

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة تلمسنة أبو بكر بلقايد

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Par : MAZZOUZ Ismahan
TAOURIT Mohammed El Amine

Sujet

Modélisation et amélioration des performances d'un séchoir solaire indirect à convection naturelle

Soutenu publiquement, le 30 / 05 / 2021 , devant le jury composé de :

MR KORTI Nabil
Mm KHALDI Souheyla
Mm Sari Hind

Professeur
MCB
MAA

Univ. Tlemcen

Président
Directeur de mémoire
Examinateur 1

Dédicaces

Avec l'expression de ma connaissance, je dédie ce modeste travail a ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais leur exprimer amour sincère.

A l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect : mon cher père MOHAMMED.

A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non âmes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse ; mon adorable mère Zoulikha .

A toi mon grand-père Abd Kader, ceci est ma profonde gratitude pour ton éternel amour, que ce rapport soit le meilleur cadeau que je puisse l'offrir.

A ma chere grand mere Kheira , qui n'a pas cessée de me conseiller , encourager et soutenir tout au long de mes études.

A vous mes sœurs (Mouna,Semeh) et mon frere Said Abd Kayoume qui m'avez toujours soutenu et encouragé durant ces années d'études.

A mes tantes (Karima,Zoubida,Amina) et mes oncles. Que Dieu leur donne une longue et joyeuse vie.

Merci pour les amours et leurs encouragements.

DÉDICACE

J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail à:

Mes chers parents,

Qui m'ont toujours soutenu dans mes études.

Mon frère et mes sœurs chacun avec son nom,

Tous mes enseignants chacun avec son nom,

Tous mes collègues chacun avec son nom,

Chaque personne qui m'a aidé.

TAOURIT Mohammed El-Amine

Remerciement

Nous remercions Dieu le clément, le tout puissant de nous avoir donné le privilège et la chance d'étudier et de suivre le chemin de la science.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à Madame Souheyla KHALDI, Maitre de conférences au sein de l'Université de Tlemcen et directrice de ce mémoire pour ses orientations exceptionnelles. Nous lui sommes particulièrement reconnaissants de nous avoir offert la possibilité de travailler dans ce contexte de ces programmes d'études.

L'aboutissement de ce travail doit beaucoup à leur confiance, leur soutien incessant aussi bien moral que matériel et à leurs encouragements permanents. Vos soutiens constants et vos nombreux conseils nous ont aidé à faire progresser cette étude. Nous vous remercions sincèrement.

Nous tenons également à remercier Monsieur KORTI Nabil d'avoir accepté de présider le jury de notre projet de fin d'études.

Notre gratitude va également à Madame SARI Hind elle a bien voulu examiner notre travail. Nous la remercions pour l'intérêt qu'elle a apporté à notre travail.

Enfin nous remercions tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin dans la réalisation de ce projet de fin d'études.

ملخص

يتم تقديم محاكاة نقل حراري رقمي لمجفف شمسي غير مباشر مع الحمل الحراري الطبيعي. يتكون المجفف الشمسي من مجمع هواء شمسي وغرفة تجفيف. يقارن الجزء الأول من هذا العمل الكفاءة الحرارية لنوعين من اللواقط: المسطحة والمسامية وتأثير المسامية على درجة الحرارة والسرعة عند نهاية المجمع. تم إجراء المحاكاة من أجل تحديد المجالات الديناميكية والحرارية لتدفق الهواء عبر المجفف الشمسي. يتم تحديد معادلات الحفظ القائمة على نموذج التدفق المضطرب $k-\epsilon$ القياسي مع حلها بطريقة الحجم المحدود باستخدام الكود التجاري *Fluent*. الجزء الثاني يحلل تأثير دمج وحدة تخزين حراري على سلوك التدفق في المجفف. تم اقتراح موقعين لوحدة التخزين: (1) تحت المجمع الشمسي (يعتبر صلباً)، (2) في غرفة التجفيف (تعتبر وسطاً مسامياً).

الكلمات المفتاحية: مجفف شمسي، وحدة تخزين ، *CFD*، الحمل الحراري الطبيعي ، التدفق المضطرب .

Résumé

Une simulation numérique de transfert thermique d'un séchoir solaire indirect à convection naturelle est présentée. Le séchoir solaire se compose d'un capteur solaire à air et une chambre de séchage. La première partie de ce travail compare l'efficacité thermique de deux types d'absorbeur: plat et poreux et l'effet de la porosité sur la température et la vitesse à la sortie du capteur. Les simulations ont été faites afin de déterminer les champs dynamique et thermique de l'écoulement d'air à travers le séchoir solaire. Les équations de conservations basées sur le modèle de turbulence $k-\varepsilon$ standard sont discrétisées et résolues par la méthode des volumes finis à l'aide du code commercial Fluent. La deuxième partie analyse l'effet de l'intégration d'une unité de stockage thermique sur le comportement de l'écoulement dans le séchoir. Deux positions ont été proposées pour l'unité de stockage: 1) sous le capteur solaire (considéré comme solide), 2) dans la chambre de séchage (considéré comme un milieu poreux).

Mots clés: *Séchoir solaire, unité de stockage, CFD, convection naturelle, écoulement turbulent.*

Abstract

A numerical simulation of the heat transfer of an indirect solar dryer with natural convection is presented. The solar dryer consists of a solar air collector and a drying chamber. The first part of this work compares the thermal efficiency of two types of absorber: flat and porous and the effect of porosity on the temperature and speed at the output of the collector. The simulations were done in order to determine the dynamic and thermal fields of the air flow through the solar dryer. The conservation equations based on the standard $k-\varepsilon$ turbulence model are discretized and solved by the finite volume method using the Fluent commercial code. The second part analyzes the effect of integrating a thermal storage unit on the flow behavior in the dryer. Two positions have been proposed for the storage unit: 1) under the solar collector (considered as solid), 2) in the drying chamber (considered as a porous medium).

Keywords: *Solar dryer, storage unit, CFD, natural convection, turbulent flow.*

Table des matières

Remerciements.....	i
Résumé.....	ii
Table des matières.....	iii
Liste des figures.....	iv
Liste des Tableaux.....	v
Nomenclature.....	vi
Introduction générale	1

CHAPITRE I: INTRODUCTION AU SECHAGE SOLAIRE

I. 1. Introduction.....	5
I. 2. Historique de séchage.....	5
I. 3. Généralité sur le séchage.....	7
I. 3. 1. C'est quoi le séchage.....	7
I. 3. 2. Mécanisme de séchage.....	7
I. 3. 3. Quelles sont les paramètres qui influent sur la cinétique de séchage.....	7
I. 4. Différents modes de séchages.....	9
I. 4. 1. Le séchage par convection.....	9
I. 4. 2. Le séchage par conduction.....	9
I. 4. 3. Le séchage par rayonnement.....	10
I. 4. 4. le séchage solaire.....	10
I. 5. Séchage solaire.....	11
I. 5. 1. Définition.....	11
I. 5. 2. Les différents modes de séchage solaire.....	11
I. 5. 3. séchoir solaire.....	12
I. 5. 4. Classification des séchoirs solaires.....	12
A. Séchoir direct :.....	12
B. Séchoir indirect.....	13
C. Séchoirs mixtes :.....	14

CHAPITRE II :ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

II. 1.	Introduction	17
II. 2.	Séchoir solaire indirect avec capteur solaire.....	17
II.2. 1.	Capteur avec absorbeur poreux	17
II.2. 2.	Capteur avec absorbeur en forme de zigzag.....	18
II.2. 3.	Capteur avec absorbeur à ailettes	19
II.2. 4.	Capteur à plusieurs passes.....	20
II. 3.	Utilisation des cheminées solaires.....	21
II. 4.	Utilisation du stockage thermique.....	21
II. 5.	Modélisation mathématique des séchoirs solaires.....	23
II. 6.	Conclusion.....	27

**CHAPITRE III: MODELE PHYSIQUE, FORMULATION MATHEMATIQUE ET
RESOLUTION NUMERIQUE**

III. 1.	Introduction.....	29
III. 2.	Géométrie du problème.....	29
III. 3.	Modélisation mathématique et conditions aux limites.....	30
III. 3. 1.	Hypothèses simplificatrices	30
III. 3. 2.	Modèle mathématique	31
a)	Dans l'air	31
b)	Dans l'absorbeur poreux	32
c)	Equation de conservation d'énergie dans les solides	33
III. 3. 3.	Conditions initiales et les conditions aux limites	34
a)	Conditions climatiques.....	34
b)	Condition aux limites	35
III. 4.	Résolution numérique.....	36
III. 5.	Conclusion.....	37

CHAPITRE IV: Résultats et interprétations

IV.1.	Introduction	39
IV.2.	Présentation du code de calcul.....	39
IV.3.	Etude dynamique et thermique du capteur solaire (cas stationnaire).....	40
IV. 3. 1.	Test de maillage	41
IV. 3. 2.	Validation du model numérique.....	41
IV. 3. 3.	Comportement dynamique des deux capteurs solaires.....	42
IV. 3. 4.	Comportement thermique des deux capteurs solaires	44
IV. 3. 5.	Comparaison entre capteur avec absorbeur plat et poreux.....	46
IV. 3. 6.	Effet de la porosité	48
IV.4.	Etude dynamique et thermique du séchoir solaire (cas instationnaire).....	49
IV. 4. 1.	Test de maillage	49
IV. 4. 2.	Validation du modèle numérique	49
IV. 4. 3.	L'effet de l'intégration d'une unité de stockage thermique dans le séchoir.....	50
Conclusion générale		63

Références bibliographiques



Liste des tableaux

CHAPITRE III : Modèle Physique, Formulation Mathématique et résolution numérique

Tableau III. 1: Paramètres de conception du séchoir solaire..... 30

Tableau III. 2: Propriétés thermophysiques. 30

CHAPITRE IV : Résultats et interprétations

Tableau IV. 1: Test d'indépendance du maillage: comparaison de la température à la sortie du capteur pour différents maillages 41

Tableau IV. 2: Test d'indépendance du maillage : comparaison de la température à la sortie de la chambre.....49

Tableau IV. 3: Température moyenne sur la ligne de repère pour différent instants 61

Liste Des Figures

CHAPITRE I : INTRODUCTION AU SECHAGE SOLAIRE

Figure I.1 : potentiel energetique de l'algerie.....	5
Figure I.2 : sechage traditionnel des produits agricoles en algerie.....	6
Figure I.3 : les phases de sechage.....	8
Figure I.4 : sechage par convection.....	9
Figure I.5 : sechage par conduction.....	9
Figure I.6 : des exemples sur les fruits et legumes qui sechee par le mode de sechage solaire.....	10
Figure I.7 : principe du sechage en mode direct.....	12
Figure I.8 : sechoir solaire indirect.....	13
Figure I.9 : le principe d'un sechoir solaire mixte.....	14
Figure I.10 : representation typique des sechoirs solaires.....	14

CHAPITRE II : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Figure II.1 : diagramme du sechoir solaire avec	18
Figure II.2 : (a) Vue schématique du séchoir solaire ; (b) Capteur solaire.....	18
Figure II.3 : Diagramme schématique du capteur solaire avec absorbeur à ailettes [7].....	19
Figure II.4 : Montage expérimental ; (a) Assemblage schématique (b) Une vue de la configuration de test.....	20
Figure II.5 : Schéma du séchoir solaire avec cheminée solaire	21
Figure II.6 : La configuration expérimentale du séchoir solaire.	22
Figure II.7 : Le schéma du séchoir solaire à armoire comprenant : a) chambre de séchage, b) capteur solaire ; c) Réservoir de stockage et conteneur PCM à l'intérieur.....	23
Figure II.8 : Représentation schématique des échanges thermiques entre les composants de la chambre solaire de séchage des aliments.	24
Figure II.9 : Schéma du flux d'air à l'intérieur du système indirect.	24
Figure II.10 : Graphique de contour de température pour les 6 formes.....	25
Figure II.11 : Contour de température ($Y = 0$) de la chambre de séchage avec 5 plateaux.	26
Figure II.12 : Schéma de séchoir solaire indirect incluant les chicanes.....	26

CHAPITRE III: Modèle Physique, Formulation Mathématique Et Résolution Numérique

Figure III.1: Schéma descriptif du séchoir solaire indirect à convection naturelle.....	29
Figure III.2: l'évolution horaire de la température et le rayonnement solaire.	34
Figure III.3: Présentation des conditions aux limites.....	35

CHAPITRE IV : Résultats Et Interprétations

Figure IV. 1: Maillage de séchoir solaire avec Gambit.....	39
Figure IV. 2: Capteur solaire avec absorbeur plat.....	40
Figure IV. 3: Capteur solaire avec absorbeur poreux.....	40
Figure IV. 4: Comparaison de la température de nos résultats avec les résultats expérimentaux et numériques de MOHANRAJ.....	42
Figure IV. 5: Les contours des vitesses et les lignes de courant pour les deux modèle du capteur (a) avec absorbeur plat, (b) avec absorbeur poreux.	43
Figure IV. 6: Distribution de champ de température dans les capteurs solaire.....	45
Figure IV. 7: Profils des vitesses de l'air au niveau de la sortie des deux capteurs.....	46
Figure IV. 8: profils de température de l'air au niveau de la sortie des deux capteurs.....	47
Figure IV. 9: l'influence de la porosité sur la température et la vitesse d'air à la sortie du capteur poreux.	48
Figure IV. 10: Comparaison de la température moyenne avec les résultats expérimentaux et numériques de Jyotirmay.....	50
Figure IV. 11: Présentation du séchoir solaire sans stockage thermique avec les conditions limites (cas 1).....	51
Figure IV. 12: Présentation du séchoir solaire avec stockage thermique sous le capteur avec les conditions limites.....	52
Figure IV. 13: Présentation du séchoir solaire avec stockage thermique dans la chambre de séchage avec les conditions limites.	53
Figure IV. 14: Répartition des champs (a) de vitesse et lignes de courant et (b) de températures dans le séchoir solaire à 10 h.	54
Figure IV. 15: Répartition des champs (a) de vitesse et lignes de courant et (b) de température dans le séchoir solaire à 13 h.	55

Figure IV. 16: Répartition des champs (a) de vitesse et lignes de courant et (b) de température dans le séchoir solaire à 18 h.	56
Figure IV. 17: Comparaison de la température de l'air à la sortie du capteur solaire pour les 3 cas: sans stockage, stockage sous le capteur et stockage dans la chambre de séchage.	57
Figure IV. 18: Evolution de débit massique en fonction du temps pour les deux cas 1 et 3...58	
Figure IV. 19: La position du trois points dans la chambre de séchage.....	59
Figure IV. 20: L'évolution de la température nodale dans les position: (a) gauche, (b) milieu et (c) droit pour les trois configurations du séchoir solaire.....	60

Nomenclature

Lettres latines		Unité
C	Facteur de résistance inertiel	m^{-1}
C_p	Chaleur spécifique	$J / Kg.K$
C_1	Constant du modèle de turbulence	
C_2	Constant du modèle de turbulence	
c_μ	Constantes du modèle de turbulence	
D_p	Diamètre de particule	m
G_s	Rayonnement solaire	W / m^2
G_k	Constante du modèle de turbulence k- ϵ	
g	Accélération gravitationnel	m / s^2
h_0	Coefficient de perte convective	$W / m^2.K$
K	Perméabilité	m^2
K	Energie cinétique turbulente	m^2 / s^2
N	Coordonnée normale	M
P	Pression	Pa
Pa	Pression atmosphérique	Pa
Pr	Nombre de Prandtl	
R	Constant universel des gaz	$J / K mol$
S	Source terme	
T	Température	$^{\circ}C$ ou K
t	Temps	s ou h
V_v	Vitesse du vent	m / s
x	Coordonnée horizontale	m
y	Coordonnée verticale	m
Symboles grecs		
α	Coefficient d'absorption	

β	Coefficient de dilatation	
ε	Taux de dissipation de l'énergie turbulence	m^2 / s^2
λ	Conductivité thermique	
τ	Coefficient de transmissivité	
ρ	Masse volumique	Kg / m^3
ρ_0	Masse volumique de référence	Kg / m^3
μ_t	Viscosité dynamique turbulente	$Kg / m.s$
μ	Viscosité dynamique	$Kg / m.s$
σ	Coefficient de radiation	
σ_t	Constante du modèle de turbulence k- ε	
σ_k	Constante du modèle de turbulence k- ε	
σ_ε	Constante du modèle de turbulence k- ε	
δ	Porosité	
ϵ	Emissivité	
Indices		
a	Ambiant	
b	Bois	
Ciel	Ciel	
v	Vitrage	

Introduction générale

L'opération de séchage est une opération dévoratrice d'énergie. Dans les pays développés, environ 12 à 25 % de la demande totale d'énergie primaire est consacrée au séchage. La perte des produits agricoles dans les pays en voie de développement due à une surproduction pendant la période des récoltes et au manque de moyen de stockage s'élève au environ de 30 à 40 % de la production globale.

Le séchage est l'une des méthodes de conservation des produits agro-alimentaires parmi tant d'autre, ex: congélation, manipulation génétique du produit, mais cette dernière est coûteuse et demande une haute technicité et cause de multiples maladies; quant à la congélation elle consomme beaucoup d'énergie car elle est alimentée en courant électrique d'une façon permanente, ce qui se répercute sur le coût du produit.

Pour les pays en voie de développements comme l'Algérie, il faut penser à sécher en exploitant l'énergie solaire. L'Algérie possède un des plus importants gisements solaires au monde. La durée d'ensoleillement atteint en moyenne 2500 heures par an sur une très grande partie de son territoire et le potentiel solaire total de l'Algérie est estimé à 169 440 TWh par an. Cette énergie devrait être bien utiliser pour une variété d'applications thermiques, telle que le séchage solaire.

Le séchage solaire est une méthode ancestrale utilisée dans le passé et jusqu'au jour d'aujourd'hui. Traditionnellement, les produit ont été exposé au soleil pour les sécher, Néanmoins, l'efficacité de cette méthode est faible compte tenu des nombreux aléas (pluie,

vent, insectes...). Pour parer aux inconvénients du séchage en pleine air, des séchoirs solaires ont été conçus.

L'étude scientifique a un intérêt considérable du séchoir solaire. Ces études ont montré que les séchoirs solaires sont pratiques, maniables et très performants. Un séchoir solaire raisonnablement conçu peut réduire les inconvénients du séchage et améliorer la qualité du produit.

Le séchoir solaire consiste à accumuler l'énergie du soleil à l'intérieur d'un dispositif de collecte de la chaleur, puis à créer un flux d'air chaud par convection naturelle ou forcée. Les séchoirs solaires qui utilisent la convection naturelle s'appelle séchoir passif tandis que les séchoir à convection forcée s'appelle séchoir actif, ces derniers sont équipées d'un ventilateur qui déplace l'air artificiellement à l'intérieur du séchoir.

l'énergie solaire est renouvelable et illimité mais elle est aussi intermittente, elle dépend du lieu, l'heure du jour, la saison et les conditions météorologiques. Cela pose un problème majeur pour les séchoir solaire, c'est la discontinuité du fonctionnement du séchoir solaire durant les heurs non ensoleillées. Par conséquent, il est nécessaire d'intégrer une unité de stockage thermique dans le séchoir solaire pour palier à cet handicap.

L'objectif de ce travail présentées ici correspondent à la simulation numérique du comportement dynamique et thermique d'un écoulement d'air au sein d'un séchoir solaire indirect à convection naturelle contenant un capteur solaire, une chambre de séchage et une unité de stockage thermique. Le présent travail comporte quatre chapitres :

Le premier chapitre présente des généralités sur le séchage solaire, les différents modes de séchage et les notions théoriques de base pour la compréhension du phénomène de séchage (mécanisme et cinétique de séchage) et les différents types de séchoirs solaires.

Le deuxième chapitre présente une synthèse bibliographique succincte et récente apportée sur les séchoirs solaires type indirects et les différentes technologies utilisées pour améliorer ses performances dynamiques et thermique.

Le troisième chapitre présente le problème physique étudié, sa modélisation mathématique, les conditions aux limites et climatiques et la résolution numérique.

Le quatrième chapitre décrit les résultats et les discussions de l'étude paramétrique du séchoir solaire. L'influence de différents paramètres, tels que l'effet du l'absorbeur poreux et l'effet de l'intégration d'une unité de stockage sur les performances du séchoir.

En fin dans la conclusion, on donne un résumé de l'essentiel des résultats obtenus ainsi que les perspectives.

CHAPITRE I

INTRODUCTION AU SECHAGE SOLAIRE

Sommaire

I. 1.	Introduction.....	4
I. 2.	Historique de séchage	5
I. 3.	Généralité sur le séchage	6
I. 4.	Déférents modes de séchages.....	8
I. 5.	Séchage solaire.....	10

I. 1. Introduction

Le séchage des produits agricoles est un procédé de conservation qui remonte à la plus haute antiquité. Le séchage naturel, à même le sol, sur les toits ou sur des claies est largement pratiqué dans la plupart des pays d'Afrique [1].

Par sa situation géographique avantageuse, l'Algérie dispose d'un important potentiel d'énergies renouvelables, telles que la géothermie, la biomasse, l'énergie solaire et éolienne ; Alors qu'elle dispose du plus grand gisement solaire du bassin méditerranéen, La durée moyenne d'ensoleillement du territoire algérien dépasse les 2650 h par an pour les régions côtières, 3000 h par an pour les régions de hauts plateaux et il augmente à 3500 h par an pour le Sahara qui représente 86% du territoire algérien. En termes d'énergie reçue, le potentiel solaire total de l'Algérie est estimé à 169.440 TWh par an [2].

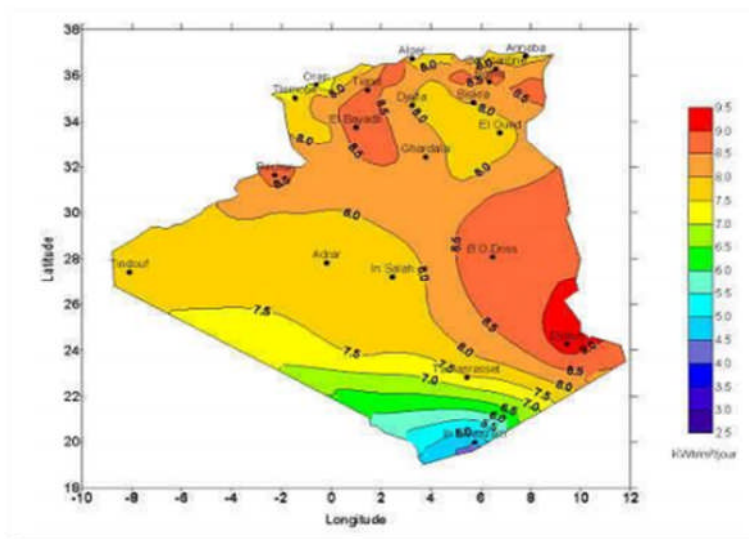


Figure I. 1 : Potentiel énergétique de l'Algérie.

Le séchage des produits agricoles est l'une des applications potentielles les plus importantes dans la région algérienne. L'utilisation de l'énergie solaire en remplacement total ou partiel des énergies fossiles dans les séchoirs industriels peut réduire la facture énergétique et de préserver l'environnement en réduisant les émissions de gaz à effet de serre.

I. 2. Historique de séchage

Le séchage est une technique très anciennement utilisée pour la conservation des produits agricoles et alimentaires (céréales, graines, fourrages, viandes et poissons séchés,

jambons, figes, noix, tabac, etc.), pour l'élaboration des matériaux (briques de terre sèche, céramiques, poterie avant cuisson, bois,...), pour les textiles (lavage, teinture,...) et les peaux [3].

La première installation de séchage connue a été trouvée dans le sud de la France et datée d'environ 8000 avant JC. C'était une surface pavée en pierre et utilisée pour le séchage des récoltes ;les vents naturels ou des vitesses modérées ont été combinés avec le rayonnement solaire pour accélérer le séchage. Diverses installations dans le monde ont été trouvées entre les années 7000 et 3000 avant JC. Il y avait plusieurs installations combinées, le rayonnement solaire et la circulation naturelle de l'air, principalement pour le séchage des denrées alimentaires. En Mésopotamie ont été trouvés des sites, séchage solaire à l'air de matières textiles colorées et de plaques d'argile écrite. La première installation de séchage à l'air exclusivement pour les cultures a été trouvée dans «Hindu river valley» et est datée d'environ 2600 avant JC. Le philosophe grec et le médecin, Aristote, qui décrit en détail les phénomènes de séchage, ont donné, pour la première fois, des explications théoriques de séchage. Plus tard, la biomasse et le bois ont été utilisés pour brûler des fours primitifs pour sécher le matériel de construction comme des briques, etc., , mais les aliments n'ont été exposés qu'au rayonnement solaire direct. L'industrie du séchage conventionnel a commencé vers le 18^{ème} siècle et à la même époque a commencé l'industrie de la conservation pour certains types d'aliments aussi. Malgré tout, le séchage par exposition au soleil (traditionnel) a continué à être utilisé jusqu'à aujourd'hui [2].



Figure I. 2 : Séchage traditionnel des produits agricoles en Algérie.

I. 3. Généralité sur le séchage

I. 3. 1. C'est quoi le 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 ,donc c'est l'opération permettant de faire passer un produit de son état initial dit « humide » (selon le cas solide ou liquide), à un état final dit « solide sec ». Pour cela, il s'agit de retirer une partie du solvant (eau) d'un corps afin d'obtenir un produit fini sous la forme d'un solide, d'un « solide divisé » ou de poudre.

I. 3. 2. Mécanisme de séchage

Le séchage, qu'il soit traditionnel ou moderne, a pour objet de réduire fortement les diverses réactions participant à la décomposition normale du produit. Pour ce faire il faut donc extraire une part importante de l'eau contenue dans le produit. Cette eau est éliminée par évaporation dans l'air environnant. Pour cela il faut de l'énergie thermique (soleil, électricité, gaz). Grâce à cette énergie, l'eau migre au sein du produit, se transforme en vapeur d'eau et est entraînée vers l'extérieur dans le cas d'un séchoir fermé.

Bien sécher c'est donc maîtriser de nombreux paramètres:

- L'énergie thermique (ni trop, ni trop peu) qui provoque l'évaporation de l'eau.
- La capacité de l'air environnant à absorber la vapeur d'eau dégagée par le produit (d'où la difficulté d'assurer un bon séchage en saison humide car l'air est déjà saturé).
- La vitesse idéale de l'air au niveau du produit de manière à accélérer l'entraînement de la vapeur d'eau : il faut sécher rapidement pour éviter le pourrissement du produit mais pas trop vite pour éviter la formation d'une croûte.
- Les caractéristiques du produit frais : on ne sèche pas un poisson gras comme on sèche un fruit ou un légume.
- La qualité du produit frais à sécher en amont (approvisionnement, tri, prétraitements) puis du produit séché en aval (conditionnement, stockage, chaîne de distribution). [1]

I. 3. 3. Quelles sont les paramètres qui influent sur la cinétique de séchage

La vitesse de séchage est une quantité très importante, déterminée par la température et la teneur en humidité du produit ainsi que la température, l'humidité relative et la vitesse de l'air

de séchage. Les produits agricoles sont hygroscopiques et le taux de séchage est donc d'une importance capitale, Le taux de séchage a généralement trois phases différentes :

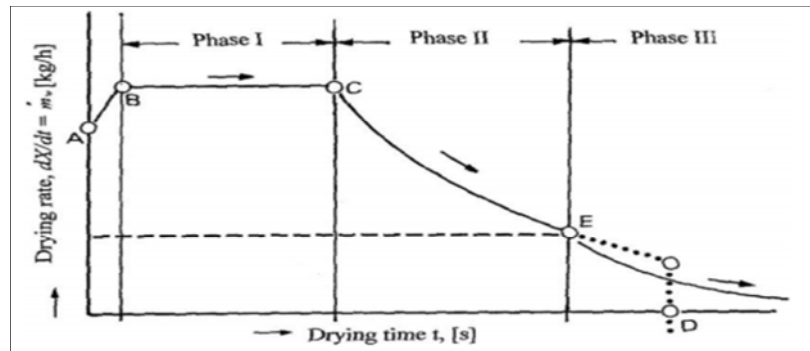


Figure I. 3 : Les phases de séchage

- Phase I : (Période de mise en température du produit), une période initiale à taux constant pendant laquelle la surface est saturée de vapeur et l'évaporation s'effectue en continu, car la surface du matériau contient suffisamment d'eau pour s'évaporer.
- Phase II : (séchage isenthalpique, vitesse de séchage constante ou l'eau libre s'évapore), la période de vitesse de chute, lorsque la surface n'est pas saturée à la vapeur, c'est-à-dire au point critique. La diffusion de l'humidité est contrôlée par un mouvement interne du liquide alors que la surface devient épuisée dans l'eau.
- Phase III : (Période de ralentissement, évaporation de l'eau liée), la deuxième partie de la période de chute, où la teneur en humidité continue de diminuer jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint et que le séchage s'arrête. Cette deuxième période de chute concerne les produits hygroscopiques.

La courbe sur la Fig. I.3 donne une vue générale des trois phases. AB est le temps passé à chauffer le produit jusqu'à ce que la température de séchage soit atteinte. BC est le séchage à vitesse constante, CE, le taux de chute de séchage, où le débit d'humidité de l'intérieur de la masse diminue d'une manière continue. C, est le point critique où la surface n'est plus saturée et la période de chute commence. Dans le point E, il y a encore de l'humidité à l'intérieur du produit, le mouvement de la teneur en humidité s'effectue lentement par diffusion et le séchage peut s'arrêter par exemple Au point D lorsque la teneur finale en humidité est atteinte. Enfin, pour un matériau hygroscopique, la courbe est asymptotique et le séchage s'arrête lorsque l'équilibre est atteint. La période de séchage de ces régimes, pour les produits hygroscopiques, dépend de la teneur initiale en humidité et de l'humidité prescrite, pour un stockage sûr [3].

I. 4. Différents modes de séchages

Pour favoriser le séchage, on est souvent amené à fournir l'énergie nécessaire pour vaporiser le liquide que l'on veut éliminer. A ce titre, nous distinguons plusieurs modes de séchage : par convection, conduction, rayonnement et solaire :

I. 4. 1. Le séchage par convection

C'est la méthode de transfert la plus utilisée car elle permet un transfert simultané de chaleur et de masse (vapeur du produit), elle consiste en un contact avec un gaz (air) circulant dans un système généralement turbulent autour du corps à déshydrater (Fig. I.4). Les échanges de chaleur et de masse entre le produit à sécher et l'air de séchage dépendent des caractéristiques de l'air (vitesse, température, humidité).

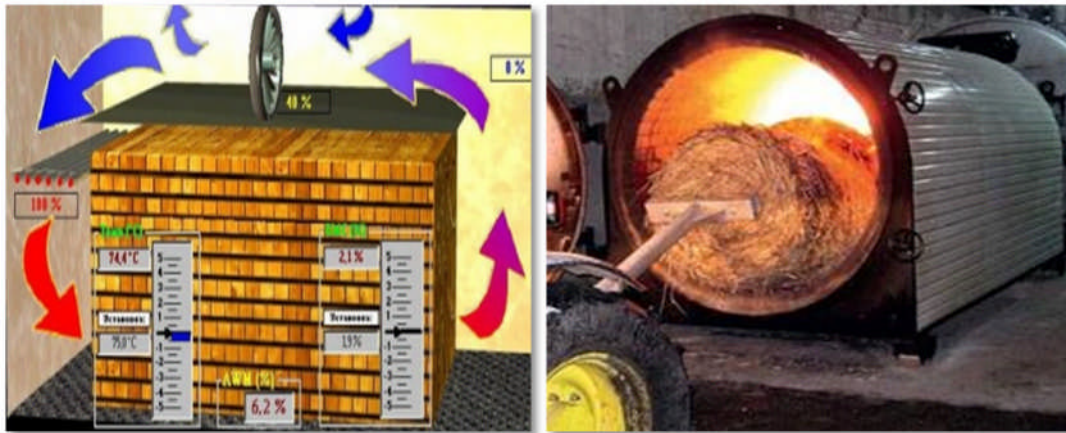


Figure I. 4: Séchage par convection

I. 4. 2. Le séchage par conduction

L'énergie thermique importante se transfère dans ce cas par contact direct du produit avec une paroi chauffée et non pas par un gaz en mouvement autour de produit à sécher.



Figure I. 5 : Séchage par conduction**I. 4. 3. Le séchage par rayonnement**

Le rayonnement infrarouge est appliqué sur le produit, généralement ce mode de séchage est très important pour éliminer l'eau, en particulier lorsque le produit à sécher n'est pas sensible à la chaleur.

Exemples : le séchage industriel des vernis et des peintures, du bois, des papiers, des pellicules photographiques, des cuirs, des textiles, des pâtes alimentaires, la dessiccation des légumes, des fruits

I. 4. 4. le séchage solaire

le séchage solaire c'est exposer directement ou indirectement un substance à déshydrater à la lumière du soleil, cela nécessite un ensoleillement suffisant. .

Exemples : séchage de piments, de plantes médicinales et aromatiques, cacao, café.



Figure I. 6 : des exemples sur les fruits et légumes qui séchée par le mode de séchage solaire.

I. 5. Séchage solaire

I. 5. 1. Définition

Le séchage solaire est l'opération efficace permet de sécher le produit directement par le flux solaire ou bien les capteurs. L'objectif de ce mode est diminué la quantité d'eau des corps humides par l'évaporation.

Pendant le séchage, l'eau contenue dans la substance disparaît progressivement dans l'air ambiant sous l'influence de deux phénomènes : l'évaporation de l'eau et sa diffusion à l'intérieure matière. Ces phénomènes dépendent des propriétés du gaz (air ou vapeur surchauffé) environnant, à savoir : La température, l'humidité relative, la pression, la vitesse, le débit. L'évaporation de l'eau est un phénomène qui nécessite de la chaleur. Plus la température de la substance est élevée et plus l'évaporation est importante.

I. 5. 2. Les différents modes de séchage solaire

Ce type de séchage possède deux types de procédés sont généralement utilisés. Soit le produit à sécher reçoit directement l'énergie solaire (séchage direct), soit un dispositif solaire capte l'énergie solaire destinée à préchauffer de l'air qui circule ensuite sur les claies du séchoir (séchage indirect).

A. Séchage en mode direct

Ce mode de séchage est pratiqué généralement dans les régions rurales. Il consiste à étaler les produits à sécher sur terre ou sur les toits des maisons, comme par exemple, des grains, des fruits ou des légumes. Il est évident que cette technique n'est pas hygiénique et a pour conséquence la perte significative de produit, due particulièrement à la contamination par la saleté, la poussière, le vent, l'infestation par des insectes, la pluie et l'interférence animale. Le soleil intermittent et la mouillure par la pluie réduisent le taux de séchage ; notons qu'une surchauffe peut aussi détériorer le produit. Une solution consiste alors à couvrir d'un plastique ou d'un verre les claies du séchoir, tout en assurant une circulation d'air naturelle. Les propriétés radiatives de la couverture choisie pour protéger le produit doivent satisfaire aux contraintes classiques favorisant l'effet de serre à savoir favoriser la récupération d'énergie solaire tout en limitant l'énergie radiative perdue par le produit. Quelle que soit la conception envisagée, la mise en œuvre du séchage solaire en mode direct par convection naturelle reste

limitée car il n'y a pas ou peu de contrôle du taux de séchage, celui-ci n'est pas uniforme, la capacité de séchage est faible et le rendement reste médiocre.

B. Séchage en mode indirect

Pour parer aux inconvénients du séchage solaire direct, des séchoirs solaires ont été conçus. Ce sont des dispositifs conçus pour que le séchage s'opère sous forme indirecte. L'air est préchauffé dans un capteur solaire ensuite orienté vers le produit à sécher. Ce dernier est mis à l'abri du rayonnement solaire. Ce mode de séchage est facilement contrôlable.

I. 5. 3. séchoir solaire

Le séchoir solaire permet de déshydrater les aliments tout en assurant de bonnes conditions hygiéniques, notamment en évitant le contact avec la poussière ou les insectes. Les aliments peuvent ainsi être séchés en un temps réduit, allant de quelques heures à quelques jours selon leur composition et le niveau d'exposition au soleil.

Un séchoir solaire est généralement constitué d'un capteur solaire et d'une chambre où les aliments sont disposés sur des grilles. Le rayonnement va chauffer et sécher l'air qui circule par le capteur solaire, cet air va ensuite entrer dans la chambre et déshydrater les aliments.

I. 5. 4. Classification des séchoirs solaires

Les séchoirs solaires sont généralement classés, selon le mode d'utilisation de l'énergie solaire, en trois types : direct, indirect et mixte.

A. Séchoir direct :

Un séchoir solaire direct permet de sécher les aliments en les disposant sous une plaque de verre ou de plastique transparente résistante au soleil dans un châssis. L'effet de serre qui se produit abaisse le taux d'humidité des aliments. Pour éviter qu'il y ait de la condensation, des trous d'aération sont percés dans le châssis. Le séchoir solaire direct se contient d'une seule pièce qui fait office à la fois de chambre de séchage et de collecteur solaire.

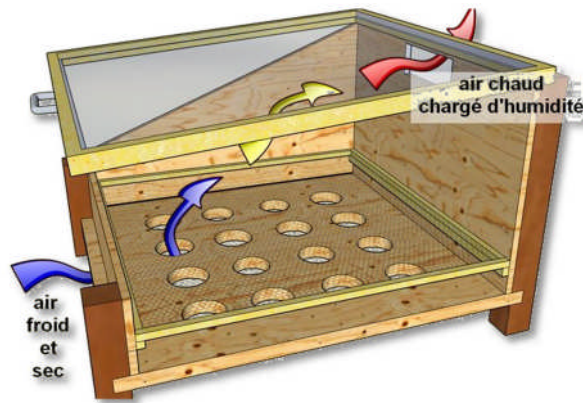


Figure I. 7: Principe du séchage en mode direct

B. Séchoir indirect

Dans les séchoirs solaires indirects, les produits à sécher ne sont pas exposés directement au soleil. Il est même à l'abri de la lumière entraînant une meilleure préservation des qualités nutritionnelles de l'aliment.

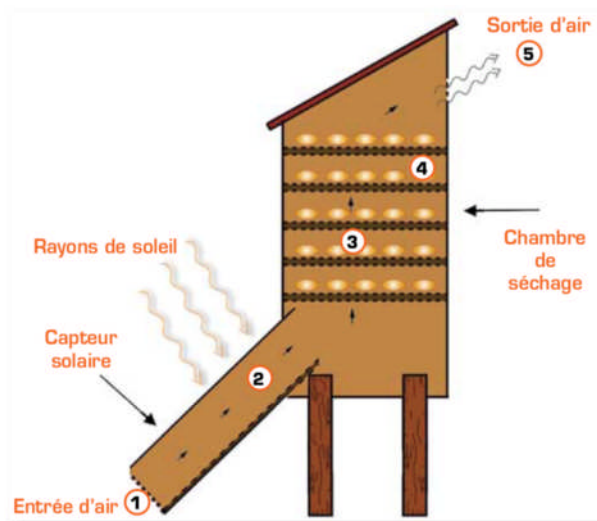


Figure I. 8: Séchoir solaire indirect

Les séchoirs indirects se composent essentiellement de deux parties : un capteur solaire et une chambre de séchage. Le capteur solaire est généralement un module à part qui se fixe sur la chambre de séchage pendant l'exposition au soleil et dont l'inclinaison a pour but de maximiser le captage de l'énergie solaire. Il est constitué d'une surface vitrée située au-dessus et d'une surface absorbante, généralement peinte en noir. L'air est d'abord chauffé dans le capteur solaire, puis conduit dans la chambre de séchage où un transfert de chaleur de l'air vers

le produit et un transfert de masse du produit vers l'air se produisent au cours du parcours de l'air de séchage.

C. Séchoirs mixtes :

Ce type des séchoirs combinent les principes des séchoirs directs et indirects. Le produit à sécher est exposé au flux solaire et à l'air préchauffé dans un capteur placé sous l'armoire de séchage.

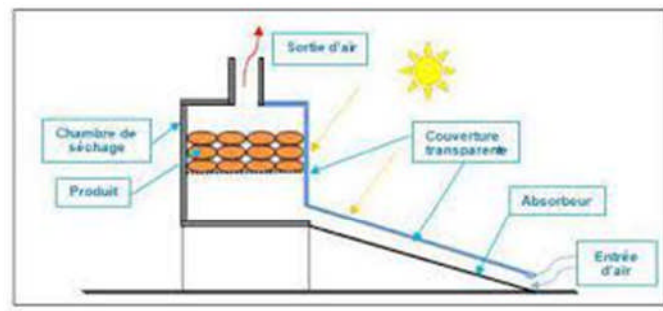


Figure I. 9: Le principe d'un séchoir solaire mixte.

Le séchage solaire consiste à accumuler l'énergie du soleil à l'intérieur d'un dispositif de collecte de la chaleur, puis à créer un flux d'air chaud par convection naturelle ou forcée. Les séchoirs solaires qui utilisent la convection naturelle s'appelle séchoir passif tandis que les séchoir à convection forcée s'appelle séchoir actif, ces derniers sont équipées d'un ventilateur qui déplace l'air artificiellement à l'intérieur du séchoir pour accroître son efficacité.

Les principaux types de séchoirs à énergie solaire sont illustrés dans la figure suivante :

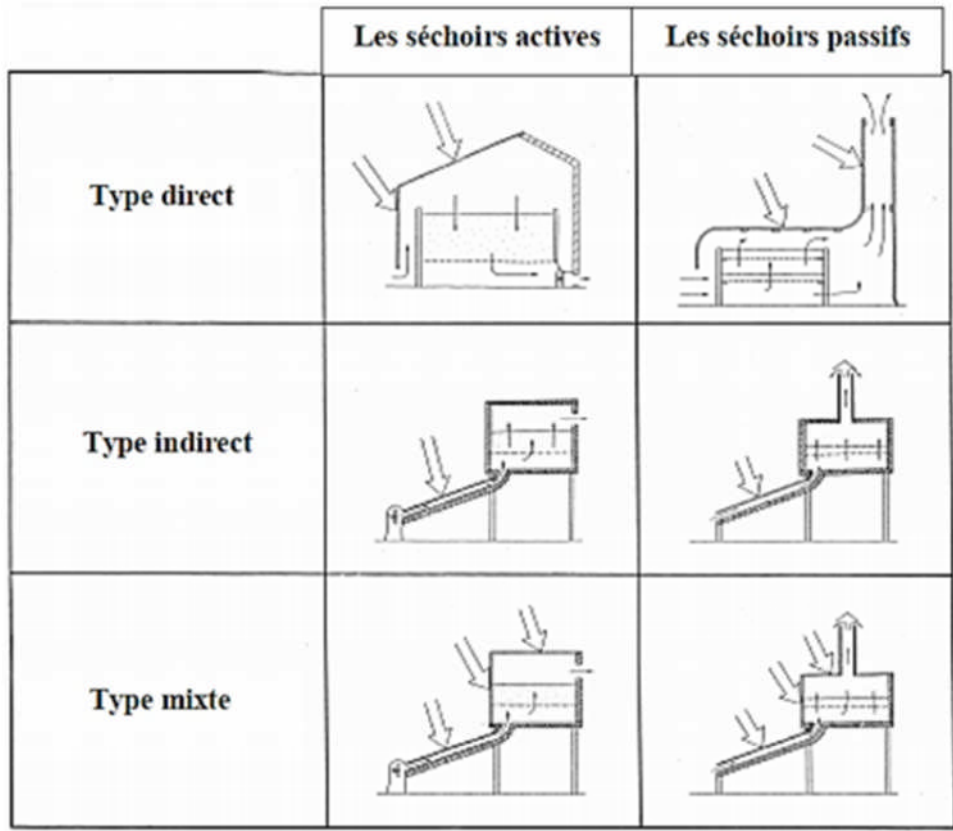


Figure I. 10: Représentation typique des séchoirs solaires.

CHAPITRE II

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Sommaire

II. 1.	Introduction	17
II. 2.	Séchoir solaire indirect avec capteur solaire	17
II. 3.	Utilisation des cheminées solaires	20
II. 4.	Utilisation du stockage thermique	21
II. 5.	Modélisation mathématique des séchoirs solaires	23
II. 6.	Conclusion	27

II. 1. Introduction

Les séchoirs constituent le moyen le plus prometteur de conserver les légumes, les céréales alimentaires, les plantes médicinales et de nombreux autres produits agricoles. Le séchage traditionnel au soleil à ciel ouvert est la technique de séchage la plus simple et la moins chère. Cependant, il souffre de sérieux défis tels que la réabsorption de l'humidité en raison de mauvaises conditions climatiques et de la contamination par la poussière, les animaux, les oiseaux et les rongeurs. La qualité du produit est également affectée par le taux de séchage non uniforme tout au long de la journée. Pour surmonter ces limitations et améliorer la qualité des produits, de nombreux chercheurs ont conçu différents types de séchoirs solaires.

Un séchoir solaire utilise l'irradiation solaire directement ou indirectement pour sécher les fruits et légumes. L'utilisation de l'énergie solaire pour le processus de séchage a suscité un intérêt considérable de la part de la communauté scientifique, dont beaucoup seront présentées ci-après.

II. 2. Séchoir solaire indirect avec capteur solaire

Les capteurs solaires sont des boîtiers d'échangeur de chaleur spéciaux qui permettent de convertir l'énergie solaire en chaleur pour les applications à basse température. Dans les séchoirs solaires, le capteur solaire est utilisé pour obtenir des valeurs de température élevées avec des flux d'air contrôlés. Amélioration de l'efficacité thermique des capteurs solaires est basée sur plusieurs techniques, parmi lesquelles :

- Améliorer l'absorbeur avec de nouvelles formes de surface d'échange pour augmenter le flux de chaleur absorbée et le coefficient de transfert de chaleur avec l'air. Il existe généralement trois catégories d'absorbeurs : poreux, zigzag et ailettes.
- Prolonger le temps de séjour du fluide caloporteur (air) dans le capteur en utilisant des capteurs à plusieurs passes.

II.2. 1. Capteur avec absorbeur poreux

Généralement on utilise des capteurs solaires simples et poreux, ceux-ci donnent souvent de meilleures performances et des taux de conversion relativement plus élevés.

Wei et Man (2014) [5] ont présenté une analyse numérique de l'écoulement d'air dans un séchoir solaire indirect à convection naturelle, le séchoir solaire contient un capteur solaire

intégrant un absorbeur poreux, une chambre de séchage et une cheminée (fig. II.1). Le modèle de turbulence ($k-\epsilon$) est utilisé pour la résolution numérique du problème. Comme résultats, ils ont conclu que l'utilisation d'un absorbeur poreux incliné augmente la température et la vitesse de l'air à la sortie. L'augmentation de la porosité conduit à réduire la zone de transfert de chaleur dans l'absorbeur.

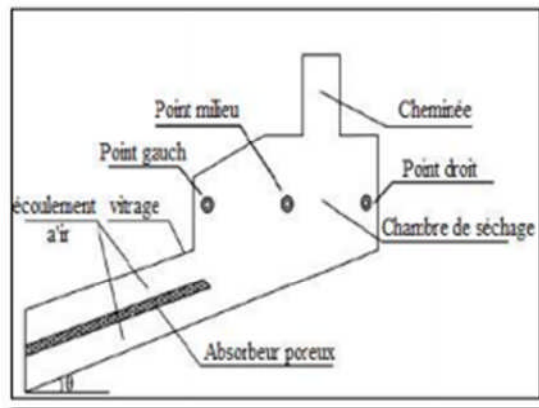


Figure II. 1 : Diagramme du séchoir solaire avec absorbeur poreux [5].

II.2. 2. Capteur avec absorbeur en forme de zigzag

Par rapport aux absorbeurs plats, ce type d'absorbeur offre une plus grande surface d'échange. Abhayet al. (2016) [6] ont présenté une étude expérimentale de séchoir solaire indirect à convection naturelle destiné à sécher les bananes. Le séchoir solaire se compose d'un capteur solaire avec absorbeur en zigzag, une chambre de séchage isolée et cheminée utilisé pour l'échappement (Fig. II. 2). Les auteurs ont trouvé que cette méthode de séchage est plus rapide et plus efficace que le séchage à l'air libre. Le rendement thermique moyen du capteur il est de 31,5%, et la chambre de séchage est de 22,38%.

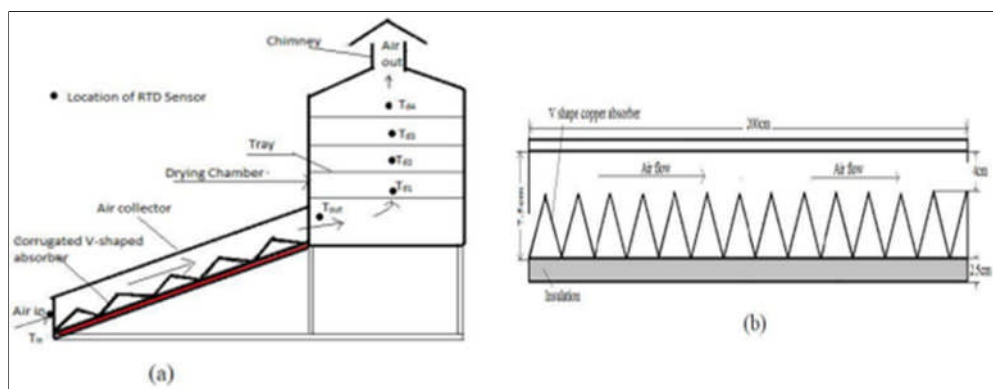


Figure II. 2 : (a) Vue schématique du séchoir solaire ; (b) Capteur solaire

avec absorbeur en forme zigzag.

II.2. 3. Capteur avec absorbeur à ailettes

Dans ce type de capteur, la géométrie de l'absorbeur est conçue pour augmenter la surface d'échange thermique d'une paroi lisse. Le principe est de placer des obstacles métalliques assimilables à des rugosités artificielles, appelés ailettes. ces derniers assure un meilleur échange thermique avec l'air, favorise la génération de turbulences et prolonge le temps de propagation du fluide. Ces capteurs ont fait l'objet de multiples travaux:

Singh.(2020) [7] a présenté une étude expérimentales et numériques visent à augmenter les performances thermiques dans un capteur solaire intégrant un absorbeur à ailettes. Un outil CFD est utilisé pour effectuer l'investigation numérique et les résultats obtenus sont validés avec les données expérimentales. Il est conclu que l'utilisation d'ailettes dans la direction transversale améliore le transfert de chaleur et entraîne par conséquent une chute de pression accrue.

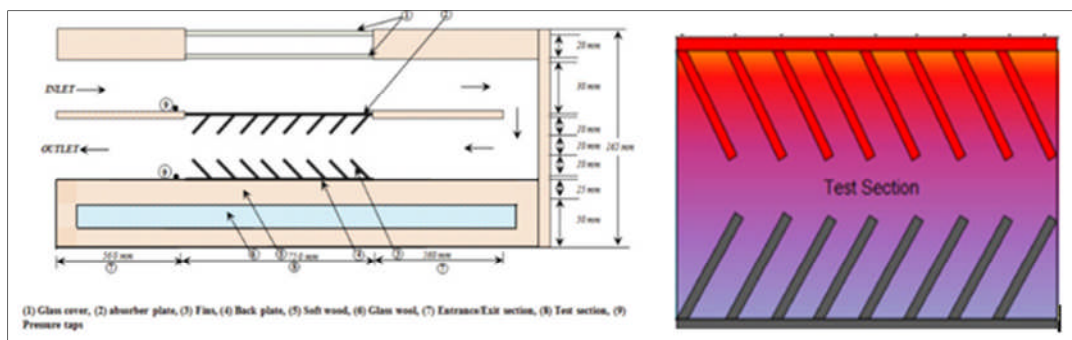


Figure II. 3 : Diagramme schématique du capteur solaire avec absorbeur à ailettes [7].

II.2. 4. Capteur à plusieurs passes

Hande et al. (2020). [8] ont conçus, analysés, fabriqués et testés un séchoir solaire indirect à double passage (DPISD) avec modification de l'absorbeur. L'objectif principal de cette étude est d'améliorer le rendement thermique du capteur solaire d'air à double passage en intégrant des mailles en fer. Des échantillons en deux épaisseurs de fruit de pépin ont été utilisés dans l'étude expérimentale. En outre, une analyse CFD du capteur solaires et de la chambre de séchage et des mesures de qualité ont été menées. La simulation numérique et les résultats expérimentaux ont montré que l'utilisation du nouveau absorbeur a une influence positive sur les performances du capteur solaire. La valeur la plus élevée de l'efficacité moyenne du sécheur a été obtenue pour une épaisseur d'échantillon mince de 23,08 %.

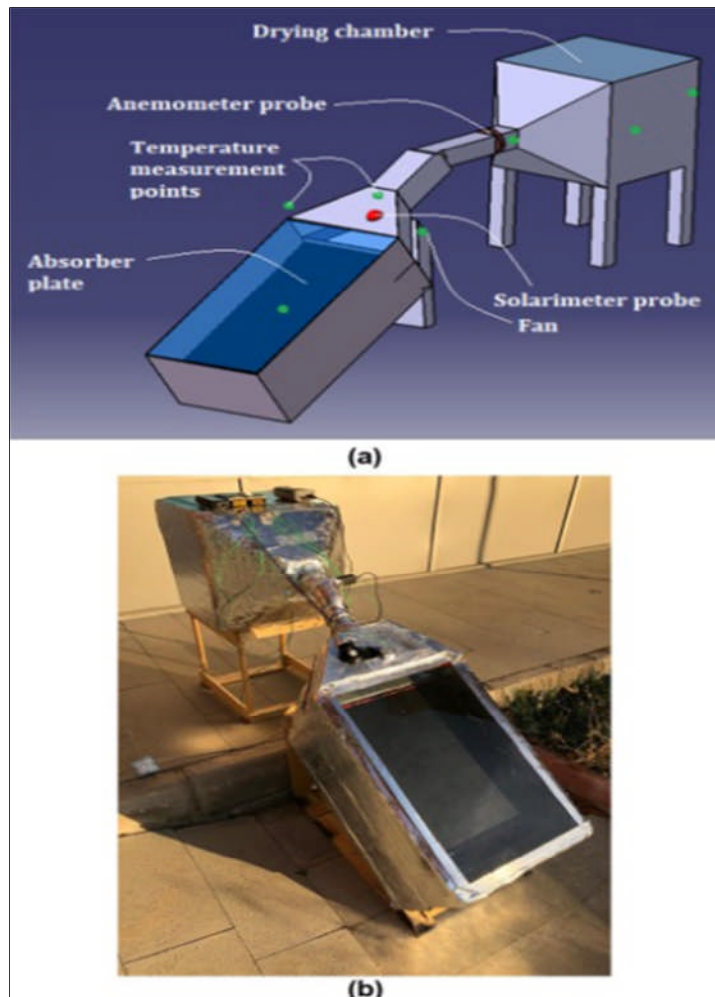


Figure II. 4 : Montage expérimental ; (a) Assemblage schématique (b) Une vue de la configuration de test.

II. 3. Utilisation des cheminées solaires

Une cheminée solaire est une structure utilisée à de nombreuses applications telles que la ventilation ainsi que l'exil des gaz chauds. Le processus d'élimination des gaz chauds à travers elle s'appelle l'effet de pile. Le processus est expliqué par la théorie de la convection naturelle dans laquelle l'air se déplace en raison d'un effet de flottabilité ou d'une différence de densité.

Jyotirmay Mathur et Al. (2006) [9] ont étudié expérimentalement l'effet de l'inclinaison de l'absorbeur sur le débit d'air d'un système de ventilation à induction solaire utilisant une cheminée solaire de toit (Fig.II.5). Les résultats de la solution développée montrent que l'inclinaison optimale de l'absorbeur varie de 40° à 60° selon la latitude du lieu. Avec l'augmentation de l'entrefer et la hauteur d'entrée, le débit augmente. Les débits obtenus

sont suffisants pour utilisant des cheminées solaires de toit pour induire une ventilation en réel bâtiments.

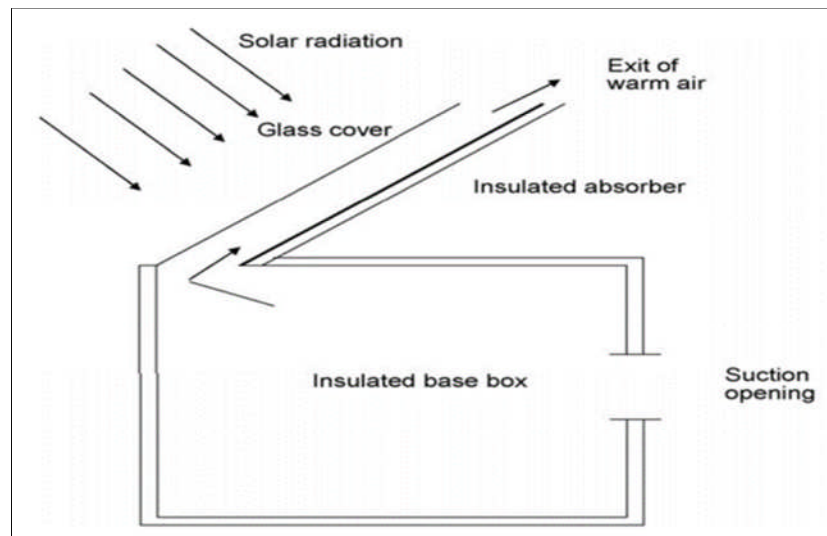


Figure II. 5 : Schéma du séchoir solaire avec cheminée solaire

II. 4. Utilisation du stockage thermique

Le stockage de l'énergie thermique consiste à préserver une quantité de la chaleur pour une utilisation ultérieure. La principale source d'énergie utilisée dans le fonctionnement d'un séchoir solaire est l'énergie solaire. La nature intermittente de cette dernière représente l'un des problèmes principaux du système de séchage solaire, car la plus part des produits alimentaire nécessite un séchage continu. Il est indispensable donc d'incorporer une unité de stockage dans les séchoirs solaires pour assurer un fonctionnement prolongé. Il existe deux types de stockage : Stockage de chaleur sensible et stockage de chaleur latente.

MOHANRAJ et al. (2009)[10] Ont étudié expérimentalement un séchoir solaire indirect à convection forcée destiné à sécher le chili. Le séchoir se compose d'une chambre de séchage et un capteur solaire (Fig.II.6).Le sable mélangé avec des déchets d'aluminium sont utilisés comme un stockage thermique. Le stockage thermique permet de prolongée le temps de séchage de 4 h par jour environ et maintient une température d'air presque constante. Le séchage du piment réduit la teneur en humidité d'environ 72,8% (base humide) à la teneur en humidité finale environ 9,1% en 24 h. L'efficacité moyenne du séchoir a été estimée d'environ 21%.



Figure II. 6 : La configuration expérimentale du séchoir solaire.

SANDALI et al. (2020) [11] ont étudié les performances d'un système de séchage solaire en armoire équipé d'un capteur solaire à tube sous vide caloduc et d'un système de stockage thermique avec application de PCM. L'analyse thermique du capteur solaire, l'efficacité du séchage, la modélisation CFD du système et l'évaluation de la qualité des tranches de pomme séchées ont été prises en compte. Les performances du séchoir ont été simulées et validées par des données expérimentales. Les expériences ont été conduites à trois débits d'air (0,025, 0,05 et 0,09 kg / s) pour le système de séchage avec et sans utilisation de PCM pour sécher des tranches de pomme d'une épaisseur de 5mm. Le résultat de l'analyse thermique a montré que l'utilisation de PCM augmente l'énergie thermique d'entrée d'environ 1,72% et 5,12% pour les débits d'air de 0,025 et 0,05 kg / s respectivement, mais une augmentation excessive du débit d'air (jusqu'à 0. 05 kg / s) diminue l'énergie thermique d'entrée. L'efficacité de séchage globale maximale était liée au système avec PCM au débit d'air de 0,025 kg / s et était de 39,9%. La simulation CFD du système de stockage et du séchoir a montré qu'il existe un bon accord entre le simulé et l'expérimental. L'utilisation de PCM n'a aucun effet négatif sur la qualité du produit séché. L'étude pourrait être utilisée comme méthode bon marché et efficace pour déshydrater les produits agricoles périssables.

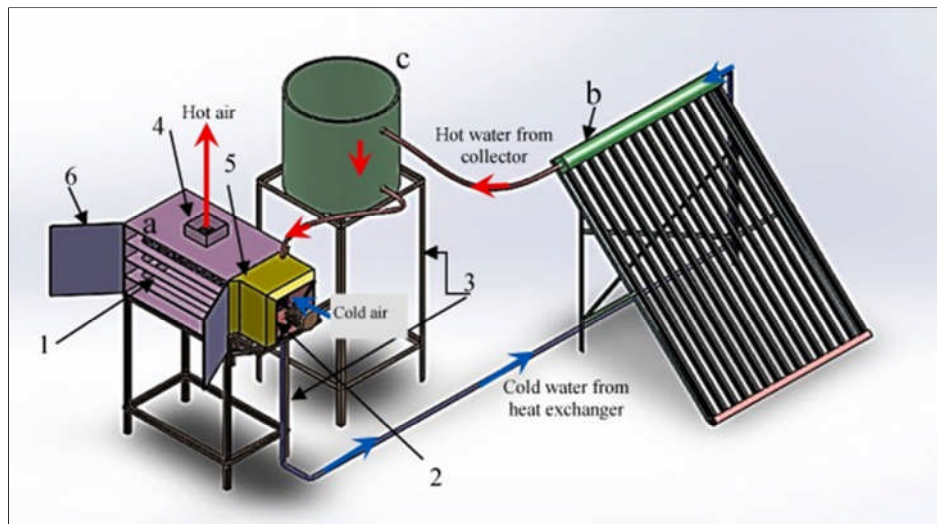


Figure II. 7 : Le schéma du séchoir solaire à armoire comprenant : a) chambre de séchage, b) capteur solaire ; c) Réservoir de stockage et conteneur PCM à l'intérieur.

II. 5. Modélisation mathématique des séchoirs solaires

La simulation numérique est très intéressante dans le domaine de séchage. Elle permet de tester l'influence des divers paramètres et de prédire le modèle de séchoir réalisant les meilleures performances, tout en évitant le coût de la construction. L'approche locale CFD est utilisée pour analyser les performances thermiques et l'optimisation des séchoirs solaires car elle prend en considération la complexité de la géométrie trouvée généralement dans les séchoirs solaires.

Tegenaw et al (2019) [12] ont étudié numériquement le transfert de chaleur en régime instationnaire dans un séchoir solaire pour le séchage des patates. La CFD est utilisé pour simuler l'écoulement d'air et le transfert de chaleur transitoire dans un domaine axisymétrique 2D. Le modèle de turbulence $k-\varepsilon$ a été adopté. Les patates ont été modélisées comme des milieux poreux avec des coefficients de résistance inertielle et visqueuse calculés. L'évolution de la vitesse d'écoulement au voisinage des deux claies de séchage a été utilisée pour expliquer la variation de la vitesse d'évolution thermique vers une température de fonctionnement stable.

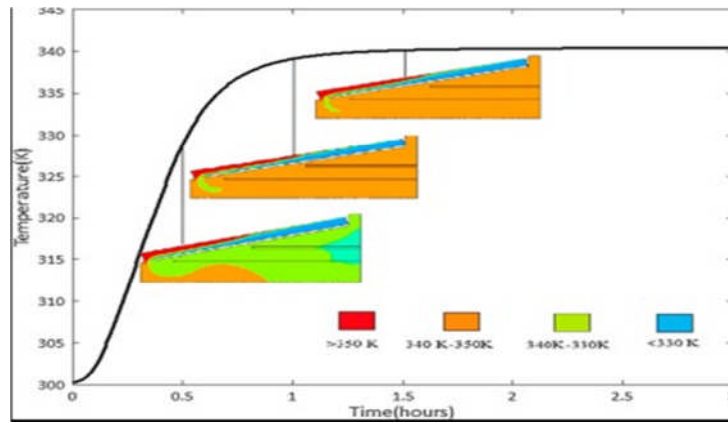


Figure II.8 : Représentation schématique des échanges thermiques entre les composants de la chambre solaire de séchage des aliments.

Moghimy et Al. (2021) [13] ont présenté une étude numérique et expérimentale du système de séchage. Un séchoir à fruits et légumes solaire à faible coût a été conçu, construit et testé pour une production à petite échelle. Une procédure d'optimisation a été réalisée pour convertir un séchoir à armoire directe largement utilisé en un nouveau séchoir indirect à l'aide de données expérimentales et de simulations numériques. Plusieurs expériences conçues accompagnées de simulations CFD utilisant la méthode des volumes finis ont été réalisées. Il a été conclu que la procédure de conversion proposée pouvait être réalisée en utilisant une plaque absorbante noire, une unité de circulation d'air et un collecteur d'air en nid d'abeille. La capacité de séchage du séchoir pourrait être augmentée de plus de 50% par rapport au type direct en ajoutant un nouveau plateau au séchoir optimisé. L'efficacité thermique du séchoir solaire proposé a été estimée à 16,4%, ce qui indique que la performance énergétique souhaitable du séchoir était supérieure à certaines conceptions disponibles de séchoirs solaires.

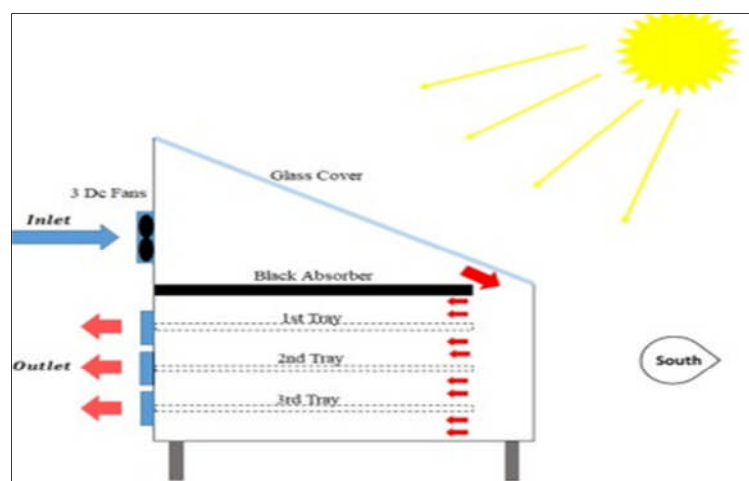


Figure II.9 : Schéma du flux d'air à l'intérieur du système indirect.

Vivekanandan et al. (2021) [14] ont analysé numériquement une nouvelle conception de séchoir. Afin de trouver la forme géométrique la plus appropriée qui donne la distribution la plus uniforme de l'écoulement à l'intérieur du séchoir, six géométries différentes de la chambre de séchage ont été étudiées et modélisées à l'aide du code Fluent (fig. II.10). A partir des résultats, il a été constaté que la forme idéale du séchoir solaire à effet de serre est Quonset Shape, il génère un maximum de 72°C. Les résultats numériques de la température de l'air ont été comparés aux données expérimentales obtenues dans le prototype et un bon accord a été constaté.

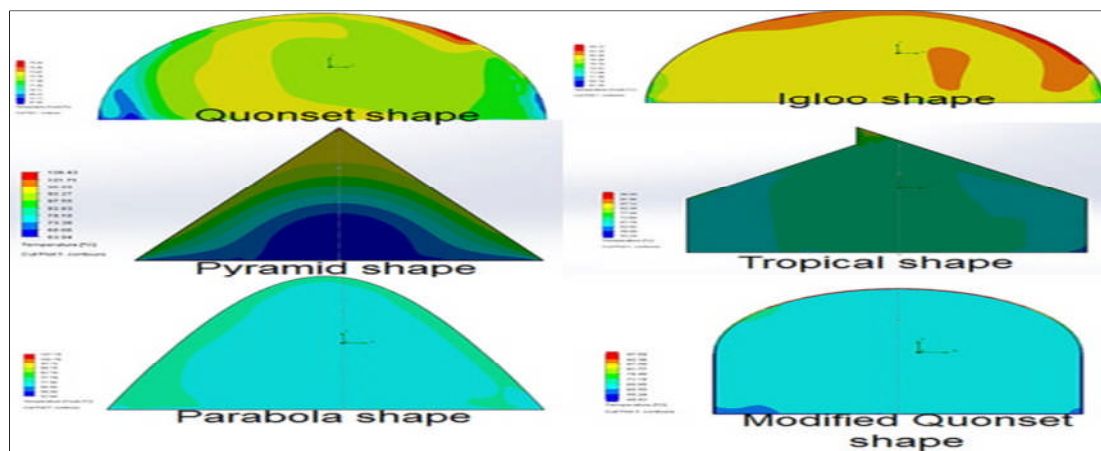


Figure II. 10 : Graphique de contour de température pour les 6 formes

Sumeet et al. (2020) [15]. Ont présenté une étude numérique sur les performances thermo-fluides d'une chambre de séchage de biomasse avec des configurations de plateaux innovantes en résolvant les équations gouvernantes de masse, quantité de mouvement, énergie et turbulence à l'aide de Fluent 17. L'effet du nombre de claies, de la longueur du claie, de la disposition de plateau et la disposition des trous sur la surface du plateau ont été examinées en détail. Un facteur d'amélioration a été présenté pour tenir compte du transfert de chaleur et de la perte de charge associée. Les résultats montrent que le transfert de chaleur et la chute de pression augmentent avec une augmentation du nombre de plateaux et du nombre optimal de plateaux sont décidés sur la base du facteur d'amélioration le plus élevé. Six agencements de plateaux différents ont été examinés et il s'est avéré qu'un agencement alternatif des parois latérales et arrière-avant emballées des plateaux est le plus efficace du point de vue des performances thermo-fluides.

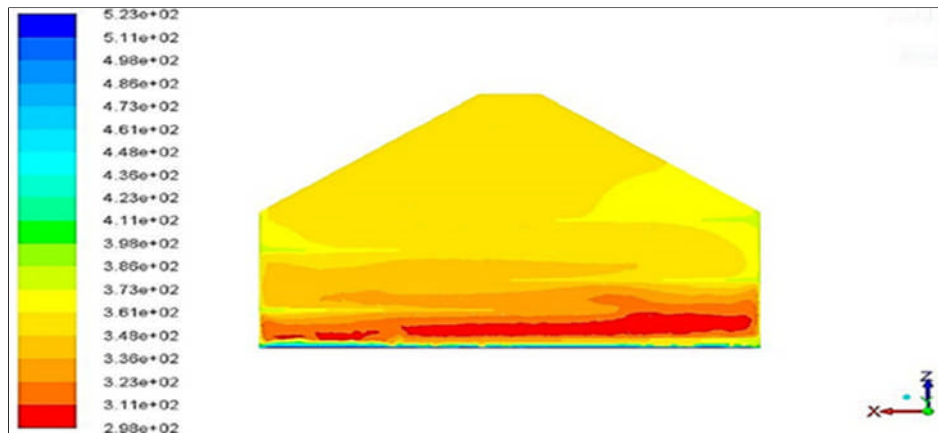


Figure II. 11 : Contour de température ($Y = 0$) de la chambre de séchage avec 5 plateaux.

Ali Ghaffari and Ramin Mehdipour. (2015) [16] ont présenté une étude numérique d'un séchoir solaire contenant trois composantes : capteur solaire, chambre de séchage et une cheminée sur le toit de la chambre de séchage. La combinaison des approches globale et locale est utilisée pour la modélisation du séchoir. Les résultats numériques étaient en accord avec les résultats expérimentaux. L'écoulement stationnaire et turbulent en 2D utilisant le modèle $k-\varepsilon$ a été simulé dans chambre de séchage en utilisant la CFD. Le séchage est non uniforme au niveau des claies à cause de la variation de température. ils ont proposé d'ajouter des chicanes dans la partie inférieure de la chambre de séchage pour améliorer la distribution de la température au niveau des claies (Fig.II.14). L'utilisation des chicanes a donc permis d'augmenter de l'efficacité de séchage puisque ils entraînent une diminution de la zone froide au centre de la chambre de séchage et une augmentation de la température d'air dans les autres parties.

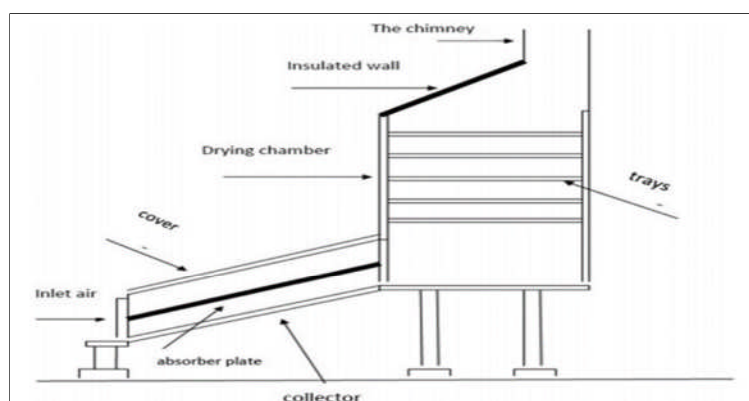


Figure II. 12 : Schéma de séchoir solaire indirect incluant les chicanes.

II. 6. Conclusion

L'objectif de ces travaux, c'est l'amélioration des performances des capteurs solaires et permettent d'obtenir de meilleures performances de ces systèmes.

CHAPITRE III: Modèle Physique, Formulation Mathématique et résolution numérique

Sommaire

III. 1.	Introduction.....	2
III. 2.	Géométrie du problème.....	2
III. 3.	Modélisation mathématique et conditions aux limites.....	3
III. 4.	Résolution numérique	9
III. 5.	Conclusion	10

III. 1. Introduction

Sur la base de la recherche bibliographique présentée dans le deuxième chapitre, nous proposons d'étudier un séchoir solaire indirect contenant un capteur solaire à air et une chambre de séchage. Parmi les modèles présentés, nous avons choisi le séchoir solaire étudié expérimentalement par Mohanraj et al. [10]. Notre travail porte sur une analyse d'un séchoir solaire similaire en utilisant l'outil numérique Fluent. Dans ce chapitre nous présentons la géométrie du modèle et les équations gouvernantes qui régissent le phénomène d'écoulement de l'air à travers le séchoir solaire. Les conditions aux limites imposées sur les extrémités de la géométrie sont aussi présentées.

III. 2. Géométrie du problème

Le modèle physique du séchoir solaire considéré est présenté sur la Fig III. 1. Il contient un capteur solaire et une chambre de séchage. Le capteur solaire incliné d'un angle de 29° a une surface de captation de 2 m^2 , il est constitué d'un absorbeur poreux en cuivre peint en noir pour augmenter sa capacité d'absorption du rayonnement, un vitrage en verre assurer la transmission du rayonnement solaire et aussi pour provoquer l'effet de serre et une isolation en bois pour minimiser les pertes thermiques vers l'extérieur. La chambre de séchage est l'endroit où on met le produit à sécher, elle est construite en bois.

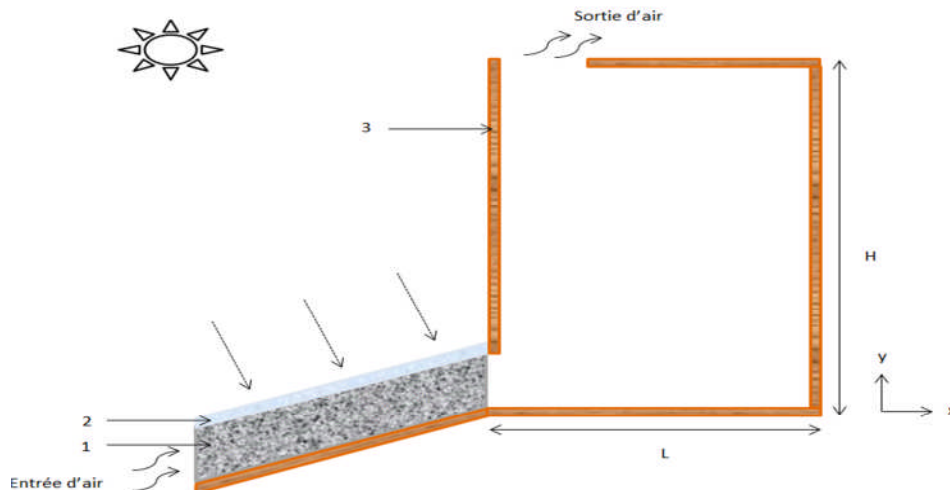


Figure III. 1: Schéma descriptif du séchoir solaire indirect à convection naturelle (1) absorbeur poreux, (2) vitrage, (3) chambre de séchage.

La majorité du rayonnement solaire transmis par le vitrage est absorbé par l'absorbeur grâce à son grand coefficient d'absorption. L'absorbeur transforme le rayonnement solaire en chaleur et la

transférée à l'air dans le milieu poreux, l'air chaude monte vers la chambre de séchage créant une aspiration naturelle d'air. Les dimensions du séchoir solaire étudié et les propriétés thermophysiques des différents composants sont présentées dans les tableaux III. 1 et III. 2, respectivement.

Tableau III. 1: Paramètres de conception du séchoir solaire.

Paramètres	Valeur (m)	
	chambre de séchage	capteur solaire
Longueur (L)	1	2
Hauteur (H)	1,5	0,96
Largeur	1	1
Entrée d'air	0,027	0,027
Sortie d'air	0,12	0,027

Tableau III. 2: Propriétés thermophysiques.

	ρ (Kg/m ³)	Cp (J/Kg.K)	λ (W/m.K)	$\mu * 10^{-5}$ (kg/m.s)	épaisseur (m)		α	ε	τ
					chambre de séchage	capteur solaire			
Air	1,225	1006,43	0,0242	1.983	/	/	/	/	/
Bois	800	2093	0,16	/	0,002	0,002	/	/	/
verre	2530	720	1,2	/	/	0,005	0,05	0,5	0,9
Cuivre	8930	382	399	/	/	0,027	0,15	0,88	/

III. 3. Modélisation mathématique et conditions aux limites

III. 3. 1. Hypothèses simplificatrices

Les hypothèses simplificatrices suivantes ont été adoptées:

- L'écoulement est supposé bidimensionnel, instationnaire et en régime turbulent.
- Le fluide est supposé incompressible, visqueux et newtonien.

- Les propriétés thermophysiques de l'air et des composants du séchoir sont considérées constantes.
- Le rayonnement entre les parois internes du séchoir est négligeable.
- Le milieu poreux est isotrope, homogène, perméable et non déformable, il est saturé par un seul fluide (air) qui est en équilibre thermique avec la matrice poreuse.
- L'écoulement d'air obéit à l'approximation de Boussinesq $\rho = \rho_0$ partout sauf dans le terme de gravité où elle varie selon la relation :

$$\rho \vec{g} = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)] \vec{g} \quad \text{III.1}$$

ρ_0 : Masse volumique à la température de référence T_0 et β est le coefficient d'expansion thermique, évalué à T_0 .

III. 3. 2. Modèle mathématique

Les équations régissant l'écoulement d'air à travers le système de séchage sont basées sur les principes de la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. Le modèle $k-\epsilon$ epsilon standard a été choisi pour décrire la turbulence. Bien qu'il existe d'autres modèles de turbulence. Le modèle $k-\epsilon$ reste la référence de l'industrie. Sur la base des hypothèses utilisées, les équations s'écrivent comme suit :

a) Dans l'air

- Equation de la continuité

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

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

- Equation de la quantité de mouvement

Suivant l'axe ox

$$\rho \left(\frac{\partial(u)}{\partial t} + \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(vu)}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad \text{III. 3}$$

Suivant l'axe oy

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \rho g \beta (T - T_0) \quad \text{III. 4}$$

- Equation de l'énergie cinétique turbulente k

$$\rho \left(\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial(ku)}{\partial x} + \frac{\partial(kv)}{\partial y} \right) = \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \left(\frac{\partial^2 k}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 k}{\partial y^2} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad \text{III. 5}$$

- Equation du taux de dissipation ε

$$\rho \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial(\varepsilon u)}{\partial x} + \frac{\partial(\varepsilon v)}{\partial y} \right) = \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \left(\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial y^2} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (c_1 G_k - c_2 \rho \varepsilon) \quad \text{III. 6}$$

Avec

$$\mu_t = \frac{\rho c_\mu k^2}{\varepsilon} \quad \text{et} \quad G_k = \frac{\mu_t}{\rho} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left\{ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right\}$$

Les constantes intervenant dans le modèle k - ε sont données par: $c_\mu=0,09$, $c_1 = 1,44$, $c_2 = 1,92$; $\sigma_k = 1$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$ et $\sigma_t = 1$

- Equation d'énergie

$$\rho \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{\partial(vT)}{\partial y} \right) = \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad \text{III. 7}$$

Pr est le nombre de Prandtl turbulent.

b) Dans l'absorbeur poreux

Un milieu poreux se caractérise par un certain nombre de grandeurs moyennes, géométriques ou statistiques :

- La porosité (δ) qui caractérise le rapport du volume des vides au volume apparent du milieu poreux.
- La perméabilité (K) qui mesure l'aptitude d'un milieu poreux à se laisser traverser par un fluide sous l'effet d'un gradient de pression ou d'un champ de gravité. Cette grandeur est très largement variable selon les milieux et n'est généralement accessible que par voie expérimentale.

Les lois des écoulements en milieu poreux ne constituent que des approximations. On s'intéresse en général qu'au phénomène à l'échelle macroscopique. Plusieurs lois phénoménales sont utilisées, la plus importante est la loi de Darcy. Dans cette étude, l'écoulement dans le milieu poreux est gouverné par le modèle de Brinkman–Forchheimer Extended Darcy dont les équations gouvernantes peuvent s'écrire comme suit :

Les milieux poreux sont modélisés par l'addition d'un terme de source (S_i) aux équations de la conservation de quantité de mouvement :

- Equation de conservation de la masse

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad \text{III. 8}$$

- Equation de conservation la quantité de mouvement

Suivant l'axe ox

$$\frac{\rho}{\delta} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\rho}{\delta^2} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu_t}{\delta} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \mu \frac{u}{K} - \frac{\rho C_F}{\sqrt{K}} |\bar{u}| u \quad \text{III. 9}$$

Suivant l'axe oy

$$\frac{\rho}{\delta} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\rho}{\delta^2} \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu_t}{\delta} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \mu \frac{v}{K} - \frac{\rho C_F}{\sqrt{K}} |\bar{v}| v + \rho g \beta (T - T_0) \quad \text{III. 10}$$

C_F est le facteur de résistance inertiel

$$K = \frac{D_p^2 \delta^3}{150(1-\delta)^2} \quad \text{et} \quad C_F = \frac{3,5(1-\delta)}{D_p \delta^3} \quad \text{III. 11}$$

- Équation de conservation d'énergie

Dans cette étude, nous avons utilisé le modèle d'équilibre thermique local, la phase solide (cuivre) et l'air dans les pores sont supposés en équilibre thermique :

$$(\rho C_p)_m \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho C_p)_m \left(u_f \frac{\partial T}{\partial x} + u_f \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda_m \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + S_T \quad \text{III. 12}$$

La masse volumique, la capacité calorifique et la conductivité thermique du milieu poreux sont calculées comme suit :

$$(\rho C_p)_m = \delta (\rho C_p)_f + (1-\delta) (\rho C_p)_s \quad \text{III. 13}$$

$$\lambda_m = \delta \lambda_f + (1-\delta) \lambda_s \quad \text{III. 14}$$

c) Equation de conservation d'énergie dans les solides

En ce qui concerne le transfert de chaleur dans les milieux solides (vitrage, isolation, sable + aluminium), l'équation gouvernante s'écrit :

$$(\rho_i C_{pi}) \frac{\partial T_i}{\partial t} = \lambda_i \left(\frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial y^2} \right) + S_T \quad i = 1, 2, 3 \quad \text{III. 15}$$

Le terme source S_T représente le vitrage. Afin de tenir compte du flux radiatif transmis par le vitrage et absorbé par l'absorbeur, une génération volumique et uniforme de chaleur $G_s \tau_v \alpha_a$ est appliquée dans le domaine de l'absorbeur poreux et la génération volumique appliquée au vitrage est $(G_s \alpha_v)$.

III. 3. 3. Conditions initiales et les conditions aux limites

a) Conditions climatiques

Les données climatiques d'une journée de mois de juillet dans la région nord-ouest de l'Algérie (Tlemcen) ont été choisies. Une base de données climatique [16] fournit les données horaires moyennes (température ambiante, vitesse du vent...) pour n'importe quel jour de l'année. L'évolution horaire du rayonnement solaire global reçu sur un plan incliné de 29° pour le mois de juillet a été choisi à partir de la Ref. [17].

L'évolution horaire de la température de l'air ambiant et du rayonnement solaire est présentée dans la Fig III. 2, et approximé par les équations III. 17 et III. 18, respectivement. Ces modèles mathématiques ont été proposés par W. Chen [5] et modifiés en fonction des données de la région de Tlemcen.

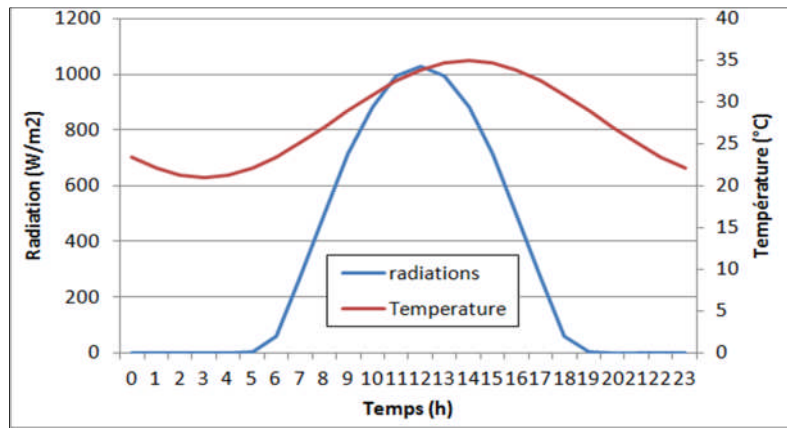


Figure III. 2: l'évolution horaire de la température et le rayonnement solaire.

$$T_a(t) = 28 + 7 \cos \left[\frac{\pi}{11} (t - 14) \right] \quad \text{III. 16}$$

$$G_s = 1068 \sin \left[\pi \frac{t-6}{14.5} \right] \quad \text{III. 17}$$

Le séchoir solaire est exposé au rayonnement solaire durant la période entre 5h et 19h.

b) Condition 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 appliquées dans notre étude sont illustrées dans la Fig III. 3.

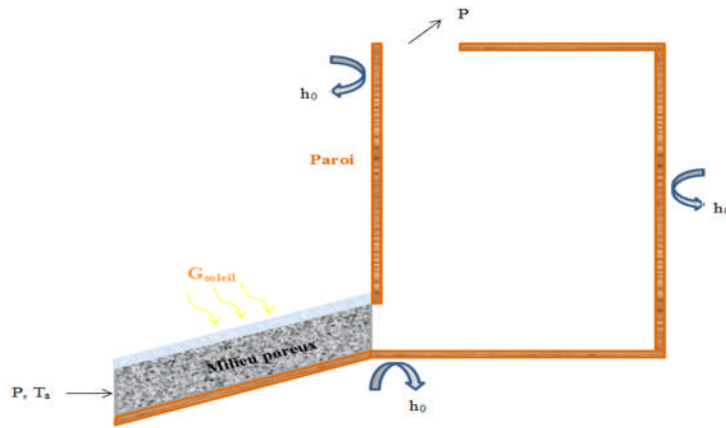


Figure III. 3: Présentation des conditions aux limites.

❖ **Les parois de la chambre et l'isolation du capteur (Bois):**

Les surfaces latérales extérieures du séchoir solaire sont exposées à la convection (pertes convectives). Le flux thermique perdu par convection peut être évalué par :

$$-\lambda_b \frac{dT}{dn} = h_0(T_b - T_a) \tag{III. 18}$$

T_b est la température des parois extérieures et T_a est la température ambiante. h_0 désigne le coefficient d'échange par convection avec l'air ambiant.

$$h_0 = 2.8 + 3V_v \tag{III. 19}$$

V_v est la vitesse du vent prise égale à 2 m/s (vitesse moyenne du vent à Tlemcen durant la période du mois de juillet).

❖ **Vitrage :**

Un transfert de chaleur conjugué convection est imposé sur la paroi extérieure du vitrage.

$$-\lambda_v \frac{dT}{dn} = h_0(T_v - T_a) \quad \text{III. 20}$$

T_v , α_v et τ_v désigne la température, coefficient d'absorption et coefficient de transmission du vitrage, respectivement.

❖ **A l'entrée de la chambre :**

La température ambiante et la pression atmosphérique sont imposées à l'entrée du séchoir solaire.

$$T_{\text{entrée}} = T_a, P_{\text{entrée}} = 10^5 \text{ Pa} \quad \text{III.21}$$

❖ **A la sortie de la chambre**

La pression atmosphérique est imposée à la sortie de la cheminée solaire

$$P_{\text{sortie}} = 10^5 \text{ Pa} \quad \text{III. 22}$$

❖ Une condition dynamique d'adhérence à la paroi ($u = v = 0$) est imposée sur toutes les parois intérieures du séchoir.

III. 4. Résolution numérique

Dans le présent travail, le calcul sera effectué à l'aide du code de calcul « FLUENT » 6.2 qui est basé sur la méthode des volumes finis.

Les termes convectifs et diffusifs sont discrétisés avec un schéma amont du second ordre (second order upwind). L'algorithme SIMPLE de Patankar et Spalding (1972) a été utilisé pour résoudre le couplage vitesse-pression. La solution était considérée comme convergente lorsque les résidus étaient de l'ordre de 10^{-6} pour les quantités de continuité, de quantité de mouvement, de turbulence et d'énergie. Le taux de production de chaleur par unité de volume dans l'absorbeur et la variation journalière de la température sont introduits dans Fluent par une fonction utilisateur (UDF). Toutes les simulations ont été réalisées sur un processeur i3, 2,16 GHz et 4 Go de mémoire.

III. 5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la géométrie du problème ainsi que les propriétés physiques des différents composants du séchoir solaire. Ensuite, nous avons spécifié les équations mathématiques gouvernantes qui régissent le phénomène d'écoulement d'un fluide à l'intérieur d'un capteur solaire et la chambre de séchage. Enfin, nous avons spécifié les conditions aux limites de toutes les frontières de la géométrie. Dans le chapitre suivant, nous allons présenter les résultats de la simulation numérique afin de mieux comprendre le comportement de l'écoulement d'air à travers le séchoir solaire.

CHAPITRE IV:

Résultats et interprétations

Sommaire

IV.1.	Introduction	39
IV.2.	Présentation du code de calcul.....	39
IV.3.	Etude dynamique et thermique du capteur solaire (cas stationnaire)	40
IV.4.	Etude dynamique et thermique du séchoir solaire (cas instationnaire)	49
	56
IV.5.	Conclusion	62

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons une validation du modèle physique et mathématique présenté dans le chapitre précédent en analysant l'indépendance du maillage par la comparaison des résultats avec des travaux publiés sur le sujet. Ensuite, nous présentons les résultats de la simulation numérique, mettant en évidence l'effet d'intégrer une unité de stockage thermique sur le comportement du séchoir solaire.

IV.2. Présentation du code de calcul

Afin d'analyser le comportement de l'air et son couplage avec les différents composants du séchoir solaire, nous avons utilisé le code commercial Fluent, qui est très adapté pour résoudre les équations de conservation dans des géométries complexes en tenant compte des différents couplages thermiques à l'intérieure du système de séchage étudié. Pour les différentes simulations réalisées, nous avons utilisé un maillage structuré avec des volumes quadrilatères du domaine calcul du séchoir solaire. La Fig IV. 1 donne un aperçu du maillage utilisé.

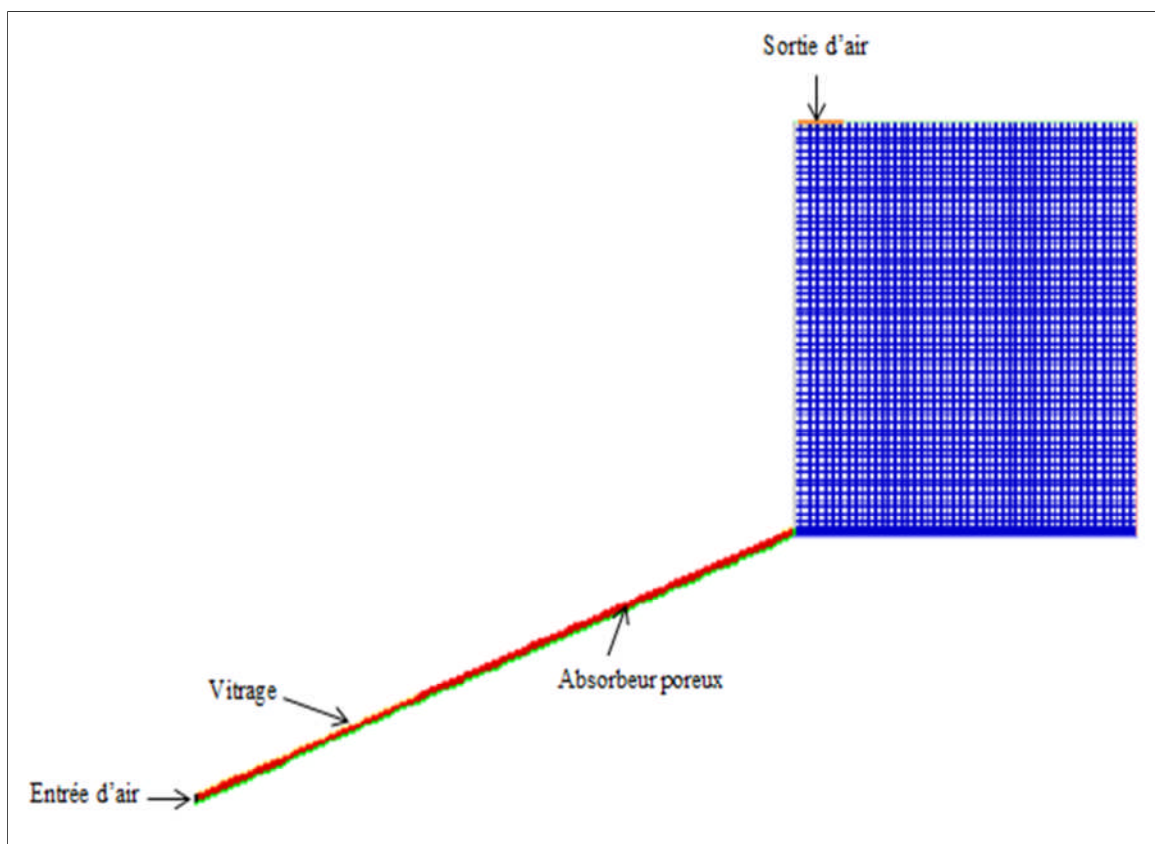


Figure IV. 1: Maillage de séchoir solaire avec Gambit.

IV.3. Etude dynamique et thermique du capteur solaire (cas stationnaire)

L'absorbeur est le cœur du capteur solaire. Il transforme l'énergie solaire en chaleur avant de la transférer au fluide colporteur. Pour pouvoir améliorer les performances du capteur du séchoir solaire, nous avons l'étudié séparément en régime stationnaire.

Le comportement thermique et dynamique d'un capteur solaire varie avec sa géométrie. A cet effet, deux modèles différents du capteur solaire ont été étudiés. Capteur solaire avec absorbeur plat et capteur solaire avec absorbeur en mousse métallique considéré comme milieu poreux. La géométrie des capteurs solaires étudiés est donnée sur les figures: IV. 2 et IV. 3.

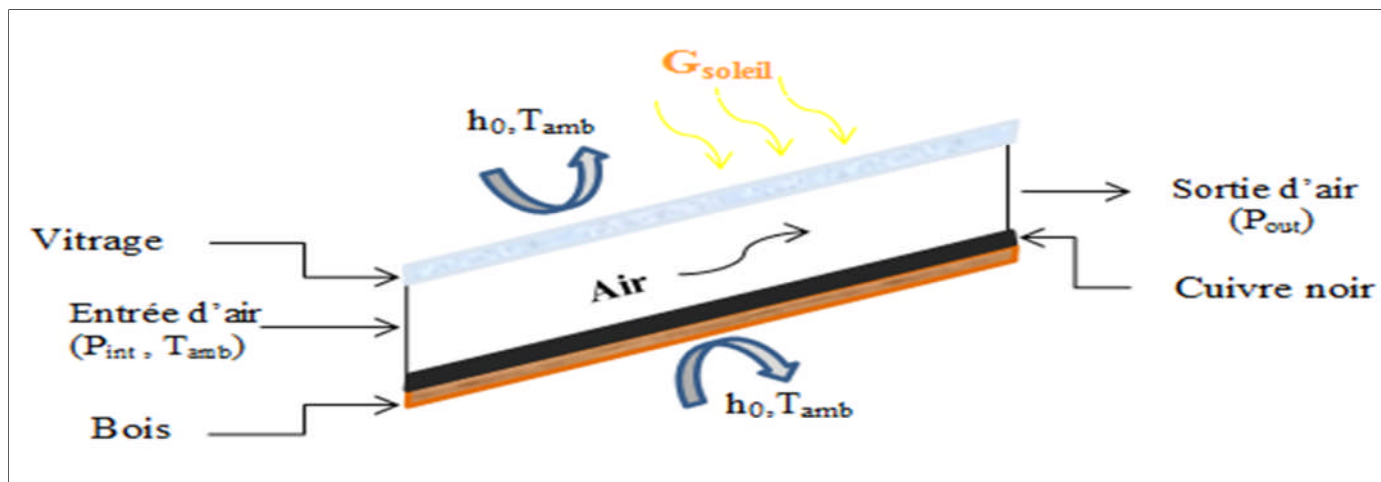


Figure IV. 2: Capteur solaire avec absorbeur plat

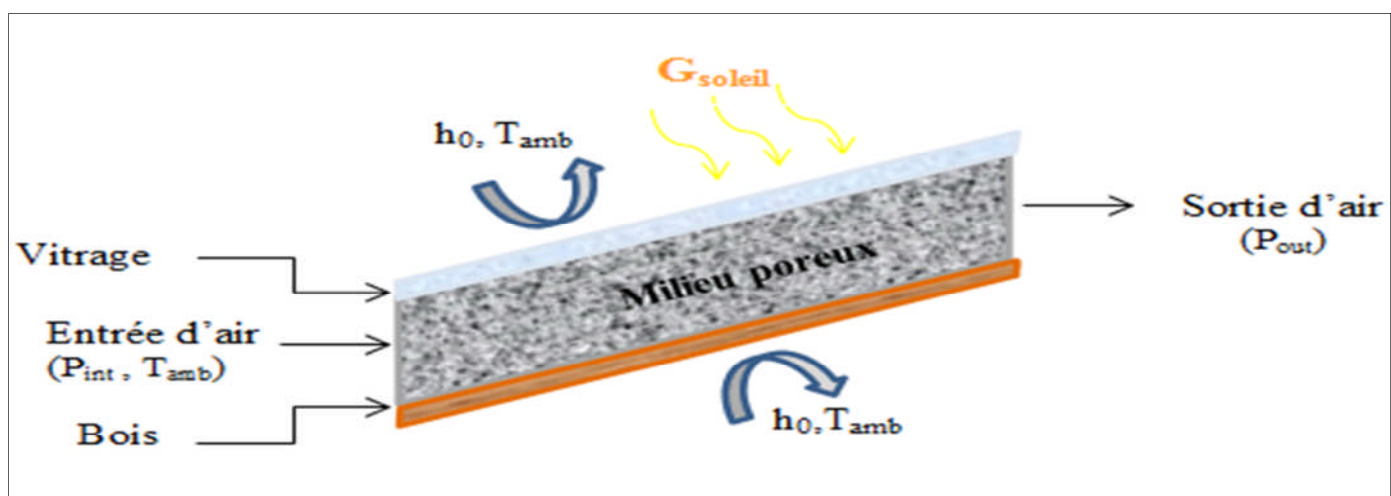


Figure IV. 3: Capteur solaire avec absorbeur poreux

Les deux capteurs solaires ont les mêmes dimensions 2 x 1 x 0.034 m. pour pouvoir comparer leurs performances et l'effet de l'ajout d'une mousse métallique. L'épaisseur de l'absorbeur plat et poreux est 0.002 m et 0.027 m, respectivement. Les températures de l'air à la sortie des deux capteurs solaires ont été comparées pour déterminer l'effet de l'ajout de la mousse métallique sur les performances des capteurs.

IV. 3. 1. Test de maillage

Une étude d'indépendance du maillage a été réalisée pour le capteur plat afin de vérifier l'exactitude des résultats numériques. La température moyenne de l'air à la sortie du capteur était le paramètre choisi à analyser. Pour cela nous avons analysé cinq grilles qui correspondent à un nombre total de 2925, 3935, 4945, 5955 et 6965 nœuds. le maillage généré est raffiné près de l'absorbeur pour obtenir des résultats fiables.

Comme on le voit dans le tableau IV. 1, les écarts obtenus par les cinq grilles de maillage sont faibles, nous avons donc adopté pour nos calculs le maillage avec 4945 nœuds qui offre un bon accord entre la précision et le temps du calcul.

Tableau IV. 1:Test d'indépendance du maillage: comparaison de la température à la sortie du capteur pour différents maillages

Nombre de nœuds	2925	3935	4945	5955	6965
Température (°C)	64,9137	65,0286	65,3064	65,6218	65,7968

IV. 3. 2. Validation du model numérique

Les résultats numériques actuels ont été comparés aux résultats expérimentaux d'un séchoir solaire étudié par Mohanraj et Al [9] et présenté par Jyotirmay et al [8].

La Fig IV. 4 montre la variation de la température moyenne à la sortie du capteur solaire pour différents longueur du capteur (1; 1,5 et 2 m). Cette figure montre un bon accord avec les résultats expérimentaux obtenus par Mohanraj avec une erreur relative moyenne observée de l'ordre 3.10 %.

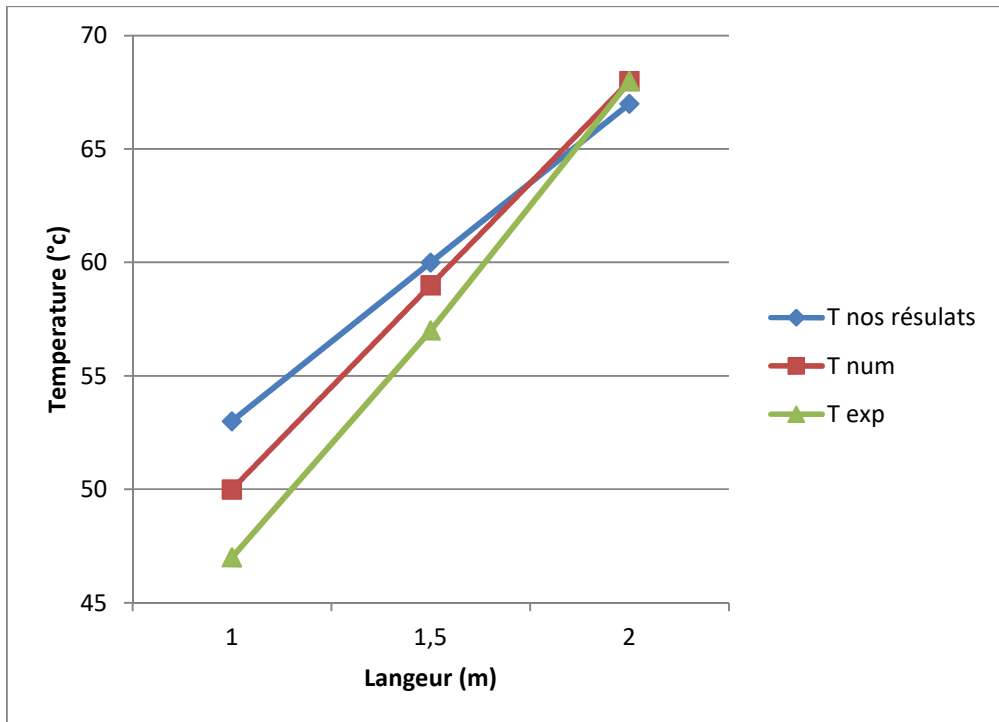
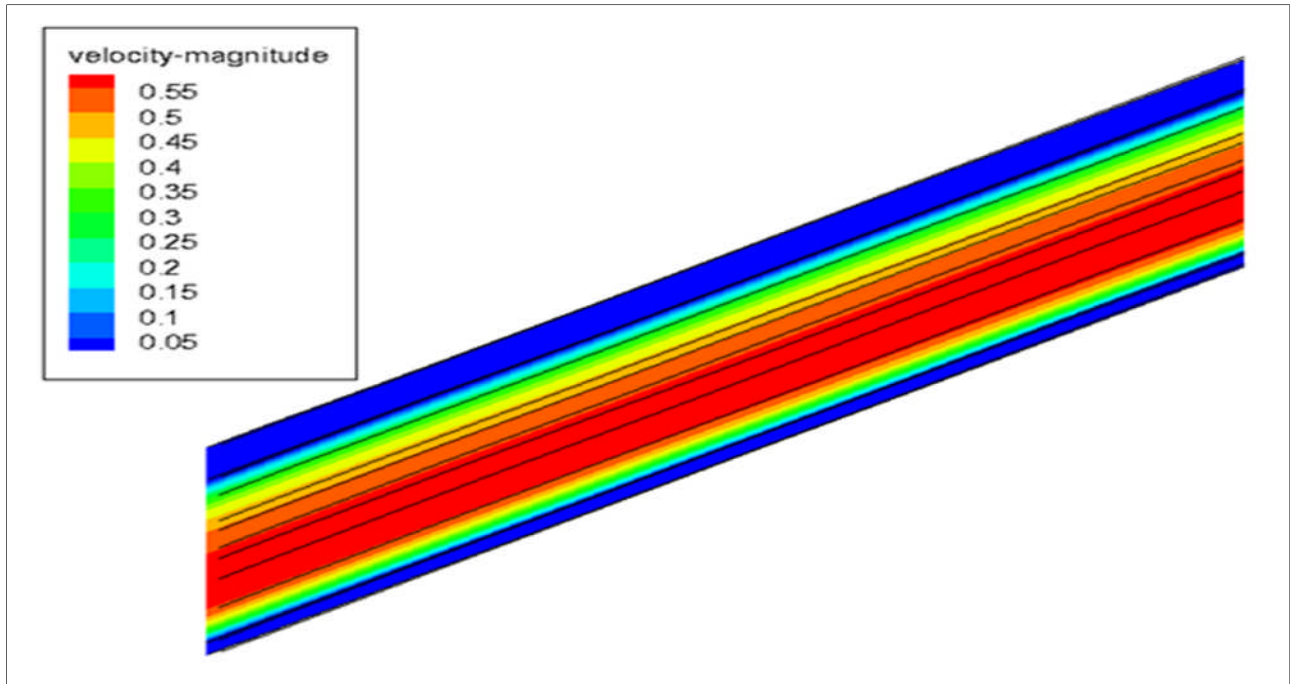


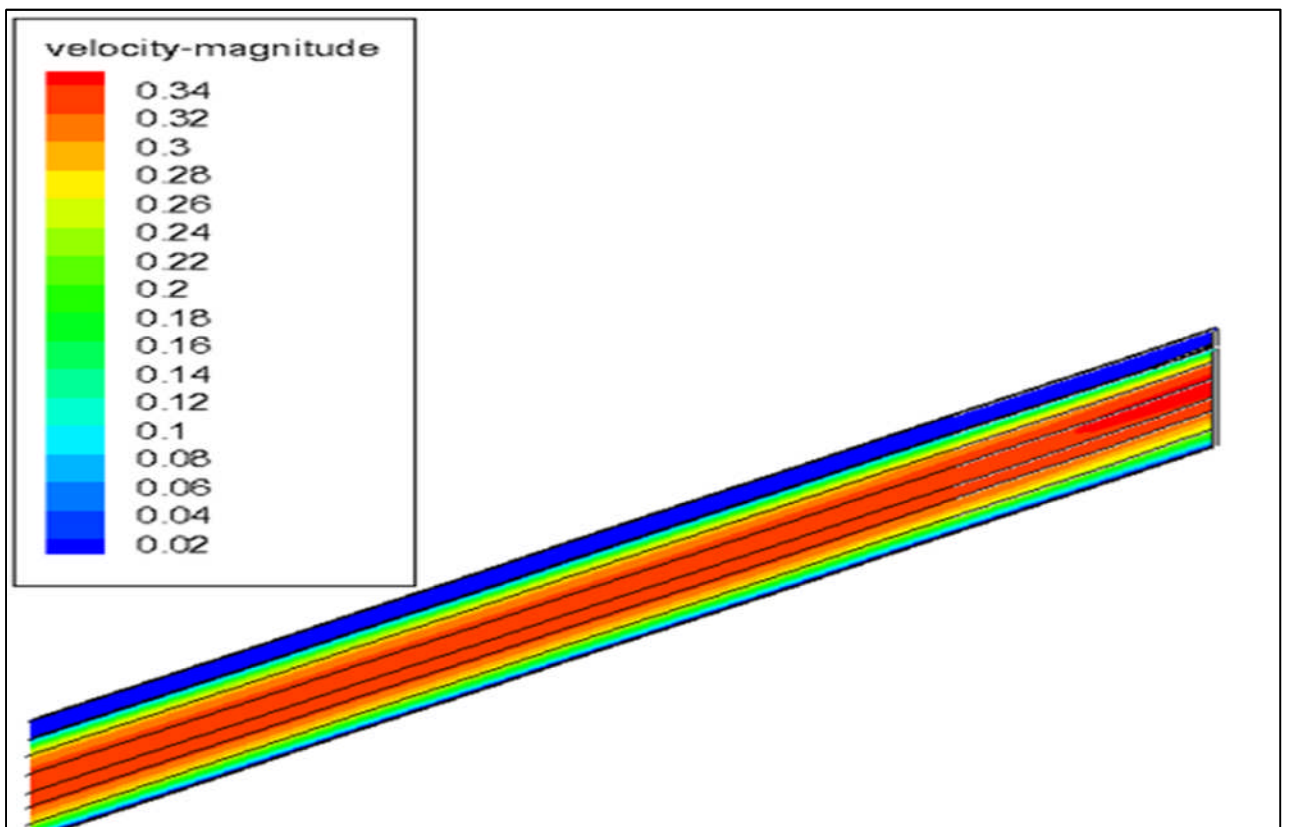
Figure IV. 4: Comparaison de la température du nos résultats avec les résultats expérimentaux et numériques de MOHANRAJ.

IV. 3. 3. Comportement dynamique des deux capteurs solaires

Les Fig IV. 5 montres les contours des vitesses et les lignes de courant au sein des deux capteurs. Les deux modèles montrent un comportement similaire de l'air, il est aspiré de l'extérieur à travers l'orifice d'entrée et est orienté vers le haut grâce à l'effet de la flottabilité. Les lignes de courants sont ordonnées et parallèles.



(a) Absorbeur plat



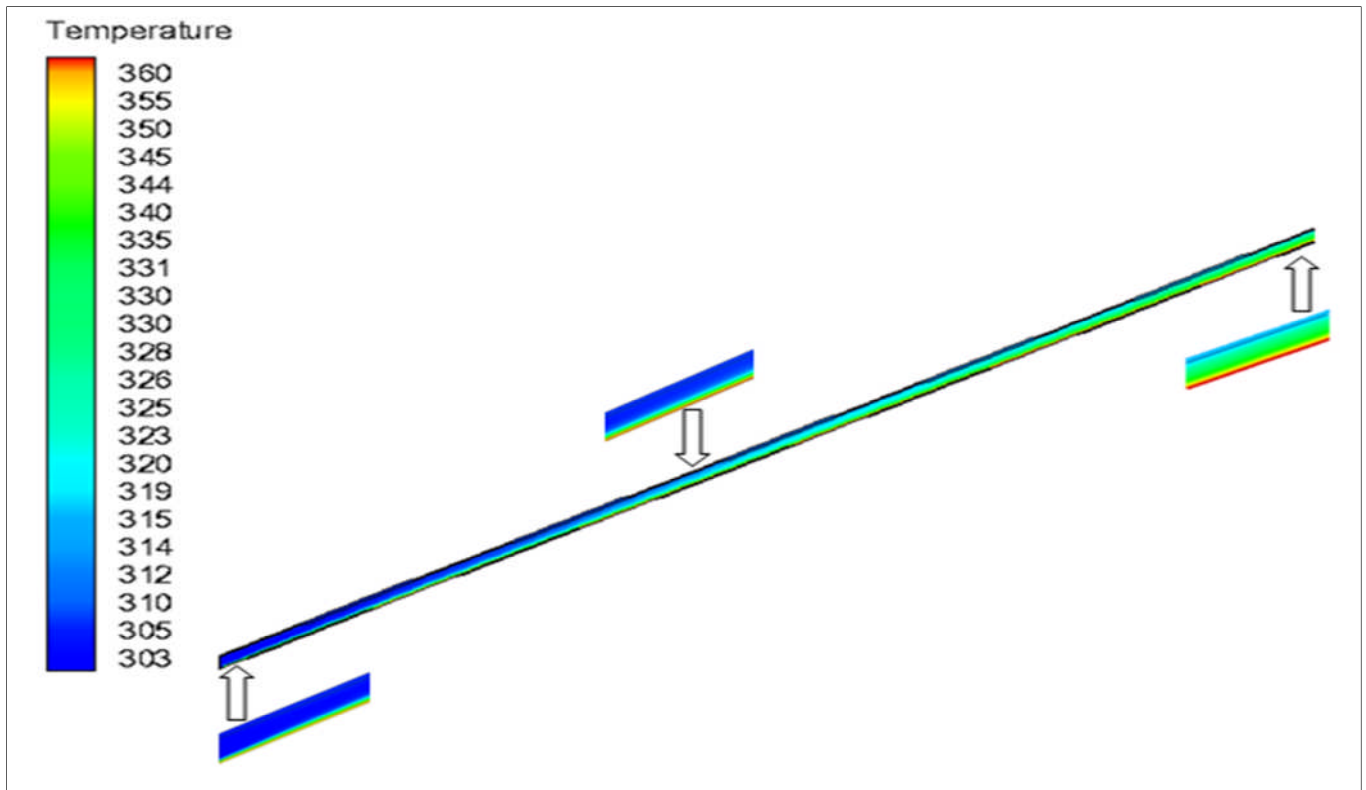
(b) Absorbeur poreux

Figure IV. 5: Les contours des vitesses et les lignes de courant pour les deux modèle du capteur (a) avec absorbeur plat, (b) avec absorbeur poreux.

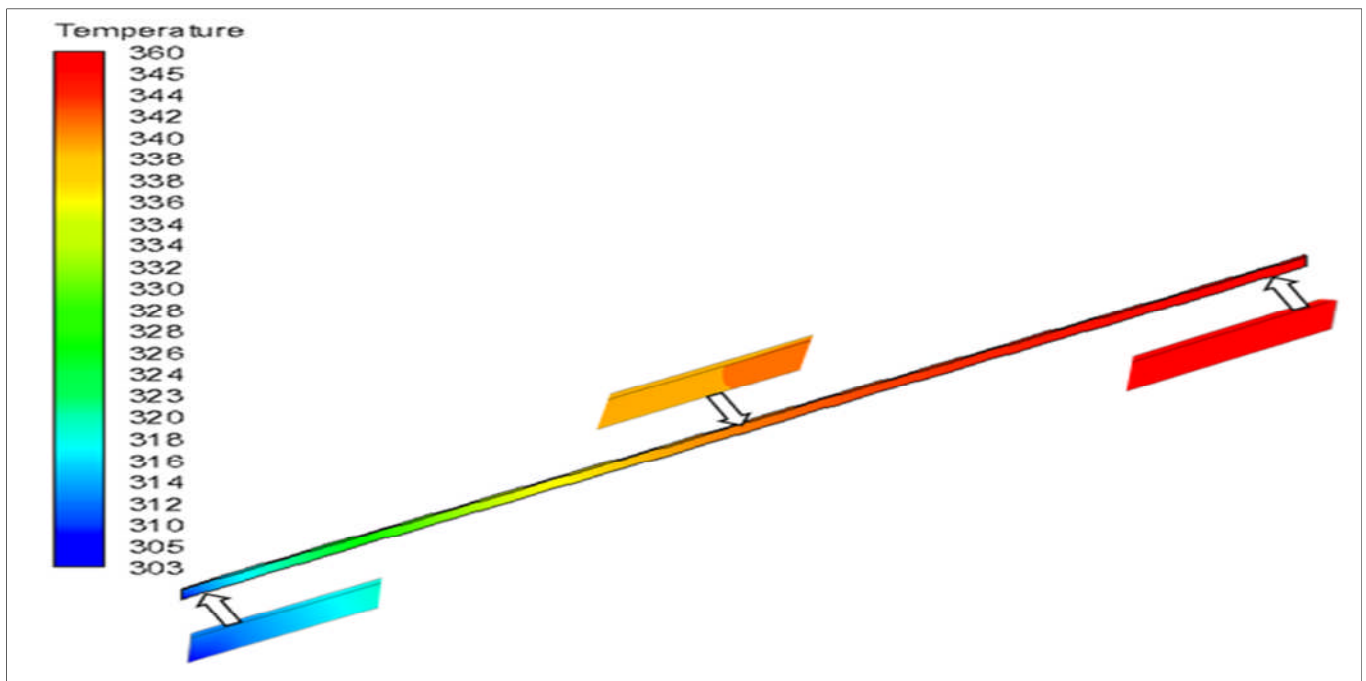
Les contours de vitesse montrent une distribution ordinaire de la vitesse pour les deux modèles. Les vitesses sont élevées au centre dans la conduite et devient nulle aux voisinages des parois. La vitesse maximale peut atteindre 0.6 m/s dans le capteur avec absorbeur plat et 0.35 m/s pour le capteur avec absorbeur poreux.

IV. 3. 4. Comportement thermique des deux capteurs solaires

La Fig IV. 6. présentes le champ de température pour les deux capteurs pour un rayonnement solaire de 1030 W/m^2 et une température ambiante égale 303 K. Les champs de températures montre une augmentation graduelle de la température de la zone de l'absorbeur vers le vitrage dans les deux modèles. Cela est évident, l'absorbeur absorbe le rayonnement solaire et transmet la chaleur à l'air dans le capteur. L'absorbeur représente donc la zone la plus chaude dans les deux modèles du capteur. La figure montre aussi que les températures dans le cas d'un capteur avec absorbeur poreux sont plus importantes, dans la mousse métallique transfert mieux l'énergie thermique vers l'air, cela est due à l'augmentation de la surface d'échange dans. Les températures enregistrées sur les absorbeurs sont 362.35 K pour l'absorbeur plat et 345.43 K pour l'absorbeur poreux.



(a) capteur avec absorbeur plat



(b) capteur avec absorbeur poreux

Figure IV. 6: Distribution de champ de température dans les capteurs solaire.

IV. 3. 5. Comparaison entre capteur avec absorbeur plat et poreux

La Fig.7 montre les profils de la vitesse à la sortie des deux capteurs. Comme on peut le voir, le changement de l'absorbeur plat par la mousse métallique a provoqué une réduction de la vitesse de l'air le long du capteur. Ce fait augmente le temps de séjour de l'air dans le capteur. Par conséquent, l'air peut gagner beaucoup d'énergie thermique par rapport au capteur avec absorbeur plat. Les vitesses moyennes de l'air à la sortie capteur sont 0.23 m/s pour le capteur poreux et 0.37 m/s pour le capteur avec absorbeur plat. Donc l'utilisation d'une mousse métallique a réduit la vitesse de l'écoulement d'air par 46.6%.

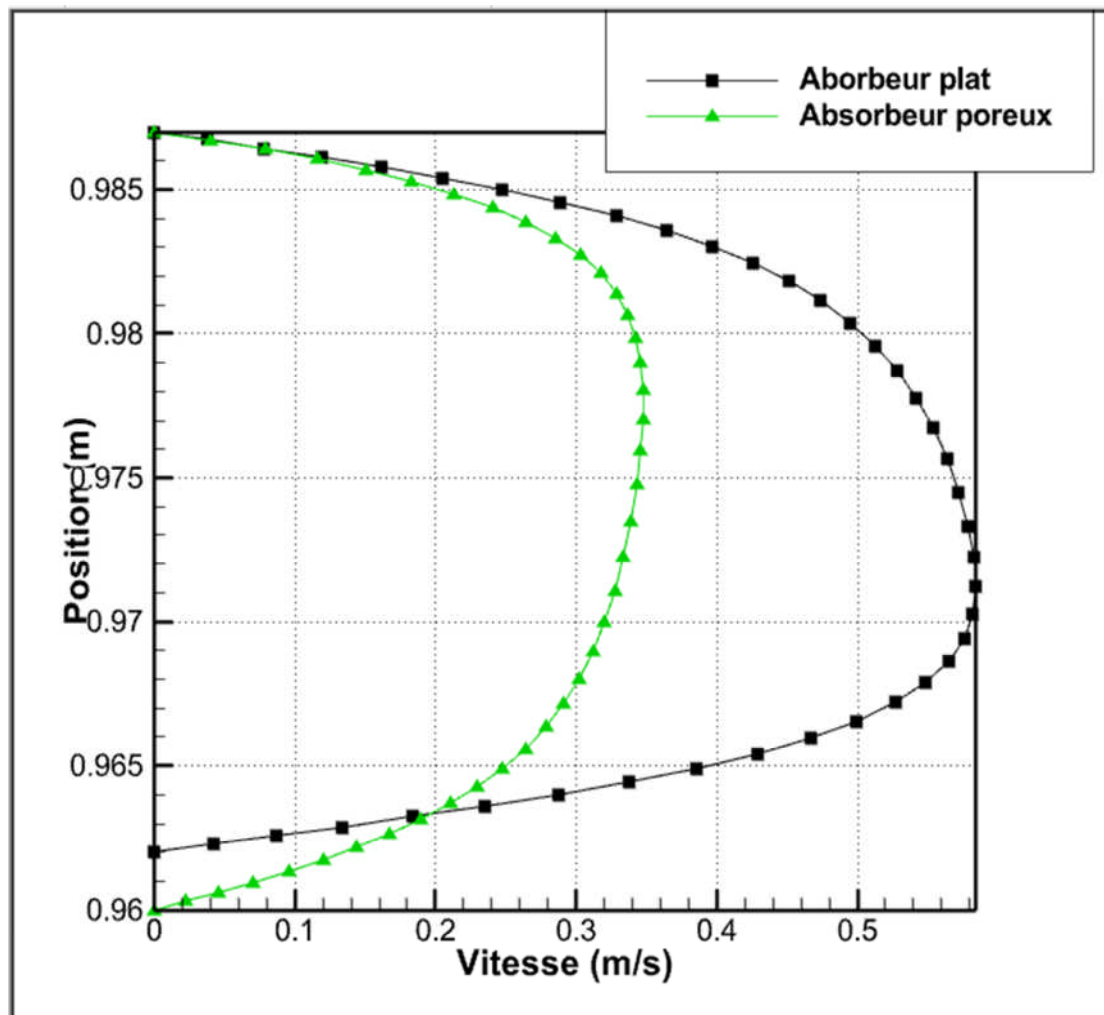


Figure IV. 7: Profils des vitesses de l'air au niveau de la sortie des deux capteurs

La Fig. 8 montre les profils de la température à la sortie des deux capteurs. On remarque que la température dans le capteur avec absorbeur poreux est plus homogène, elle est presque constante le long de la sortie. Pour le cas de l'absorbeur plat, la température est maximale au

voisinage de l'absorbeur et minimale au voisinage du vitrage. Les températures moyennes à la sortie du capteur sont 329.19K pour le capteur plat et 345.32K pour le capteur avec absorbeur poreux. Donc l'utilisation d'une mousse métallique a augmenté la température de l'air à la sortie du capteur par 25.16 %.

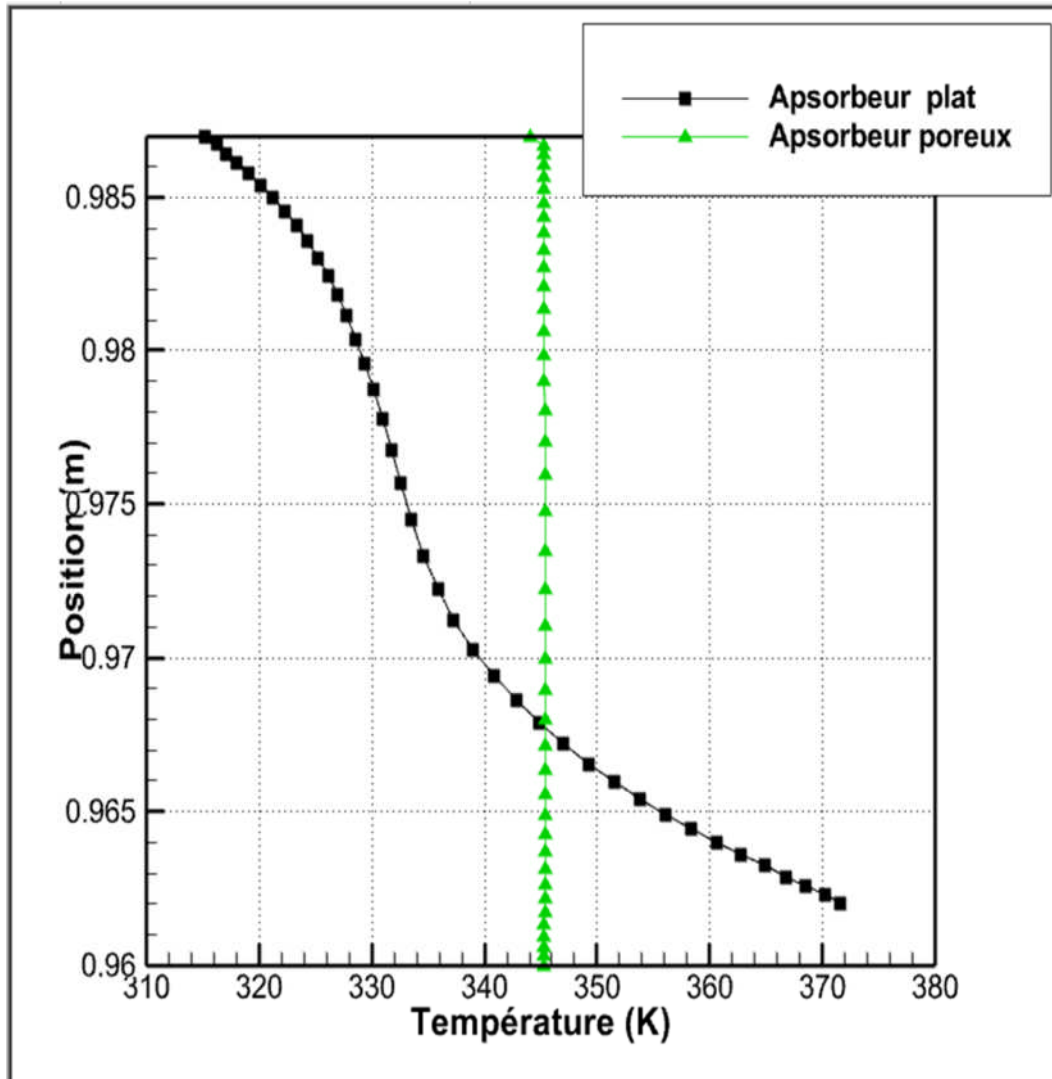


Figure IV. 8: profiles de température de l'air au niveau de la sortie des deux capteurs.

D'après ces observations on conclut que le capteur poreux est plus performant car il assure des températures plus importantes, donc on va l'adopter pour la suite de travail.

IV. 3. 6. Effet de la porosité

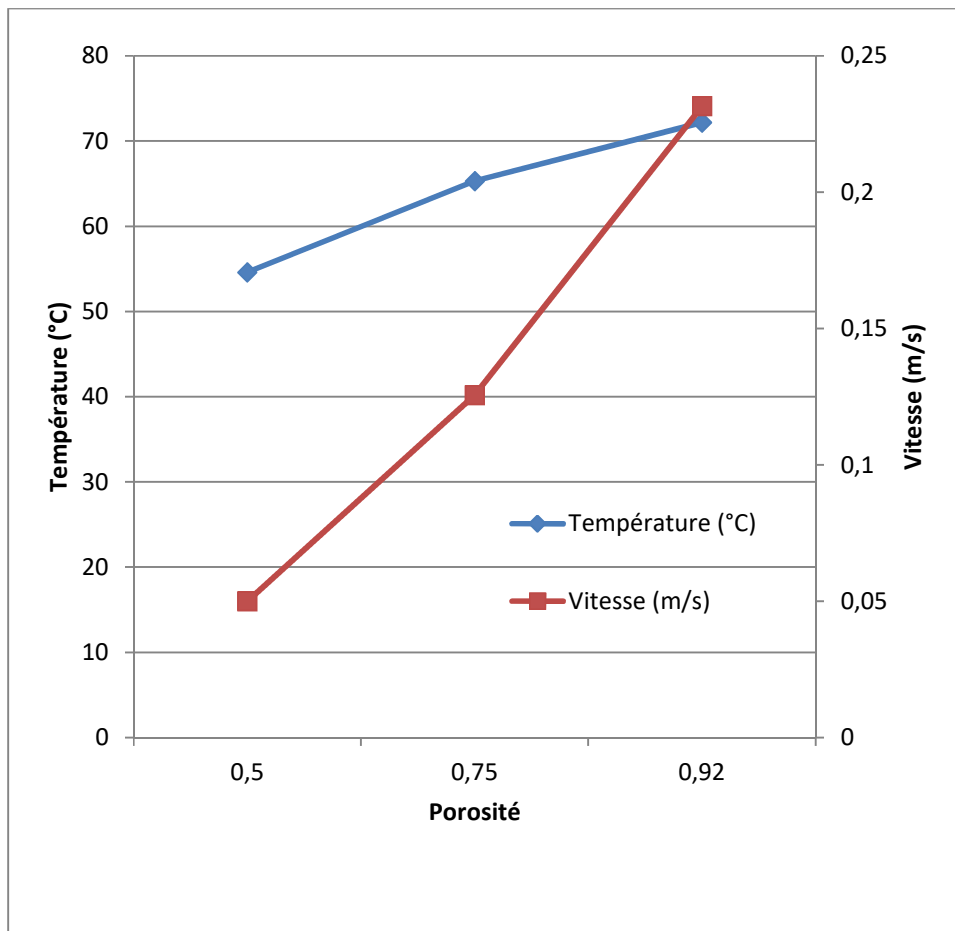


Figure IV. 9: l'influence de la porosité sur la température et la vitesse d'air à la sortie du capteur poreux.

La Fig IV. 9 montre l'influence de la porosité sur la température et la vitesse de l'air à la sortie du capteur avec absorbeur poreux. On remarque que la température et la vitesse de l'air augmentent avec l'augmentation de la porosité du milieu poreux. L'augmentation de la porosité permet d'augmenter la surface d'échange et donc d'augmenter la température de l'air. L'augmentation de la porosité applique moins de résistance au passage de l'air ce qui est traduit par une augmentation de sa vitesse. Alors, on constate qu'il y a une relation proportionnelle entre la porosité du milieu poreux et l'efficacité thermique du capteur solaire. D'après ces observations on peut dire que la porosité 0.92 assure la température et la vitesse les plus élevées, donc on va l'adopter pour la suite de travail.

IV.4. Etude dynamique et thermique du séchoir solaire (cas instationnaire)

IV. 4. 1. Test de maillage

Pour étudier l'indépendance des résultats du maillage, nous avons analysé quatre grilles. Le nombre total des nœuds correspondants sont : 5151, 15251, 30351 et 50451. La température à la sortie de la chambre de séchage est sélectionnée à titre de comparaison, comme le montre le tableau IV.2. On constate que les différences obtenues pour les grilles sont relativement faible. Pour le reste, nous avons utilisé un maillage de 5151 quates nœuds car il donne un bon compromis entre précision, taille de stockage et temps de calcul.

Tableau IV. 2: Test d'indépendance du maillage : comparaison de la température à la sortie de la chambre de séchage.

Nombre de nœuds	5151	15251	303510	50451
Température (°C)	49.18	49.84	50	50.02

IV. 4. 2. Validation du modèle numérique

Pour valider nos résultats numériques, nous les avons comparés avec des résultats expérimentaux et numériques présentés par Jyotirmay et Al [8].

La Fig IV. 10 montres la variation de la température de l'air à la sortie de la cheminée solaire en fonction de l'intensité du rayonnement solaire. Nos résultats sont en bon accord avec les résultats expérimentaux de Jyotirmay et Al [8]. L'erreur relative moyenne observée était de 0.01%. On peut voir que nos résultats numériques sont plus proches aux résultats expérimentaux par rapports aux résultats numériques publiés dans la même étude. Cela revient au model global utilisé dans les travaux de Jyotirmay et al. [8] tandis que la méthode CFD proposée dans ce travail est plus localisée et peut prédire correctement les performances dynamiques et thermiques du séchoir.

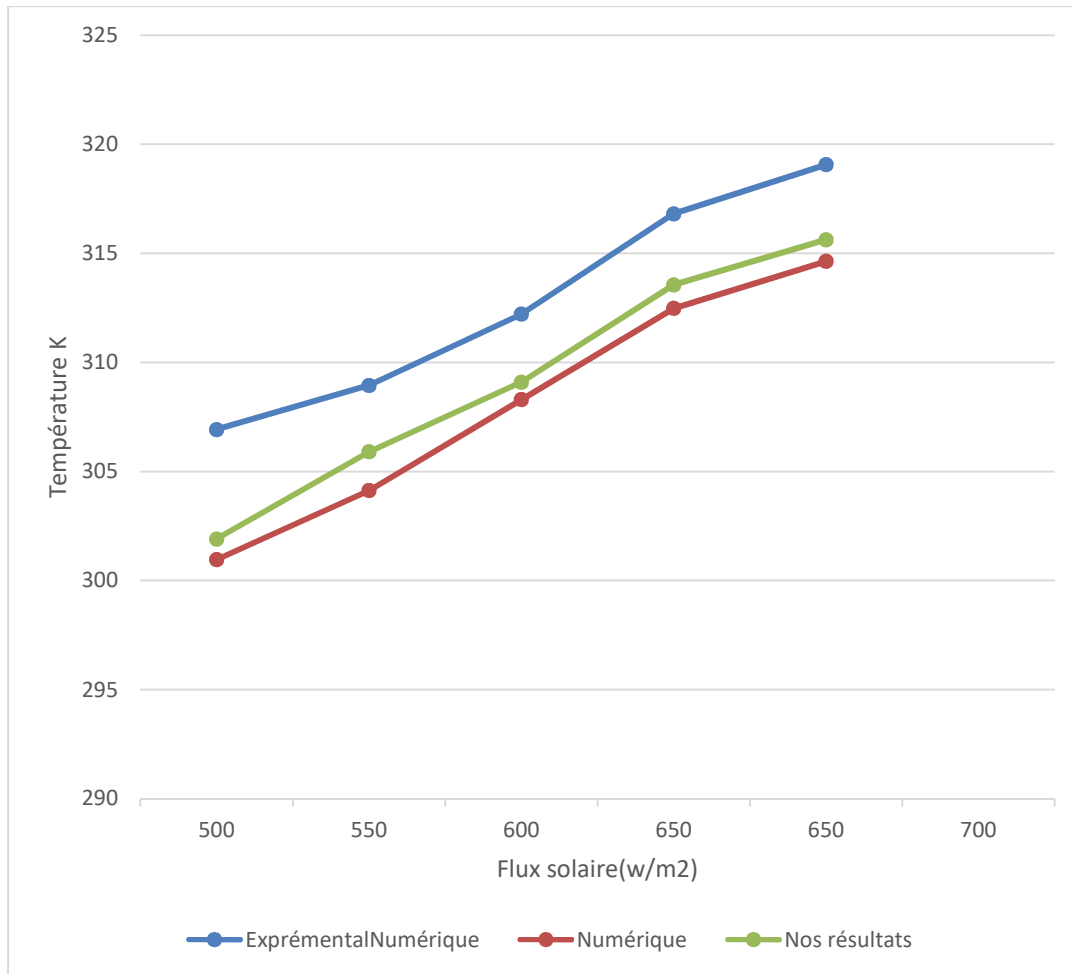


Figure IV. 10: Comparaison de la température moyenne avec les résultats expérimentaux et numériques de Jyotirmay.

IV. 4. 3. L'effet de l'intégration d'une unité de stockage thermique dans le séchoir

Dans cette partie, nous avons étudiées trois cas du séchoir solaire sans charge (sans produit à sécher) :

a) Cas 1 : Séchoir solaire sans stockage thermique

Dans ce cas, le séchoir solaire contient un capteur solaire avec absorbeur poreux couplé à une chambre de séchage (Fig. 11). Les conditions « pression inlet » et « pression outlet » sont appliquées à l'entrée du capteur et à la sortie de la chambre, respectivement. Les parois sont remises à un transfert thermique par convection.

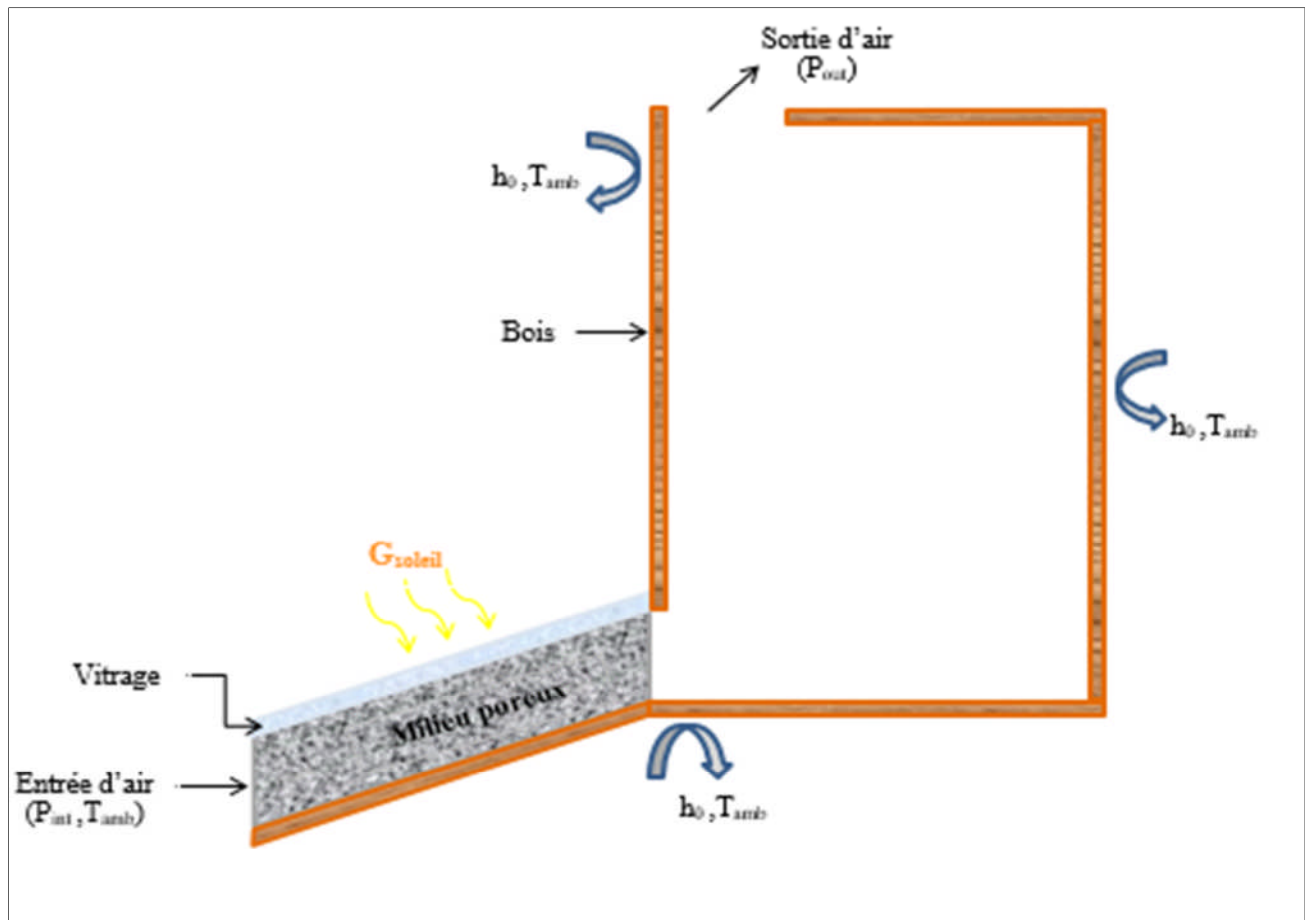


Figure IV. 11: Présentation du séchoir solaire sans stockage thermique avec les conditions limites (cas 1).

b) Cas 2 : Séchoir solaire avec stockage thermique sous le capteur

Dans ce cas une unité de stockage thermique est intégrée sous le capteur solaire et considéré comme solide (Fig. 12). Le matériau du stockage utilisé est un mélange de sable et les déchet d'aluminium. L'unité de stockage thermique a une épaisseur de 0.1 m. Les même conditions aux limites sont appliqué dans ce cas.

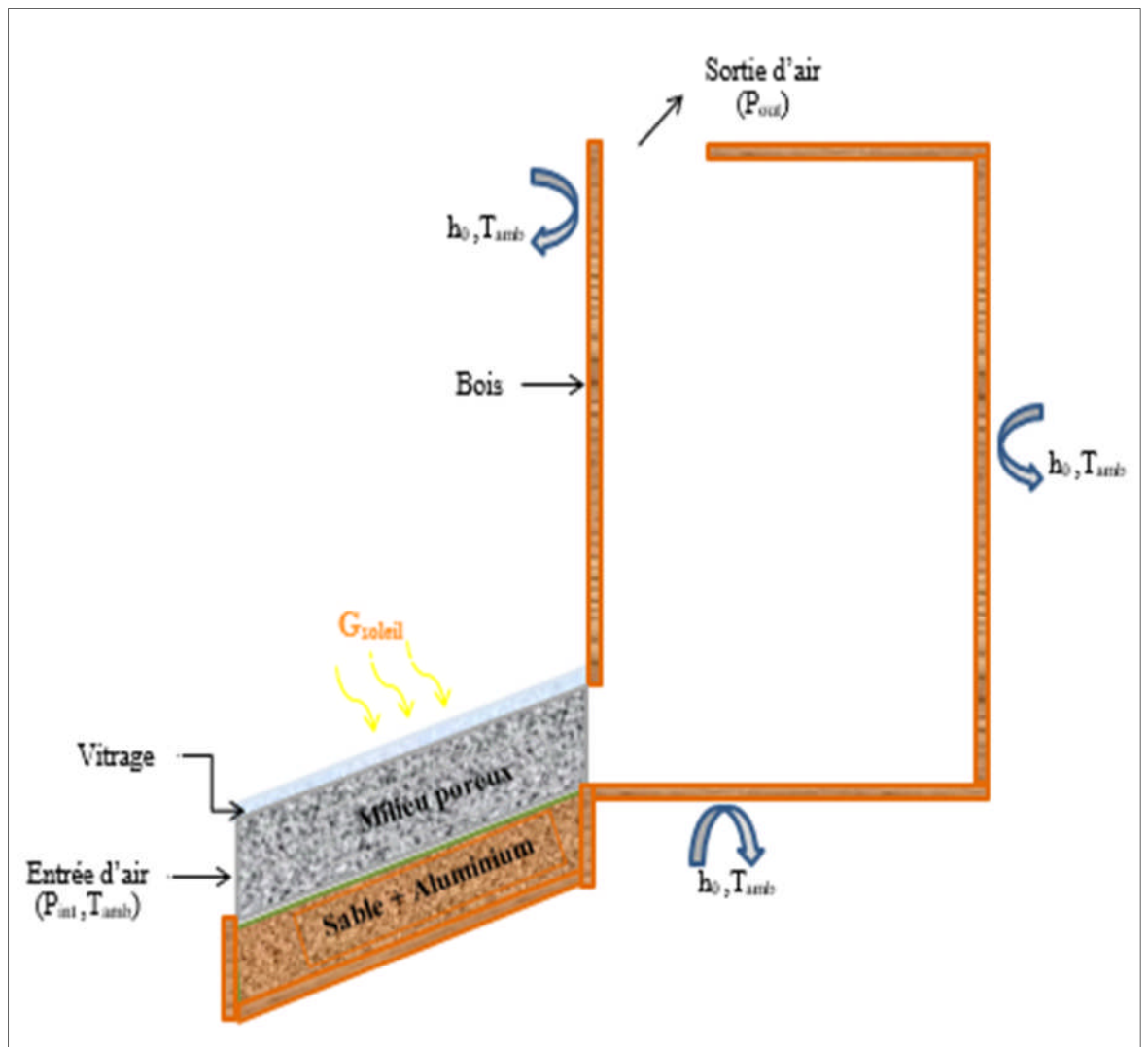


Figure IV. 12: Présentation du séchoir solaire avec stockage thermique sous le capteur avec les conditions limites.

c) Cas 3 : Séchoir solaire avec stockage thermique dans la chambre de séchage

Dans le 3^{ème} cas, nous avons intégré une unité de stockage thermique dans la chambre de séchage, cette dernière porte les même caractéristiques comme le deuxième cas et est considérée comme milieu poreux (Fig 13). Les conditions aux limites ne change pas.

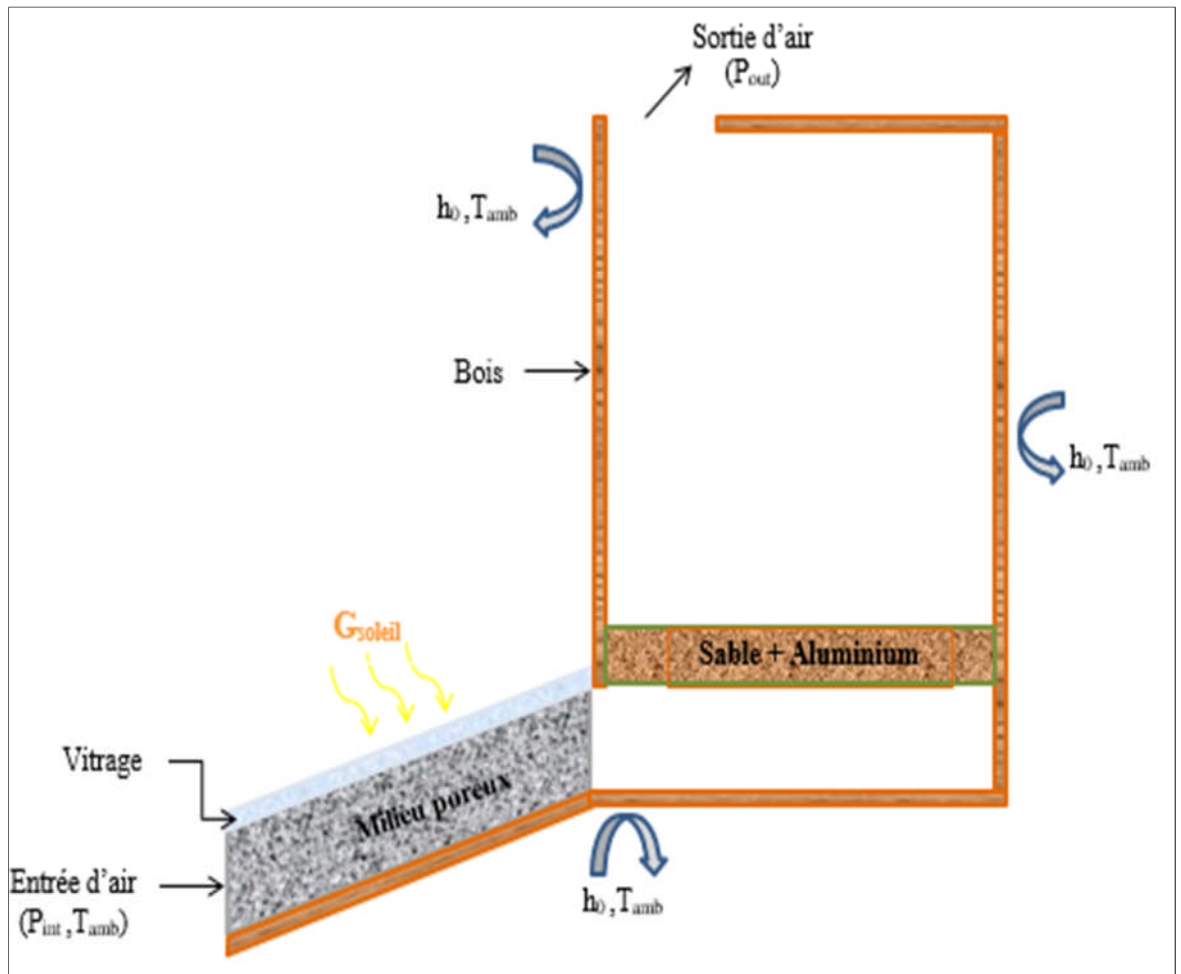


Figure IV. 13: Présentation du séchoir solaire avec stockage thermique dans la chambre de séchage avec les conditions limites.

Les Fig IV. 14, 15 et 16 montrent les profils des lignes de courant, du champ de vitesse et du champ thermique dans le séchoir solaire pour les différentes configurations à différents instants (10h, 13h et 18h). L'analyse des résultats montre que :

- Le rayonnement absorbé par l'absorbeur est transférée à l'écoulement d'air par convection. L'air ambiant entrant dans le séchoir à travers l'orifice d'entrée, sa température augmente au contact avec l'absorbeur dans le capteur solaire. Il monte ensuite vers la chambre de séchage. Une partie de l'écoulement sort vers l'extérieur à travers la sortie et l'autre partie revient à la chambre formant une zone de recirculation dans le cœur de la chambre de séchage.
- Pendant le jour (entre 10h et 13h), les absorbeurs enregistrent les températures maximales du séchoir car ils récoltent le maximum du rayonnement.

- Durant l'après midi, les températures et les vitesses de l'air diminuent naturellement à travers le séchoir suite à la réduction du rayonnement.
- Contrairement au cas 1, l'ajout d'un système de stockage de chaleur dans les Cas.2 et 3 assure des températures plus élevées dans la chambre de séchage. Cela apparaît clairement à l'instant 18h. On peut voir la restitution de la chaleur dans le cas 3 où l'unité de stockage retransmet la chaleur stockée vers la chambre de séchage. Les configurations 2 et 3 assurent donc des températures plus élevées le soir ce qui prolonge la durée de fonctionnement du séchoir solaire.
- Sur les contours de vitesse on peut voir que les vitesses maximales sont enregistrées aux niveaux des capteurs. Dans les chambres de séchage, les vitesses élevées sont enregistrées à l'approche des parois de la chambre de séchage.

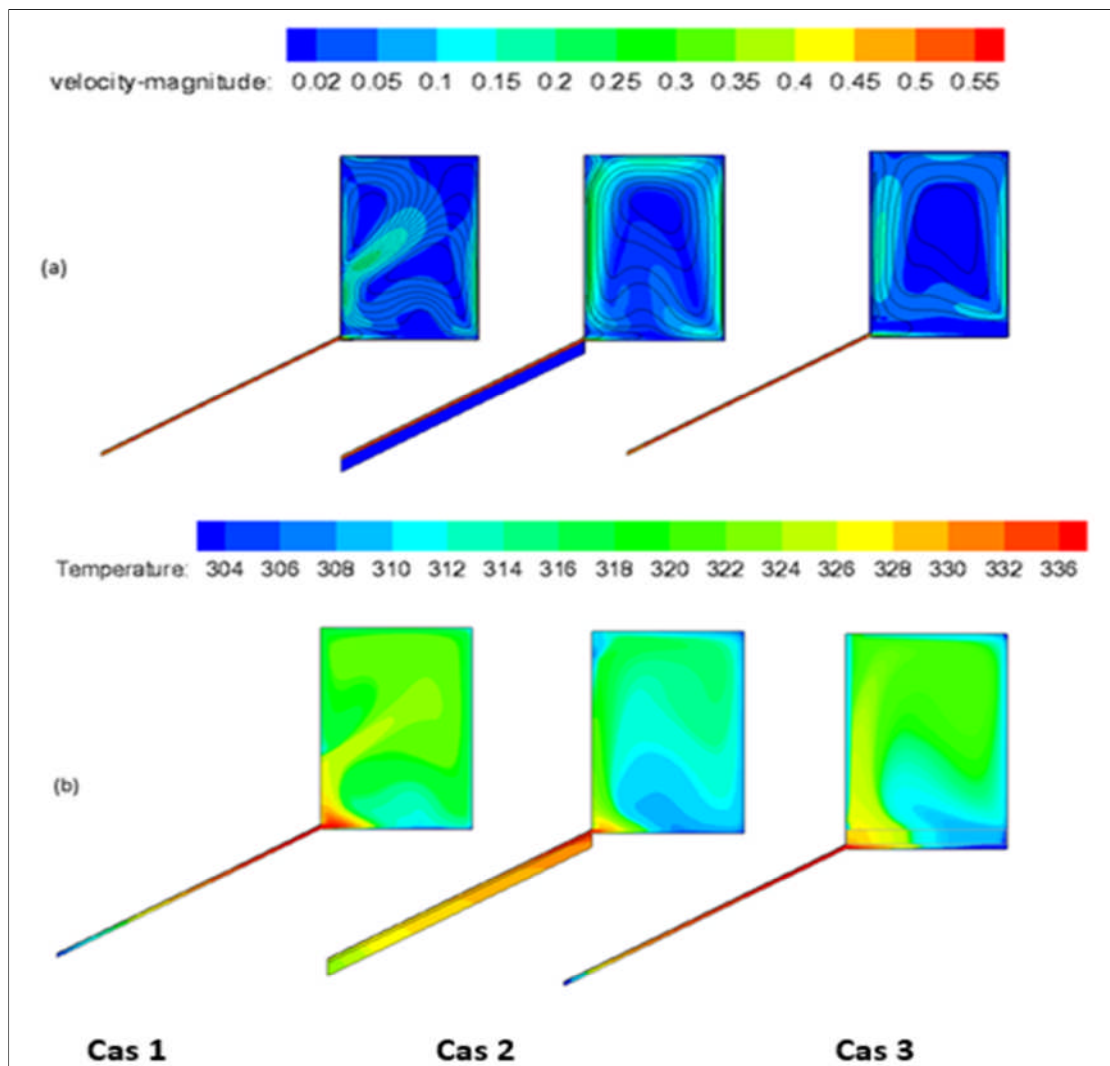


Figure IV. 14: Répartition des champs (a) de vitesse et lignes de courant et (b) de températures dans le séchoir solaire à 10 h.

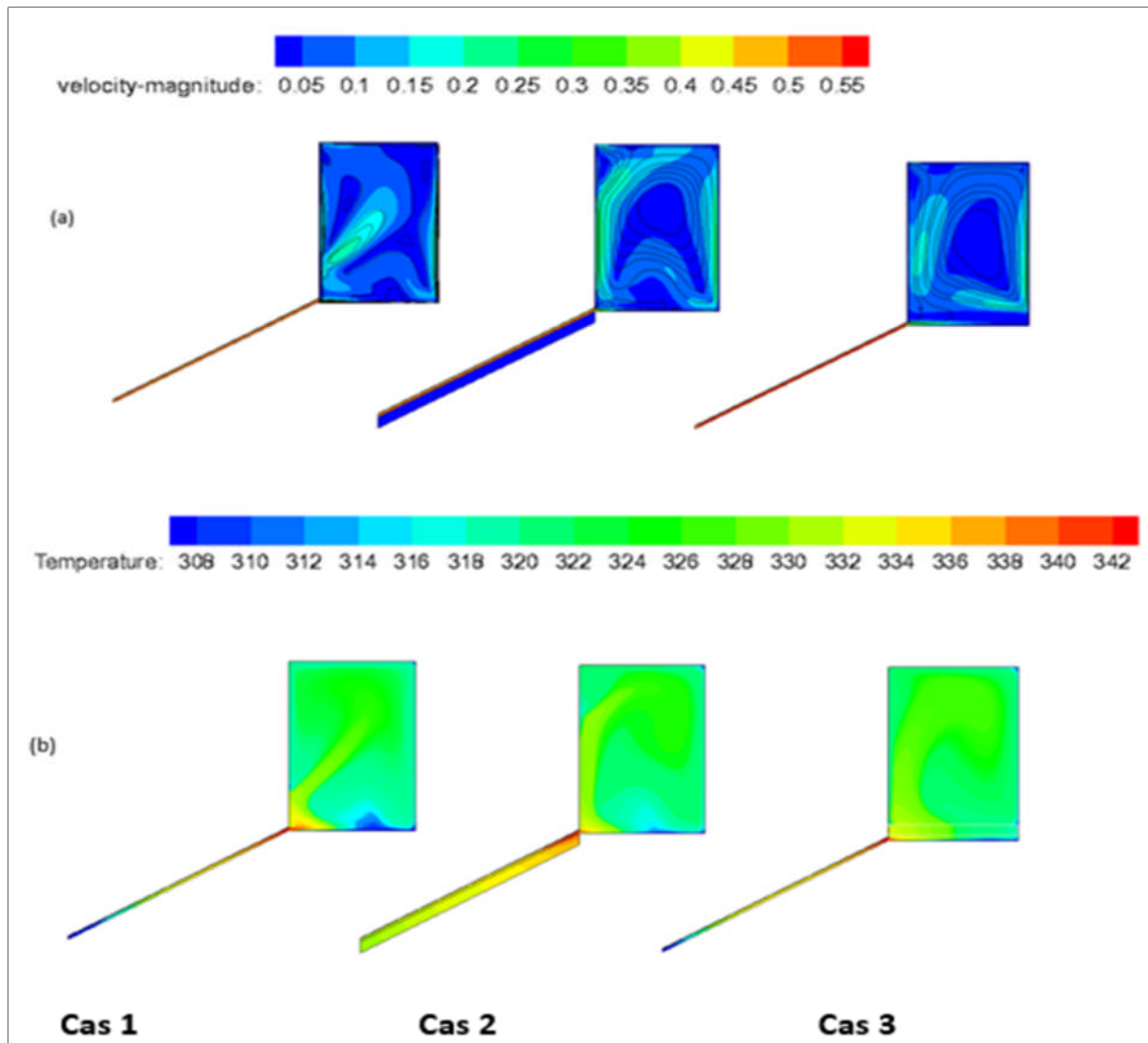


Figure IV. 15: Répartition des champs (a) de vitesse et lignes de courant et (b) de température dans le séchoir solaire à 13 h.

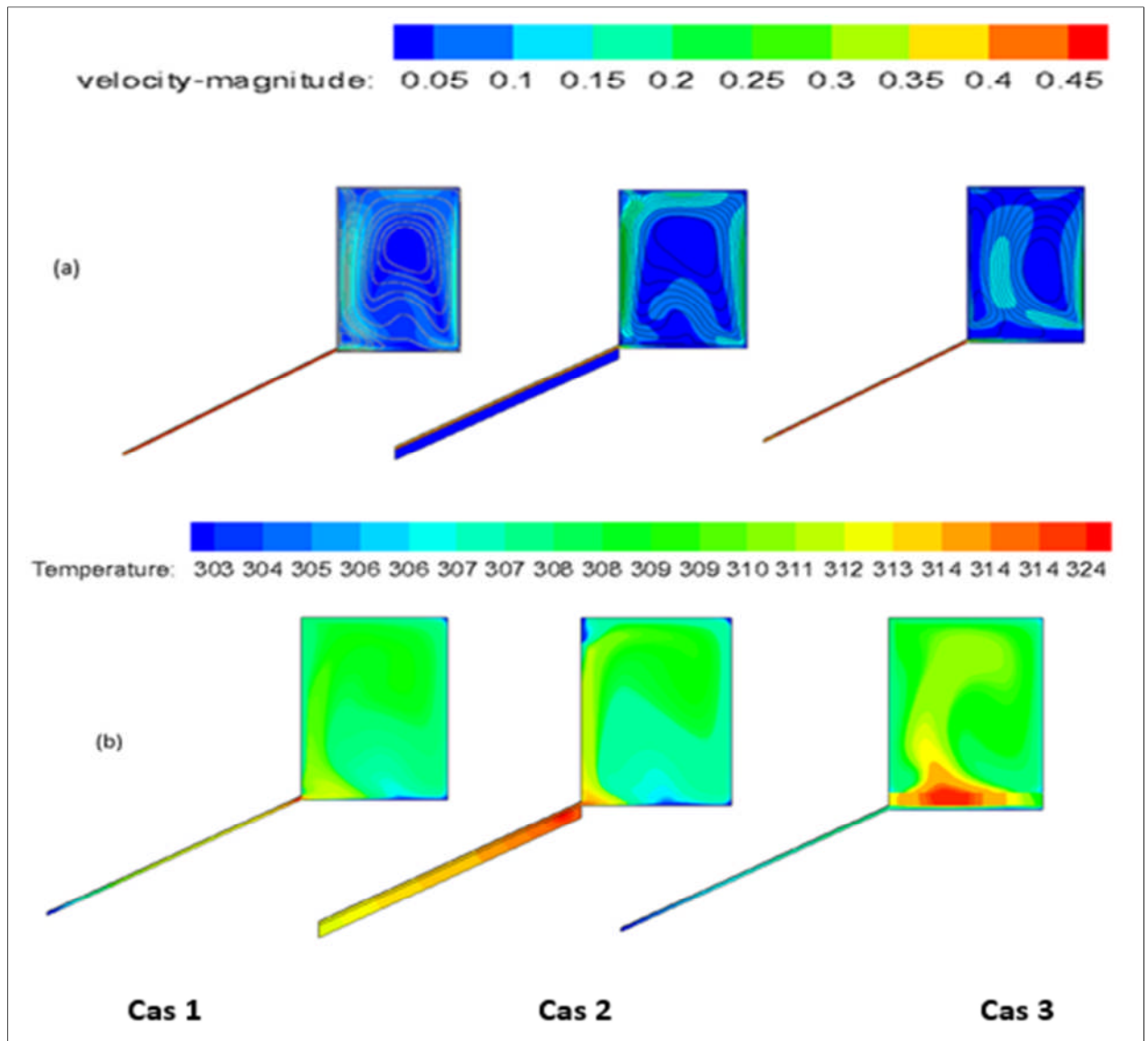


Figure IV. 16: Répartition des champs (a) de vitesse et lignes de courant et (b) de température dans le séchoir solaire à 18 h.

IV. 4. 3. 1. L'évolution de la température de l'air à la sortie du capteur pour les trois cas:

La Fig. IV. 17 montre l'évolution de la température de l'air à la sortie du capteur pour les trois configurations du séchoir solaire. On remarque que les températures augmentent durant la première demi-journée, et diminuent après. Cela est dû à la variation du rayonnement solaire pendant la journée. On remarque aussi un déphasage thermique positif dû aux propriétés de stockage du lit thermique pour le cas 2.

On constate que la température de l'air est faible durant la première demi-journée dans le troisième cas où le stockage est placé sous le capteur. Cette position du stockage provoque la réduction de l'énergie thermique transférée à l'air dans le capteur. Une partie de l'énergie absorbée par l'absorbeur est stockée dans l'unité de stockage collée avec l'absorbeur. ce comportement s'inverse par la suite en raison de la restitution de la chaleur stockée.

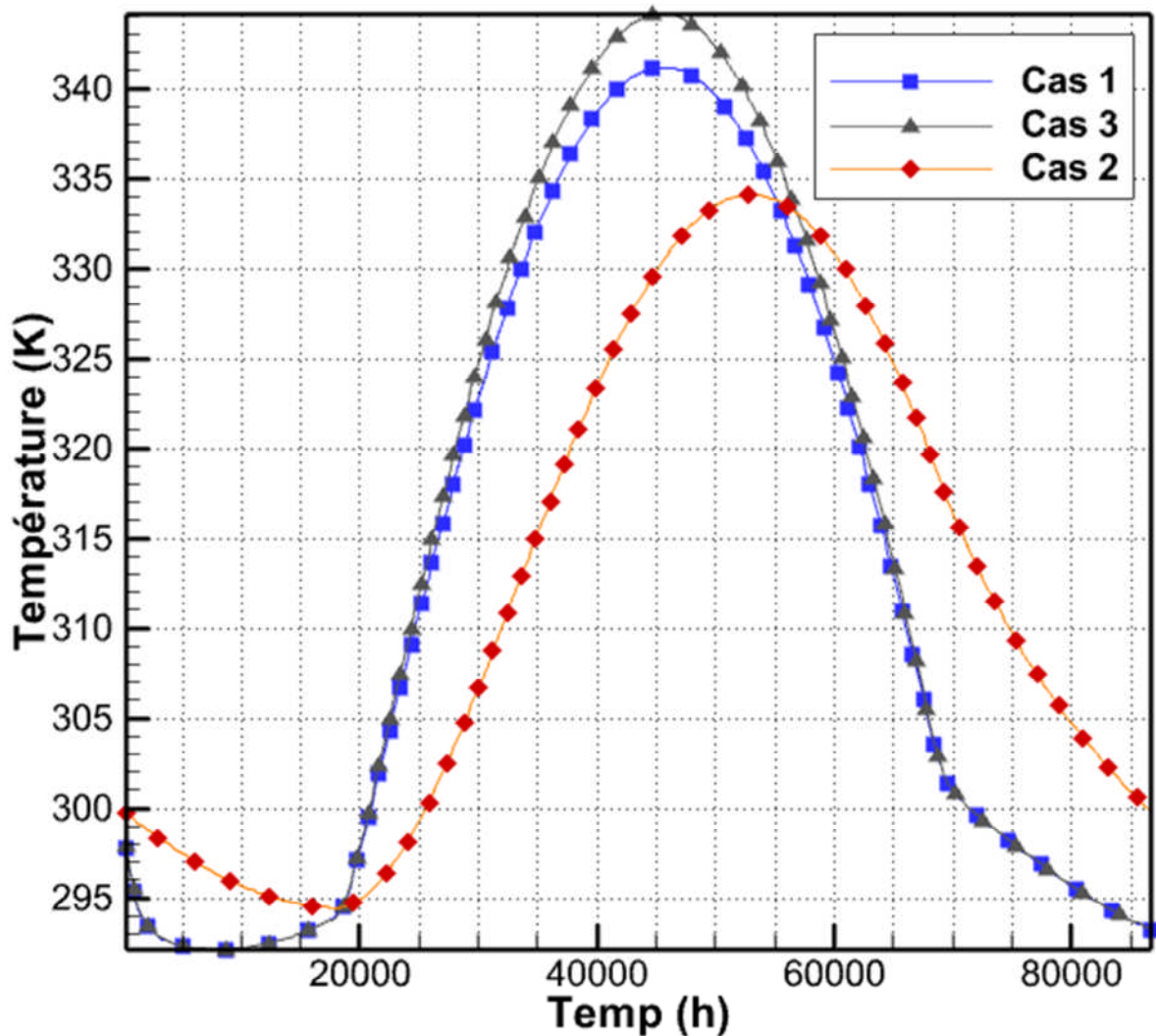


Figure IV. 17: Comparaison de la température de l'air à la sortie du capteur solaire pour les 3 cas: sans stockage, stockage sous le capteur et stockage dans la chambre de séchage.

Pour les deux autres cas, on remarque un comportement similaire pour les deux températures avec un écart du température. Le séchoir solaire avec stockage dans la chambre assure des températures plus élevées durant la période entre 06:30 et 16h. Hors ces heures les

valeurs de températures sont identiques. Les valeurs des températures maximales sont : 344 K et 342 K pour les cas 3 et 1; respectivement. On peut expliquer l'écart de la température par la résistance au passage de l'air appliquée par l'unité de stockage (milieux poreux). Pour confirmer cette justification on a besoin de tracer la variation de débit massique à travers le séchoir solaire pour les deux cas 2 et 3:

La Fig. V. 2 montre l'évolution du débit d'air traversant le séchoir au cours du temps pour les deux cas : sans stockage (cas 1) et avec stockage dans la chambre (cas 3).

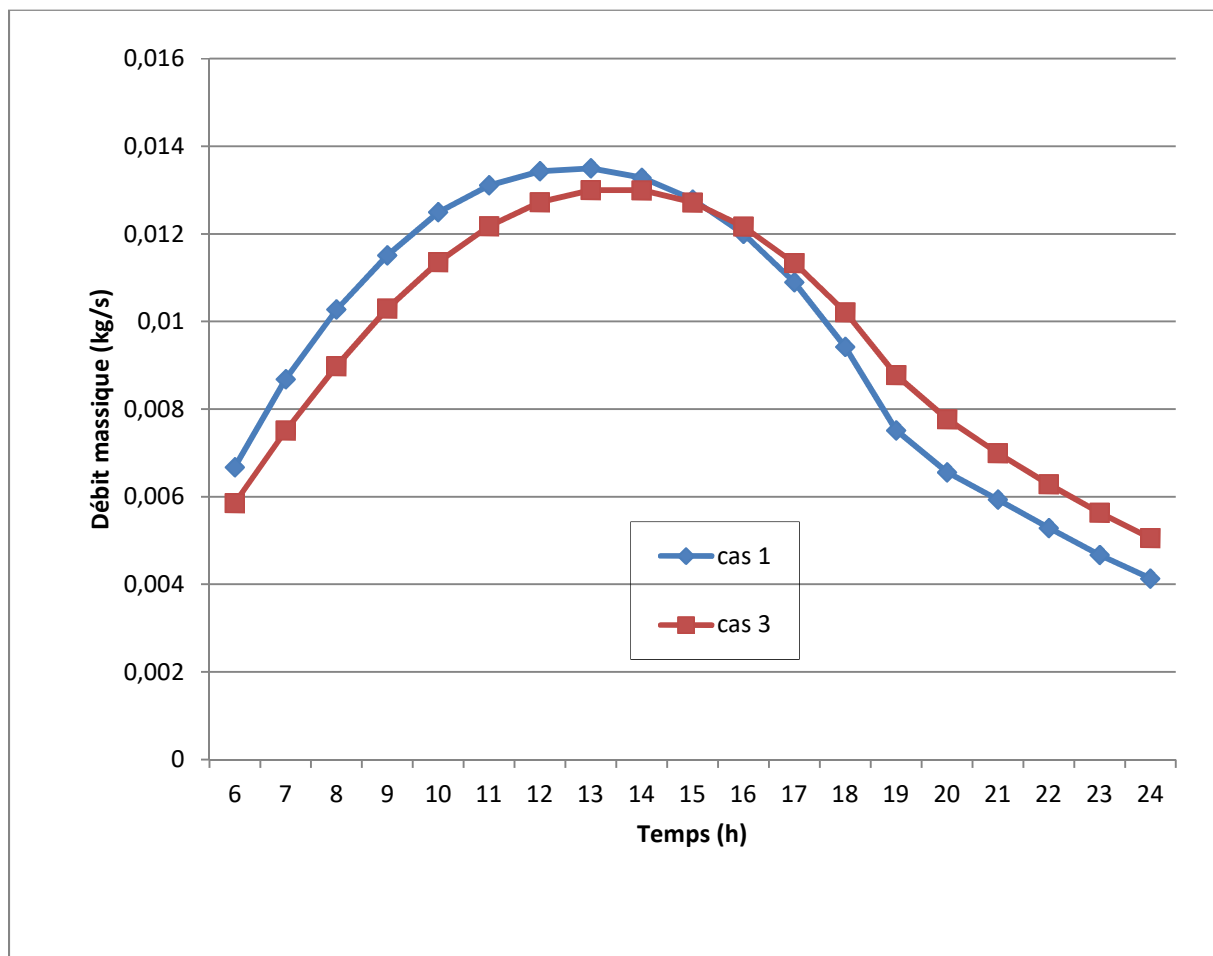


Figure IV. 18: Evolution de débit massique en fonction du temps pour les deux cas 1 et 3.

Comme on peut le voir, l'utilisation d'une unité de stockage a provoqué une réduction du débit massique pendant la matinée jusqu'à 16 h. Ensuite, le comportement s'inverse et le débit devient plus faible pour le cas sans stockage. Les valeurs maximales de débit sont de 0,013 kg/s et 0,012 kg/s vers 13 h pour les cas 1 et 3, respectivement.

IV. 4. 3. 2. Evolution de la température de séchage pour les trois configurations du séchoir solaires

Pour choisir la configuration la plus performante, on doit savoir quelle configuration donne les températures de l'air les plus élevées au niveau des claies de séchage. Dans ce travail nous n'avons pas intégré les claies de séchage, pour cela, on a choisi une position comme repère pour tracer l'évolution horaire de la température nodale de l'air dans trois points: un point gauche, droite et milieu (voir la Fig. IV. 19). Pour pouvoir comparer les températures on doit garder la même position des points dans les trois configurations du séchoir.

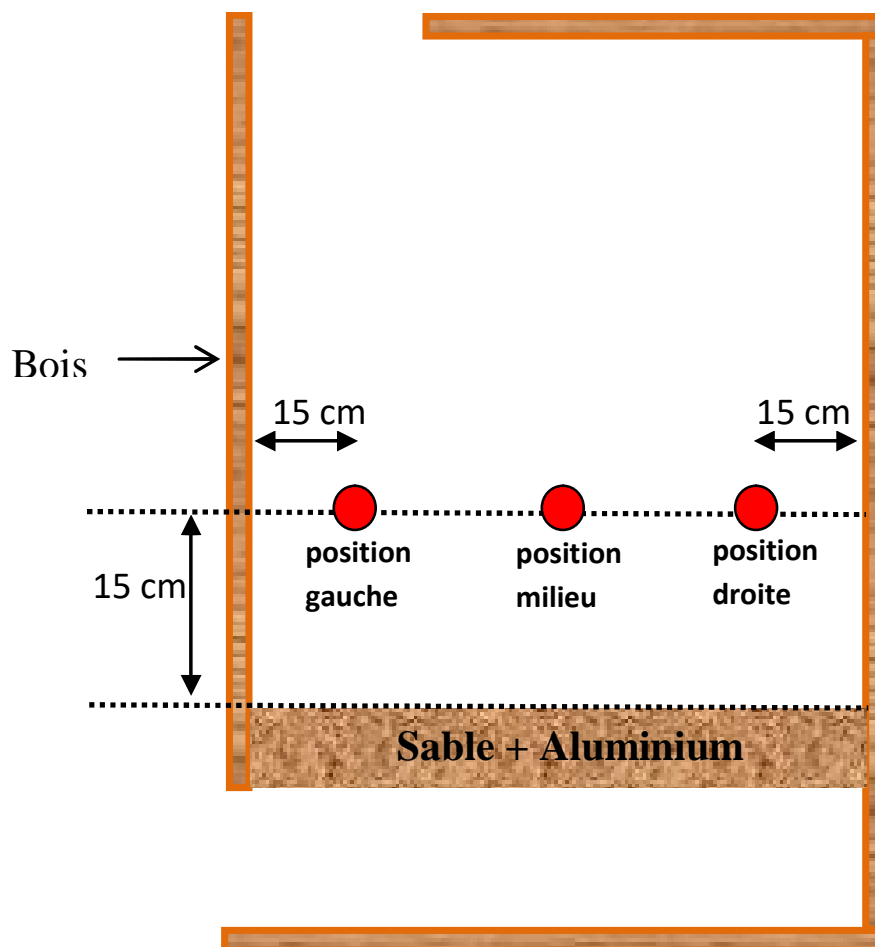
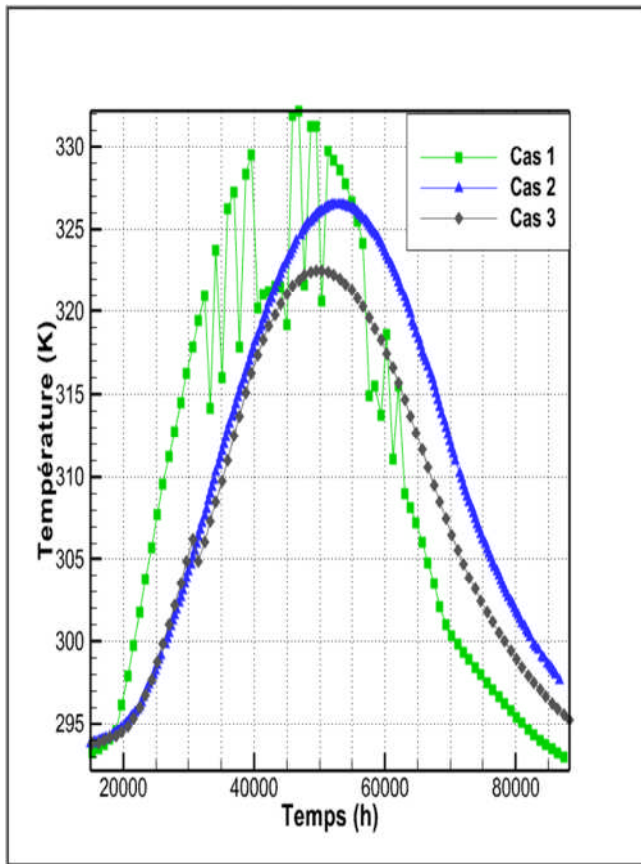
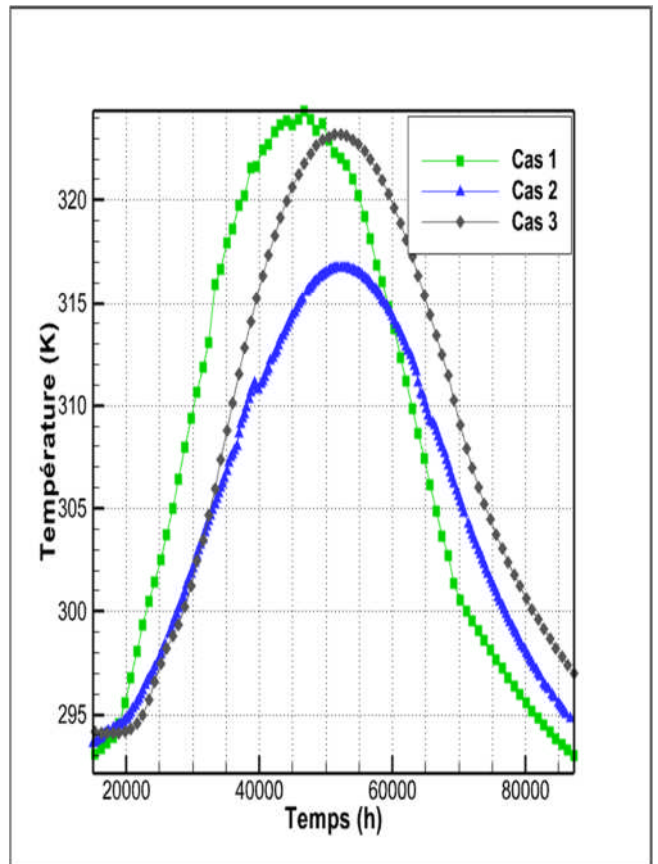


Figure IV. 19: La position du trois points dans la chambre de séchage.

La Fig. IV.20 présente les profils de la température pour différentes position x pour les trois configurations du séchoir solaire.



(a)



(b)

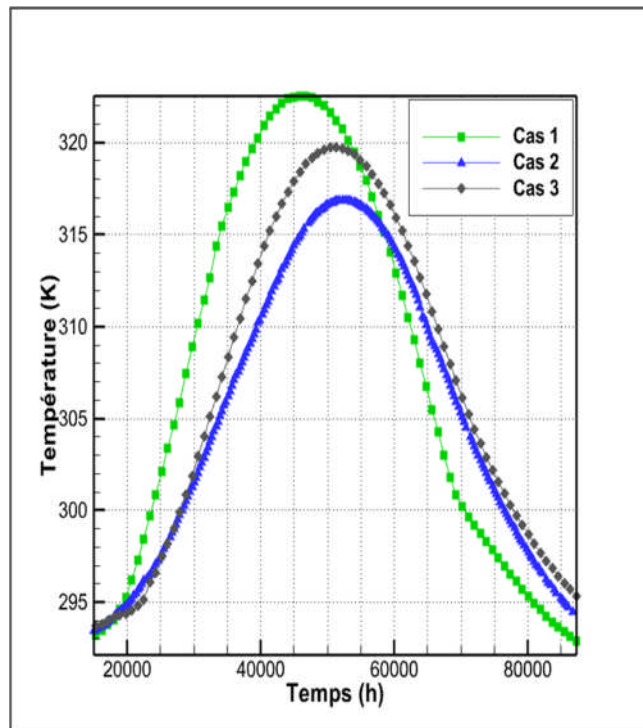


Figure IV. 20: L'évolution de la température nodale dans les position: (a) gauche, (b) milieu et (c) droit pour les trois configurations du séchoir solaire.

Comme on peut le voir, le séchoir solaire sans stockage assure les températures les plus élevée durant la matinée et jusqu'à 14h. C'est évident, car l'énergie thermique absorbée dans le capteur est transférée totalement vers la chambre de séchage. Les températures maximales dans les positions gauches, milieux et droite sont 332 K, 325 K et 322 K, respectivement. Donc le côté gauche dans cette configuration (sans stockage) est plus chaud.

Durant la période entre 14h et 24h, le comportement s'inverse et les séchoirs avec stockage enregistrent des températures plus élevées. Cela revient à la réduction graduelle du rayonnement solaire ce qui provoque la restitution de la chaleur stockée.

Pour la configuration 3 (stockage dans la chambre) les températures maximales sont 322 K, 322 K et 320 K dans les positions gauches, milieu et droite, respectivement. Donc une distribution homogène de la température est remarquée dans cette configuration.

Pour le cas 2 (stockage sous le capteur) les températures maximales sont 327K pour le point gauche et 317 K pour les autres positions. Donc le côté gauche est plus chaud.

Pour les positions milieu et droite, on remarque que le cas du stockage dans la chambre assure des températures plus importantes presque durant toute la journée par rapport au cas de stockage sous capteur. Ce comportement s'inverse pour le point du gauche.

Pour avoir une idée plus précise sur les températures à ce niveau, on a calculé la température moyenne sur cette ligne pour les trois configurations à différents instants. Ces valeurs sont présentées sur le tableau IV.3.

Tableau IV. 3: Température moyenne sur la ligne de repère pour différent instants

	10 h	13 h	18h
Cas 1	320.37	326	308.18
Cas 2	308.77	317.75	312.01
Cas 3	311.74	323.10	315.11

D'après ce tableau on remarque que la configuration trois (séchoir solaire avec stockage dans la chambre) assure les températures les plus élevée et les plus homogènes. Donc la configuration trois est la plus performante par les trois configurations.

IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats obtenus à travers les différentes simulations réalisées pour analyser le comportement dynamique et thermique d'un système de séchage. Pour cela, deux modèle du capteur solaire et trois configurations de séchoir ont été analysées et comparées sur une journée typique du mois de 15 juillet 2020 sous les conditions climatiques de la ville de Tlemcen (Algérie). Les principales conclusions sont :

- L'utilisation d'une mousse métallique a réduit la vitesse de l'écoulement d'air par 46.6% et a augmenté la température de l'air à la sortie du capteur par 25.16 %. Donc le capteur poreux est plus performant.
- L'augmentation de la porosité permet d'augmenter la surface d'échange et donc augmenter la température de l'air à la sortie du capteur.
- L'augmentation de la porosité applique moins de résistance au passage de l'air ce qui est traduit par une augmentation de sa vitesse.

L'étude du séchoir solaire a montré que:

- Les absorbeurs enregistrent les températures maximales du séchoir car ils récoltent le maximum du rayonnement.
- Les Cas.2 et 3 assurent des températures plus élevées dans la chambre de séchage durant la réduction du rayonnement solaire.
- Les vitesses maximales sont enregistrées aux niveaux des capteurs. Dans les chambres de séchage, les vitesses élevées sont enregistrées à l'approche des parois.
- L'utilisation d'une unité de stockage dans la chambre de séchage a provoqué une réduction du débit massique pendant la matinée jusqu'à 16 h, cela a provoqué l'augmentation de la température dans la chambre.
- Le séchoir solaire sans stockage assure les températures les plus élevées durant la matinée jusqu'à 14h.
- La distribution de la température n'est pas uniforme pour les cas 1 et 2 car le côté gauche est plus chaud.
- Une distribution homogène de la température est remarquée dans la configuration 3.
- La configuration trois (séchoir solaire avec stockage sous le capteur) assure les températures les plus élevées et les plus homogènes. Donc la configuration trois est la plus performante.

Conclusion générale

Le séchage c'est un processus très efficace qui permet d'augmenter le temps de stockage des produits dans l'industrie agro-alimentaire, mais il consomme beaucoup d'énergie. Cela explique la raison d'utiliser les séchoirs solaires qui sont considérablement développés ces dernières années.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'efficacité dynamique et thermique d'un séchoir solaire. Il s'agit d'un contrôle et une amélioration des mécanismes du transfert de chaleur afin de trouver la conception optimale d'un séchoir solaire indirect à convection naturelle.

La première partie du travail consiste à étudier numériquement le comportement thermique et dynamique d'un capteur solaire en comparant deux formes de l'absorbeur: un absorbeur plat et un absorbeur poreux. L'écoulement d'air est créé naturellement et est considéré bidimensionnel, stationnaire et en régime turbulent. Le rayonnement solaire est pris pour une valeur fixe de 1030 W/m^2 et la température ambiante pour une valeur de 303 K .

La simulation numérique est assurée à l'aide du code de calcul FLUENT, D'après les résultats obtenus, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- L'utilisation d'un absorbeur poreux dans le capteur solaire peut augmenter la température et la vitesse d'air à la sortie du capteur par rapport à un absorbeur plat.
- La variation de la porosité a une influence sur l'écoulement d'air, une augmentation de la porosité provoque une augmentation de température et de la vitesse à la sortie du capteur. Pour cela, une porosité de 0.92 est adoptée pour ce capteur.

L'objectif de la deuxième partie est d'étudier l'effet d'intégration d'une unité de stockage thermique sous forme d'un mélange du sable et les déchets d'aluminium dans le séchoir solaire sur le comportement d'air. Pour étudier l'effet de stockage thermique, il est important de prendre en considération le régime instationnaire. Pour cela, un UDF est utilisé pour intégrer la variation du rayonnement solaire et la température ambiante dans la simulation sous Fluent. Les conditions climatiques de la région de Tlemcen ont été choisies pour une journée du mois de Juillet (2020). L'étude du séchoir solaire a montré que:

- Les absorbeurs enregistrent les températures maximales du séchoir car ils récoltent le maximum du rayonnement.
- Les Cas 2 et 3 assurent des températures plus élevées dans la chambre de séchage durant la réduction du rayonnement solaire.
- Les vitesses maximales sont enregistrées aux niveaux des capteurs. Dans les chambres de séchage, les vitesses élevées sont enregistrées à l'approche des parois.
- L'utilisation d'une unité de stockage dans la chambre de séchage a provoqué une réduction du débit massique pendant la matinée jusqu'à 16 h, cela a provoqué l'augmentation de la température dans la chambre.
- Le séchoir solaire sans stockage assure les températures les plus élevées durant la matinée jusqu'à 14h.
- La distribution de la température n'est pas uniforme pour les cas 1 et 2 car le côté gauche est plus chaud.
- Une distribution homogène de la température est remarquée dans la configuration 3.
- La configuration trois (séchoir solaire avec stockage sous le capteur) assure les températures les plus élevées et les plus homogènes. Donc la configuration trois est la plus performante.

Références

- [1] <https://core.ac.uk/download/pdf/132675102.pdf>.
- [2] <https://bu.umc.edu.dz/theses/gclim/NAS7216.pdf>
- [3] <http://dspace.univ-eloued.dz/xmlui/bitstream/handle/123456789/740/621.042-033.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [4]. Chen, W. and M. Qu, Analysis of the heat transfer and airflow in solar chimney drying system with porous absorber. *Renewable Energy*, 2014. 63: p. 511-518.
- [5]. Lingayat, A., V. Chandramohan, and V. Raju, Design, development and performance of indirect type solar dryer for banana drying. *Energy Procedia*, 2017. 109: p. 409-4163 - 414 , 10.1016 / j.enconman.2012.06.017
- [6]. Singh. Thermohydraulic performance of double pass solar thermal collector with inline, staggered and hybrid fin configurations. *Journal of Energy Storage*. Volume 27, February 2020, 101080
- [7]. Hande et al . Enquête expérimentale et CFD sur un sécheur solaire indirect modifié avec un treillis en fer à faible coût. *Énergie solaire* .Volume 197 , février 2020 , pages 371-384
- [8]. Jyotirmay Mathur et Al. Summer-performance of inclined roof solar chimney for natural ventilation. *Energy and Buildings* 38 (2006) 1156–1163
- [9]. Mohanraj, M. and P. Chandrasekar, Performance of a forced convection solar drier integrated with gravel as heat storage material for chili drying. *Journal of Engineering Science and Technology*, 2009. 4(3) : p. 305-314.
- [10]. Sandali (2019). Contribution à l'étude d'amélioration des performances thermiques des séchoirs solaires utilisant différentes techniques.
- [11] .Tegenaw et al. On the comparison between computational fluid dynamics (CFD) and lumped capacitance modeling for the simulation of transient heat transfer in solar dryers. *Solar Energy*. Volume 184, 15 May 2019, Pages 417-425
- [12]. Moghimi et al. 2021. 6 :Experimental and numerical optimal design of a household solar fruit and vegetable dryer. *Solar Energy* 214 (2021) 575–587
- [13]. M.Vivekanandan. .Experimental and CFD investigation of six shapes of solar greenhouse dryer in no load conditions to identify the ideal shape of dryer. *materialstoday proceedings*. Volume 37, Part 2, 2021, Pages 1409-

[14]. Sumeet et al .CFD supported performance analysis of an innovative biomass dryer Sumeet .
Department of Mechanical Engineering, Birla Institute of Technology, Mesra, Ranchi, Jharkhand,
835215, India Volume 214, 15 January 2021, Pages 575-587-1416

[15]. Ali Ghaffari et al..Modeling and Improving the Performance of Cabinet Solar Dryer Using
Computational Fluid Dynamics.Food Eng. 2015; 11(2): 157–172

[16]www.infoclimat.fr/observations-meteo/archives/15/juillet/2020/tlemce-zenata/60531.html

[17] <http://data.cder.dz:81/#>