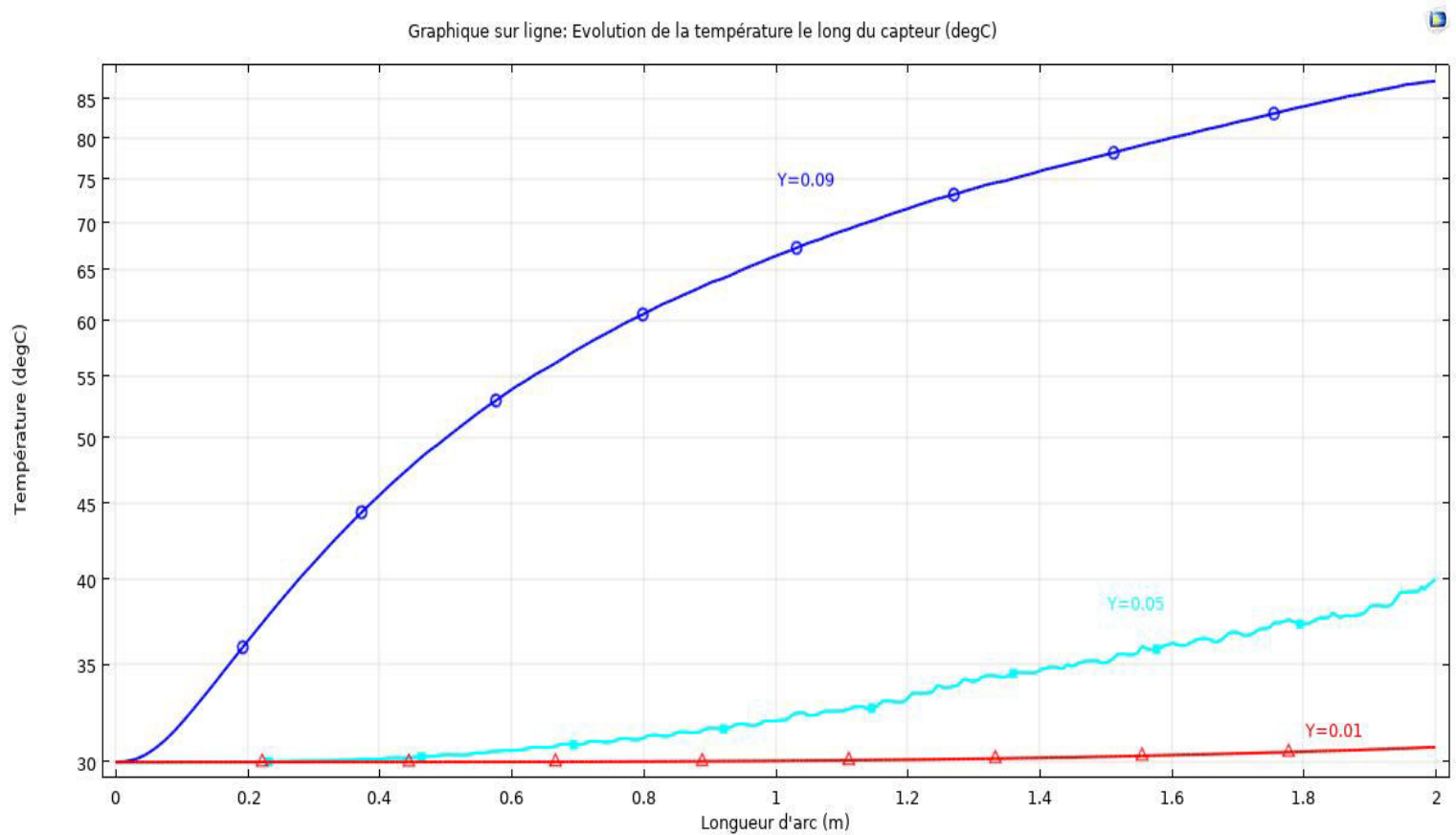


Figure V.20: Evolution de la température (flux 500 W/m²).

Interprétations et discussions des résultats obtenus :

*On constate que la vitesse la plus importante 0,568 m/s est très proche de celle obtenue pour un flux de 100 W/m² qui vaut 0,552 m/s.

La vitesse à la sortie la plus importante se situe au point Y = 0.062 m comme pour le flux de 100 W/m².

Donc le profile et la répartition de vitesse sont plus ou au moins les mêmes pour tout les flux solaire carce dernier influe plus sur l'évolution de la température que celle de la vitesse comme le montre bien les **Figures V.15 et V.18**.

CHAPITRE V : SIMULATION ET RESULTATS

*La température moyenne à la sortie du capteur pour un flux de chaleur de 500 W/m^2 avec les mêmes conditions à l'entrée (30°C , $0,5 \text{ m/s}$) est **49,033 °C**.

L'évolution de la température le long du capteur est plus conséquente c'est du au flux de chaleur qui est plus grand par rapport à la première simulation, les échanges de chaleur entre l'air asséchant et le flux solaire sont importante que se soit avec rayonnement ou par convection.

Le Flux solaire est plus important à cause de la position du soleil à 10H et 15H qui est à une hauteur de 60.8° et 49.1° , et une azimuth de -70.6° et 83.5° respectivement ce qui permet au capteur de percevoir d'avantages du flux solaire.

Le rayonnement solaire, ne traverse pas entièrement le vitrage du capteur car une petite partie est réfléchié par la vitre, et surtout à cause de l'angle d'incidence avec le capteur qui est certes moins important que celui de 8H du matin mais toujours aussi influent.

La différence entre les courbes qui passent par les lignes de coupes $Y = 0.01 \text{ m}$, $Y = 0.05 \text{ m}$ et $Y = 0.09 \text{ m}$ a été expliqué dans le paragraphe précédent.

c. 950 W/m²:

Le flux de chaleur maximal pour midi TSV ou 13H heure Locale. Il représente le flux le plus important dans la simulation pour l'irradiation solaire maximale pour la journée type

Vitesse :

CHAPITRE V : SIMULATION ET RESULTATS

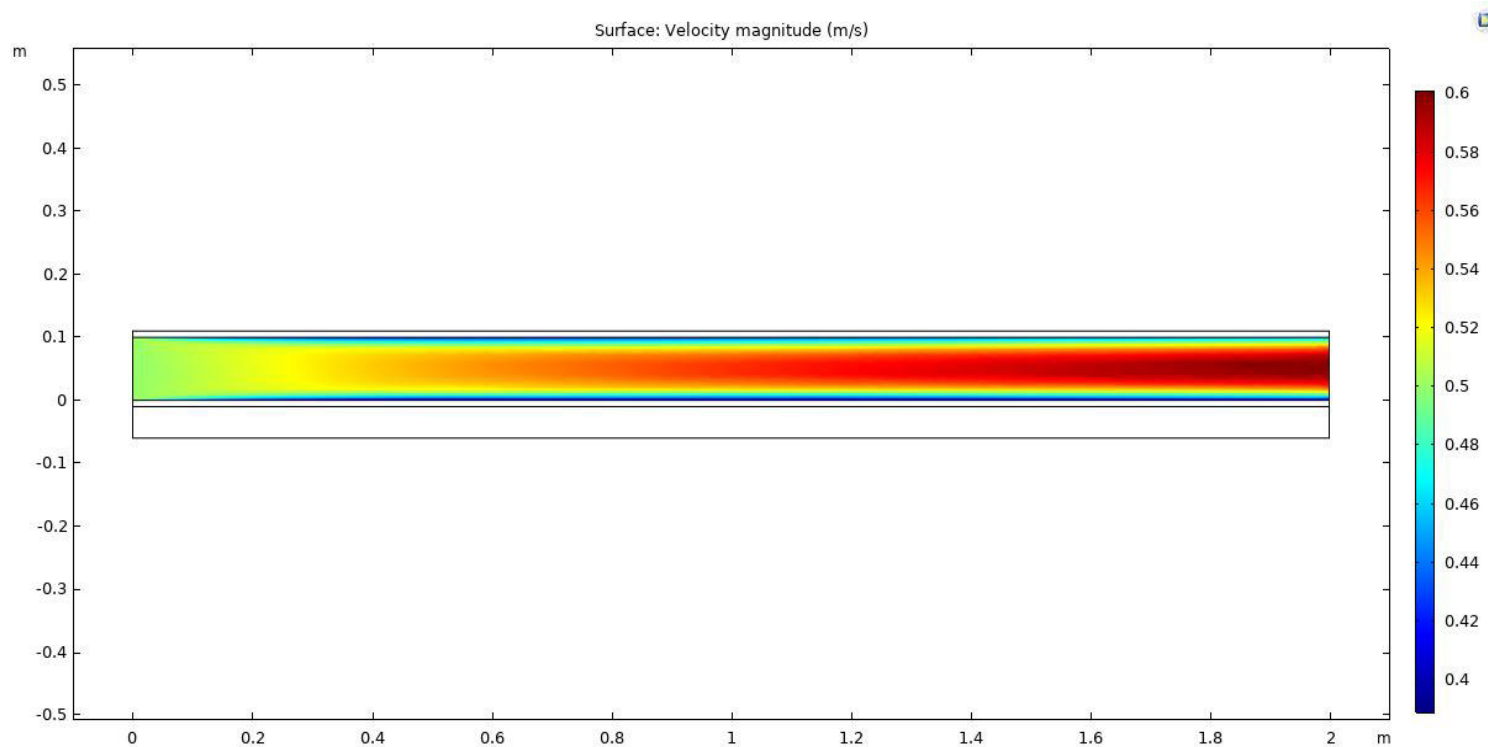


Figure V.21: Répartition de la vitesse pour un flux solaire 950 W/m^2 .

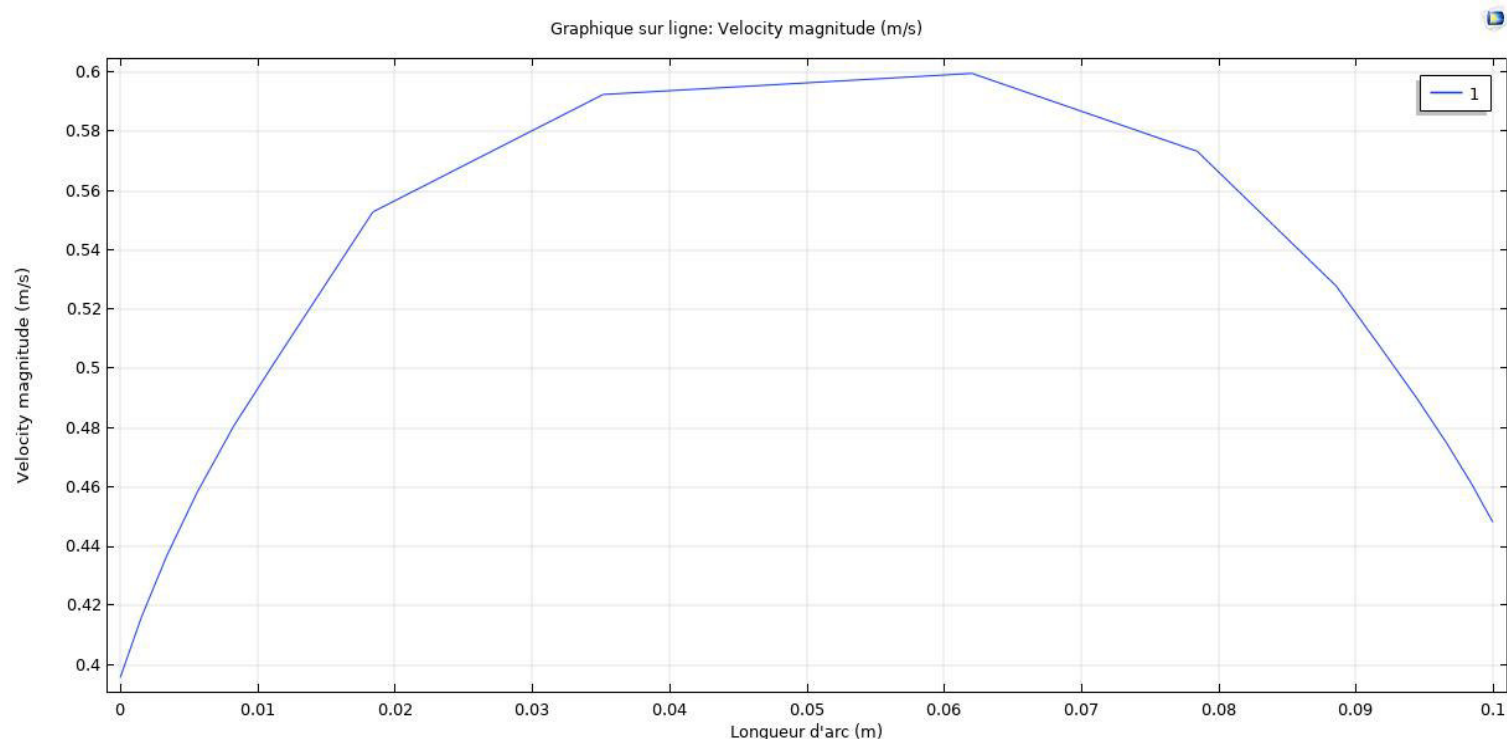


Figure V.22 : Courbe de vitesse à la sortie du capteur (flux solaire 950 W/m^2).

CHAPITRE V : SIMULATION ET RESULTATS

Température :

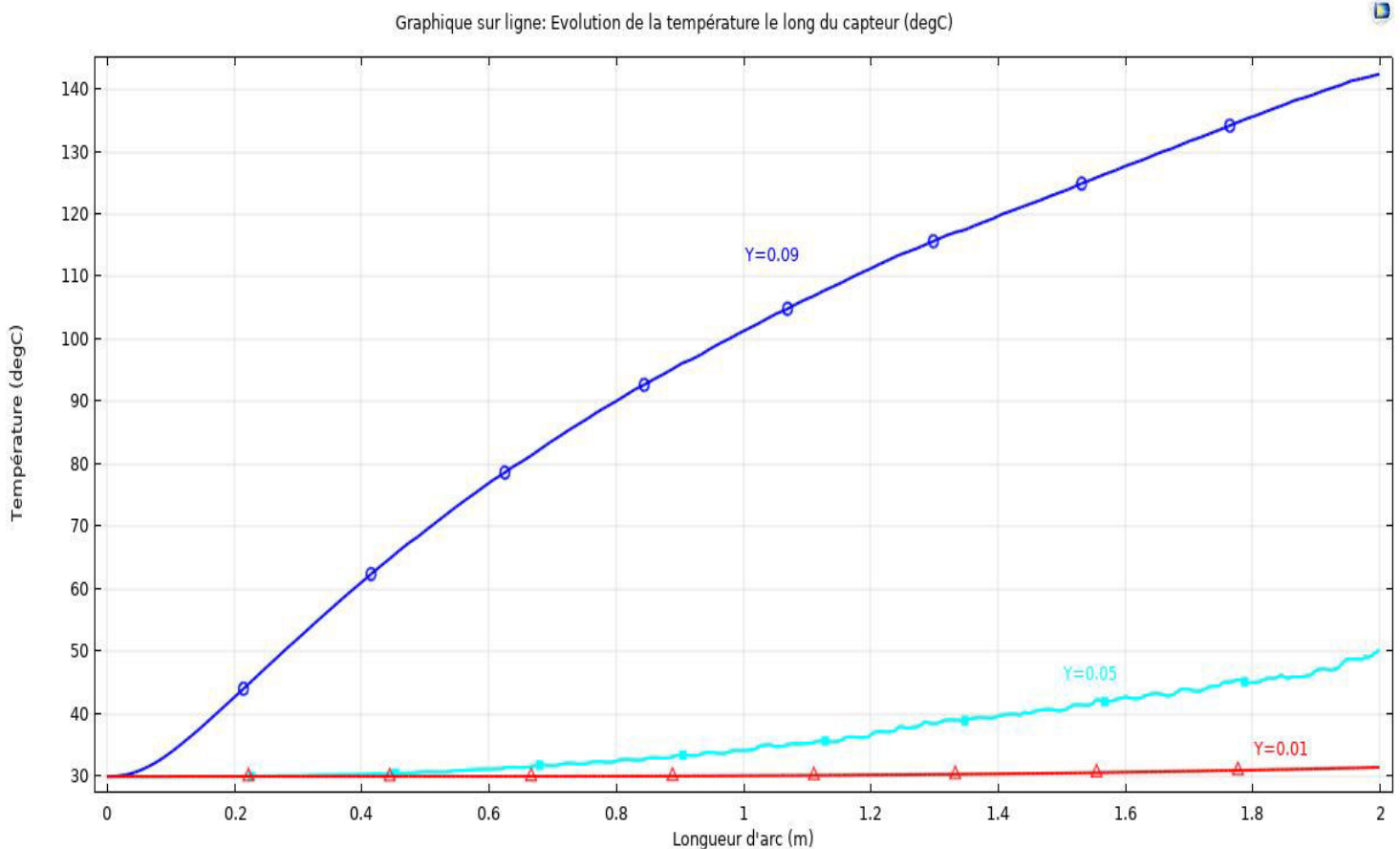


Figure V.23 : Courbes des Températures (Flux Solaire : 950W/m²).

Interprétations et discussions des résultats obtenus :

*La répartition des vitesses est distribuée de la même manière que les autres flux, le point de vitesse le plus grand est égal à 0.6 m/s et elle au point $x = 2$ m et $y = 0.062$ m.

La vitesse comme le montre la **figure V.21** est légèrement plus importante que le cas du flux de 500 W/m² à cause de la hausse de température qui fait activer les interactions intermoléculaires qui rendra l'air un plus vif pour un flux de chaleur de 950 W/m² avec les mêmes dimensions du capteur.

Le profile de vitesse sur la **Figure V.22** est parabolique avec une allure un peu plus grande c'est du à la valeur maximal de la vitesse, le profile de la vitesse n'est pas nul au dernier point sur la vitre est égal à 0.45 m/s à c'est du aussi au flux solaire très important qui veut dire un fluide plus vif et considérant que ce point se situe sur la vitre, les particules d'air chauffés vont plus rencontrer des phénomènes d'adhérences à la paroi.

CHAPITRE V : SIMULATION ET RESULTATS

*La température moyenne à la sortie du capteur pour un flux solaire incident de 950 W/m^2 qui est le flux maximal pour notre simulation est **67,564 °C**.

La valeur moyenne à la sortie approche la valeur idéale pour le séchage de la pomme de terre qui varie entre 50 et 70 °C.

L'ensoleillement est maximal a midi TSV 13H heure locale le soleil étant à la position la plus haute dans le ciel dans la journée avec une hauteur et une azimuth de 70.0° et 44.8° respectivement, ce qui permet au capteur de capté le maximum du flux solaire incident malgré les pertes sur le rayonnement avec absorption du verre (quantité minimale) et une autre partie réfléchié par la vitre aussi.

Les courbes de la température sur la **Figure V.23** montrent que la température de l'air à des points ponctuels peut s'approcher de 140 °C.

La courbe pour la ligne de coupe $Y = 0,01 \text{ m}$ est identique que pour les autres flux.

La courbe qui passe par le milieu du volume de contrôle ($Y = 0,05 \text{ m}$) montre une évolution signifiante qui approche 50 °C à la sortie du capteur et c'est une valeur optimal pour un bon séchage.

CHAPITRE V : SIMULATION ET RESULTATS

V.3.2.2 Résumé des Résultats pour le capteur lisse (sans rugosité) :

a. Température moyenne à la sortie :

Ce tableau montre l'évolution de la température moyenne de l'air asséchant à la sortie du capteur qui passe par une ligne de coupe vertical à $x = 2$ m à des heures précises de la journée :

Heure (h)	6	8	10	13	15	18	20
Température moyenne à la sortie (°C)	30	33,650	49,033	67,564	49,033	33,650	30

Tableau V.1 : l'évolution de la température moyenne de l'air asséchant à la sortie du capteur lisse pendant la journée.

Le flux solaire à 6H et 20H de la journée est nul donc l'apport de chaleur au capteur est inexistant, ce qui résulte que la température de la sortie du capteur est la même que celle d'entrée qui est considéré à 30 °C.

30 °C est la température ambiante du capteur, elle est considérée comme la température moyenne de la journée type du mois de juillet.

41,847 °C est la température moyenne le long de la journée pour (la température moyenne de sortie du capteur qui passe par une ligne de coupe verticale à $x = 2$ m).

46,586 °C est la température moyenne entre 10H et 18H, dans cette période de la journée le flux solaire n'est pas nul.

La courbe qui va illustrer la température moyenne de l'air à la sortie du capteur au cours de la journée est parabolique elle suivra la courbe du flux solaire.

La figure suivante montre l'évolution de la température moyenne à la sortie du capteur

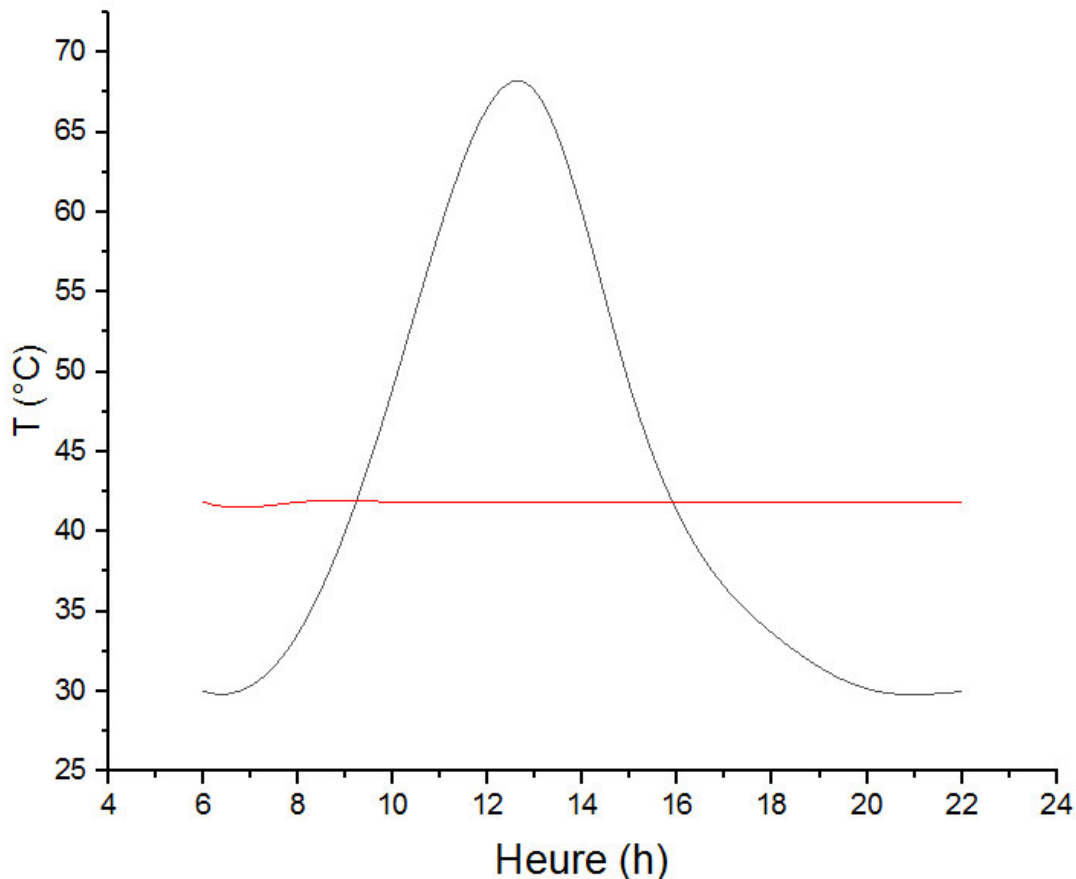


Figure V.24 : Evolution la température moyenne à la sortie pour le capteur lisse.

Comme le montre la **Figure V.24** le profile d'évolution de la température pendant la journée est parabolique avec la valeur de 13h étant le max de cette courbe.

La courbe rouge représente la valeur moyenne pour la température moyenne à la sortie du capteur elle vaut **41,847 $^{\circ}\text{C}$** .

Pour un capteur thermique (lisse sans rugosité) à simple passe la courbe de la température est selon la **Figure V.24** avec une résonnance de 67,564 $^{\circ}\text{C}$, l'amplitude de ce graphe dépend du flux solaire et la vitesse de l'air à l'entrée du capteur seulement vue que la surface du capteur est lisse (sans rugosité).

b. Vitesse et température moyenne à l'intérieur du capteur lisse (sans rugosité) :

Vitesse de l'air à l'intérieur du capteur :

La vitesse de l'air à l'intérieur d'un capteur à simple passe sans rugosité sur la surface est conditionnée par deux paramètres principaux qui sont :

1. La vitesse l'air à l'entrée du capteur qui est généralement proche de la vitesse moyenne de ce dernier, la vitesse de l'air est imposée par les conditions climatiques de la région.
2. Les conditions aux limites à la paroi qui sont elles imposée par les lois de la mécanique du fluide pour un écoulement du fluide (air) entre deux plaques planes qui résulte que $V_{\text{paroi}} : 0 \text{ m/s}$.

Ceci résulte que les points ou on enregistre les plus grandes vitesses passe au milieu du capteur pour des lignes de coupes horizontales, et ca explique l'aspect paraboliques des graphes avec des lignes de coupes verticales.

Il y a un autre facteur qui affecte l'écoulement des particules d'air à l'intérieur du capteur pas aussi important que les deux premiers mais il doit être cité c'est bien le flux solaire les particules d'air les plus proches du vitrage qui représente les points les plus chauds pour cette simulation, la chaleur augmente les interactions intermoléculaires ce qui rendra les particules d'air plus actif et légère et éventuellement plus mobiles.

Pour ce type de capteur l'écoulement d'air est plus ou moins uniforme comme le montre les *figures V.15 ; 18 ; 21* des répartitions des vitesses.

La deuxième étude comportera un absorbeur avec des rugosités sur la surface de l'absorbeur, après la fin de cette étude on va faire une comparaison des performances des deux capteurs.

CHAPITRE V : SIMULATION ET RESULTATS

c. Graphiques de la vitesse et la température moyenne à l'intérieur du capteur :

Ce tableau représente la vitesse et la température moyenne sur le volume de contrôle d'air :

Flux (W/m ²)	0	100	500	950
V _{moy} (m/s)	0,5	0,50255	0,51376	0,52634
T _{moy} (°C)	30	32,120	39,798	49,360

Tableau V.2 : l'évolution de la température et la vitesse moyenne de l'air asséchant à l'intérieur du capteur lisse pendant la journée

Les courbes ci-dessous montrent l'évolution de la température et la vitesse moyenne à l'intérieur du capteur pendant la journée :

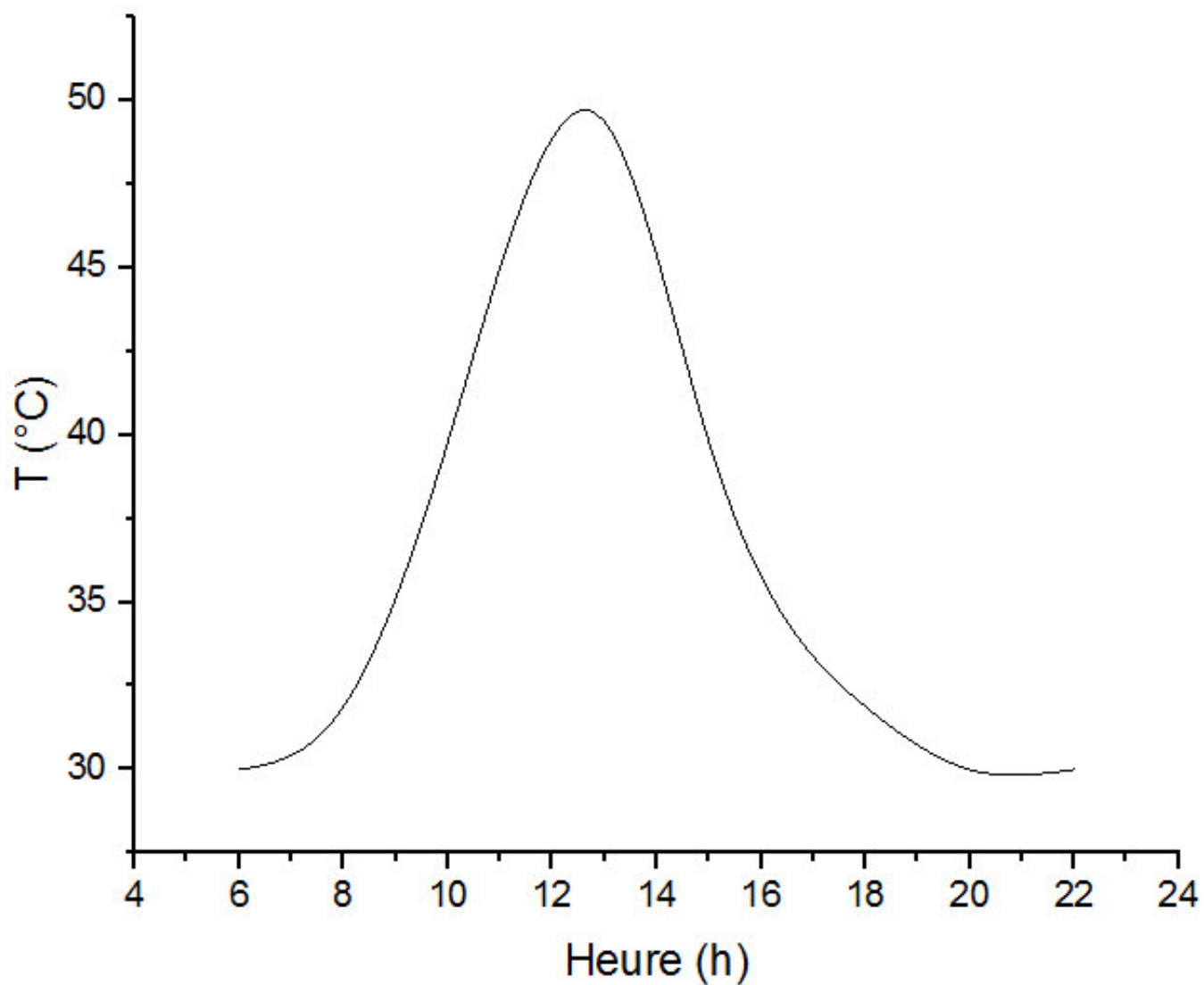


Figure V.25 : Température moyenne à l'intérieur du capteur pendant la journée.

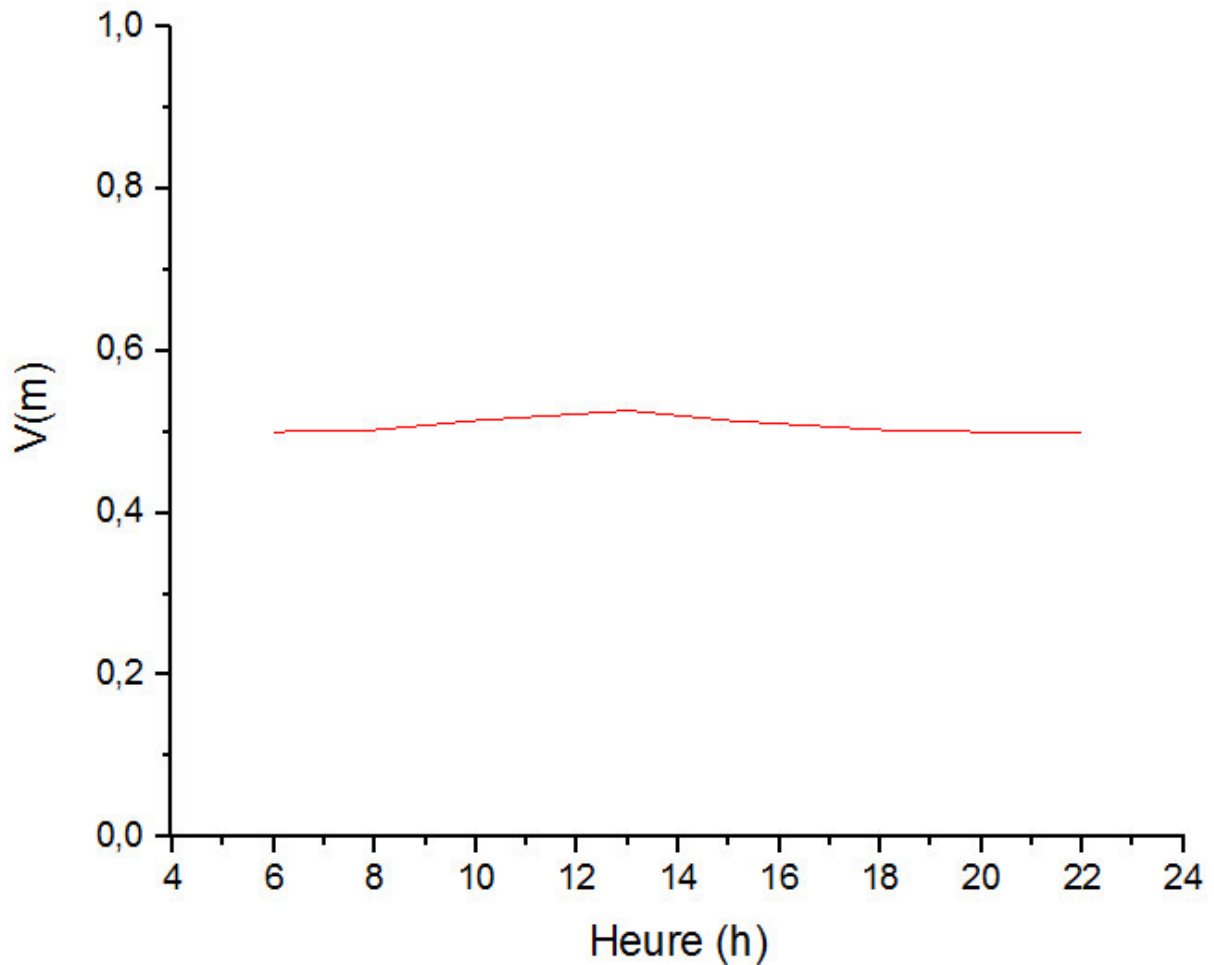


Figure V.26 : Vitesse moyenne à l'intérieur du capteur pendant la journée.

Les températures moyennes sur le volume de contrôle ont la même évolution que la température moyenne à la sortie.

La résonnance est plus importante à la sortie vue que c'est une valeur moyenne sur une ligne pas une surface pour le cas de la température sur le volume de contrôle.

La vitesse sur ce type de capteur est presque la même sur tout le volume de contrôle parce que l'air ne rencontre aucun obstacle à l'intérieur du capteur.

La vitesse pour tout les flux est très proche vue que le flux solaire n'affecte pas l'écoulement du fluide en termes d'activité des particules d'air.

CHAPITRE V : SIMULATION ET RESULTATS

V.3.3 Capteur avec rugosité sur la surface de l'absorbeur :

Le capteur thermique sur cette simulation sera contraint aux mêmes conditions que en température à l'entrée du capteur et en flux solaire à la fin de cette étude on prendra le soin de faire une étude comparative entre les deux types de capteur.

La présentation de cette simulation est la même que pour le capteur sans rugosité à part le maillage et la géométrie du volume de contrôle qui varieront suivant la rugosité imposé.

V.3.3.1 Géométrie du volume de contrôle :

Les domaines et l'écoulement de l'air (entre absorbeur et la vitre) sont les mêmes que celle de la première simulation à part le volume de contrôle ou il y aura des rugosités de forme rectangulaire entre l'absorbeur et la vitre.

On a des rugosités rectangulaires alternés entre la vitre et l'absorbeur de distances de 0,2 m entre eux à partir de $x = 0,1$ m qui veut dire (0.1 m, 0.3 m, 0.5m) jusqu'à la longueur de 2m.

Les rugosités sont rectangulaires verticales par rapport à l'horizontale de dimensions (Largeur 0.01 m, Hauteur 0,04 m).

La **Figure V.27** montre bien la géométrie des rugosités :

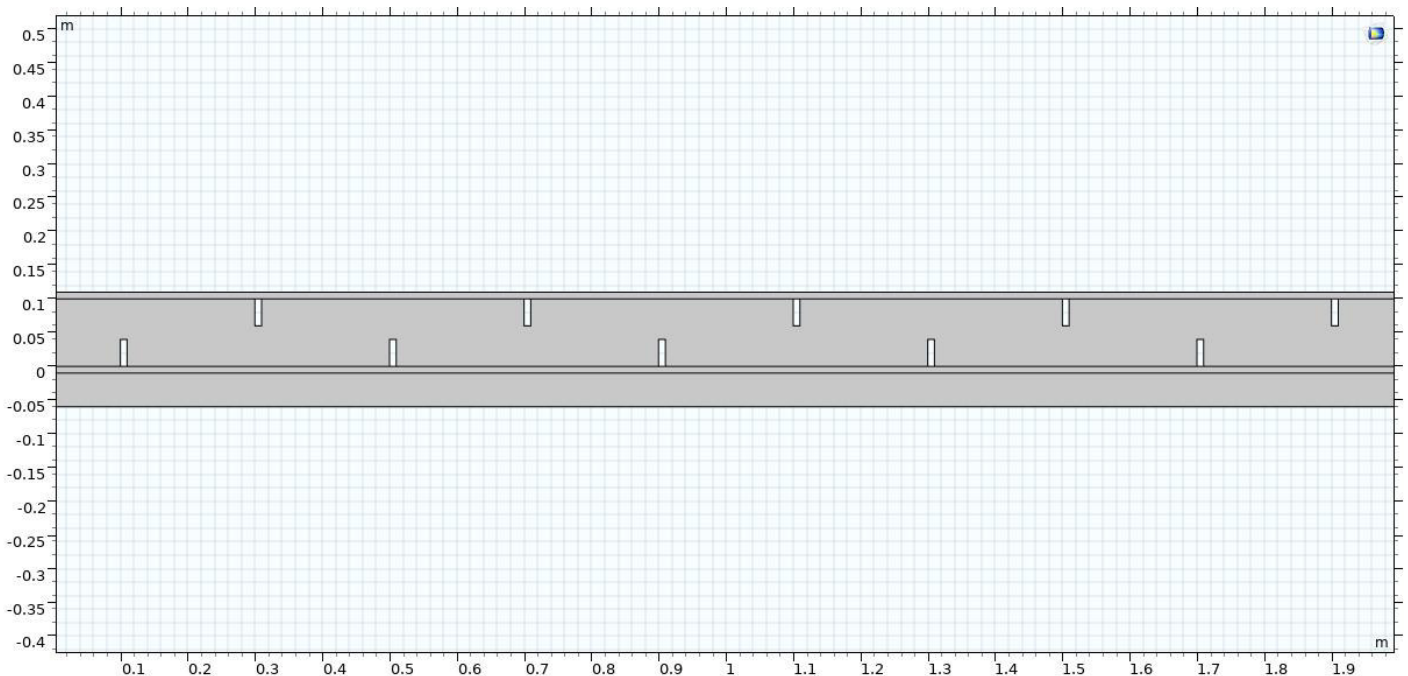


Figure V.27 : Géométrie des rugosités imposées au capteur.

CHAPITRE V : SIMULATION ET RESULTATS

V.3.3.2 Maillage et volume de contrôle :

Le maillage va automatiquement s'adapter à la forme des obstacles à l'intérieur du capteur comme le montre les **Figure V.28** :

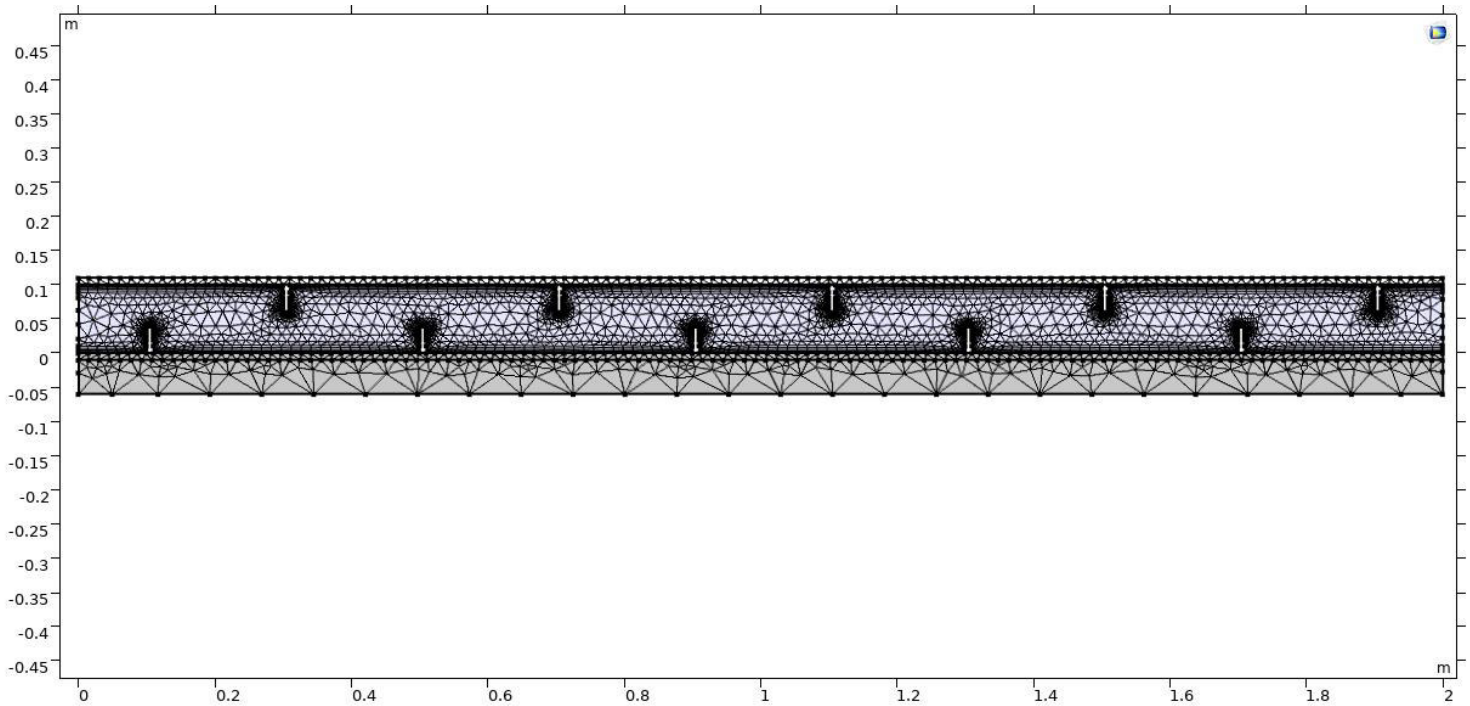


Figure V.28 : Maillage complet capteur avec rugosité.

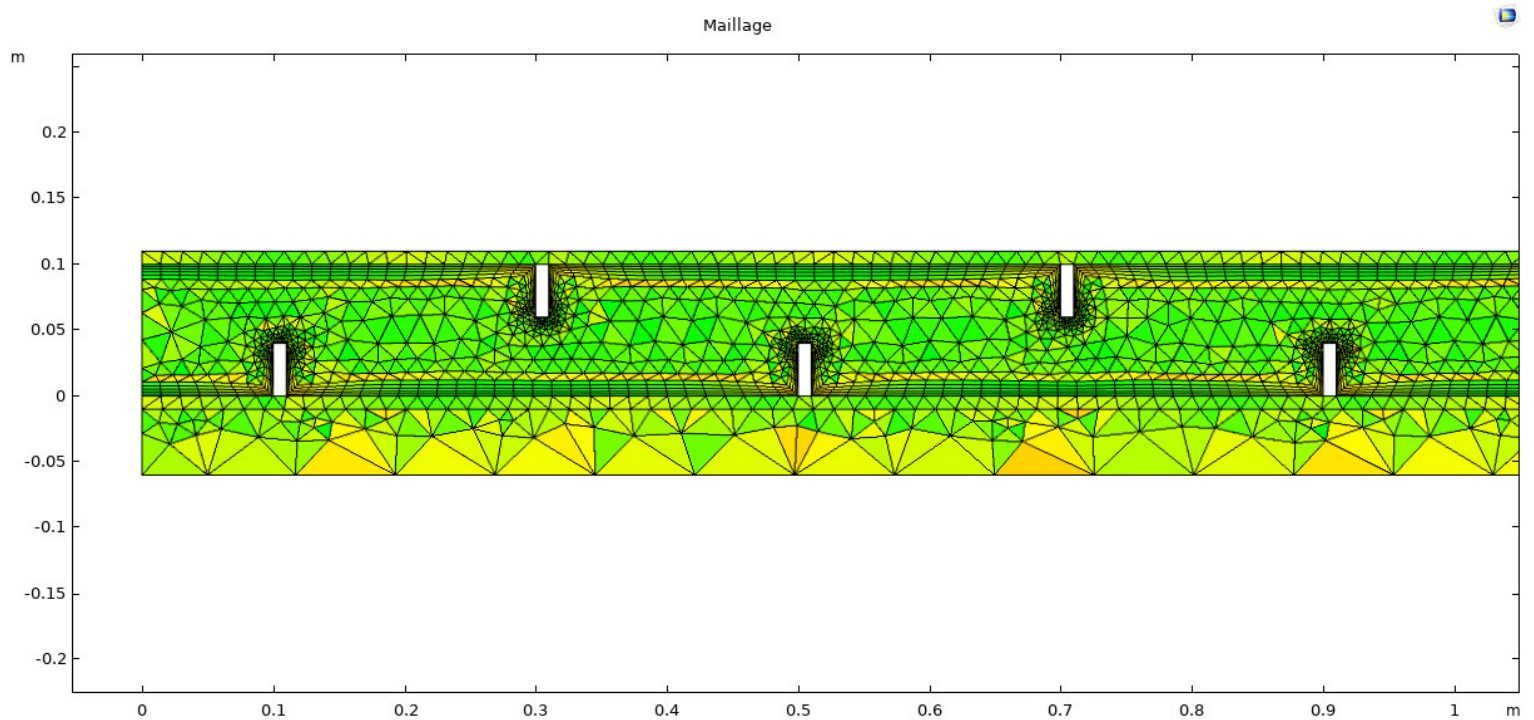


Figure V.29 : Maillage du capteur avec rugosité entre ($x = 0$ m et $x = 1$ m) .

CHAPITRE V : SIMULATION ET RESULTATS

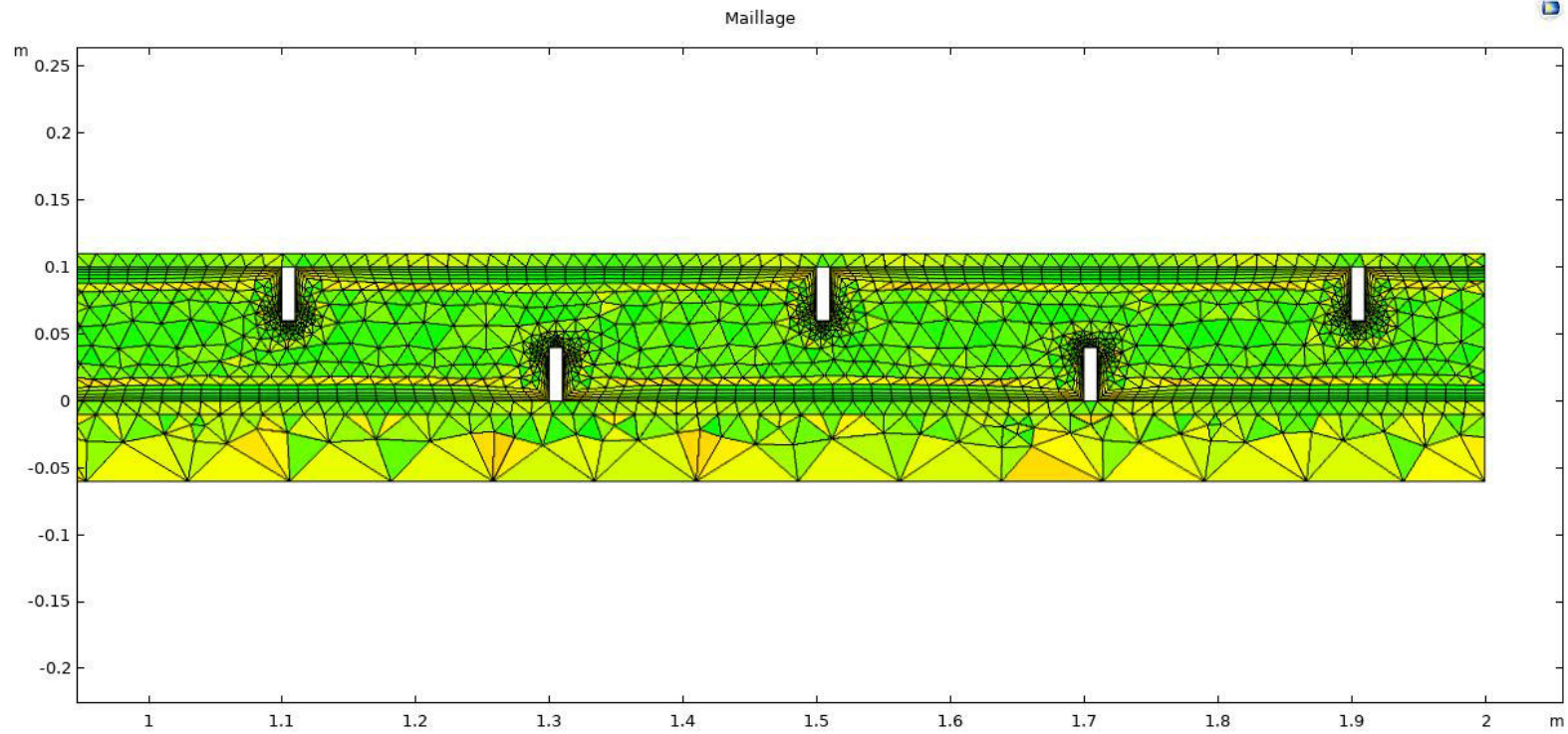


Figure V.30: Maillage du capteur avec rugosité entre ($x = 1$ m et $x = 2$ m).

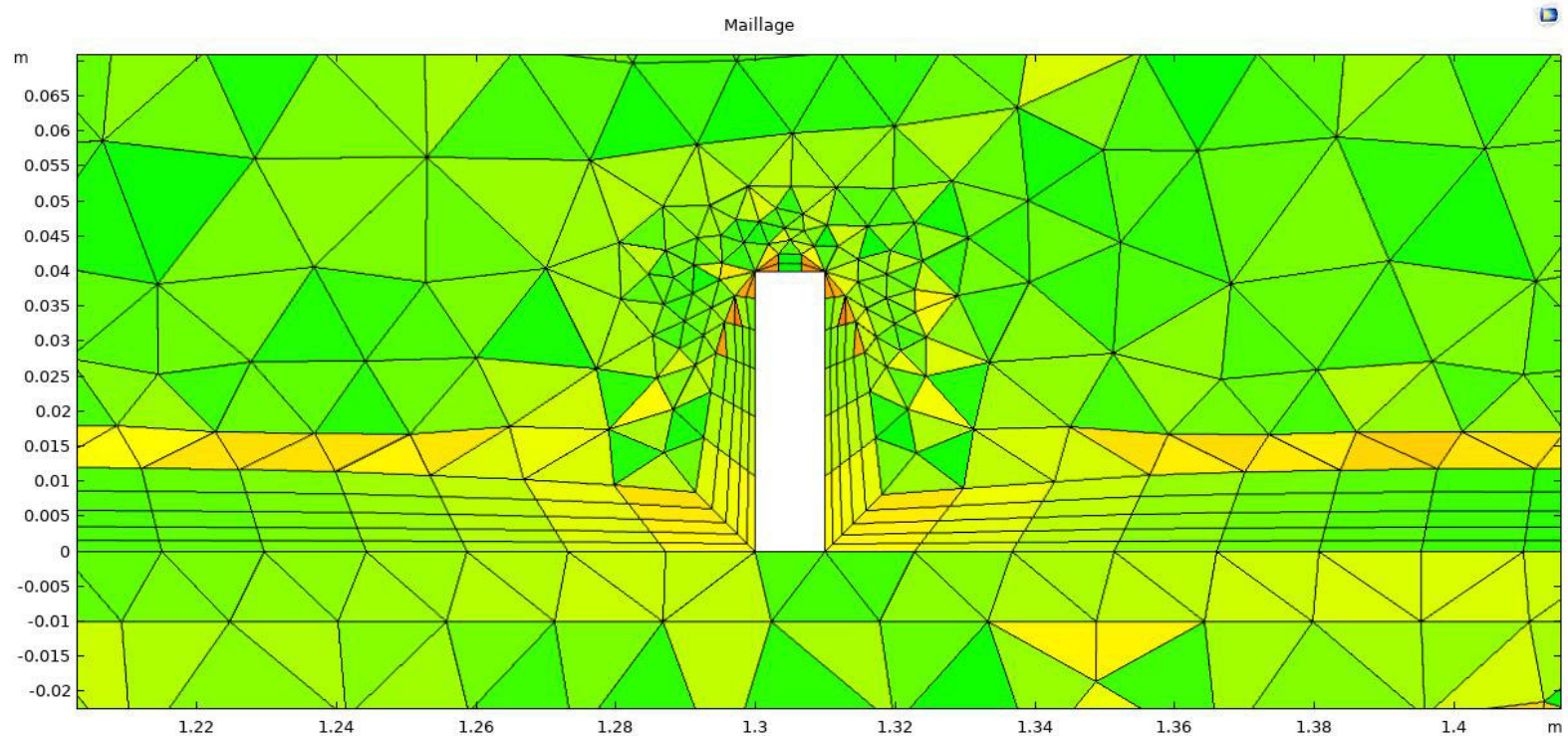


Figure V.31 : Maillage détaillé aux alentours des obstacles.

CHAPITRE V : SIMULATION ET RESULTATS

Comme le montre bien les figures ci dessus le maillage est bien adapté par la physique avec beaucoup d 'éléments aux alentours des obstacles, et des éléments minces et identiques près des parois.

La deuxième simulation comportera les trois flux solaire imposés comme dans la première

V.3.3.3 . Résultats de différents flux de chaleur de la journée (Capteur rugueux) : a. 100 W/m² :

Vitesse :

Les figures relatives à la vitesse sont ci-dessous :

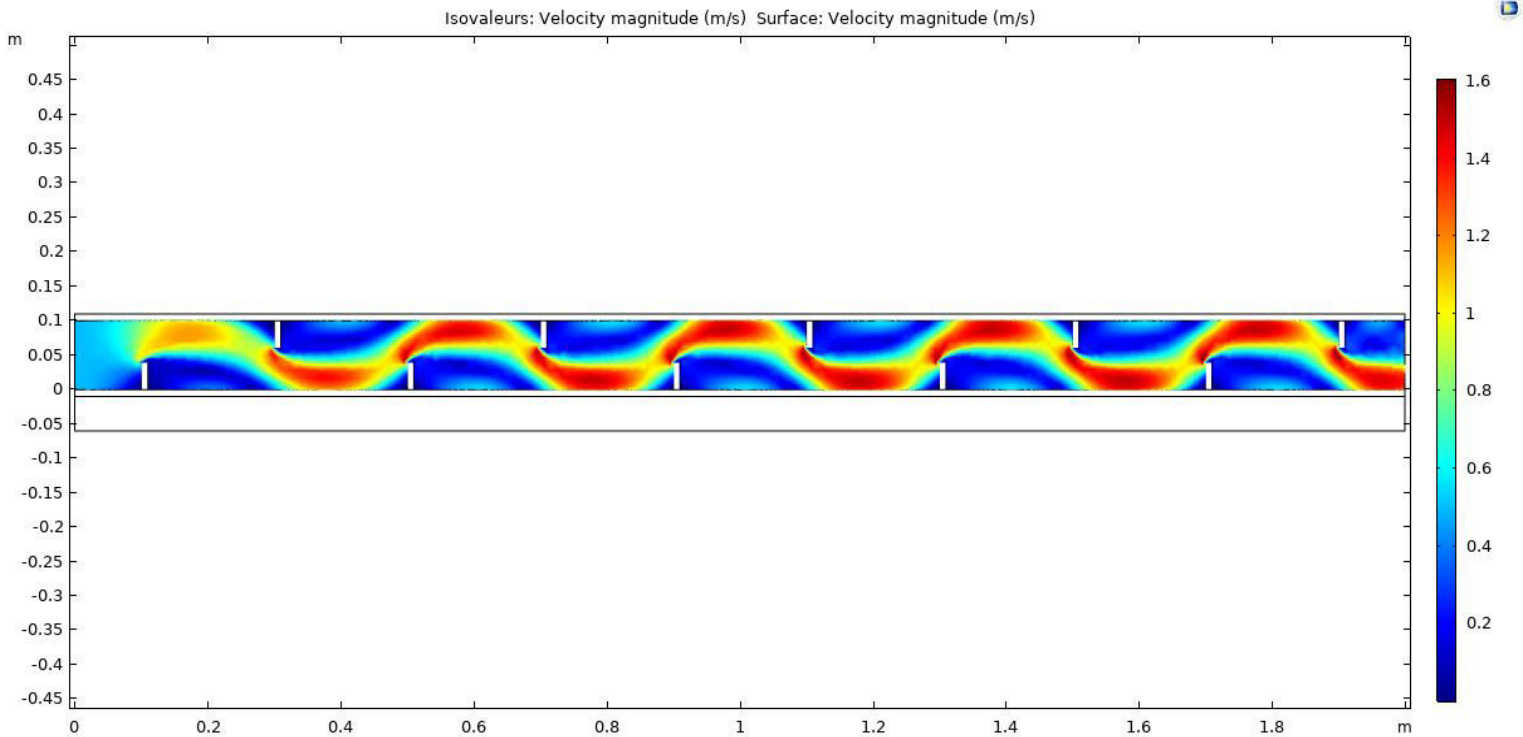


Figure V.32 : Répartition de la vitesse sur le volume de contrôle.

CHAPITRE V : SIMULATION ET RESULTATS

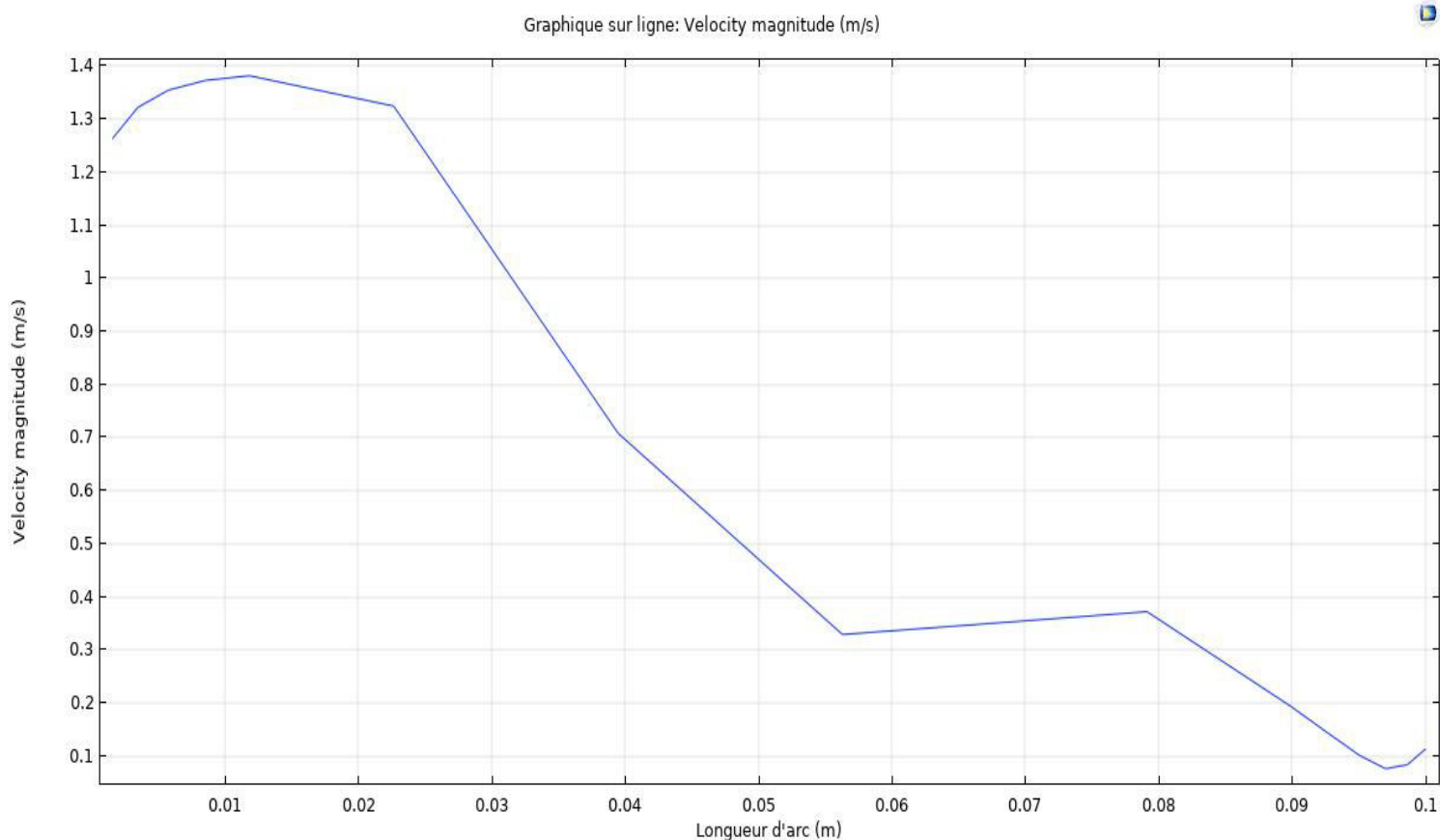


Figure V.33 : Vitesse à la sortie (ligne de coupe verticale $x = 2$ m).

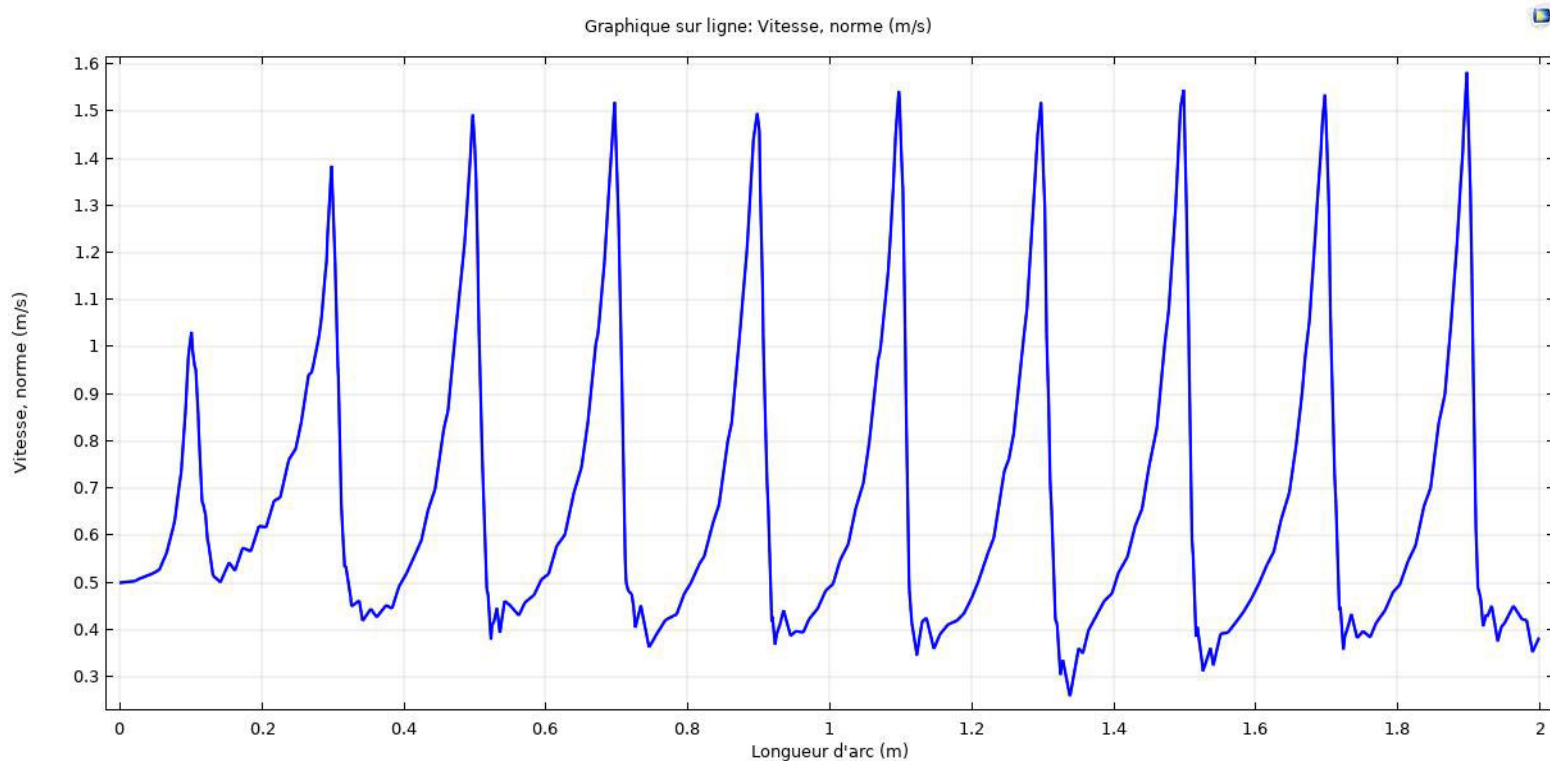


Figure V.34 : Courbe de vitesse (Ligne de coupe horizontale $y = 0,05$ m).

CHAPITRE V : SIMULATION ET RESULTATS

Température :

La **Figure V.35** représente les courbes des températures le long du capteur pour des lignes de coupes horizontales qui passent par $y = 0,01 \text{ m}$; $y = 0,05 \text{ m}$; $y = 0,09 \text{ m}$:

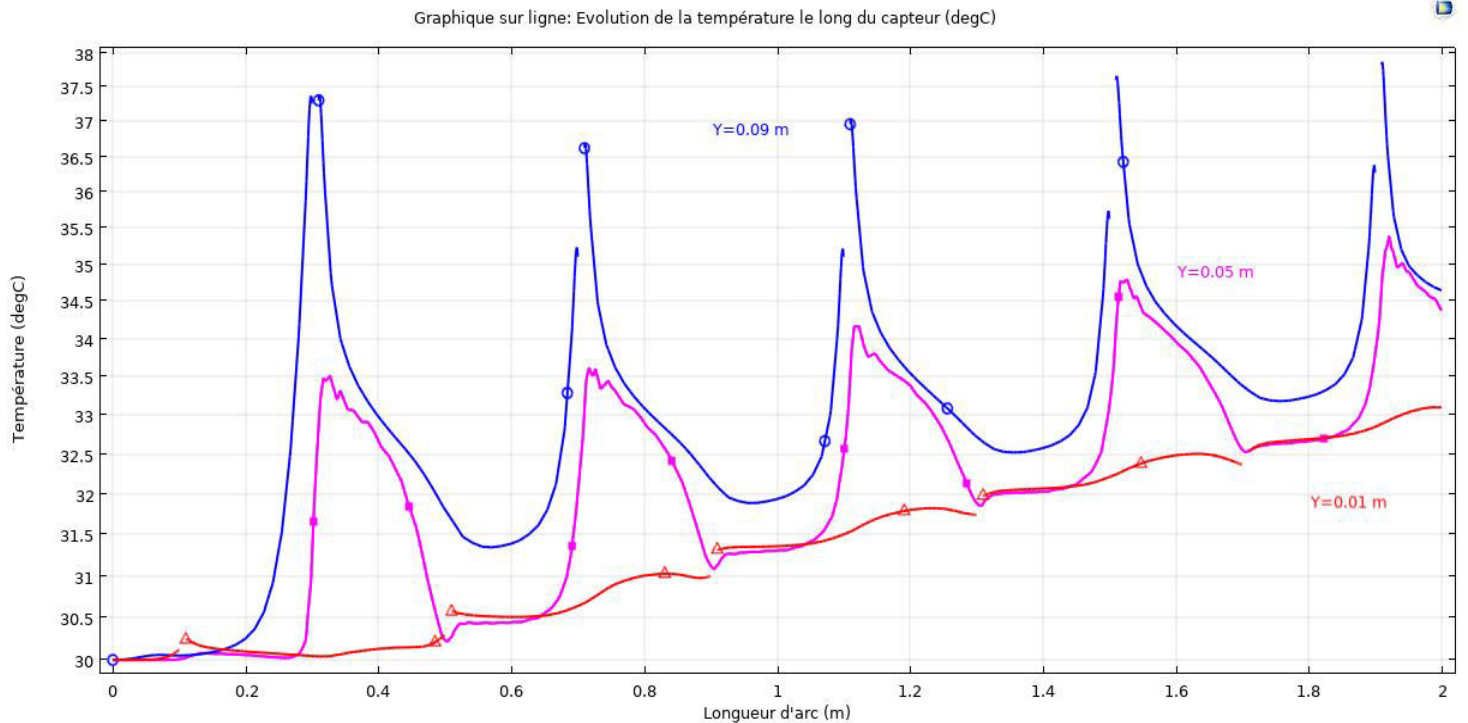


Figure V.35 : Courbes des températures pour un capteur rugueux (flux solaire 100 W/m^2).

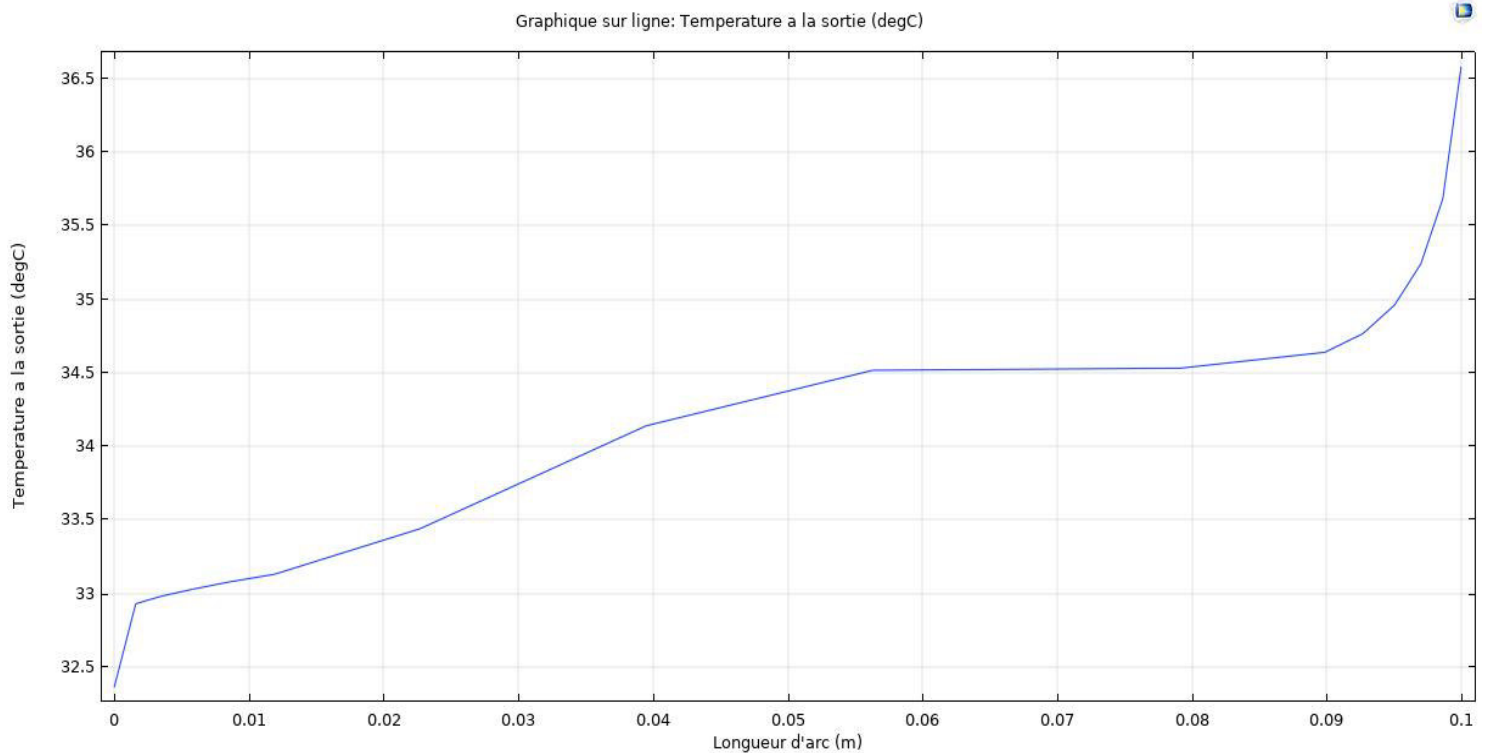


Figure V.36 : Températures à la sortie (flux solaire 100 W/m^2).

Interprétations et discussions des résultats obtenus :

*La vitesse moyenne à la sortie pour ce capteur est **0,67388 m/s** et celle à l'intérieur du capteur est **0,69044 m/s** pour une vitesse d'entrée de **0,5 m/s**.

La vitesse moyenne à l'intérieur de ce capteur est plus importante que celle à la sortie contrairement au premier type du capteur, c'est à cause des obstacles à l'intérieur du volume du contrôle qui font accélérer le fluide d'air à cause du rétrécissement de la section de passage.

La vitesse maximale sur le volume de contrôle est **1,59 m/s**, elle est enregistrée au point $x = 1,89 \text{ m}$.

L'évolution de la vitesse suivant une ligne de coupe horizontale $y = 0,05 \text{ m}$ **Figure V.34** est sinusoïdale, la taille des rectangles est de $y = 0,04 \text{ m}$ de hauteur ce qui veut dire que la ligne passe au milieu entre les rectangles ce qui explique la forme sinusoïdale, à chaque fois que l'air s'approche de la rugosité ($0,1 \text{ m}$; $0,3 \text{ m}$; $0,5 \text{ m}$) il gagne en vitesse et enregistre les pics de vitesse puis décélère au moment s'éloigne de la rugosité.

En effet, la forme et la disposition des obstacles affectent l'écoulement d'air pendant sa trajectoire. La répartition des vitesses **Figure IV.32** le montre l'écoulement de l'air à l'intérieur s'adapte aux formes des rugosités imposées (l'écoulement est en forme de zigzags), on enregistre les vitesses les plus importantes juste après les obstacles.

*La température moyenne à la sortie du capteur est **34,123°C**, et celle sur le volume de contrôle est **32,120°C**, pour une température d'entrée de 30°C .

Les coupures des courbes $Y = 0,09 \text{ m}$ et $Y = 0,01 \text{ m}$ aux points ($0,1 \text{ m}$; $0,3 \text{ m}$; $0,5 \text{ m}$) sont dues aux obstacles qui sont pas considérés dans le volume de contrôle.

La courbe $Y = 0,05 \text{ m}$ quand à elle n'a aucune coupure parce qu'elle passe entre les rectangles de hauteur $0,04 \text{ m}$.

Les températures les plus élevées sont enregistrées avant les rectangles à cause du rétrécissement de la section du passage de $0,1 \text{ m}$ à $0,06 \text{ m}$, ce qui crée une condensation des

CHAPITRE V : SIMULATION ET RESULTATS

particules d'air et une activité des interactions intermoléculaire plus importante ce qui rend le fluide plus chaud.

L'air atteint une température maximale **37,8°C** au point $x = 1,9$ m.

b. 500 W/m²:

Vitesse :

Les profils des vitesses sont plus au moins les mêmes pour tout les flux solaires :

On constate une légère augmentation dans la vitesse du fluide qu'on a expliqué auparavant

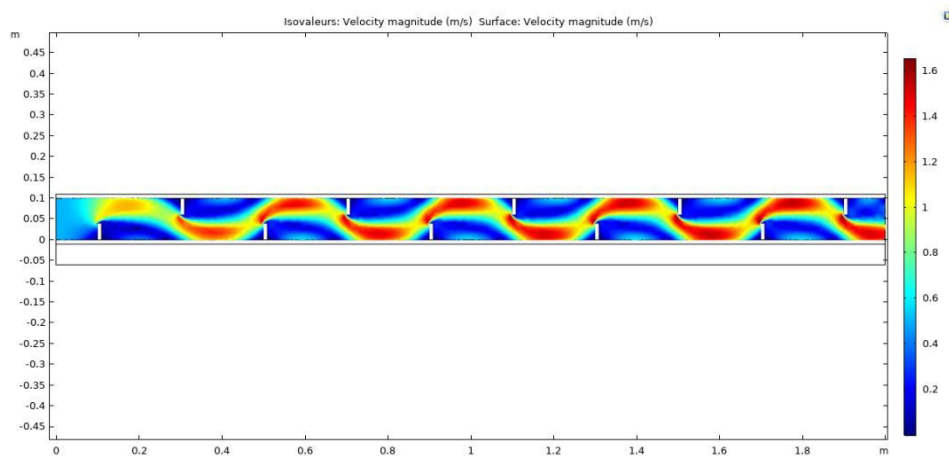


Figure V.37 : Répartition de la vitesse de l'air sur le volume de contrôle (500 W/m²).

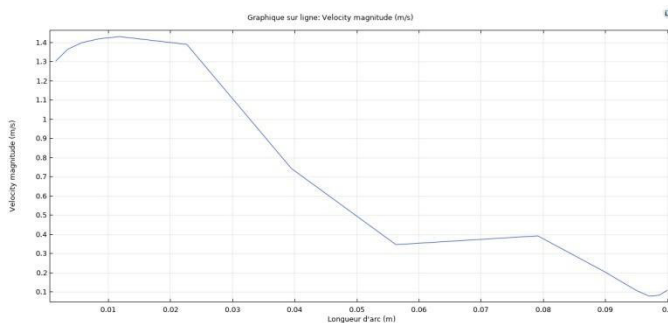


Figure V.38 : Vitesse à la sortie (500 W/m²).

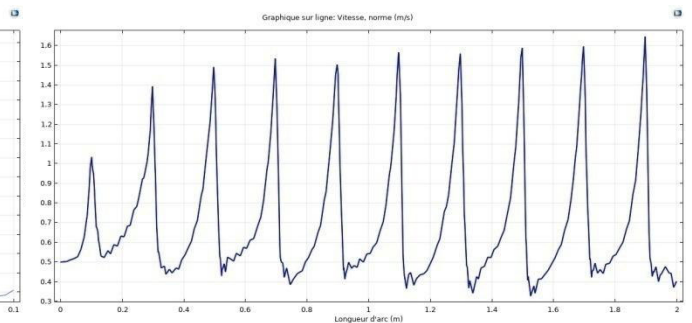


Figure V.39 : Vitesse (horizontale $Y = 0,05$ m).

CHAPITRE V : SIMULATION ET RESULTATS

Température :

Les courbes suivantes représentent l'évolution de la température :

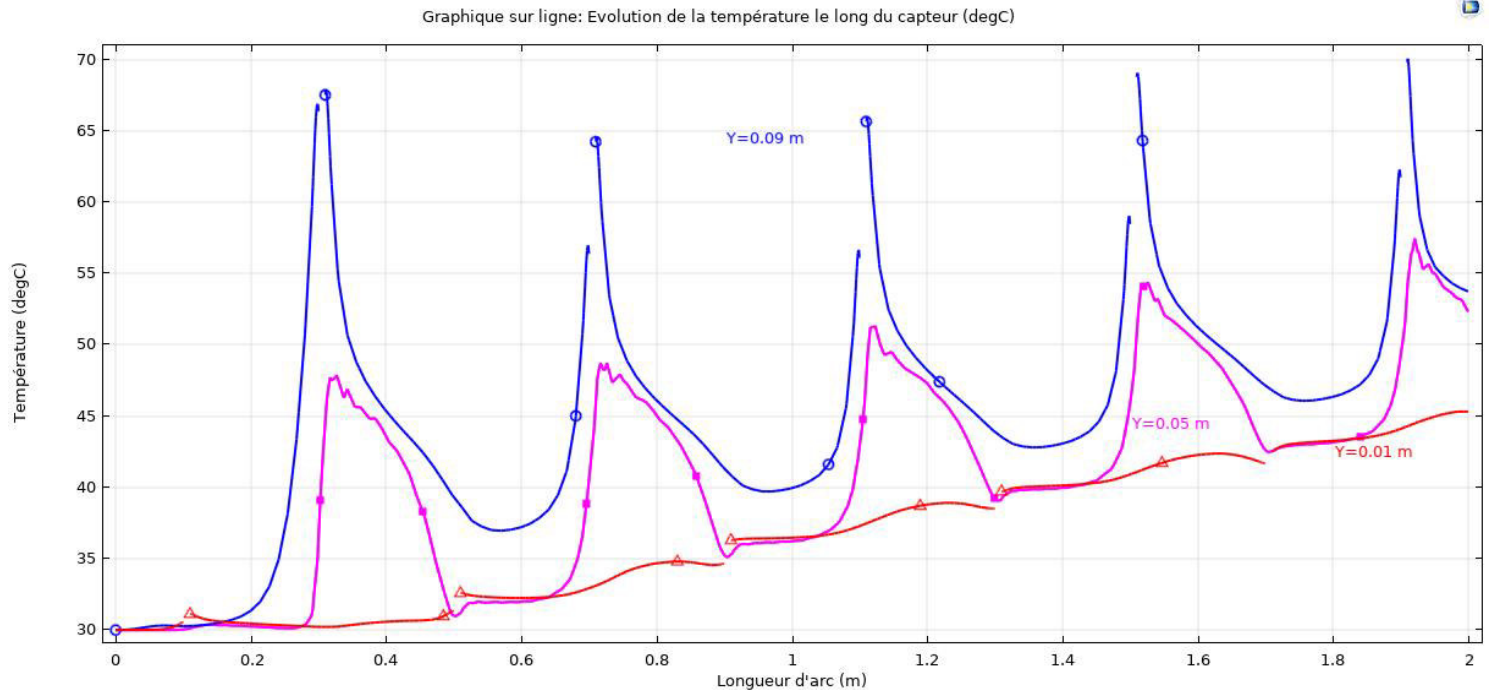


Figure V.40 : Courbe de température (500W/m^2).

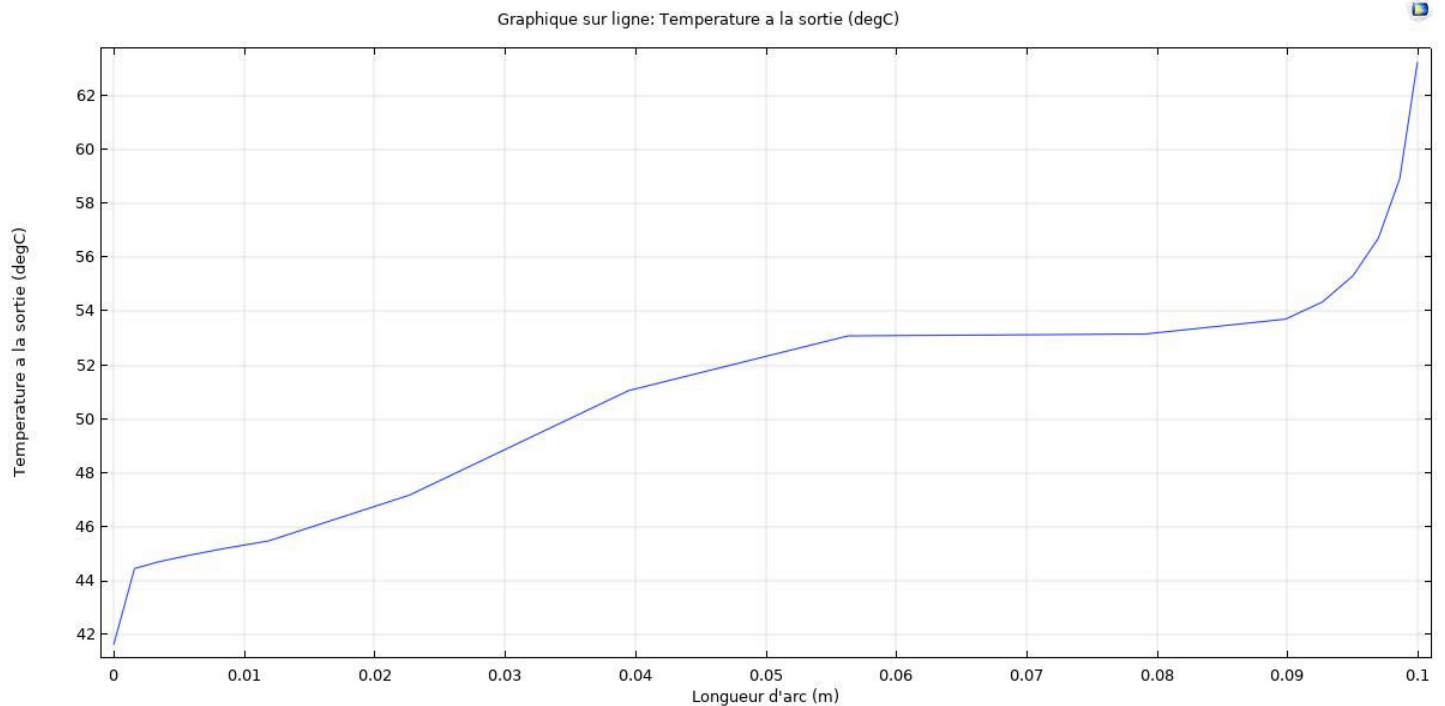


Figure V.41 : La température à la sortie du capteur (500 W/m^2).

CHAPITRE V : SIMULATION ET RESULTATS

Interprétation et discussion des résultats obtenus :

* La vitesse moyenne à la sortie pour ce capteur est **0,70477 m/s** et celle à l'intérieur du capteur est **0,70298 m/s** pour une vitesse d'entrée de 0,5 m/s.

La vitesse maximale sur le volume de contrôle est **1,63 m/s**, elle est enregistrée au point $x = 1,9$ m.

*La température moyenne à la sortie vaut **50,904°C** et celle à l'intérieur du capteur **40,670°C** pour une température d'entrée de 30°C.

La température maximale enregistrée à l'intérieur du capteur est **70°C**, au point $x = 1,9$ m.

c. 950 W/m² :

Vitesse :

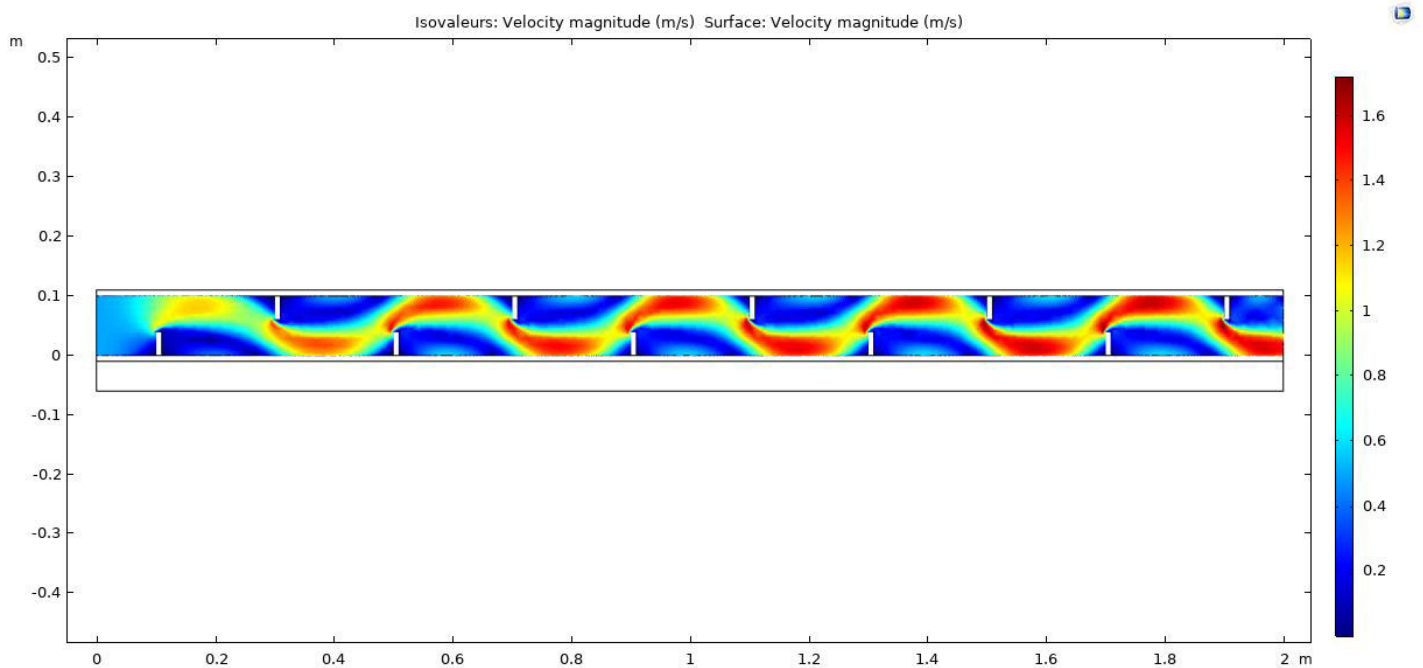
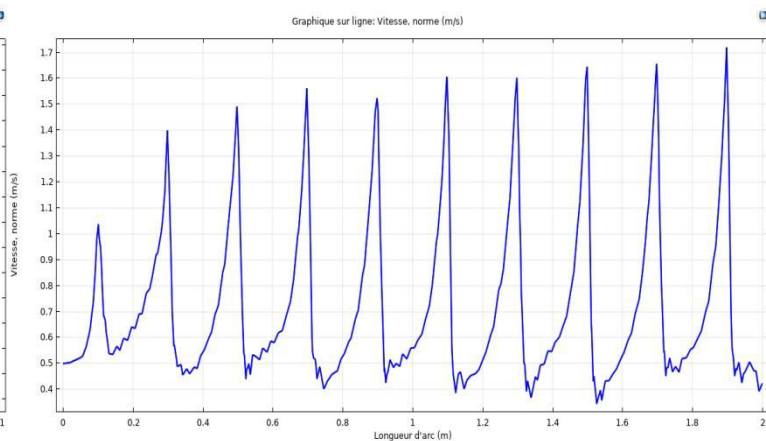
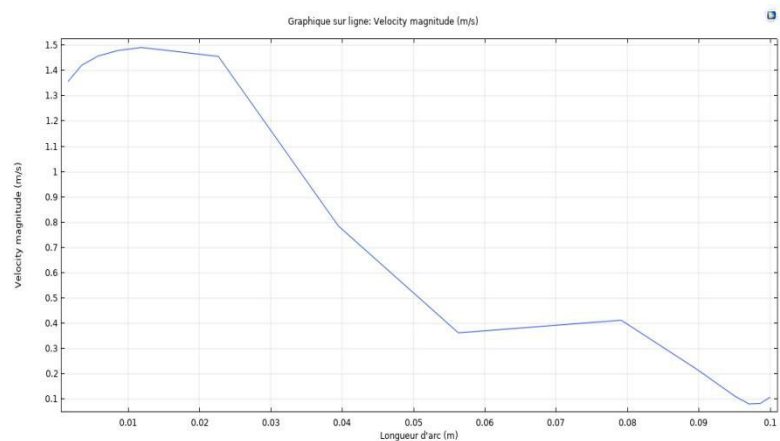
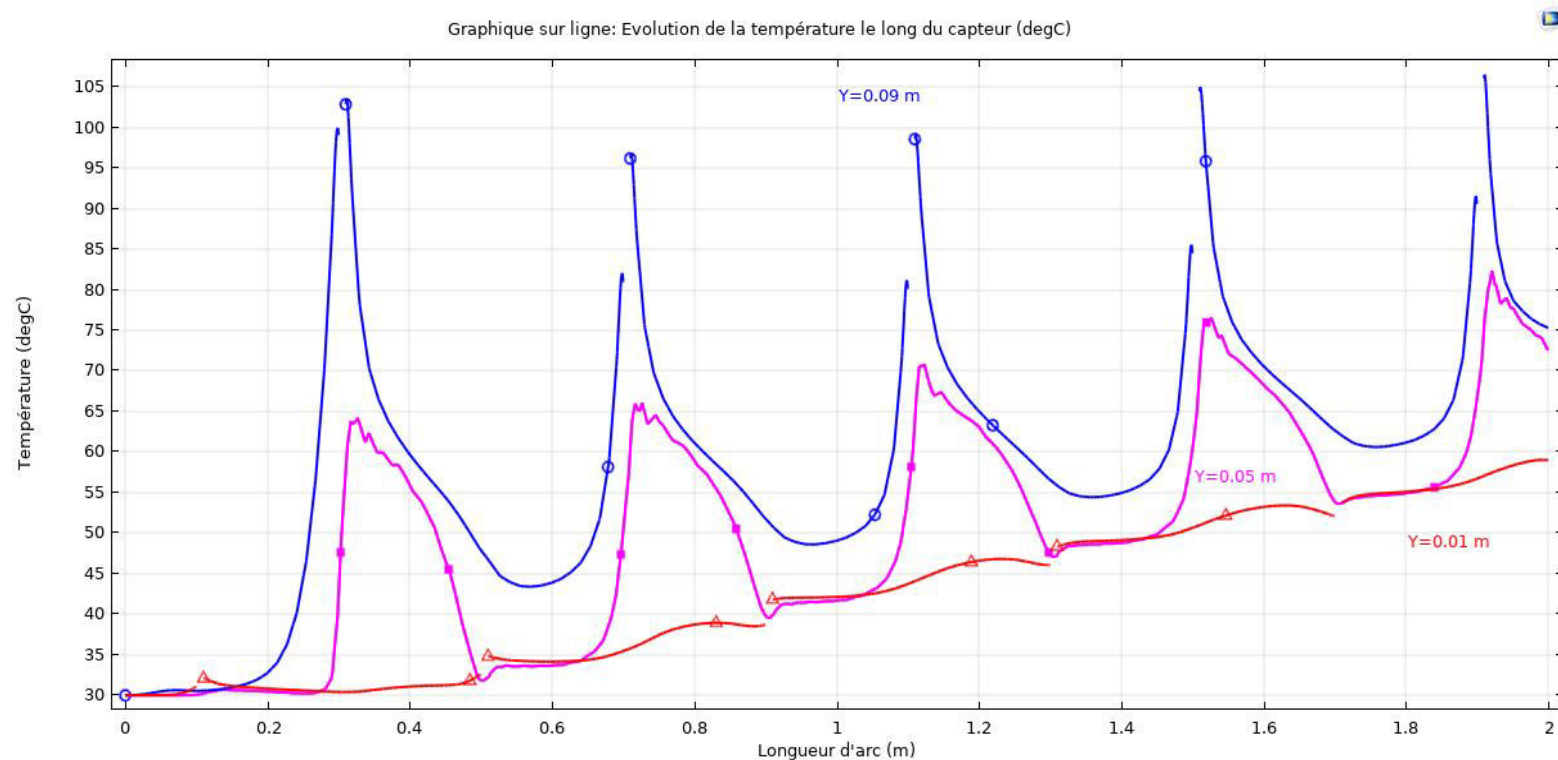


Figure V.42 : Répartition des vitesses (Flux solaire 950 W/m²).

CHAPITRE V : SIMULATION ET RESULTATS



Température :



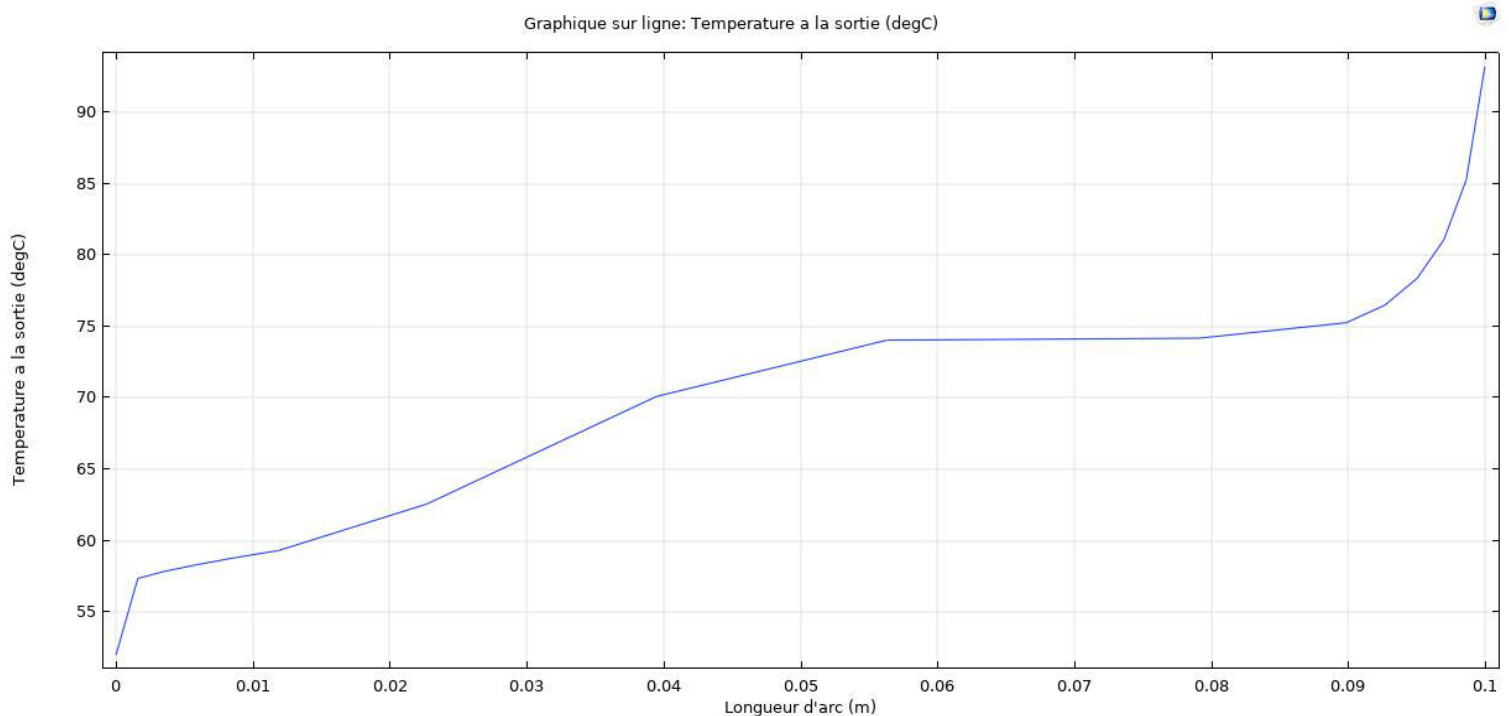


Figure V.46: Température à la sortie (950 W/m²).

Interprétation et discussion des résultats obtenus :

*La vitesse moyenne à la sortie **0,73791 m/s**, et celle moyenne sur le volume de contrôle **0,71878 m/s**.

La vitesse maximale est au même point que les autres, elle vaut **1,72 m/s**.

* La température moyenne de sortie est **69,815°C**, La température moyenne à l'intérieur du capteur est **50,355°C**.

La température maximale est **105,2°C**, au point $x = 1,9$ m.

La courbe qui passe par la ligne de coupe $Y = 0,05$ m à une évolution significative pour ce flux solaire, elle atteint une température de **83°C** quand elle passe près du dernier rectangle sur le volume de contrôle.

CHAPITRE V : SIMULATION ET RESULTATS

V.3.3.4 Résumé des résultats pour le capteur rugueux :

a. Température moyenne à la sortie :

Ce tableau montre l'évolution de la température à la sortie pour ce type de capteur :

Heure (h)	6	8	10	13	15	18	20
Température moyenne à la sortie (°C)	30	34,123	50,904	69,815	50,904	34,123	30

Tableau V.3 : l'évolution de la température moyenne de l'air asséchant à la sortie du capteur rugueux pendant la journée.

42,838°C est la température moyenne le long de la journée pour (la température moyenne de sortie du capteur qui passe par une ligne de coupe verticale à $x = 2$ m).

47,974 °C est la température moyenne entre 10H et 18H, dans cette période de la journée le flux solaire n'est pas nul.

La courbe suivante montre l'évolution la courbe de la température pendant la journée :

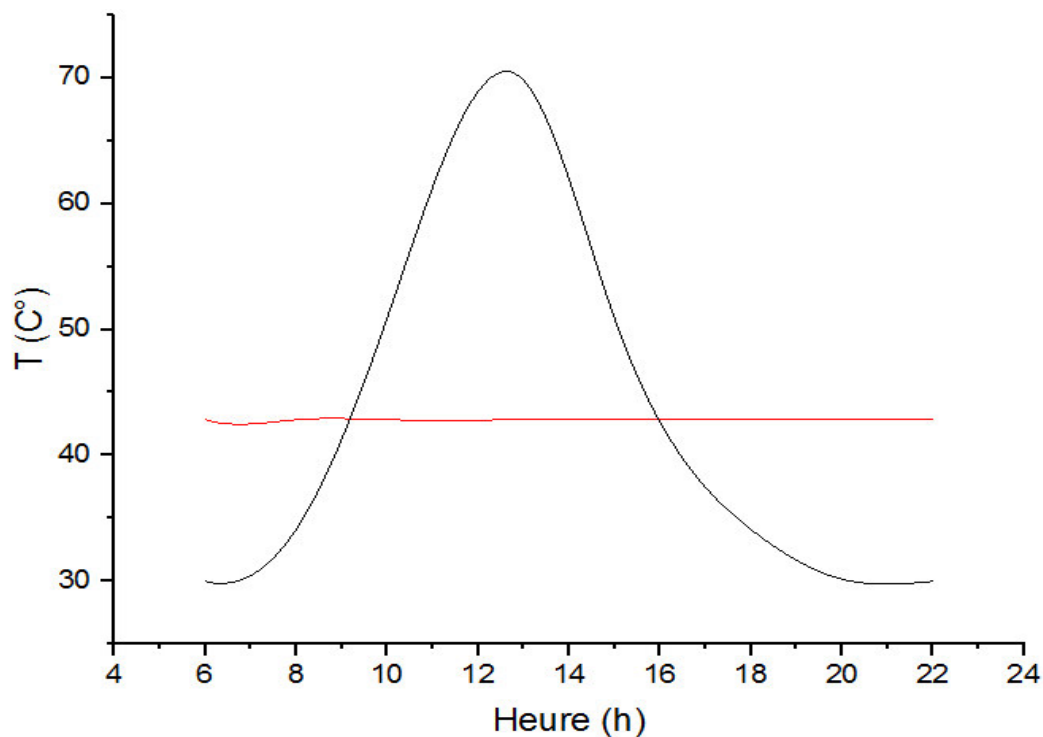


Figure V.47 : Courbe de température à la sortie capteur rugueux.

CHAPITRE V : SIMULATION ET RESULTATS

La **Figure V.47** illustre l'évolution de la température à la sortie du capteur pendant la journée elle est maximale à 13h pour le flux max la valeur de la température a ce moment de la journée approche Les **70°C**.

La courbe rouge représente la valeur moyenne pour la température moyenne à la sortie du capteur elle vaut **42,838 °C**.

La courbe bleue représente la valeur moyenne de la température moyenne à la sortie entre 8H et 18H du capteur pour une ligne de coupe verticale $x = 2$ m, qui de l'ordre de **48°C**.

Pour le capteur solaire rugueux la température moyenne à la sortie dépend de plusieurs facteurs :

- La température et la vitesse d'entrée et le flux solaire appliqué comme pour le capteur lisse.
- La forme des rugosités, pour cette simulation elles sont rectangulaires.
- Les répartitions des rugosités sur la surface de l'absorbeur.
- Le type d'écoulement d'air (sous ou sur l'absorbeur).
- Rugosité sur ou sous la surface de l'absorbeur.

Ces critères jouent un rôle important par rapport aux échanges thermiques qui se passent à l'intérieur du volume de contrôle.

b. Vitesse et température moyenne à l'intérieur du capteur rugueux :

*La vitesse le capteur est conditionné par les mêmes paramètres que le premier capteur, on ajoute les conditions imposées par les rectangles qui sont le rétrécissement de la section de passage qui augmente la vitesse considérablement par rapport au premier cas jusqu'à atteindre une vitesse maximale de **1,72 m/s**.

La vitesse est répartie selon les rectangles imposés comme le montre bien **Figure V.32 ; 37 ; 42** qui est en forme de zigzagues.

*La température est répartie de la même manière pour les trois flux solaire, elle s'adapte à la forme de rugosité imposée.

La température augmente près des rectangles pour des raisons qu'on a expliquées auparavant.

CHAPITRE V : SIMULATION ET RESULTATS

Remarque :

La température et la vitesse évolue d'une manière inversement proportionnelle **Figure V.43 ; 46.**

Les particules d'air les plus vifs sont moins chauds suivant les lois des écoulements du fluide entre deux plaques.

Vu que la rugosité au point $x = 1,9$ m est sur le vitrage donc la vitesse d'air est plus grande sur la section de passage entre $y = 0$ m et $y = 0,06$ m, et c'est l'inverse pour la température.

Cela se produit sur toute la ligne de sortie pour la température et la vitesse.

c. Graphiques de la vitesse et la température moyenne à l'intérieur du capteur rugueux:

Ce tableau représente la vitesse et la température moyenne sur le volume de contrôle d'air :

Flux solaire (W/m ²)	0	100	500	950
Vitesse moyenne (m/s)	0,5	0,69044	0,70298	0,71878
Température moyenne (°C)	30	32,120	40,670	50,355

Tableau V.4 : l'évolution de la température et la vitesse moyenne de l'air asséchant à l'intérieur du capteur lisse pendant la journée.

Les courbes ci-dessous montrent l'évolution de la température et la vitesse moyenne à l'intérieur du capteur pendant la journée :

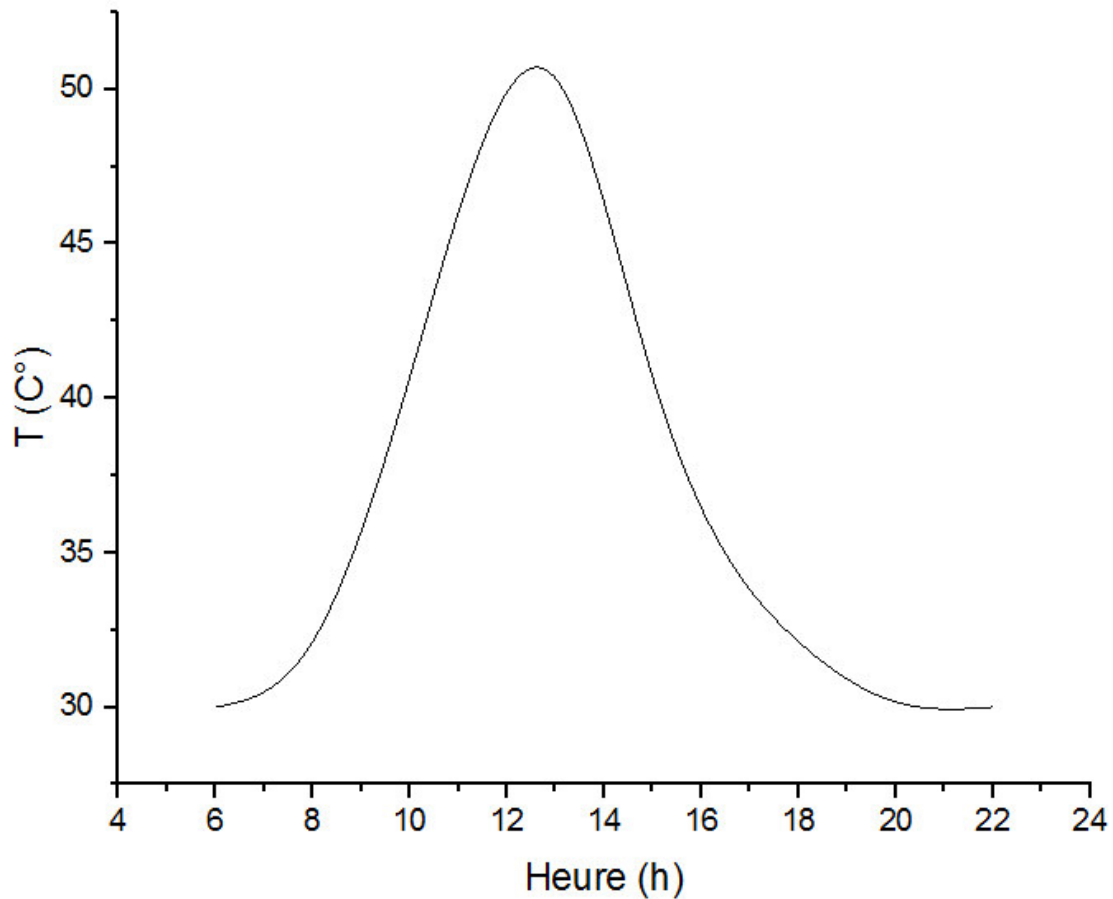


Figure V.48 : Température moyenne à l'intérieur du capteur (rugueux) pendant la journée.

La température moyenne sur le capteur thermique est presque la même que pour le capteur lisse en terme d'évolution pendant la journée, mais la répartition de température dépend des obstacles imposés.

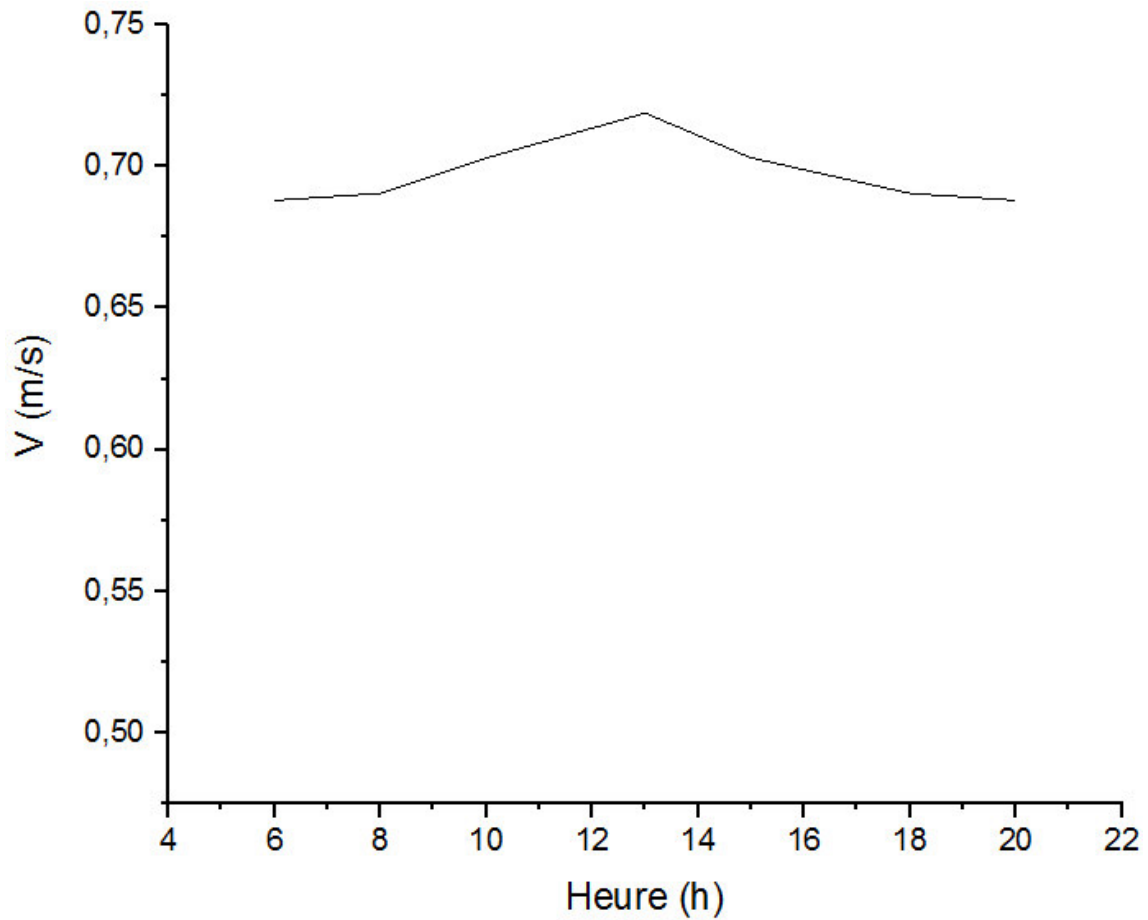


Figure V.49 : Vitesse moyenne à l'intérieur du capteur pendant la journée.

La vitesse moyenne à l'intérieur du capteur varie sur ce type du capteur par rapport à la rugosité imposée pour tous les points de passage de l'air.

Elle est plus importante par rapport à la vitesse pour un capteur lisse, elle atteint **0,70298 m/s**.

V.4 Etude comparative :

Une expérience qui a été faite et qui dure 14h pour une journée fictive ou on fait la comparaison entre le capteur solaire thermique à air avec et sans rugosité sur la surface de l'absorbeur et le vitrage.

V.4.1 Température moyenne à la sortie :

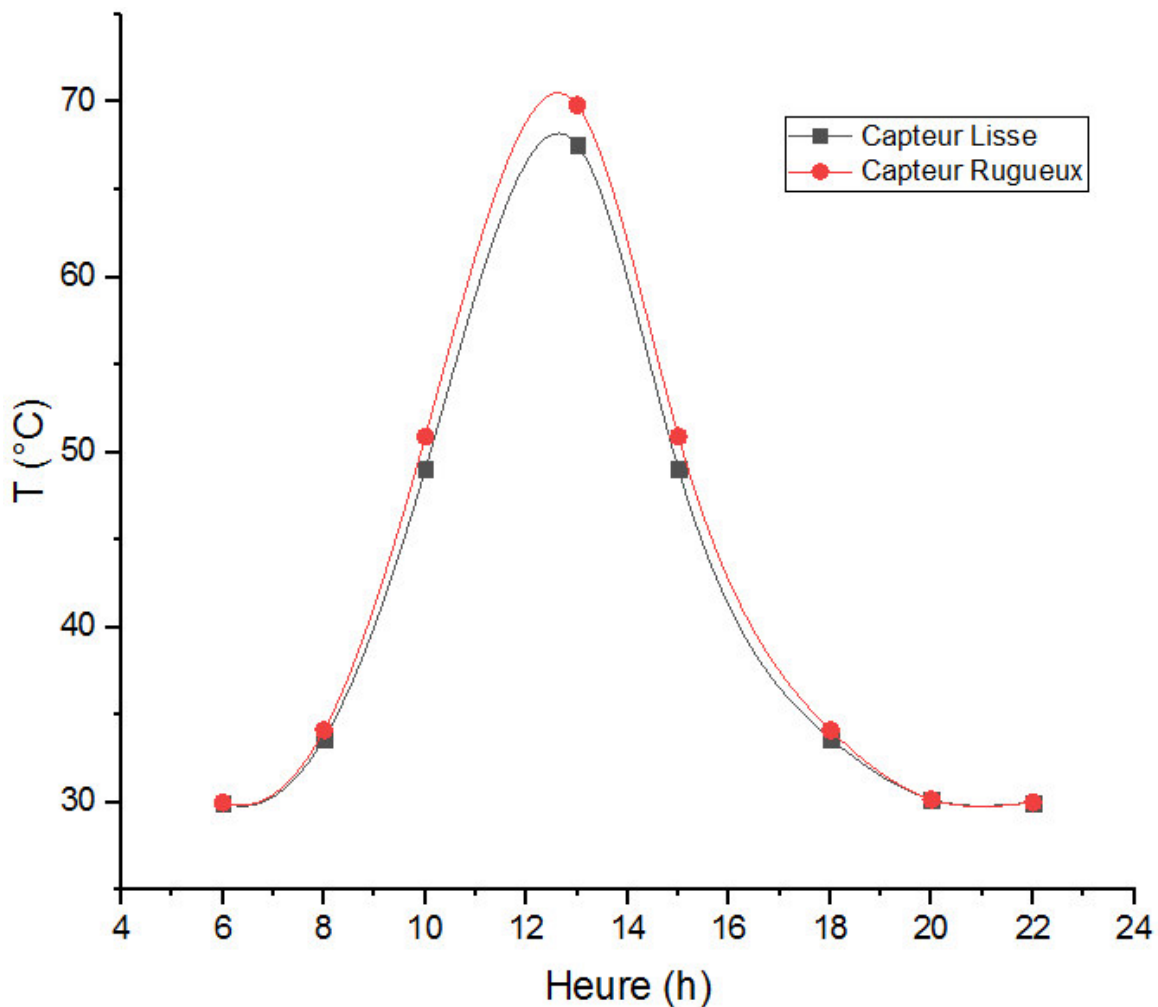


Figure V.50 : Comparaison entre l'évolution de la température moyenne à la sortie d'un capteur lisse et rugueux pendant la journée.

V.4.2 Température Moyenne à l'intérieur du capteur :

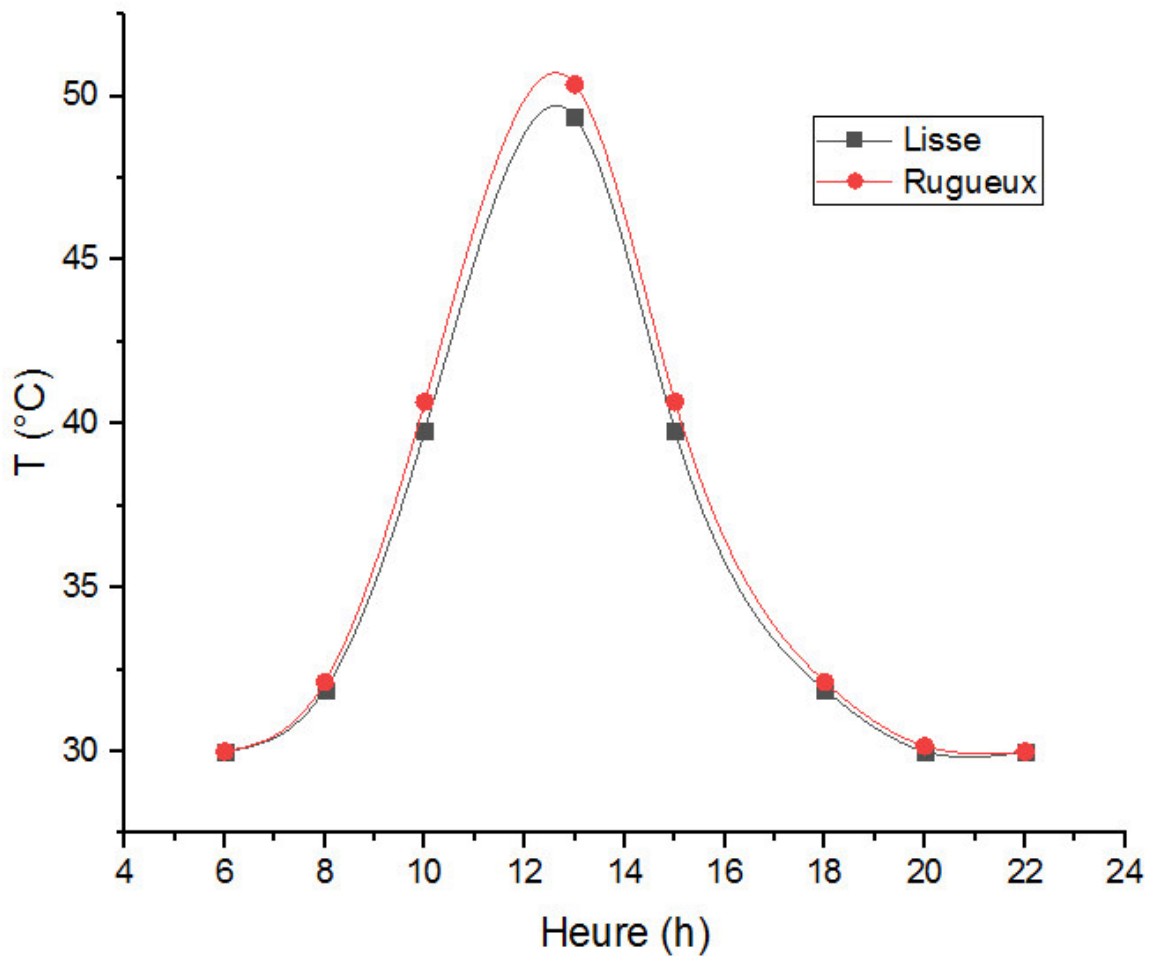


Figure V.51 : Comparaison entre l'évolution de la température moyenne à l'intérieur d'un capteur lisse et rugueux pendant la journée.

D'après ces figures que nous avons obtenues on remarque que l'amplitude de la courbe d'un capteur rugueux est plus importante que celui d'un capteur lisse avec des valeurs de résonance pour la sortie **69,815°C** et **67,564°C** pour le rugueux et le lisse respectivement.

V.4.3 Vitesse moyenne sur le volume de contrôle :

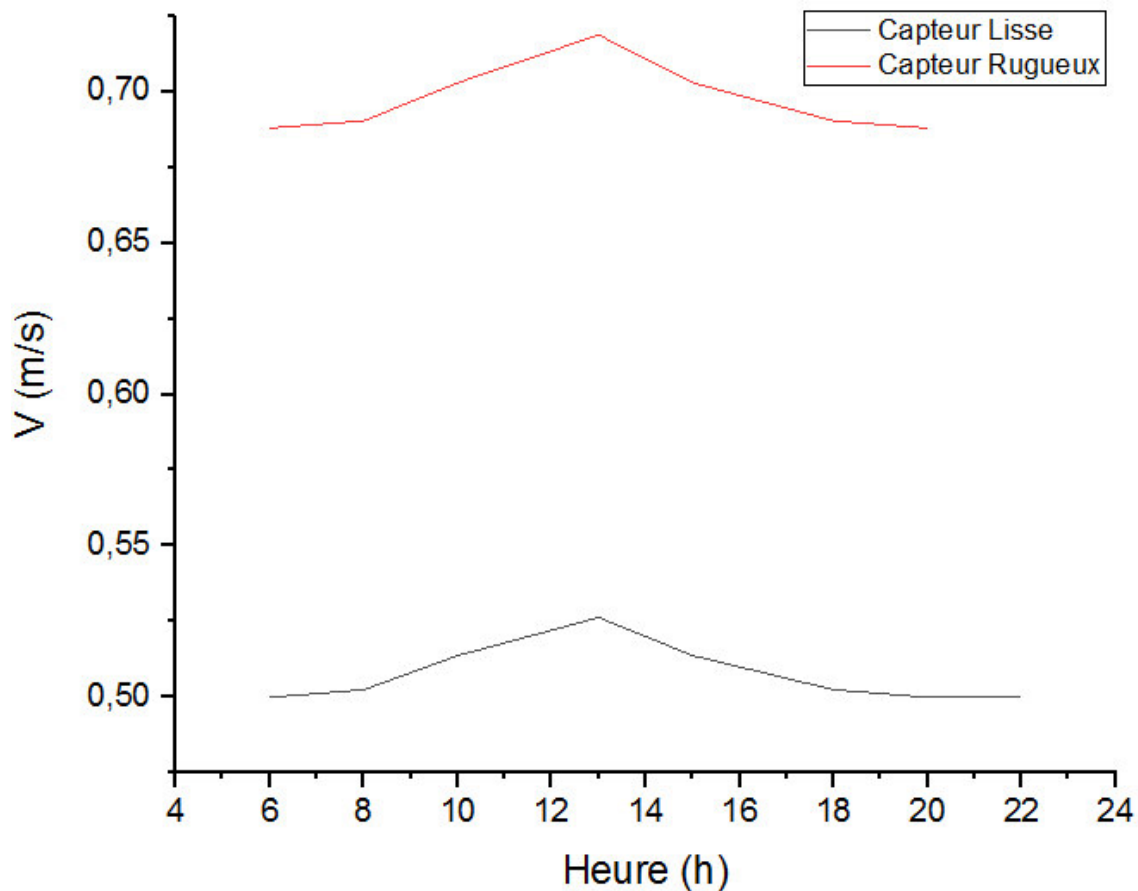


Figure V.52: Comparaison entre l'évolution de la vitesse moyenne à l'intérieur d'un capteur lisse et rugueux pendant la journée.

D'après cette figure on constate que la variation de la vitesse moyenne à l'intérieur du capteur au cours de la journée est plus conséquente pour un capteur rugueux par rapport à un capteur lisse, c'est dû aux obstacles imposées sur le volume de contrôle choses qui rend le fluide plus vif pour le capteur rugueux.

V.4.4 Rendement thermique :

Le rendement d'un capteur solaire est défini comme le rapport entre la quantité de chaleur collectée sur la quantité totale de rayonnement frappant la surface du capteur durant une période donnée.

$$\eta = \frac{\text{Quantité de CHaleur utile Colletcée}}{\text{quantité totale de rayonnement frappant la surface du capteur}}$$

$$\eta = \frac{Qu}{I \times Ac}$$

La quantité de chaleur utile collectée pour tout type de capteur est exprimée par :

$$Qu = QmCp (T_{out} - T_{in})$$

Avec Q_m le débit massique

$$Qm = \rho \times S \times V$$

$$\eta = \frac{QmCp(T_{out} - T_{in})}{I \times Ac}$$

Cette loi est applicable pour un capteur soumis a des conditions expérimentale en utilisant des températures et débits massique réelles, et surtout en prenant en considération les pertes thermiques que soit pour les rayons réfléchies ou absorbés par le vitrage et les pertes à l'intérieur du capteur.

Dans cette simulation c'est un cas idéal, on n'a pas pris en considération les pertes en chaleur pour le capteur donc on va les remplacer par un facteur de pertes thermiques qui est dans les normes des capteurs thermiques à air :

$$\eta = \frac{\alpha QmCp(T_{out} - T_{in})}{I \times Ac}$$

Les rendements des capteurs thermiques à air sont généralement bas ils ne dépassent pas 50 %, pour les cas expérimentales (réelles).

Le coefficient de pertes de thermiques est donc considéré $\alpha = 0,5$ pour notre simulation. Le but du calcul du rendement thermique est de comparer les performances des deux capteurs lisse et rugueux.

CHAPITRE V : SIMULATION ET RESULTATS

Ce tableau montre les rendements thermiques de chaque flux solaire pour les deux types de capteur :

Rendement thermique / Flux solaire (W/m ²)	100	500	950
Capteur Lisse (sans rugosité)	0,538	0,5575	0,579
Capteur Rugueux (avec rugosité)	0,604	0,6125	0,614

Tableau V.5 : Rendement thermique des deux types de capteurs pour les flux solaire imposés.

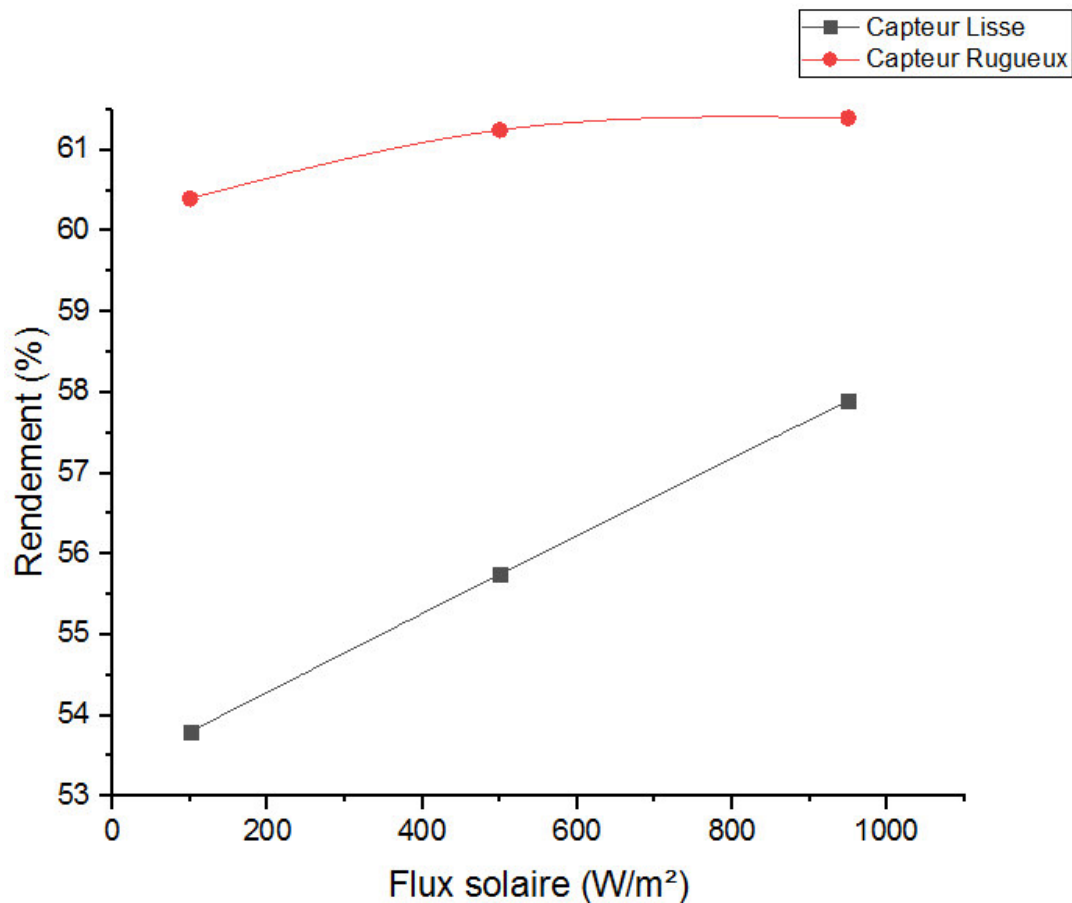


Figure V.53 : Evolution du rendement thermique suivant le flux solaire pour le capteur rugueux et lisse.

Le rendement thermique du capteur dépend en grand partie du débit massique de l'air, l'irradiation solaire et la géométrie de la surface du capteur solaire. Dans notre étude, seul le flux solaire varie et affecte le rendement du capteur.

CHAPITRE V : SIMULATION ET RESULTATS

On remarque que le rendement augmente à chaque fois que le flux solaire augmente jusqu'à la valeur maximale et puis redescend quand le flux et la température ambiante diminuent.

Le capteur rugueux est plus performant en termes de rendement thermique on constate que la valeur maximale du rendement du capteur rugueux **61,4 %**, est plus importante que celle du capteur lisse **57,9 %**.

V.4.5 Conclusion :

On considère trois flux de chaleur pour une journée type qui sont (100 ; 500 ; 950 W/m²) pour des moments bien précis de la journée ou on suivra l'évolution de la vitesse et la température puis le rendement thermique.

Le but de la simulation c'est la comparaison entre les performances de deux types de capteur thermique avec et sans obstacles sur le volume de contrôle.

Après avoir terminé l'étude nous avons constaté que les points les plus chauds de l'air asséchant sont enregistrés pour un capteur rugueux.

On a fait une simulation qu'on n'a pas tapé sur ce manuscrit avec des rugosités de forme rectangulaire de dimensions (Hauteur = 0,08 m ; Largeur 0,01m), l'évolution de la température n'était pas conséquente vu que la vitesse arrive jusqu'à 4 m/s à l'intérieur du capteur à cause du rétrécissement excessif de la section de passage.

Les résultats obtenus dans notre étude montrent que les performances en termes de température et de vitesse d'un capteur solaire thermique avec des rugosités sur la surface de l'absorbeur sont meilleures que dans un capteur sans obstacles.

Pour cela on peut conclure que le séchage dans le capteur rugueux est plus vite par rapport au séchage du capteur lisse parce que la température moyenne à la sortie de l'air asséchant est plus importante pour celui avec des obstacles donc D'une manière générale, le produit (pomme de terre) sèche plus vite dans un séchoir pour une unité de production d'air chaud, avec un absorbeur muni de rugosités.

Le rendement thermique du capteur rugueux est plus important que celui du capteur lisse.

L'effet de la vitesse sur l'air asséchant est très important pour le transfert de chaleur l'augmentation de la vitesse permet un meilleur rendement thermique.

Conclusion générale :

L'objet de cette étude est le dimensionnement d'un capteur solaire thermique, qui a pour but le séchage de la pomme de terre par le biais d'un séchoir solaire indirect à convection naturelle, suivie d'une étude comparative des performances d'un capteur lisse et rugueux.

Notre travail a été réalisé pour les conditions climatiques de la région de Boumerdes pour les conditions climatiques du mois de juillet pour une journée fictive avec une température moyenne de la saison (mois de juillet).

Pour illustrer notre étude, nous avons focalisé notre travail sur la partie du capteur pour avoir des meilleures conditions de séchage du produit agroalimentaire (pomme de terre).

Les résultats obtenus par la simulation montrent que :

1) Pour l'air asséchant à l'intérieur du capteur :

L'écoulement d'air pour le capteur rugueux est plus dynamique en termes de vitesse, température et efficacité, ce qui implique une meilleure cinétique de séchage.

2) Pour la réalisation et l'amélioration du capteur solaire :

- Un meilleur passage de l'air dynamique dans le deuxième type de capteur (avec rugosité sur la surface de l'absorbeur).
- l'efficacité thermique augmentée dans le capteur avec rugosité sur l'absorbeur.

Recommandations :

- Pour améliorer l'efficacité du capteur solaire réalisé on propose d'ajouter des chicane pour augmenter la surface de contact et le transfert de chaleur dans le capteur.
- Un rétrécissement excessif de la section de passage peut empêcher la température de l'air d'augmenter considérablement.
- l'augmentation de la surface de captation du rayonnement conduit à l'élévation de la température de l'air chaud ce qui entraîne un meilleur temps de séchage.

En fin nous espérons que ce modeste travail va servir de base pour un développement éventuel de ce genre de séchoir.

Page des références

[1] : RAHAL BOUSSE HAIM avec les amis, énergie solaire thermique, editor a printer, 2004.

[2] : L'abe des technologies de l'énergie renouvelable, septembre 2003, www.pollutionprobe.org.

[3] : www.techno-science.Net. (15/04/2019).

[4] : Bensellama Elhadi, 2006-2007 : Modélisation d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique, mémoire de fin d'étude, université de Blida, 2006-2007.

[5] : J.M.CHAUERIAUX, conversion thermique du rayonnement solaire.

[6] : www.climamaison.com/lexique/capteur_solaire.htm.(20/04/2019).

[7]: Y. Tripanagnostopoulos & al, 2000: Low cost improvements to building integrated air Cooled hybrid PV- Thermal systems, Proc. 16th Europ. PV Solar Energy Conf. Glasgow, U.K. 1-5 May, Vol II pp. 1874– 1899.

[8] :D.K Edwards, 1979 : Capteurs solaire ; Edition SCM, Paris.

[9] : R. Bernard & al, 1980 : Le rayonnement solaire conversion thermique et applications ; Technique et documentation Lavoisier, 2ème édition 1980.

[10] : S. Saadi, 2010 : Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan, Mémoire de Magister en physique ; UMC.

[14]: Lopez, J.R., Anand, N.K., Flecher, L.S., (1995) "A numerical analysis of laminar convective heat transfer in a three-dimensional channel with baffles" in: Proceedings of the Third U.S. National Congress on Computational Mechanics, Dallas, TX, vol. 1, pp. 406–416.

[15]: Bazdidi-Tehrani, F., and Naderi-Abadi, M., (2004) "Numerical Analysis of Laminar Heat Transfer in Entrance Region of a Horizontal Channel with Transverse fins", International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 31, No. 2, pp. 211-220.

[16] Yang, YT, Hwang CZ. (2003) "Calculation of turbulent flow and heat transfer in a porous-based channel", Int J. Heat Mass. Transfer; 46, pp. 771–80.

[17]: Yuan, Z.X. and Tao, W.Q. (1998), "Numerical prediction for laminar forced convection heat transfer in parallel-plate channels with streamwise-periodic rod disturbances", *Int. J. Numerical Methods in Fluids*, Vol. 28, pp. 1371-87.

[18]: Founti, M.A., Whitelaw, J.H. (1981) "Shell side flow in a model disc and doughnut heat exchanger", *Tech. Report FS/81/37, Mech. Eng. Dept., Imperial College, London, UK.*

[19]: Berner, C., Durst, F., McEligot, D.M., (1984) "Flow around baffles", *Trans. ASME J. Heat Transfer* 106, pp. 743–749.

[20]: Berner, C., Durst, F., McEligot, D.M., (1984) "Streamwise-periodic flow around baffles", in: *Proceedings of the 2nd International Conference on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal.*

[21] : A. Charreau, R. Cavaille *Séchage théorie et pratique Technique de L'Ingénieur, génie des procédés*, 2480-1; 2480-23, (1991).

[22] : J. Bimbenet *Les échanges dans l'industrie agricole et alimentaire*
Édition pp34 *Cahiers du génie Industriel Alimentaire (G.I.A), Sepaic, Paris*
2 ème Cité par H. Madjoudj ,(1984).

[23] : A. Mouafki, " *Modélisation. Simulation du procédés de séchage solaire des feuilles de menthe*", *Mémoire de Magistère, Ouargla* (2004).

[24]: W. L. McCabe, J. C. Smith, et P. Harriott, "Unit operation of chemical Engineering ", *Hill Book Company* (1985).

[25] : *Technique de l'ingenieur-génie des procédés séchage* [10] *Technique de l'ingenieur-génie des procédés séchage* par André charreau et Roland cavaillé, j 2480-2 ; 2480-22.

[26] : D.Schnell, "Technique de séchage, Traduit de l'allemand", *GMBH, Eschborn*, (1983).

[27] : M.Daguent/ *les séchoirs solaire.*

[28]: Robin Alexandre/ *Sécheur solaire* 2003 / 2004.

[29]: O. V. Ekechukwn, B. Norton, "Review of solar energy systems II:An overview of solar drying technology", *Energy Conversion and Management*, 40 (615 - 655) - (1999).

[30] : A.BERCHIDE, "Etude et expérimentation d'un chauffe-eau solaire de type capteur- stockeur", *Mémoire de Master, Université de Tlemcen*, (2011).

[31] : Microsoft Encarta 2006.

[32] : Roger Bernard.*Le rayonnement solaire ; conversion thermique et applications ; 2^e édition*, 1980.

[33]: A. Madhlope, S.A. Jones, and J.D. Kalenga Saka, 2001. A solar air heater with composite absorbed systems for food dehydration. *Renewable Energy*, 27, 27-37.

[34] : D.Mennouche "Valorisation des produit agro-alimentaires et des plantes médicinales par le procédé de séchage solaire", *Thèse de Magistère, Ouargla*(2006).

[35] : <https://energieplus-lesite.be/theories/le-climat/l-enseillement-d8/> (17/06/2019).

[36]: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Air> (20/06/2019).