

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**



**UNIVERSITE DE GHARDAIA**

**DEPARTEMENT D'AUTOMATIQUE ET D'ELECTROMECHANIQUE**

Mémoire de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme de Master en :

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Energies Renouvelables

**Spécialités : énergies renouvelables en électrotechnique**

**THEME**

**AMELIORATION DES PERFORMANCES THERMIQUE ET  
DYNAMIQUE D'UN CAPTEUR DESTINE AU SECHAGE**

**Présenté Par :**

**AMER HADJ AHMAD**

**SELKH ABDEL HAKEM**

Devant le jury :

Akermi Faouzi	président	MAA	université de Ghardaïa
Bouaraour Kamel	encadreur	MCA	université de Ghardaïa
Zitani Brahim	examinateur	MAA	université de Ghardaïa

Année universités: 2019/2020

## Remerciements

Tout d'abord, *On remercie ALLAH Tout-Puissant, la justice est accomplie, et à la lumière de ces circonstances exceptionnelles (covid- 19), nous demandons à ALLAH d'arrêter cette épidémie.*

Nous adressons le grand remerciement notre encadreur Pr. Bouaraour Kamel qui a proposé le thème de ce mémoire, aussi pour ses conseils et ses orientations. Nous avons également l'honneur de remercier l'Administration du Département d'énergie renouvelable d'avoir facilité le processus de sélection du mémoire et de l'encadreur, ainsi que de l'organisation et la bonne coordination. Un grand merci est adressé aux examinateurs d'avoir accepté la lecture et l'évaluation de notre mémoire. Finalement, nous remercions tous ceux qui ont participé à réaliser ce mémoire.

## DÉDICACES

*Nous dédions ce travail humble à tous Aidez-nous de près ou de loin dans la réalisation du mémoire de maîtrise, en particulier:*

*À notre famille (AMER et SELKH), nos chers parents, nous tous  
Le respect et l'affection comme symbole de leur soutien, de leur  
sacrifice et de leur patience*

*Juste pour leurs conseils et conseils.*

*À nos chers frères et sœurs.*

*À toutes nos familles.*

*Pour tous nos professeurs.*

*À tous nos amis.*

*À tous ceux qui me sont chers et à ceux qui ont contribué à nous*

## Résumé

L'amélioration des performances dynamique et thermique d'un système destiné au séchage plan à air sont d'un intérêt capital dans le domaine de séchage des produits agroalimentaires et cela parce que très répandue dans notre vie pratique. A ce propos, ce travail consiste en une contribution à une étude numérique d'un écoulement laminaire incompressible bidimensionnel d'air traversant une conduite de section rectangulaire munie des obstacles. Les profils ainsi que les contours de vitesse et de température ont été analysés en détail pour toute la géométrie considérée et pour différentes sections choisies. L'effet de l'emplacement de ces obstacles « sur l'isolant ou sur l'absorbeur » ainsi que l'effet de la variation de la hauteur sur la température et sur la vitesse à la sortie de ce capteur.

Mots clés : capteur solaire plan, séchage, obstacle

Abstract:

The improvement of the dynamic and thermal performance of a system intended for flat air drying is of major interest in the field of drying of agrifood products and this because it is very widespread in our practical life. In this regard, this work consists of a contribution to a numerical study of a two-dimensional incompressible laminar flow of air passing through a duct of rectangular section provided with obstacles. The profiles as well as the speed and temperature contours were analyzed in detail for all the geometry considered and for various selected sections. The effect of the location of these obstacles "on the insulation or on the absorber" as well as the effect of the variation in height on the temperature and on the speed at the exit of this sensor.

Key words: solar collector plan, drying, obstacle

## ملخص

يعد تحسين الأداء الديناميكي والحراري لنظام مخصص لتجفيف الهواء المسطح ذا أهمية كبيرة في مجال تجفيف منتجات الأغذية الزراعية وهذا لأنه منتشر جداً في حياتنا العملية. في هذا الصدد، يتكون هذا العمل من مساهمة في دراسة عددية لتدفق رقائقي ثنائي الأبعاد غير قابل للضغط للهواء الذي يمر عبر مجرى من قسم مستطيل مزود بعوائق. تم تحليل الملامح بالإضافة إلى ملامح السرعة ودرجة الحرارة بالتفصيل لجميع الأشكال الهندسية التي تم النظر فيها ولأقسام مختلفة مختارة. تأثير موقع هذه العوائق "على العزل أو على الماص" وتأثير التباين في الارتفاع على درجة الحرارة وعلى السرعة عند خروج هذا المستشعر

كلمات مفتاحية: لاقط شمسي، تجفيف، عائق

# Table des matières

Remerciements .....	I
Dédicaces.....	II
Résumé.....	III
Liste des figures.....	VII
Liste de tableau.....	IX
Nomenclature.....	X
Introduction Générale.....	1

## **Chapitre I : le séchage solaire et ses applications**

Introduction .....	4
I.1. Généralité sur l'énergie thermique.....	4
I.1.1. L'énergie solaire thermique .....	4
I.1.2. Les utilisations de l'énergie solaire thermique .....	4
I.2. La conversion thermique.....	6
I.2.1 Les serres.....	6
I.2.2 Les capteurs solaires .....	6
I.2.3 Les maisons solaires.....	7
I.2.4 Le séchage solaire .....	8
I.3-Historique des séchoirs solaires.....	8
I.4-Les différents types des séchoirs solaires .....	14
I.4.1. Les séchoirs naturels .....	14
I.4.2. Les séchoirs direct.....	14
I.4.3- Les séchoirs indirects.....	15
I.4.4- Les séchoirs mixtes.....	15
I.4.5 Les séchoirs hybrides .....	16
I.5 Les avantages et les inconvénients du séchage solaire.....	16
Conclusion.....	17

## **Chapitre II : modélisation mathématique**

Introduction .....	19
II.1 La géométrie étudiée.....	19
II.2 Les équations de conservation .....	21
II.3 Les conditions aux limites .....	21
Conclusion.....	22

## **Chapitre III : modélisation numérique**

Introduction .....	24
--------------------	----

III.1 Hypothèses simplificatrices.....	24
a. Equation de continuité.....	24
b. Equation de conservation de la quantité de mouvement suivant $-x$ .....	24
c. Equation de conservation de la quantité de mouvement suivant $-y$ .....	25
d. Équation de conservation d'énergie.....	25
III.2 Présentation du gambit.....	25
III.2.1. Construction d'un maillage.....	25
III.2.2 Notice d'utilisation de Gambit.....	26
III.2.3 Démarrage de Gambit.....	26
III.2.4 Maillage sous Gambit.....	27
III.2.5 Choix du type de maillage.....	27
III.2.5.1 Maillage structuré (quadra/hexa).....	27
III.2.5.2 Maillage non structuré (tri/tétra).....	27
III.2.5.3 Maillage hybride.....	28
III.2.6 Construction de la géométrie.....	28
III.2.7 Techniques générales de génération du maillage.....	28
III.3 Présentation du code Fluent.....	29
III.3.1 Démarrage de logiciel Fluent.....	29
III.3.2 Importation de la géométrie.....	29
III.3.3 Vérification du maillage importé.....	30
III.3.4 Affichage de la grille.....	31
III.3.5 Choix du solveur.....	31
III.3.6 choix du modèle de turbulence.....	32
III.3.7 Définition des caractéristiques des matériaux.....	32
III.3.8 Conditions d'opération.....	33
III.3.9 Conditions aux limites.....	33
III.3.10 Choix de solution.....	34
III.3.10.1 Sous-relaxation.....	34
III.3.10.2 Choix de la méthode de couplage Pression-Vitesse.....	35
III.3.11 Initialisation.....	35
III.3.12 La convergence.....	36
III.3.12.1 Critère de convergence.....	37
III.3.13 Lancement du calcul.....	37
Conclusion.....	38

## **Chapitre IV : résultat et discussion**

Introduction.....	40
IV.1 La géométrie étudiée sur Gambit.....	40

IV .2 Sensibilité de maillage .....	40
IV .3 Comportement dynamique et thermique d'un écoulement d'air avec et sans obstacle à différentes hauteurs et d'emplacements.....	41
IV.3.1 Contour de la vitesse et de la température.....	41
IV.3.1.1 cas simple sans obstacle .....	41
IV.3.1.2 Avec obstacles au niveau de l'absorbeur.....	42
IV.3.1.3 Avec obstacles au niveau de l'isolant.....	44
IV.3.2 Profils de la vitesse.....	45
IV.3.2.1 Avec obstacle au niveau de l'absorbeur .....	45
IV.3.2.2 Avec obstacle au niveau de l'isolant .....	46
IV.3.3 Comparaison entre la vitesse de fluide dans le cas avec obstacle au niveau l'absorbeur et l'isolant	48
IV.3.4 Profils de température .....	48
IV.3.4.1 cas sans obstacle.....	49
IV 3.4.2 cas avec obstacle au niveau de l'absorbeur .....	49
IV 3.4.3 cas avec obstacle au niveau de l'isolant .....	50
IV.4.3 comparaison entre la température de fluide dans le cas avec obstacle au niveau de l'absorbeur et au niveau de l'isolant.....	51
Conclusion.....	52
Conclusion générale .....	53
Références bibliographiques .....	54

## Liste des figures

Figure I.1 : Système de chauffage .....	4
Figure I.2 : Le cuiseur boîte.....	5
Figure I.3 : Le cuiseur à panneaux .....	5
Figure I.4 : Le système parabolique .....	6
Figure I.5 : Les serres de la Perrine.....	6
Figure I.6 : Capteur solaire thermique plan .....	7
Figure I.7 : Capteur solaire thermique cylindro-parabolique .....	7
Figure I.8 : Schéma descriptif du dispositif utilisé Boulemtafes and Semmar 1999 [2] .....	8
Figure I.9 : Schéma descriptif du séchoir utilisé dans la référence [3].....	9
Figure I.10 : Schéma descriptif de séchoir étudié par A.A. El-Sebaï et al [4] .....	9
Figure I.11 : Séchoir solaire avec capteur solaire multi-passe incliné et un lit profond [5] .....	10
Figure I.12 : Séchoir solaire indirect multi-plateaux avec capteur solaire plan [6].....	11
Figure I.13 : Deux types de séchoirs utilisés dans l'étude de (Benkhelfellah, El mokretar et al. 2005) [2]....	11
Figure I.14 : Schéma descriptif d'un séchoir solaire avec stockage thermique [7].....	12
Figure I.15 : Schéma descriptif du séchoir utiliser par Khalil, Al-Juamily et al. 2007 [8].....	12
Figure I.16 : Séchoir solaire indirecte à convection forcée [9].....	13
Figure I.17 : Schéma de dispositif utilisé dans le travail de (Aoues, Moumami et al. 2009)[10] .....	14
Figure I.18 : Schéma explicite d'un séchoir solaire direct [13].....	15
Figure I.19 : Schéma explicite d'un séchoir solaire indirect .....	15
Figure I.20 : Schéma explicite d'un séchoir mixte [13]. .....	16
Figure I.21 : Schéma explicite du séchoir solaire hybride.....	16
Figure II. 1 : Composants du capteur utilisé.....	19
Figure II. 2 : Schéma descriptif des dimensions du collecteur thermique proposé (2D).....	19
Figure II. 3 : Schéma descriptif de l'obstacle au niveau de l'absorbeur.....	20
Figure II. 4 : Schéma descriptif de l'obstacle au niveau d'isolant.....	20
Figure III.1 : Lancement du Gambit.....	26
Figure III.2 : Menu principale de Gambit.....	27
Figure III.3 : Les opérations pour construire une géométrie .....	28
Figure III.4 : Schéma représentatif de l'algorithme SIMPLE .....	38
Figure IV.1 : le maillage non uniforme sur gambit .....	40
Figure IV.2 : Contours de la vitesse horizontale pour le cas simple .....	41
Figure IV.3 : Contours de la vitesse horizontale pour le cas simple .....	42
Figure IV.4 : Contour de la température pour le cas simple.....	42
Figure IV.5 : Contour de la vitesse horizontale.....	42
Figure IV.6 : Contour de la vitesse verticale .....	42
Figure IV.7 : Contour de la température.....	43
Figure IV.8 : Contours de la vitesse horizontale .....	43
Figure IV.9 : Contours de la vitesse verticale .....	43
Figure IV.10 : Contours de la température .....	43
Figure IV.11 : Contours de la vitesse horizontale .....	44
Figure IV.12 : Contours de la vitesse verticale.....	44
Figure IV.13 : Contours de la température .....	44
Figure IV.14 : Contours de la vitesse horizontale .....	45
Figure IV.15 : Contours de la vitesse verticale.....	45



Figure IV.16 : Contours de la température .....	45
Figure IV.17 : Profils de vitesse pour différentes sections pour $h=1\text{cm}$ .....	46
Figure IV.18 : Profils de vitesse pour différentes sections pour $h=2\text{cm}$ .....	46
Figure IV.19 : Profils de vitesse pour différentes sections pour $h=1\text{cm}$ .....	47
Figure IV.20 : Profil de vitesse à plusieurs sections pour $h=2\text{cm}$ .....	47
Figure IV.21 : Les profils de vitesse pour la section $2L/3$ .....	48
Figure IV.22 : L Profil de température pour le cas simple .....	49
Figure IV.23 : Profils de la température en fonction de position pour $h=1\text{cm}$ .....	49
Figure IV.24 : Profils de la température en fonction de position pour $h=2\text{ cm}$ . .....	50
Figure IV.25 : Profils de température en fonction de position pour $h=1\text{cm}$ .....	50
Figure IV.26 : Profils de température en fonction de position pour $h=2\text{cm}$ .....	51
Figure IV.27 : Les profils de température pour la section $2L/3$ .....	51

## Liste de tableau

Tableau IV. 1 : Sensibilité du maillage sur la température et la vitesse .....	41
--	----

## Nomenclature

Notation Latin	Désignation	Unité
$\tau^*$	représente le temps	s
$\rho$	la masse volumique	$\text{kg}/\text{m}^3$
$V$	le vecteur vitesse du fluide	
$T$	la température	k
$T_\infty$	la température ambiante	k
$p$	la pression	Pa
$\nu$	la viscosité cinématique du fluide	$\text{m}^2/\text{s}$
	la conductivité thermique	$\text{w}/\text{m.k}$
$\beta$	le coefficient de dilatation	$\text{k}^{-1}$
$C_p$	la chaleur spécifique	$\text{kJ}/\text{kg.k}$
$P_s$	la source volumique de chaleur	
$\varphi$	la fonction de dissipation (Puissance locale des forces de viscosité)	
$\Delta$	L'opérateur Laplacien	
$h_1, h_2$	hauteurs	m

# Introduction Générale

L'Algérie dispose d'un grand potentiel énergétique tant pour les énergies fossiles, que pour les énergies renouvelables. Ce dernier type est en progression continu depuis des dizaines d'année à travers le territoire national. Les centrales installées contribuent avec des taux acceptables à satisfaire les besoins énergétiques du pays. Le solaire photovoltaïque joue le rôle le plus important, avec 22 centrales installées, cependant on ne peut pas sous-estimer le rôle du solaire thermique à produire de l'eau chaude sanitaire pour les foyers isolés ou pour la croissance des végétations dans les serres ou même pour le séchage des produits agricoles.

Le séchage solaire est parmi les applications du solaire thermique les plus importants. Que soit de façon direct ou indirect, l'application la plus connue des séchoirs solaires et de sécher les produits agroalimentaires. Le principe consiste à réduire le teneur en eau à l'intérieur des produits en-dessous d'une valeur permettant sa conservation à température ambiante. Cependant pour avoir un rendement plus élevée, il faut avoir une vitesse importante ou une température relativement élevée.

Dans le présent travail on s'intéresse à l'amplification du rôle de la vitesse et de la température à l'intérieur de la veine d'un capteur solaire plan vitré. Le but est de placer des épaulements au niveau de l'absorbeur ou de l'isolant pour améliorer les performances thermiques et dynamiques d'un séchoir solaire indirect.

Le chapitre 1 représente un aperçu sur historique des séchoirs solaires, et ces différentes classes.

Le chapitre 2 est consacré à la définition de la géométrie étudiée ainsi que les différentes équations mathématiques qui régit les phénomènes thermiques dans l'espace compris entre l'absorbeur et l'isolant. Pour qu'il soit résoluble, le système des équations est complété par l'introduction des conditions aux limites.

Dans le chapitre 3, la géométrie choisie est le maillage adéquat sont réalisés par le logiciel **Gambit**, et le système des équations cité dans le chapitre 2 est résolu numériquement par le code de calcul **Fluent**. Les équations sont résolues d'une manière itérative afin d'avoir la solution la plus précise.

Le chapitre 4 regroupe les détails des cas étudiés. Les épaulements sont placés soit au niveau de l'absorbeur, soit au niveau de l'isolant. Pour voir l'influence de la position des épaulements, plusieurs positions sont choisies. La hauteur des épaulements est aussi testée. Les résultats obtenus sont sous forme des graphes et des figures qui représentent les contours de la vitesse et de la

température et des lignes de courant. Enfin, nous terminons ce mémoire par une conclusion générale.

**Chapitre I :**  
**le séchage solaire et ses applications**

## Introduction

Le séchage est une opération ayant pour but d'éliminer partiellement ou totalement l'eau d'un corps humide par évaporation de cette eau. Dans ce chapitre, nous aborderons des généralités sur l'énergie solaire thermique et ses applications. On va mettre la lumière sur le principe de fonctionnement de séchoirs solaires et l'historique et les différents types et les avantages et les inconvénients.

## I.1. Généralité sur l'énergie thermique

### I.1.1. L'énergie solaire thermique

L'énergie solaire thermique est la transformation instantanée de l'énergie des rayons solaires en énergie thermique. Cette transformation peut être utilisée directement, comme par exemple le chauffage de l'eau sanitaire à l'aide des capteurs solaires, ou indirectement dans le cas de la production de l'électricité dans une centrale thermodynamique solaire. Le solaire thermique est basé sur l'utilisation de la chaleur transmise par rayonnement. A l'aide des progrès technologiques, les techniques de captation directe, d'une partie de l'énergie solaire sont nettement améliorées afin de rendre les systèmes solaires plus fiables, efficaces et rentables [8].

### I.1.2. Les utilisations de l'énergie solaire thermique

Cette énergie couvre un taux élevé des besoins en chauffe- eau et autre complément de chauffage dans le monde. L'installation se fait souvent sur la toiture d'une maison indépendante ou d'un bâtiment tout entier. Il s'agit de capteurs vitrés dans lesquels circule un liquide caloporteur réchauffé par le rayonnement du soleil.

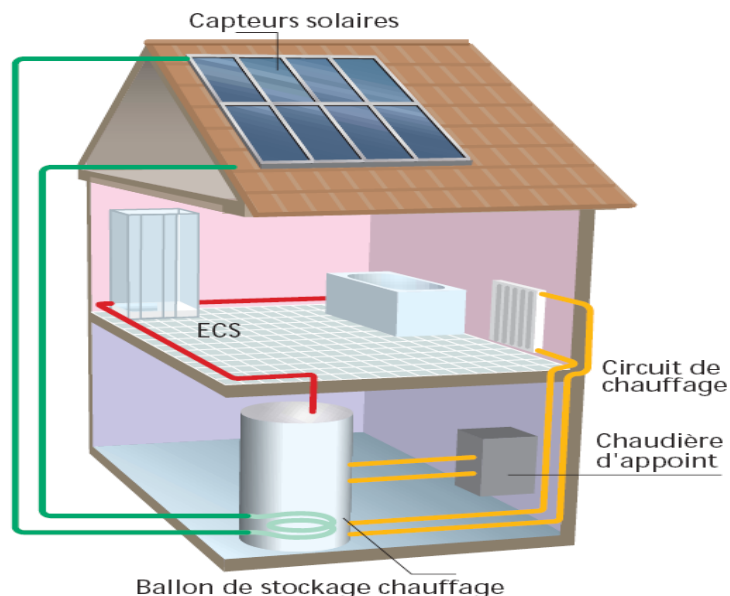


Figure I.1 : Système de chauffage

## Chapitre I : le séchage solaire et ses applications

---

L'énergie solaire thermique est aussi utilisée pour les machines frigorifiques comme le réfrigérateur à absorption de gaz, les camping-cars et les caravanes.

D'autres utilisations de l'énergie thermique telle les sècheurs solaires et les cuisinières sont en vogue en Chine et en Inde. On distingue plusieurs types de cuiseurs :

- **Le cuiseur boîte** : est composé d'un ou plusieurs panneaux solaires qui concentrent l'énergie sur une boîte vitrée.



**Figure I.2** : Le cuiseur boîte

- **Le cuiseur à panneaux** : est doté de plusieurs panneaux qui concentrent la chaleur sur une cloche en verre dans laquelle sont placés les aliments.



**Figure I.3** : Le cuiseur à panneaux

- **Le système parabolique** : qui est composé de disques concaves [1], afin de concentrer les rayons lumineux sur un objet qui se situe dans le foyer du système.





**Figure I.4** : Le système parabolique

### I.2. La conversion thermique

#### I.2.1 Les serres

Le rayonnement solaire est la seule forme d'énergie transmissible à grande distance sous forme d'ondes électromagnétiques, est absorbée (inégalement) par les objets qui y sont exposés, et elle est convertie en chaleur. Si de plus on expose des objets au rayonnement solaire à travers une paroi de verre, les fréquences correspondant au rayonnement infrarouge sont arrêtées, « piégées » par le verre : c'est ce que l'on connaît sous le nom d'effet de serre.

L'effet de serre peut être avantageusement complété au moyen d'un réchauffage par ruissellement sur les parois, en faisant appel à la géothermie basse température ou à la récupération des rejets industriels, ceux des centrales électronucléaires par exemple [3]



**Figure I.5** : Les serres de la Perrine

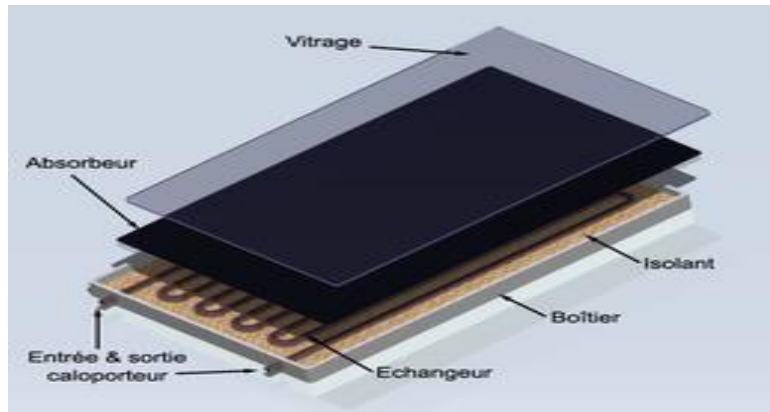
#### I.2.2 Les capteurs solaires

Les capteurs solaires plans sont constitués d'un caisson fermé par un couvercle en verre, et renfermant une canalisation parcourue par de l'eau (fluide caloporteur). Tout l'intérieur est peint en noir de façon à absorber le maximum de rayonnement ; le rendement d'un capteur bien réalisé

## Chapitre I : le séchage solaire et ses applications

---

dépasse 50 % et permet de produire l'eau chaude sanitaire d'une habitation. La température atteinte ne dépasse pratiquement pas 80 °C.



**Figure I.6 :** Capteur solaire thermique plan

Les capteurs à concentration permettent d'atteindre des températures supérieures à 150 °C ; une surface réfléchissante de forme cylindrique concentre le rayonnement solaire sur un récepteur parcouru par le fluide caloporteur. L'eau chaude produite peut être utilisée directement pour le chauffage de locaux, de serres, de piscines, ou à des fins industrielles. Elle peut aussi être transformée en travail mécanique ou électrique de façon très classique, avec toutefois un faible rendement dû à la température trop basse de la source chaude [3].



**Figure I.7 :** Capteur solaire thermique cylindro-parabolique

### I.2.3 Les maisons solaires

Le rayonnement solaire peut aussi servir à chauffer directement des locaux d'habitation ; des maisons solaires ont été expérimentées dans des sites variés, les meilleurs étant ceux qui

## Chapitre I : le séchage solaire et ses applications

correspondent à un ensoleillement annuel maximal. La construction doit être fermée vers le nord, ouverte au sud ; la collecte de l'énergie se fait par les murs, des panneaux solaires, et éventuellement par une serre ; un système de chauffage d'appoint doit être prévu.

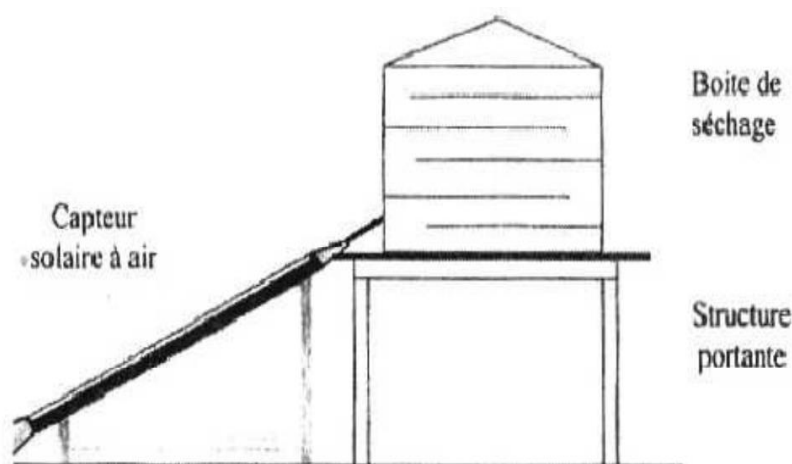
Les difficultés proviennent de l'irrégularité du rayonnement, suivant la latitude du lieu, la saison, l'heure de la journée, et l'état de l'atmosphère ; de plus, le soleil manque essentiellement quand on en a le plus besoin, de l'automne au printemps. Un stockage de la chaleur est donc primordial, et de préférence sur une longue période, afin d'utiliser en hiver la chaleur captée et stockée pendant l'été [3]

### I.2.4 Le séchage solaire

Le but du processus de séchage est d'éliminer l'humidité ou l'évaporation de l'eau à l'intérieur du produit, et ce processus ne se fait pas seulement en exposant les produits agricoles au soleil, en les stockant dans un endroit sec et en utilisant également l'air qui est chauffé sous l'influence du rayonnement solaire comme source de chaleur et ce processus se compose de deux modèles de séchage direct et de séchage indirect. [1]

### I.3-Historique des séchoirs solaires

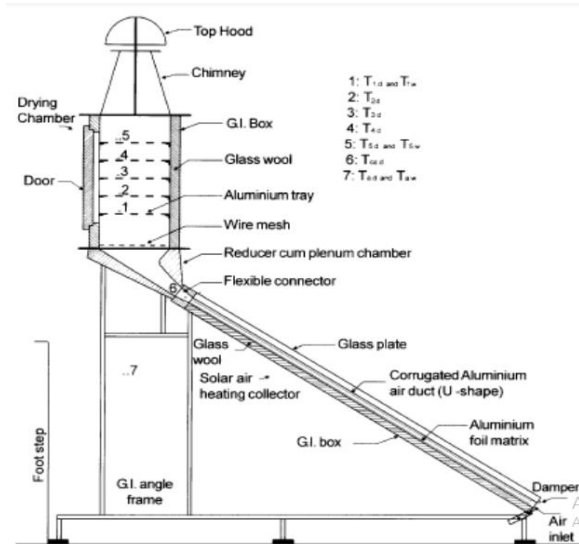
**Boulemtafes and Semmar 1999**[2], ont présentés un travail sur la conception et la réalisation d'un séchoir indirect à vocation agricole destiné au séchage des fruits et légumes. Le séchoir est constitué d'une boîte parallélépipédique, elle est alimentée en air chaud par un capteur solaire plan à air. La partie expérimentale consistera à étudier les caractéristiques de l'air de séchage lorsqu'il arrive dans la boîte de séchage, c'est-à-dire, sa température, son degré d'humidité, sa vitesse et son débit ainsi que leurs évolutions au cours d'une journée caractéristique. Enfin la mise en équation des phénomènes de transfert de chaleur et de masse ayant lieu pendant le séchage, permet de comparer entre théorie.



**Figure I.8** : Schéma descriptif du dispositif utilisé Boulemtafes and Semmar 1999 [2]

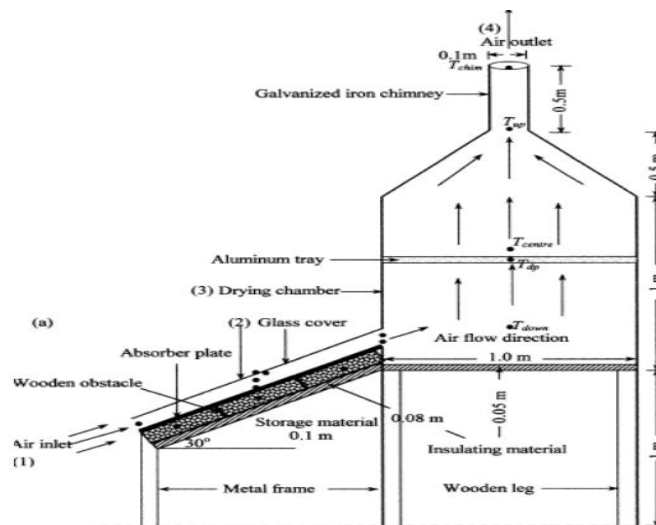
## Chapitre I : le séchage solaire et ses applications

(Dilip R, Sawhney et al. 2002, [3]) ont utilisés un séchoir solaire indirect, fonctionnant à convection naturelle, leur séchoir est composé d'un capteur solaire et d'une chambre de séchage. Les résultats obtenus par ce séchoir sont encourageants, dont la température à la sortie varie entre 50 °C et 55 °C. Durant la période d'expérimentation qui s'étale de Mars à Mai,. Ils ont observé que le séchage des raisins par ce système prend 04 jours, alors que le séchage traditionnel nécessite une durée allant de 07 à 15 jours.



**Figure I.9 :** Schéma descriptif du séchoir utilisé dans la référence [3]

En 2002 L'étude de **El-Sebaii et Aboul-Enein** [4], présente une série d'expériences pour le séchage des figues qui sont coupés en tranche et traités chimiquement dans un séchoir solaire indirect avant le séchage pour augmenter l'évaporation de l'humidité à l'intérieur du produit, et par conséquent le temps de séchage va diminuer.



**Figure I.10 :** Schéma descriptif de séchoir étudié par A.A. El-Sebaii et al [4]



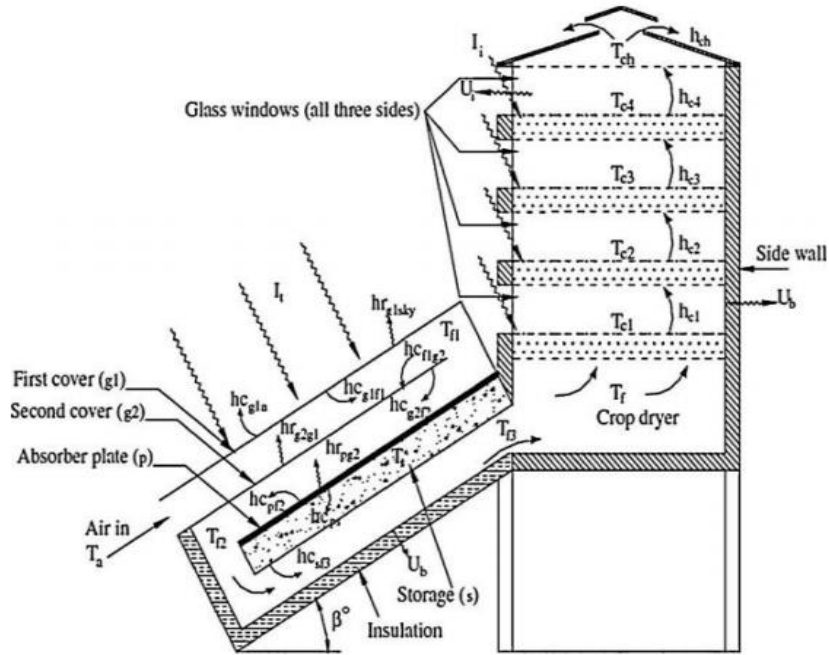


Figure I.12 : Séchoir solaire indirect multi-plateaux avec capteur solaire plan [6]

En 2005 l'étude de **Benkhelfellah, El mokretar** [2] est consacré à la comparaison entre le séchage des produits agro-alimentaires dans un séchoir direct et indirect. Dans leur travail, ils ont entrepris l'étude du bilan d'énergie des modèles expérimentaux des séchoirs solaires de type direct et indirect, afin d'en déterminer la cinétique de séchage de produits agroalimentaires, compte tenu les conditions ambiantes du site donné. La figure I.13 montre les deux types de séchoirs utilisés dans cette étude.



séchoir solaire de type direct

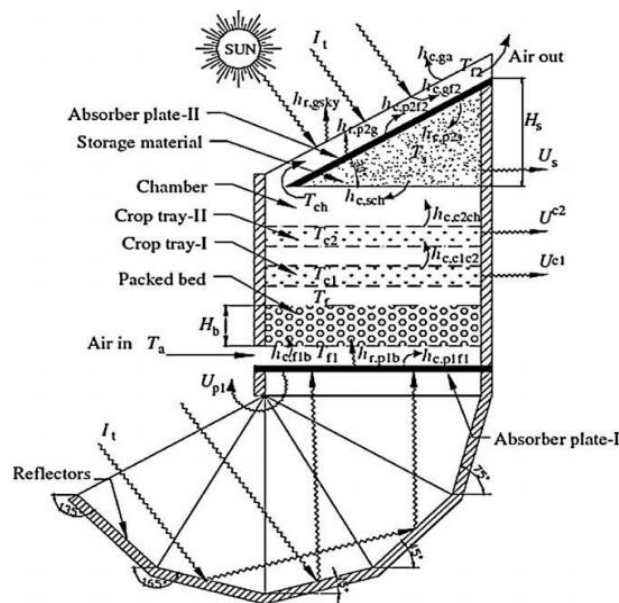


séchoir solaire de type indirect

Figure I.13 : Deux types de séchoirs utilisés dans l'étude de (Benkhelfellah, El mokretar et al. 2005) [2]

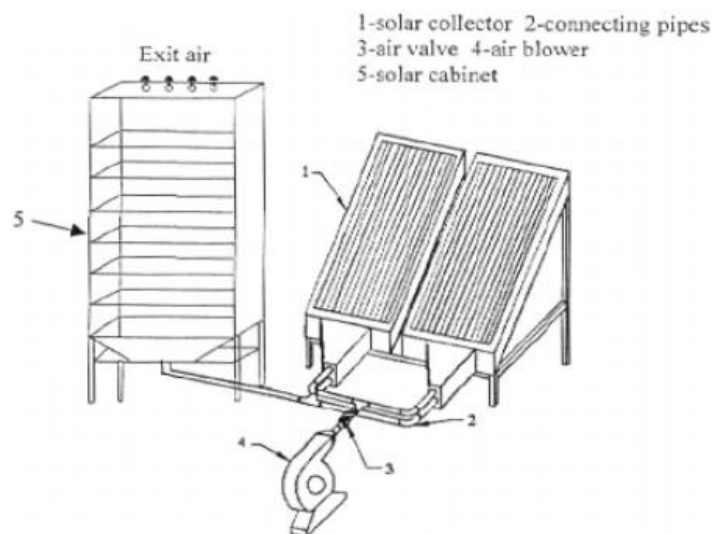
## Chapitre I : le séchage solaire et ses applications

En 2007, **Dilip. Jain** [7], a développé un nouveau type de séchoir à convection naturelle avec une unité de stockage thermique pour assurer l'air chaud pendant la période non ensoleillée. Ce type se compose d'un réchauffeur d'air plat, relié avec réflecteur de forme polygonale pour refléter le maximum du rayonnement solaire incident (Figure I.14). Ce système est destiné pour le séchage de l'oignon, avec une capacité de 90 kg.



**Figure I.14** : Schéma descriptif d'un séchoir solaire avec stockage thermique [7]

L'étude expérimentale de (**Khalil, Al-Juamily al**) [8], est basée sur l'efficacité thermique d'un séchoir solaire indirect à convection forcée, qui se compose de trois parties : collecteur solaire, chambre de séchage et un ventilateur (figure I.15).

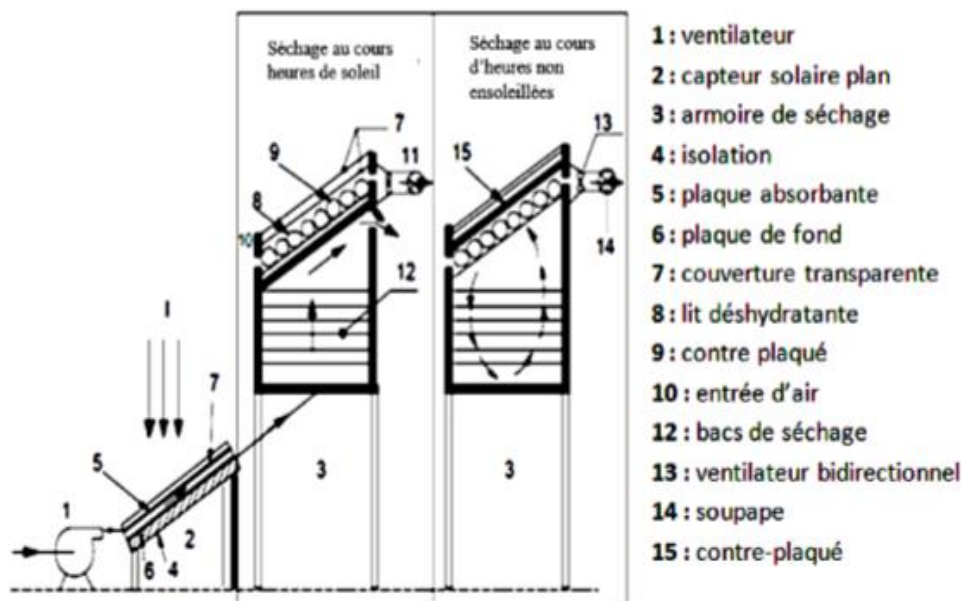


**Figure I.15** : Schéma descriptif du séchoir utiliser par Khalil, Al-Juamily et al. 2007 [8]

## Chapitre I : le séchage solaire et ses applications

Ce type de séchoir est destiné à sécher certains produits tels que le raisin, abricot, et haricots. Des expériences ont été faites en fonction de trois débits différents respectivement 0.076, 0.063 et 0.046 m<sup>3</sup> /s. Le procédé expérimental indique que la température de l'air à la sortie du capteur, est le facteur le plus important et montre que lorsque le débit augmente la température diminue.

**Shanmugama** et **Natarajanb** 2006 [9], ont développé un séchoir solaire de type indirect fonctionnant en convection forcée, fabriqué et exécuté dans des conditions climatiques chaudes et humides en Inde, pour étudier l'efficacité thermique et l'humidité enlevée pendant le séchage de 75 kg de pois. Ce système est couplé par un capteur solaire orienté vers le sud pour maximiser le rayonnement solaire incident. La conclusion de ces résultats montre que le séchage dans un séchoir de type intégré se continue dans les heures non ensoleillées, en plus, la qualité du produit est améliorée pour un débit d'air variant entre 0,01, 0,02 et 0,03 kg/s par rapport au produit qui sèche en continuité, ainsi que l'efficacité thermique qui atteint 63 % (figure I.16), et le taux d'extraction d'humidité qui varie de 0,55 à 0,85 kg/kWh



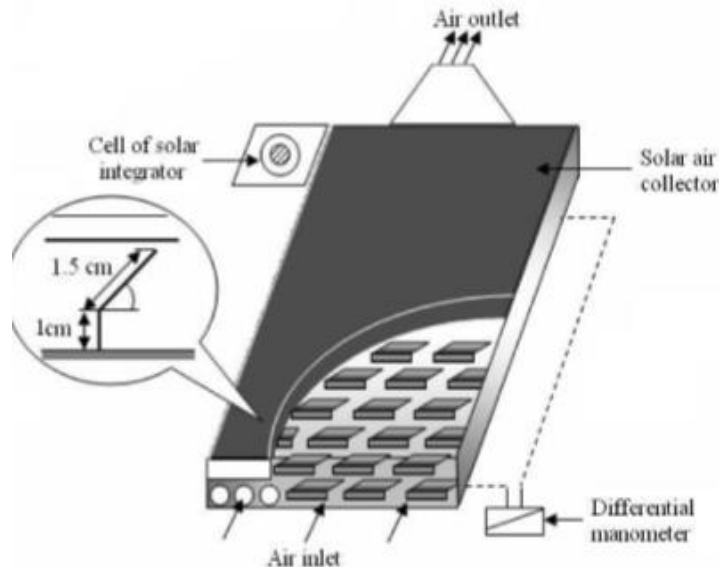
**Figure I.16** : Séchoir solaire indirecte à convection forcée [9]

En 2009 une autre étude sur l'amélioration des performances thermiques d'un capteur solaire à air [2] est réalisée par **Aoues, Moumimi** et al. Ils ont présenté une série des tests expérimentaux menés sur un capteur solaire plan. L'installation expérimentale complète comprend la mesure du rayonnement solaire global, la vitesse du vent, le débit d'air et les températures ambiante, de l'air à l'entrée et à la sortie.



## Chapitre I : le séchage solaire et ses applications

Pour optimiser les performances thermiques, le capteur a été garni dans sa veine d'air dynamique de rugosités artificielles de différentes formes et différents arrangements, après une étude comparative, ils ont arrivé à choisir la bonne configuration parmi les quatre étudiées, qui permet d'obtenir le meilleur rendement du capteur.



**Figure I.17** : Schéma de dispositif utilisé dans le travail de (Aoues, Moummi et al. 2009)[10]

### I.4-Les différents types des séchoirs solaires

On classe les séchoirs solaires selon la manière de leur utilisation du rayonnement solaire. On trouve : les séchoirs naturels, les séchoirs directs, les séchoirs indirects et les séchoirs mixtes.

#### I.4.1. Les séchoirs naturels

Ce séchage s'effectue sous forme directe de soleil et d'air, qui n'est pas maîtrisé, il s'effectue en répartissant le produit alimentaire sur des étagères ou des nattes, et en le déposant au sol. Ces séchoirs sont très peu coûteux, mais nécessitent une intervention humaine régulière et soutenue: protéger ou collecter le produit en cas de pluie, mélange fréquent pour éviter la surchauffe de la couche supérieure et homogénéité du produit pour permettre à la couche inférieure de se sécher [11]

#### I.4.2. Les séchoirs directs

Le séchage solaire direct utilise la lumière directe du soleil pour sécher les aliments. Il 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 en noir pour augmenter la capacité d'absorption de chaleur, une feuille de plastique ou polyéthylène transparent sert généralement [12]

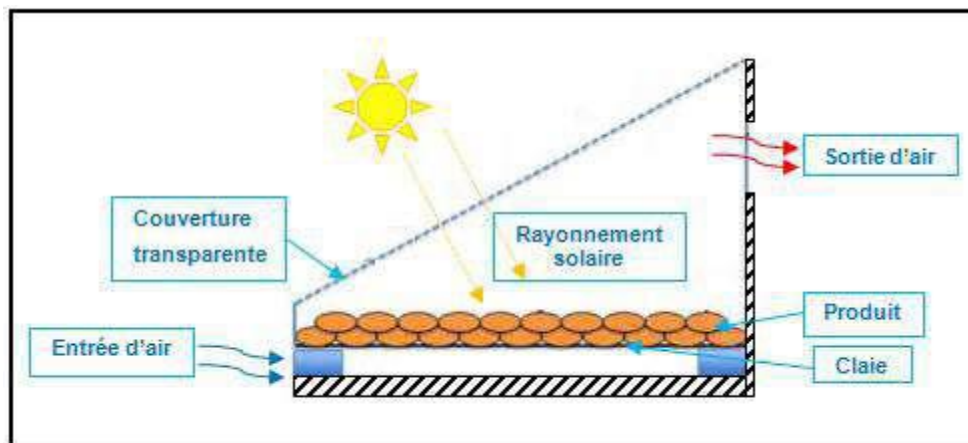


Figure I.18 : Schéma explicite d'un séchoir solaire direct [13]

### I.4.3- Les séchoirs indirects

Dans ce type de séchoir, les produits à sécher ne sont pas exposés à la lumière directe du soleil. Les séchoirs solaires indirects ont un capteur solaire séparé et une unité de séchage. Il se compose généralement de quatre éléments, à savoir le capteur solaire, l'unité de séchage, le ventilateur et les canaux de circulation d'air. Le capteur solaire est utile pour atteindre des valeurs de température élevées avec de l'air contrôlé.

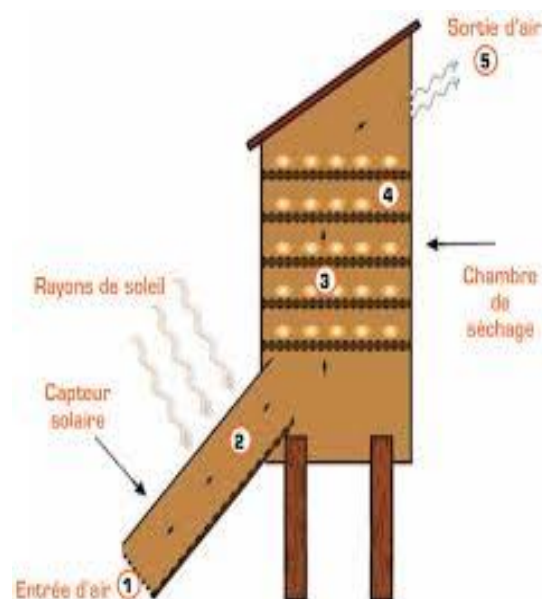


Figure I.19 : Schéma explicite d'un séchoir solaire indirect

### I.4.4- Les séchoirs mixtes

Ces séchoirs combinent des séchoirs directs et indirects. Dans ce type de séchoir, la chaleur nécessaire au séchage est fournie grâce à l'action combinée du rayonnement solaire, qui frappe

## Chapitre I : le séchage solaire et ses applications

directement les produits et l'air chauffé dans les complexes [12] comme le montre la figure ci-dessous.

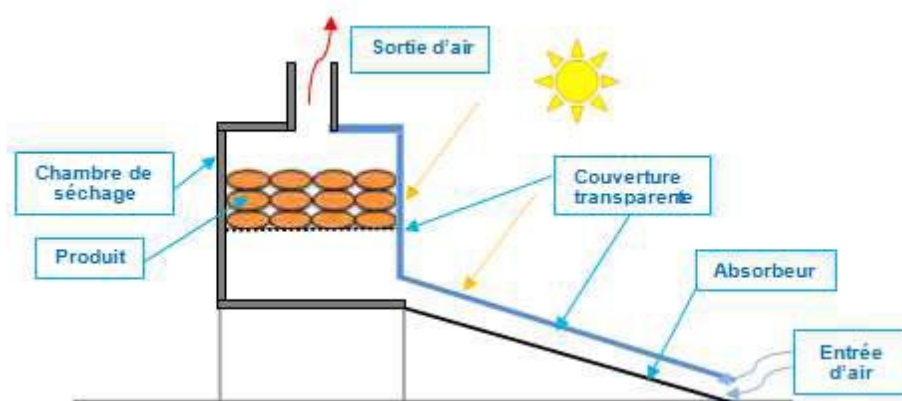


Figure I.20 : Schéma explicite d'un séchoir mixte [13].

### I.4.5 Les séchoirs hybrides

Ces séchoirs utilisent, en plus de l'énergie solaire, une énergie d'appoint (fuel, électricité, bois, etc.) pour assurer un niveau élevé de chauffage de l'air ou pour assurer la ventilation. L'énergie solaire sert souvent dans ce cas, de préchauffage de l'air. Ces systèmes, plus coûteux, sont généralement réservés à des applications à grande échelle, ou à des applications commerciales pour lesquelles la qualité et le débit du produit fini ne peuvent dépendre des conditions climatiques [14].

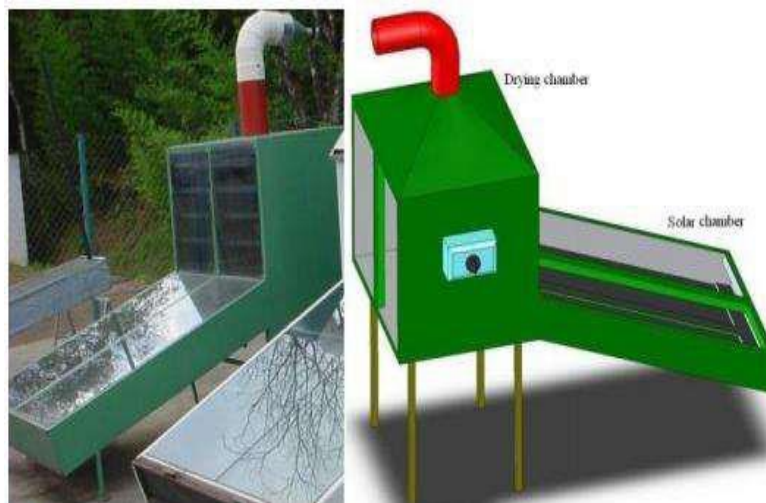


Figure I.21 : Schéma explicite du séchoir solaire hybride.

## I.5 Les avantages et les inconvénients du séchage solaire

-Avantages :

1. La simplicité de la méthode.
2. La durée de conservation des aliments séchés augmente de plusieurs mois.

## Chapitre I : le séchage solaire et ses applications

---

3. Désactiver les enzymes responsables de la détérioration des aliments.
4. Ce processus est respectueux de l'environnement.

### **-Inconvénients :**

1. Être exposé aux rayons ultraviolets qui peuvent endommager les aliments.
2. Perte de couleur et d'odeur des aliments.
3. Durée de séchage des produits alimentaires.
4. Fournir un rayonnement solaire permanent.

### **I.6 Conclusion**

Ce chapitre nous a permis de connaître les applications de l'énergie solaire thermique de façon générale et de comprendre en particulier le principe de fonctionnement des séchoirs solaires, d'avoir une idée générale sur l'évolution des méthodes de séchage solaire à travers les études précédentes et les différents types des séchoirs solaires avec leurs avantages et leurs inconvénients.

## **Chapitre II : Modélisation Mathématique**

### Introduction

Le présent chapitre consiste à présenter la configuration géométrique du problème étudié ainsi que les différents cas étudiés et les conditions aux limites qui seront également adoptées.

### II.1 La géométrie étudiée

Plusieurs techniques ont été appliquées pour le perfectionnement d'un système de séchage des produits agroalimentaires. Parmi ces techniques, l'amélioration des performances du système se fait au niveau du capteur solaire (poste avant du système). Notre objectif est donc d'utiliser l'une de ces techniques en se basant sur une étude numérique, menée sur un capteur solaire plan à air [15].

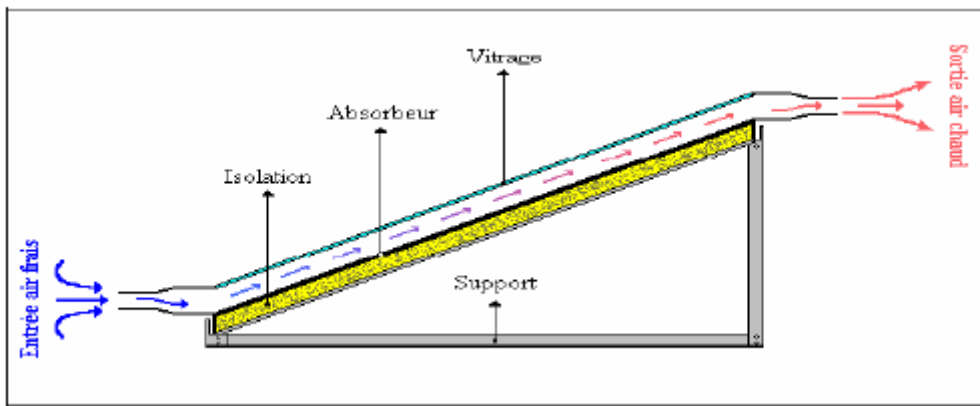


Figure II. 1 : Composants du capteur utilisé

Les dimensions des principaux composants du capteur sont

- La longueur  $L=1.5\text{m}$  et la largeur  $l=12\text{cm}$
- Une seule couverture transparente de verre d'épaisseur  $5\text{ mm}$
- La hauteur entre la couverture transparente et la plaque absorbante est égale à environ  $3\text{cm}$
- La veine d'air dynamique d'une hauteur de  $5\text{cm}$  est comprise entre la plaque absorbante (corps noir) et la plaque inférieure.
- L'isolation arrière est assurée grâce à une feuille de polystyrène de  $4\text{cm}$

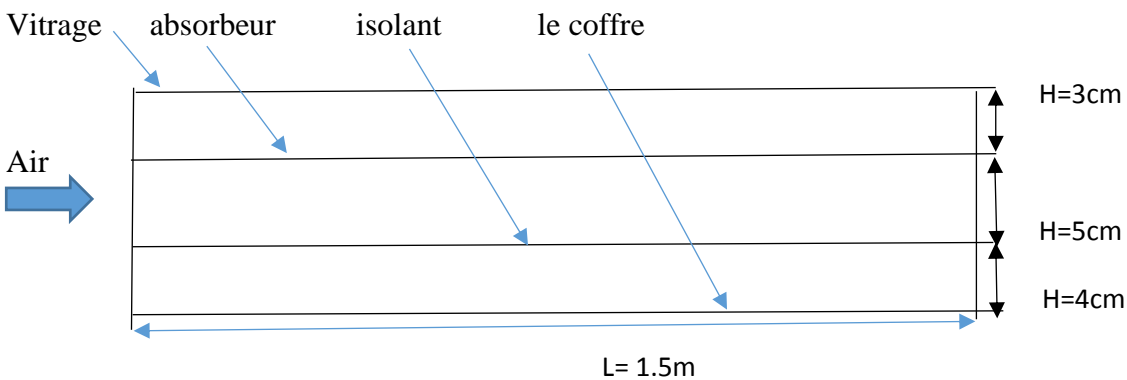


Figure II. 2 : Schéma descriptif des dimensions du collecteur thermique proposé (2D)

## Chapitre II : Modélisation Mathématique

Notre étude consiste à améliorer les performances thermiques et dynamiques du collecteur thermique. Pour cette étude, on a proposé d'analyser et d'étudier l'influence de différents cas d'emplacement d'obstacle placé soit « sur l'absorbeur » ou « sur l'isolant » dans la veine dynamique (Figure II.2)

### Le premier Cas

Pour ce cas, on a choisi de placer l'obstacle sur la plaque supérieure (l'absorbeur) de la veine d'air, deux hauteurs différentes ont été examinées (Figure II.2)

$$h_1 = 1\text{cm}$$

$$h_2 = 2\text{cm}$$

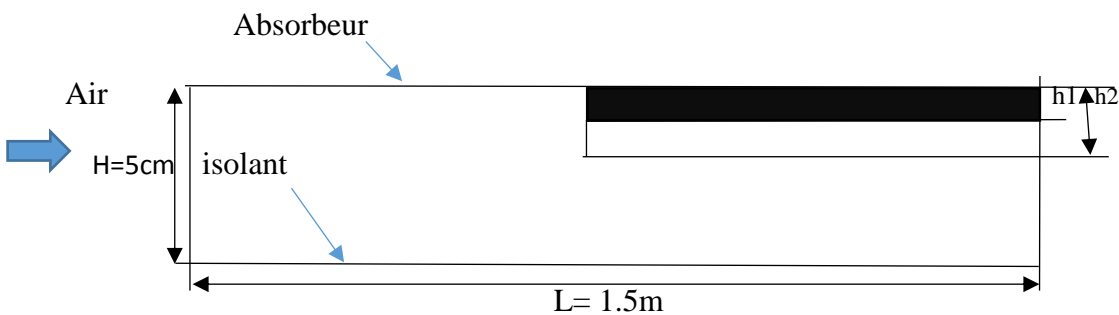


Figure II. 3 : Schéma descriptif de l'obstacle au niveau de l'absorbeur

### Le deuxième cas

Pour ce cas, on a choisi de placer l'obstacle sur la plaque inférieure (l'isolant) de la veine d'air, les mêmes deux hauteurs que la précédente ont été examinées (Figure II.3)

$$h_1 = 1\text{cm}$$

$$h_2 = 2\text{cm}$$

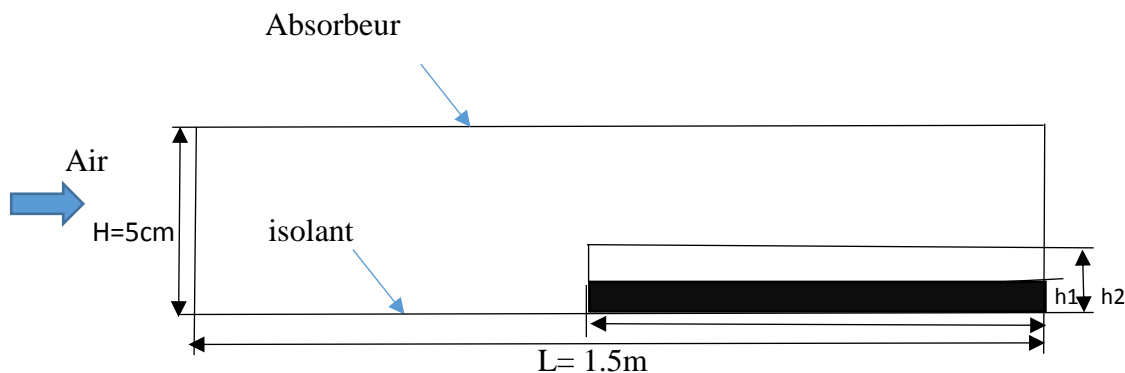


Figure II. 4 : Schéma descriptif de l'obstacle au niveau d'isolant

### II.2 Les équations de conservation

Avant de se consacrer à la simulation numérique d'un phénomène, il convient de se préoccuper des lois qui le régissent et aussi de préciser les modélisations physiques et numérique adoptées.

\* **Equation de conservation de la masse (Equation de continuité)** [16]

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau^*} + \text{div} \left( \rho \cdot \vec{V} \right) = 0 \quad (\text{II.1})$$

\* **Equation de la conservation de la quantité de mouvement**

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial \tau^*} + \vec{V} \cdot \text{grad} \cdot \vec{V} = \frac{-1}{\rho} \text{grad} p + \nu \cdot \Delta \vec{V} - \vec{g} \beta (T - T_\infty) \quad (\text{II.2})$$

\* **Equation de la conservation de l'énergie**

$$\rho \cdot C_p \left( \frac{\partial T}{\partial \tau^*} + \vec{V} \cdot \text{grad} T \right) = \beta \cdot t \left( \frac{\partial p}{\partial \tau^*} + \vec{V} \cdot \text{grad} p \right) + P_s + \varphi + \text{div} \left( k \cdot \text{grad} T \right) \quad (\text{II.3})$$

➔

### II.3 Les conditions aux limites

La résolution numérique du modèle mathématique adopté est conditionnée par les conditions initiales et les conditions aux limites appliquées aux frontières du domaine. Le fluide dans le séchoir solaire est initialement au repos et à une température uniforme égale à la température ambiante. Les différentes conditions aux limites dans la figure ci-dessous.

On présente les conditions aux limites introduites dans notre système :

**- A l'entrée**

Vitesse imposé  $U_{in}$

Température imposé  $T_{in}$

**-A la sortie**

Pression atmosphérique est imposée

**- A la paroi inferieure**

La condition d'adiabatique est appliquée

La condition de non glissement est applique



## Chapitre II : Modélisation Mathématique

---

### - A la paroi supérieure

La condition de non glissement est appliquée

Une température constante est imposée.

Émissivité externe constante de 0.93

### Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté la géométrie étudiée avec les conditions aux limites et les différents cas traités. Nous avons schématisé les différents constituants d'un capteur plan destiné au séchage ainsi que les équations mathématiques qui gouvernent les phénomènes physiques qui se manifestent dans ce type de séchage solaire.

**Chapitre III :**  
**Étude Numérique**

### Introduction

La simulation numérique en mécanique des fluides (CFD ; Computational Fluid Dynamics) est reconnue aujourd'hui comme l'un des outils incontournables de conception et est largement utilisée dans l'industrie. Le choix de l'utilisation de telle méthode numérique va dépendre essentiellement du type et de la complexité du problème à résoudre et la nature du fluide. Les logiciels de simulation numérique des écoulements, ou codes CFD, résolvent les équations régissant les mouvements d'un fluide dans un milieu donné. Ces équations traduisent la conservation de la masse et de la quantité de mouvement du fluide (équations de Navier-Stokes), ainsi que la conservation de l'énergie.

Dans ce chapitre on présente les équations qui gouvernent le phénomène physique, et ensuite la définition des logiciels **Gambit** et **Fluent**.

### III.1 Hypothèses simplificatrices

Avant de procéder à la solution itérative des équations différentiels aux dérivées partielles qui gouvernent l'écoulement, il est demandé d'imposer quelques hypothèses simplificatrices tel que:

- L'écoulement et le transfert de chaleur sont bidimensionnels.
- L'écoulement d'air est supposé stationnaire.
- Les propriétés physiques du fluide ( $C_p$ ,  $\mu$ ,  $\lambda_f$ ,  $\rho$ ) et du solide ( $\lambda_s$ ) sont constantes et évaluées à la température du fluide à l'entrée.
- L'air est considéré comme un fluide newtonien et incompressible.
- Les profils de vitesse et de température sont uniformes.

En tenant compte des hypothèses précédentes, les équations décrivant l'écoulement d'air avec transfert de chaleur à l'intérieur de la veine dynamique sont les équations de **Navier-Stokes** dans le cas laminaire. Ils sont réécrits sous la forme:

#### a. Equation de continuité

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{III. 4})$$

#### b. Equation de conservation de la quantité de mouvement suivant $-x$

$$\frac{\partial(u.u)}{\partial x} + \frac{\partial(u.v)}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu \cdot \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (\text{III.5})$$

### c. Equation de conservation de la quantité de mouvement suivant $-y$

$$\frac{\partial(u.v)}{\partial x} + \frac{\partial(v.v)}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( v \cdot \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v \cdot \frac{\partial v}{\partial y} \right) + g \cdot \beta \cdot (T - T_0) \quad (\text{III.6})$$

### d. Équation de conservation d'énergie

$$\rho \cdot C_p \left( \frac{\partial(u.T)}{\partial x} + \frac{\partial(v.T)}{\partial y} \right) = K \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right) \quad (\text{III.7})$$

## III.2 Présentation du gambit

GAMBIT est un logiciel qui permet de créer des maillages pouvant être utilisés en particulier sous FLUENT. Le meilleur est un prétraitement au logiciel de simulation. Il permet de générer un maillage structuré ou non structuré en coordonnées cartésiennes, polaires, cylindriques ou axisymétriques. Il peut réaliser des maillages complexes en deux ou trois dimensions avec des mailles de type rectangle ou triangle. [17]

Le logiciel Gambit regroupe trois fonctions :

- Définition de la géométrie du problème,
- Le maillage et sa vérification,
- La définition des frontières (des conditions aux limites) et définitions des domaines de calculs

### III.2.1. Construction d'un maillage

Pour construire un maillage, il est bon de suivre la démarche suivante:

- Définir la géométrie.
- Réaliser le maillage.
- Définir les paramètres des zones de calcul. [18]

La géométrie comprend les positions physiques de points caractéristiques définissent la zone que l'on a à mailler: coordonnées spatiales des quatre sommets d'un carré, du point de départ et du point d'arrivée d'une ligne; du centre et de l'ouverture angulaire d'un arc de cercle. Il faut pouvoir représenter la zone à étudier par un ensemble de figures géométriques simples raccordées les unes aux autres.

Pour des maillages structurés, on peut faire la liaison entre la géométrie et le maillage, Aussi, avant de réaliser le maillage, il faut spécifier par écrit d'une part la géométrie adoptée pour définir la zone à mailler, d'autre part les numéros des mailles correspondant aux points caractéristiques de la géométrie. Un nœud pourra alors être repéré par ces coordonnées physiques  $x$  et  $y$  ou indices  $I$  et  $J$ .

## Chapitre III : Étude Numérique

Par ailleurs, il peut être avantageux de définir des points intermédiaires qui ne sont pas indispensables à la définition de la géométrie mais qui permettent de délimiter les zones dans lesquelles les mailles seront adaptées pour raffiner le maillage près des parois par exemple ou bien pour épouser au mieux la forme des obstacles, parois ou autres...

### III.2.2 Notice d'utilisation de Gambit

Ce logiciel est utilisé pour définir et créer le modèle d'étude (surface ou volume) et de le mailler suivant le bon vouloir de l'utilisateur. Les différentes étapes d'utilisation de GAMBIT sont définies dans la notice suivante :

### III.2.3 Démarrage de Gambit

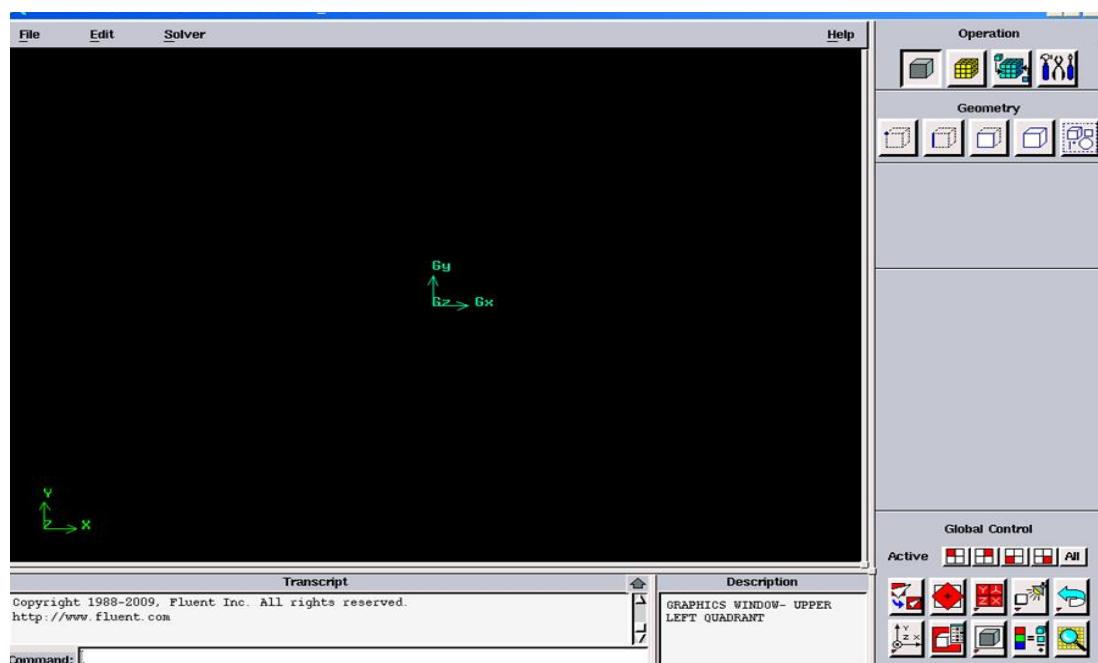
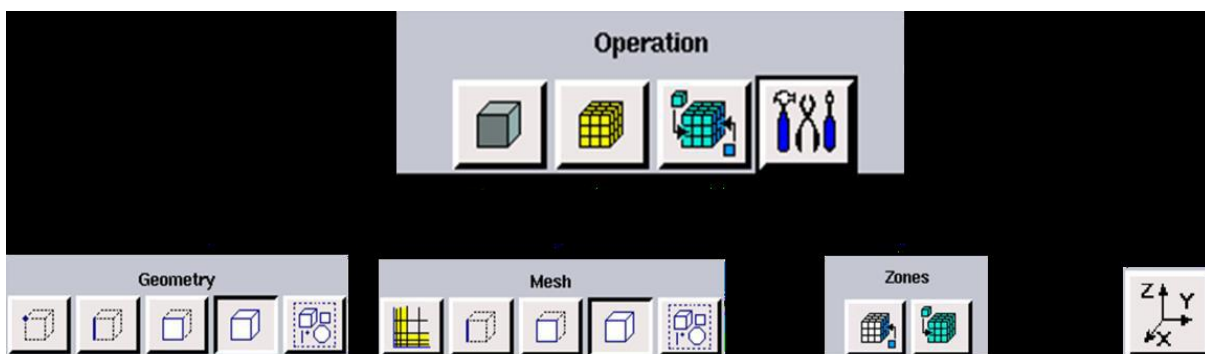


Figure III.1 : Lancement du Gambit





**Figure III.2 :** Menu principale de Gambit

### III.2.4 Maillage sous Gambit

La génération du maillage (2D ou 3D) est une phase très importante dans une analyse CFD, vu l'influence de ses paramètres sur la solution calculée. Ce menu permet de mailler en particulier une ligne de la géométrie, à savoir disposer les nœuds avec des conditions particulières (utilisation d'un ratio pour modifier la pondération du maillage, application de formes différentes de maillage). [19]

### III.2.5 Choix du type de maillage

#### III.2.5.1 Maillage structuré (quadra/hexa)

Il est beaucoup plus facile de le générer en utilisant une géométrie à multi bloc, il présente les Avantages suivants :

- Economique en nombre d'éléments, présente un nombre inférieur de maille par rapport à un Maillage non structuré équivalent [20].
- Réduit les risques d'erreurs numériques car l'écoulement est aligné avec le maillage.

Ses inconvénients :

- Difficile à le générer dans le cas d'une géométrie complexe
- Difficile d'obtenir une bonne qualité de maillage pour certaines géométries complexes

#### III.2.5.2 Maillage non structuré (tri/tétra)

Les éléments de ce type de maillage sont générés arbitrairement sans aucune contrainte quant à leur disposition.

\*Ses avantages :

- Peut être généré sur une géométrie complexe tout en gardant une bonne qualité des éléments.
- Les algorithmes de génération de ce type de maillage (tri/tétra) sont très automatisés.

\*Ses inconvénients :

- Très gourmand en nombre de mailles comparativement au maillage structuré
- Engendre des erreurs numériques (fausse diffusion) qui peuvent être plus importantes si l'on compare avec le maillage structuré

## Chapitre III : Étude Numérique

### III.2.5.3 Maillage hybride

Maillage généré par un mélange d'éléments de différents types, triangulaires ou quadrilatéraux en 2D, tétraédriques, prismatiques, ou pyramidaux en 3D.

Ses avantages :

- Combine entre les avantages du maillage structuré et ceux du maillage non structuré.

### III.2.6 Construction de la géométrie

La finalité de la construction de la géométrie est de définir les domaines de calcul qui seront des faces dans un problème 2D et des volumes dans un problème 3D.

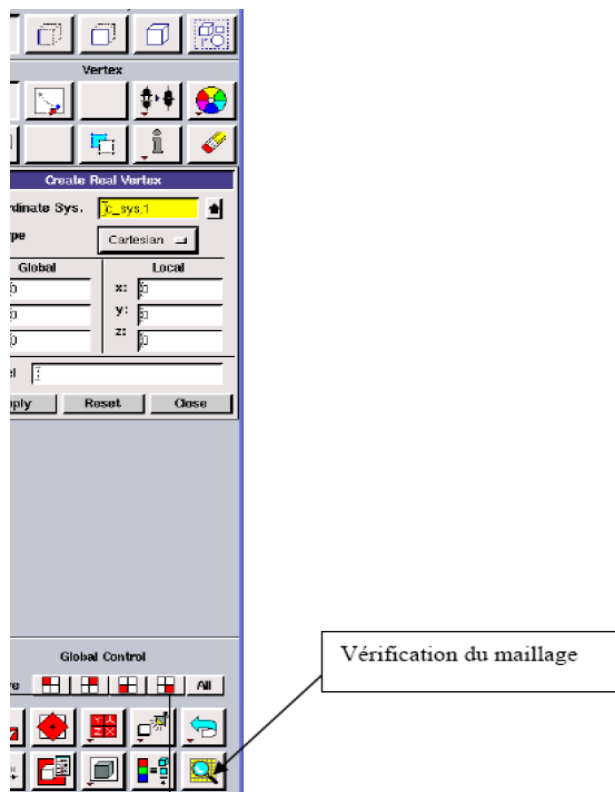


Figure III.3 : Les opérations pour construire une géométrie

### III.2.7 Techniques générales de génération du maillage

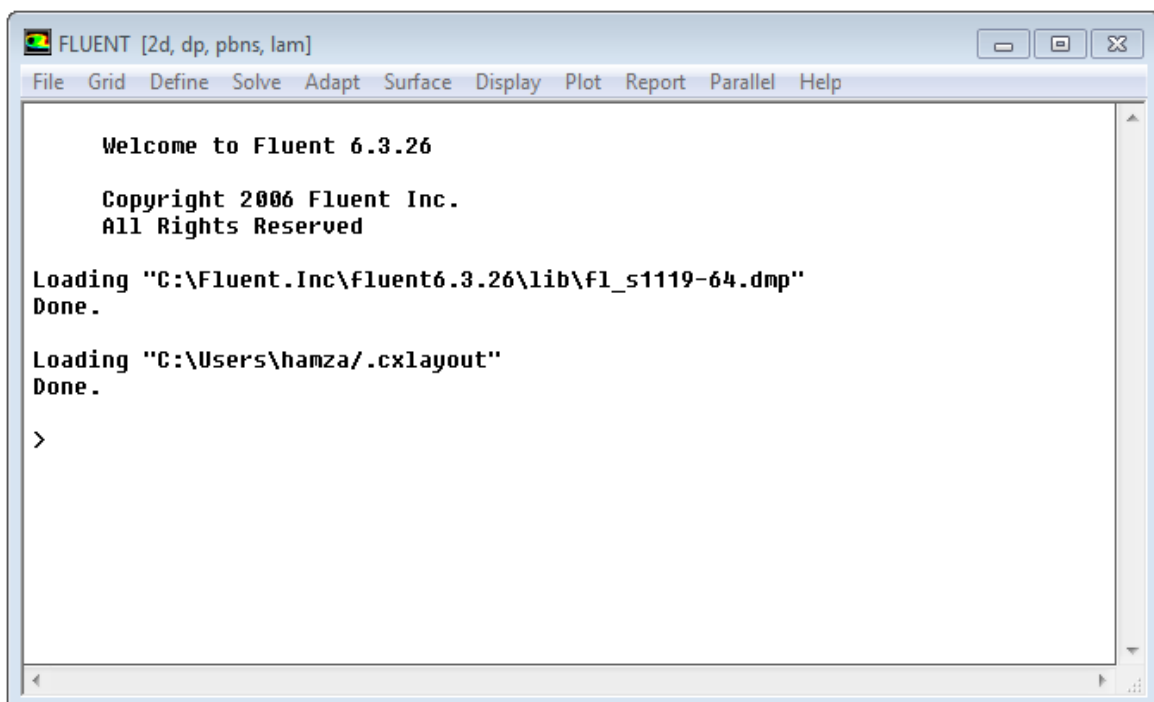
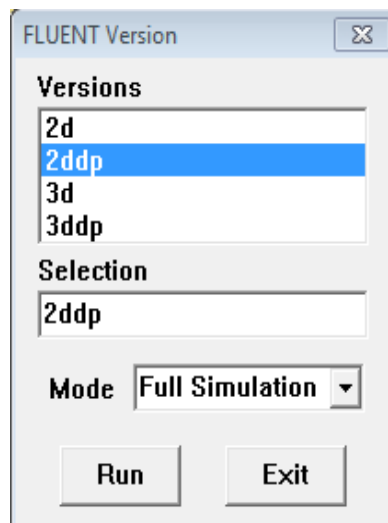
Pratiquement, il n'existe pas de règle précise pour la création d'un maillage valable, cependant il existe différentes approches qui permettent d'obtenir une grille acceptable. Nous pouvons résumer ces règles ainsi :

- Maintenir une bonne Qualité des éléments
- Assurer une bonne Résolution dans les régions à fort gradient
- Assurer un bon Lissage dans les zones de transition entre les parties à maillage fin et les parties à maillage grossier
- Minimiser le nombre total des éléments (temps de calcul raisonnable).

### III.3 Présentation du code Fluent

Fluent est un logiciel qui permet de résoudre et simuler des problèmes de mécanique des fluides et de transferts thermiques par la méthode des volumes finis. Fluent est un code de calcul pour modéliser les écoulements des fluides et les transferts thermiques dans des géométries complexes. Il peut résoudre des problèmes d'écoulement avec des mailles non structurées, qui peuvent être produites pour des géométries complexes, avec une relative facilité.

#### III.3.1 Démarrage de logiciel Fluent

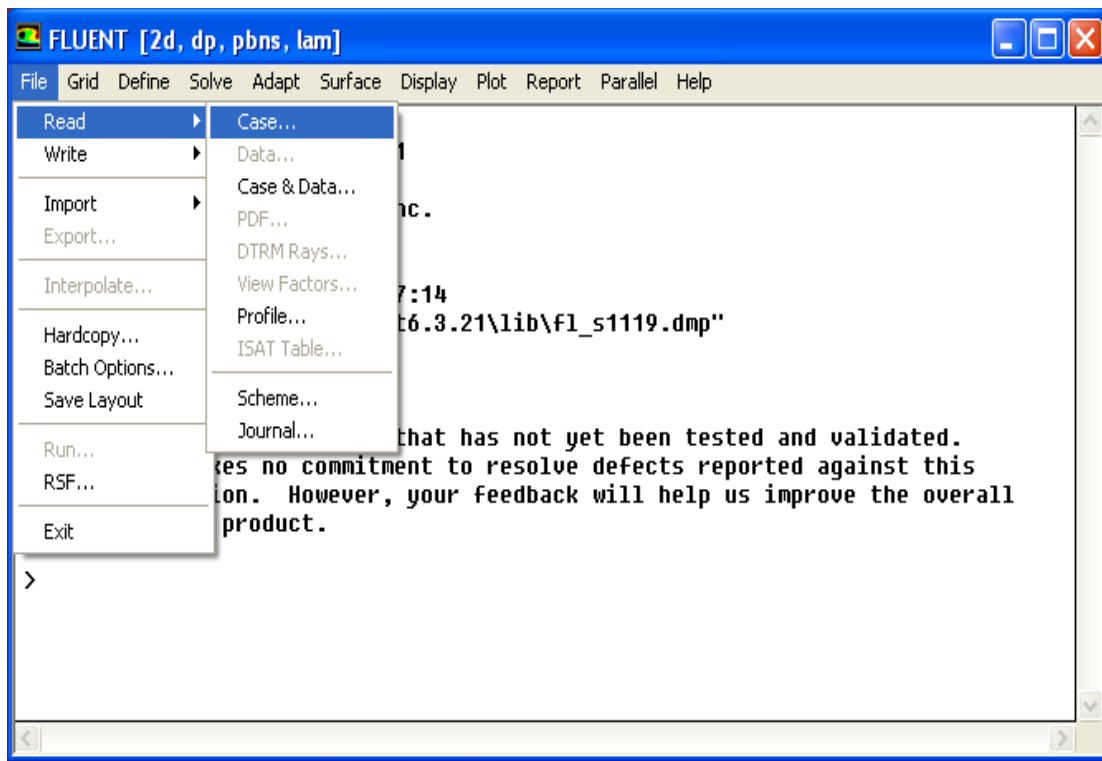


#### III.3.2 Importation de la géométrie

Pour commencer la simulation il faut importer le fichier (\*.msh) généré sous Gambit.

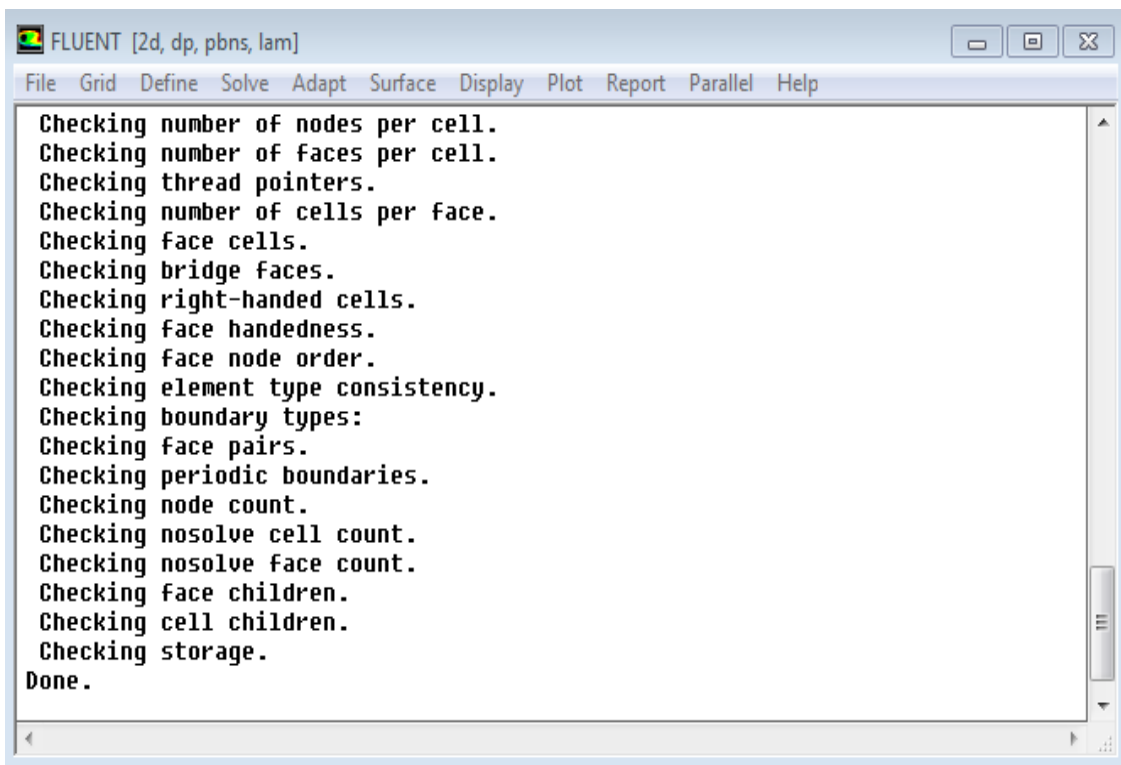


File → Read → Case...



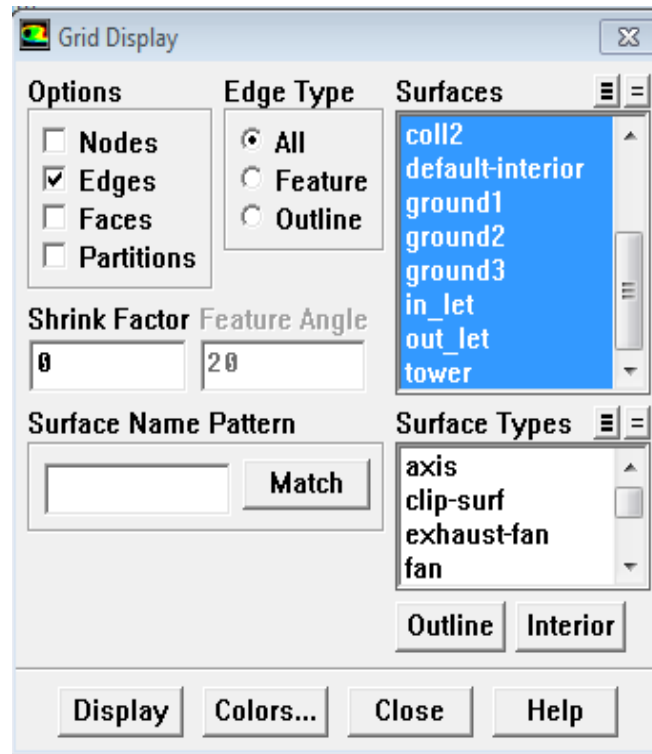
### III.3.3 Vérification du maillage importé

Grid → Check



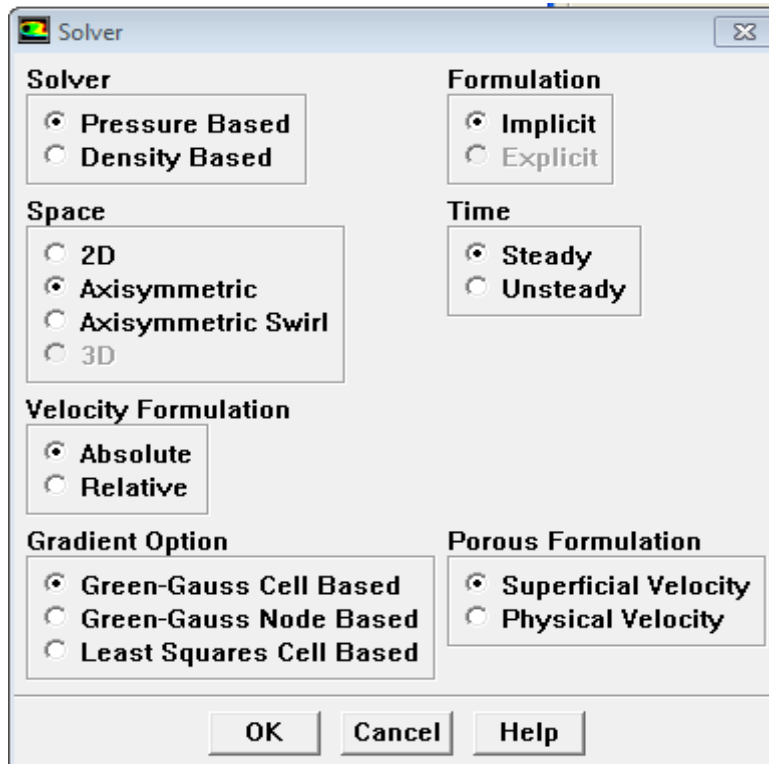
### III.3.4 Affichage de la grille

Display → Grid



### III.3.5 Choix du solveur

Define → Models → Solver

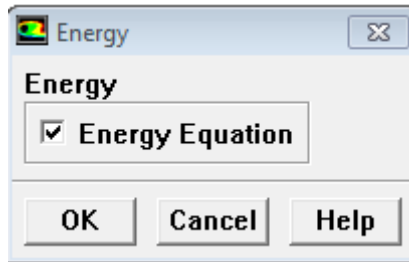


## Chapitre III : Étude Numérique

### III.3.6 choix du modèle de turbulence

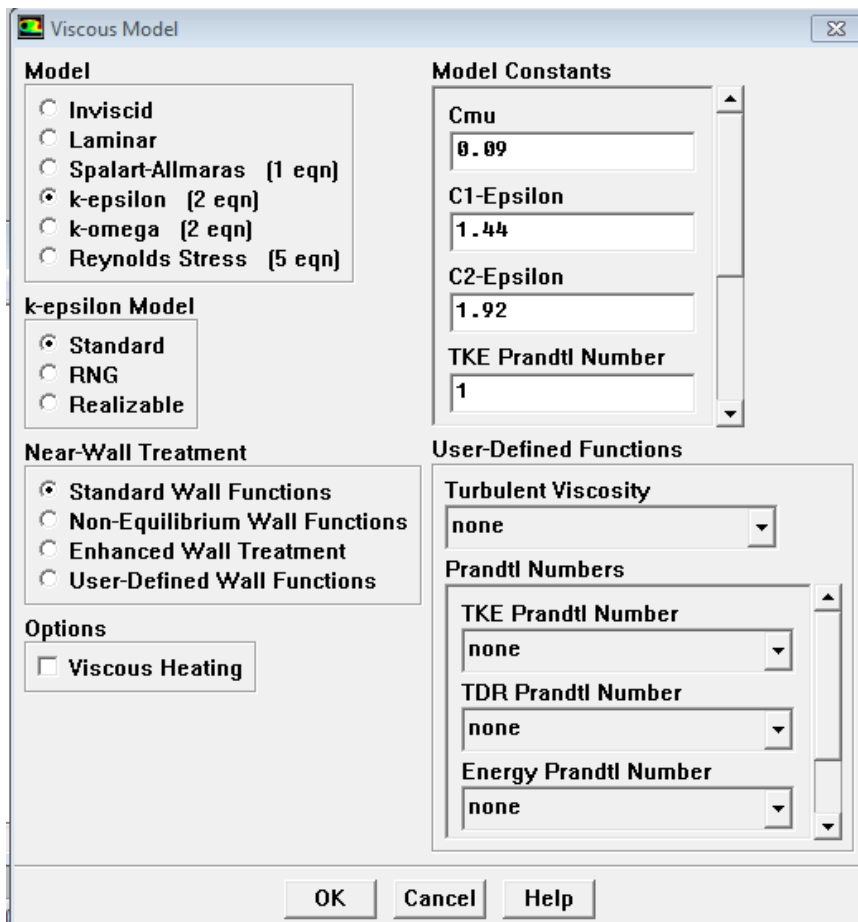
Define → Models → Energy

On introduit d'abord l'équation d'énergie dans le système des équations à résoudre.



Define → Models → Viscous

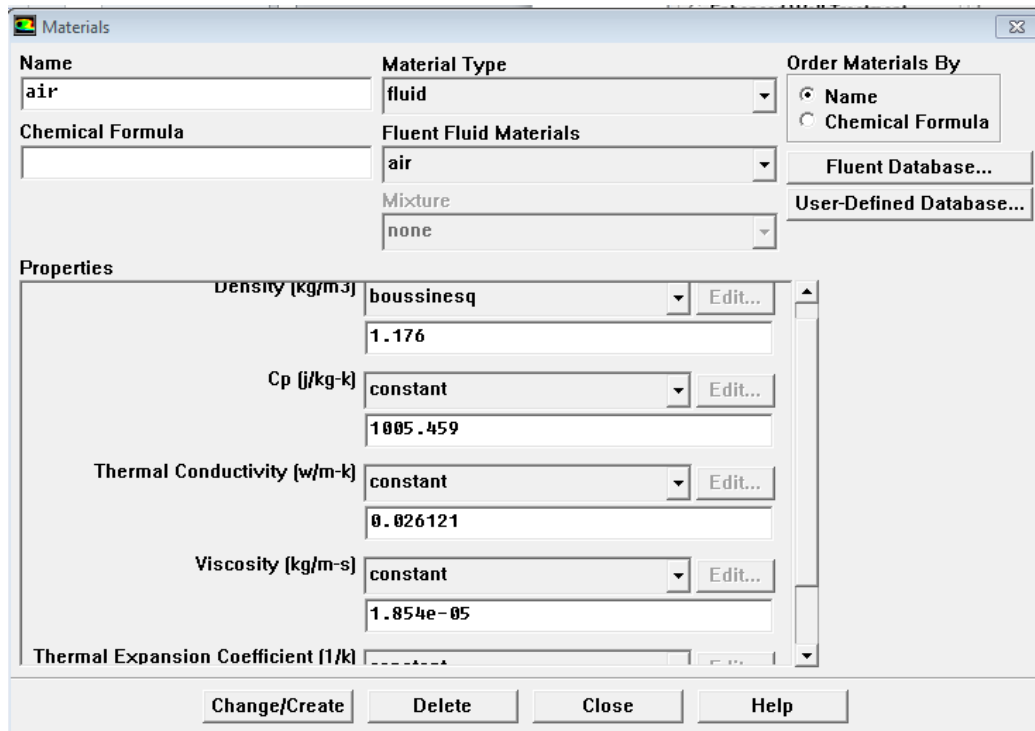
Cette étape va nous permettre de choisir le type du modèle de turbulence, pour résoudre le problème considéré, avec un affichage des différents constants.



### III.3.7 Définition des caractéristiques des matériaux

Define → Materials

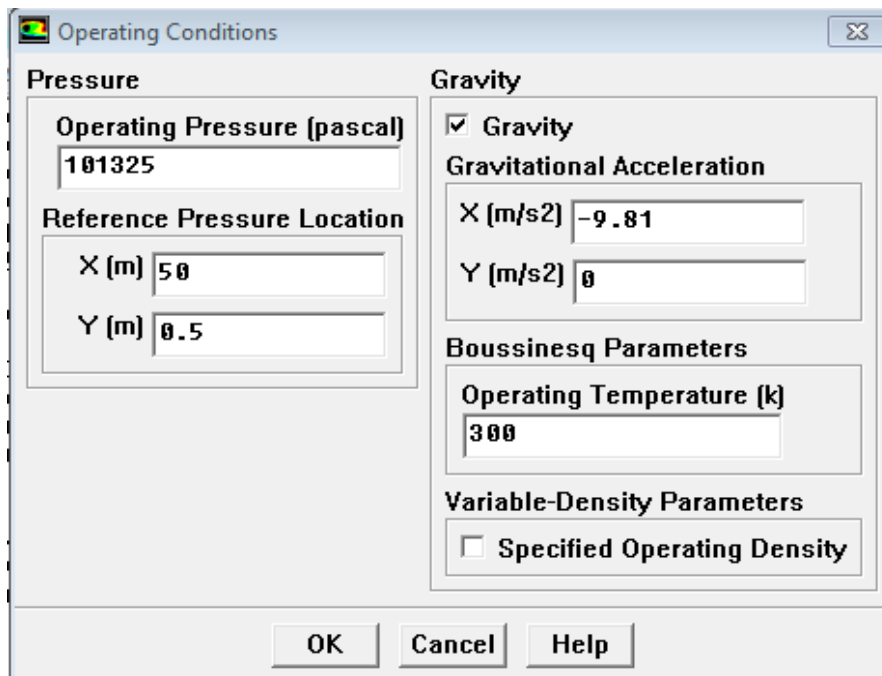
Cette tâche va nous permettre de choisir les propriétés du fluide utilisé.



### III.3.8 Conditions d'opération

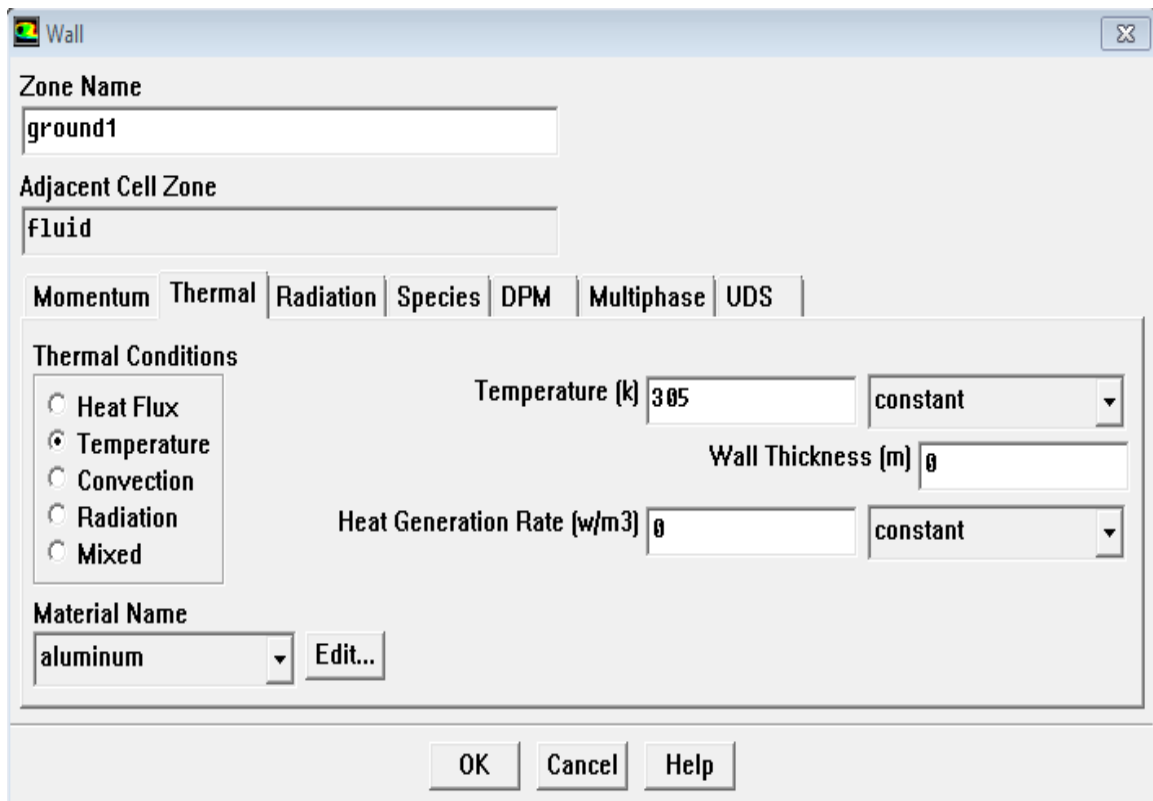
Define → Operating conditions

Il s'agit là de déterminer les conditions initiales



### III.3.9 Conditions aux limites

Define → Boundary Conditions



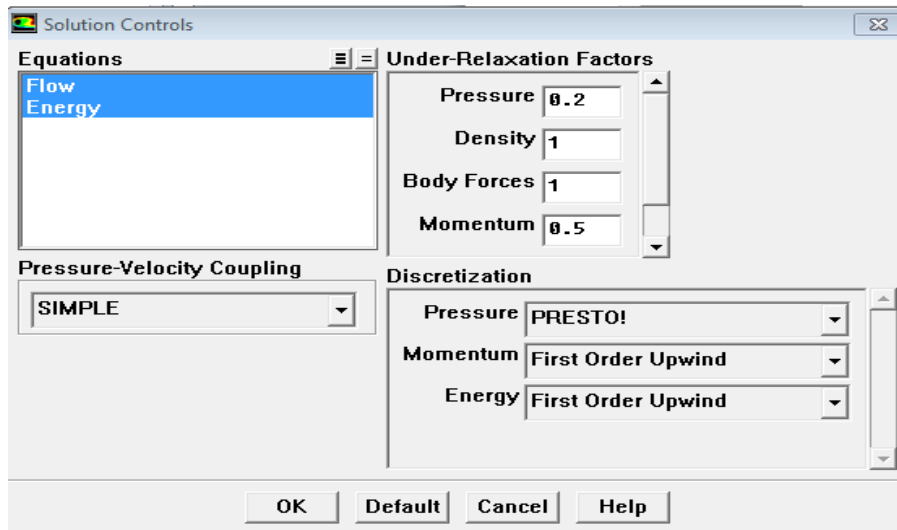
### III.3.10 Choix de solution

Solve → controls → solution

Il s'agit là de définir l'algorithme de résolution du système des équations, ainsi que les coefficients de sous-relaxation ou de sur-relaxation qu'il faut admettre pour chaque équation pour faire accélérer la convergence.

#### III.3.10.1 Sous-relaxation

A cause de la non linéarité des équations résolues, il est possible, pour atténuer les fluctuations de la solution, de réduire les variations des variables d'une itération à une autre en introduisant une sous-relaxation.



Il n'existe pas des règles générales concernant des meilleures valeurs des coefficients de sous-relaxation, mais il existe des recommandations pour chacune des grandeurs, généralement basé sur des connaissances empiriques.

### III.3.10.2 Choix de la méthode de couplage Pression-Vitesse

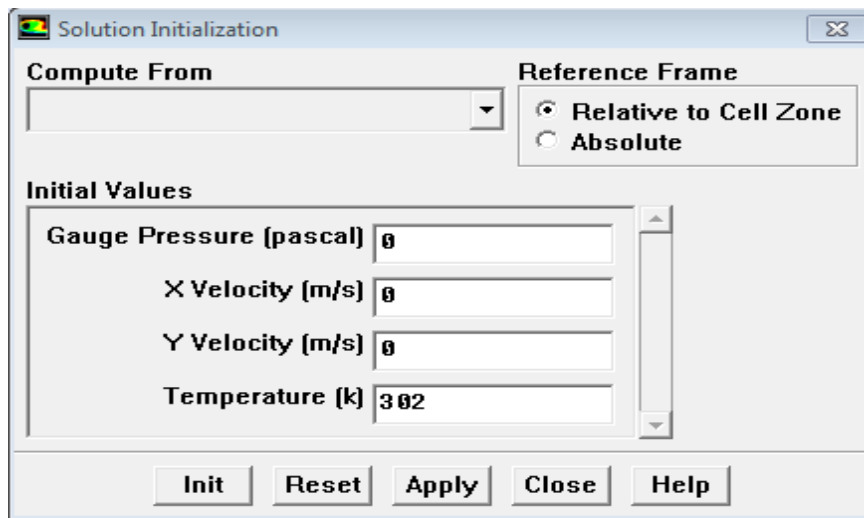
Trois algorithmes sont disponibles dans le logiciel de calcul [49] :

- SIMPLE : le plus robuste.
- SIMPLEC : il donne une convergence plus rapide pour les problèmes simples.
- PISO : il est utile pour des problèmes des écoulements instables.

L'algorithme choisit dans notre étude est l'algorithme SIMPLE. A l'initialisation du calcul, un champ de pression fixé a priori est introduit dans l'équation de bilan de la quantité de mouvement, permettant de calculer un premier champ de vitesse. La combinaison des équations de bilan de masse et de quantité de mouvement permet ensuite de corriger ces premiers champs de pression et de vitesse. Les autres équations de transports sont ensuite résolues et le champ de pression corrigé est utilisé pour initialiser le calcul à l'itération suivante. Cette succession d'opération est répétée jusqu'à ce que les critères de convergences soient atteints.

### III.3.11 Initialisation

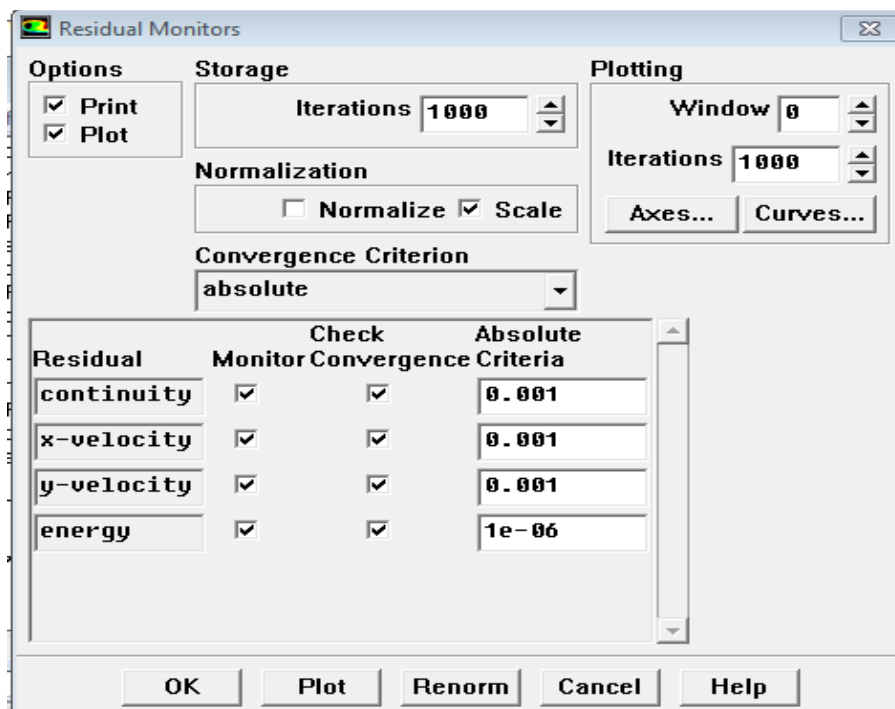
**Solve** → **Initialize** → **Initialize**



### III.3.12 La convergence

Solve → Monitors → Residual

Dans cette étape, on fixe les erreurs absolues pour chaque variable et on mentionne le nombre des itérations, avec la possibilité d'affichage simultané de l'évolution des erreurs ou de l'imprimer à la fin des itérations.



### III.3.12.1 Critère de convergence

La résolution numérique des problèmes de type CFD nécessite un processus itératif. Pour apprécier la convergence du processus itératif, des critères de convergence doivent être pris en compte. Ainsi, la convergence du processus itératif est déterminée par le concept de résidu.

Après l'étape de discrétisation, l'équation de conservation d'une variable  $\phi$  donnée sur une cellule de centre P peut s'exprimer comme suit :

$$a_p \cdot \phi_p = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (III.14)$$

Où :  $a_p$  et  $a_{nb}$  représentent les contributions convectives et diffusives, l'indice nb est lié aux centres de cellules adjacentes. b représente la contribution de partie constante du terme source  $\Phi \phi$ .

Le résidu normalisé a alors pour expression :

$$R^\phi = \frac{\sum_{\text{Domaine}} \left| \sum_{nb} a_{nb} \cdot \phi_{nb} + b - a_p \cdot \phi_p \right|}{\sum_{\text{Domaine}} |a_p \cdot \phi_p|} \quad (III.15)$$

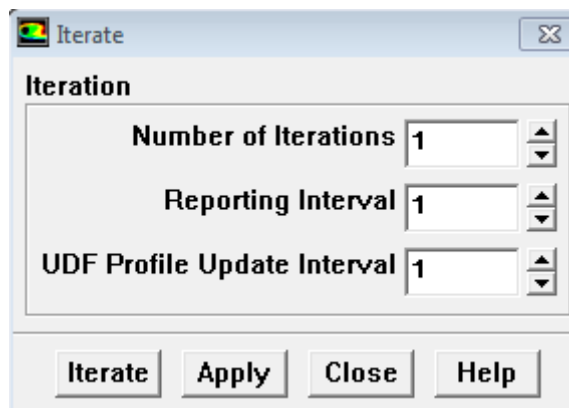
Ces expressions des résidus sont valables pour toutes les grandeurs sauf la pression, dans le cas de cette grandeur, le résidu est déterminé à partir de l'équation de continuité :

$$R^C = \sum_{\text{Domaine}} |\text{taux de création de matière dans le domaine}| \quad (III.16)$$

### III.13 Lancement du calcul

**Solve** → **Iterate**

On cliquant sur iterate , on commence les itérations, tout en respectant la séquence d'affichage .



L'algorithme ci-dessous représente les étapes de calcul.



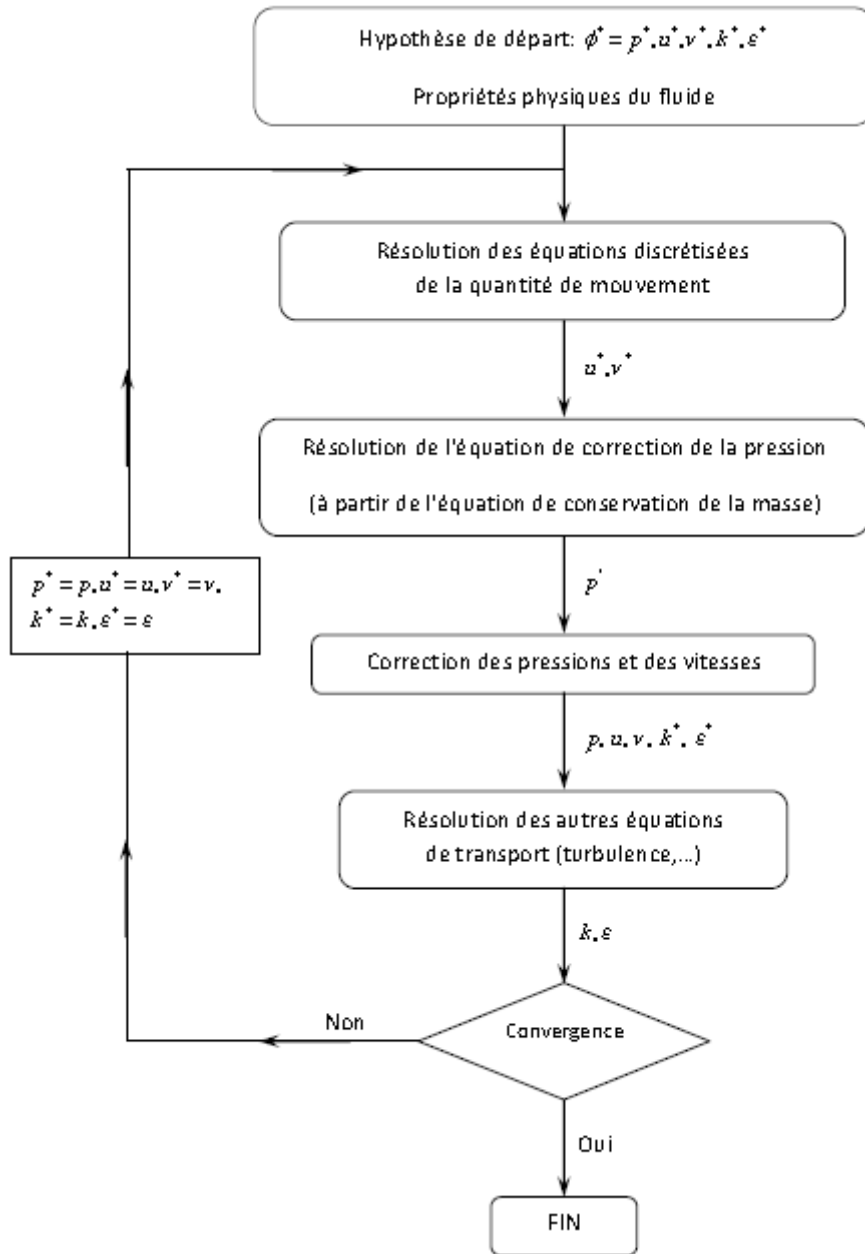


Figure III.4 : Schéma représentatif de l’algorithme SIMPLE

$u$  et  $v$  sont les deux composantes du vecteur vitesse,  $p$  représente la pression  $\phi^*$  est défini par :  $\phi = \phi^* + \phi'$  où  $\phi'$  est une correction.

**Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons parlé de la modélisation de l’écoulement laminaire dans l’espace compris entre l’absorbeur et l’isolant d’un capteur solaire plan en utilisant le code de calcul Fluent. Les équations régissant le phénomène physique sont les équations de Navier-stokes. Avant de passer à la résolution itérative des systèmes des équations, il faut générer la configuration à étudier et son maillage par le logiciel Gambit.

**Chapitre IV :**  
**Résultats et discussion**

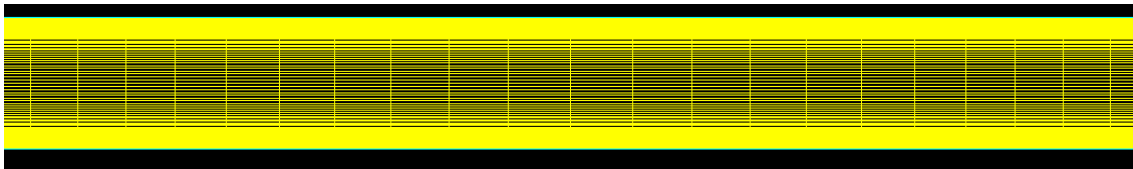
### Introduction

Dans ce chapitre, on va présenter les résultats d'une étude numérique du comportement dynamique et thermique d'un écoulement dans un collecteur thermique plan à air à simple passe.

Les simulations numériques faites par le code de calcul « Fluent » nous a permis d'obtenir l'évolution des températures et des vitesses pour toutes les géométries considérées. Plusieurs sections de l'obstacle ont été choisies (sur l'absorbeur ou sur l'isolant) pour faire une comparaison avec le cas simple. L'influence des trois hauteurs d'obstacles arbitrairement choisis sur les paramètres cités sera présentée aussi en détail dans ce chapitre.

#### IV.1 La géométrie étudiée sur Gambit

Pour capter le gradient de la vitesse et de la température près des parois, on a choisi le maillage non uniforme pour notre étude, la figure (IV.1)



**Figure IV.1** : le maillage non uniforme sur gambit

#### IV .2 Sensibilité de maillage

Pour mettre en exactitude les variations des gradients de température et de vitesse, on a utilisé un maillage non uniforme concentré au voisinage de l'absorbeur et de l'isolant. L'analyse de l'indépendance de maillage sur les résultats a été effectuée à l'aide d'une série des tests sur différentes grilles (M1.M2.M3) :

-**Le premier** maillage : il est caractérisé par un nombre des éléments de  $50 * 100$  soit 5000 éléments.

- **Le deuxième** maillage : il est caractérisé par un nombre des éléments de  $75 * 125$  soit 9375 éléments.

- le troisième maillage : il est caractérisé par un nombre des éléments de  $100 * 150$  soit 15000 éléments.

Les résultats obtenus pour la composante axiale de la vitesse maximale ainsi que la température à la sortie du collecteur sont présentés sur le tableau suivant :

## Chapitre IV : Résultats et discussion

Nombre des éléments de maillage	M1	M2	M3
	50*100	75*125	100*150
T max(K)	314.9939	315.0436	315.0719
U max(m/s)	1.282984	1.284663	1.285637
V max(m/s)	0.05834961	0.0647027	0.07007096

**Tableau IV. 1** : Sensibilité du maillage sur la température et la vitesse

1) Les erreurs relatives entre le maillage (M1) et (M2).

$$\text{Err01} = \begin{cases} T = 0.02\% \\ U = 0.21\% \\ V = 9.81\% \end{cases}$$

2) Les erreurs relatives entre le maillage (M2) et (M3).

$$\text{Err02} = \begin{cases} T = 0.008\% \\ U = 0.07\% \\ V = 7.66\% \end{cases}$$

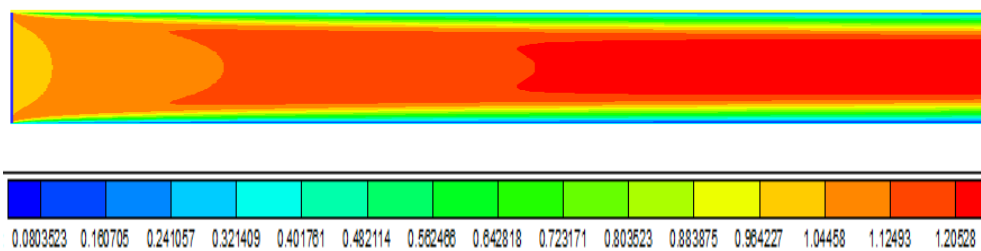
D'après les tests effectués, on a adopté la grille du maillage  $100 \times 150$  (15000 éléments) pour le reste de nos calculs. Ce maillage permet d'obtenir des solutions avec une erreur raisonnable.

### IV.3 Comportement dynamique et thermique d'un écoulement d'air avec et sans obstacle à différentes hauteurs et d'emplacements

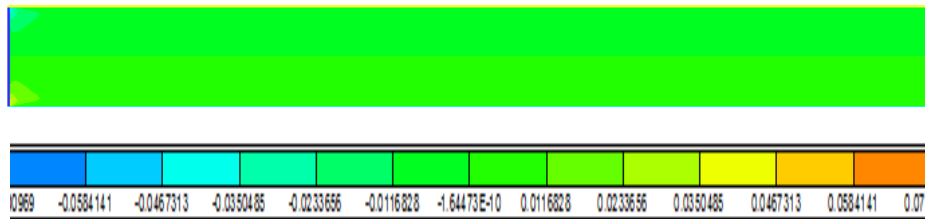
#### IV.3.1 Contour de la vitesse et de la température

Après exécution du code de calcul sous Fluent, la convergence est atteinte lorsque les erreurs atteignent la valeur souhaitée. Tous les contours des différentes variables sont tracés par le programme **Tecplot**. Pour des raisons de clarté des légendes des figures présentées ci-dessous, on va se limiter seulement à 16 niveaux.

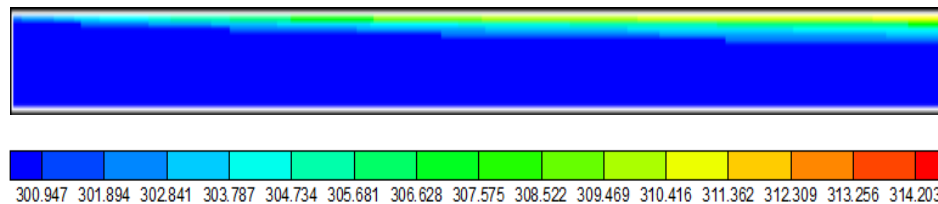
##### IV.3.1.1 cas simple sans obstacle



**Figure IV.2** : Contours de la vitesse horizontale pour le cas simple



**Figure IV.3 :** Contours de la vitesse horizontale pour le cas simple



**Figure IV.4 :** Contour de la température pour le cas simple

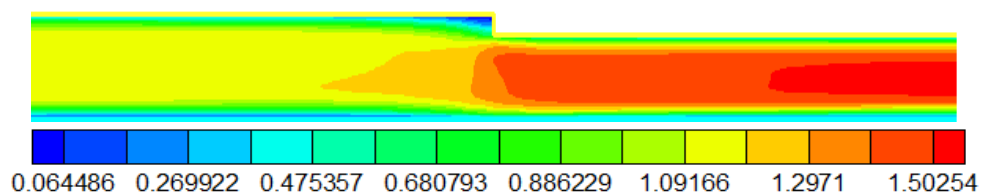
On remarque le profil parabolique de la vitesse horizontale dans les contours. On remarque aussi que la vitesse horizontale est prépondérante par rapport à la vitesse verticale vu le sens de l'écoulement. Les contours de la température montrent que les températures les plus élevées se localisent dans la partie supérieure du système à cause de la condition imposée de la température.

### IV.3.1.2 Avec obstacles au niveau de l'absorbeur

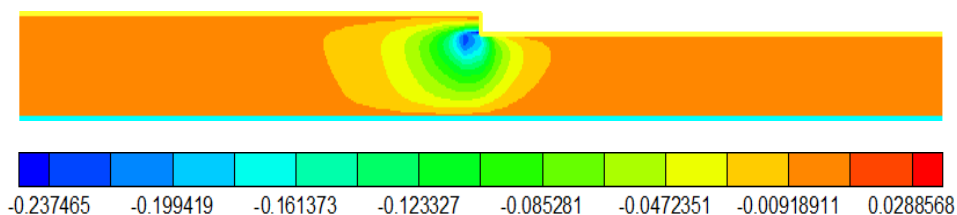
La configuration utilisée ainsi que les conditions aux limites sont les mêmes que ceux appliqués pour le cas simple sans obstacles.

#### -Cas avec $h=1\text{cm}$

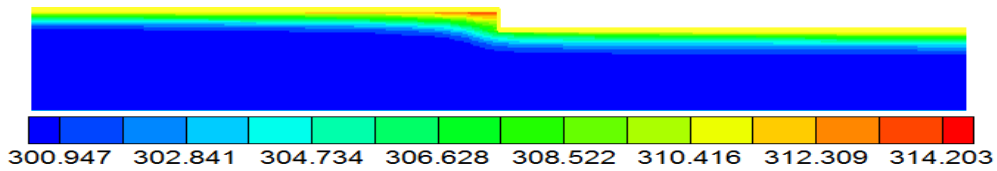
Les contours de la vitesse horizontale, la vitesse verticale et la température sont respectivement présentés sur les figures suivantes :



**Figure IV.5 :** Contour de la vitesse horizontale



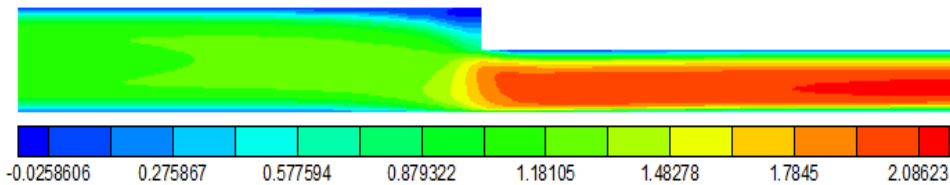
**Figure IV.6 :** Contour de la vitesse verticale



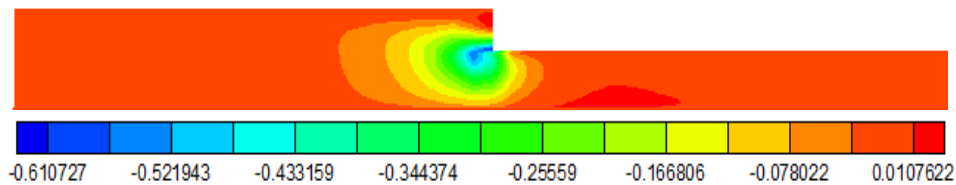
**Figure IV.7 :** Contour de la température

On remarque que les vitesses les plus élevées sont signalées après l'obstacle. On constate des valeurs négatives de la vitesse verticale, et cela est dû à l'effet de l'obstacle sur les particules d'air qui l'obligent à redescendre. On remarque aussi que les températures les plus élevées sont concentrées dans la partie supérieure près de l'absorbeur.

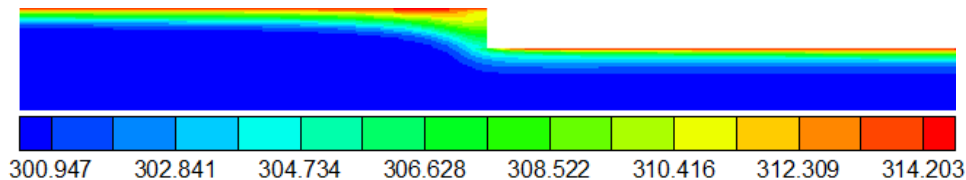
**-Cas avec  $h=2\text{cm}$**



**Figure IV.8 :** Contours de la vitesse horizontale



**Figure IV.9 :** Contours de la vitesse verticale



**Figure IV.10 :** Contours de la température

Même remarques ont été signalé comme le cas précédent mais avec des valeurs plus élevées que soit pour la température ou pour les vitesses. Cela est dû au rétrécissement de la section de passage d'air (principe de conservation de la masse).

## Chapitre IV : Résultats et discussion

### IV.3.1.3 Avec obstacles au niveau de l'isolant

L'obstacle est placé à mi-distance entre l'entrée et la sortie. Les contours de la vitesse horizontale, la vitesse verticale et la température sont respectivement présentés sur les figures suivantes :

#### -Cas avec $h=1\text{cm}$

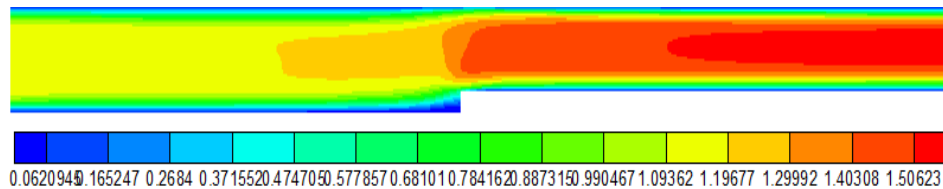


Figure IV.11 : Contours de la vitesse horizontale

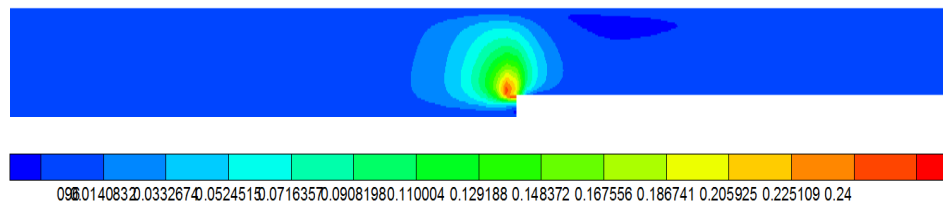


Figure IV.12 : Contours de la vitesse verticale

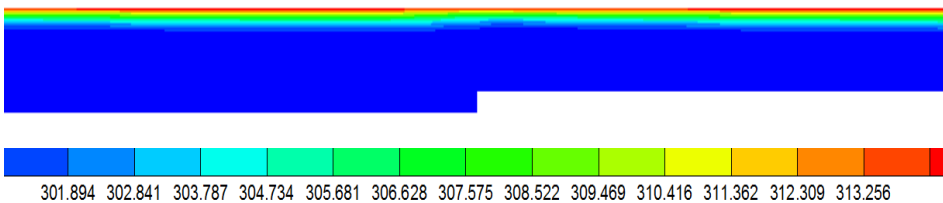
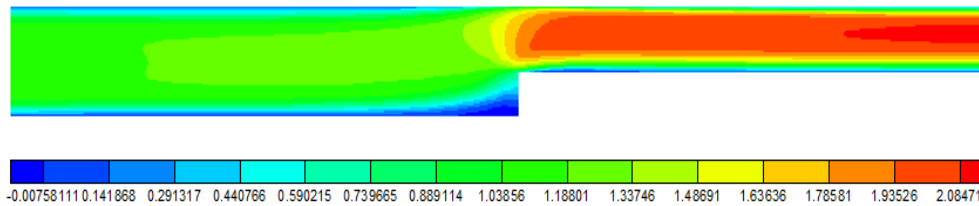


Figure IV.13 : Contours de la température

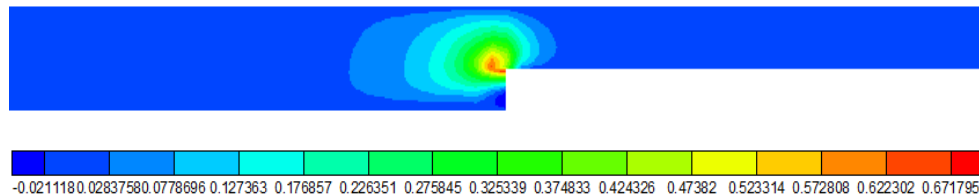
D'après les contours de la vitesse horizontale, on remarque que la vitesse perd son profil parabolique en allant vers l'aval de la veine dynamique. Les mêmes remarques ont été signalées pour les contours de la température comme pour les cas précédents, mais avec homogénéisation dans la température près de l'absorbeur.

#### -Cas avec $h=2\text{cm}$

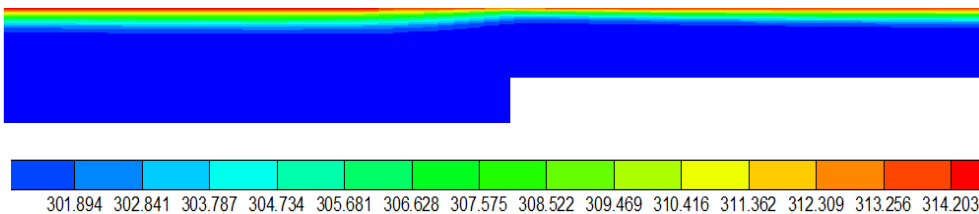
Les contours sont respectivement présentés sur les figures ci-dessous :



**Figure IV.14 :** Contours de la vitesse horizontale



**Figure IV.15 :** Contours de la vitesse verticale



**Figure IV.16 :** Contours de la température

On remarque que les vitesses horizontales de fluide en aval de la conduite sont plus élevées par rapport à celles en amont. Sur la partie en aval de l'obstacle, on remarque que la vitesse prend des valeurs maximales au centre de la conduite et s'accélère de plus en plus en augmentant la hauteur de l'obstacle, cette accélération d'écoulement d'air est justifiée par le principe de la conservation de la masse (diminuer la section = augmenter la vitesse). Il est à noter aussi que les vitesses deviennent nulle aux voisinages des deux parois et cela à cause des frottements.

### IV.3.2 Profils de la vitesse

Les profils de la vitesse d'écoulement d'air sont présentés pour plusieurs sections dans la veine dynamique du capteur. Les différentes sections arbitrairement choisies sont :

- 1<sup>ère</sup> section :  $L/3=50\text{cm}$ ,
- 2<sup>ème</sup> section :  $L/2=75\text{cm}$
- 3<sup>ème</sup> section  $2L/3=100\text{m}$ .

#### IV.3.2.1 Avec obstacle au niveau de l'absorbeur

Les figures ci-dessous montrent les profils de la vitesse en fonction de la position (m), pour le cas avec obstacle  $h=1\text{cm}$  et  $h=2\text{cm}$  sur l'absorbeur.



-Pour  $h=1\text{cm}$

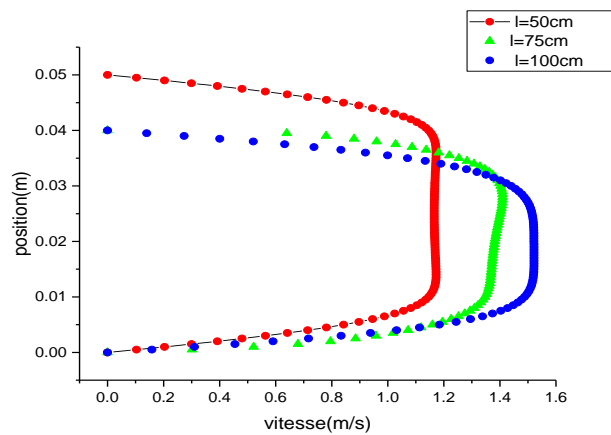


Figure IV.17 : Profils de vitesse pour différentes sections pour  $h=1\text{cm}$

-Pour  $h=2\text{cm}$

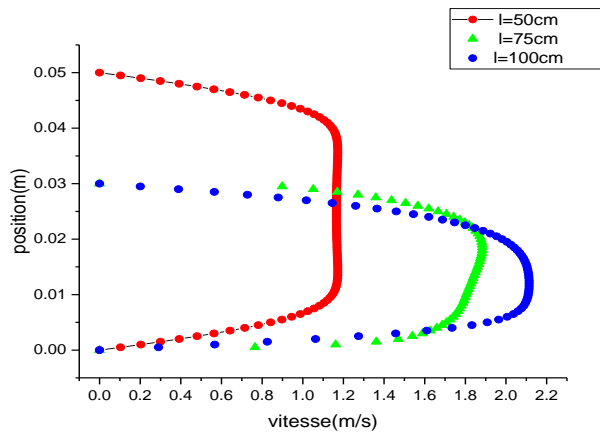


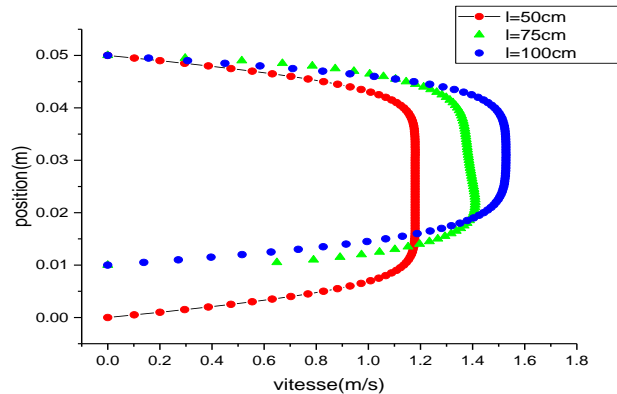
Figure IV.18 : Profils de vitesse pour différentes sections pour  $h=2\text{cm}$

On remarque que les vitesses les plus élevées sont localisées en aval du collecteur pour les deux hauteurs des obstacles. On remarque aussi que la vitesse perd son aspect parabolique au milieu du collecteur à cause de l'emplacement des obstacles.

### IV.3.2.2 Avec obstacle au niveau de l'isolant

Les figures ci-dessous présentent les profils de vitesses en fonction de la position(m), pour le cas avec obstacle  $h=1\text{cm}$  et  $h=2\text{cm}$  sur l'isolant pour des différentes sections choisies.

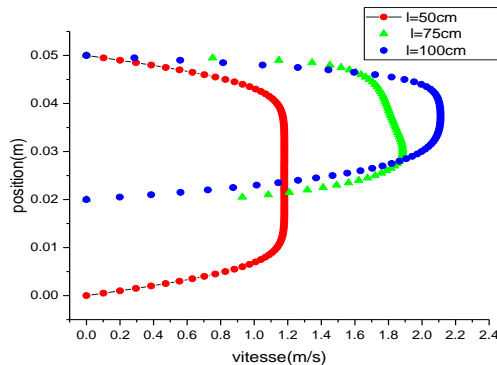
-Pour  $h=1\text{cm}$



**Figure IV.19 :** Profils de vitesse pour différentes sections pour  $h=1\text{cm}$

On remarque que le profil perd son aspect parabolique en allant vers l'amont du collecteur. On remarque aussi que le maximum de la vitesse est signalé dans la partie supérieure de la veine dynamique près de la sortie du collecteur, suite à l'effet de la température qui crée une stratification du fluide qui pousse l'air chaud vers le haut.

Pour  $h=2\text{cm}$



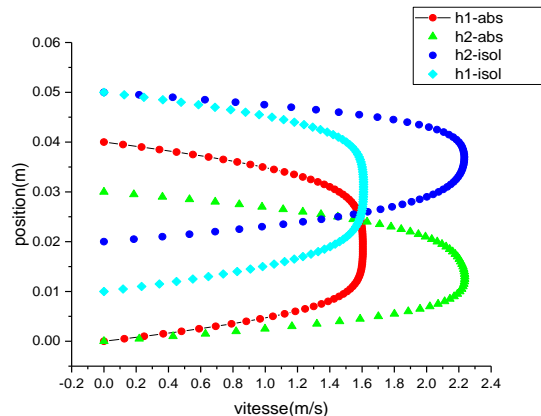
**Figure IV.20 :** Profil de vitesse à plusieurs sections pour  $h=2\text{cm}$

On remarque une petite déformation des profils par rapport au FigIV.17, cependant on signale un maximum de vitesse plus élevé que pour le cas précédent pour toutes les sections choisies. Cela est dû à l'augmentation d'hauteur de l'obstacle.

## Chapitre IV : Résultats et discussion

### IV.3.3 Comparaissant entre la vitesse de fluide dans le cas avec obstacle au niveau l'absorbeur et l'isolant

Pour voir l'effet d'emplacement des obstacles sur la vitesse, on trace les profils de la vitesse dans la même figure pour une section donnée. On remarque que pour la même hauteur, les vitesses sont presque symétriques par rapport à l'axe ( $y=2.5$  cm) qui représente la mi-hauteur du collecteur.



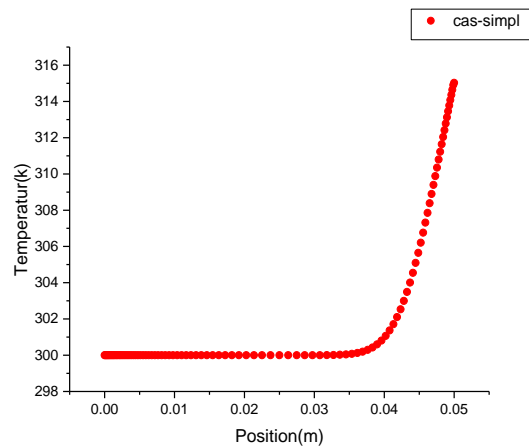
**Figure IV.21 :** Les profils de vitesse pour la section  $2L/3$

D'après la figure ci-dessus, on voit que pour la section donnée, la vitesse atteint son maximum toujours pour les cas avec un obstacle de 2cm, que soit l'obstacle est placé à l'absorbeur ou sur l'isolant. On remarque aussi que l'axe  $y=2.5$  cm, représente un axe de symétrie par rapport aux profils de vitesse pour la même hauteur d'obstacle.

### IV.3.4 Profils de température

Pour voir l'évolution de la température dans le collecteur, les profils de température sont présentés en fonction de la position verticale (m), pour le cas avec obstacle sur l'absorbeur et sur l'isolant. Pour chaque hauteur choisie des obstacles ( $h=1$ cm et  $h=2$ cm), nous avons tracé les profils pour trois différentes section ( $L/3$  et  $L/2$  et  $2L/3$ ). Ces trois sections sont choisies arbitrairement.

### IV.3.4.1 cas sans obstacle

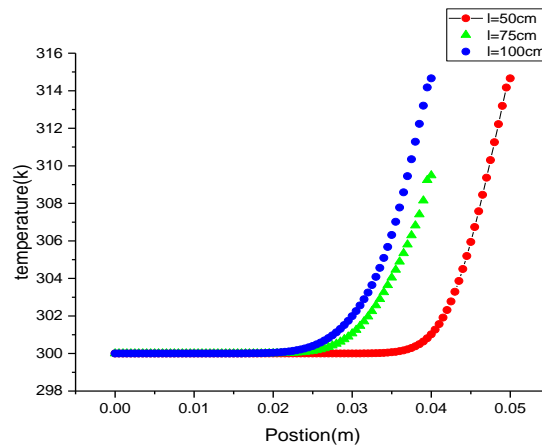


**Figure IV.22 :** L Profil de température pour le cas simple

On remarque que la température garde sa valeur de référence jusqu'au  $y=0.04\text{m}$  où il commence à augmenter de manière presque linéaire jusqu'à atteindre la température imposée à l'absorbeur.

### IV 3.4.2 : Cas avec obstacle au niveau de l'absorbeur

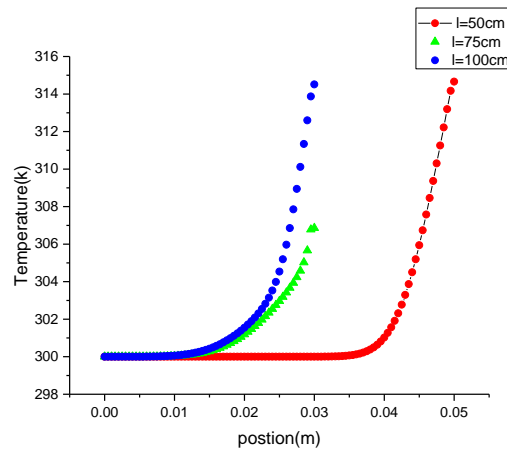
-Pour  $h=1\text{cm}$



**Figure IV.23 :** Profils de la température en fonction de position pour  $h=1\text{cm}$

Pour ce cas, on remarque le même aspect qualitatif que pour le cas simple sans obstacle. Cependant la distance à partir de laquelle la température commence à augmenter est changée. Pour  $L=50\text{ cm}$  et  $L=75\text{ cm}$ , elle est au voisinage  $y=0.025\text{ cm}$ , mais pour  $L=75\text{ cm}$ , elle au voisinage de  $y=0.038\text{ cm}$ .

-pour  $h=2\text{cm}$



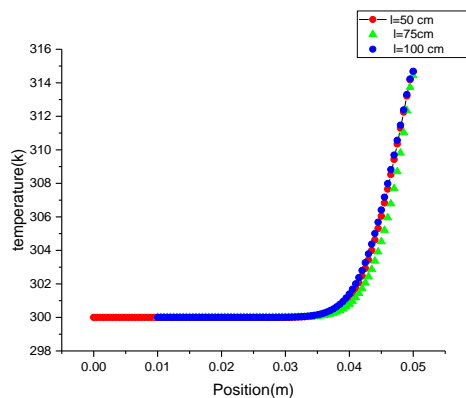
**Figure IV.24 :** Profils de la température en fonction de position pour  $h=2\text{ cm}$ .

Les mêmes remarques ont été signalé pour ce cas, mais avec un déplacement en bas du collecteur du point où la température commence à augmenter pour  $L=50\text{cm}$  et  $L=75\text{ cm}$ . Pour  $L=100\text{ cm}$ , le profil est semblable à celui trouvé pour  $h=1\text{cm}$ .

### IV 3.4.3 cas avec obstacle au niveau de l'isolant

Pour les mêmes sections choisies précédemment, les profils de températures sont présentés ci-dessous.

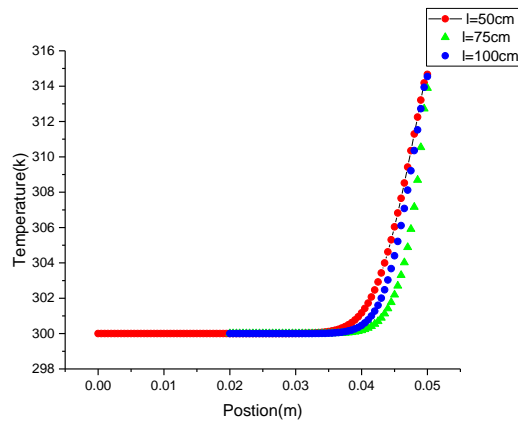
- Pour  $h=1\text{cm}$



**Figure IV.25 :** Profils de température en fonction de position pour  $h=1\text{cm}$

Les profils sont presque indiscernables montrant le même aspect qualitatif que soit pour  $L=50\text{ cm}$ ,  $L=75\text{ cm}$  ou  $L=100\text{ cm}$ .

-pour  $h=2\text{cm}$

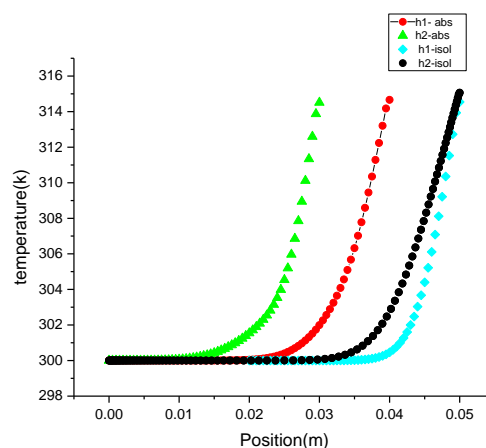


**Figure IV.26 :** Profils de température en fonction de position pour  $h=2\text{cm}$

Le même aspect qualitatif est observé que pour le cas avec  $h=1\text{cm}$ , mais les profils commencent à se séparer à partir de  $y=0.04\text{ m}$ .

### IV.4.3 Comparaissant entre la température de fluide dans le cas avec obstacle au niveau de l'absorbeur et au niveau de l'isolant

Pour une section donnée ( $L=100\text{ cm}$ ), nous avons fait une comparaison entre les différents profils de température. On remarque que lorsque l'obstacle est placé au niveau de l'absorbeur, la température pour cette section évolue plus rapidement que pour le cas où l'obstacle est placé au niveau de l'isolant. On remarque aussi que soit l'obstacle est placé au niveau de l'isolant ou de l'absorbeur, la hauteur  $h=2\text{cm}$  donne les meilleur résultats.



**Figure IV.27 :** Les profils de température pour la section  $2L/3$

### Conclusion

Les résultats numériques obtenus ont montré que :

- L'introduction des épaulements que soit au niveau de l'absorbeur ou de l'isolant a augmentée considérablement la vitesse et la température à l'intérieur de la veine dynamique du capteur. Par rapport au cas simple, nous avons inscrit une nette augmentation par rapport à la vitesse et par rapport à la température.
- On obtient les mêmes résultats lorsqu'on met les épaulements sur l'absorbeur ou sur l'isolant.
- La distance à partir de laquelle on place les épaulements influe également sur le champ de vitesse et de température.
- L'utilisation des obstacles de 2cm de hauteur offre des meilleurs résultats par rapport aux obstacles de 1cm.

### Conclusion générale

Dans le présent travail, on s'intéresse à l'étude numérique d'un capteur solaire plan destiné au séchage. Le but était d'améliorer les performances thermiques et dynamiques d'un séchoir solaire indirect. L'étude consiste à étudier le comportement de l'air à l'intérieur de l'espace confiné entre l'absorbeur et l'isolant d'un capteur plan vitré à simple passe. L'idée est de placer des épaulements au niveau de l'absorbeur et/ou de l'isolant et voir leurs effets sur la vitesse et la température.

La géométrie étudiée ainsi que les conditions aux limites sont réalisées par le code Gambit. Les équations de conservation de la masse, de la quantité du mouvement et de l'énergie qui régit le transfert thermique et massique dans la veine dynamique du capteur sont résolues numériquement par le code Fluent.

Les résultats numériques obtenus ont montré que :

- L'introduction des épaulements que soit au niveau de l'absorbeur ou de l'isolant a augmentée considérablement la vitesse et la température à l'intérieur de la veine dynamique du capteur. Par rapport au cas simple, nous avons inscrit une nette augmentation par rapport à la vitesse et par rapport à la température.
- On obtient les mêmes résultats lorsqu'on met les épaulements sur l'absorbeur ou sur l'isolant.
- La distance à partir de laquelle on place les épaulements influe également sur le champ de vitesse et de température.
- L'utilisation des obstacles de 2cm de hauteur offre des meilleurs résultats par rapport aux obstacles de 1cm.



## Références bibliographiques

- [1] **Sandali Messaoud**, Etude dynamique et thermique d'un capteur solaire à air à double passe avec milieu poreux, Mémoire de magister, Université Abou-Baker Belkaid-Tlemcen, 2014.
- [2] **HOUHOU HATE**, Etude de théorique et expérimental du séchage solaire de certains produits agro-alimentaires, thèse de Magister, Université Mohamed Khider – Biskra.
- [3] **Dilip R. Pangavhane, R.L. Sawhney and P.N. Sarsavadia**. Design, development and performance testing of a new natural convection solar dryer, *Energy* 27 (2002), 579–590
- [4] **A. El-Sebaï, S. Aboul-Enein, M.R.I. Ramadan and H.G. El-Gohary**, Empirical correlations for drying kinetics of some fruits and vegetables, *Energy* 27 (2002), 845–859.
- [5] **Dilip Jain and Rajeev Kumar Jain**, Performance évaluation of an incline multi-pass solar air heater with in-built thermal storage on deep-bed drying application, *Journal of Food Engineering* 65(2004), 497–509.
- [6] **Dilip Jain**, Modeling the system performance of multi-tray crop drying using an inclined multi-pass solar air heater with in-built thermal storage, *Journal of Food Engineering* 71 (2005), 44–54.
- [7] **Dilip Jain**, Modeling the performance of the reversed absorber with packed bed thermal storage natural convection solar crop dryer, *Journal of Food Engineering* 78 (2007), 637– 647.
- [8] **Khalil E.J. Al-Juamly, Abdul Jabbar N. Khalifa, Tadahmun A. Yassen**, Testing of the performance of a fruit and vegetable solar drying system in Iraq, *Desalination* 209 (2007), 163–170.
- [9] **V. Shanmugama, E. Natarajan**, Experimental investigation of forced convection and desiccant integrated solar dryer, *Renewable Energy* 31 (2006), 1239–1251.
- [10] **A. Labed, N. Moumni, K. Aouès, M. Zellouf et A. Moumni**, Etude théorique et expérimentale des performances d'un capteur solaire plan à air muni d'une nouvelle forme de rugosité artificielle, Université Mohamed Khider, Biskra, 2009.
- [11] **DJEBNOUN KHALED**, Etude théorique et expérimentale des performances d'un séchoir couplé à un capteur solaire plan à air, Mémoire de magister, Université Mohamed Khider – Biskra 2012.
- [12] **Slimane BOUGHALI**, Etude et optimisation du séchage solaire des produits agro-alimentation dans les zones arides et désertiques, Thèse de doctorat en sciences, université hadj Lakhdar Batna, 2010.
- [13] **Souheyla KHALDI**, Etude numérique du comportement thermique d'un séchoir solaire utilisant un lit thermique pour le stockage d'énergie, Thèse de Doctorat, université de Tlemcen, 2018.

- [14] **DJEBNOUN KHALED**, Etude théorique et expérimentale des performances d'un séchoir couplé à un capteur solaire plan à air, Mémoire de magister, Université Mohamed Khider – Biskra, 2012.
- [15] **A. Labeled, N. Moummi, K. Aouès, M. Zellouf et A. Moummi**, Etude théorique et expérimentale des performances d'un capteur solaire plan à air muni d'une nouvelle forme de rugosité artificielle, Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°4 (2009), 551 – 561.
- [16] **A. Aissa et Chaoubi Ouafa**, Contribution à la simulation des transferts thermiques dans un capteur solaire plan application de séchage, Mémoire master académique, Université Kasdi Merbah-Ouargla, 2015.
- [17] **BENSENOUCI Djamel**, Cours pour lancement du gambit, Chapitre 4.
- [18] **MATENE ELHACENE**, Démarche générale pour l'utilisation de GAMBIT .2009/2010
- [19] **BENSENOUCI Djamel**, Cours pour lancement du gambit. Chapitre 3.
- [20] **OLOUFEMI FAKOREDE**, Etude numérique de l'anémométrie à la nacelle, Mémoire présenté dans le cadre de la maîtrise en génie en vue de l'obtention du grade de maitre des Sciences Appliquées, université du Québec à Rimouski, 2012.