REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de **T**echnologie

Thèse de Doctorat LMD

Filière : Génie mécanique

Option : Energétique et transferts

Sujet :

Contribution à l'étude du transfert thermique dans un capteur solaire. Application au séchoir solaire pour produits agricoles

Présentée par

Mr. HALASSA Daoud

Soutenue publiquement le 15/01/2020 devant le jury composé de

Professeur	KORICHI Abdelkader	Université de Médéa	Président
Professeur	TOUATI Boumediène	Université de Bechar	Examinateur
Professeur	ZIRARI Mounir	Université de Médéa	Examinateur
Professeur	MENNOUCHE Djamel	Université de Ouargla	Examinateur
Professeur	ANNOUN Mohamed	Université de Médéa	Directeur de thèse
Professeur	BOUBEKRI Abdelghani	Université de Ouargla	Co-directeur de thèse

Année universitaire 2019-2020

ملخص

يهدف هذا العمل إلى تحديد أكثر أنواع مجمعات الألواح المسطحة الهوا ئية الشمسيةً كفاءة بين أحادي و مزدوج الممرات الهوائية المستخدمة لتناسب غرفة التجفيف التي يتم تهويتها بشكل طبيعي ، ودراسة تأثير الم قاسات الهندسية (الطول والعرض) من أجل الحصول على درجة الحرارة المناسبة التي تناسب نظام التجفيف ، وتجانس جيد لدرجة الحرارة داخل ال مجففات الشمسية غير المباشرة أيضًا. تظهر العديد من التحقيقات التي أجريت تجريبيًا أن المستقطب الشمسي أحادي الممر الهوائي هو أكثر كفاءة بنسبة 8٪ من المستقطب الشمسي ثنائي الممر في ظل ظروف تشغيلية مماثلة. تكشف المحاكاة العددية CFD ، التي أجريت على أساس اختلافات في طول وعرض المجمع الشمسي لظروف مناخية مختلفة ، أن جامع المرور البسيط الشمسي 4 متر × 1.5 متر ينتج توزيعًا أكثر تجانسًا لدرجة الحرارة. بالإضافة إلى ذلك، تتم دراسة تأثير مادة تغيير الطور (PCM) عند دمجها مع مجمّع الطاقة الشمسية بغرض تمديد وقت التشغيل اليومي للنظام التجفيف أكثر بعد غروب الشمس أو عندما تكون غائمة. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أنه تم تحسين الأداء الحراري لنظام التجفيف وزيادة وقت التشغيل لمدة ساعتين.

الكلمات المفتاحية: اللاقط الشمسي المسطح، الطاقة الشمسية، المجفف الشمسي، مود تغيير الحالة الفزيائية، المدخنة الشمسية، تهوية طبيعية

Abstract

This work aims to determine the most efficient type of solar air flat plate collector between both simple pass and double pass collector used to fit a drier chamber which is naturally ventilated and to examine the effect of its geometric parameters (length and width) in order to obtain not only the right temperature which is better suited for the drying system but also a good homogeneity of the temperature inside the indirect solar dryer. Several investigations conducted experimentally show that the simple pass collector is 8% more efficient than the double pass collector under similar operational conditions. A CFD simulation, which was done based on variations in the length and width of the solar collector for different climatic conditions, reveals that the 4m x 1.5m solar simple pass collector produces a more homogenous distribution of temperature. Additionally, the effect of the phase change material (PCM) when fitted with the solar collector is studied for the purpose to extend the daily operating time of the drier system after the sun set or when it is cloudy. The obtained results showed that the thermal performance of the drier system is improved and the operating time is increased by two hours.

Key words: Solar energy; Solar air collector; Solar drying; Phase Change Material PCM; Solar Chimney; Natural ventilation

Résumé

Ce travail a pour objectif de déterminer le type du collecteur solaire à plaque le plus efficace parmi les deux à savoir le collecteur avec simple passage ou avec double passages utilisés dans un séchoir solaire naturellement ventilée, et aussi d'examiner l'effet de ses paramètres géométriques (longueur et largeur). afin d'obtenir non seulement la bonne température, mieux adaptée au système de séchage, mais également une bonne homogénéité de la température à l'intérieur de la chambre de séchage. Plusieurs études menées expérimentalement montrent que le collecteur simple passe est 8% plus efficace que le collecteur double passe dans des conditions de fonctionnement similaires. Une simulation CFD, basée sur les variations de longueur et de largeur du capteur solaire pour différentes conditions climatiques, révèle que le capteur solaire à simple passage de 4m x 1,5m produit une distribution de température plus homogène. En outre, l'effet du matériau à changement de phase (PCM) lorsqu'il est intégré au capteur solaire a été étudié dans le but de prolonger la durée de fonctionnement quotidienne du système de séchage après le coucher du soleil ou par temps nuageux. Les résultats obtenus montrent que les performances thermiques du système de séchage sont améliorées et que la durée de fonctionnement est augmentée de deux heures

Mots clés : Energie solaire; Capteur solaire; Séchoir solaire; Matériaux à changement de phase MCP; Cheminée solaire; Ventilation naturelle.

Dédicace

A la mémoire de ma grand-mère

A mon grand-père

A mes parents

A ma femme

A mes frères et ma soeur

Je dédie les fruits de mon travail

Daoud

Remerciments

Les travaux entrepris dans le cadre de cette thèse ont fait l'objet de collaboration entre le département génie mécanique de l'université YAHIA FARES de Médéa et le laboratoire de développement des énergies nouvelles et renouvelables en zones arides (LENREZA) à l'université de KASDI MERBAH Ouargla en Algérie.

Je tiens tout d'abord à remercier très vivement monsieur le professeur ANNOUN Mohamed qui a eu l'aimable volonté de diriger ce travail tout le long de ces années. Je remercie également mon codirecteur de thèse le professueur BOUBEKRI Abdelghani pour la qualité d'accueil, d'aide et du suivi des plus petits détails de mon travail dont particulièrement la conduite expérimentale et l'analyse informatique des données. Que Messieurs MENNOUCHE Djamel et SANDALI Messoud trouvent ici l'expression de ma reconnaissance pour les précieuses discussions qu'ils m'ont offertes à plusieurs occasions.

Je tiens aussi à remercier monsieur le professeur KORICHI Abdelkader pour avoir gentiment accepté de présider le jury de ma thèse. Je remercie également messieurs TOUATI Boumediène , ZIRARI Mounir, et MENNOUCHE Djamel pour avoir accepté de juger ce travail.

Je remercie aussi et particulièrement mes responsables, de Laboratoire Matériaux et Environnement de la Faculté des Sciences et de la Technologie Université Dr Yahia Fares de Médéa

Mes remerciements s'adressent également aux membres de l'équipe « séchage solaire » du laboratoire LENREZA particulièrement et vivement à mon Prof Mennouche D.

Que tous ceux qui ont fait part, de près ou de loin, à ce travail trouvent ici l'expression de mes remerciements et ma profonde gratitude.

Je remercie enfin, avant et toujours mon bon et grand dieu ALLAH pour tous ses dons que je ne puisse dénombrer et dont la réussite de ce travail n'en est qu'un petit !

Table des matières

Introduction générale……..1

Chapitre 1

Contexte général, problématique et situation physique de l'étude

Introduction

1.1 Contexte générale……....5

1.1.1 Energie et gisement solaire en Algérie …….5

1.1.2 Situation géographique de l'Algérie et les capacités d'ensoleillement ……6

1.2 Identité et constitutions du capteur solaire plan……..8

1.2.1 Historique et définition des capteurs solaires…….8

1.2.2 Composants d'un capteur solaire plan……8

1.2.3 Capteurs solaires plan ……9

1.3 Différents modes de transferts thermiques mis en jeu dans un capteur solaire……9

1.3.1 Conduction……10

1.3.2. Convection……10

1.3.3. Rayonnement……..…….11

1.4 Bilan thermique d'un capteur solaire plan ……..12

1.5 Améliorations des capteurs solaires……..13

1.6 Les domaines d'applications d'un capteur solaire……..16

1.6.1 Chauffage et climatisation des habitations …….16

1.6.2 Distillation solaire……..17

1.6.3. Application des capteurs au séchage solaire…….17

1.7 Systèmes de séchage solaire……...……18

1.7.1 Historique et définition…….18

1.7.2 Différents types des séchoirs solaires……...18
1.7.2.1.Séchoirs solaires directs……19
1.7.2.2.Séchoirs solaires indirects…….20
1.7.2.3.Les séchoirs solaires mixtes……..21
1.7.2.4.Séchoirs solaires hybrides……22
1.8 Rôle du capteur solaire plan dans un système de séchage……. 22
1.9 Produits agricoles objets du séchage solaire en Algérie……..23
1.9.1. Revue bibliographique sur les configurations des capteurs……..23
1.9.2. Relation entre la performance du capteur et l'opération de séchage (point de vue thermique et la qualité de produit)……26
1.10. Problématiques relatives au séchage solaire…….27
1.11. Conclusion : Impacts espérés de l'étude……28

Chapitre 2

Etude expérimentale des différentes configurations des capteurs solaires plans

2.1. Introduction…….30
2.2. Etude expérimental des capteurs non connecté avec la chambre de séchage……..……30
2.2.1. Fiche technique sur les capteurs solaires utilisés……..31
2.3. Etude expérimental des capteurs connectés avec les chambres de séchage……..33
2.4. Appareillage de mesure…….34
2.4.1. Rayonnement solaire…….35
2.4.2. Humidité Relative……....35
2.4.3. Vitesse de vent à l'entrée du capteur……36
2.4.4. Système d'acquisition……...36
2.4.5. Fiche technique concernant les matériaux utilisés

2.5. Protocole expérimental et méthodologie de travail ……39
2.5.1. Méthodologie d'expérience……...40
2.5.2. Protocole expérimental……....41
2.6. Série d'expériences……41
2.7. Les résultats expérimentaux……42
2.7.1. Résultats de la première série d'expériences……...42
2.7.2. Résultats de la deuxième série d'expériences……...49
2.7.3. Résultats de 3eme série d'expériences……..55
2.8. Conclusion……..62

Chapitre 3

Effet des configurations géométriques sur les champs dynamique et thermique dans la chambre de séchage

3.1. Introduction……64
3.2. Principe de la méthode des volumes finis……..64
3.3. Présentation du problème Physique et de logiciel de travail…….65
3.3.1. Gambit……...65
a. Maillage…….....65
a.1. Maillage structuré (quadra/hexa)……...66
a.2 Maillage non structuré (tri/tétra)……..66
a.3 Maillage hybride……..67
3.3.2. Fluent……...67
Capacité de Fluent…….67
3.3.3. Les différentes étapes à suivre pour la simulation numérique par FLUENT……....68

3.4. La méthodologie de traitement (cas de la présente étude)……..69

3.4.1. Mise en équation du problème……..…69

a) Equations générales en régime laminaire……69

b) Equation de continuité……69

c) Equation de quantité de mouvement……...69

d) Equation de conservation d'énergie……69

3.4.2. Hypothèses Simplificatrices……..70

3.4.3. Equations du Problèmes……71

3.4.4. Conditions Aux Limites……71

3.4.5. Description de séchoir solaire indirect……..72

Le capteur solaire……..72

La chambre de séchage……72

3.5. La Méthode de travail sur logiciel……73

3.5.1. Travail sur «Gambit » ……...……...73

3.5.2. Travail sur « FLUENT ».…….....75

3.6. Simulation des différentes configurations du capteur aspirant……76

3.6.1. Simulation numérique du capteur à l'état réelle…….....77

3.6.2. Simulation des propositions de modification ……...78

3.7. Simulation des différentes configurations du capteur évacuant…….81

3.7.1. Données des conditions opératoires mesurées……..81

3.7.2. Simulation numérique de cheminée ordinaire……...82

a) Validation numérique à l'état réelle……...……82

b) Simulation numérique aux cas des modifications……...……83

b).1. Effet de la variation de la Longueur (conception C1)……....84

b).2. Effet de la variation de l'angle de convergence (ConceptionC2)…….....85

b).3. Effet du positionnement de la cheminée (gauche et droite)……....86

b).3.1. Cheminée à gauche (ConceptionC3)…….……86

b).3.2. Cheminée élargie positionnée à droite (ConceptionC4)……....86

3.7.3. Simulation numérique de cheminée solaire……..87

a) Positionnement de cheminée à gauche (ℓ =0.16m) (ConceptionCS1)…….....88

b) Positionnement de cheminée à droite (ℓ =0.16m) (Conception CS2)…….88

3.8. Conclusion……...89

Chapitre 4

Effets des améliorations conceptuelles des capteurs solaires sur les performances d'un séchoir solaire indirect

Partie I : Amélioration du Capteur solaire plan par intégration des matériaux à changement de phase……...90

4.1.Introduction……...90

4.2.Généralité sur Matériaux à changement de phase MCP……...90

4.2.1. Stockage thermique……...90

4.2.2. Les matériaux à changement de phase (MCP)……..91

4.2.3. Critère de sélection d'un bon MCP…….....91

4.2.4. Types de MCP……...92

4.2.5. Différentes formes des matériaux à changement de phase…….....93

4.3.Simulation du capteur solaire sans intégration de matériaux à changement de phase……..……94

4.3.1. Hypothèses simplificatrices…….94

4.3.2. Equations dimensionnelles gouvernantes…….....95

4.3.3. Conditions initiales et aux limites……95

4.3.4. Effet de l'épaisseur du vitrage……..97

4.3.5. Effet d'épaisseur de la lame d'air (la masse de l'air)……99

4.3.6. Effet du Changement de la longueur du capteur……101

4.4.Simulation du capteur solaire avec intégration des matériaux à changement de phase (MCP)…….…..102

4.4.1. Effet de l'épaisseur de la couche MCP…….....103

4.4.2. Effet de la nature du matériau à changement de phase……...107

Partie 2 : Amélioration des performances d'un séchoir solaire indirect naturellement ventilé par une cheminée solaire……...…112

4.5. Introduction

4.6. Etude numérique du comportement thermique de la chambre de séchage avec cheminée solaire sans MCP……112

4.6.1. Validation du modèle numérique…….....113

4.6.2. Simulation du séchoir solaire sans intégration de MCP……..113

4.6.3. Effet de la nature de cheminée……115

4.6.4. Effet du positionnement de cheminée solaire…….118

4.6.5. Etude de l'effet de la lame d'air (vitesse de ventilation)……....120

4.7. Etude numérique du comportement thermique de la chambre de séchage avec intégration par une couche de MCP dans le capteur……...124

4.7.1. Distribution de température dans le séchoir……125

4.7.2. Variation des températures dans différents points du séchoir……125

4.7.3. Comparaison de la variation de température à la sortie du capteur et la cheminée dans le cas du capteur avec MCP……127

4.2.1.1. Etude du comportement thermique du séchoir solaire avec intégration de MCP au niveau du capteur d'admission……..124

Conclusion générale……129

Liste des tableaux

Tableau (1-1): Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques…….7

Tableau (2-1) : Propriétés thermo-physiques des différents composants du capteur …….39

Tableau (2-2) : Propriétés thermo-physiques des matériaux à changement de phase utilisés dans les simulations……39

Tableau(2-3) : Biomatériaux utilisés……..40

Tableau (2-4): Enthalpie de l'air à la sortie des capteurs à petits échelles……49

Tableau (2- 5): Enthalpie de l'air à la sortie des capteurs à échelles réelles…….55

Tableau (2-6): Enthalpie de l'air à la sorties des capteurs lié avec les chambres……..62

Tableau (3-1) : Conditions aux limites mois d'avril…… 76

Tableau (3-2) : Conditions aux limites…….81

Tableau (3-3) : Température mésurées (mois d'avril)……..82

Tableau (3-4) : Température mésurées (mois de juin)…….83

Tableau (3-5): Modifications de la cheminée ordinaire …… ….83

Tableau (3-6): Les paramètres du premier cas de modification ……...84

Tableau (3-7): Les paramètres du 2ème cas de modification …….85

Tableau (3-8): Les paramètres du 3ème cas de modification ……86

Tableau (3-9) : Les paramètres du 4ème cas de modification ……...87

Tableau (3-10) : Configurations testées pour le cas de la cheminé solaire……...88

Tableau (4.1) : Les prophéties thermo-physique de MCP ……108

Tableau (4.2) : Amélioration des apports thermiques dans la période de 19h à 24h selon la nature des MCP utilisés……...110

Liste des figures

Figure (1-1): Schématisation de principe de captation du rayonnement solaire……6
Figure (1-2): Carte_solaire_irradiation_globale_surface_horizontale_Algerie……..…...6

Figure (1-3): Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu…….7

Figure (1-4): Schéma des composants principaux d'un capteur solaire plan…….9

Figure (1-5) : Différent échanges thermiques dans capteur plan……..10

Figure (1-6): Chauffage et climatisation des habitations……..16

Figure (1-7): Principe de construction et de fonctionnement dun distillateur solaire simple……17
Figure (1-8) : Schéma descriptif du séchoir solaire…….19

Figure (1-9): Séchoir solaire indirect……20

Figure (1-10) : Séchoir solaire mixte à circulation forcée……21

Figure (1-11): Séchoir solaire hybride solaire gaz …….22

Figure (1-12): Comparaison entre les valeurs calculées et mesurées de l'air de sortie, l'air moyen et les températures du matériau de stockage dans le réchauffeur d'air pour le Jour 1……25
Figure (2-1): Caractéristiques des capteurs à petits échelles (1, 2, 3,4)……....32

Figure (2-2): Caractéristiques des capteurs à échelle réelle à simple et à double passage……..33

Figure (2-3): Caractéristiques des capteurs à échelle réelle avec la chambre…….....34

Figure (2-4): Solari-métré (SOLARD) et le capteur de rayonnement solaire……...35

Figure (2-5): Thermo-hygrometer (testo 635)……..35

Figure (2-6): Appareil (Testo 416)……....36

Figure (2-7): Le ChâssisNI cDAQ-9174 et Le Module NI9113 attacher avec des Thermocouple……...……37

Figure (2-8): Acquisition des données *(logiciel SignalExpress)*……38

Figure (2-9) : Anémomètre et Module NI-9203……...38

Figure (2-10): Variation du rayonnement solaire……..42

Figure (2-11): Evolution de T. ambiante……43

Figure (2-12): Variation de la vitesse du vent à l'entré de capteur……...43

Figure (2-13): Variation de l'humidité relative ambiante……..……...44

Figure (2-14): Eévolution de T à l'entré et à la sortie pour le capteur N1……44

Figure (2-15): Evolution de T à l'entré et à la sortie pour le capteur N2……...45

Figure (2-1): Eévolution de T à l'entré et à la sortie pour le capteur N3……....45

Figure (2-2): Eévolution de T à l'entré et à la sortie pour le capteur N4……....46

Figure (2-3): Evolution des valeurs ΔT (T_{sortie} - $T_{entrée}$) pour les capteurs de 1^{ere} série d'expériences……46

Figure (2-4): Variation du rendements des capteurs N1, N2, N3 et N4 de la 1^{ere} série d'expériences……48

Figure (2-20): Variation du Rayonnement solaire de la 2^{eme} série d'expériences……49

Figure (2-21): Evolution de la température ambiante pour la 2^{eme} série d'expérience….....50

Figure (2-22): Vitesse du vent pour la 2^{eme} série d'expériences……50

Figure (2-23): Variation de l'humidité relative pour le 2^{eme} série d'expériences……....51

Figure (2-24): Evolution de T. entré, T.sortie pour le capteur à simple passage……...51

Figure (2-25): Evolution de T. entré, T. sortie pour le capteur à double passage, le 1^{er} passage……..52

Figure (2-26): Evolution de T. entré, T. sortie pour le capteur à double passage, le 2^{em} passage……..52

Figure (2-5): Evolution de température à l'absorbeur pour le capteur à bipasse et à simple passage……..53

Figure (2-6): Evolution des valeurs ΔT pour les capteurs de 2eme série d'expériences……53

Figure (2-7): Rendements des capteurs de 2eme série d'expériences……54

Figure (2-30): Evolution de T. ambiante et de R. solaire pour la 3eme série d'expériences……56

Figure (2-31): Evolution de la vitesse de vent et de l'humidité relative pour la 3eme série d'expériences ……57

Figure (2-8): Evolution de T. entré et de T. sortie pour le capteur simple passage avec la chambre…….. ..57

Figure (2-9): *Evolution* de T. entré et de T. sortie pour le capteur double passage, le 1er passage avec la chambre……...58

Figure (2-10): Evolution de T. entré et de T. sortie pour le capteur double passage, le 2em passage avec la chambre……...58

Figure (2-35): Evolution de la température à l'absorbeur pour le capteur à simple passage et bipasse lie avec la chambre……...59

Figure (2-36): Evolution des températures dans la chambre de capteur simple passage……..59

Figure (2-37): Evolution des températures dans la chambre de capteur double passage……..60

Figure (2-38): Evolution des valeurs ΔT pour les capteurs de 3eme série d'expériences……60

Figure (2-39): Rendement des capteurs de 3eme série d'expériences…… ……61

Figure (3-1) : Maillage structuré et non structuré……67

Figure (3-2) : Etapes de résolution suivies par GAMBIT et FLUENT……68

Figure (3-3) : Schéma du séchoir…….....72

Figure (3-4) : Dimensions de notre séchoir réel…….....74

Figure (3-5) : Maillage de séchoir à partir le gambit……74

Figure (3-6) : Maillage de séchoir adapte……76

Figure (3-7): Résultats de simulation du capteur à l'état réelle……78

Figure (3-8): Variation de la longueur et de la largeur de capteur……..79

Figure (3-9) : Résultats de la simulations après modifications de la longueur et de la larguer du capteur 81

Figure (3-10) : Distributions de vitesse et de température dans la chambre de séchage pour la journée du mois d'avril…….82

Figure (3-11) : Distributions de vitesse et de température dans la chambre de séchage pour la journée du mois de juin…….83

Figure (3-12): Distributions de vitesse et de température dans la chambre de séchage pour la conception C1…….....84

Figure (3-13) : Distributions de vitesse et de température dans la chambre de séchage pour la conception C2……..85

Figure (3-14) : Distributions de vitesse et de température dans la chambre de séchage pour la conception C3……..86

Figure (3-15): Distributions de vitesse et de température dans la chambre de séchage pour la conception C4……...……....87

Figure (3-16) : Distributions de vitesse et de température la cheminée dans la chambre de séchage pour la cheminé solaire CS1……88

Figure (3-17): Distributions de vitesse et de température dans la chambre de séchage pour la cheminé solaire CS2……..89

Figure (4-1): Classification des MCP proposée par Abhat……...92

Figure (4-2): Différentes géométries utilisées pour la macro-encapsulation……93

Figure (4-3): Conteneurs de MCP et la configuration du MC 94

Figure (4-4): Variation de la température à la sortie du capteur pour les trois épaisseurs à 14 h…….97

Figure (4-5): Variation de la température au-dessous du vitrage avec les trois épaisseurs à 14h…….98

Figure (4-6): Variation temporelle de la température à la sortie du capteur pour les trois épaisseurs……..98

Figure (4-7): Champ de température à 14 h pour épaisseur du vitrage 5 mm…….99

Figure (4-8): Evolution temporelle de l'enthalpie a la sortie de capteur……100

Figure (4-9): Evolution temporelle de la température à la sortie de capteur……..…100

Figure (4-10): Profil de température à la sortie de capteur dans les trois cas à14 h……...101

Figure (4-11): Evolution temporelle de la température à la sortie du capteur……....101

Figure (4-12): Evolution temporelle de l'enthalpie à la sortie du capteur……..102

Figure (4.13): Variation de la température moyenne au-dessus de l'absorbeur en fonction du temps pour différentes épaisseurs de MCP…….104

Figure (4.14): profile de température du capteur pour Déférents l'instants 1. isolant 2. MCP 3. Absorbeur 4. Lame d'air 5. Vitrage……..105

Figure (4.15): Variation de l'enthalpie à la sortie du capteur en fonction de temps……...106

Figure (4.16): Variation de la Température à la sortie du capteur en fonction de temps……106

Figure (4. 17): Fraction de liquide du MCP en fonction de temps……107

Figure (4.18): Température de l'absorbeur en fonction de temps pour différents MCP…….108

Figure (4.19): Température à la sortie de capteur en fonction de temps pour différents MCP……109

Figure (4.20): Enthalpie à la sortie de capteur en fonction de temps pour différents MCP……110

Figure (4.21): Fraction de liquide en fonction de temps pour différents MCP……...111

Figure (4.22): Températures mesurées et simulées dans la chambre de séchage……...113

Figure (4.23): Schéma descriptif des endroits de mesure……...114

Figure (4.24): Schéma descriptif : cheminée ordinaire (1), cheminée solaire (2)……...115

Figure (4.25) : Distribution de température à 14 h dans le séchoir pour les deux cheminées……116

Figure (4.26): Courbes des températures à la sortie du capteur et de la cheminée ordinaire……..117

Figure (4.27): Courbes des températures à la sortie de capteur et de la cheminée solaire……..117

Figure (4.28): Distribution des températures dans le séchoir pour les deux positionnements de la cheminée…….119

Figure (4.29): Courbes des températures aux niveaux horizontaux avec une cheminée solaire centrée…….119

Figure (4.30): Courbes des températures aux étages avec une cheminée solaire au nord…….120

Figure (4.31): Distribution des températures pour les différentes épaisseurs de la lame d'air…….121

Figure (4.32): Courbes des vitesses à la sortie de la cheminée solaire pour les différentes lames d'air……...121

Figure (4.33): Courbes des températures à la sortie de la cheminée solaire pour différentes lames d'air……...122

Figure (4.34): Diagramme des étapes de simulation……...123

Figure (4.35): Schéma descriptif du séchoir avec intégration de MCP au capteur…….124

Figure (4.36): Champ de température au sein du séchoir dans le cas de capteur sans et avec MCP……125

Figure (4.37): Température dans la chambre au niveau des étages……126

Figure (4.38): Température aux sorties de la cheminée et du capteur avec MCP……126

Figure (4.39): Variation de température à la sortie de capteur (a), et de cheminée (b)……128

Nomenclture

Lettres latines

Symbole	Désignation	Unité
C_v	Chaleur massique du verre	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
C_p	Chaleur massique du polystyrène	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
C_c	Chaleur massique du cuivre	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
C_A	Chaleur massique de l'aluminium	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
C_{Ai}	Chaleur massique de l'acier inoxydable	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
E	épaisseur	(m)
G	La gravité	$m.s^{-2}$
h	Coefficient de convection	$(W{\cdot}m^{-2}{\cdot}K^{-1})$
h_a	Coefficient de transfert thermique avec l'extérieur	$W.m^{-2}.K^{-1}$
h_p	Coefficient global de pertes du capteur	$(W{\cdot}m^{-2}{\cdot}K^{-1})$
M_f	Masse en fluide du capteur	$(kg\ m^{-3})$
P	Pression	Pa
P_{atm}	Pression atmosphérique	Pa
Q	Flux de chaleur	W
Q	Densité de flux de chaleur émis par le corps	$W\ m^{-2}$
q_{cf}	Débit calorifique du fluide caloporteur	$(W.°C^{-1})$
S	Surface d'échange	m^2
T_p	Température de la paroi solide	K
T_0	Température de référence	K
T_f	Température du fluide	K
T	Temps	s
T_{fe}	Température du fluide caloporteur à l'entrée de l'absorbeur	K
T_{fs}	Température du fluide caloporteur à la sortie de l'absorbeur	K
T_{pm}	Température moyenne de la paroi absorbante	K
T_a	Température de l'air extérieur	K
V	La vitesse radiale	$m.s^{-1}$
U	La vitesse axiale	$m.s^{-1}$

Lettres grecques

Symboles	**Désignation**	**Unité**
ρ	La masse volumique	$kg.m^{-3}$
ρ_p	Masse volumique du polystyrène	$kg.m^{-3}$
ρ_c	Masse volumique du cuivre	$kg.m^{-3}$
ρ_A	Masse volumique de l'aluminium	$kg.m^{-3}$
ρ_{Ai}	Masse volumique de l'acier inoxydable	$kg.m^{-3}$

λ_v	Conductivité thermique de verre	$W.m^{-1}.K^{-1}$
λ_p	Conductivité thermique du polystyrène	$W.m^{-2}.K^{-1}$
λ_c	Conductivité thermique du cuivre	$W.m^{-2}.K^{-1}$
λ_A	Conductivité thermique de l'aluminium	$W.m^{-2}.K^{-1}$
λ_{Ai}	Conductivité thermique de l'acier inoxydable	$W.m^{-2}.K^{-1}$
β	Coefficient d'expansion thermique	K^{-1}
$\varepsilon *$	Émissivité thermique du matériau	W
δ	Constante de Stefan-boltzmann	$W.m^{-2}.k^{-4}$
φ_{sa}	Flux solaire absorbé	$W.m^{-2}$
φ_p	Flux perdu par paroi absorbant	$W.m^{-2}$
φ_u	Flux utile transmise au fluide caloporteur	$W.m^{-2}$
φ_{st}	Flux stocké dans le capteur	$W.m^{-2}$
φsa:	Flux solaire absorbé par la surface exposée	W
G(i,γ):	Eclairement (densité de flux) solaire incident sur le capteur	$(W.m^{-2})$
αps	Coefficient d'absorption de la paroi absorbante par rapport au rayonnement solaire	
τcs	Coefficient de transmission de la couverture transparente par rapport au rayonnement solaire	

Introduction générale

Afin de répondre aux besoins humains en énergie, les scientifiques comme les gouvernements s'orientent vers le développement et l'exploitation des ressources en énergies renouvelables. Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle de temps humain. L'énergie renouvelable, non polluante, contribue à l'amélioration de la gestion des ressources locales et à la génération des emplois, parmi les quelles on trouve, au premier rang, l'énergie solaire. Les principaux avantages qui rendent cette source d'énergie renouvelable très intéressante peuvent se résumer par les faits suivants: (a)- Energie gratuite, (b)- Disponibilité sur une grande partie du globe (Gisement solaire), (c)- Absence des risques d'épuisement (au moins à l'échelle humaine), (d)- Pas de rejets polluants et (e)- Pas de danger radioactif et déchets encombrants.

Afin d'utiliser l'énorme source d'énergies renouvelables, l'Algérie a créé une dynamique en lançant un ambitieux programme de développement des énergies renouvelables et de promotion de l'efficacité énergétique. Ce programme s'appuie sur une stratégie axée sur le développement et l'extension de ressources inépuisables, telles que l'énergie solaire, la biomasse, la géothermie, l'énergie éolienne et l'énergie hydraulique, afin de diversifier les sources d'énergie et préparer l'Algérie pour demain. Le programme consiste à installer jusqu'à 22 000 MW de capacité de production d'énergie renouvelable entre 2011 et 2030, dont 12 000 MW destinés à répondre à la demande d'électricité domestique et 10 000 MW destinés à l'exportation [1]. Cette dernière option dépend de la disponibilité d'une demande assurée à long terme par des partenaires fiables ainsi que d'un financement externe attractif. Dans ce programme, environ 40% de l'électricité produite pour la consommation intérieure devrait provenir de sources d'énergie renouvelables d'ici à 2030 [2].

La situation géographique de l'Algérie signifie qu'elle est en mesure de jouer un rôle stratégique important dans la mise en œuvre de la technologie des énergies renouvelables dans le nord de l'Afrique. Le climat est transitoire entre maritime (nord) et semi-aride à aride (moyen et sud). Les précipitations annuelles moyennes varient de 500 mm (au nord) à 150 mm (au sud). La température moyenne annuelle est d'environ 12 ° C. L'Algérie joue un rôle très important sur les marchés mondiaux de l'énergie, à la fois en tant que producteur d'hydrocarbures important et en tant qu'exportateur, ainsi qu'en tant que participant clé sur le marché des énergies renouvelables.

L'Algérie, vue sa situation géographique, dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie acquise quotidiennement sur une surface horizontale de 1m² est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m²/an au nord et 2263 kWh/m²/an au sud du pays [3].

Un des outils utilisés pour exploiter l'énergie solaire est le capteur plan à air qui peut être utilisé dans beaucoup d'applications nécessitant des températures basses et modérées, telles que le chauffage des locaux, le séchage des produits agricoles, le séchage du bois, le séchage des briques, etc…A l'aide des capteurs solaires, l'énergie des rayons solaires peut être captée et transformée directement en énergie électrique (Conversion photovoltaïque) ou en énergie thermique (Conversion photothermique). Cette dernière constitue un domaine d'application très important et très large particulièrement dans les régions bien ensoleillées.

Le séchage solaire des produits agroalimentaires est un procédé de conservation qui favorise le stockage des aliments et a un intérêt économique certain pour le pays. En agroalimentaire, d'une façon générale, l'optimisation du séchage doit répondre à deux impératifs essentiels qui sont la consommation restreinte de l'énergie nécessaire et la sauvegarde de la qualité du produit séché. Cet aspect a fait l'objet de nombreux travaux scientifiques qui traitent le problème à différents niveaux du processus : le produit, le séchoir et le coût économique.

Pour les pays en voie de développement, on a pensé à sécher en exploitant l'énergie solaire méthode utilisée dans le passé et jusqu'au jour d'aujourd'hui, néanmoins il est à noter que l'efficacité des processus de séchage direct en ambiance naturelle est faible compte tenu des nombreux problèmes en relation avec la météorologie, les constituants du produit sensibles aux rayonnements ultra violets, la poussière, les insectes, etc.

Le séchage solaire est donc un procédé de conservation et de valorisation qui favorise le stockage des aliments et qui utilise l'énergie solaire comme source de chauffage. Dans le séchage direct, les rayons solaires frappent directement les produits mais dans le type de séchage solaire indirect, le séchoir se compose de trois parties, la première est un capteur solaire plan à air, dont le but est de capter les rayons solaires et les transformer en énergie thermique, cette énergie est transportée avec l'air à la deuxième partie qui est la chambre de séchage où se trouve le produit à sécher, et la troisième partie est la cheminée (ordinaire ou solaire) qui fait évacuer l'air humide vers l'extérieur afin de renouveler l'air de séchage. Une cheminée solaire, appelée également cheminée provençale ou cheminée thermique, est un

dispositif permettant d'améliorer la ventilation naturelle d'un séchoir en utilisant le mouvement convectif de l'air chauffé passivement dans un conduit exposé au rayonnement solaire.

Dans cette thèse, l'objectif de notre travail est de contribuer, par une solution technique (expérimentale et numérique) à assurer, dans un séchoir solaire indirect, une bonne répartition et un degré de température convenables à sécher des produits agroalimentaires sans détérioration conduisant ainsi à un produit fini de bonne qualité. Un des problèmes essentiels de l'utilisation de l'énergie solaire est l'hétérogénéité de la distribution de température de l'air dans les chambres de séchage des séchoirs solaires. Par ailleurs, l'introduction de quelques modifications sur la forme géométrique du séchoir, soit le capteur d'aspiration ou le capteur d'évacuation, peut nettement améliorer la répartition de température dans la chambre en améliorant aussi la vitesse de ventilation naturelle.

Afin d'assurer une lecture aisée de cette thèse, nous avons choisi de structurer le développement de notre étude selon un enchainement logique constitué d'une introduction, de quatre chapitres et d'une conclusion.

L'introduction présente brièvement les intérêts technico-économiques de l'étude avec un exposé succinct de la stratégie théorique, expérimentale et numérique dont a été abordé le travail. Dans le premier chapitre on se propose un contexte général qui contient des notions théoriques générales sur l'irradiation et le gisement solaire, d'autre part, les capteurs et les séchoirs solaires afin de regrouper les éléments de revue bibliographique sur le rôle des capteurs plans dans un séchoir solaire, ce qui représente l'essentiel de la problématique de cette étude. Le deuxième chapitre présente quelques essais expérimentaux utilisant différents capteurs solaires plans, réalisés dans des travaux antérieurs, afin de rechercher les meilleurs cas de configurations et paramètres de travail assurant des températures convenables pour les opérations de séchage solaire pratiquées dans les régions du Sahara algérien. Nous avons choisi de travailler sur des capteurs solaires plans à air utilisés généralement dans les applications de séchage. Les principaux paramètres d'influence sur le rendement de ces capteurs sont l'isolation, la circulation du fluide (naturelle ou ventilée), l'emplacement et l'inclinaison, le vitrage et l'effet de serre, la forme de la plaque absorbante, la peinture ou la couche qui se dépose sur la face de l'absorbeur exposée aux rayonnements solaires et aussi la configuration géométrique des capteurs. Dans le troisième chapitre nous avons fait appel au moyen de simulation numérique utilisant un logiciel CFD approprié (Fluent) travaillant par la méthode des volumes finis afin d'étudier et discuter les meilleurs cas de figures permettant d'obtenir des températures de travail suffisantes pour assurer et achever des opérations de

séchage solaire des produits agroalimentaires (50°C à 70°C) dans les conditions climatiques de la région de Ouargla, nord-est du Sahara algérien. Dans cette partie du travail, nous étudions l'influence des modifications au niveau de la forme (longueur et largeur) du capteur plan afin d'obtenir une bonne homogénéité de distribution de température dans la chambre de séchage. Une étude numérique est faite pour étudier le comportement dynamique et thermique de l'écoulement d'air dans la chambre de séchage à partir des modifications apportées sur le capteur solaire plan à air. D'autre part, dans ce même chapitre nous avons étudié la ventilation naturelle utilisant les techniques de cheminée ordinaire et de cheminée solaire, dans un objectif d'amélioration des performances du séchoir solaire avec moindre cout. Le travail ainsi abordé a mis en application les équations d'écoulement et de transfert thermique moyennant le logiciel CFD Fluent. Les calculs de simulations concernent les deux types de cheminées avec considération d'un nombre de modifications conceptuelles appropriées et qui ont fait l'objet de comparaisons et commentaires. Le quatrième chapitre présente une étude numérique dans le but d'évaluer les performances thermiques d'un capteur solaire plan à air, sans et avec intégration des matériaux à changement de phase. Les calculs de simulation ont été conduits moyennant la méthode des volumes finis mise en œuvre sur le code de calcul CFD "Fluent" et utilisant un modèle en régime instationnaire permettant d'approcher au mieux le cas réel. A cet effet le MCP, avec différentes propriétés thermo-physiques, a été placé en-dessous de la plaque absorbante pour stocker l'énergie solaire afin de l'utiliser dans les heures peu ou non ensoleillés. Ce même chapitre, dans sa deuxième partie, a fait l'objet d'évaluation des performances thermiques d'un séchoir solaire, utilisant l'évacuation de l'air par cheminée solaire. En fin dans une conclusion générale nous avons souligné les résultats les plus significatifs obtenus à travers les différentes parties composant ce travail de thèse. Certaines recommandations ont été notées en perspective pour la continuité de la présente étude.

Chapitre 1

Contexte général, problématique et situation physique de l'étude

1.1 Contexte générale

1.1.1 Energie et gisement solaire en Algérie

L'énergie solaire est une ressource très importante pour l'énergie renouvelable. La conversion de l'énergie solaire en utile comme la chaleur, l'électricité etc. ..., est une exigence importante. Le flux solaire sur la surface de la terre fournit une énergie qui est plus grande que l'exigence énergétique de tous les êtres humains dans la vie quotidienne. Il est nécessaire et convenable de basculer de la méthode de conversion d'énergie conventionnelle en un nouveau pour utiliser l'énergie solaire de manière efficace [4].

Le soleil produit une énorme quantité d'énergie, qui quitte sa surface sous forme de rayonnement électromagnétique d'un spectre allant de 0,2mm (ultra-violet) à 4mm (infrarouge). Cette énergie représente une source majeure d'énergie dans le monde. Malgré la distance considérable de la terre du soleil (150.10^6km), la couche terrestre reçoit une quantité d'énergie sous forme de rayonnements solaires soit direct, diffus ou globale de 180.10^6 GW [5].

L'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autres sources d'énergie. Elle représente un potentiel considérable; en effet, notre pays (l'Algérie) reçoit plus de 3000 h de lumière solaire par année avec un haut niveau d'éclairement. Avec une optimisation des angles de réception, la moyenne annuelle journalière est de 5 à 7 kWh /m²/jour [6], [7].
L'énergie émise par le soleil voyage jusqu'à la terre sous forme de rayonnement électromagnétique [8]. Ce rayonnement est semblable aux ondes radioélectriques mais il possède une gamme de fréquence différente. L'intérêt du solaire est sensiblement le même sur tout le territoire. L'ensoleillement est plus fort dans le Sud, mais dans le Nord, les besoins en chauffage sont plus importants et plus étalés sur l'année. L'énergie solaire peut être récupérée par des capteurs solaires thermiques ou photovoltaïques. Les capteurs solaires plans utilisent le rayonnement diffus provenant du ciel et du sol, par contre les concentrateurs n'utilisent que le rayonnement direct. La figure (1-1) suivante montre le principe de captation par les deux types de conversion thermique de l'énergie solaire [7].

Le flux solaire peut être directement converti en chaleur par l'intermédiaire de capteurs solaires thermiques. Cette technique est applicable au chauffage des habitations, des piscines,

à la production d'eau chaude sanitaire, ou encore au séchage des récoltes ou des produits agroalimentaires (fourrage, céréales, fruits [9].

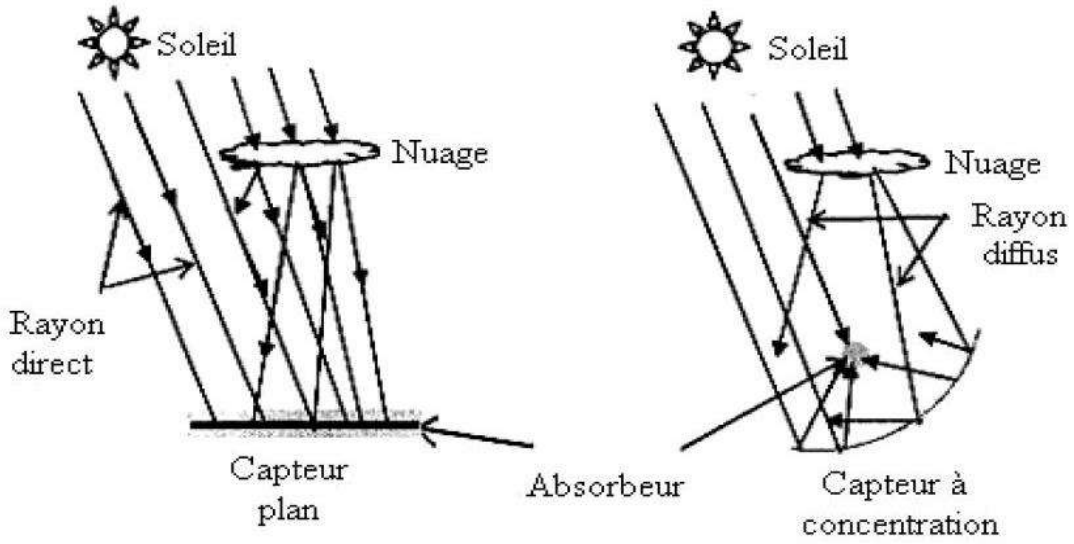


Figure (1-1): Schématisation de principe de captation du rayonnement solaire [10]

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la figure (1-2) :

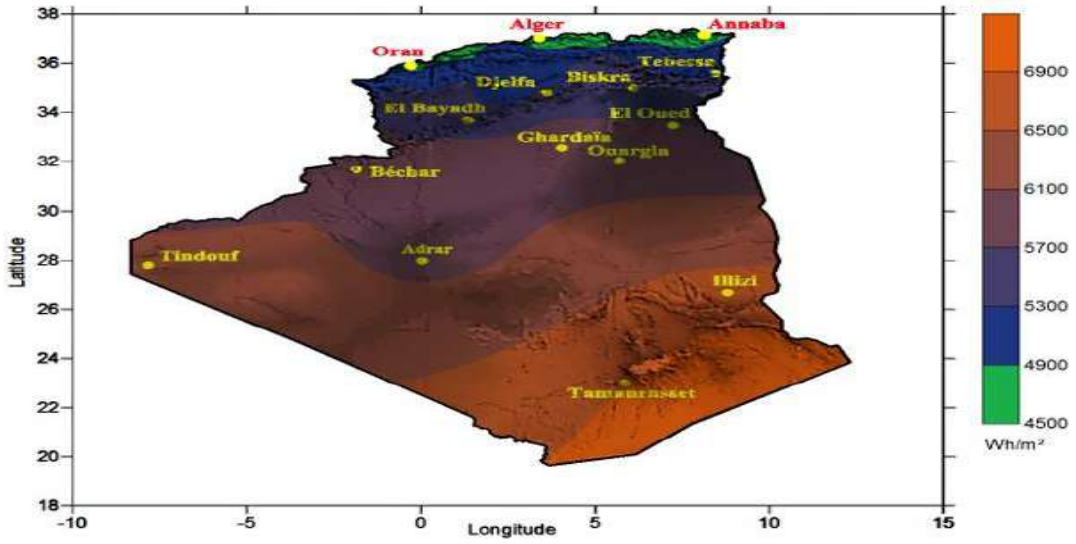


Figure (1-2): Carte solaire irradiation globale surface horizontale Algerie [11]

1.1.2 Situation géographique de l'Algérie et les capacités d'ensoleillement

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient

été découverts à Hassi R'Mel. La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau (1-1) selon l'ensoleillement reçu annuellement [7] :

Tableau (1-1): Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques [7]

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m^2/an)	1700	1900	26500

La durée d'insolation dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6h/j en période estivale.

La région d'Adrar est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel de toute l'Algérie comme c'est illustré par la figure (1-3) [12]:

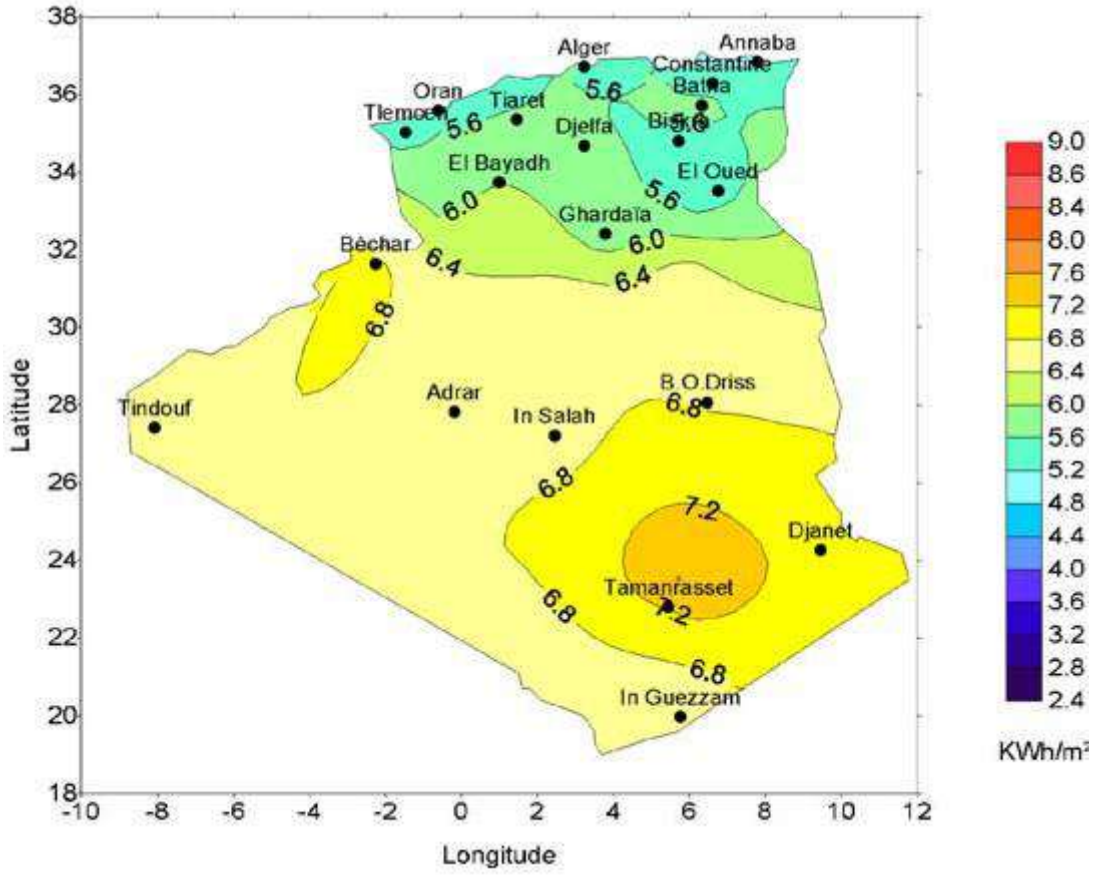


Figure (1-3): Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu [12]

1.2. Identité et constitutions du capteur solaire plan

1.2.1. Historique et définition des capteurs solaires

Les capteurs solaires sont des dispositifs énergétiques, pour la récupération des rayons solaires ensuite convertis en d'autres formes d'énergie (thermique, ou photovoltaïque) [13]. Le capteur solaire est un échangeur de chaleur qui fonctionne entre une source radiante le soleil et un fluide d'autre part. Krishna Murari Pandey et Rajesh Chaurasiya (2017) énoncent que le capteur solaire est un genre d'échangeur de chaleur où l'échange thermique prend entre une source de distance et un fluide de transfert thermique entrant dans le collecteur. Le rayonnement solaire du soleil frappe l'absorbeur du collecteur et l'énergie thermique est alors transférée au fluide [14]. Son rôle est la conversion de l'énergie apportée par le rayonnement solaire en énergie calorifique. La chaleur collectée par l'absorbeur est cédée au fluide caloporteur qui circule dans des canalisations ou une lame d'air qui sert à transporter la chaleur du capteur vers le point d'utilisation [15].

L'histoire des capteurs thermiques à basse température remonte à Horace-Bénédict de Saussure (1740-1799) qui mit en évidence l'effet de serre obtenu par un vitrage au dessus d'un absorbeur dans un caisson isolé. Il fallait cependant attendre 1910 pour voir apparaître les premiers chauffe-eau solaires en Californie.

Les capteurs solaires plans ont été intensivement étudiés par Hottel et Woertz (1942), Bliss (1959), Nahar et Garg (1980), Francken (1984) et d'autres. Les capteurs solaires plans sont l'un ou l'autre conduit ondulé (Mathur et al. 1959) et en esclavage (Patil, 1975) ou type de tube-dans-plat (CSIRO, 1964) avec la retenue différente arrangements (Yellot et Sobotka, 1964 ; Gupta et Garg, 1968 ; Bonheur, 1959) [16]. Les capteurs solaires plans habituellement sont de manière permanente fixés en position, et doivent donc être orientés convenablement.

1.2.2 Composants d'un capteur solaire plan

Un capteur solaire plan typique se compose habituellement de vitre de couverture, plaque absorbante, couches d'isolation, et d'autres auxiliaires [17]. Le schéma des composants principaux d'un capteur solaire plan est donné sur la figure (1-4).

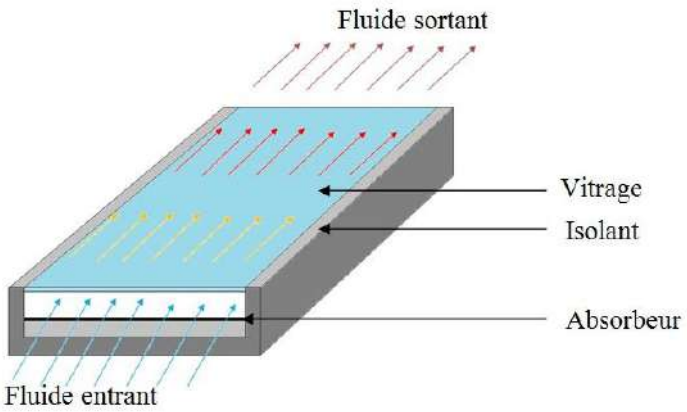


Figure (1-4): schéma des composants principaux d'un capteur solaire plan

Le capteur solaire plan se compose essentiellement des éléments suivants :

a- une plaque opaque en générale peint en noir matte qui absorbe le rayonnement solaire et transmet la chaleur au fluide caloporteur.

b- une isolation thermique arrière et latérale.

c- une couverture transparente généralement en verre à simple ou à double vitrage qui assure l'effet de serre et évite le refroidissement de l'absorbeur en protégeant de vent.

Dans un capteur solaire thermique, le rayonnement traverse son vitrage et frappe l'absorbeur. C'est à la surface de celui-ci que le rayonnement solaire est converti en chaleur. Un fluide caloporteur, qui circule, conduit la chaleur captée vers le consommateur. Le vitrage crée un effet de serre, qui augmente le rendement du capteur.

1.2.3 Capteur solaire plan à air

Trois fonctions incombent à ce type de capteurs, absorber le rayonnement solaire, le transformer en chaleur et transmettre cette chaleur au fluide caloporteur. Pour absorber au maximum l'énergie rayonnée du soleil, il suffit d'une surface plane placée de façon judicieuse ; cette surface doit être douée du coefficient d'absorption de la couche superficielle le plus élevé possible. [8].

1.3. Différents modes de transferts thermiques mis en jeu dans un capteur solaire

Un capteur solaire met en jeu simultanément les trois modes de transfert thermique, conduction, convection et rayonnement (figure 1-5).

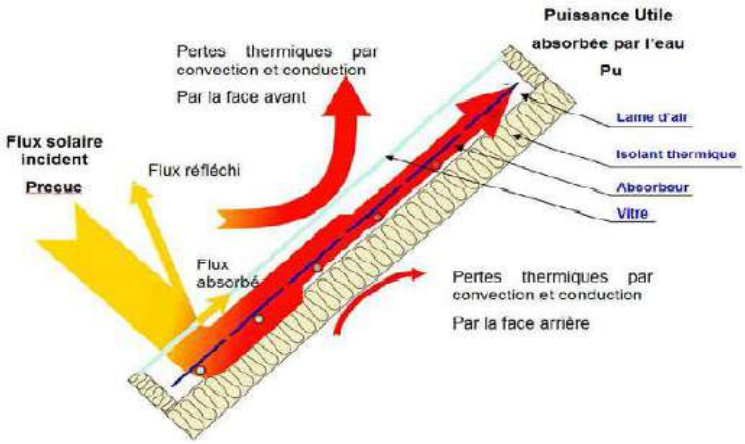


Figure (1-5) : Différent échanges thermiques dans capteur plan [19]

1.3.1. Conduction:

La conduction est le mode de transfert de chaleur caractérisé par la propagation de l'énergie thermique dans un milieu matériel sans déplacement de la matière. La loi correspondant à ce processus de diffusion thermique est la loi de Fourier donnée par la relation:

$$Q = - \lambda.S.\text{grad } T \qquad (1.1)$$

Q: Flux de chaleur.

λ: Coefficient de conductivité thermique.

S: Surface d'échange.

1.3.2. Convection:

La convection est un transport de l'énergie thermique dû à des mouvements macroscopiques. On distingue deux types de convection :

- **La convection forcée :** Le mouvement du milieu est engendré par un dispositif externe (le vent, une pompe, un ventilateur…etc).
- **La convection naturelle :** Le mouvement du fluide est engendré par les variations de densité causées par des variations de température au sein du fluide, tel est le cas de la thermo-circulation.

Le transfert thermique convectif est régi par la loi de Newton:

$$Q = h.S.(T_p - T_f) \qquad (1.2)$$

Q : Le flux échange par convection.

h: Coefficient de convection.

S: Surface de la paroi solide en contact avec le fluide.

T_p: Température de la paroi solide.

T_f: Température du fluide.

Dans un capteur plan l'échange par convection s'effectue entre :

- La vitre et l'ambiance, par convection libre ou forcée par le vent.
- La vitre et la plaque de l'absorbeur par convection libre.
- La plaque et le fluide par convection libre.
- Le fluide et l'isolant par convection libre.
- L'isolant et l'ambiance par convection libre ou forcée par le vent.

1.3.3. Rayonnement

Le transfert de chaleur par rayonnement à lieu lorsque de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques est émise par une surface et absorbée par une autre. Cet échange peut avoir lieu même lorsque les corps sont séparés par le vide ou par n'importe quel milieu intermédiaire suffisamment transparent pour les ondes électromagnétiques.

La loi fondamentale du rayonnement est celle de Stefan-Boltzmann:

$$\mathbf{Q} = \boldsymbol{\varepsilon} * \times \boldsymbol{\delta} \times \mathbf{T}^{4} \qquad (1.3)$$

Q : Densité de flux de chaleur émis par le corps.

$\varepsilon *$: Émissivité thermique du matériau.

δ: Constante de Stefan-boltzmann évaluée à: $5{,}6 \times 10^{-8}\ W.m^{-2}.k^{-4}$.

T: Température absolue du corps.

Dans un capteur solaire plan le transfert par rayonnement s'effectue entre :

- ✓ La vitre et le ciel.
- ✓ La vitre et la plaque chauffante.
- ✓ L'isolant et le sol.

1.4. Bilan thermique d'un capteur solaire plan :

Le bilan thermique de la paroi absorbante s'écrit [20] :

$$\varphi_{sa} = \varphi_p + \varphi_u + \varphi_{st} \quad (1.4)$$

Où:

φ_{sa}: Flux solaire absorbé,

φ_p: Flux perdu par paroi absorbant,

φ_u: Flux utile transmis au fluide caloporteur,

φ_{st}: Flux stocké dans le capteur qui s'écrit:

$$\varphi_{st} = M_f . C_f . \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.5)$$

Où:

M_f : Masse en fluide du capteur définie par : $\sum mi.ci = M_f . C_f$, i représentant les différents éléments constitutifs du capteu.r

T : Température moyenne du capteur

t : Temps

La puissance absorbée par le capteur s'écrit :

$$\varphi_{sa} = \tau cs . \alpha_{ps} . G(i,\gamma) . S \quad (1.6)$$

Où:

φsa : Flux solaire absorbé par la surface exposée (W)

G(i,γ) : Eclairement (densité de flux) solaire incident sur le capteur ($W.m^{-2}$)

αps : Coefficient d'absorption de la paroi absorbante par rapport au rayonnement solaire

τcs : Coefficient de transmission de la couverture transparente par rapport au rayonnement solaire

S : Surface de la paroi absorbante.

Dans le cas où le fluide caloporteur ne subit pas de changement d'état, le flux utile s'écrit:

$$\varphi_u = q_{cf}\left(T_{fs} - T_{fe}\right) \quad (1.7)$$

Où :

q_{cf} : Débit calorifique du fluide caloporteur ($W.°C^{-1}$) = débit massique x capacité calorifique

T_{fe}: Température du fluide caloporteur à l'entrée de l'absorbeur

T_{fs} : Température du fluide caloporteur à la sortie de l'absorbeur.

Les déperditions thermiques du capteur sont mises sous la forme :

$$\varphi_p = h_p.(T_{pm} - T_a).s \qquad (1.8)$$

Où :

h_p : Coefficient global de pertes du capteur .

T_{pm} : Température moyenne de la paroi absorbante.

T_a: Température de l'air extérieur.

Dans le cas d'un capteur plan, la température moyenne T_{pm} peut en première approximation être calculée par :

$$T_{pm} = \frac{3T_{fs}+T_{fe}}{4} + \Delta T \qquad (1.9)$$

Pour tenir compte de la non-linéarité de l'évolution de la température du fluide dans le capteur et de l'écart de température ΔT existant entre le fluide et la paroi absorbante.

1.5. Améliorations des capteurs solaires [21]

Les capteurs solaires plans à air transforment l'énergie radiante du soleil en énergie thermique extraite par l'air en écoulement dans le capteur. Cette énergie est utilisée dans différentes applications solaires, comme par exemple, le séchage des grains ou du bois, le chauffage des locaux industriels ou à usage d'habitation, ainsi que dans la réfrigération solaire. Plusieurs types des capteurs à air ont été construits et testés à travers le monde. L'objectif principal étant de collecter le maximum d'énergie solaire à un coût minimum. L'idée d'utiliser les collecteurs à énergie solaire est enregistrée depuis des temps préhistoriques. En 1875, Mouchot a fait une avance notable dans la conception de capteur solaire en faisant un réflecteur sous forme de cône court. En 1901, A.G. Eneas a installé un collecteur de focalisation de diamètre 10m qui a permis d'actionner un appareillage de

pompage de l'eau d'une ferme de Californie. Pendant les 50 dernières années, beaucoup de constructions ont été conçues en utilisant les collecteurs solaires afin de chauffer le fluide de fonctionnement qui actionne l'équipement mécanique [22].

Ho-Ming Yeh et Tong-Tshien Lin (1995), [23] ont étudié théoriquement et expérimentalement l'influence du rayonnement solaire capturé sur l'efficacité de capteur solaire. Ils ont trouvé que le taux du rayonnement solaire et la surface de contact entre l'absorbeur et le fluide caloporteur accroît avec l'augmentation de la surface du capteur, mais aussi elle augmente le coefficient des pertes thermiques entre la couverture et l'extérieur. A. Mohamad (1997), [24] à étudier la minimisation des pertes de la chaleur qui passe de la couverture vers l'ambiance ; Il a proposé de forcer l'air pour circuler sur la couverture de verre avant le passage par l'absorbeur, et d'utiliser un absorbeur poreux pour augmenter le transfert thermique à l'air et d'ajouter une deuxième couverture. A. Benkhelifa (1998) [25] a présenté un modèle mathématique pour étudier l'influence de quelques paramètres sur le coefficient de perte thermique vers l'avant du capteur. Le modèle permet de calculer ces pertes thermiques. Il a trouvé que l'augmentation du coefficient de pertes thermiques dépend de l'augmentation de l'émissivité de l'absorbeur ainsi que sa température et le coefficient d'échange convectif avec l'air ambiant, mais, l'accroissement de la distance entre l'absorbeur et la vitre diminue les pertes thermiques. N.T. Ahmad (2001) [26] a étudie expérimentalement la minimisation des pertes de chaleur convective vers l'environnement d'un capteur utilisé dans le chauffage des serres. Il a trouvé un gain considérable dans la température de l'air avec une différence de température qui tend vers 10°C. Ce travail montre que l'isolation transparente (ici film de bulles d'air) améliore les performances de capteurs, alors c'est mieux d'utiliser cette isolation pour couvrir tout le capteur ou au moins sa partie inférieure, comme il a été fait dans ce travail. A. Ahmed-Zaïd et al. (2001), [27] ont étudié expérimentalement l'insuffisance de l'échange thermique réalisée dans le capteur solaire plan à air entre le fluide et l'absorbeur. L'utilisateur est amené à apporter des améliorations pour de meilleures performances ou une meilleure efficacité thermique. Ils ont introduit des chicanes (obstacles) pour améliorer le couple rendement-écart de température du capteur [28-30]. Dans le même sens, d'autres chercheurs ont étudié numériquement par outils de simulation numérique (CFD) le comportement thermique du capteur avec l'intégration des chicanes [31-35]. Pour le même objectif d'augmenter l'apport thermique le l'absorbeur beaucoup de travaux de recherche ont été fait pour voir l'effet du nombre de passage d'air dans le capteur plan à air [21, 36]. Fayza Ben Yelles et al (2007), [37] et pour réduire les pertes thermiques par l'avant du capteur, ont proposé une nouvelle conception qui utilise l'aérogel de silice (matériaux poreux de faible

conductivité thermique) comme un isolant placé au dessus de l'absorbeur. Avec la comparaison de ce nouveau capteur avec les autres capteurs plans, avec ou sans absorbeur sélectif. Le coefficient de pertes par conduction et par rayonnement à travers l'isolant et le coefficient de pertes globales du nouveau dispositif ont été estimés. O. Turgut, N. Onur (2009), [38] ont étudié expérimentalement et numériquement la détermination des coefficients thermiques moyens pour une convection forcée au dessus de la surface d'un capteur solaire. Les simulations numériques ont été obtenues par le code Fluent, et l'étude expérimentale a été effectuée par l'utilisation du transfert de chaleur. Les coefficients de transfert de masse ont été convertis en coefficients de transfert thermique par une analogie entre ces deux processus. Les résultats expérimentaux sont comparés avec les résultats numériques. Ils ont observé que les deux résultats sont harmonieux entre eux, dans cette étude, des nouvelles corrélations ont été présentées pour le nombre de Nusselt avec une erreur de 12 %. Elradi A. Musa et al (2004), [39] ont étudié l'analyse du transfert de chaleur du capteur solaire à double passe avec milieu poreux. Pour augmenter le transfert de chaleur des déférents milieux poreux ordonné avec déférentes porosités. Le capteur a été développé et testé à l'intérieur par la variation des caractéristiques et les conditions de fonctionnements par l'utilisation d'un simulateur allogène-lampe comme source de radiation. Ils ont trouvé que dans le capteur solaire à double passe, le débit massique a un grand effet sur l'élévation de la température. La radiation solaire a aussi une grande influence sur l'élévation de la température à la basse porosité. Le nombre de Reynolds a un grand effet que le nombre de Nuselt à la basse porosité. Le coefficient de transfert de chaleur augmente par l'utilisation du milieu poreux dans le canal inférieur du capteur solaire à double passe.

A.E. Kabeel, et al [40] ont présenté une revue de la littérature traitant des méthodes d'amélioration, des configurations de conception et des applications de différents types de capteur solaire à air. Différentes recherches ont été effectuées sur les capteurs à air, expérimentales ou théoriques, afin d'améliorer leurs performances. Différentes modifications sur l'absorbeur plaque ont été faites. L'une des théories techniques d'amélioration les plus importantes consiste à utiliser des ailettes pour augmenter la surface de transfert de chaleur. Divers types des ailettes ont amélioré les performances, tels que les ailettes longitudinales, les ailettes ondulées et les ailettes fixées avec des baffles. Le processus de recyclage a également amélioré les performances des capteurs à air. On constate également que pour améliorer à la fois le transfert de chaleur et les performances thermo-hydrauliques du capteur, des absorbeurs artificiellement rugueux sont utilisés. En utilisant la rugosité artificielle, les

résultats ont montré une bonne amélioration du nombre de Nusselt et du coefficient de frottement pour une large gamme de nombres de Reynolds.

En vue également d'utiliser des matériaux de stockage de chaleur, en particulier des matériaux à changement de phase (PCM), divers types de lit de garnissage et des absorbeurs revêtus sélectifs permettent une bonne amélioration de l'efficacité des capteurs. Grâce à ces améliorations, les capteurs solaires à air sont devenus plus populaires dans un plus grand nombre d'applications, avec une bonne réduction de la consommation de carburant et des coûts d'installation et de fonctionnement [40, 41].

1.6. Les domaines d'applications d'un capteur solaire

À travers les domaines d'utilisations des capteurs solaires plans dans le monde, la majorité des installations des capteurs solaires sont utilisées pour produire de l'eau chaude sanitaire pour des maisons individuelles. En fin 2012, 78 % des installations en services étaient dédiées à cet usage. Les capteurs solaires sont aussi utilisés pour des systèmes combinés (eau chaude sanitaire, chauffage de bâtiment et distillation solaire), pour le chauffage de piscines, pour des centrales de chauffage solaire, pour des procédés industriels ou encore pour de la climatisation solaire ainsi que le séchage des produits agroalimentaires parmi les domaines d'utilisation des capteurs solaires plans très répandus. [42-43].

1.6.1. Chauffage et climatisation des habitations

Le principe est présenté sur la Figure (1-10), consiste à chauffer le fluide dans le capteur solaire, celui-ci est ensuite véhiculé par ventilateur vers des points d'utilisation.

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

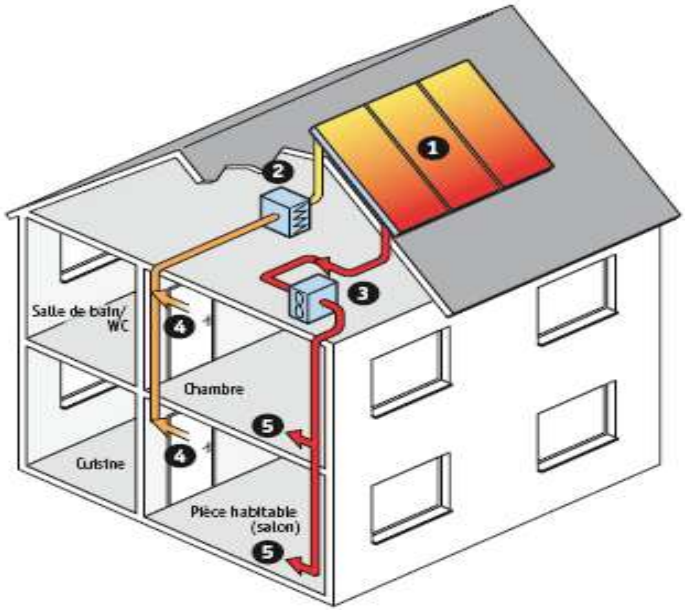


Figure (1-6) : Chauffage et climatisation des habitations

1.6.2. Distillation solaire

La distillation solaire est une technique qui utilise le rayonnement solaire pour chauffer de l'eau saumâtre dans un bac couvert par une vitre inclinée [OUT 2006]. L'eau salée dans le bac va se chauffer (d'autant plus vite que le bassin est noir) et avec l'augmentation de température une partie de l'eau s'évapore et la vapeur d'eau se liquéfie sur la surface intérieure de la vitre transparente. Des gouttes d'eau vont se former, couler sur la surface de la vitre et tomber dans le récupérateur situé au coin. Il faut régulièrement nettoyer le bassin pour éliminer le sel, (Figure (1-11)).

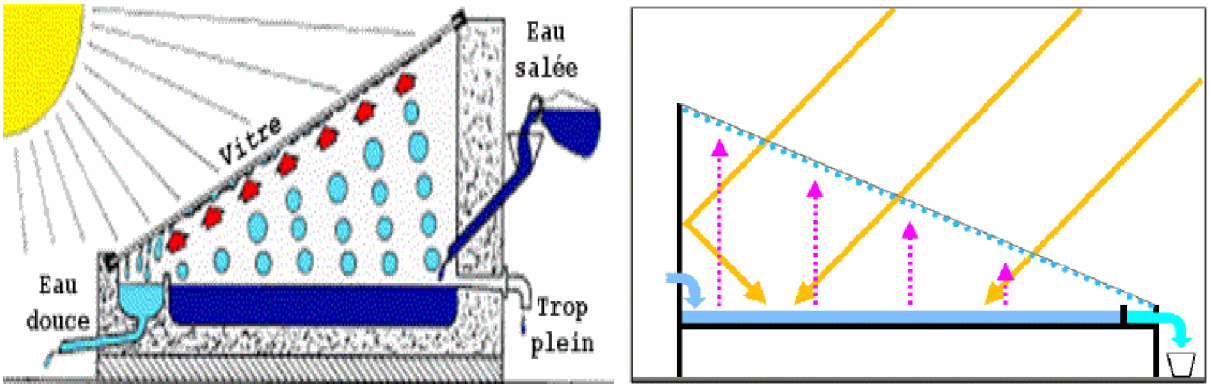


Figure (1-7) : Principe de construction et de fonctionnement d'un distillateur solaire simple (Source [EKO 2006] et [OUT 2006]).

1.6.3. Application des capteurs au séchage solaire

Le séchage, opération importante dans toute transformation de produits issus de l'industrie agro alimentaire, est un procédé très énergivore. Cela explique le recours de plus en plus fréquent aux énergies renouvelables et principalement l'énergie solaire par l'utilisation des séchoirs solaires [44]. Parmi les produits agricoles qui actuellement font l'objet de nombreux travaux de recherche dans le domaine de séchage solaire en Algérie sont les suivants [56] :

- Les dattes, plusieurs variétés et à des fins diverses
- Les tomates (tranches, pâte et poudre)
- Les figues
- Les abricots
- La pomme de terre
- Arachides
- Quelques plantes aromatiques et médicinales

1.7. Systèmes de séchage solaire

1.7.1. Historique et définition

Différents types de séchoirs solaires ont été conçus, développés, et examinés dans les différentes régions des tropiques et du subtropical. Largement parlant, des séchoirs solaires peuvent être classifiés dans deux larges catégories : séchoirs solaires passifs et actifs. Les séchoirs passifs utilisent seulement des sources d'énergie renouvelable. Les séchoirs solaires passifs peuvent être classifiés dans trois catégories, et ce sont les séchoirs passifs directs, les séchoirs passifs indirects, et les séchoirs passifs mixtes. Les séchoirs actifs utilisent la source non-renouvelable ou en tant que source de chaleur supplémentaire ou comme une source auxiliaire telle qu'une source pour conduire le ventilateur pour la circulation d'air par le produit [13]. Des séchoirs solaires peuvent également être classifiés en tant que séchoirs solaires à convection naturelle et séchoirs solaires à convection forcée. Dans les séchoirs solaires à convection naturelle, la circulation d'air est habituellement établie par circulation d'air par effet de gradient de densité tandis que dans des séchoirs solaires à convection forcée, la circulation d'air est fournie en utilisant le ventilateur actionné par le module d'électricité/solaire ou le combustible fossile. Maintenant, les séchoirs solaires conçus, développés, et utilisés dans les tropiques et le subtropical sont discutés sous ces deux rubriques des séchoirs solaires de convection naturelle et des séchoirs solaires de convection forcés.

1.7.2. Différents types des séchoirs solaires

Il y a plusieurs types des séchoirs solaires développés pour servir les divers objectifs de sécher des produits agro-alimentaires selon le besoin local et la disponibilité. On peut classer les séchoirs, suivant la façon dont ils utilisent le rayonnement solaire, en séchoirs naturels, séchoirs directs et séchoirs indirects.

- Un séchoir est dit direct, si le rayonnement solaire atteint directement les produits, le séchoir est indirect lorsque les produits sont à l'abri du rayonnement.
- Un séchoir est dit à convection naturelle si la circulation d'air est assurée par thermosiphon et un séchoir en convection ventilée (forcée) si elle est assurés par une action mécanique [45].

1.7.2.1. **Séchoirs solaires directs:**

Par définition, les rayons du soleil frappent directement les séchoirs. Ce sont des appareils simples et rustiques d'un châssis vitré, sous lequel les produits à sécher sont des clayettes.

Une circulation d'air se fait à travers l'appareil, par tirage naturel dû au réchauffement (effet de cheminée) (figure I-3), ou par action du vent sur les ouvertures, fait de la rusticité des modèles [46].

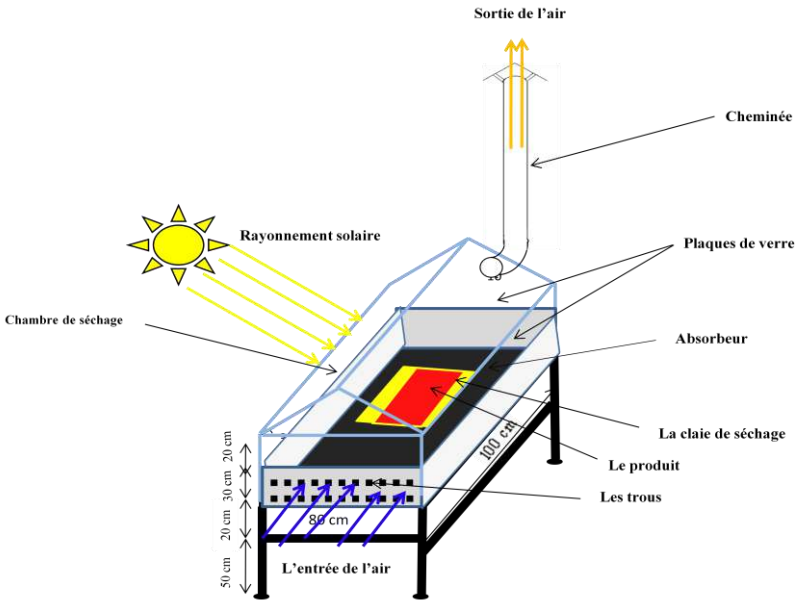


Figure (1-8) : Schéma descriptif du séchoir solaire direct LENREZA-UKMO[47].

Les avantages et les inconvénients du séchoir solaire direct sont les suivants :

Avantages

- Bien meilleure protection contre la poussière, les insectes, les animaux et la pluie par rapport au séchage traditionnel.
- Pas besoin de main d'œuvre qualifiée.
- Grandes possibilités de conception

Inconvénients

- Dégradation de la qualité par exposition directe au soleil (destruction de la vitamine A et C, décoloration).
- Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement.

- Faible circulation de l'air qui limite la vitesse du séchage et augmente les risques de moisissure.

1.7.2.2. **Séchoirs solaires indirects**

Les produits à sécher ne sont pas exposés directement au rayonnement solaire. Ils sont disposés sur des claies à l'intérieur d'une enceinte ou d'un local en rapport avec l'importance des quantités à sécher (figure 1-7). L'air neuf est admis dans l'enceinte de séchage après passage dans des capteurs à air ou autre préchauffeur, qui le réchauffent en fonction du débit utilisé. [46]

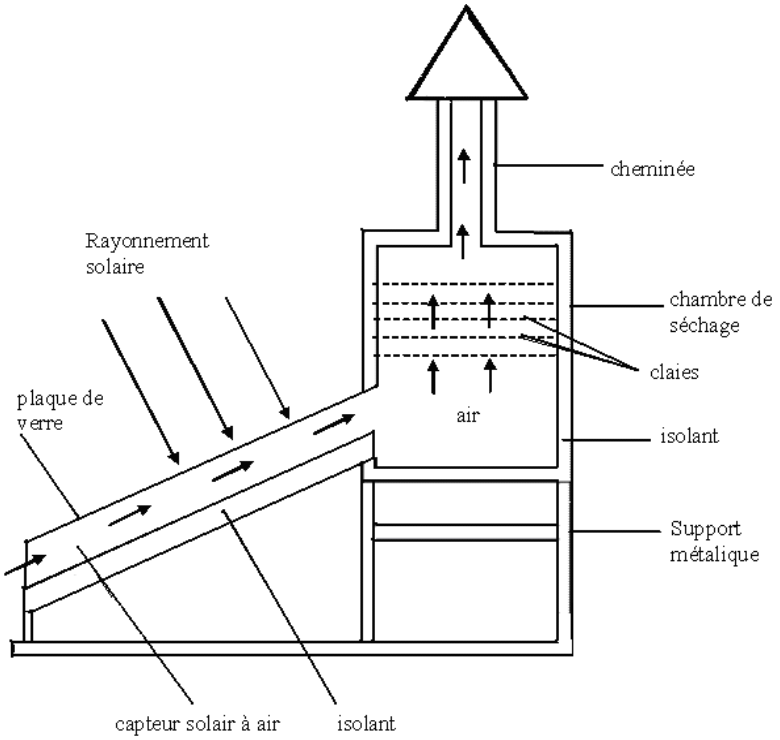


Figure (1-9): Séchoir solaire indirect [48].

Dans les séchoirs solaires indirects, le collecteur convertit le rayonnement solaire en chaleur. L'air pénètre dans le collecteur, se chauffe et sa température augmente par conséquent. L'air chaud monte par convection jusqu'à la chambre de séchage où il échange partiellement sa chaleur avec le produit à sécher. La durée de séchage est très variable selon les conditions climatiques **[**49].

Les avantages et les inconvénients du séchoir solaire indirect sont les suivants :

Avantages

- Le produit n'est pas exposé directement au soleil. Ils présentent l'avantage de mieux préserver les caractéristiques de l'aliment : sa couleur, son aspect, sa valeur nutritive.
- Leur fonctionnement n'exige pas une énergie électrique ou des combustibles fossiles.

Inconvénients

- Coût important.
- Durée de séchage variable suivant les conditions climatiques et la conception du séchoir.

1.7.2.3. Séchoirs solaires mixtes :

Ces séchoirs combinent les dispositifs des séchoirs directs et indirects. Dans ce type de séchoirs, l'action combinée du rayonnement solaire direct sur le produit à sécher et le capteur solaire est de fournir la chaleur nécessaire pour le processus de séchage. La figure (1-8) montre un type de séchoir solaire mixte.



Figure (1-10) : Séchoir solaire mixte à circulation forcée [49]

Les avantages et les inconvénients du séchoir solaire mixte sont les suivants :

Avantages

-Forte augmentation des apports thermiques par rapport aux autres types des séchoirs solaires.

Inconvénients

- Vitesse de séchage très variable suivant les conditions climatiques et la conception de séchoir.

1.7.2.4. Séchoirs solaires hybrides

Dans ce type de séchoir hybride (Figure. 1-9) on utilise une des sources d'énergie auxiliaire (électrique, gaz, fuel, bois, biomasse…..) pour parer aux aléas climatiques et ajuster la température de l'air asséchant à la température fixe de consigne moyennant des thermorégulateurs. Les séchoirs solaires hybrides sont plus performants que les séchoirs solaires passifs, car ils peuvent fonctionner par temps couvert ou pendant la nuit. Néanmoins ce type de séchoir a pour inconvénient: un coût de production et d'investissement relativement élevé par rapport au séchoir passif, nécessité d'approvisionnement local en électricité, gaz, pièce de rechange et demande un personnel qualifié pour la maintenance. [46,50,51]

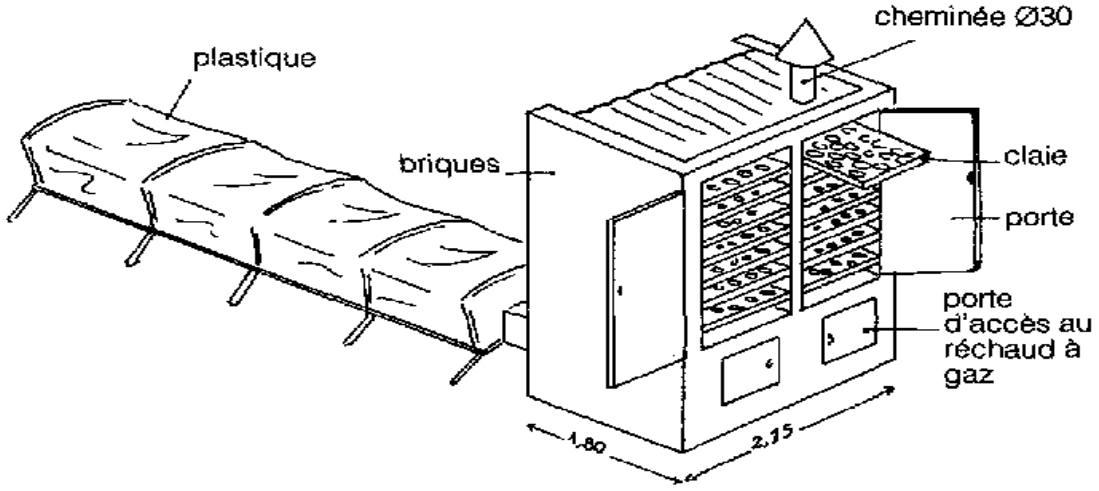


Figure (1-11): Séchoir solaire hybride solaire gaz [45].

1.8. Rôle du capteur solaire plan dans un système de séchage

Le séchoir solaire en général se compose de trois parties principales (capteur, chambre de séchage et une cheminée), le capteur est le premier élément dans le système, pour cela il a une grande importance et nécessite beaucoup d'adaptation pour obtenir un produit sèche de bonne qualité.

L’utilisation des capteurs plans à air pour alimenter en air chaud les séchoirs des produits agricoles, est devenue depuis quelques années, une technique courante, en raison des quantités d’énergie que nécessitent une opération de séchage et l’accroissement de leur coût. Pour réussir une telle opération, il est indispensable d’associer à l’enceinte de séchage un capteur approprié, dont les températures de service permettent d’obtenir dans une plage intéressante de leur rendement, un temps de séchage réduit et un produit sec de bonne qualité.
TABET Ismail, 2016 [52] rapporte qu’un capteur solaire est un dispositif mécanique qui capte l'énergie solaire rayonnante et la convertit en énergie utile. D’autre part comme principe explique que le collecteur solaire est utilisé pour extraire la chaleur du rayonnement du soleil. Au cœur d'un capteur solaire est un absorbeur solaire. Ce dernier absorbe le rayonnement du soleil et le convertit en chaleur. Les capteurs solaires sont utilisés pour chauffer l'eau d’usage domestique, chauffage domestique, et produire de la chaleur à la température requise [53]
Rabéa Kaoula et al., 2014 [54] montre que le rôle des capteurs solaires plans à air est de transformer l’énergie radiante du soleil en énergie thermique extraite par l’air en écoulement dans le capteur. Cette énergie est utilisée dans différentes applications solaires, comme par exemple le séchage des produits agroalimentaires (fruits, bois..) et le chauffage [55]. Donc on peut dire que le rôle principal de capteur solaire plan dans un système de séchage est d’assurer l’air chaud à un degré de température convenable pour sécher les produits agricoles

1.9. Revue bibliographique sur les problèmes des capteurs et les séchoirs

1.9.1. Revue bibliographique sur les configurations des capteurs:

Les systèmes de collecteur solaire à air sont des dispositifs simples dans lesquels l'énergie du soleil (insolation solaire) est capturée par une plaque absorbante et utilisée pour chauffer l'air. Le chauffage par air solaire est une technologie de chauffage à énergie renouvelable utilisée pour chauffer ou conditionner l'air pour les bâtiments ou pour traiter des applications de chaleur.

La production de l’énergie thermique à partir de l’énergie solaire est aujourd’hui une des techniques les plus prometteuses pour répondre aux besoins énergétiques mondiaux. Actuellement il y a plusieurs millions de m² des capteurs et de systèmes solaires installés dans le monde utilisant les technologies les plus récentes. La plus grande part de recherche est consacrée au développement des capteurs solaires du point de vue performance thermique en général tenant en compte de tous les paramètres qui influent sur leurs comportements en relation avec les applications envisagées telles que le chauffage d’eau ou d’air, distillation

solaire ou le séchage des produits agroalimentaires. Les développements des capteurs solaires plans dans les deux cas (capteur à part ou combiné avec un système solaire) suivent trois voies :

1- Voie expérimentale
2- Voie numérique
3- Voie mixte entre expérimentale et numérique au même temps

Krishna Murari Pandey, Rajesh Chaurasiya [14] présentent un aperçu des différentes techniques utilisées pour améliorer l'efficacité des collecteurs tardifs. Les auteurs ont examiné l'effet de l'utilisation de nano-fluides comme fluide de transfert de chaleur et l'effet de modification de la conception des plaques absorbantes pour une meilleure capture des rayonnements. Des méthodes de réduction de la perte de chaleur ont été étudiées, à savoir, utilisation de polymère, utilisation de mini canaux pour le débit de fluide, utilisation de MCP (matériaux de changement de phase) pour fournir de la chaleur pendant la nuit sans réservoir. Les effets de l'utilisation des dispositifs d'amélioration comme les inserts et le réflecteur ont été aussi discutés.

Walid Aissa et al [55]; ont présenté un travail expérimental qu'est d'étudier un capteur solaire plan à air à convection forcée avec l'intégration d'un lit de matériau de stockage en pierre de granit dans les conditions climatiques d'Egypte-Assouan. Les expériences sont effectuées à différents débits de masse d'air; Variant de 0,016 kg/s à 0,08 kg/s pour cinq jours chauds d'été de juillet 2008. Les valeurs horaires du rayonnement solaire mondial et certaines données météorologiques (température, pression, humidités relatives, etc.) pour les jours de mesure sont obtenues de l'Autorité météorologique de l'Egypte, station d'Assouan. Dans leur travail, les auteurs ont essayé de présenter la distribution de la température sous une forme non dimensionnelle qui la rend utilisable pour toute région et ne se limite pas aux conditions locales. Les comparaisons entre les valeurs calculées des températures de l'air de sortie, des températures moyennes de l'air et des températures des matériaux de stockage et les valeurs mesurées correspondantes ont montré un bon accord. La comparaison entre le travail actuel et ceux des recherches antérieures a montré un accord équitable.

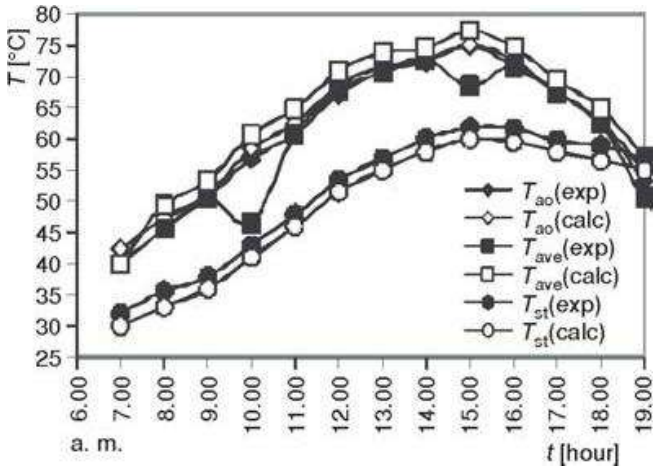


Figure (1-12) : Comparaison entre les valeurs calculées et mesurées de l'air de sortie, l'air moyen et les températures du matériau de stockage dans le réchauffeur d'air [55]

L'objectif de l'étude de Rabéa Kaoula et al [54], est d'analyser l'apport énergétique des capteurs solaires à air dans le cadre de l'étude de l'efficacité énergétique dans le secteur de bâtiment. En effet, le travail concerne l'étude théorique d'un capteur solaire plan à air à simple passe entre l'absorbeur et la vitre, intégré en façade, fonctionnant en régime dynamique en convection naturelle et destiné au chauffage. L'analyse du comportement de ce capteur a permis d'établir un modèle basé sur la résolution des équations de bilans thermiques par la méthode nodale. A l'aide de la simulation numérique sous Matlab (en utilisant la méthode de runge-kutta), ils ont pu déterminer les profils de températures du vitrage, de l'absorbeur, et du fluide caloporteur (l'air) à la sortie du capteur, ainsi que le rendement thermique instantané.

D. Bahrehmand, M. Ameri [57] ont fait un travail de recherche, des modèles mathématiques sont présentés pour les systèmes de collecteurs solaires à air à couverture unique et à deux verres avec un flux de convection naturelle. Ces modèles sont basés sur une solution analytique d'équations de bilan énergétique pour différents éléments des collecteurs. Les résultats obtenus et les résultats expérimentaux d'autres chercheurs sont en bon accord. Les effets d'une tôle métallique d'étain suspendue au milieu du canal d'air, des films longitudinaux avec des formes rectangulaires et triangulaires, ainsi que des variations de profondeur et de longueur du canal sur les économies d'énergie et d'exergie des collecteurs solaires à air sont également étudiés. Les résultats montrent que le collecteur avec deux couvercles en verre a une meilleure performance qu'un collecteur à un seul verre, et il est apprécié de manière analytique par les première et deuxième lois de la thermodynamique. Les

résultats montrent également que les collecteurs à ailettes triangulaires sont plus efficaces en termes d'énergie que ceux avec des surfaces rectangulaires.

S.M.A. Rahman et al [58], ont présenté une optimisation économique de l'évaporateur et de la zone de collecte d'air d'un système de séchage par pompe à chaleur assistée par énergie solaire. La viabilité économique des systèmes de chauffage solaire est généralement réalisée en comparant les flux de coûts récurrents tout au long de la vie des systèmes alternatifs solaires et conventionnels. Par conséquent, l'identification des variables optimales en utilisant un programme de simulation et une analyse économique basée sur la période de récupération du système. Le langage FORTRAN est utilisé pour exécuter la simulation. L'effet de la charge et des différentes variables économiques sur la période de récupération est également étudié. L'analyse économique révèle que le système a suffisamment d'économies pendant le cycle de vie avec une période de récupération minimale d'environ 4 ans

1.9.2. Relation entre la performance du capteur et l'opération de séchage (point de vue thermique et la qualité de produit)

Dans le but d'étudier la performance du capteur solaire sur l'opération du séchage Ahmed Khouya et al. [59] ont présenté une étude théorique sur un système de séchage constitué d'un capteur solaire à air de type multi – passes muni d'ailettes et couplé à une cuve de stockage dans les conditions climatiques de la région de Tanger au Maroc. L'étude est réalisée à partir des modèles mathématiques obtenus par l'écriture des lois de conservation de l'énergie dans les différents composants du système. Des simulations ont été réalisées en exploitant des mesures expérimentales du rayonnement solaire et de la température ambiante d'un jour type à Tanger. Les résultats obtenus mettent en évidence l'importance de la double circulation d'air ainsi que l'usage des ailettes sur les performances du système de séchage [59]. L'intérêt de ce travail est l'étude d'un séchoir solaire à bois monté en série à une cuve de stockage thermique alimentée par un capteur solaire. Concernant les capteurs solaires à air, le rendement thermique peut être amélioré si on favorise l'échange de chaleur entre la plaque d'absorption et l'air. Pour ce faire, les auteurs ont proposé d'augmenter la surface d'échange entre l'absorbeur et l'air au moyen d'une plaque d'absorption munie d'ailettes. Un modèle numérique monodimensionnel décrivant tous les modes de transferts thermiques impliqués a été établi. Les conditions thermiques in-stationnaires d'entrée de l'air dans le système ont été prises en compte.

Un séchoir solaire à convection forcée de type indirect utilisant un matériau à changement de phase (PCM) a été conçu, construit et expérimenté Par Aymen El Khadraoui et al [60]. Le séchoir est composé d'un panneau d'air solaire pour un chauffage direct de l'agent de séchage, d'un accumulateur d'énergie solaire (collecteur d'air solaire avec cavité PCM) et d'une chambre de séchage. Le sécheur solaire a été testé sans charge avec et sans PCM. La présente étude vise à étudier la faisabilité de l'utilisation d'un réchauffeur d'air solaire avec PCM pour stocker l'énergie solaire pendant la journée, et de la libérer pendant la nuit. Des expériences ont été menées pour évaluer les caractéristiques de charge et de décharge de l'unité de stockage latente (cavité PCM). L'efficacité énergétique journalière de l'accumulateur d'énergie solaire a atteint 33,9%, tandis que l'efficacité quotidienne d'exergie a atteint 8,5%. Les résultats montrent qu'après utilisation de l'accumulateur d'énergie solaire, la température de la chambre de séchage est supérieure à la température ambiante de 4 à 16 °C, toute la nuit. De plus, l'humidité relative dans la chambre de séchage a été observée de 17 à 34,5% inférieure à l'humidité relative ambiante, dans le cas du teinturier solaire avec PCM.
L'objectif de travail de M. Ayadi et al [61], basé sur une étude purement théorique, est de rechercher la rentabilité énergétique de deux composants d'une unité de séchage solaire (capteur, stock) sans appoint et dont le but de satisfaire un dimensionnement déjà réalisé à l'échelle macroscopique pour une demande énergétique bien définie: sécher une quantité de produit donné pendant une journée de la saison de récolte, soit entre les mois de mai et septembre avec un stockage de chaleur qui relaye la nuit.

1.10. Problématiques relatives au séchage solaire:

Dans la pratique des séchoirs solaires indirects, les capteurs plans à air sont souvent utilisés pour chauffer et conduire l'air asséchant dans la chambre de séchage. La température de séchage obtenue est donc fonction de la configuration et des performances du capteur solaire en question. D'autre part, les opérations de séchage utilisant des séchoirs solaires présentent souvent le problème des conditions instables de l'air asséchant. Les vitesses de l'air mises en jeu sont alors généralement faibles. Afin d'éviter la condensation éventuelle et afin d'accélérer les échanges thermiques dans les séchoirs solaires il est important de s'orienter vers la mise au point de moyens d'extraction de l'air par ventilation. L'un des facteurs les plus importants dans la conception des séchoirs à air conventionnels est la conception du flux d'air. Dans les séchoirs solaires, l'effet de l'hétérogénéité de l'écoulement est particulièrement difficile à résoudre. La répartition du débit d'air dépend du processus de séchage, du milieu de

séchage et de la géométrie de la chambre de séchage. Ces facteurs déterminent l'uniformité du séchage et donc la qualité des produits finis. Même si les performances d'une chambre de séchage peuvent être étudiées expérimentalement, une telle recherche limite la généralisation des résultats et ne peut certainement pas être appliquée à la conception originale de la chambre de séchage en raison des limitations de temps et de coût.

L'uniformité du processus de séchage solaire et la qualité du produit sont des paramètres interdépendants. L'uniformité du séchage est influencée par les propriétés importantes de l'air du séchage, à savoir la température, l'humidité et la vitesse. En conséquence, l'uniformité du séchage solaire peut être améliorée par intégration avec un système de déshumidification et / ou optimisation de la conception du séchoir. On peut alors résumer les problèmes relatifs au domaine de séchage solaire, en cas d'un séchoir solaire indirect à convection naturelle, dans les points suivants :

a. Le problème des paramètres de conception du capteur qui influe sur la performance du capteur, sachant que ce dernier est utilisé comme source de chaleur pour la chambre de séchage.
b. La température de séchage obtenue est donc fonction de la configuration et des performances du capteur solaire en question.
c. Le problème des conditions instables de l'air asséchant. Les vitesses de l'air mises en jeu sont alors généralement faibles.
d. Le problème de l'uniformité (homogénéité) de distribution de la température dans la chambre de séchage.

1.11. Conclusion : Impacts espérés de l'étude

L'étude envisagée par cette thèse représente une contribution qui rentre dans le cadre des tentatives de résolution des problèmes technologiques et thermiques des séchoirs solaires. Par ailleurs il est bien entendu que les résultats recherchés doivent répondre en faveur des conditions optimales de séchage solaire en relation avec une meilleure qualité de produit sec. Nous estimons qu'une telle étude, en cas de son achèvement et associée à d'autres études en relation, pourrait aboutir sur des conclusions à impacts technologiques, économiques et même sociaux qu'on peut regrouper en trois grands titres :

(a) Relancer l'industrie des séchoirs solaires mixtes optimales répondant à tous les besoins de séchage des produits agroalimentaires.

(b) Améliorer les performances des séchoirs solaires par la bonne homogénéité de répartition et le degré de la température au sein de la chambre de séchage.

(c) Assurer la continuité de séchage pendant toute la journée (et dans la nuit) avec un produit final de bonne qualité.

Chapitre 2

Etude expérimentale des différentes configurations des capteurs solaires plans

2.1. Introduction

Les capteurs solaires plans à air constituent un domaine d'application très important et très large particulièrement dans les régions bien ensoleillées. La plus grande part de recherche est consacrée au développement des capteurs solaires du point de vue performance thermique en général tenant en compte de tous les paramètres qui influent sur leurs comportements, nous entendons ici les paramètres de conception (géométriques, thermo-physiques et optiques) [62].

La plus part des capteurs solaires couverts utilisés sont à couverture simple, à double ou triple pour voir la différence sur l'efficacité particulièrement l'effet de serre [63, 64, 65]. D'autre travaux ont traité l'impact de la modification des paramètres géométriques (démentions, surface d'échange, intégration des chicanes, orientation, sens d'écoulement d'air, nombre de passages de l'air) sur le rendement du capteur [63, 64, 66].

Notre travail a été effectué sur des capteurs solaires plans à air qui fonctionnent dans l'intervalle des températures de 20°C à 70°C, utilisés généralement dans les applications de séchage. Dans la pratique des séchoirs solaires indirects, les capteurs plans à air sont souvent utilisés pour chauffer et conduire l'air asséchant dans la chambre de séchage. La température de séchage obtenue est donc fonction de la configuration et des performances du capteur solaire en question. C'est dans ce sens que le présent travail se propose de faire quelques essais expérimentaux utilisant différents capteurs solaires plans, réalisés dans laboratoire LENREZA (Université de Ouargla), afin de rechercher les meilleurs cas de configurations et paramètres de travail assurant des températures convenables pour les opérations de séchage solaire pratiquées dans les régions du Sahara algérien.

2.2. Etude expérimentale des capteurs non connectés avec la chambre de séchage

Nous présentons dans cette partie, des séries expérimentales menés sur des capteurs solaires plans à air, conçu au laboratoire LENREZA et expérimentés dans la région d'Ouargla. Quatre capteurs à petite échelle avec des différents isolants et deux capteurs à

échelle réelle, l'un à simple passage et l'autre à double passage de l'air. L'installation expérimentale complète comprend la mesure du rayonnement solaire global, la vitesse de l'air, le débit d'air, l'humidité relative et la température ambiante de l'air à l'entrée et à la sortie des capteurs pour nous aider à calculer le rendement de chaque capteur, tout avec l'aide d'un système d'acquisition de c-DAQ Compact. Ainsi, cette étude comparative est effectuée dans l'objectif de décider sur le choix d'une configuration assurant une meilleure efficacité des opérations de séchage.

2.2.1. Fiche technique sur les capteurs solaires utilisés

Dans cette partie d'étude nous avons utilisé des différents capteurs solaires avec différentes dimensions pour chaque série d'expérience. Nous avons utilisé des capteurs à petites échelle ($1^{ère}$ série d'expérience) et des capteurs à échelle réelle ($2^{ème}$ série d'expérience).

Les quatre capteurs à petites échelle ont les mêmes dimensions mais les matériaux isolants sont différents (figure 2-1).

En ce qui concerne les capteurs à l'échelle réels nous avons utilisé deux types, le simple et le double passage (figure 2-2)

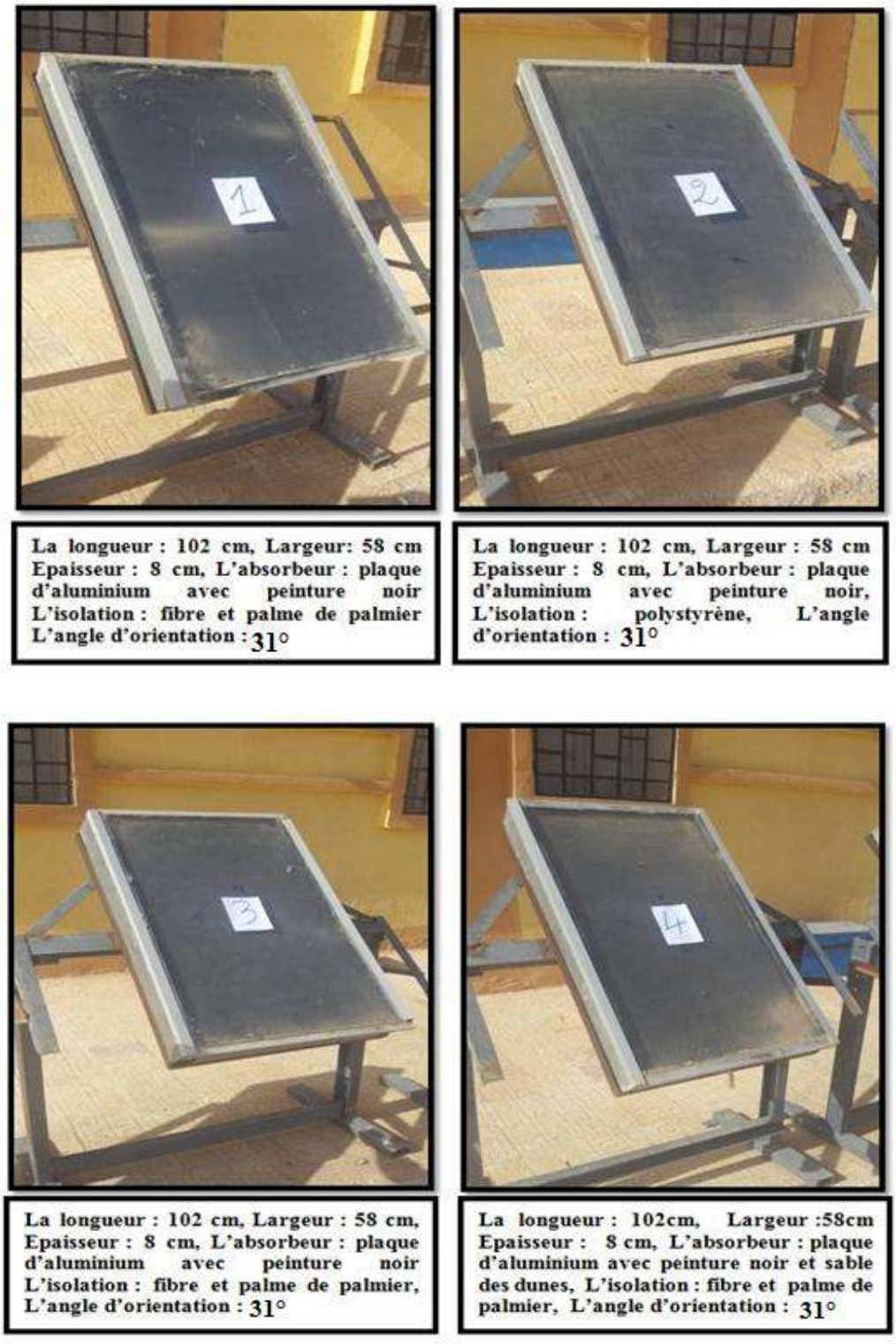


Figure (2-1): Caractéristiques des capteurs à petites échelles (1ére série d'expérience) (1, 2, 3,4)

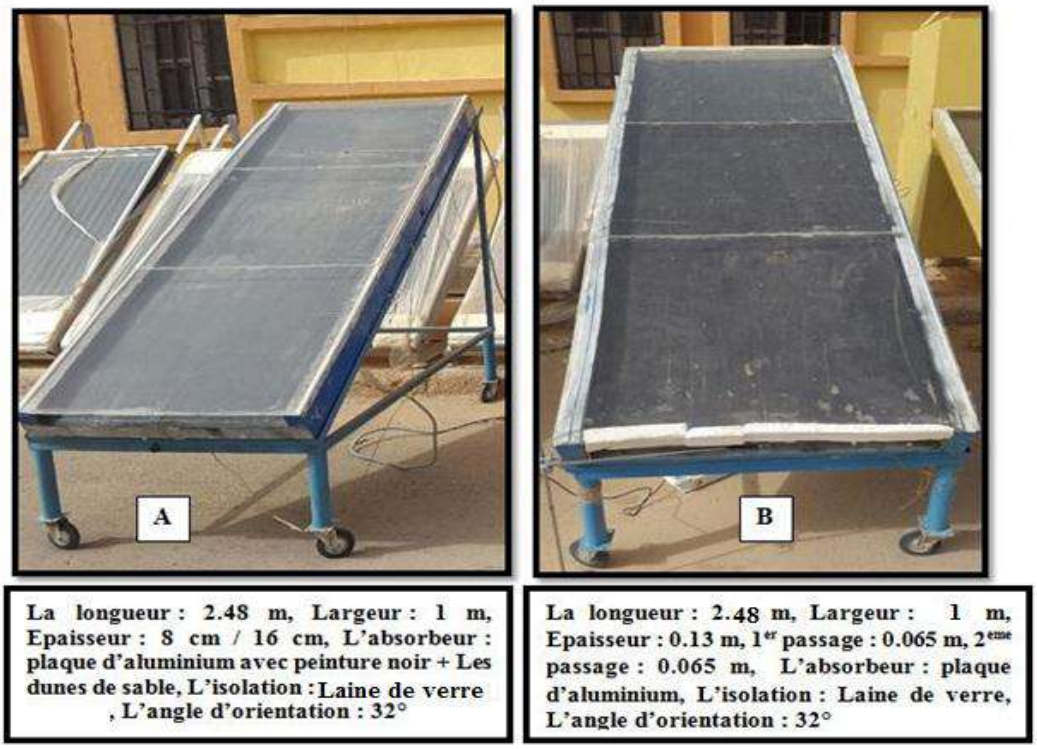


Figure (2-2): Caractéristiques des capteurs à échelle réelles à simple et à double passage (2ème série).

2.3. Etude expérimental des capteurs connectés avec les chambres de séchage.

Dans cette étude nous avons utilisé les capteurs solaires à l'échelle réelle connectée avec la chambre de séchage (3ère série d'expérience) comme il est indiqué sur la figure ci-dessous



Figure (2-3): Caractéristiques des capteurs à échelle réelles avec la chambre de séchage (3ème série)

2.4. Appareillage de mesure

Au cours des expériences nous avons mesuré le rayonnement solaire, l'humidité relative de l'air ambiant et la vitesse de l'air à l'entrée du capteur. Les appareils de mesure utilisés sont respectivement, un solari-mètre SOLARD et un thermo-hygromètre Testo 635 et Testo 416. D'autre part,

nous avons utilisé un système d'acquisition de type «Signal Express» avec les divers modules NI pour mesurer les autres paramètres (les températures dans les différents endroits de capteur et la vitesse de l'air).

2.4.1. Rayonnement solaire

Le rayonnement global reçu sur le plan du capteur est mesuré en W/m^2 à l'aide d'un solarimètre et ceci durant la journée de l'expérience. Les résultats obtenus sont affichés sur un appareil à affichage numérique.



Figure (2-4) : Solari-mètre (SOLARD) et le capteur de rayonnement solaire

2.4.2. Humidité Relative

L'Humidité relative est mesurée avec un thermo-hygromètre (testo 635) permettant de donner à la fois la température (en °C) et l'humidité relative (en % du seuil de saturation). La mesure se fait au moyen de sondes adaptées, au milieu de la lame d'air.



Figure (2-5): Thermo-hygromètre (testo 635)

2.4.3. Vitesse de l’air à l’entrée du capteur

Nous avons utilisé à ce propos un appareil (Testo 416) comme le montre la figure ci après.

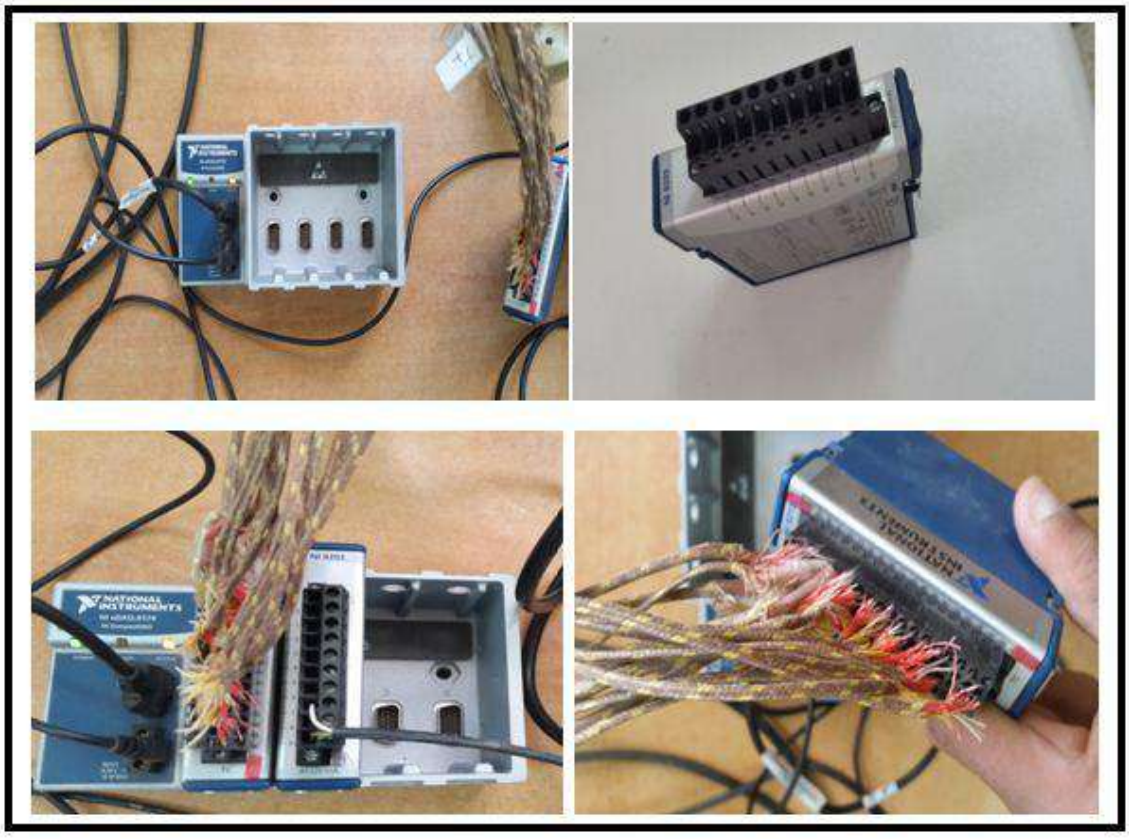


Figure (2-6) : Appareil (Testo 416) pour la mesure de la vitesse de l'air

2.4.4. Système d’acquisition

Pour la mesure de la température et la vitesse de l’air dans le système on a utilisé un système d’acquisition comprenant un micro PC, des thermocouples, un châssis et ses modules, un logiciel « Signal Express » et un Anémomètre.

- Le NI cDAQ-9174 est un châssis NI CompactDAQ 4 emplacements destiné aux systèmes de test de mesures de signaux mixtes compacts et portables (figure 2-7). Le châssis cDAQ-9174 se compose des éléments suivants :
    - Un convertisseur CA/CC qui se branche directement dans le châssis
    - un câble USB doté de vis moletées pour le maintien des câbles
- Les Modules NI a des différents types, chaque type calcule une différente d’énergie et il y a 3 types de modules NI qui sont :
    - NI 9213 : Calcul de températures est connecté avec des thermocouples.
    - NI 9203 : Calcul de la vitesse de l’air (connecté avec un Anémomètre).



(A) **(B)**

Figure (2-7) : Le Châssis NI cDAQ-9174 et Le Module NI9113 connecté avec des thermocouples

(A) : Châssis NI cDAQ-9174
(B) : Modules NI-9113, NI-9203 connectés avec des thermocouples

- Le PC est équipé du logiciel (SignalExpress) d'enregistrement de données interactif permettant d'acquérir, analyser et présenter rapidement et sans programmation les données de centaines de périphériques et d'instruments d'acquisition de données.

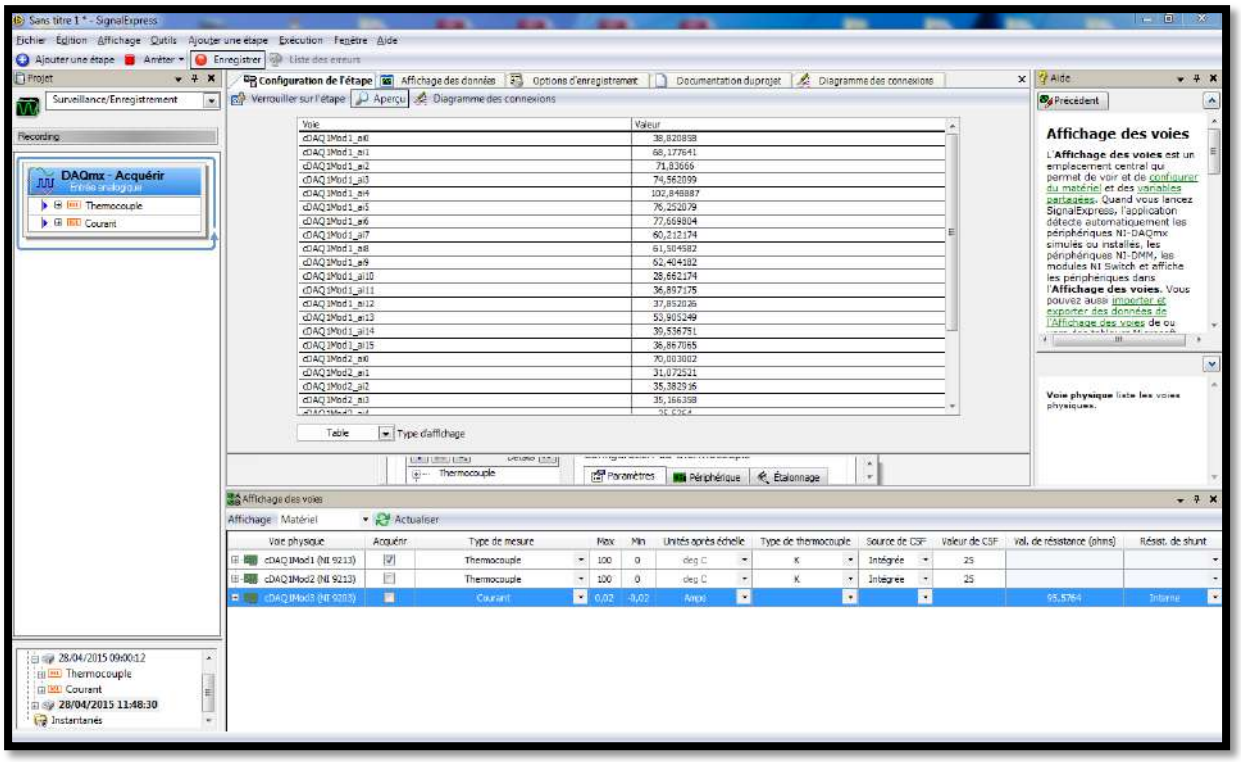


Figure (2-8): Acquisition des données (logiciel SignalExpress)

La mesure de vitesse de l'air est effectuée par un anémomètre attaché à un module NI9203 (figure 2-9), les résultats son afficher sur un PC dans le logiciel SignalExpress.

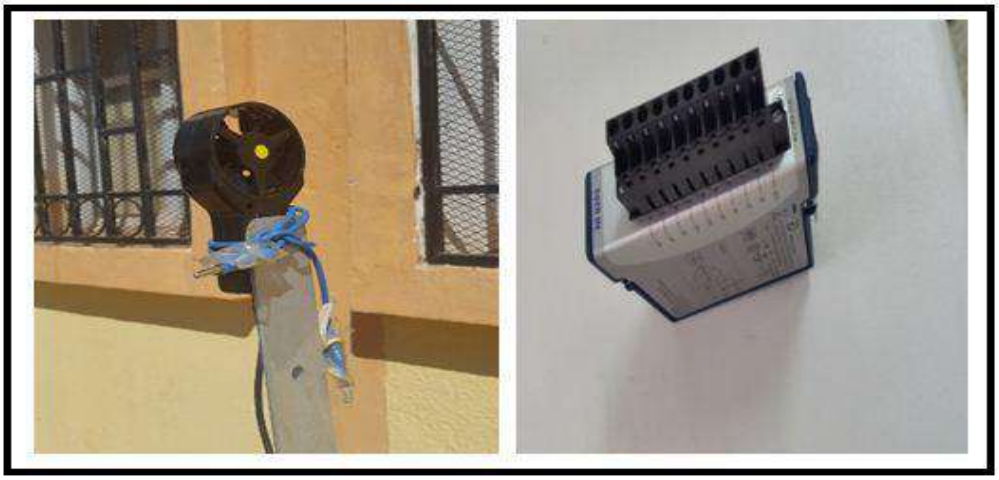


Figure (2-9) : Anémomètre et Module NI-9203

Quant à la température dans le séchoir solaire, elle est mesurée à l'aide des thermocouples, placés dans plusieurs endroits du capteur solaire (à l'ambiance, entrée, milieu

et sortie des capteurs ; entrée, milieu et sortie de la chambre). Les résultats ainsi mesurés sont affichés sur PC via le logiciel SignalExpress.

2.4.5. Fiche technique concernant les matériaux utilisés

Les propriétés thermo-physiques des éléments constituant le capteur plan ainsi que les propriétés des matériaux MCP à envisager dans la partie de simulation de cette étude, sont exposées dans les tableaux (2-1) et (2-2) ci-dessous.

Tableau (2-1) : Propriétés thermo-physiques des différents composants du capteur [95,96]:

Matériaux	Propriétés physiques					
	Masse volumique $[kg.m^{-3}]$		conductivité thermique [W.m^{-1}.K^{-1}]		chaleur spécifique [J kg^{-1} K^{-1}]	
	Symbole	Valeurs	Symbole	Valeurs	Symbole	Valeurs
Verre	ρ_v	2500	λ_v	0.81	C_v	840
Polystyrène	ρ_p	700	λ_p	0.320	C_p	2310
Cuivre	ρ_c	8954	λ_c	383	C_c	386
Aluminium	ρ_A	2719	λ_A	202.4	C_A	871
Acier inoxydable	ρ_{Ai}	7850	λ_{Ai}	15	C_{Ai}	460

Tableau (2-2) : Propriétés thermo-physiques des matériaux à changement de phase utilisés dans les simulations [97,98]

MCP	Les propriétés Thermo-physiques				
	Température de fusion [K]	Chaleur Latente [KJ/Kg]	La masse volumique [Kg/m^3]	Conductivité thermique [W/m.K]	Chaleur spécifique [J/kg.K]
Paraffine	345	224	772 ,2	0 ,335	2800
Paraffine	333	213	778	0,15	2340
Paraffine wax	326,5	266	780	0,21	2500
Paraffine	307	150	1850	0,47	2350

Tableau (2-3) : Biomatériaux utilisés [95, 99, 100,101]

Matériaux	E (m)	λ (W/m. °C)	R_{th} (m^2. °C/W)
Sable de dune	0,15	0,33	0,45
Fibre de palmier	0,03	0,058	0,52

Partie du palmier	Variété de palmier	Sens des fibres	Réf	E (mm)	ρ ($kg.m^{-3}$)	λ ($Wm^{-1}K^{-1)}$	a ($10^{-7}m^2s^{-1}$)
Pétiole (P)	Deglet-nour 1	//	PDN1	4.6	254± 1	0.084± 0.003	3.31± 0.31
	Deglet-nour 1	⊥	PDN1	4.5	276 ±2	0.083± 0.003	2.29 ±0.20
	Deglet-nour 2	//	PDN2	5	200± 2	0.084± 0.003	3.29 ±0.27
	Deglet-nour 2	⊥	PDN2	4.45	195± 2	0.072 ±0.003	2.85 ±0.32
	Deglet-nour 3	⊥	PDN3	3.3	210 ±1	0.066± 0.003	2.39± 0.31
	Deglet-nour 4	⊥	PDN4	3	173 ±2	0.058± 0.004	2.87 ±1.66
	Mech-deglet	⊥	PMD	4.4	187± 1	0.073± 0.003	3.13± 0.49
	Elghers	⊥	PG	4.2	206± 1	0.072± 0.002	2.76 ±0.24
	Dhokar	⊥	PDH	4.5	245± 1	0.077± 0.003	2.52± 0.38

2.5. Protocole expérimental et méthodologie de travail

2.5.1. Méthodologie d'expérience

La méthodologie suivie pour la réalisation des expériences consiste à une séquence d'étapes:

- La préparation des capteurs solaires (Adaptation d'angle, Position…)

- L'installation des appareils de mesure

- Le lancement des expériences avec le logiciel d'acquisition

- La prise de mesures chaque 15 minutes.

La préparation des capteurs solaire concerne le contrôle des conditions opératoires avant les expériences et ce dans le but d'assurer le bon fonctionnement des équipements et

aussi l'obtention des résultats fiable. Cette préparation consiste de faire les procédures suivantes :

- Le nettoyage des vitres, la plaque absorbante et les plaques noir du capteur solaire.
- Le renouvellement de la peinture noir dans chaque plaque absorbante des capteurs.
- L'emplacement des thermocouples sur les points nécessaires dans les capteurs.

Le réglage des appareils de mesures comprend les étapes suivantes :

- L'emplacement correct des thermocouples dans les capteurs.
- Le branchement et installation des éléments du Solarimètre.
- L'Installation de Thermo-hygromètre (testo) pour la mesure d'humidité relative.
- La préparation d'anémomètre et le Module NI9203.
- L'Installation de l'anémomètre (Testo 416635) à l'entrée de capteurs.
- L'activation du système d'acquisition.

2.5.2. Protocole expérimental

Le protocole expérimental consiste à mesurer quotidiennement l'évolution de température dans les capteurs, ainsi les relevés du rayonnement solaire et la vitesse de l'air entre 9h et 16h. A la fin de chaque journée, les résultats obtenus sont récupérés sous forme de tableaux Excel via le logiciel SignalExpress.

2.6. Série d'expériences

Nous avons effectuées une série d'expériences pour étudier la performance des capteurs solaires plans à air, et le travail expérimental est subdivisé en trois parties :

- La première série et consacrée pour l'étude des capteurs à petites échelles, on a utilisé dans ce cas 4 capteurs. Dans chaque capteur on a trois thermocouples (à l'entrée, au milieu et à la sortie), après on a commencé notre expérience avec les protocoles et méthodologie mentionnés précédemment ; cette série d'expérience a été réalisée du 09-03-2015 au 12-03-2015.
- La deuxième série est basée sur l'étude de performance de deux capteurs à échelles réelles.

1) Capteur avec passage simple de l'air.
2) Capteur avec double passage de l'air.

Le même système d'acquisition a été utilisé, on a manipulé le capteur à double passe dans cette série. Le travail se fait en alternance, chaque jour un seul passage d'air est ouvert, l'autre étant maintenu fermé. Le dernier jour on a ouvert les deux passages. Les essais de cette série ont été effectué dans la période du 06-04-2015 au 15-04-2015.

- La troisième série a été consacrée pour l'étude de performance des deux capteurs à échelles réelles connectés avec une chambre de séchage, le système utilisé étant le même, on a ajouté des nouveaux thermocouples dans les chambres de séchage. Les essais de cette série s'étalaient sur la période du 28-04-2015 au 04-05-2015.

2.7. Résultats expérimentaux

2.7.1. Résultats de la première série d'expériences

a) Cnoitidnos climatiques de la journée (12-03-2015)

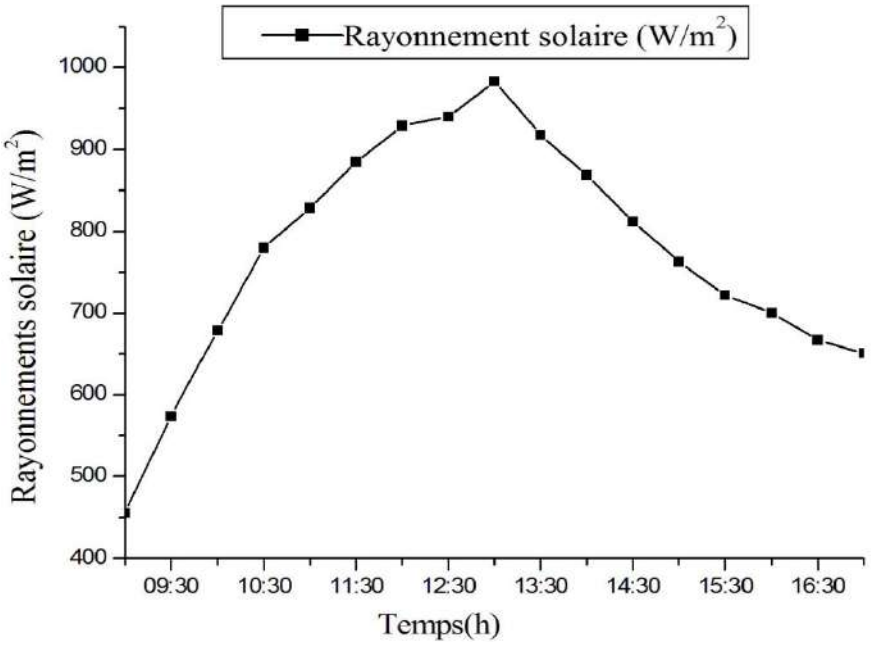


Figure (2-10): Variation du rayonnement solaire de la 1ère série d'expériences

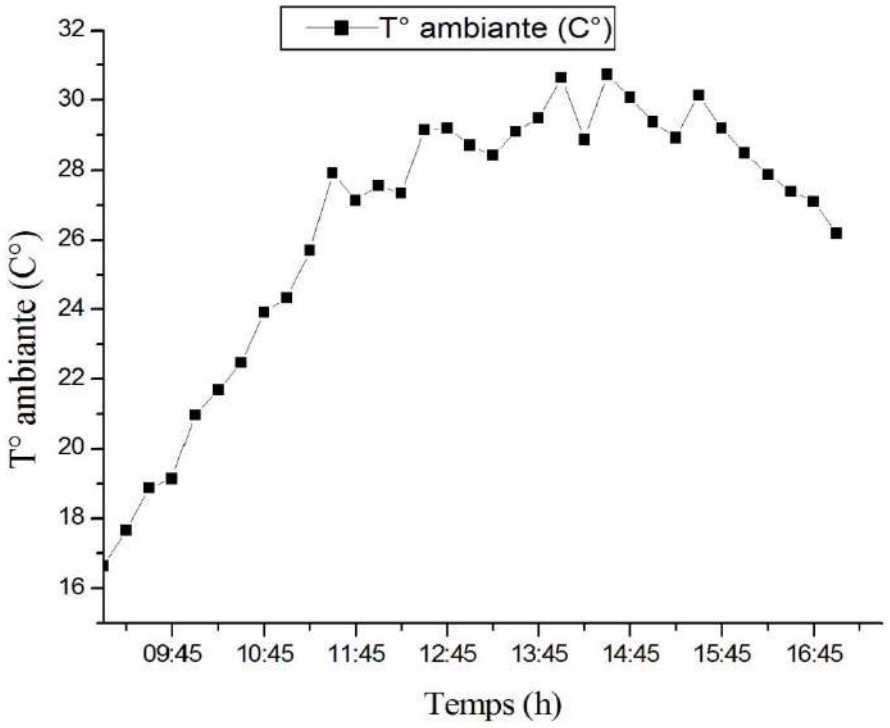


Figure (2 -11): Evolution de la température ambiante de la 1ère série d'expériences

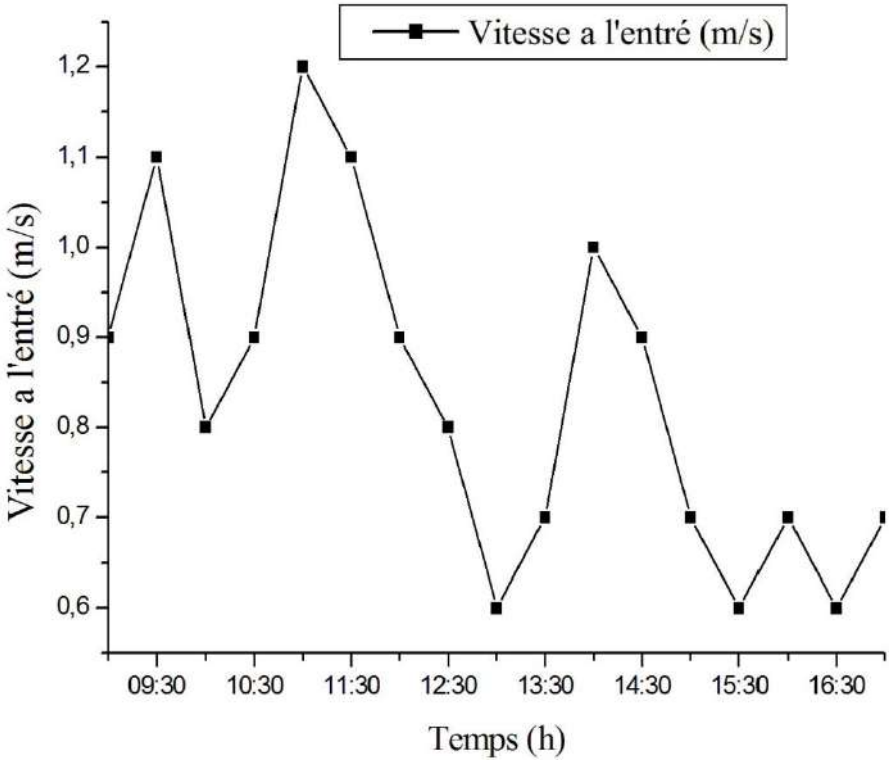


Figure (2 -12): Variation de la vitesse du vent à l'entré de capteur de la 1ère série d'expériences

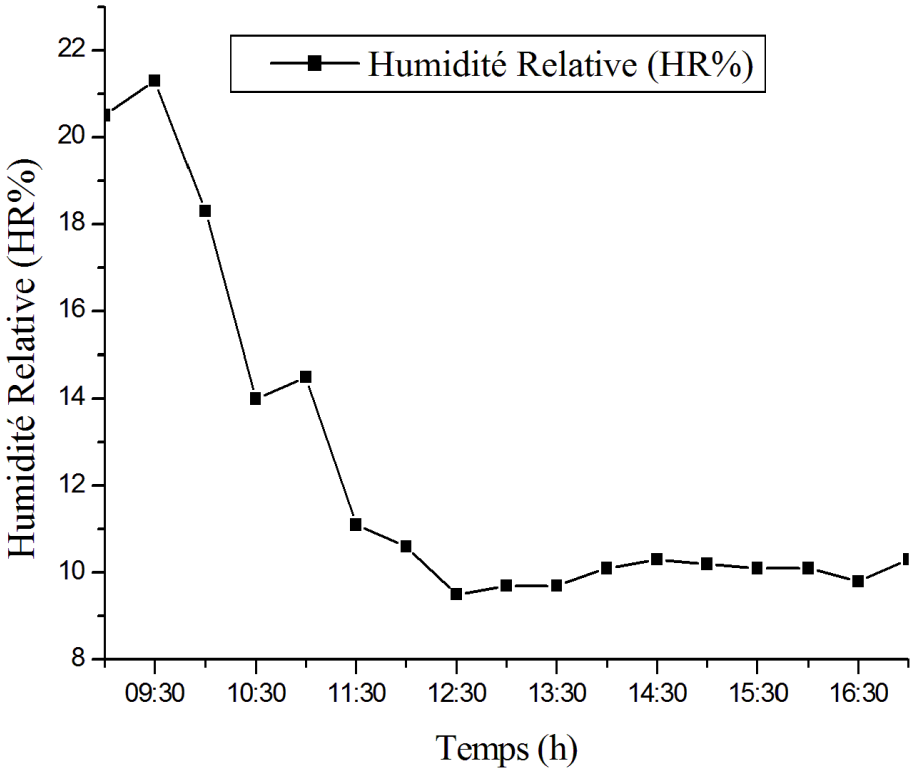


Figure (2 -13): Variation de l'humidité relative ambiante de la 1ère série d'expériences

b) Courbes des températures

Capteur N1

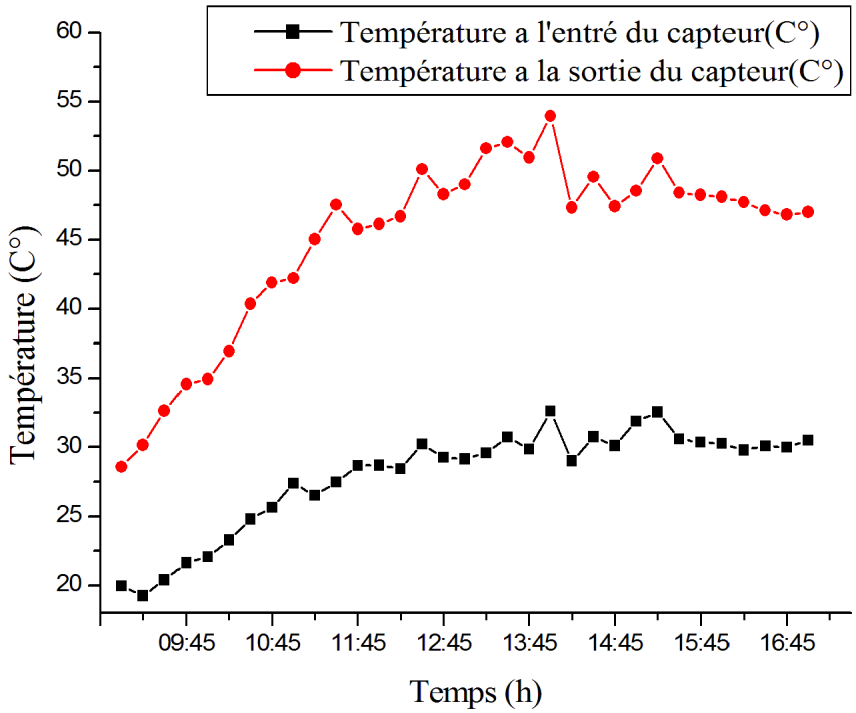


Figure (2 -14): Evolution de T à l'entré et à la sortie pour le capteur N1 de la 1ère série d'expériences

Capteur N2

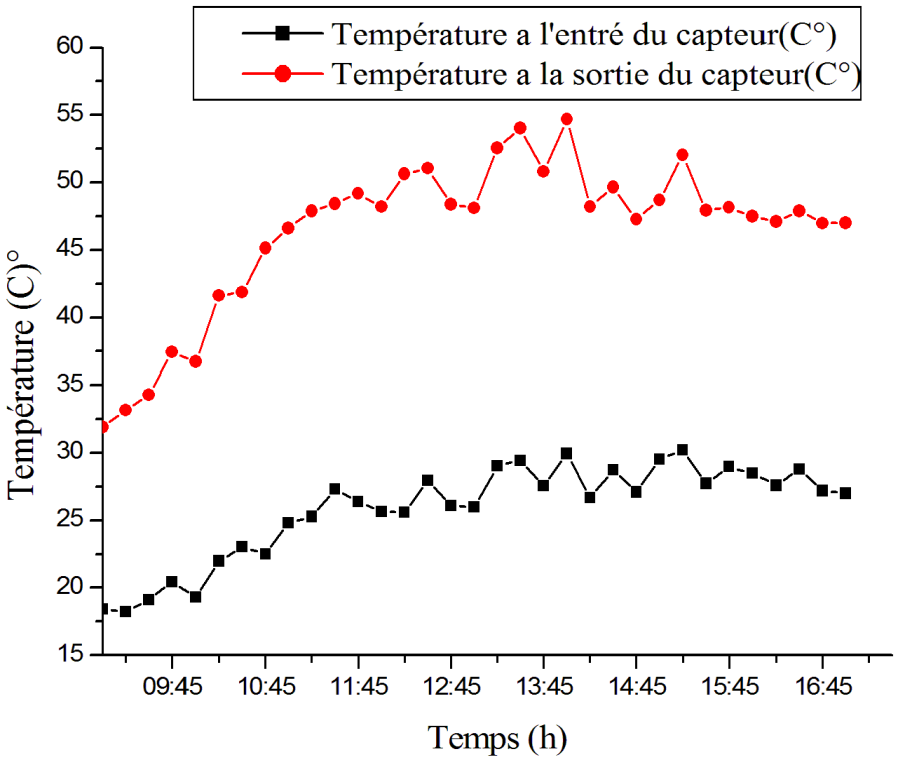


Figure (2 -15): Evolution de T à l'entré et à la sortie pour le capteur N2 de la 1ère série d'expériences

Capteur N3

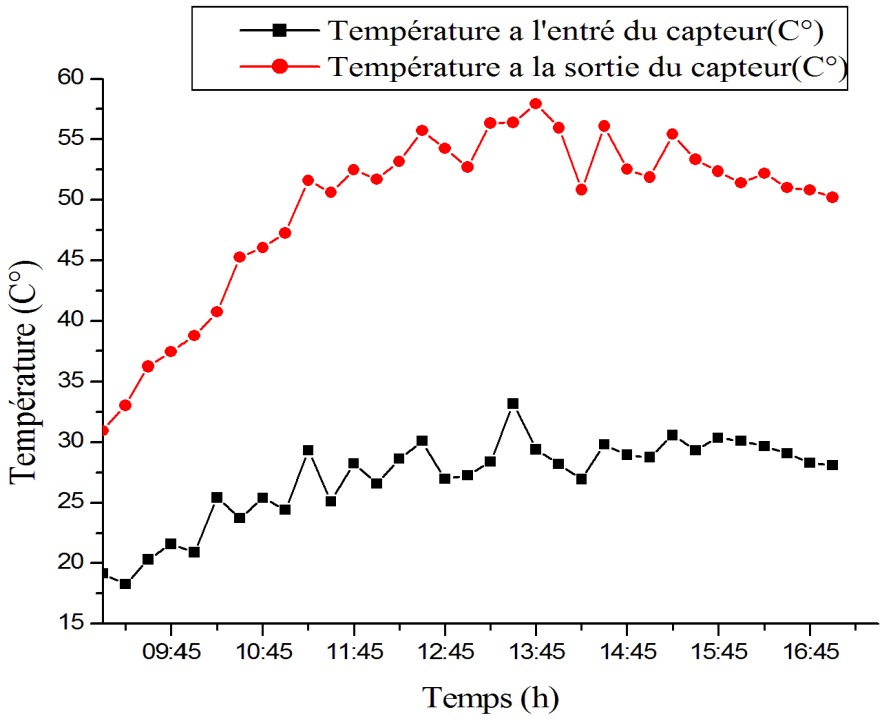


Figure (2 -1): Evolution de T à l'entré et à la sortie pour le capteur N3 de la 1ère série d'expériences

Capteur N4

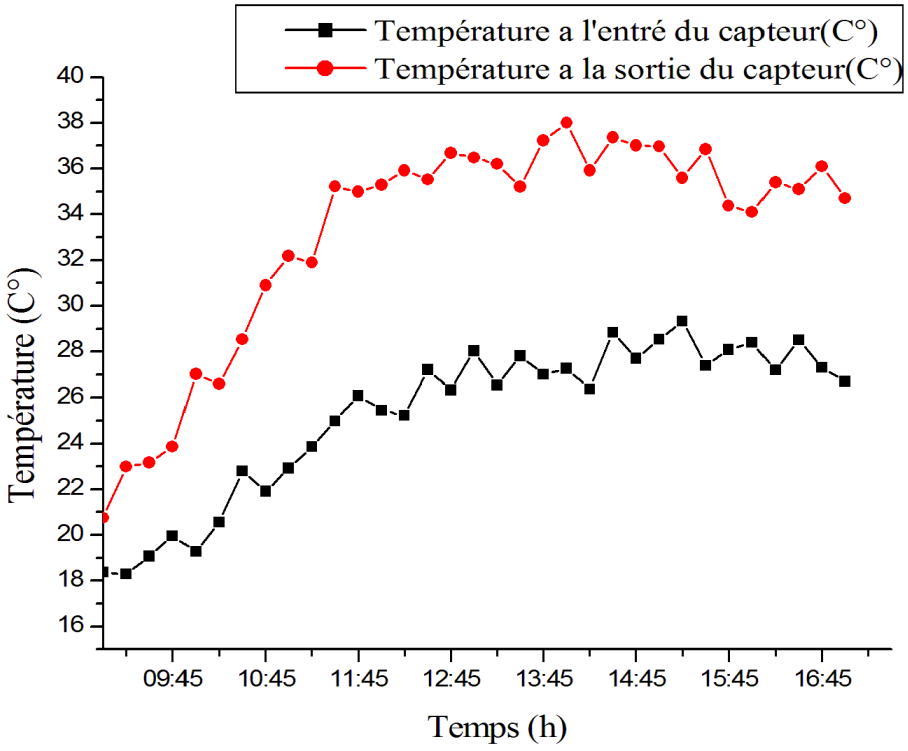


Figure (2 -2): Evolution de T à l'entré et à la sortie pour le capteur N4 de la 1ère série d'expériences

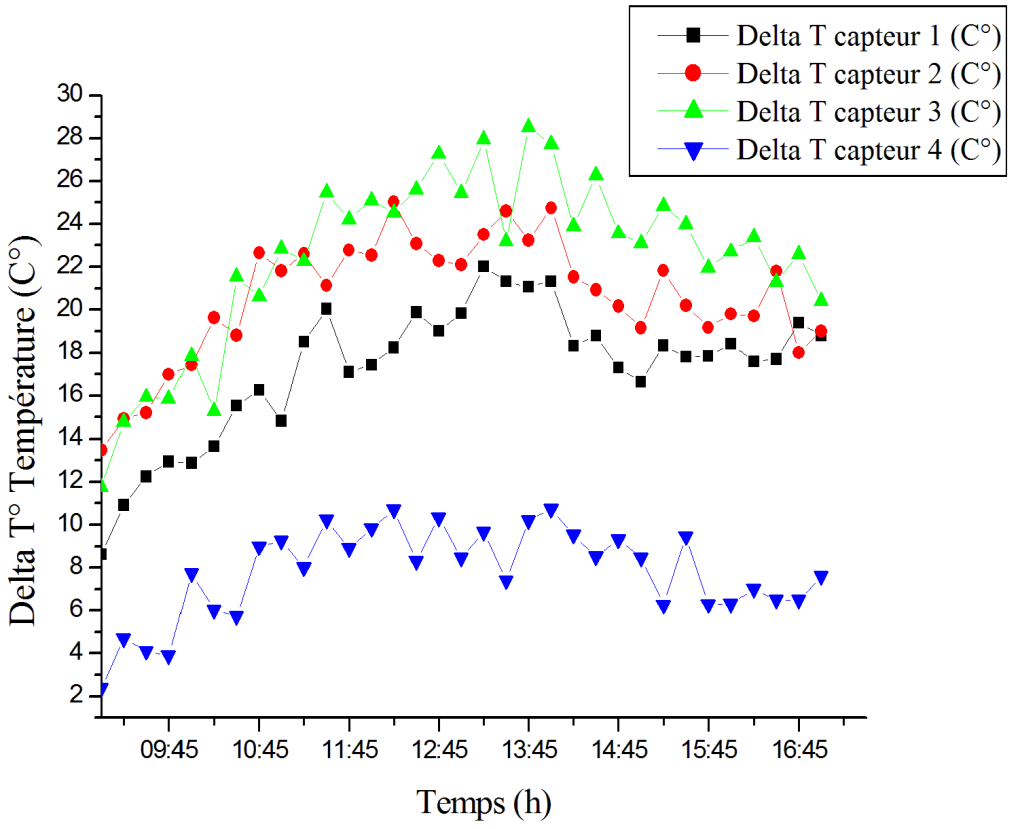


Figure (2-3): Evolution des valeurs ΔT (T_{sortie} - $T_{entrée}$) pour les capteurs de la 1ere série d'expériences

Pour cette première série d'expériences (figures 2-10 à 2-18), nous constatons dans les courbes précédentes de température d'entrée et sortie des capteurs que la température augmente avec l'évolution du rayonnement solaire [450, 950 W/m^2] et la température ambiante [17, 30°C] à partir du début d'expérience (9h00) jusqu'à midi [12h30 – 14h00] où la température atteint la valeur maximale. Après cette dernière valeur l'allure de la température diminue jusqu'à la fin d'expérience, par contre l'humidité relative commence à une valeur de 21% et décroit jusqu'à 10%.

L'écart entre les températures des différents capteurs à l'entrée et à la sortie, présenté dans la figure (2-4) peut être expliqué par la différence entre les caractéristiques des composants de chaque capteur (l'isolation et la plaque absorbante). En effet, nous remarquons que dans le cas du capteur avec l'isolation des matériaux locaux agricoles (fibre de palmier) la température à la sortie atteint une valeur élevée par rapport aux autres capteurs, alors on peut conclure que cette configuration est le meilleur choix au point de vue économique en raison de la disponibilité de fibre de palmier surtout dans la région des oasis du Sahara Algérien.

c) Courbes de rendement

Sur les courbes de la figure 2-19, ci-dessous, nous avons présenté les courbes du rendement thermique Correspondant à chacun des capteurs expérimentés

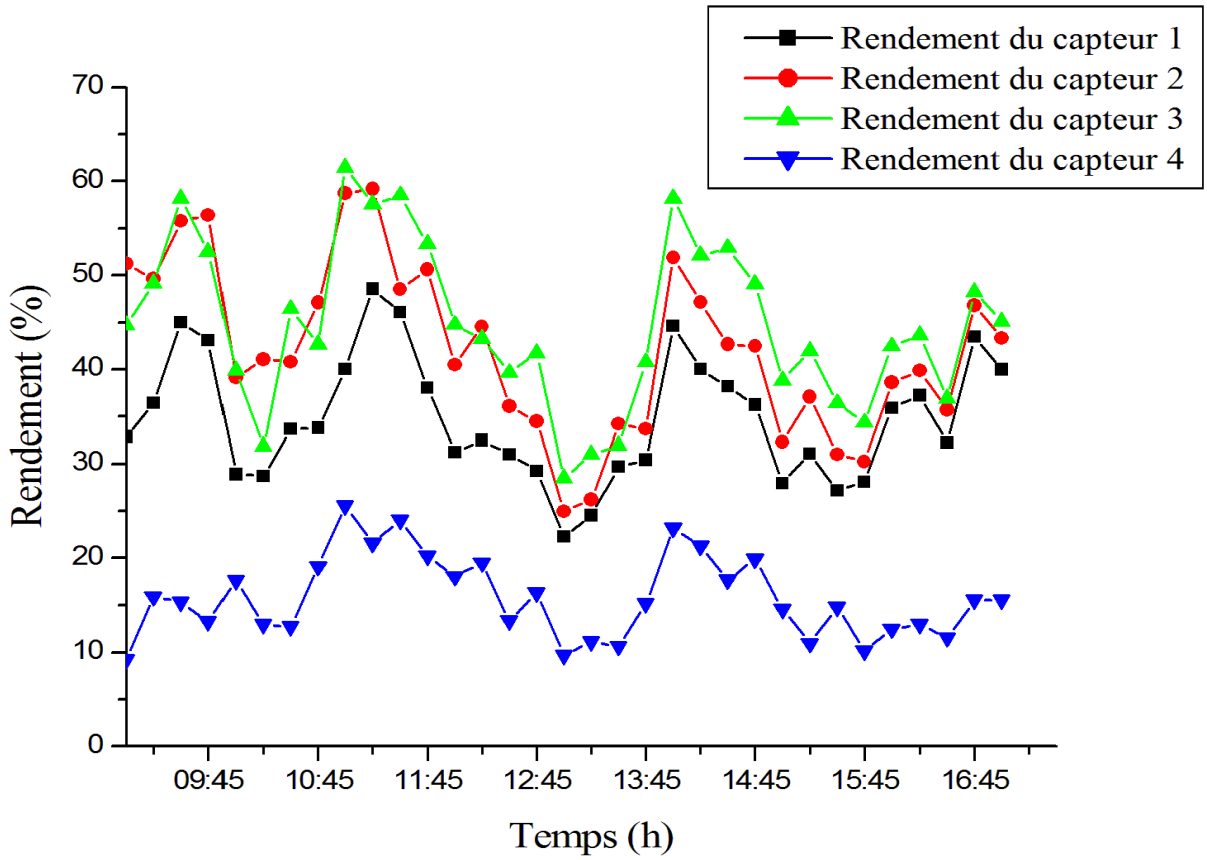


Figure (2 -5): Variation du rendement des capteurs N1, N2, N3 et N4 de la 1ere série d'expériences

La figure (2-19) montre l'évolution des rendements des capteurs en fonction du temps. Un écart important est observé entre les rendements des capteurs N_1, N_2, N_3 et N_4, à cause de l'écart de température et la vitesse de l'air sachant que les deux derniers ont été influencés par les différentes propriétés des composants des capteurs. Les valeurs maximales de rendement pour chaque capteur sont comme suit :

Le capteur N_1 : η_{max}=48%

Le capteur N_2 : η_{max}=57%

Le capteur N_3 : η_{max}=65%

Le capteur N_4 : η_{max}=27%

On peut ainsi déduire que les caractéristiques du troisième capteur donnent le meilleur rendement comparé aux autres à cause de la plaque absorbante (plaque aluminium avec peinture noire et le sable de dunes, l'isolation de fibre de palmier).

Tableau (2-4): Enthalpie spécifique de l'air à la sortie des capteurs petits échelles de la 1ere série d'expériences

Capteurs	Température Maximale à al eitros [C°]	Enthalpie [kJ/kg air sec]
N1	57.5	87.96
N2	53.9	78.94
N3	57	86.15
N4	37	47.28

2.7.2. Résultats de la deuxième série d'expériences

a) Conditions climatiques de la journée (15-04-2015)

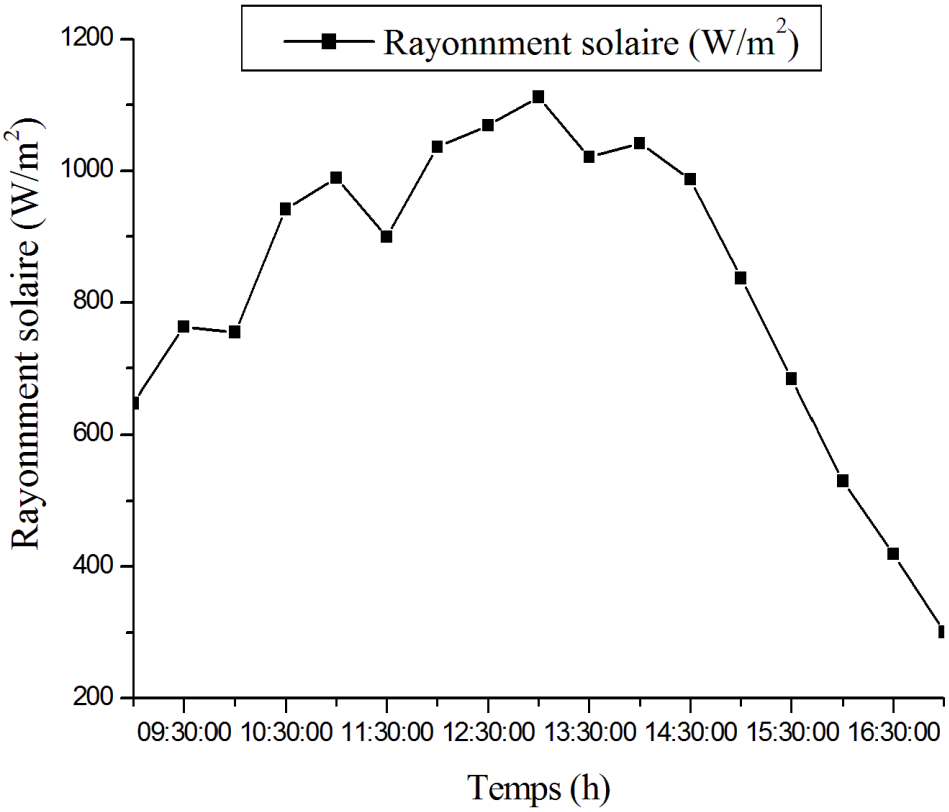


Figure (2-20): Variation du Rayonnement solaire de la 2eme série d'expériences

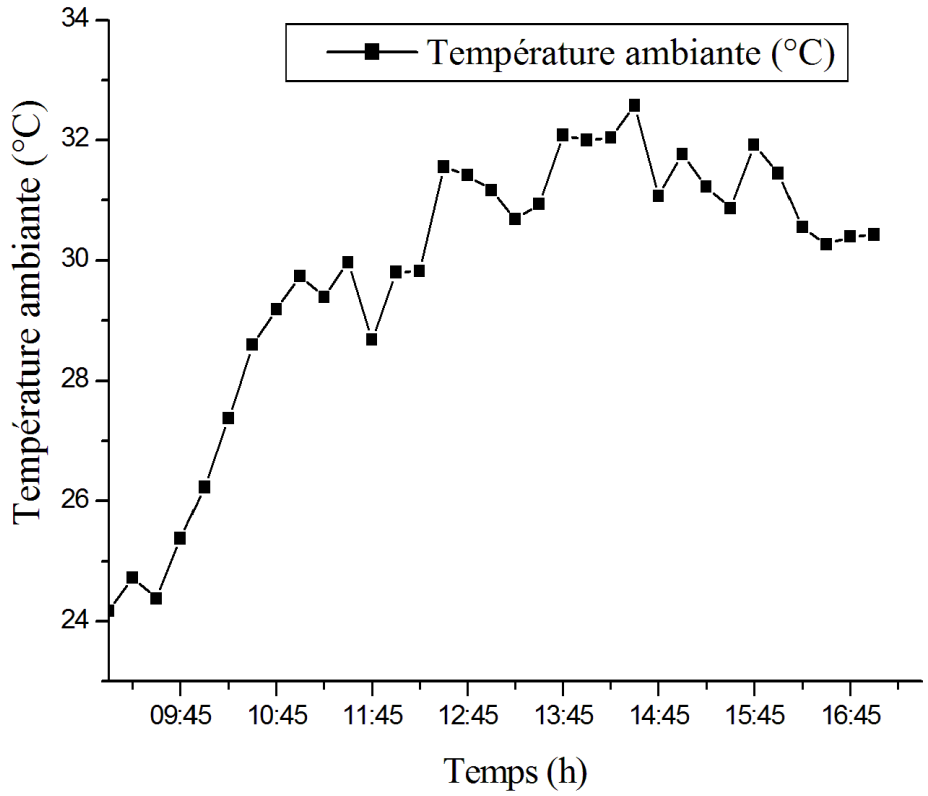


Figure (2 -21): Evolution de la température ambiante de la 2eme série d'expérience

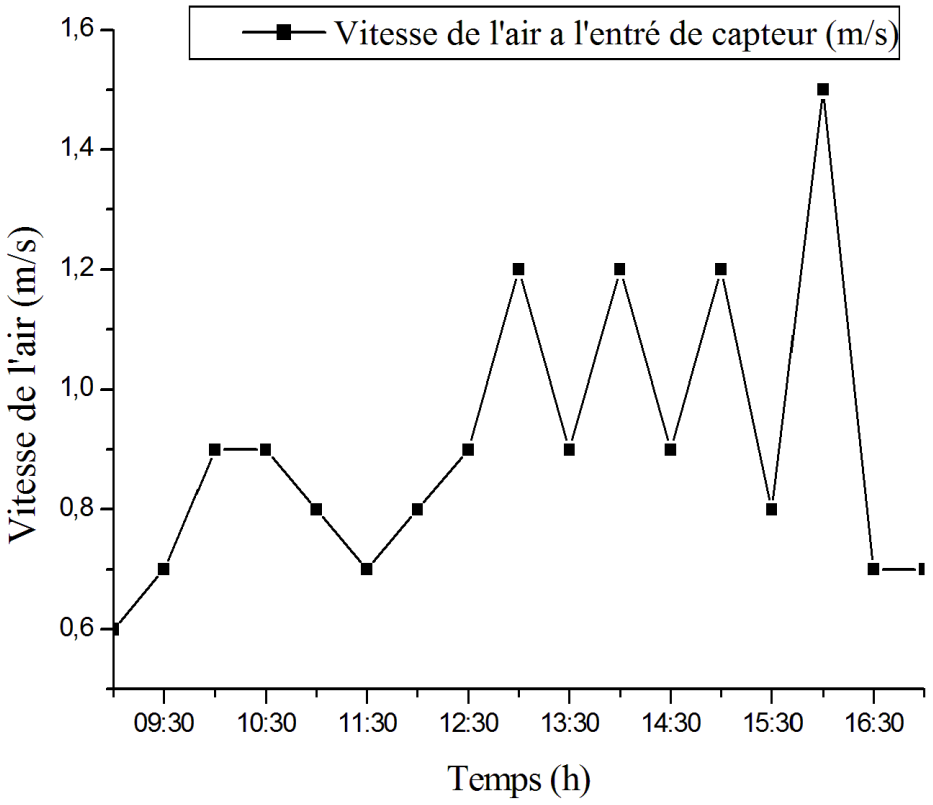


Figure (2 -22): Vitesse du vent de la 2eme série d'expériences

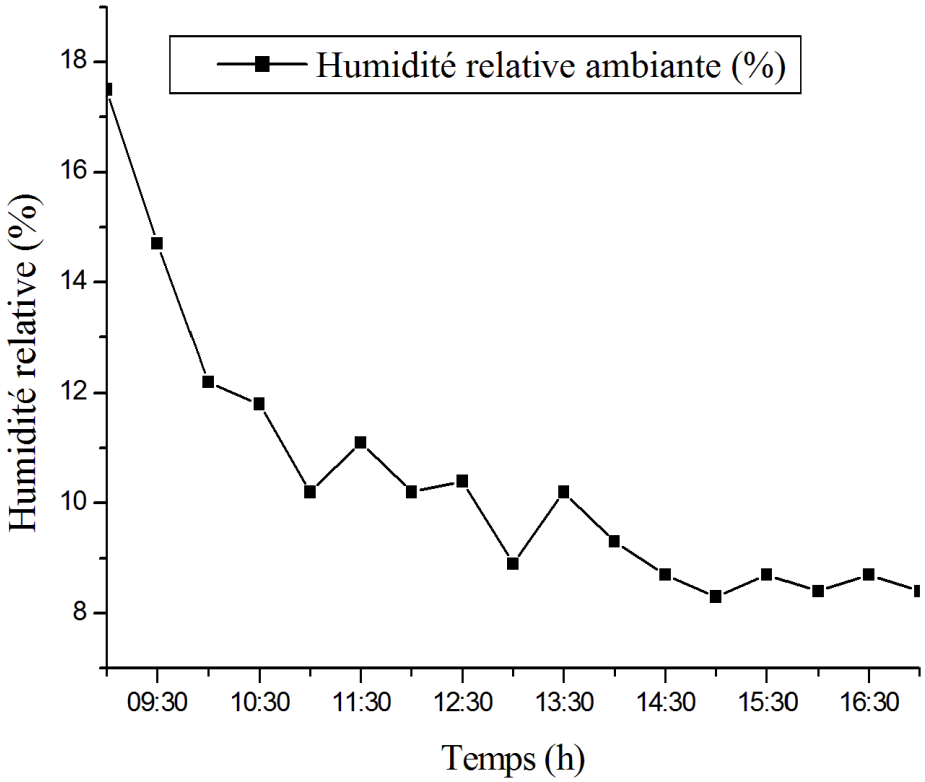


Figure (2 -23): Variation de l'humidité relative de la 2 éme série d'expériences

b) Courbes des températures

Capteur à simple passage

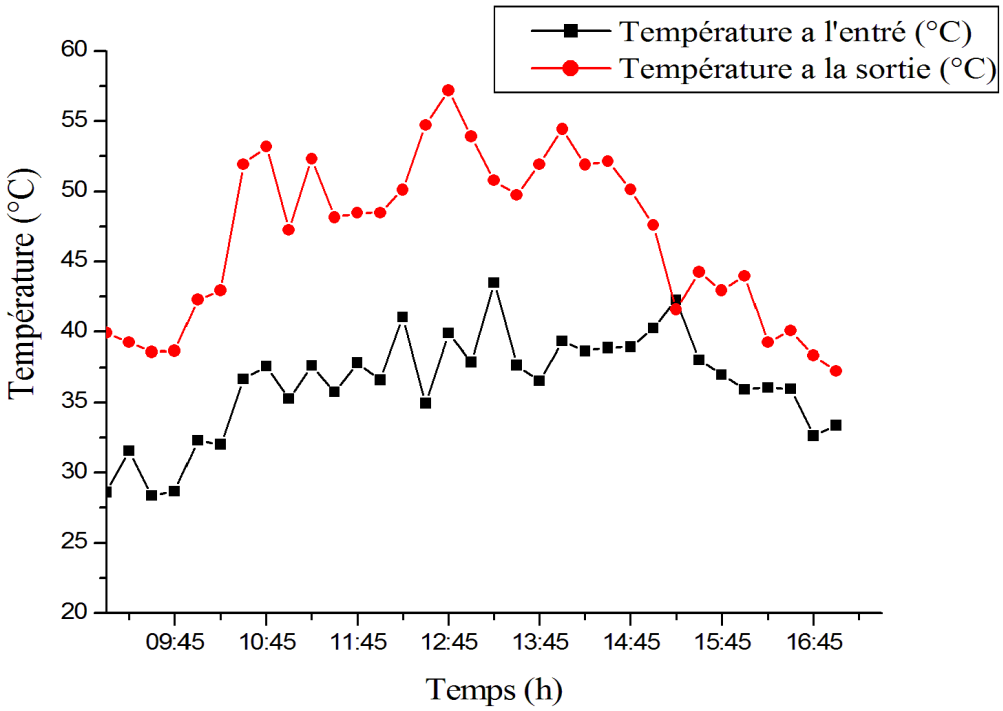


Figure (2 -24): Evolution de T. entré, T. sortie pour le capteur à simple passage de la 2eme série d'expériences

Capteur à double passage - 1er passage

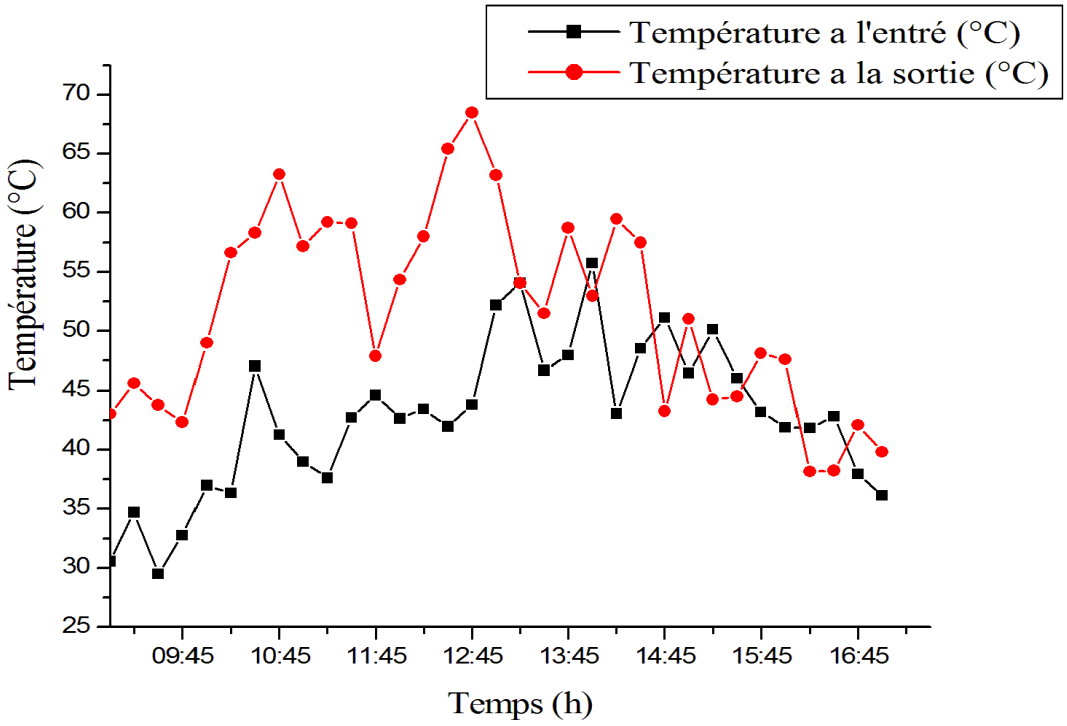


Figure (2 -25): Evolution de T. entré, T. sortie pour le capteur à double passage, le 1er passage de la 2eme série d'expériences

Capteur à double passage - 2em passage

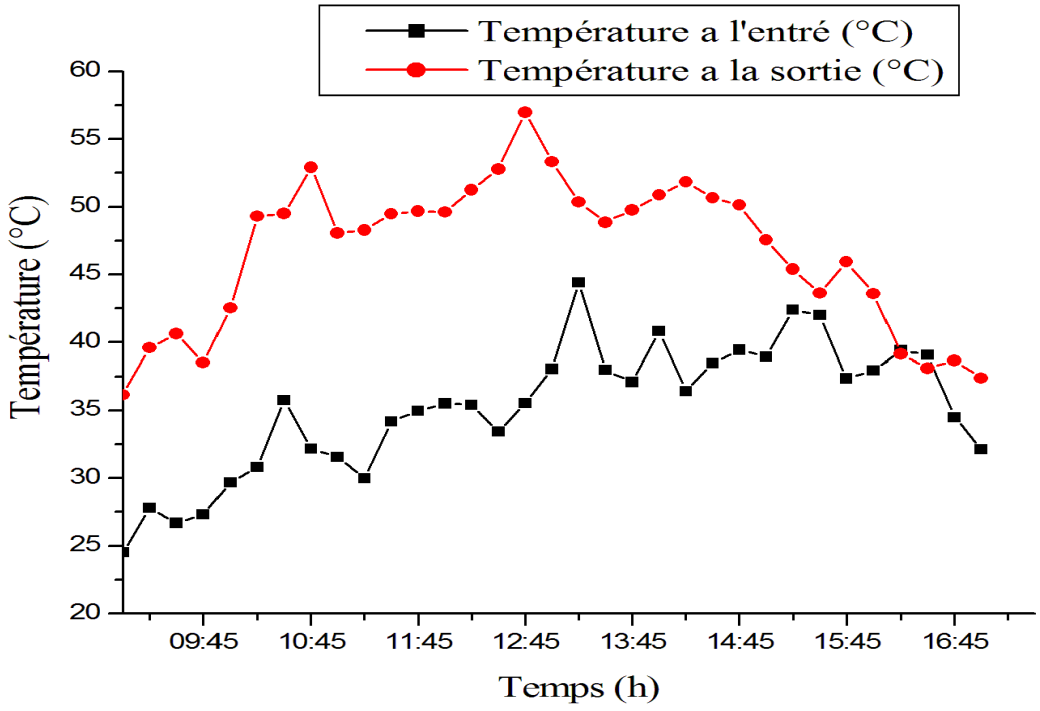


Figure (2-26):Evolution de T. entré, T. sortie pour le capteur à double passage, le 2em passage de la 2eme série d'expériences

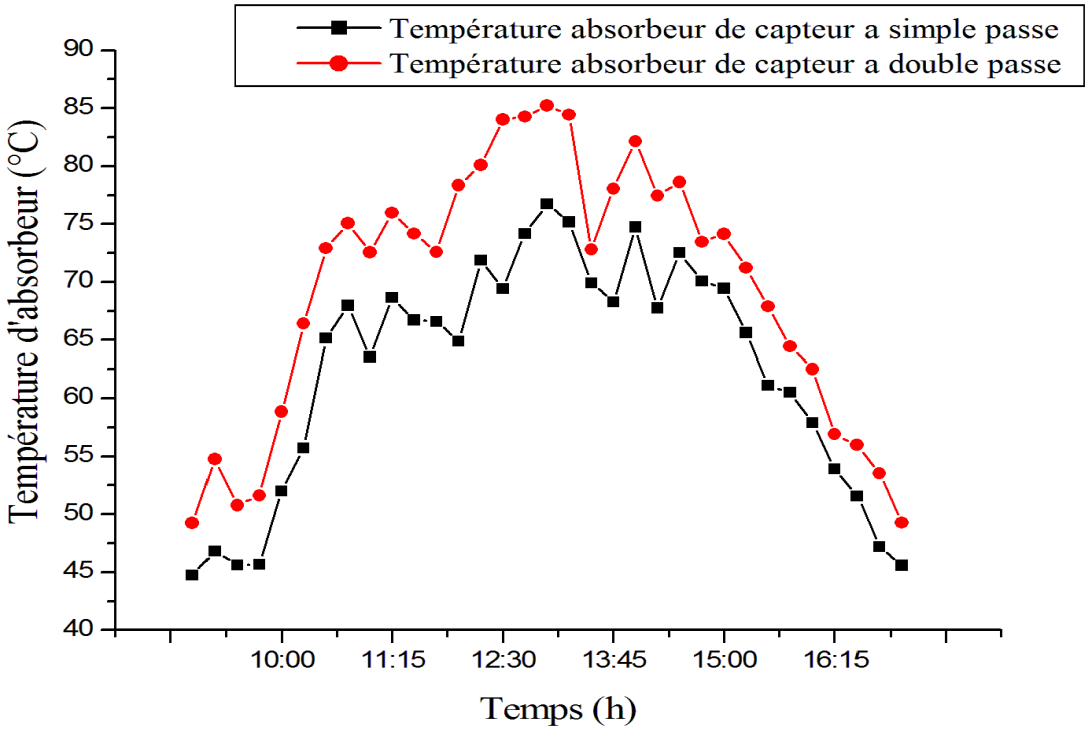


Figure (2-6): Evolution de température à l'absorbeur pour le capteur à double et à simple passage de la 2eme série d'expériences

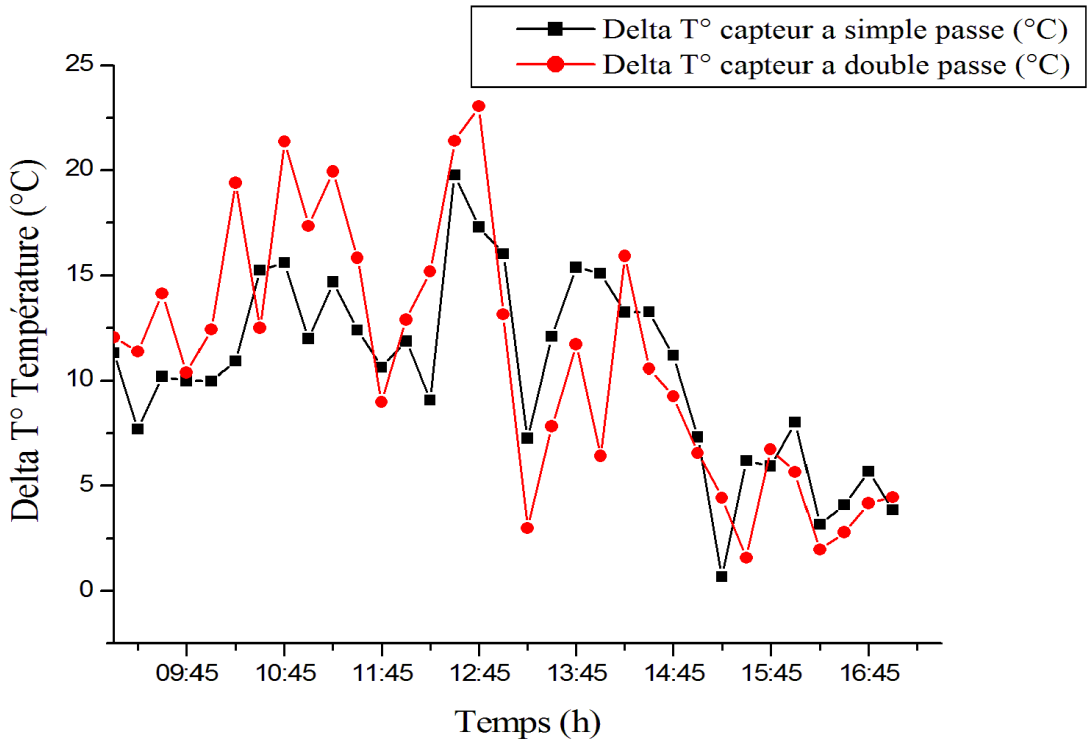


Figure (2-7): Evolution des valeurs ΔT pour les capteurs de la 2eme série d'expériences

Les essais sur les capteurs à échelle réelle de la 2ème série d'expériences ont été réalisés dans une période relativement chaude pendant la saison du printemps (à la localité de Ouargla) et cela explique l'augmentation du rayonnement solaire, température et humidité relative malgré que ce dernier soit généralement faible (climat sec).

Le capteur de passage simple génère un grand écart de température dans l'heure de pic (T_{min} = 38°C, T_{max} = 57°C) où le rayonnement solaire aussi atteint son maximum (1088 W/m²) et l'écart de température obtenu est suffisant pour une application de séchage (ΔT_{max}=17°C).

Pour l'autre capteur (capteur à double passage), on a remarqué un peu d'augmentation de température à la sortie du capteur d'un maximum de (T_{max}=67°C) pour le premier passage, et (T_{max}=57.5°) pour le 2eme passage, la différence de température entre les deux passages est attribuable à ce qu'il est au-dessus du deuxième passage.

La différence entre les deux capteurs (simple passage et double passage) et attribuable aux caractéristiques physiques de chacun des isolants et les propriétés géométriques des capteurs (longueur, largeur et surface d'entrée d'air).

c) Courbes des rendements

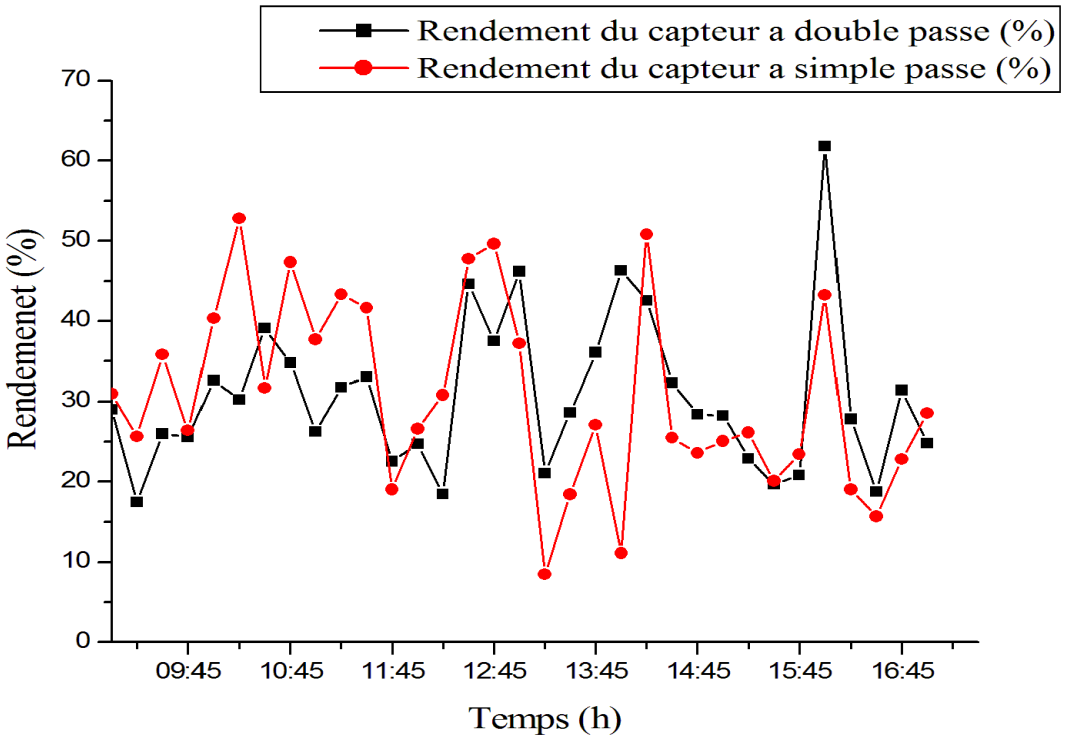


Figure (2 -8): Rendements des capteurs de la 2eme série d'expériences

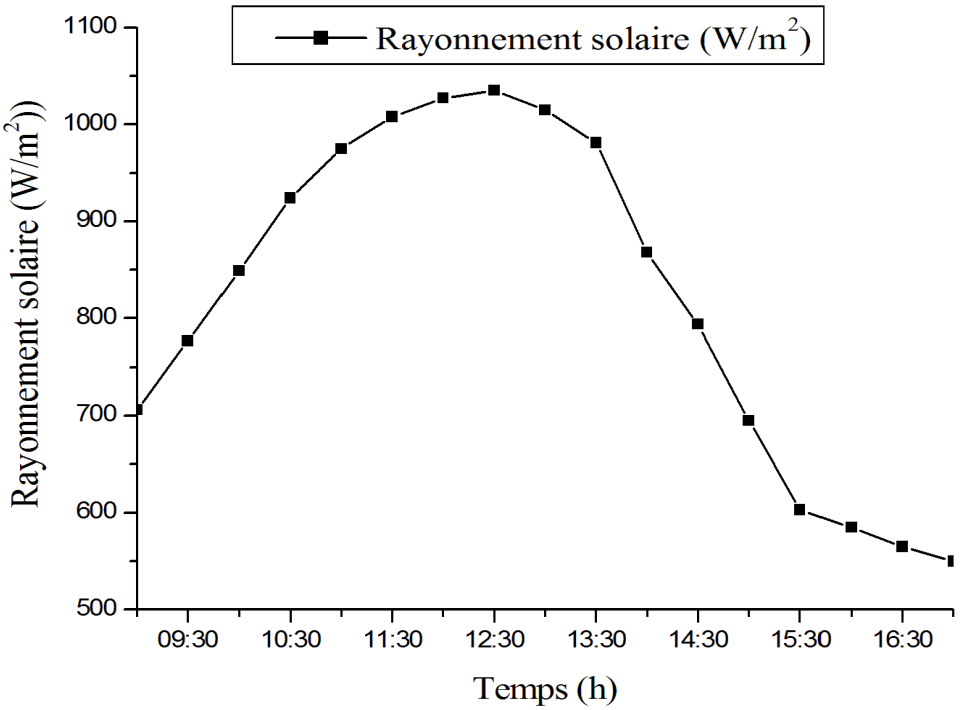
Tableau (2-5): Enthalpie spécifique de l'air à la sortie des capteurs à échelles réelles de la 2eme série d'expériences

Capteurs	Température Maximale à la sortie [C°]	Enthalpie [kJ/kg air sec]
Simple Passage	57.3	73.57
Double Passage 1er passage	67.7	94.06
Double Passage 2^{éme} passage	57	73.74

La figure (2-29) montre que les rendements des capteurs à simple et double passe (les deux passes), sont des rendements presque les mêmes donc pour le bon choix on se réfère à la vision économique (la réalisation moins chère) qui consiste à choisir le capteur à simple passe.

2.7.3. Résultats de 3eme série d'expériences

a) Conditions climatiques de la journée (04-05-2015)



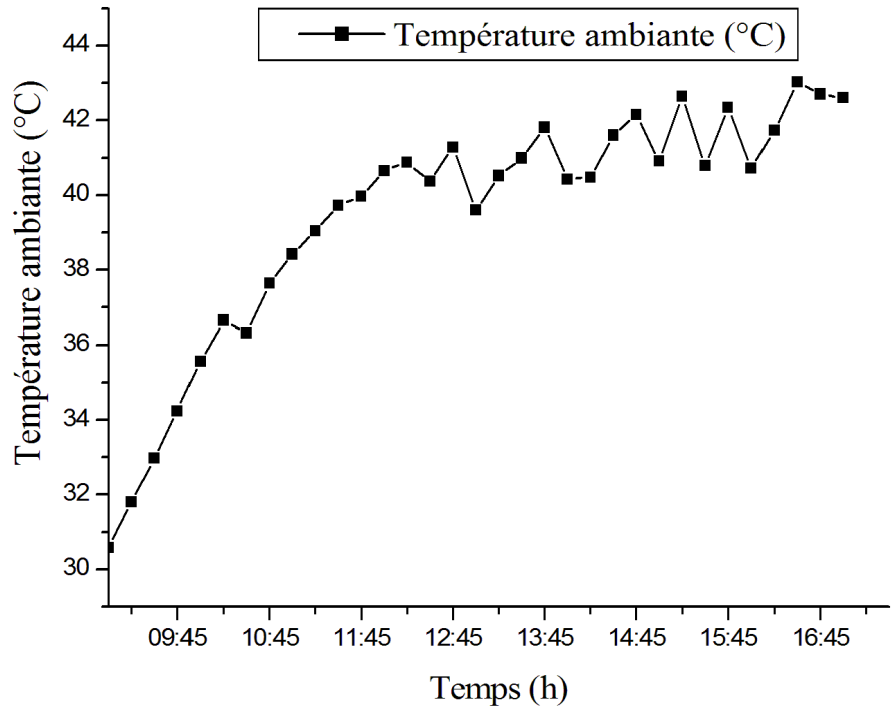
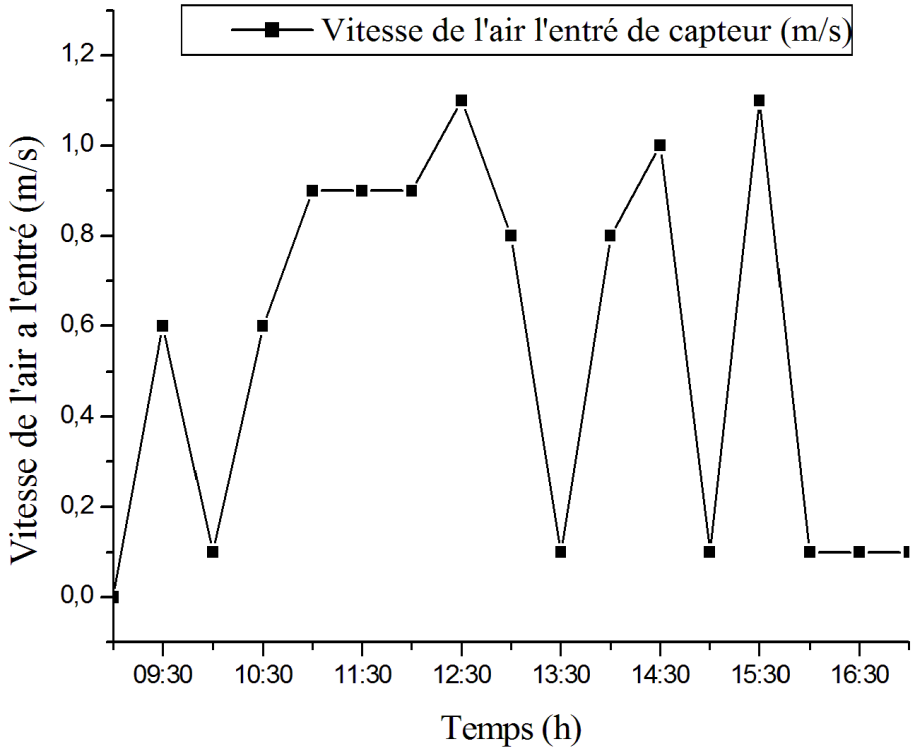


Figure (2-30): Evolution de la température ambiante et du Rayonnement solaire de la 3eme série d'expériences



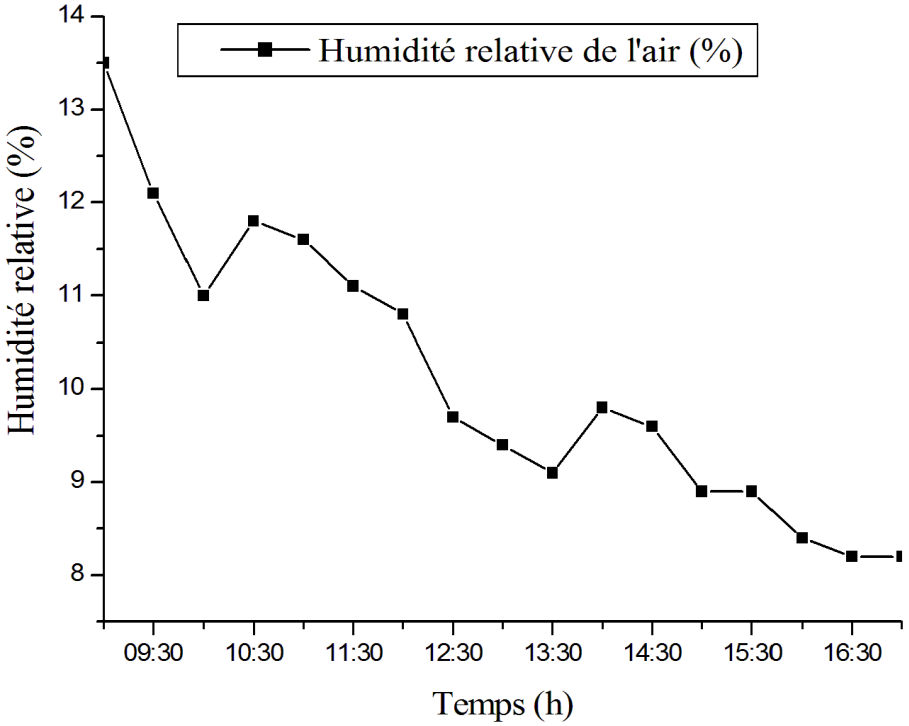


Figure (2 -31): Evolution de la vitesse de l'air et de l'humidité relative de la 3eme série d'expériences

b) Les courbes des températures dans les capteurs

Capteur simple passage avec la chambre de séchage

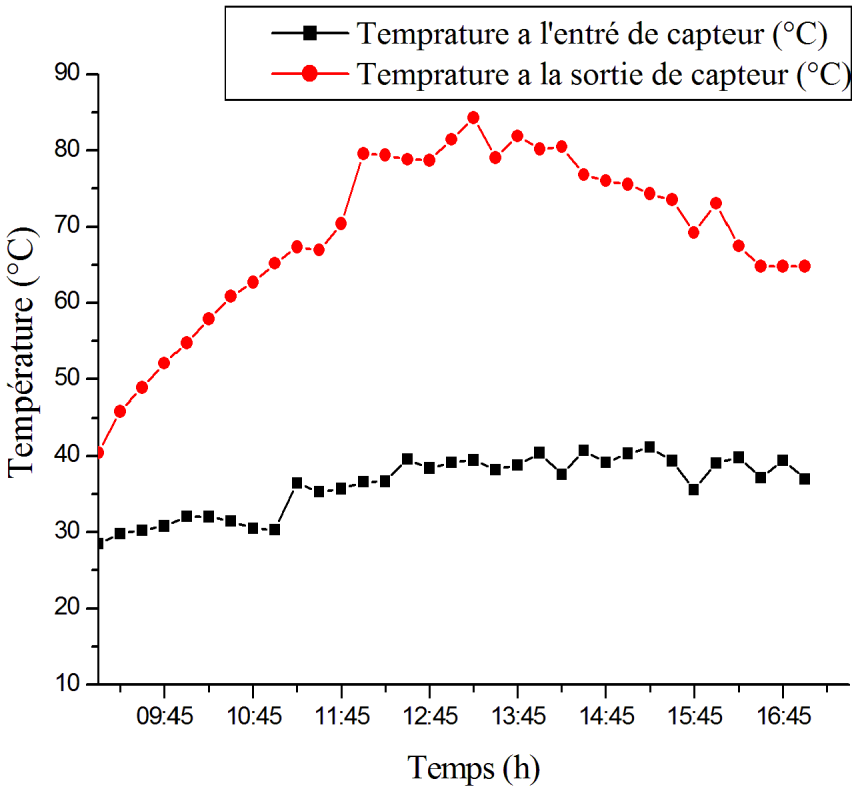


Figure (2 -9): Evolution de T. entré et de T. sortie pour le capteur simple passage avec la chambre de la 3eme série d'expériences

Capteur double passage avec le 1er passage avec la chambre de séchage

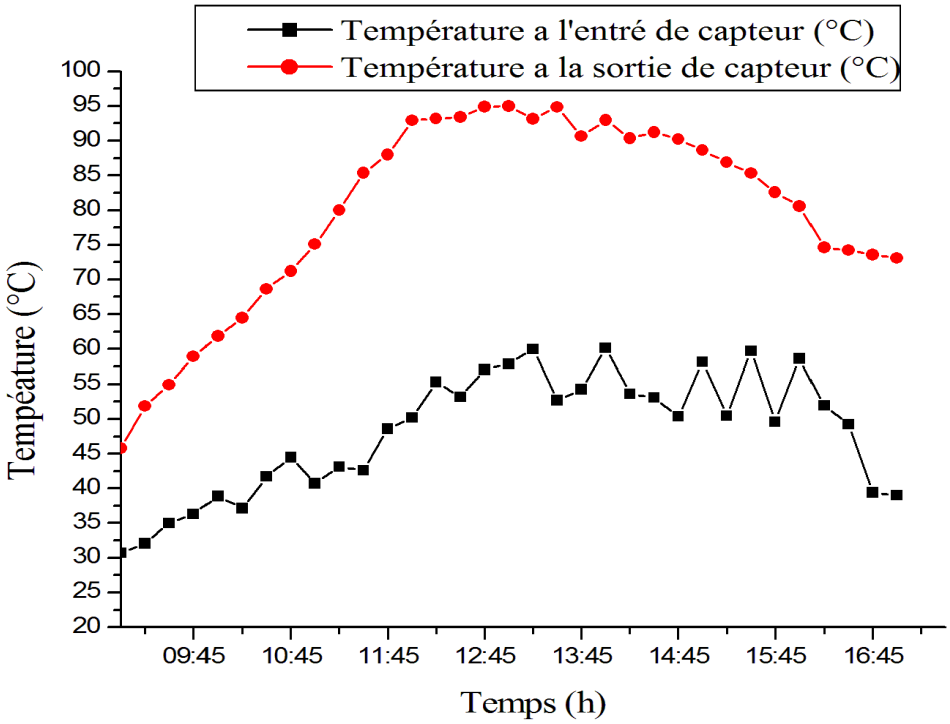


Figure (2-10): Evolution de T. entré et de T. sortie pour le capteur double passage, le 1er passage avec la chambre de la 3eme série d'expériences

Capteur double passage avec le 2ème passage avec la chambre de séchage

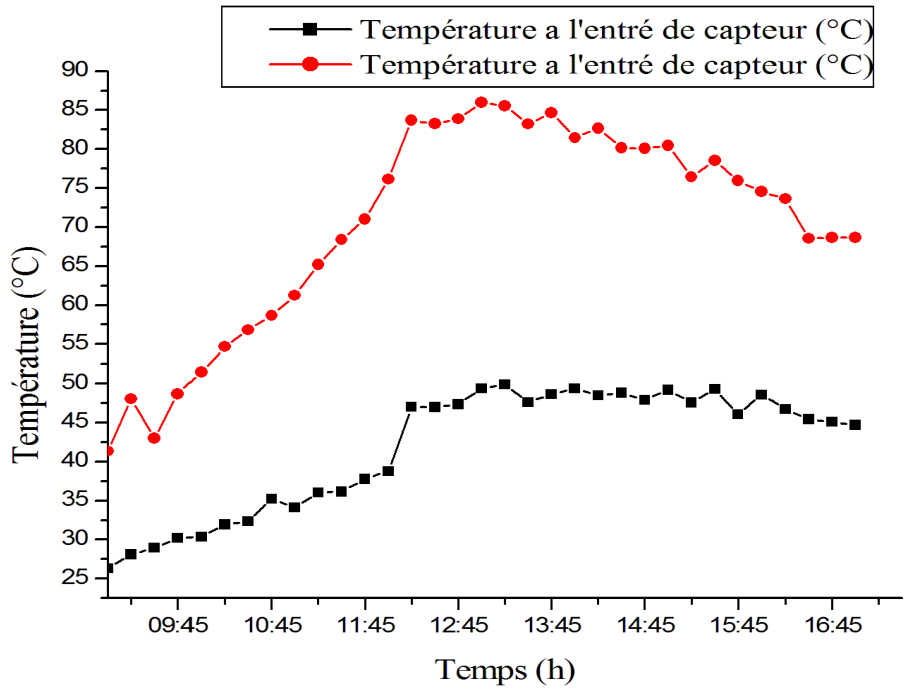


Figure (2 -11): Evolution de T. entré et de T. sortie pour le capteur double passage, le 2éme passage avec la chambre de 3eme série d'expériences

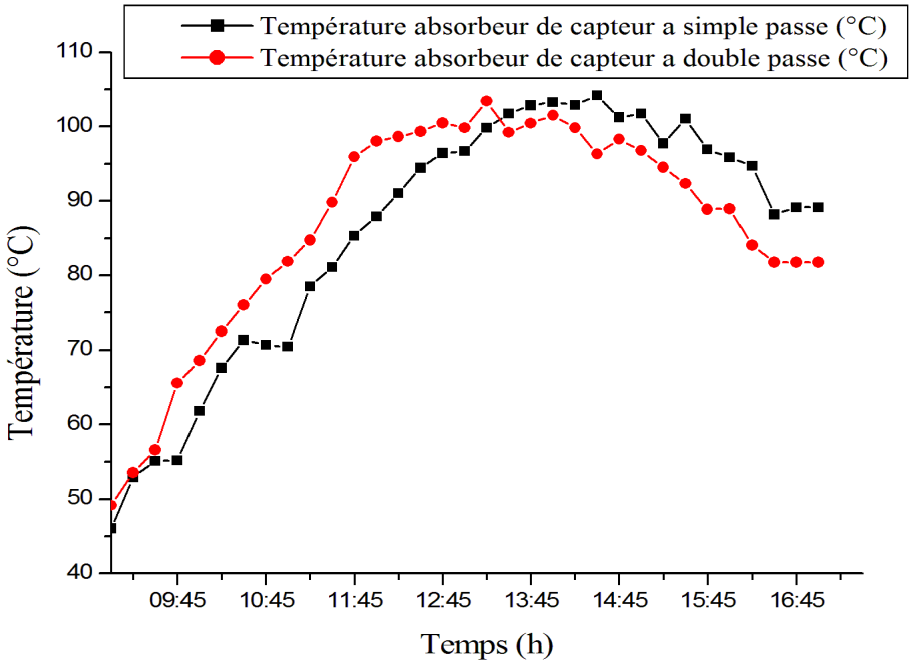


Figure (2-35): Evolution de la température à l'absorbeur pour le capteur à simple passage et double passage avec la chambre de la 3eme série d'expériences

c) Courbes des températures dans la chambre de séchage

La chambre de séchage avec capteur à simple passage

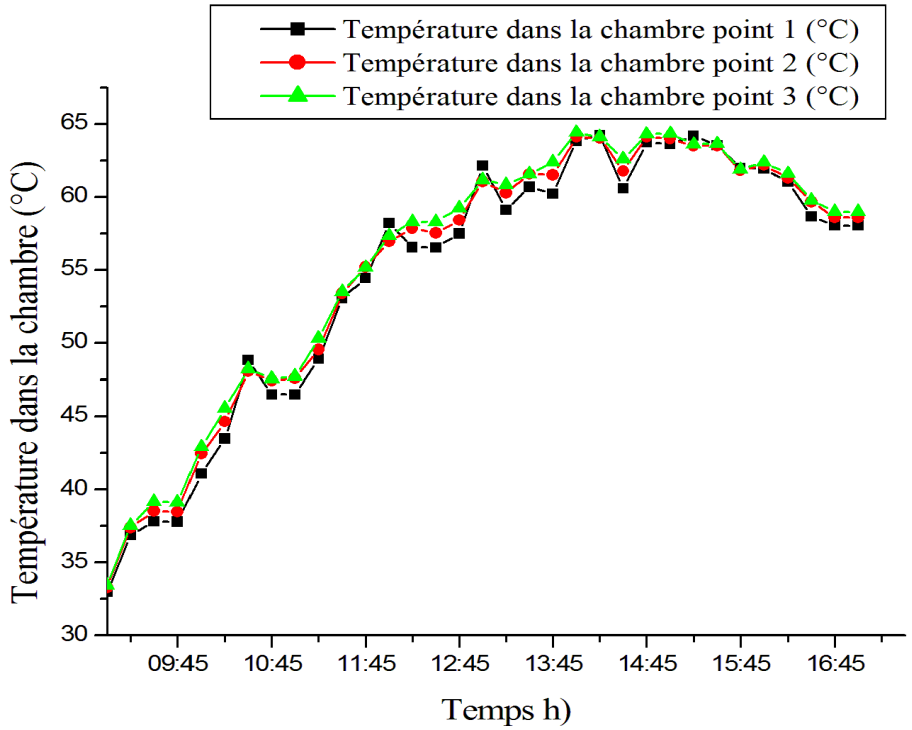


Figure (2-36): Evolution des températures dans la chambre connectée au capteur simple passage de la 3eme série d'expériences

La chambre de séchage avec capteur à double passage

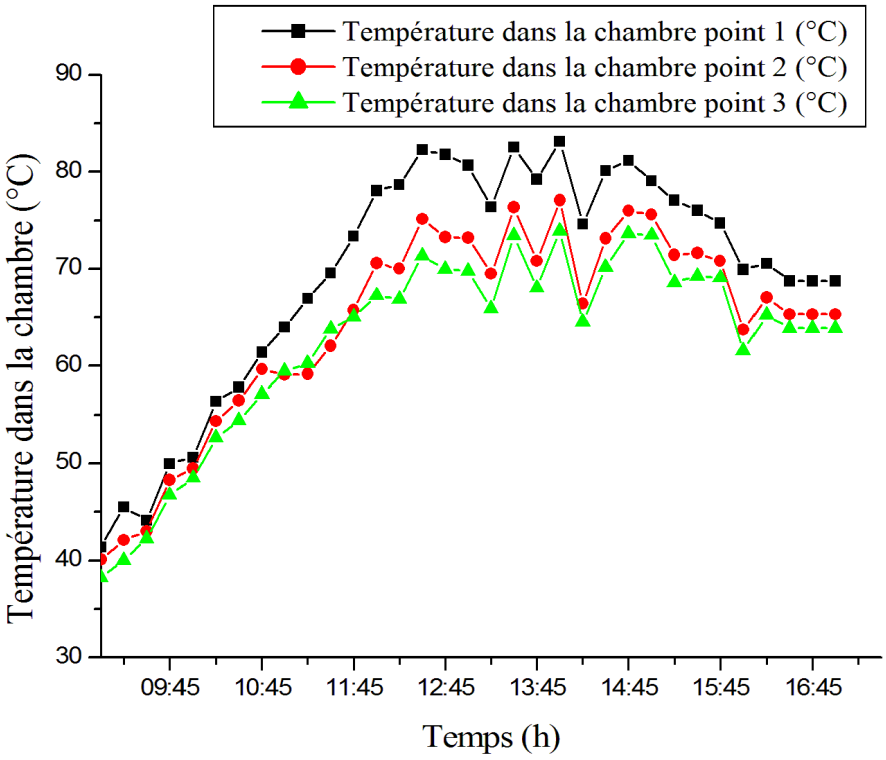


Figure (2-37): Evolution des températures dans la chambre connectée au capteur double passage de la 3eme série d'expériences

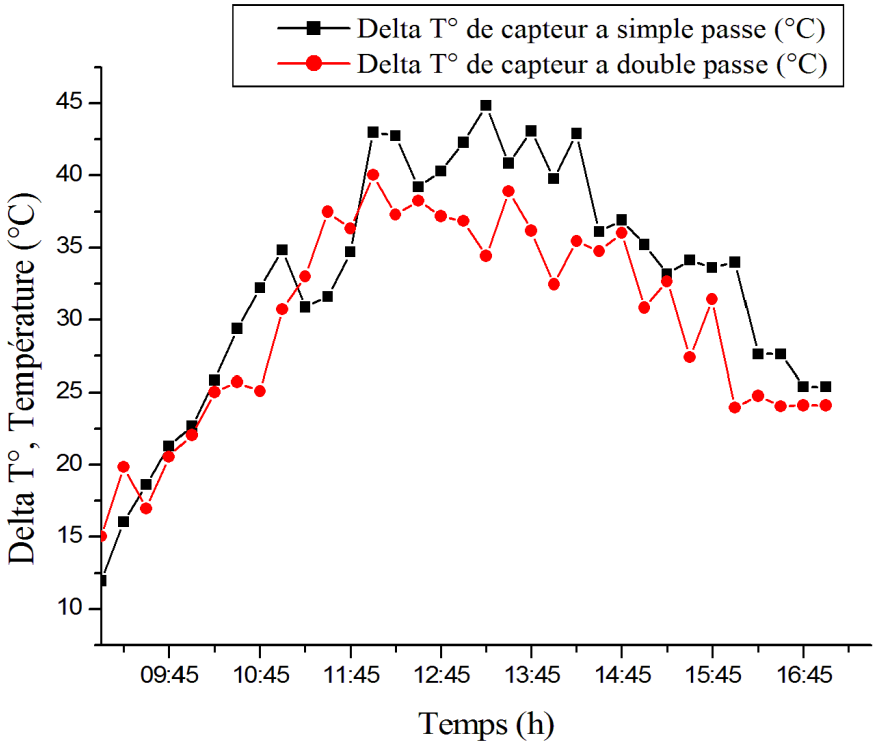


Figure (2-38): Evolution des valeurs ΔT pour les capteurs de la 3eme série d'expériences

Nous avons monté les capteurs avec les chambres de séchage (capteur simple passage et capteur double passage), cette étape a été faite dans l'objectif d'observer l'influence des différentes configurations des capteurs sur la distribution des températures dans la chambre de séchage. Les résultats obtenus indiquent que la température entrant dans la chambre de séchage est très suffisante pour une opération de séchage des produits agroalimentaires particulièrement en période d'été.

Avec une température de sortie maximale de (T_{max}= 85°C pour le capteur simple passage) et (T_{max1}=94°C, T_{max2}=84°C pour les deux passages de capteur double passe, notons que ces valeurs de T sont en absence de ventilation dans la chambre), cette élévation de température à la sortie de capteur double passage à cause de manque de l'évacuation de l'air asséchant.

A partir des courbes de l'évolution de température à l'intérieur des deux chambres on remarque que l'air a tendance à se refroidir en avançant vers la sortie de la chambre de séchage de manière que sa température puisse reprendre des valeurs convenables aux applications de séchage, soient 50°C à 70°C.

d) Les courbes des rendements

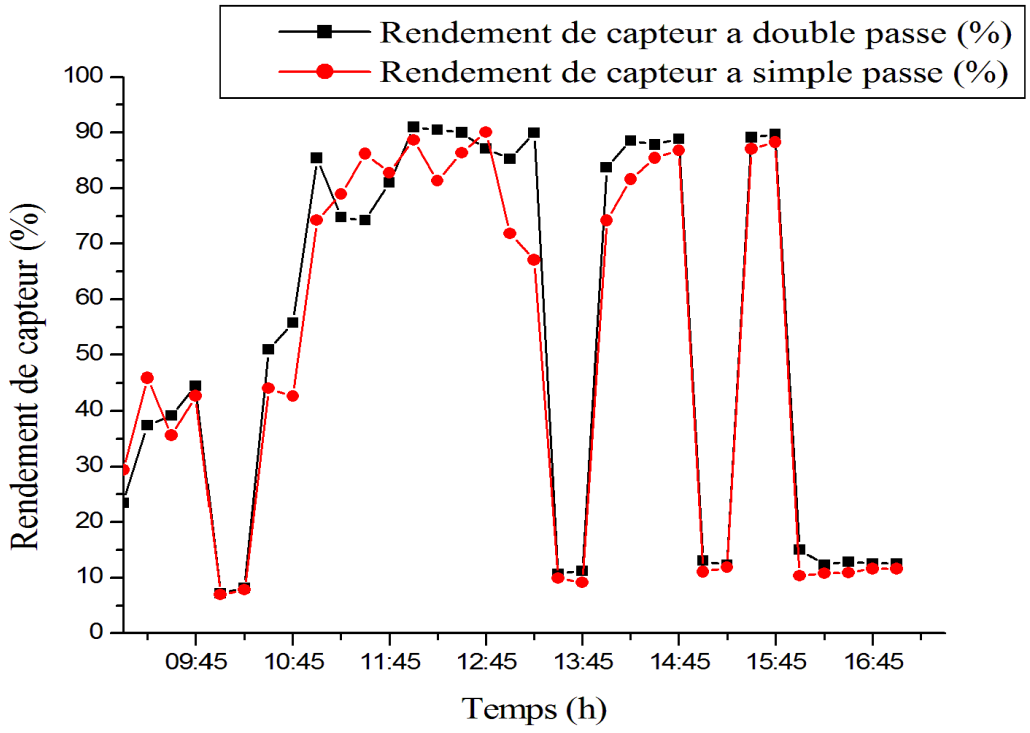


Figure (2 -39): Rendements des capteurs de la 3eme série d'expériences.

Les résultats présentés dans la figure (2-39) indiquent que le rendement obtenu dans le cas de la troisième série d'expérience est plus élevé que celui obtenu dans les autres cas d'expériences puisque ΔT de ces capteurs est supérieur à ΔT des autres capteurs [35°C et 40°C] comme on l'a précisé plus haut. Ceci est du principalement à l'évacuation de l'air qui est faible.

La forme sinusoïdale des courbes de rendements est en relation avec les moments de chute de la vitesse de l'air à l'entrée des capteurs qui devient presque nulle.

Tableau (2-6): Enthalpie de l'air à la sorties des capteurs connecté avec les chambres de la 3eme série d'expériences

Capteurs	Température Maximale à la sortie [C°]	Enthalpie [kJ/Kg as]
Simple Passage	84.10	173.59
Double Passage 1er passage	94	238.80
Double Passage 2^{éme} passage	86	182.98

2.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une investigation expérimentale en vue d'examiner les effets des paramètres géométriques et thermo-physiques sur la performance des capteurs solaires plans utilisés avec les séchoirs solaires. L'étude à porté sur différents prototypes de capteurs. Une première série d'expérience a été faite sur 04 prototypes de capteurs aux mêmes dimensions avec différents matériaux isolants. Les résultats correspondants montrent que l'utilisation d'isolation thermique à base de biomatériaux locaux tels que les fibres de palmier offre une bonne efficacité du capteur comparée aux autres capteurs avec un moindre cout. Une deuxième série d'essais a porté sur deux capteurs de plus grande taille conçus pour simple et double passage. Les résultats, dans ce cas, ont montré que les performances du capteur à double passage sont meilleures que celui à simple passage. Cette même constatation a été revérifiée lors de la troisième série d'expériences où les capteurs étaient raccordés à des chambres de séchage. Aussi il a été constaté que les températures à la sortie du capteur étaient plus élevées, probablement par effet de stratification thermique dans la chambre. En fin la vue d'ensemble des résultats discutés dans

cette étude encourage l'orientation du travail vers un complément utilisant les méthodes d'optimisation afin de définir les meilleurs choix adéquats, particulièrement pour la région d'étude.

Chapitre 3

Effet des configurations géométriques sur les champs dynamique et thermique dans la chambre de séchage

3.1. Introduction

Un des problèmes essentiels de l'utilisation de l'énergie solaire est la non homogénéité de distribution des températures de l'air dans les chambres de séchage des séchoirs solaires indirect à convection naturelle [67-71]. Par contre, l'introduction de quelques modifications sur la forme géométrique du séchoir, soit la chambre ou le capteur, peut améliorer nettement la répartition de température dans la chambre. D'autre part, les études effectuées sur les séchoirs solaires particulièrement sur la cheminée d'évacuation ont porté sur l'amélioration des cheminées afin d'accroître le débit d'air réchauffé à travers le produit à sécher. Ces études ont aussi porté sur la compréhension des relations entre les divers paramètres qui influent sur le fonctionnement de ces séchoirs et aussi sur les moyens d'amélioration des séchoirs de manière à les adapter davantage aux besoins locaux. Dans ce chapitre nous considérons le même séchoir solaire sur lequel nous étudions deux points, à savoir :

- L'influence des modifications au niveau de la forme (longueur et largeur) du capteur afin d'obtenir une bonne homogénéité de distribution de température dans la chambre de séchage. Une étude numérique par la méthode des volumes finis est faite pour étudier le comportement dynamique et thermique de l'écoulement d'air dans la chambre de séchage à partir des modifications sur le capteur solaire plan à air.
- Effets d'intégration d'une cheminée solaire permettant la ventilation naturelle, d'un séchoir solaire, utilisant le moyen de simulation dans un objectif d'amélioration des performances du séchoir solaire avec moindre cout dans les conditions climatiques de la région d'Ouargla au nord-est du Sahara algérien.

3.2. Principe de la méthode des volumes finis

La méthode des volumes finis est largement utilisée dans les phénomènes de la physique et des sciences de l'ingénieur, tel que la mécanique des fluides, le transport de masse et de chaleur. Quelques unes des caractéristiques importantes de la méthode des volumes finis sont similaires à celles de la méthode des éléments finis : elles peuvent

être utilisées sur la géométrie orbitaire, utilisant des maillages structurés ou non structurés et elles mènent aussi à des schémas robustes.

Le principe de méthode des volumes finis consiste essentiellement en :

- La discrétisation du domaine considéré en volume de contrôle ;
- La formulation intégrale des équations différentielles aux dérivées partielles ;
- Le choix d'un schéma représentant la variation de la quantité physique et l'assemblage des diverses équations ;
- Le modèle doit être stable est convergent

3.3. Présentation du problème Physique et de logiciel de travail

La simulation numériques en mécanique des fluides (CFD ; Computationl Fluid Dynamics) est reconnue aujourd'hui comme l'un des outils incontournables de conception et est largement utilisée dans l'industrie. Le choix de l'utilisation de telle méthode numérique va dépendre essentiellement du type et de la complexité du problème à résoudre : La nature du fluide, le comportement thermodynamique, la modélisation du milieu et le problème stationnaire ou in stationnaire.

Les codes de simulation numérique des écoulements, ou codes CFD (Computational Fluid Dynamics), résolvent les équations régissant les mouvements d'un fluide. Ces équations traduisent la conservation de la masse et de la quantité de mouvement du fluide (équations de Navier-Stokes), ainsi que la conservation de l'énergie.

3.3.1 Gambit

Gambit est un logiciel de DAO (Dessin Assisté par Ordinateur) et de génération de maillage. Le logiciel Gambit est un mailleur 2D/3D ; préprocesseur qui permet de mailler des domaines de géométrie d'un problème de CFD (Computational Fluid Dynamics). Il génère des fichiers*.msh pour Fluent. Gambit regroupe trois fonctions :

- définition de la géométrie du problème.
- le maillage et sa vérification.
- la définition des frontières (Types de conditions aux limites) et définitions des domaines de calculs.

a) Maillage

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

a.1 Maillage structuré (quadra/hexa)

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

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

Les inconvénients sont :

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

a.2 Maillage non structuré (tri/tétra)

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

Ses avantages :

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

Les inconvénients sont :

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

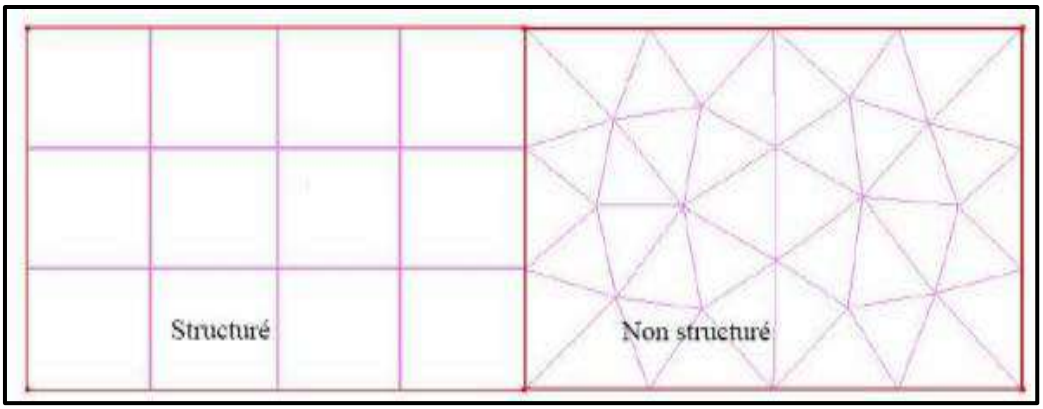


Figure (3-1) : *Maillage structuré et non structuré*

a.3 Maillage hybride

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

Ses avantages :

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

3.3.2. Fluent

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

Capacité de Fluent :

- Écoulement dans des géométries 2D ou 3D en utilisant des maillages adaptatifs non structurés.
- Écoulement incompressible ou compressible
- Analyse stationnaire ou instationnaire
- Ecoulements non visqueux, laminaires ou turbulents
- Fluide Newtonien ou non-Newtonien
- Transfert de chaleur par convection naturelle ou forcée.
- Transfert de chaleur couples conduction /convection
- Transfert de chaleur par rayonnement
- Repère de référence inertielle (stationnaire) ou non-inertiel (en rotation)

- Multiples repères de référence en mouvement incluant des interfaces glissantes et des plans de mélange
- Ecoulement à travers les matériaux poreux
- Modèles pour turbine 1D/ échangeur de chaleur
- Ecoulements diphasique, incluant la cavitation
- Ecoulement à surfaces libre avec surfaces complexes.

3.3.3. Les différentes étapes à suivre pour la simulation numérique par FLUENT

Les principales étapes à suivre lors du travail sur logiciel de simulation numérique des écoulements fluent nécessitent la connaissance de certaines notions théorique de base. Ces notions concernent notamment les définitions des principales équations régissant l'écoulement. Les étapes pour le déroulement des simulations sur les deux logiciels Gambit et FLUENT sont résumées sur la figure (3-2).

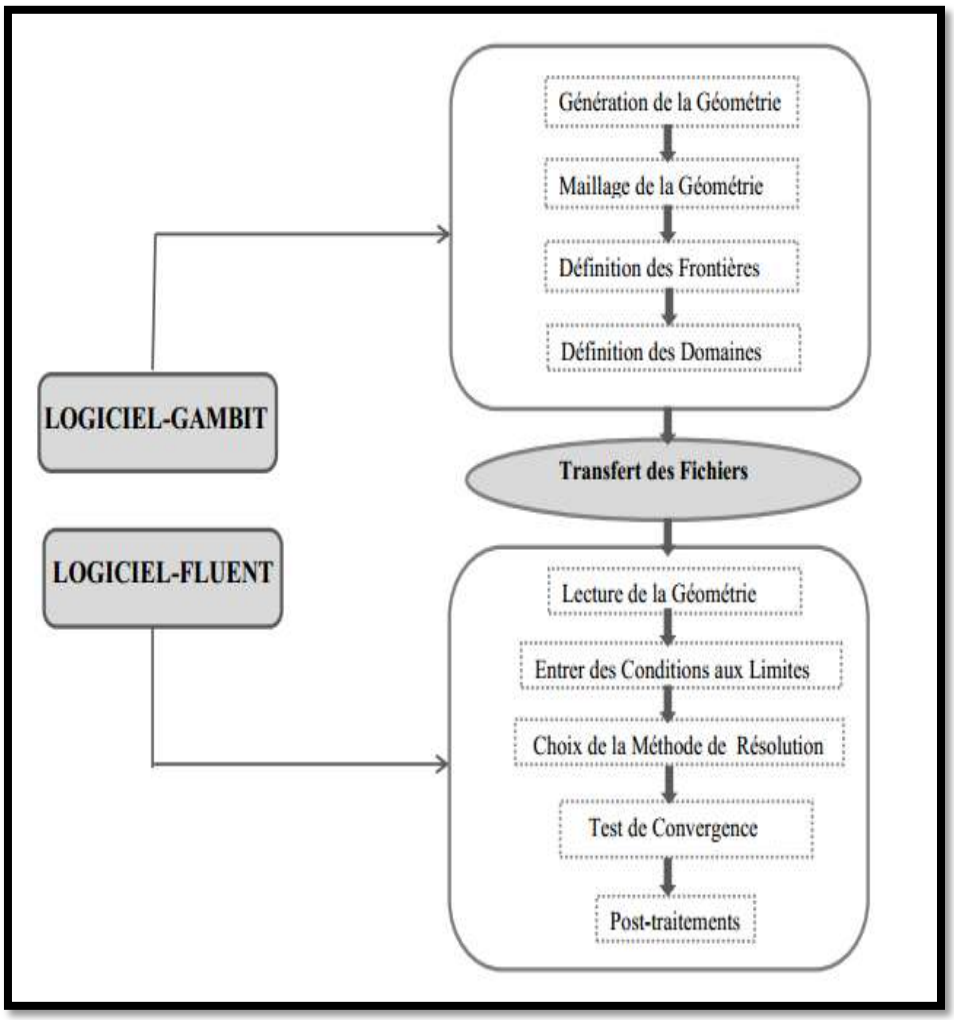


Figure (3-2) : Etapes de résolution suivies par GAMBIT et FLUENT

3.4. Méthodologie de traitement (cas de la présente étude)

3.4.1. Mise en équation du problème

a) Equations générales en régime laminaire

La convection naturelle engendrée par des transferts de chaleur au voisinage des surfaces chauffées a été largement étudiée tant au niveau théorique qu'expérimental. En mécanique des fluides, en supposant que le fluide est un milieu continu, on peut utiliser les lois classiques de conservation qui sont :

- Loi de conservation de la masse ou l'équation de continuité.
- Deuxième loi de newton (principe de conservation de quantité de mouvement) ou les équations de quantité de mouvement.
- Loi de conservation d'énergie (premier principe de la thermodynamique) ou l'équation d'énergie.

b) Equation de continuité

C'est l'équation qui exprime la loi de conservation de la masse pour un volume de contrôle matériel. Elle s'exprime mathématiquement sous la forme suivante :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}\,(\rho . V) = 0 \qquad (3.1)$$

Où :

ρ : masse volumique

V : vecteur vitesse

c) **Equation de quantité de mouvement**

Le principe de conservation de la quantité de mouvement permet d'établir les relations entre les caractéristiques du fluide lors de son mouvement et les causes qui le produisent. Il indique que le taux de variation de quantité de mouvement contenu dans le volume de contrôle est égal à la somme de toutes les forces extérieures qui lui sont appliquées. Il s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{D(\rho . V)}{Dt} = \rho . F - \text{grad}(p) + \mu \Delta V + \frac{1}{3}\mu\, \text{grad}(\text{div}(V)) \qquad (3.2)$$

F : est une force par unité de volume.

μ : est la viscosité dynamique.

d) **Equation de conservation d'énergie**

L'équation de conservation d'énergie est obtenue à partir du premier principe de la thermodynamique. Ce principe met en relation les différentes formes d'énergie, soit :

$$\frac{D(\rho.C_p.T)}{Dt} = \Delta(k.T) + q + \beta.T.\frac{Dp}{DT} + \Phi \qquad (3.4)$$

Où :

$\frac{D(\rho.C_p.T)}{Dt}$: La variation totale d'énergie (par accumulation et convection).

$\Delta(k.T)$: La variation d'énergie par conduction.

q : Puissance volumique dissipée.

$\beta.T.\frac{Dp}{DT}$: La variation d'énergie due à la compressibilité.

Φ : La dissipation irréversible due au frottement visqueux.

Les coefficients C_p, k et βsont respectivement, la capacité calorifique, la conductivité thermique et le coefficient de dilatation isobare du fluide.

3.4.2. Hypothèses Simplificatrices

Il est maintenant nécessaire d'effectuer un certain nombre d'hypothèses afin d'établir un modèle mathématique simple qui décrit la physique de ce problème, nous avons alors adopté les hypothèses suivantes :

- L'écoulement est stationnaire et bidimensionnel.
- Le fluide est Newtonien et incompressible.
- L'écoulement engendré est laminaire.
- La température (ou le flux) de la source de chaleur est constante dans le temps.
- Le transfert de chaleur par rayonnement est négligeable.
- Le travail, induit par les forces visqueuses et de pression, est négligeable.
- Les propriétés physiques du fluide sont constantes hormis la masse volumique qui obéit à l'approximation de Boussinesq dans le terme de la poussée d'Archimède.

- La puissance volumique dissipée est négligeable.
- On utilise l'approximation de Boussinesq :

$$\rho = \rho_0(1 - \beta(T - T_0)) \qquad (3.5)$$

3.4.3. Equations du Problèmes

Après introduction des hypothèses données ci-dessus, on peut établir les différentes équations nécessaires à la résolution du problème considéré dans cette étude comme suit :

a) Equation de continuité

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \qquad (3.6)$$

u et v étant les composantes du champ de vitesse V (u, v) dans la direction x et y respectivement.

b) Equations de quantité de mouvement

Suivent x :

$$u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + \vartheta(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}) \qquad (3.7)$$

Suivent-y :

$$u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} + \vartheta(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}) - g\beta(T - T_0) \qquad (3.8)$$

c) Equation de l'énergie

$$u\frac{\partial T}{\partial x} + v\frac{\partial T}{\partial y} = \alpha(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}) \qquad (3.9)$$

3.4.4. Conditions aux limites

Les équations précédentes sont résolus, à condition que l'intégration de conditions aux limites. Les conditions de températures sont connues sur les faces du capteur et la chambre de séchage. La température de la partie supérieure (vitre) constante, Un flux thermique perdu par rayonnement et par convection représenté dans la relation suivante :

$$q = \varepsilon\sigma(T_v^4 - T_c^4) + h_{cv}(T_v - T_a) \qquad (3.10)$$

La température de la partie inférieure de lame d'air (l'absorbeur) constante et un flux constant.

Les parties latérales un flux égal à zéro, la chambre de séchage est adiabatique.

Les faces extérieures on impose une condition dynamique (u, v, w).

3.4.5. Description du séchoir solaire indirect

Dans cette étude nous avons utilisé un séchoir solaire indirect à convection naturelle préalablement conçu et réalisé (travaux antérieurs) au sein du laboratoire de développement des énergies nouvelles et renouvelables en zones arides et sahariennes (LENREZA) à l'université Kasdi Merbah de Ouargla. Ce séchoir est composé de deux parties, capteur plan à air et chambre de séchage (figure 3-3).

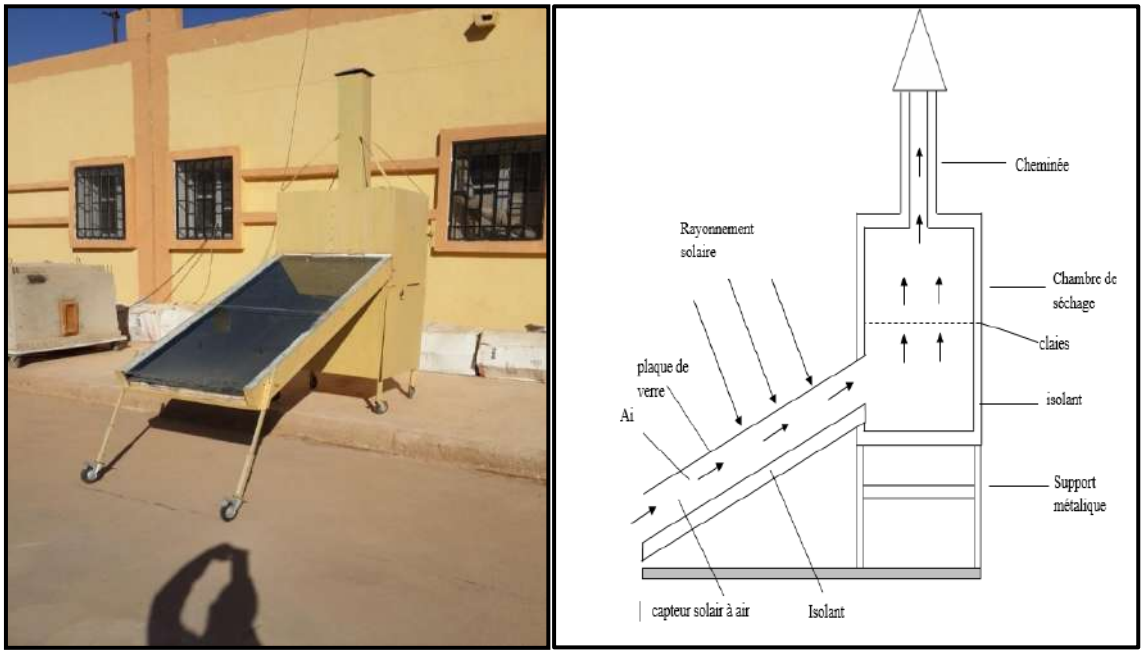


Figure (3-3) : Schéma du séchoir

- **Capteur solaire**

Le capteur solaire est un capteur plan à air, de longueur de 2m, de largeur 1m et une hauteur de 0.13m. Le capteur est recouvert d'une plaque de verre, et une lame d'air 0.06m sous laquelle est déposée une plaque d'aluminium peinte en noire mate qui sert d'absorbeur.

Les côtés latéraux et la partie inférieure sont isolés thermiquement avec du polystyrène. Le capteur est incliné d'un angle de 31° (altitude de la ville de Ouargla) par rapport au plan horizontal et orienté vers le plan sud.

- **Chambre de séchage**

La chambre de séchage est une boite galvanisée de forme cubique, de hauteur 0.8 m, de profondeur 0,8 m ; les parois latérales, et les parties inférieure et supérieure sont isolées thermiquement par du polystyrène. La chambre de séchage est munie d'une cheminée cubique fabriquée avec des feuilles galvanisées de hauteur 1m, les côtés de 0.020 m, les parties latérales sont isolées thermiquement par du polystyrène. La chambre de séchage est posée sur un support métallique, les produits sont déposés à l'intérieur de la chambre sur une claie de forme rectangulaire composée d'un cadre en métal sur lequel est fixé un grillage permettant le passage de l'air.

3.5 Méthode de travail sur logiciel

Pour aborder notre étude, nous avons commencé le traitement du cas du séchoir solaire indirect dans ses dimensions réelles (figure 3-4) et nous présentons dans ce qui suit les étapes typiques de la procédure suivie pour la mise en application du problème sur logiciel.

3.5.1 Travail sur «Gambit »



a) Géométrie

Création des points (données des dimensions des points) les dimensions sont en mètres (m).

$P_1(0; 0; 0)$ $P_5(1.714; 0.875; 0)$ $P_9(2.514; 1.03; 0)$

$P_2(0; 0.06; 0)$ $P_6(2.0715; 0.875; 0)$ $P_{10}(2.1565; 1.03; 0)$

$P_3(1.714; 1.03; 0)$ $P_7(2.1565; 0.875; 0)$ $P_{11}(2.0715; 1.03; 0)$

$P_4(1.714; 1.09; 0)$ $P_8(2.514; 0.875; 0)$ $P_{12}(2.0715; 1.09; 0)$

P_{13} (2.1565 ; 1.09 ; 0) P_{16} (2.1565 ; 1.675 ; 0) P_{17} (2.0715 ; 1.675 ; 0)

P_{14} (2.514 ; 1.09 ; 0) P_{15} (2.514 ; 1.675 ; 0) $P_{18}(1.714 ; 1.675 ; 0)$

P_{19}(2.0715 ; 2.675 ; 0) P_{20} (2.1565 ; 2.675 ; 0)

- Création des lignes (31 linge)
- Création des surfaces (11 face)

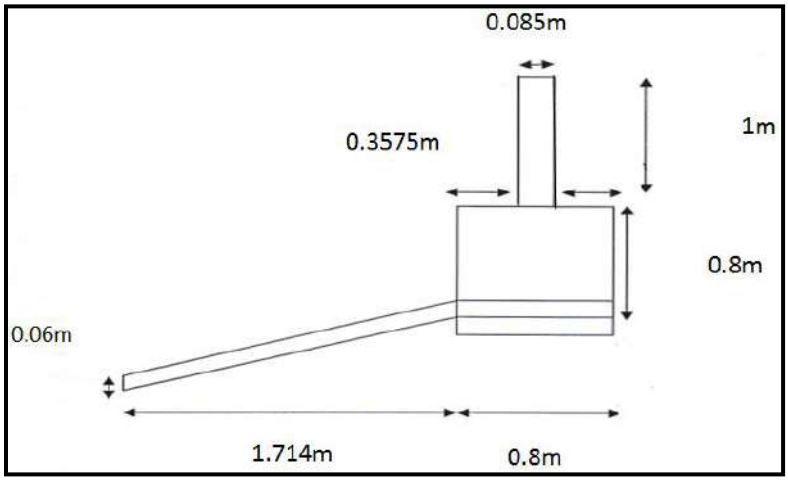


Figure (3-4) : Dimensions de séchoir a l'état réel

b) **Maillage (Mesh) :** 

- Intervalle count (On divise)

(P_1; P_2) et (P_3; P_4) et (P_{11}; P_{12}), (P_{10}; P_{13}), (P_9; P_{14}) =15

(P_1; P_3) et (P_2; P_4)=400

(P_3; P_5) et (P_{11}; P_6), (P_7; P_{10}), (P_8; P_9)=20

(P_5; P_6) et (P_7; P_8) et (P_3; P_{11}), (P_{10}; P_9), (P_4; P_{12}), (P_{13}; P_{14}), (P_{18}; P_{17})

(P_{16}; P_{15})=72

(P_4; P_{18}) et (P_{12}; P_{17}), (P_{13}; P_{16}), (P_{14}; P_{15}) =130

(P_{17}; P_{19}) et (P_{16}; P_{20})=200

(P_{17}; P_{16}) et (P_{19}; P_{20}), (P_{12}; P_{13}), (P_{11}; P_{10}), (P_6; P_7)=16

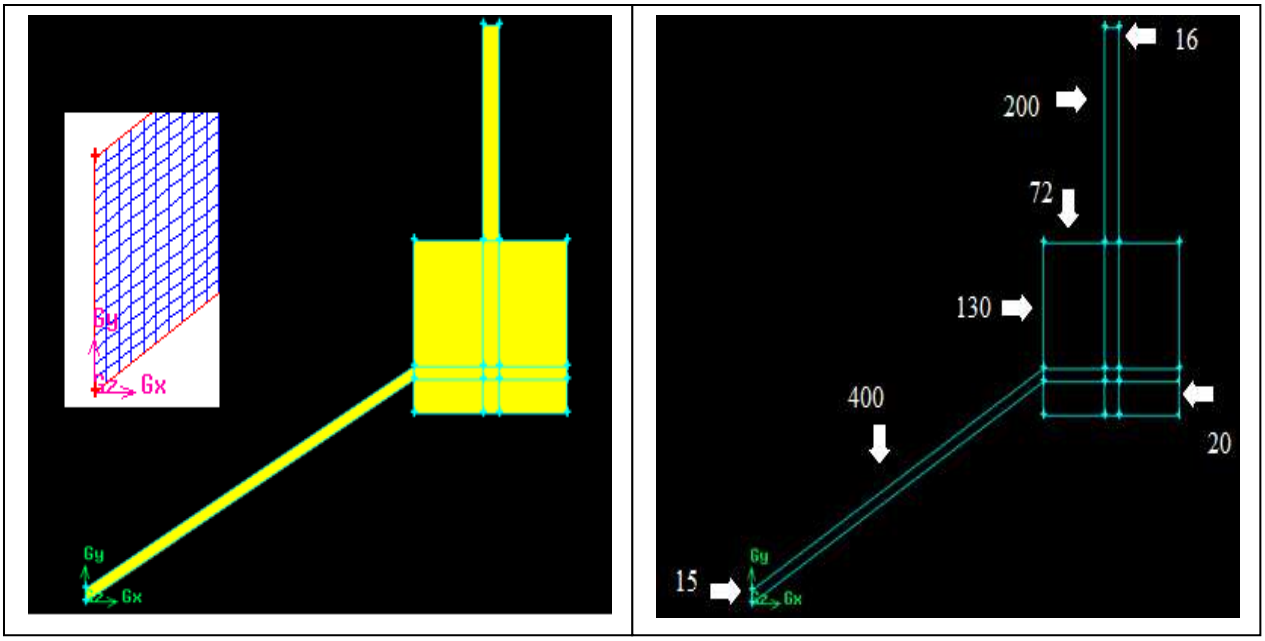


Figure (3-5) : Maillage de séchoir à partir le gambit

Remarque : La multitude des faces pour les maillages structurés est favorable pour les écoulements étudiés.

c) Condition aux limites :

[P_0,P_1] L'entrée de séchoir : la vitesse d'air.

[P_1,P_4] : vitre (type : mur) : àune température fixée.

[P_0,P_3] : L'absorbeur (type : mur)à une température fixée.

[P_{19},P_{20}] La sortie de séchoir : une pression atmosphérique à la sortie.

Le reste zones latérale sont des zones adiabatiques (type : mur).

Type de fluide (air) c'est qui s'écoule dans tous les faces.

d) Conservation de maillage

[fiIe, Save]

[file, export, Mesh] dans le disque local C.

[file, Exit, NO] pour fermer le Gambit.et fermer l'Exced.

3.5.2 Travail sur « FLUENT » :

a) **Solveur FLUENT6,3 :**

2ddp (deux dimension a double précisions [Run]

*FLUENT (2d, dp, pbns)

[File, Read, case] au disque local C. (documents and setting, DELL, ...Mesh)

[Grid, Check],[Grid, Info, Save]

b) Début des opérations :

Modèle : [Define]

- Solver : un régime laminaire pour l'écoulement de l'air.
- Energy
- Viscous

Matériaux :

- B:0.0032 [1/K](coefficient de la dilatation)
- Densité:1.2kg/m (bousineq)

Conditions opératoires:

- Un transfert de chaleur avec gravité.
- Condition aux limites

Solve :

- (controls, Solution) forc body
- (Initialize, Initialize) entre
- (monitor, Residual) print
- (iterate)

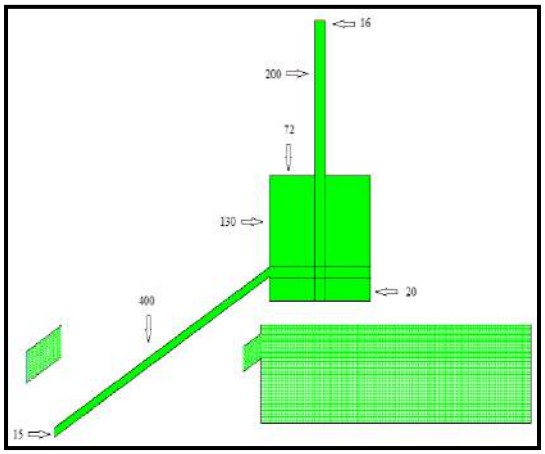


Figure (3-6) : M*aillage du séchoir adopté*

3.6 Simulation des différentes configurations du capteur aspirant

Données des conditions opératoires mesurées

Parmi les journées de collectes on a choisit des journées typiques dans des différents mois (Avril, Mais, juin, Novembre) du 28/04/2015, 04/05/2015 25/06/2011, et 02/11/2010 pour introduire les conditions aux limites suivantes, sachant que chaque deux journées sont caractérisées par un ordre de grandeur de la vitesse d'air, à l'entrée du capteur, entre faible et modérée.

Conditions aux limites des journées du travail

Tableau (3-1) : Conditions aux limites (cas du mois d'avril)

Day	$\boldsymbol{V_e}(\boldsymbol{m}/\mathrm{s})$	$\boldsymbol{T_e}(\mathrm{K})$	$\boldsymbol{T_{abs}}(\mathrm{K})$	$\boldsymbol{T_v}(\mathrm{K})$	$\boldsymbol{T_s}(\mathrm{K})$
28 Avril	0.8	313.41	376.28	346.86	345.86
04 Mais	0.8	311.82	375.84	347.56	354.88
25 juin	0.16	318	342	337.3	335
02 Novembre	0.17	304.3	354.1	328.8	322.5

3.6.1 Simulation numérique du capteur à l'état réel

Afin d'avoir l'influence des diverses conditions climatiques sur le comportement thermique du séchoir (capteur et chambre). Les résultats de la simulation à l'état réel sont présentés dans la figure (3-7). Cette figure illustre les données numériques de la distribution des températures dans la chambre de séchage. Nous pouvons, dans ce cas distinguer deux situations, d'abord pendant les jours où la vitesse de l'air à l'entrée de capteur est assez élevée, le phénomène de stratification de la température est très clair sur la figure (3-7A), d'autre part sur la figure (3-7 B) pour les conditions climatiques avec une faible vitesse de l'air à l'entrée, nous montre une stratification de la température mais qui est moins intense par la comparaison avec l'autre résultat.

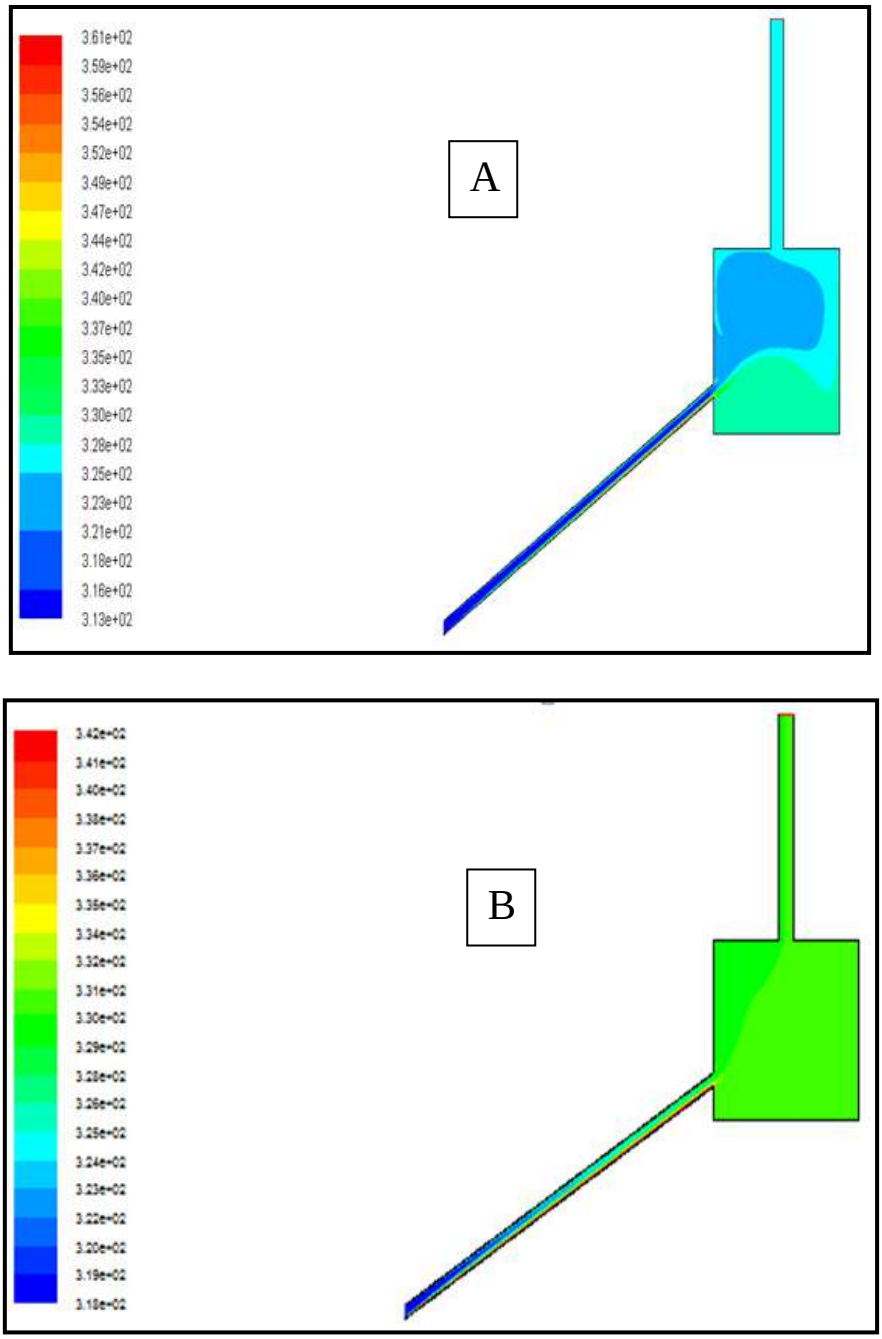


Figure (3-7): Résultats de simulation du capteur à l'état réel

3.6.2 Simulation des propositions de modification

Dans cette partie nous allons procédé au changement de la forme du séchoir en apportant des modifications sur la longueur et la largeur du capteur ; ce changement touchera :

1. Longueur du capteur (4m) largeur maintenue (1m) ⟶ Prototype II
2. Longueur du capteur (6m) largeur maintenue (1m) ⟶ Prototype III

3. Largeur du capteur (1.5m) longueur maintenue (2m) ⟶ Prototype VI
4. Largeur du capteur (2m) longueur maintenue (2m) ⟶ Prototype VI

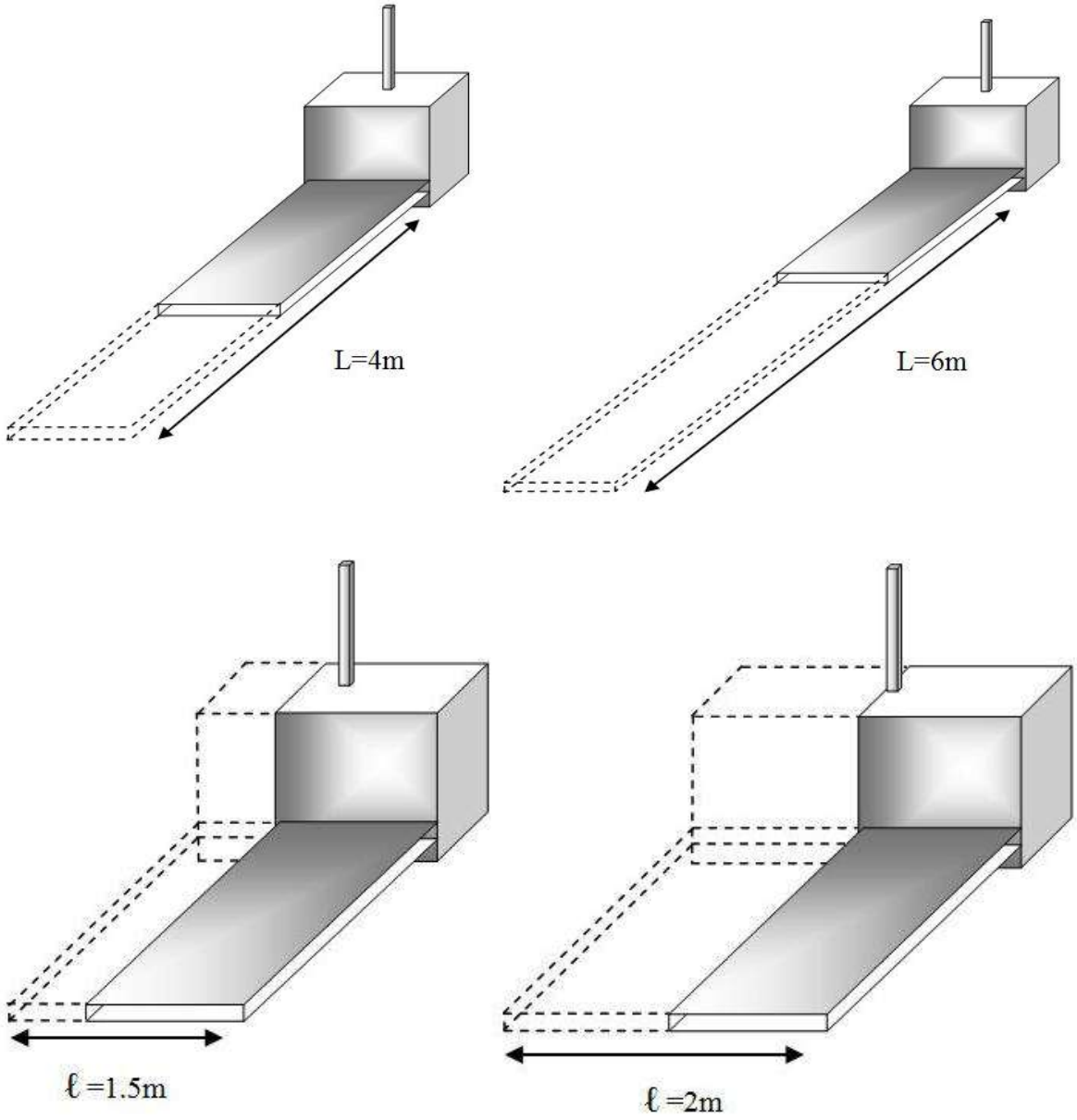


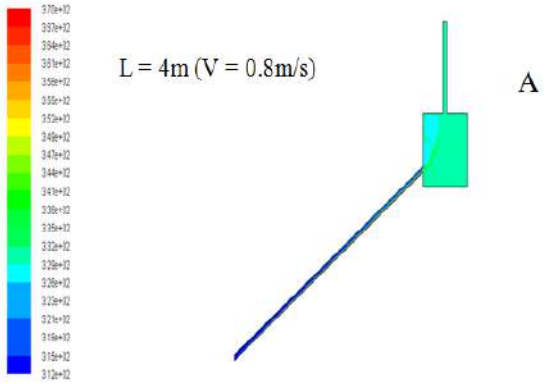
Figure (3-8): Variation de la longueur et de la largeur du capteur

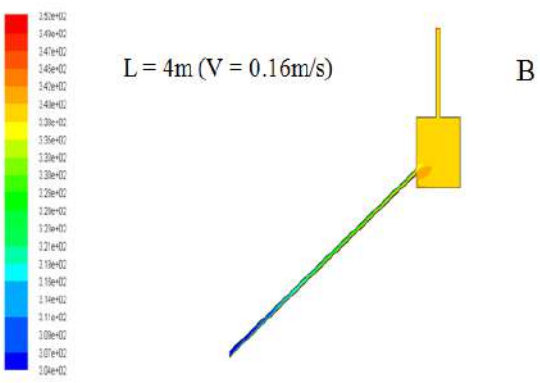
La figure (3-9) donne les résultats de simulation des changements de longueur et largeur du capteur qui montrent l'effet des différentes longueurs (4m et 6m) et largeurs (1,5m et 2m) sur la distribution de la température et de sa homogénéité dans la chambre de séchage.

Au début, les résultats numériques de simulation de la modification de longueur de capteur (4 et 6 m), nous donnent plus d'homogénéité de distribution de la température dans la chambre par la comparaison avec les résultats de l'état réel où la longueur du capteur est 2m, mis à part un petit écart de température au niveau des cotés Sud et Est. D'autre part nous

notons une réduction de l'effet négatif de la vitesse de l'air à l'entrée sur la température de séchage dans la chambre qui se montre élevée comparée avec l'état réel, et une bonne influence de la faible vitesse sur l'augmentation de la température dans la chambre.

D'autre part, concernant les modifications de la largeur du capteur on observe pour la largeur ℓ = 1,5m que les résultats de simulation, nous donnent une température à la sortie de capteur un peut élevée par comparaison avec celle à l'état réel, dans les mêmes conditions climatiques, à un écart de température à la sortie entre les deux cas (réel et modifié) de 9 K , ce qui peut être expliqué par le fait que la modification de la largeur augmente la surface d'échange de la plaque absorbante et le débit d'air, d'autre part concernant la distribution de la température dans la chambre de séchage reste non homogène sous l'effet de la vitesse a l'entrée élevée. Par ailleurs, pour la journée du mois de Novembre, nous avons obtenu une bonne homogénéité de distribution de température dans la chambre de séchage grâce à la faible vitesse à l'entrée du capteur, à la suite pour ℓ = 2m, les résultats de simulation nous montrent que cette augmentation de largeur donne un bon effet sur l'homogénéité de température dans la chambre de séchage et diminue l'influence négative de la vitesse de l'air à l'entrée du capteur aussi, puisque cette vitesse peut être considérée minime devant cette largeur. D'autre part la température de l'air à la sortie du capteur reste élevée similairement à l'état de ℓ=1, 5m et ℓ=2m de 326, 33 K par rapport à l'état réel de L=1m de Tsortie=317°K.





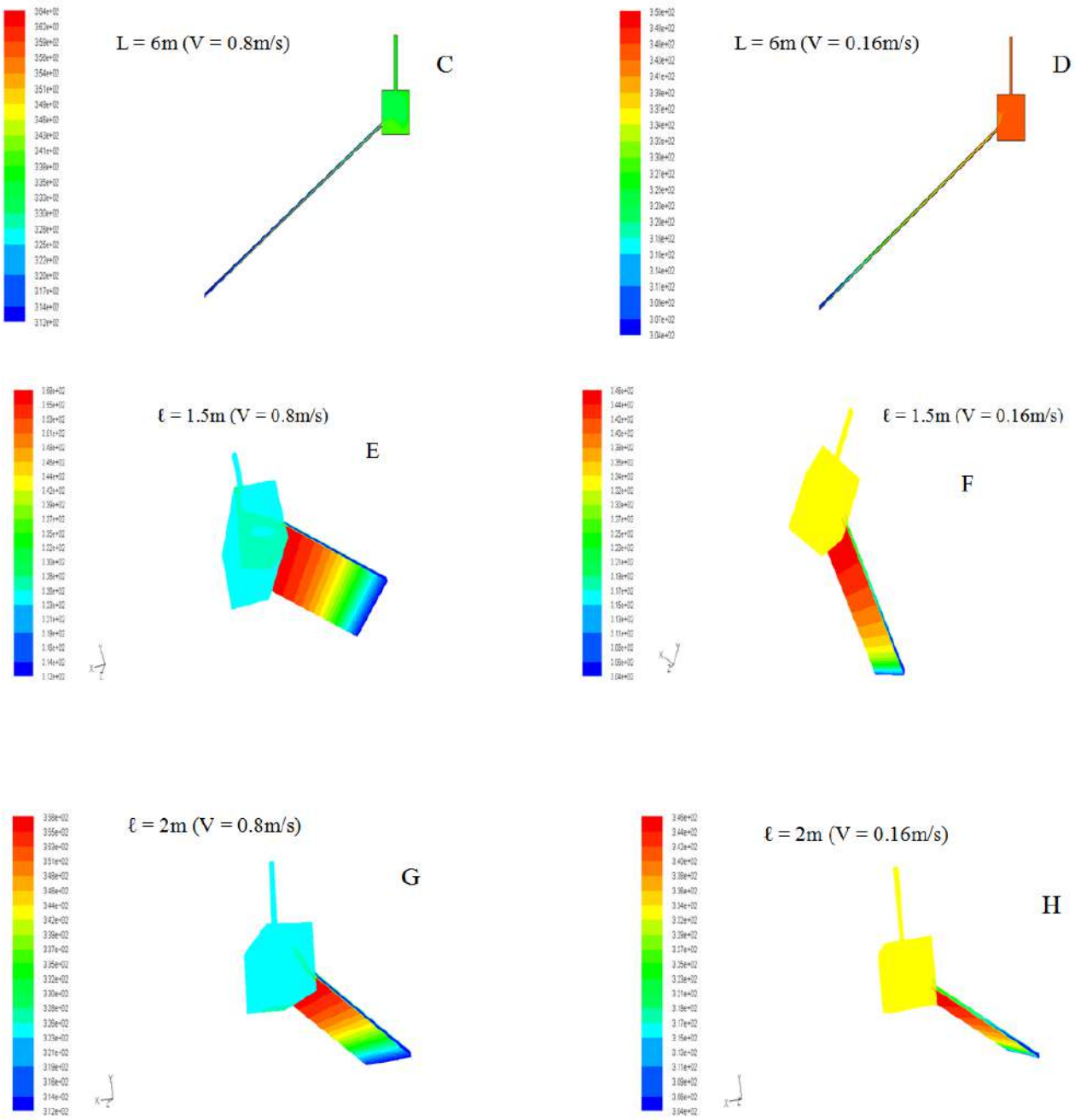


Figure (3-9) : Résultats de la simulation après modifications de la longueur et de la larguer du capteur

3.7 Simulation des différentes configurations du capteur évacuant

Pour aborder cette partie de l'étude, nous avons commencé par le traitement du cas du séchoir solaire indirect dans son état réel. Nous avons commencé par simuler les champs dynamique et thermique de la cheminée ordinaire en considérant la géométrie et les

dimensions réelles du séchoir. Quelques modifications ont été ensuite considérées sur la cheminée du séchoir de laboratoire illustré au début de ce chapitre sur la figure (3-3). D'autre part nous avons exposé une simulation détaillée sur la cheminée solaire dans les dimensions initiales puis des modifications pour obtenir le meilleur cas où la ventilation soit convenable avec l'homogénéité de distribution de température au sein de la chambre de séchage et la qualité du produit éventuel à sécher.

3.7.1 Données des conditions opératoires mesurées

Les relevés des deux journées typiques dans deux mois différents : le 28 avril et le 25 juin, ont été choisis pour définir les conditions limites à introduire dans les calculs de simulation. Ces conditions sont données sur le tableau (3-2) ci-dessous. Notons que la particularité réside dans le fait que la vitesse à l'entrée du capteur diffère en valeur, faible et moyenne vitesse.

Tableau (3-2) : Conditions aux limites

Journée	V_e (m/s)	T_e (K)	T_{abs} (K)	T_v (K)	T_s (K)
Avril	0.8	313.41	376.28	346.86	345.86
Juin	0.16	318	342	337.3	335

3.7.2 Simulation numérique de la cheminée ordinaire

a) Validation numérique à l'état réel

Les résultats numériques de la distribution des températures au sein de la chambre de séchage et la cheminée donnent des valeurs proches de l'expérience avec une différence de température de 2 à 3°C, probablement due aux instabilités des conditions climatiques. On remarque pour le cas de la journée du mois d'Avril que la température est élevée à l'intérieur de la chambre (323K à 336K) et la distribution de température dans la chambre est presque homogène sauf l'exception du côté gauche de la chambre et la cheminée (figure 3-10) ; ceci est dû à l'influence de la vitesse de l'air, relativement élevée, à l'entrée du capteur (0.8m/s). Par ailleurs pour le cas de la journée du mois de Juin où la température est complètement homogène à la valeur de 329K à part un petit écart de température sur les deux côtés de la cheminée (figure 3-11). Ceci explique l'influence de la vitesse de l'air sur l'homogénéité et la diminution de la température à l'intérieur de la chambre de séchage.

Tableau (3-3) : Températures mesurées (mois d'avril)

T_{ch1}	T_{ch1}	T_{ch1}	dans la chambre
334,8	335,1	334,4	Avril

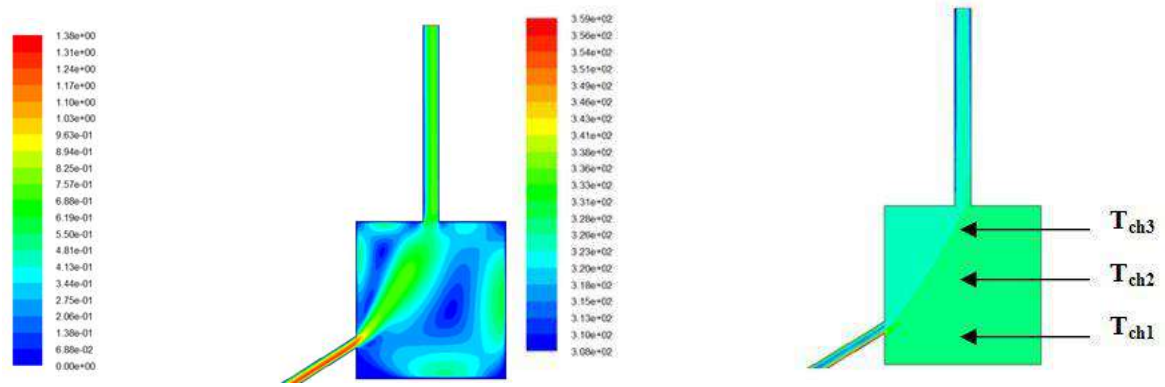


Figure (3-10) : Distribution de vitesse et de température dans la chambre de séchage pour la journée du mois d'avril

Tableau (3-4) : Températures mesurées (mois de juin)

T_{ch1}	T_{ch1}	T_{ch1}	dans la chambre
331	330.7	330.7	Juin

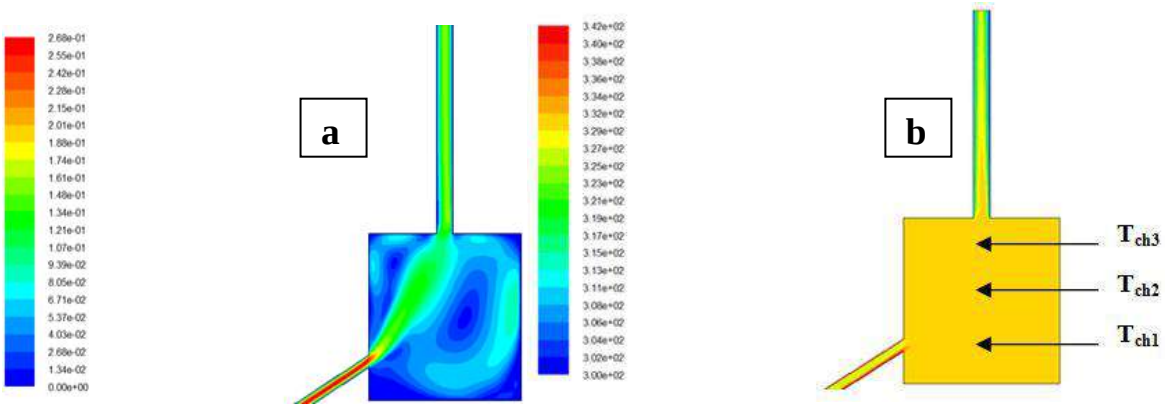


Figure (3-11) : Distributions de vitesse et de température dans la chambre de séchage pour la journée du mois de juin

b) Simulation de la cheminée ordinaire modifiée

Dans la suite de ce travail nous avons modifié la forme du séchoir en modifiant la longueur, la largeur, l'angle de convergence de la cheminée. L'ensemble des modifications est résumé sur le tableau (3-5).

Tableau (3-5): Modifications de la cheminée ordinaire

Paramètres	**Symboles et valeurs**	**Conception**
Longueur de cheminée	L=1,5m	***C1***
Angle de convergence et largeur de cheminée	α=45°, ℓ=0,16m	***C2***
positionnement de cheminée (gauche)	gauche	***C3***
Positionnement de cheminée (droite)	droite	***C4***

On note ici que dans la suite de cette présentation et discussion des résultats, on se restreint à exposer les résultats correspondants à la journée typique du mois d'avril.

b.1 Effet de la variation de la Longueur (conception C1)

Dans ce premier cas nous avons modifié la longueur de la cheminée, les autres paramètres étant maintenus aux valeurs initiales, comme c'est donné sur le tableau (3-6).

Tableau (3-6): Les paramètres du premier cas de modification

Paramètres	Valeurs initiales	Valeurs modifiées
Longueur : L (m)	1.000	1.500
Largeur :l (m)	0.085	*
Angle coude : α	90°	*

Les résultats de la simulation numérique de la modification de la longueur de cheminée à 1.5m, donnent plus d'homogénéité de distribution de température à l'intérieur de la chambre par comparaison avec les résultats de l'état réel où la longueur de cheminée était de 1m (figure 3-12). Nous remarquons une diminution de l'effet négatif de la vitesse élevée d'entrée

sur la température de la chambre de séchage qui est constatée à l'état réel dans le même mois. Ce résultat confirme l'influence de la longueur de la cheminée 1.5m sur la distribution des températures.

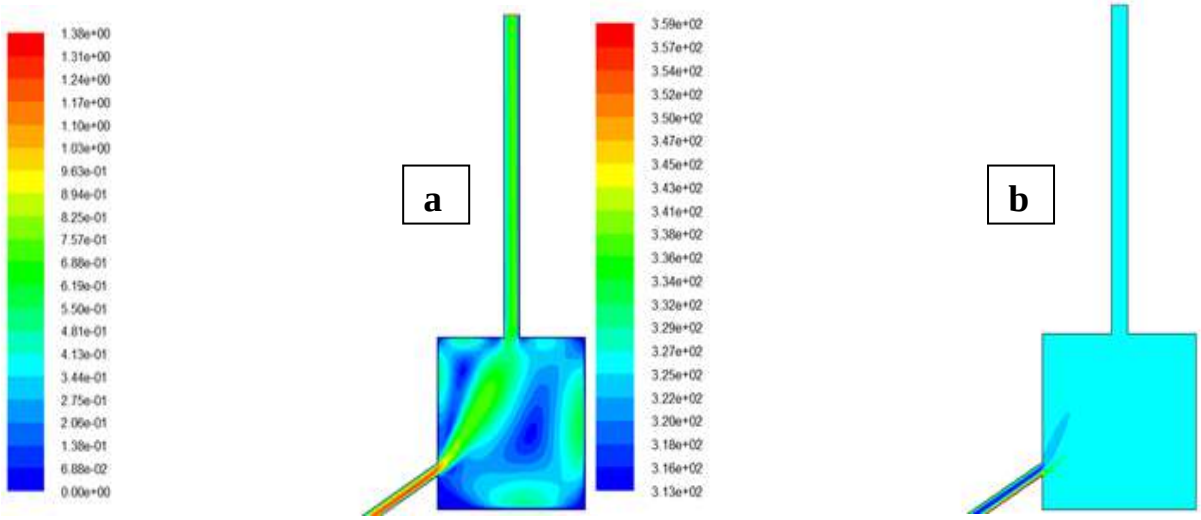


Figure (3-12): Distributions de vitesse et de température dans la chambre de séchage pour la conception ***C1***

b.2 Effet de la variation de l'angle de convergence (Conception C2)

Dans cette partie d'étude nous avons modifié la largeur et l'angle de la cheminée, toutefois la hauteur de la cheminé est maintenu à sa valeur initiale comme il est mentionné dans le tableau (3-7).

Tableau (3-7): Les paramètres du 2ème cas de modification

Paramètres	Valeurs initiales	Valeurs modifiées
Longueur : *L* (m)	1.000	*
Largeur : *l* (m)	0.085	0.16
Angle coude : α	90°	45°

Dans ce cas d'application nous avons adopté une forme optimale selon une étude faite sur le même prototype de séchage [43], (angle de convergence de la cheminée α =45°). Nous pouvons voir que l'homogénéité de distribution de la température dans la chambre et la cheminée est convenable par comparaison aux résultats à l'état réel et à l'état de cheminée en cas de conception ***C1***.Cela explique que cette forme de cheminée a permis d'éviter les zones d'accumulation des températures et simplifier la circulation et l'évacuation de l'air vers la cheminée. D'autre part nous avons remarqué plus de baisse de la température (320K) grâce à l'influence de la vitesse relativement élevée de l'air à l'entrée du capteur.

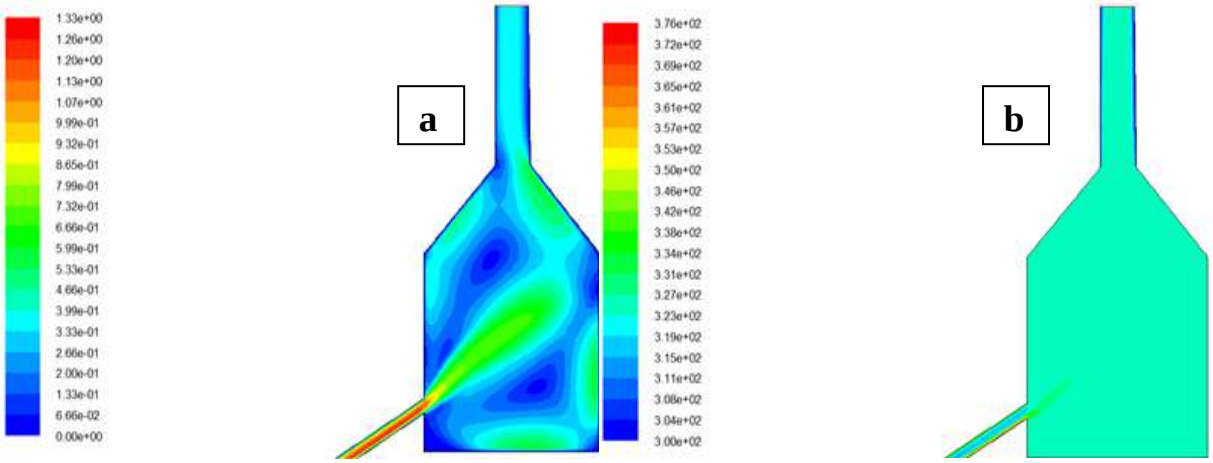


Figure (3-13) : Distributions de vitesse et de température dans la chambre de séchage pour la conception ***C2***

b.3 Effet du positionnement de la cheminée (gauche et droite)

b.3.1 Cheminée à gauche (ConceptionC3)

Dans cette partie d'étude la cheminé est positionnée à gauche. Toutefois les autres paramètres étant maintenus aux valeurs initiales comme le mentionne le tableau (3-8).

Tableau (3-8): Les paramètres du 3ème cas de modification

Paramètres	Valeurs initiales	Valeurs modifiées
Longueur : *L* (m)	1.000	*
Largeur : *l* (m)	0.085	*
Angle coude : α	90°	*

Les résultats de la simulation numérique de la cheminée positionnée à gauche de la chambre, montrent une meilleure homogénéité de distribution de la température à l'intérieur de la chambre par comparaison aux résultats de l'état réel. On remarque alors une température de 322K. Cette diminution de température peut être expliquée par l'effet négatif de la vitesse de l'air dans ce positionnement de la cheminée.

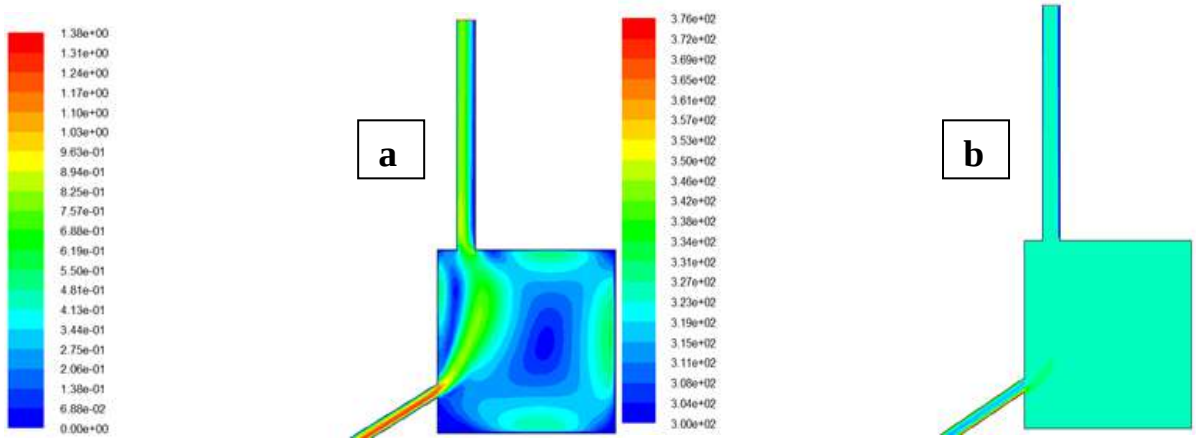


Figure (3-14) : Distributions de vitesse et de température dans la chambre de séchage pour la conception C3

b.3.2 Cheminée élargie positionnée à droite (Conception C4)

Dans cette partie d'étude la cheminé est élargie en gardant sa position réelle à droite et les autres paramètres étant maintenus aux valeurs initiales comme le mentionne le tableau (3-9).

Tableau (3-9) : Les paramètres du 4ème cas de modification

Paramètres	Valeurs initiales	Valeurs modifiées
Longueur : *L* (m)	1.000	*
Largeur : *l* (m)	0.085	0.16
Angle coude : α	90°	*

Dans ce cas la simulation de la cheminée élargie à 0,16m de coté et positionnée sur le côté droit, a montré une température dans la chambre relativement faible par comparaison avec celle à l'état réel dans les mêmes conditions climatiques ; avec un écart de 2°C entre les deux cas (réel et modifié). L'homogénéité de distribution de la température dans la chambre est vérifiée sauf à côté de la cheminée où on observe un écart de 5°C et 7°C, ce qui peut être expliqué par le fait que la modification de position et la largeur de la cheminée diminue la température et affecte l'homogénéité de distribution de la température dans la chambre malgré la vitesse de l'air plus grande.

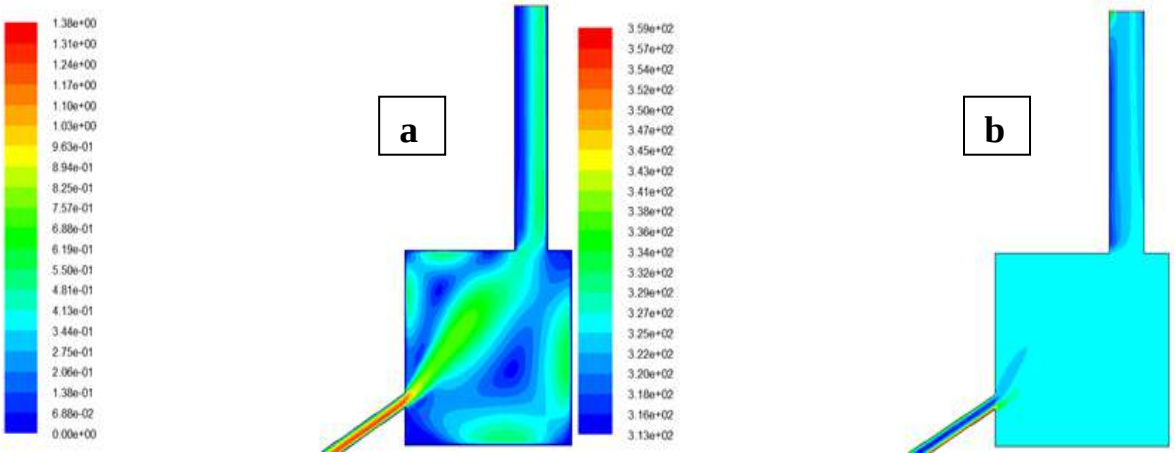


*Figure (3-15): Distributions de vitesse et de température dans la chambre de séchage pour la conception **C4***

3.7.3 Simulation de la cheminée solaire

Dans cette partie nous avons considéré une cheminée dotée d'un vitrage et une plaque absorbante soit une configuration connue sous l'appellation de cheminée solaire. Nous avons alors choisi de simuler cette cheminée avec les meilleures configurations obtenues dans le cas d'étude précédente où la ventilation du séchoir était assurée par une cheminée ordinaire [44]. Le tableau 10 résume les configurations testées numériquement.

Tableau (3-10) : Configurations testées pour le cas de la cheminé solaire

Paramètres	Symboles et valeurs	Conception
Positionnement de cheminée solaire à gauche	Gauche et ℓ=0,16m	***CS1***
Positionnement de cheminée solaire à droite	Droite et ℓ=0,16m	***CS2***

a) Positionnement de la cheminée solaire à gauche (ℓ =0.16m) (ConceptionCS1).

La simulation des transferts thermiques dans la cheminée solaire élargie a donné une meilleure homogénéité comparée (figure 3-16) au même cas avec la cheminée ordinaire. Ce qui prouve un effet cumulé positif de cette configuration

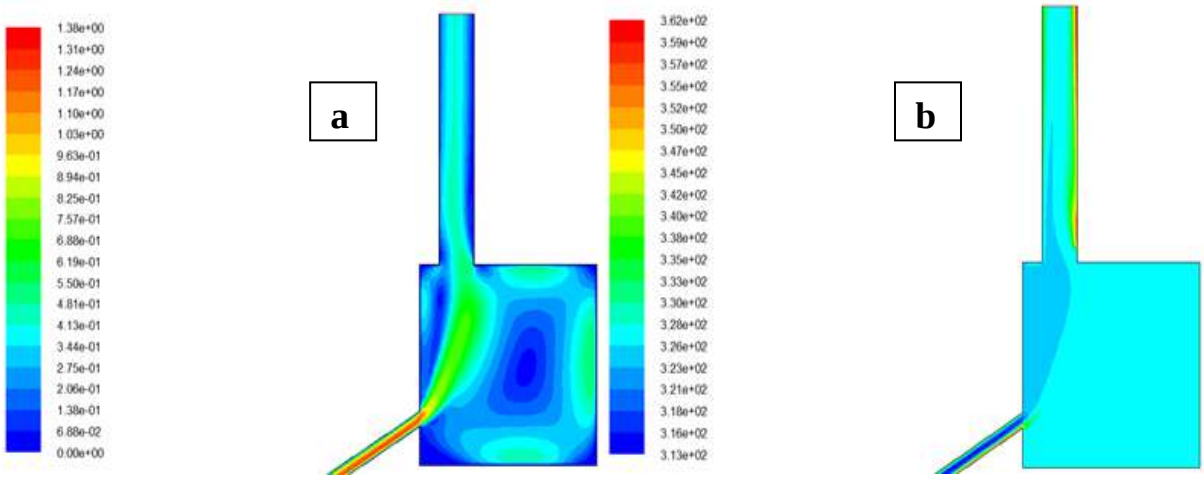


Figure (3-16) : Distributions de vitesse et de température dans la chambre de séchage pour la cheminée solaire CS1

b) Positionnement de la Cheminée solaire à droite (ℓ =0.16m) (Conception CS2).

La modification de la largeur et la position de la cheminé solaire au côté droit a entrainé moins d'homogénéité de la distribution de température à l'intérieur de la chambre. Une augmentation est remarquée en température (325K) avec l'accumulation à l'intérieur de la chambre avec une distribution relativement homogène.

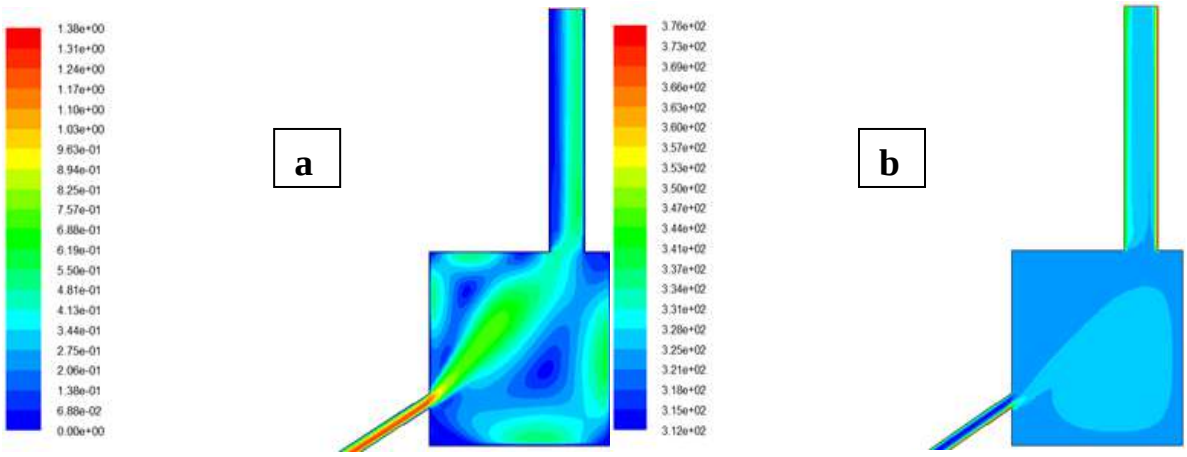


Figure (3-17): Distributions de vitesse (a), et de température (b) dans la chambre de séchage pour la cheminée solaire CS2

3.8 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons considéré un capteur réellement conçu au laboratoire LENREZA, celui-ci a été ensuite modifié pour les simulations suivantes. L'effet des modifications apportées sur la configuration géométrique a été alors étudié et discuté. Les modifications de la forme géométrique du capteur solaire consistaient à limiter ou minimiser les points d'accumulation de température au sein de la chambre (stratification thermique) avec un choix judicieux des composants des capteurs. Les résultats obtenus des différentes simulations nous ont montré que dans le cas de conception réelle initiale, pour les différentes journées, la distribution des températures dans la chambre de séchage est peu homogène et l'écart de température entre l'entrée et la sortie du capteur est sensiblement faible en cas de vitesse d'entrée élevée (vent). Par ailleurs en cas de faible vitesse d'air à l'entrée du capteur, la distribution des températures au sein de la chambre de séchage est presque homogène et même l'écart de température entrée/sortie du capteur est important. Suite aux modifications proposées sur la géométrie du capteur (longueur/largeur) dans les deux jours typiques de Mai et Novembre (forte et faible vitesse de l'air entrant) par ordre, on peut dire que le prototype avec une longueur de 4m et une largeur de 2m donne une bonne influence sur la distribution des températures dans la chambre spécialement pour les jours ayants une haute vitesse à l'entrée du capteur. Les résultats de simulation numérique obtenus à partir des différentes catégories de capteurs solaires considérés (longueur et largeur) permettent de conclure que les modifications de la géométrie nous donnent une vision d'un choix meilleur de séchoir solaire à partir des facteurs importants de la forme.

L'étude a concerné une cheminée ordinaire assujettie à différentes modifications. Les résultats ainsi obtenus ont ressorti la cheminée de longueur 1,5m placée au coté droit de la face est du séchoir comme étant le cas préféré en termes d'homogénéisation du champ de température dans la chambre de séchage. Dans un second lieu les mêmes simulations ont été reconduites utilisant une cheminée solaire. Il a été remarqué à chaque fois l'impact de l'extraction de l'air par cette technique sur le comportement du séchoir et la meilleure configuration retenue correspondait alors à une cheminée solaire de longueur 1,5m mais placée au coté gauche de la face est du système de séchage.

Chapitre 4

Effets des améliorations conceptuelles des capteurs solaires sur les performances d'un séchoir solaire indirect

Partie I : Amélioration du Capteur solaire plan par intégration des matériaux à changement de phase

4.1 Introduction

Le Stockage de l'énergie thermique (TES: Thermal Energy Storage) en général, et les matériaux à changement de phase (MCP) en particulier, ont fait un sujet principal dans la recherche au cours des 20 dernières années. L'intérêt international pour stockage thermique de l'énergie est justifié par le fait qu'il traite de l'économie d'énergie, l'utilisation efficace et rationnelle des ressources disponibles et l'utilisation optimale des énergies renouvelables. Dans ce cadre, le TES fournit des solutions dans des domaines très spécifiques:

- Le temps de retard et la puissance disponible entre la production ou la disponibilité de l'énergie et sa consommation dans les systèmes de réception (de l'énergie solaire, cogénération, etc.)
- Sécurité de l'approvisionnement énergétique (hôpitaux, centres informatiques, etc.)
- L'inertie thermique et une protection thermique. [74]

4.2 Généralités sur Matériaux à changement de phase MCP

4.2.1 Stockage thermique

Le stockage de l'énergie thermique permet à la chaleur d'être utilisée en différé. La chaleur peut être stockée sous plusieurs formes:

- La chaleur sensible : stockage dans des matériaux inertes
- La chaleur latente : utilisation de matériaux à changement de phase qui emmagasinent l'énergie à mesure qu'ils changent de phase.
- La chaleur des réactions : thermochimie et absorption [75].

4.2.2 Les matériaux à changement de phase (MCP):

Les matériaux à changement de phase (en anglais PCM : Phase Change Material) ont pour particularité de pouvoir stocker de l'énergie sous forme de chaleur latente. La chaleur étant absorbée ou restituée lors du passage de l'état solide à l'état liquide et vice versa.

Les Matériaux à Changement de Phase, appelés communément « MCP » sont des matériaux intelligents qui reposent sur l'application d'un principe physique simple : ils se liquéfient en absorbant de l'énergie à partir d'une certaine température caractéristique pour chaque type de matériau (en général fixée par leur formulation) et restituent cette énergie lorsque la température de leur environnement est inférieure à celle-ci [76].

On peut classer les MCP selon leur nature chimique en trois grandes catégories:

- Les MCP organiques: paraffines, corps non-paraffiniques, polyacools.
- Les MCP inorganique: hydrates salins, sels, métaux, alliages.
- Les MCP eutectiques: Composés organique-organique, organique-inorganique, inorganique-inorganique [77].

Les matériaux à changement de phase sont utilisés dans différents domaines : le stockage d'énergie solaire, le refroidissement des boîtes de transport de produits sensibles, les systèmes de mémoires permanentes en informatique, les systèmes de climatisation (liquide frigorigènes), l'industrie textile (par exemple les vêtements) ainsi que dans le domaine de la construction des bâtiments où ils sont utilisés dans les systèmes passifs et actifs [78].

4.2.3 Critère de sélection d'un bon MCP

La sélection d'un MCP nécessite de se poser les bonnes questions quant à l'application et l'implantation du système de stockage futur. Une réflexion et analyse autour de la densité de stockage souhaitée, des puissances de charge et de décharge mais aussi des critères économiques et environnementaux sont à entreprendre pour sélectionner le meilleur MCP. Plusieurs méthodes ont été proposées par différents auteurs afin de choisir au mieux un matériau pour une application spécifique [79-80].

- ✓ Propriétés thermo-physiques
- ✓ Les propriétés thermiques
- ✓ Les propriétés physiques
- ✓ Propriétés cinétiques et chimiques

4.2.4 Types de MCP

En 1983, Abhat [81] a donné une classification générale des matériaux, utilisée depuis par la communauté scientifique du stockage latent. Cette classification est illustrée sur la Figure (4.1)



Figure (4-1) : Classification des MCP proposée par Abhat [81]

Les différents sous-groupes de MCP présentent des propriétés thermiques et chimiques très différentes qui affectent significativement la conception du système de stockage thermique pour une application donnée.

Le choix de la capsule dépend essentiellement de l'application envisagée. Les capsules flexibles en plastique ont été développées pour les applications à basse température. Pour les applications à plus haute température, les capsules en métal (acier, cuivre, aluminium), plus robustes, sont préférées. La rigidité des capsules en métal rend la gestion de la pression à l'intérieur plus compliquée à cause de l'expansion volumique du MCP lors de la fusion. Dans ce cas, environ 20 % du volume de la capsule est laissé vide pour permettre au MCP de fondre sans générer de surpressions et ainsi limiter les risques de fuites [81]. Une publication plus récente propose cependant une nouvelle technique d'encapsulation pour limiter la part de vide nécessaire à l'expansion volumique [82].

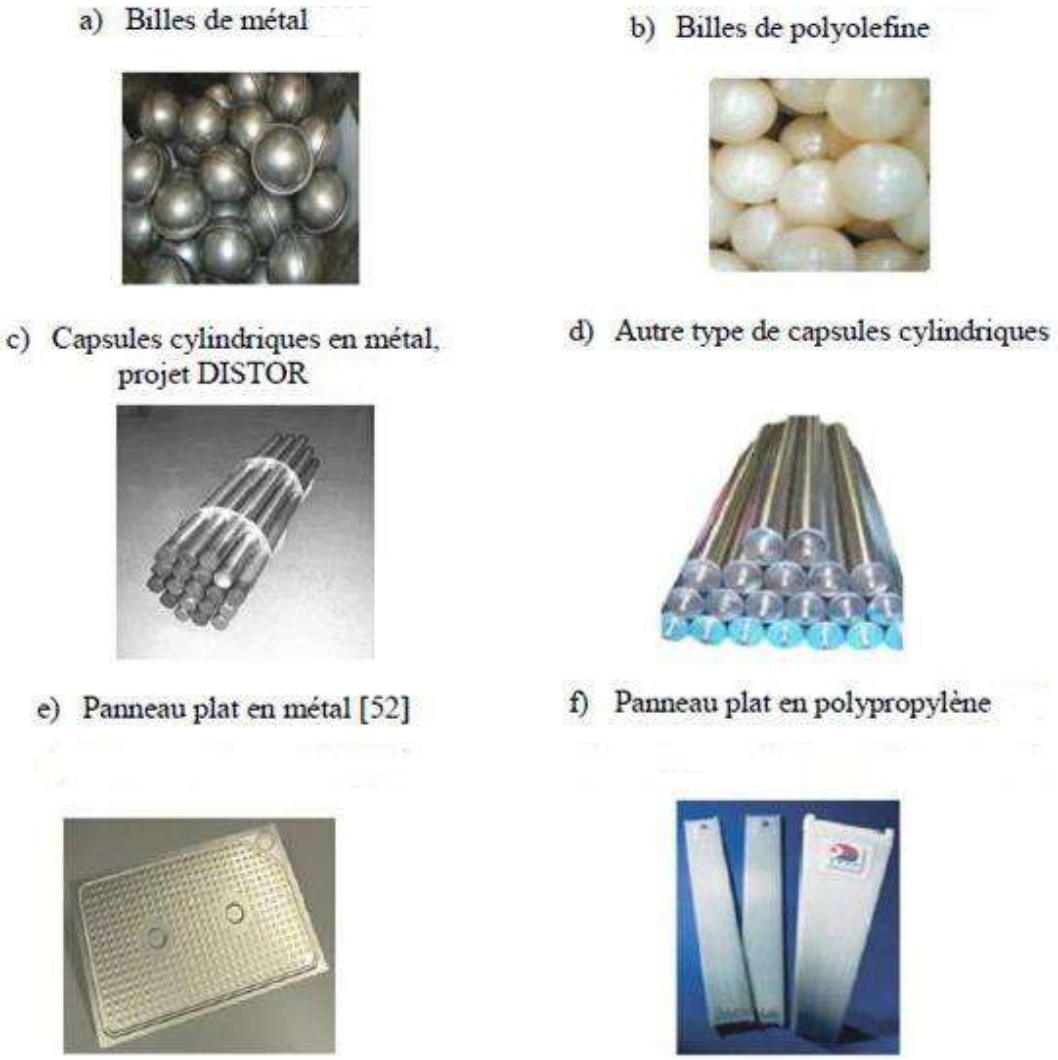


Figure (4-2): Différentes géométries utilisées pour la macro-encapsulation [75]

4.2.5 Différentes formes des matériaux à changement de phase

Il doit y avoir un échange de chaleur efficace entre le MCP et le fluide caloporteur afin d'avoir un grand aller-retour pour l'efficacité du stockage d'énergie. Par conséquent, les MCP sont généralement contenus de manière à assurer une grande surface de transfert de chaleur et donc un coefficient de transfert de chaleur par convection élevé entre le Pack MCP et le fluide caloporteur. La figure. (4.2.a) présente une coquille d'un MCP récipient avec le fluide caloporteur dans un tube. La Figure (4.2.b) présente un récipient de MCP cylindrique avec fluide caloporteur écoulant autour et la Figure (4.2.c) montre un récipient plaque de MCP rectangulaire tel que le fluide caloporteur peut circuler autour [83]

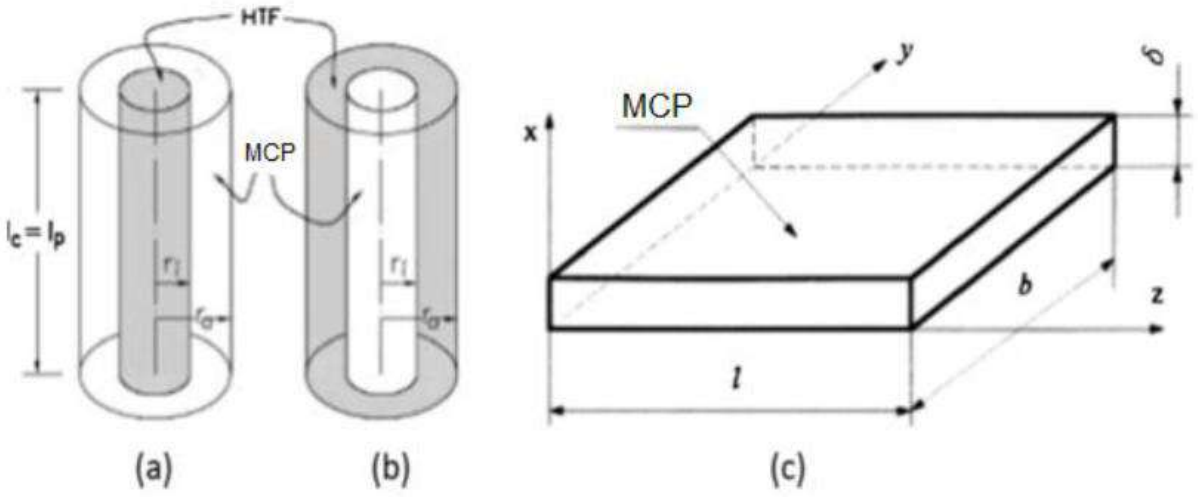


Figure (4-3) : Conteneurs de MCP et la configuration du MCP. (a) coquille et le récipient de tube; (b) récipient cylindrique; (c) contenant rectangulaire [83]

4.3 Simulation du capteur solaire sans intégration de matériaux à changement de phase

4.3.1 Hypothèses simplificatrices

La formulation du problème étudié est basée sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, hypothèses liées à la géométrie, au type d'écoulement, aux mécanismes de transferts et aux problèmes de changement de phase. Afin de permettre une résolution simple et réaliste, nous avons considéré les hypothèses suivantes :

- Ecoulement bidimensionnel et incompressible.
- L'écoulement instationnaire en régime laminaire.
- Fluide visqueux newtonien.
- Les propriétés thermo-physiques du fluide (C_{pf}, λ_f , μ_f) et du solide (C_{ps},ρ_s, λ_s , μ_s) sont considérées constantes.
- Les variations du volume dues au changement de phase sont négligeables.
- Les propriétés physiques sont les mêmes dans les deux phases pour le MCP.
- On utilise d'autre part l'approximation de Boussinesq.

$$\rho = \rho_0(1 - \beta(T - T_0)) \tag{4.1}$$

4.3.2 Equations dimensionnelles gouvernantes

a) Equation de continuité

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{4.2}$$

b) Equations de quantité de mouvement

Suivant x :

$$u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial p}{\partial x} + v\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) - g\beta(T - T_C)cos\theta \tag{4.3}$$

Suivant y :

$$u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial p}{\partial y} + v\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) - g\beta(T - T_C)sin\theta \tag{4.4}$$

c) Equation de l'énergie

$$u\frac{\partial T}{\partial x} + v\frac{\partial T}{\partial y} = a\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \tag{4.5}$$

4.3.3 Conditions initiales et aux limites

a) Conditions initiales

Initialement, l'air est supposé au repos à la température ambiante.

$$\text{à } t = 0 \qquad \begin{cases} u(0,y,0) = u_{int}.cos\theta \\ v(0,y,0) = u_{int}.sin\theta \\ T = Ta \end{cases}$$

b) Conditions aux limites :

b.1 Aux frontières des parois :

Sur la paroi supérieure :

À 0 ≤ x ≤ L, y = H

$$-\lambda_v\frac{dT}{dy} = h_a(T(x,H,t) - T_a) + \varepsilon\sigma(T^4(x,H,t) - T_s^4) + I \tag{4.6}$$

La température du ciel est donnée par la formule de Swinbank [101] :

$$T_s = 0{,}0552.T_a^{1,5} \tag{4.7}$$

Le coefficient de convection avec l'extérieur est calculé selon Mac Adams par la corrélation suivante [103] :

$$h_a = 5{,}7 + 3{,}8V_{vent} \tag{4.8}$$

À x=0 et x=L, Hi+Ha+H1 ≤ y ≤ H(faces latérales de la vitre)

$$-\lambda_v \frac{dT}{dy} = h_a(T_v(t) - T_a) \tag{4.9}$$

À x=0 et x=L, Hi ≤ y ≤ Hi+Ha(faces latérales de l'absorbeur)

$$-\lambda_a \frac{dT}{dy} = h_a(T_{a'}(t) - T_a) \tag{4.10}$$

À x=0 et x=L, 0 ≤ y ≤ Hi(faces latérales de l'isolant)

$$-\lambda_i \frac{dT}{dy} = h_a(T_i(t) - T_a) \tag{4.11}$$

À 0 ≤ x ≤ L, y=0(face inférieure de l'isolant)

$$-\lambda_i \frac{dT}{dx} = h_a(T_i(t) - T_a) \tag{4.12}$$

b.2 Dans le cas d'utilisation de MCP :

À x=0 et x=L, Hi ≤ y ≤ Hi+H_{mcp} (faces latérales de la couche MCP)

$$-\lambda_a \frac{dT}{dy} = h_a\left(T_{mcp}(t) - T_a\right) \tag{4.13}$$

b.3 A la sortie du capteur :

À x=L, Hi+Ha ≤ y ≤ Hi+Ha+H_1

$$\begin{cases} \left.\dfrac{dT}{dx}\right|_{(0,y,t)} = 0 \\ P = P_{atm} \end{cases}$$

b.4 A L'entrée du capteur

À x=0, Hi+Ha ≤ y ≤ Hi+Ha+H₁

$$\begin{cases} u(0,y,t) = u_{int}.cos\theta \\ v(0,y,t) = u_{int}.sin\theta \\ T = Ta \end{cases}$$

4.3.4 Etude de l'effet de l'épaisseur du vitrage

Afin d'étudier l'effet de l'épaisseur de vitrage sur le fonctionnement du capteur solaire on a choisi trois épaisseurs de vitrage (épaisseurs commercialisées) respectivement : 3, 5 et 7mm. Les résultats de la simulation des capteurs sont représentés sur les figures (4-4), (4-5) et 4-6). Ces dernières ont été réparties en deux catégories, des résultats dans un temps fixe et d'autres en régime instationnaire.

Sur chacune des figures (4.4), (4.5) et (4.6) on remarque que la température à la sortie du capteur augmente quand on augmente l'épaisseur de vitrage. L'augmentation de l'épaisseur de vitrage minimise les pertes thermiques vers l'extérieur donc la température de sortie augmente.

De plus dans la figure (4.5) et (4.6) la température de l'air à la section de sortie juste devant la vitre diminue. Cette diminution est faite par l'effet de la convection de la frontière droite de vitrage avec l'air ambiant. Cette chute de température est bien remarquable sur la figure (4-7).

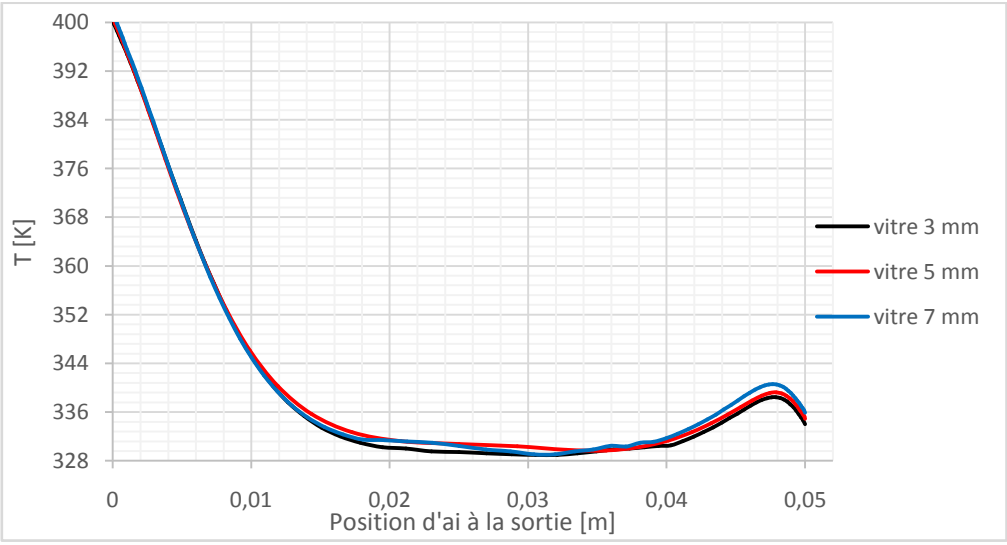


Figure (4-4) : Variation de la température à la sortie du capteur pour les trois épaisseurs à 14 h

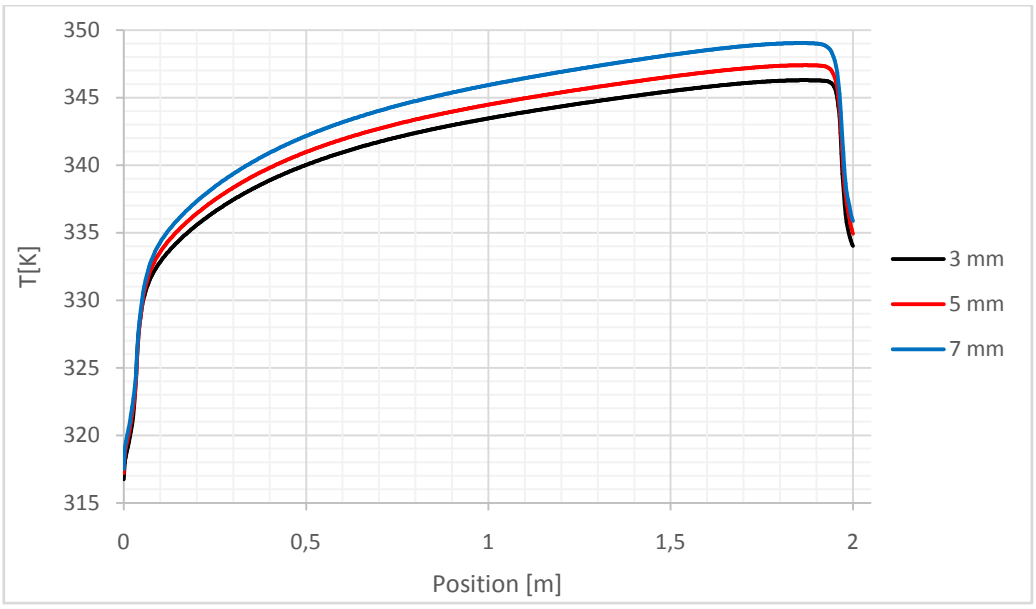


Figure (4-5) : Variation de la température au-dessous du vitrage avec les trois épaisseurs à 14h

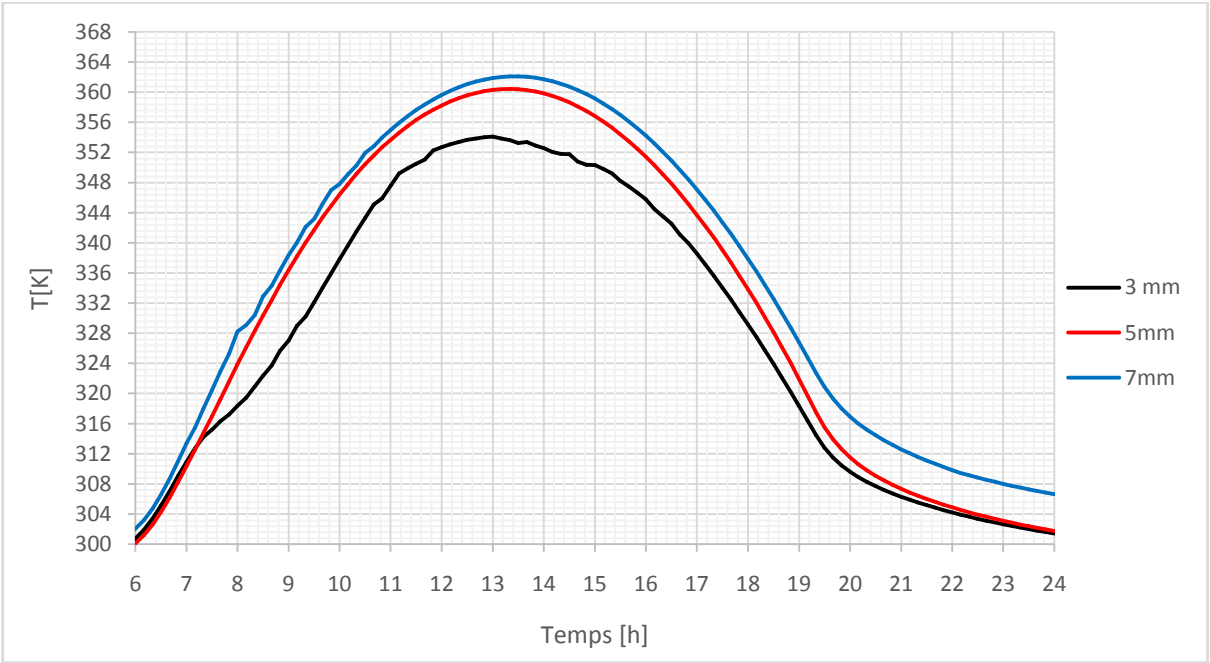


Figure (4-6) : Variation temporelle de la température à la sortie du capteur pour les trois épaisseurs

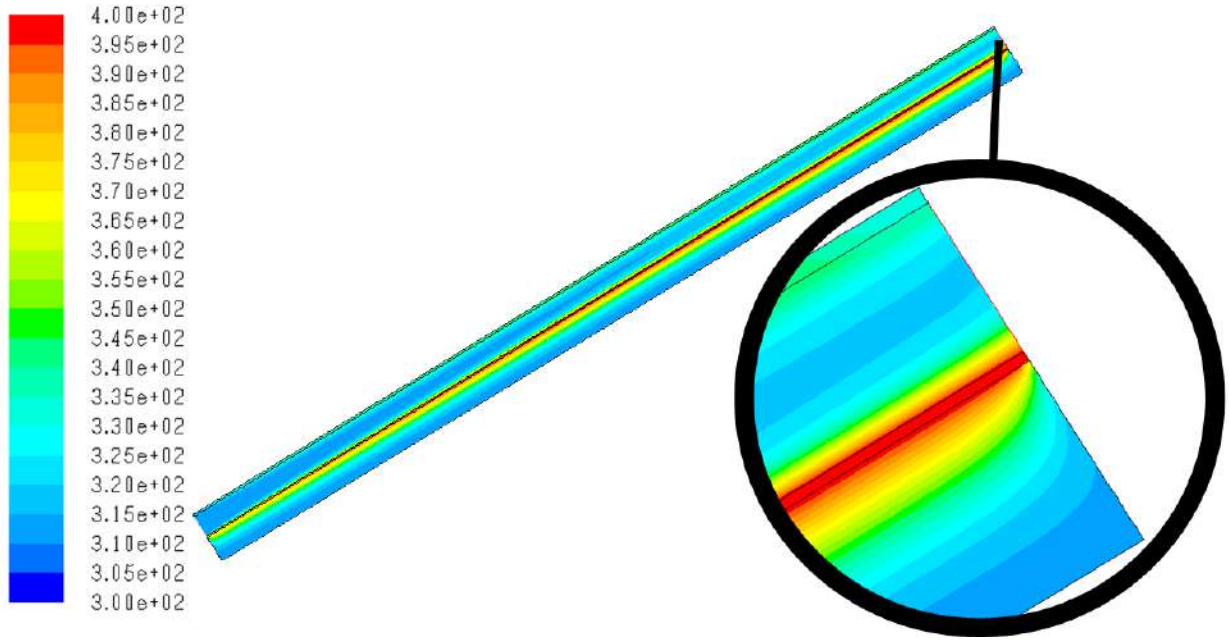


Figure (4-7) : Champ de température à 14 h pour épaisseur du vitrage 5 mm

4.3.5 Effet d'épaisseur de la lame d'air (débit de l'air) :

L'un des paramètres qui influent directement sur la température de sortie est l'épaisseur de la lame de passage de l'air. Dans le but de choisir la meilleure épaisseur, des simulations d'un capteur avec épaisseur de passage de 3cm, 5cm et 7 cm ont été faites. Pour illustrer l'effet de l'épaisseur de la lame d'air, nous avons tracé la variation de l'enthalpie et de la température à la sortie du capteur en fonction de temps. Les figures (4.8), (4.9) ci-dessous montrent l'influence de l'épaisseur de la lame d'air sur la température et l'enthalpie de l'air à la sortie du capteur.

On remarque qu'il y a une différence de la température de l'ordre de 10°C entre les trois épaisseurs. La température maximale correspond au cas d'une épaisseur de 3cm ; sa valeur est de 368 K. La diminution de l'épaisseur de la lame d'air sert à réduire la quantité d'air à l'intérieur du capteur ce qui facilite l'effet d'échauffement de l'absorbeur sur le fluide circulant et ce phénomène est bien représenté dans la figure (4-10).

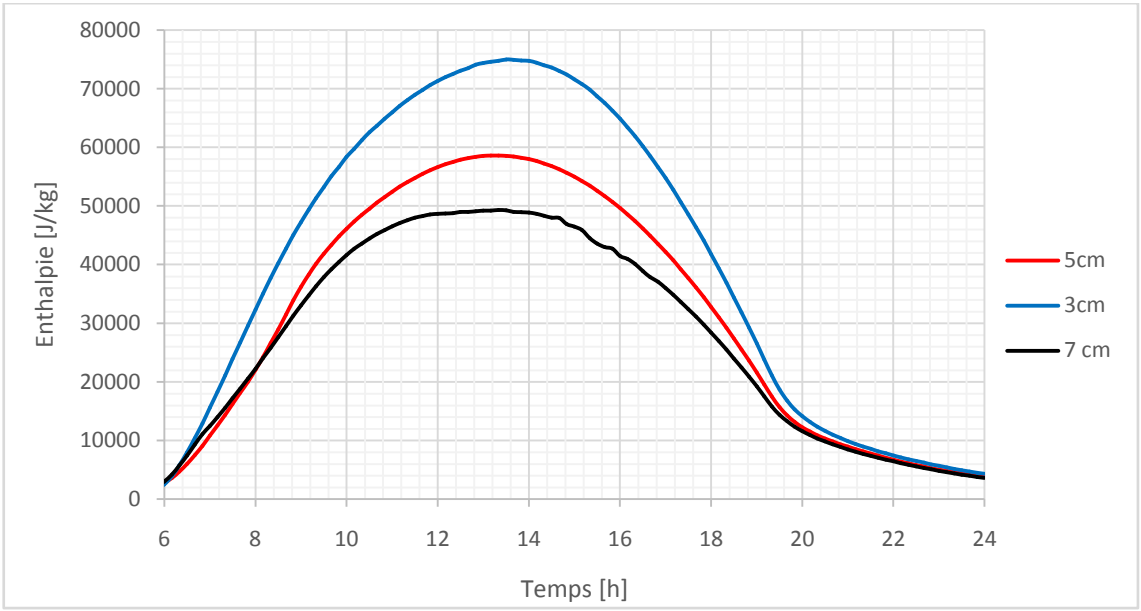


Figure (4-8) : Evolution temporelle de l'enthalpie de l'air à la sortie de capteur

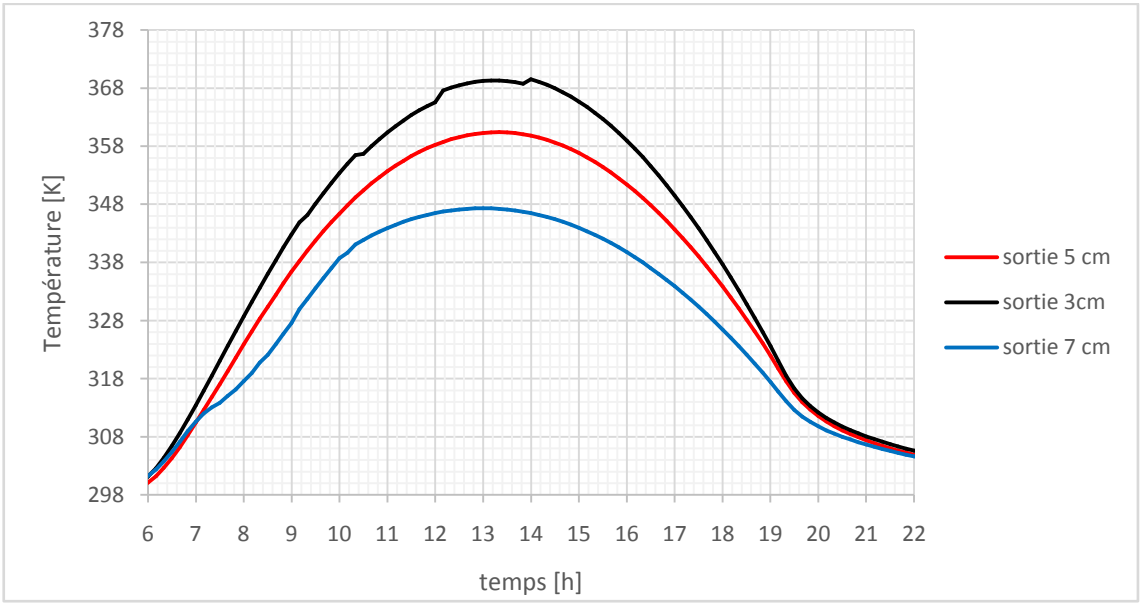


Figure (4-9): Evolution temporelle de la température de l'air à la sortie de capteur

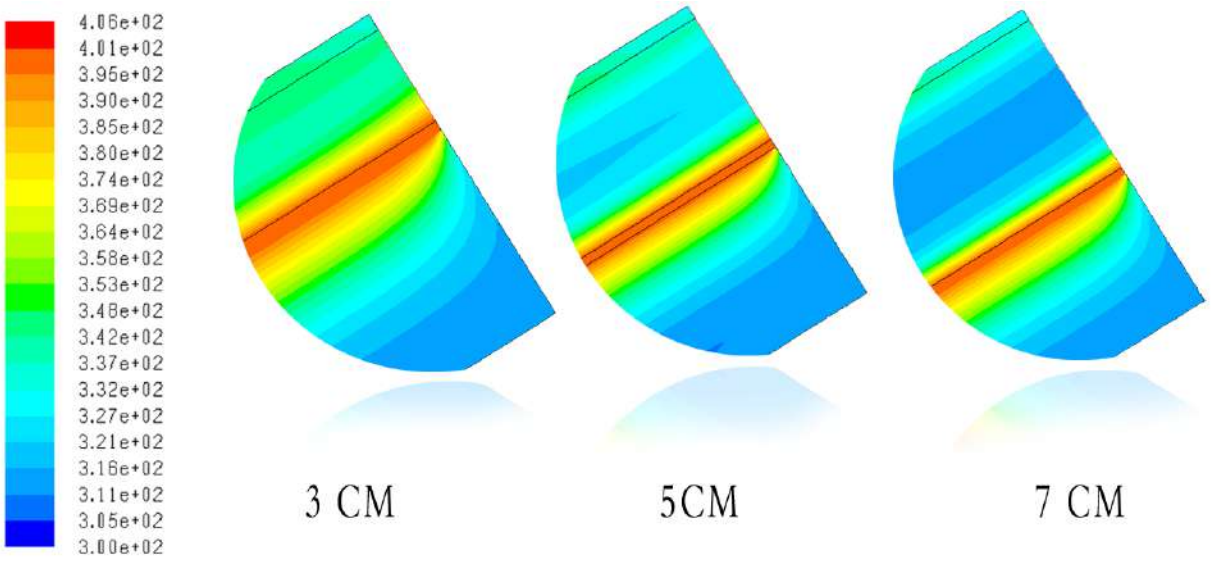


Figure (4-10) : Profil de température à la sortie de capteur dans les trois cas à14 h.

4.3.6 Effet du Changement de la longueur du capteur :

Dans cette partie d'étude le changement de la longueur du capteur est faite ; trois longueurs ont été choisies 1,2 m ; 2m et 2,8 m.

Les figures (4.11) et (4.12) représentent l'évolution temporelle de la température et de l'enthalpie respectivement, à la sortie du capteur où on peut remarquer que la température de l'air à la sortie augmente avec l'augmentation de la langueur de capteur. On obtient plus de chaleur générée et on augmente le temps de séjour du fluide à l'intérieur du capteur.

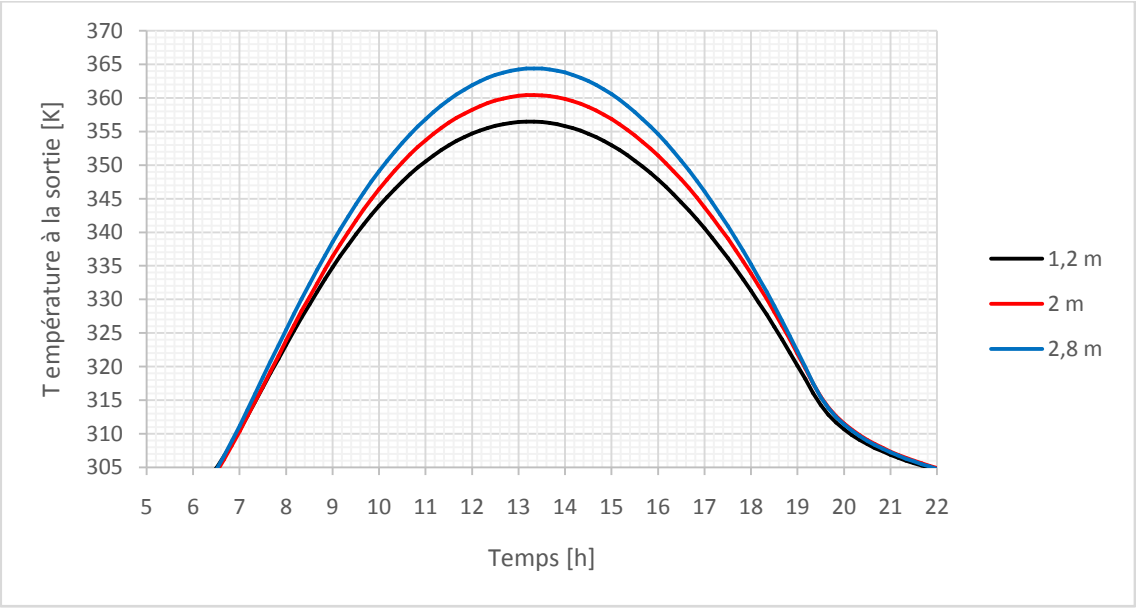


Figure (4-11) : Evolution temporelle de la température de l'air à la sortie du capteur

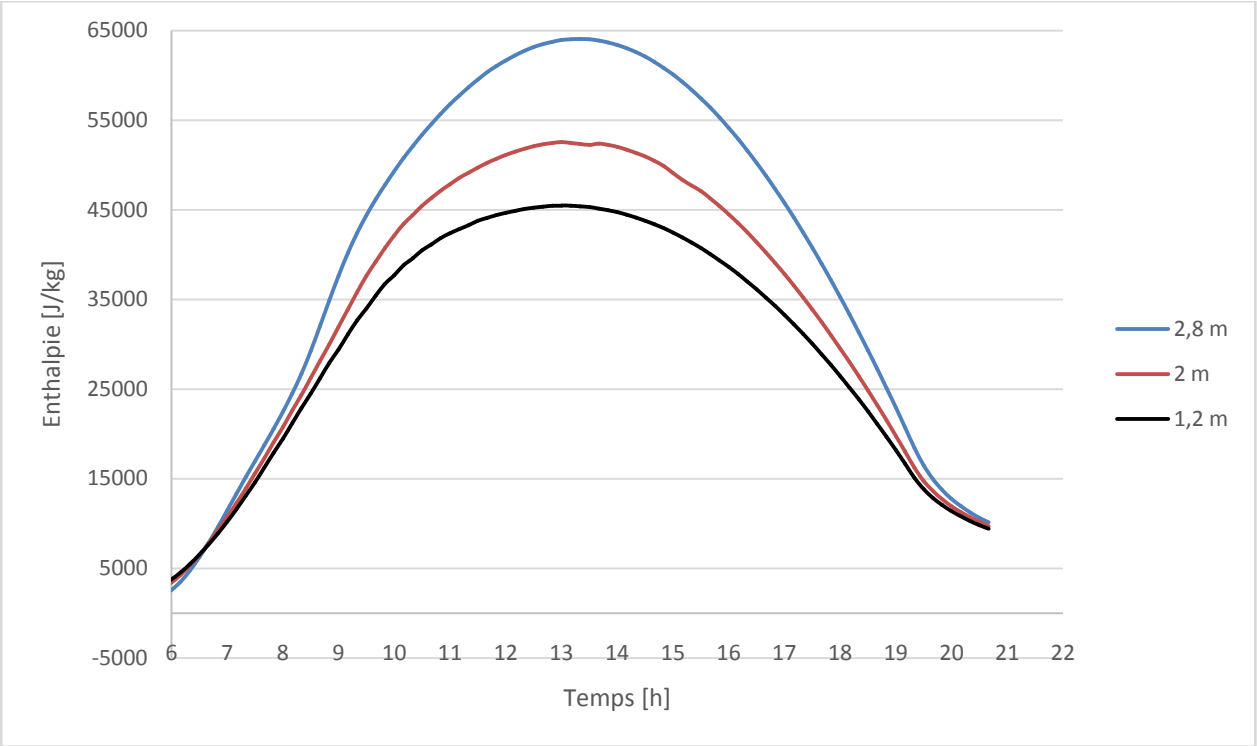


Figure (4-12) : Evolution temporelle de l'enthalpie de l'air à la sortie du capteur

En fin dans cette première partie de simulation, on a cherché à obtenir la meilleure configuration de capteur avant l'intégration de MCP utilisant la simulation basée sur des données d'un capteur réel du laboratoire LENREZA. Nous avons remarqué que les variations apportées, par simulation, sur les différents paramètres du capteur n'ont pas conduit à des améliorations sensibles sur les performances thermiques du capteur. C'est pour cela que nous avons décidé de maintenir le choix des paramètres, dans leurs valeurs correspondantes au capteur type du laboratoire LENREZA, et ce afin d'avoir une base de comparaison correcte en poursuivant la partie d'étude avec intégration des MCP.

4.4 Simulation du capteur solaire avec intégration des matériaux à changement de phase (MCP)

Dans cette partie de notre étude, nous avons considéré l'ajout d'une couche plane rectangulaire d'un matériau MCP en dessous de la plaque absorbante. Les calculs de simulations ont, en premier lieu, porté sur différentes épaisseurs du même MCP. En second lieu, plusieurs MCP de natures différentes ont été simulés et comparés pour la même épaisseur de la couche installée. Et afin de ressortir l'influence de la saison, nous avons dans ce dernier cas considéré les résultats de simulation relatifs à deux journées typiques représentant l'été et l'hiver.

4.4.1 Effet de l'épaisseur de la couche MCP

Des quantités variantes de MCP (paraffine à température de fusion de 72°C) sont intégrées en-dessous de l'absorbeur du capteur avec des épaisseurs respectives de 0,4 cm; 0,5 cm ; 0,75 cm et 1 cm. Dans le but d'étudier l'influence des quantités des MCP, les résultats obtenus sont comparés en référence au cas du capteur sans MCP. Pour cela nous avons choisi de tracer les courbes de température, de l'enthalpie à la sortie de capteur et la température au-dessus de la plaque absorbante en fonction du temps pour différentes épaisseurs.

La figure (4.13) représente la variation de la température moyenne de l'absorbeur en fonction de temps, on remarque que la courbe subit une inflexion quand la température de l'absorbeur approche à la température de fusion de MCP (345 K). On remarque aussi qu'il y a un faible déphasage, notamment au point du moment de pic, entre les courbes quand on augmente l'épaisseur du MCP. La différence de température maximale de l'absorbeur entre la courbe avec MCP et sans MCP augmente quand on augmente l'épaisseur du MCP. Cette différence prend la valeur maximale de 3,42 K pour une épaisseur de MCP égale à 1 cm. Sur cette même figure (4.12) il est très clair qu'à partir de 19h (coucher du soleil), la température obtenue pour les différentes épaisseurs du MCP est sensiblement différente. On peut citer, à titre indicatif, qu'à 21h on observe un écart de température de 21 K entre le cas du capteur sans MCP et le cas de 1 cm de MCP.

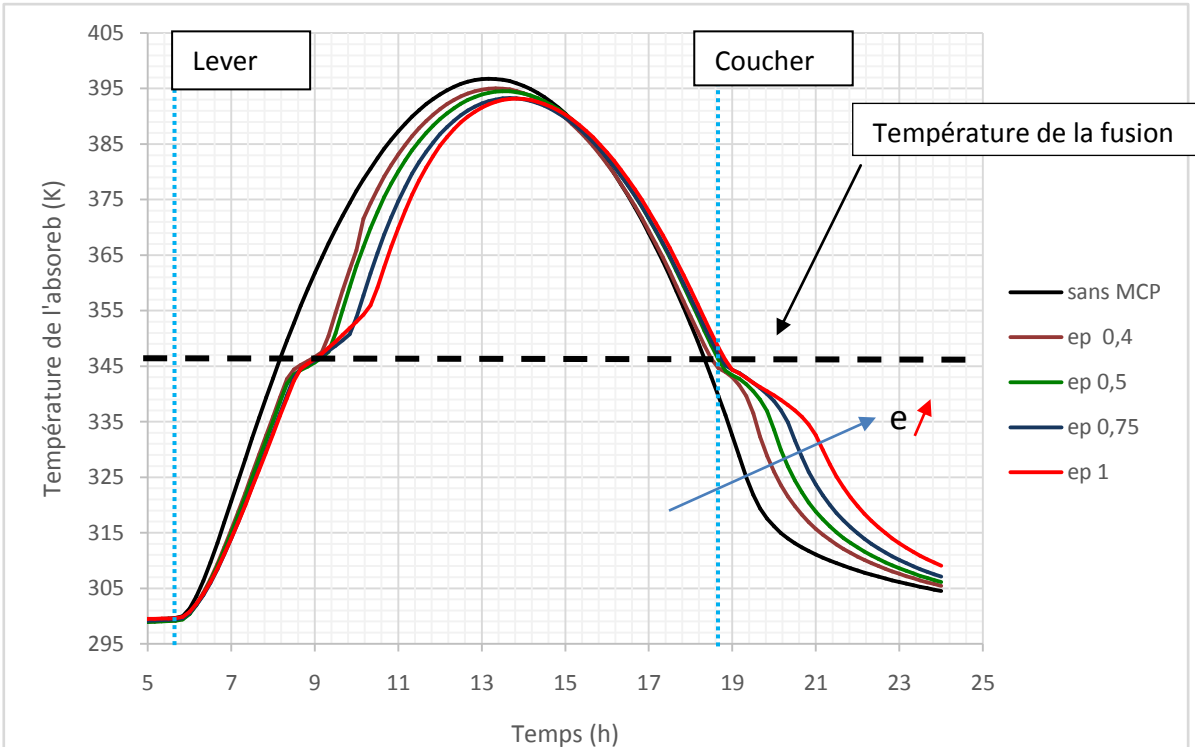
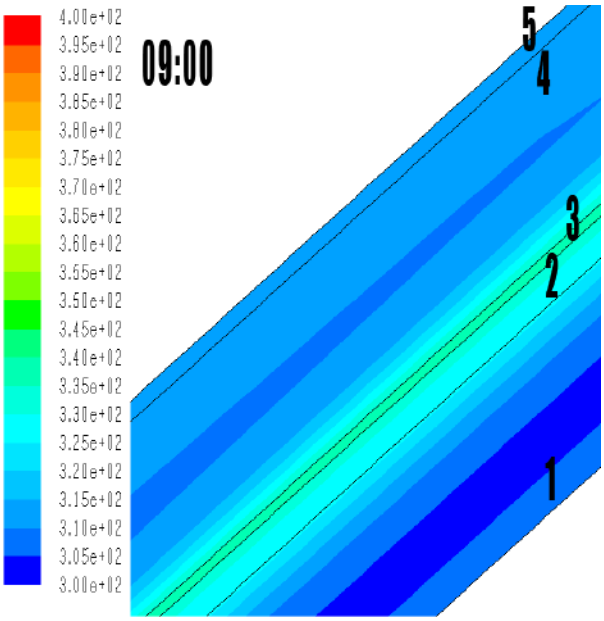
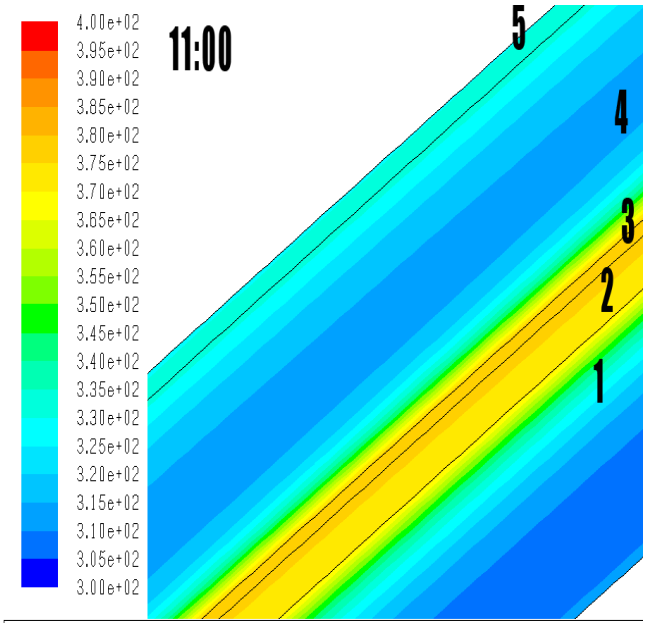


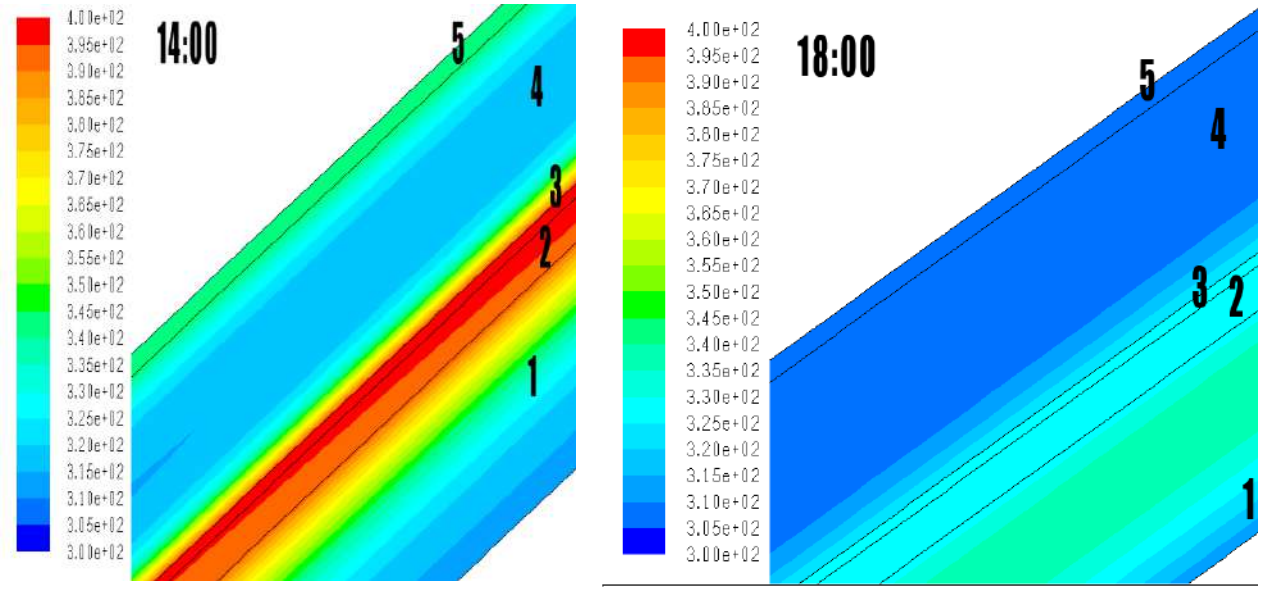
Figure (4.13) : Variation de la température moyenne au-dessus de l'absorbeur en fonction du temps pour différentes épaisseurs de MCP.



(a) Profile de Température à 09h30



(b) Profile de Température à 11h30



(c) Profile de Température à 14h00 *(d) : Profile de Température à 18h00*

Figure (4.14) : Profile de température du capteur pour Déférents instants
1. isolant 2. MCP 3. Absorbeur 4. Lame d'air 5. Vitrage

Les figures (4.15), (4.16) représentent la variation de la température et d'enthalpie en fonction de temps à la sortie du capteur dans le cas d'intégration des différentes épaisseurs de MCP ainsi que sans intégration du MCP. On remarque que la température et l'enthalpie du capteur sans MCP est supérieure à celle dans le cas de l'intégration de MCP. On peut décomposer les deux courbes en trois périodes :

- [8 h - 11:30] dans cette période les courbes de MCP faites une réfraction à 8:30 h avec une température entre 318 et 322 K cette réfraction revient aux changements de phase, la durée de changement de phase est maximale dans le cas d'épaisseur 1 cm puisque le MCP stocke une quantité de chaleur latente supérieur aux autres cas.

- [11 :30 - 18 :45] On remarque que la courbe d'épaisseur 1 cm est la supérieure par rapport aux autres épaisseurs puisque le MCP fait le stockage de la chaleur sensible jusqu'à 14 h.

- [18 :45 - 00 :00] les courbes de MCP présentent une deuxième réfraction à l'environ de 19 h, la température reste presque constante avec un gain persistant dans 50 minutes pour les épaisseurs 0,4 et 0,5 ; 90 minutes pour l'épaisseur 0,75cm et 2 heures pour l'épaisseur 1 cm. L'importance de cette période est qu'elle présente l'effet de déstockage de la chaleur latente du MCP sur la température de sortie du capteur pour les différentes épaisseurs. Le

gain en température dû au déstockage est à son maximum de 10 K à environ 21h entre les cas sans MCP et 1cm de MCP.

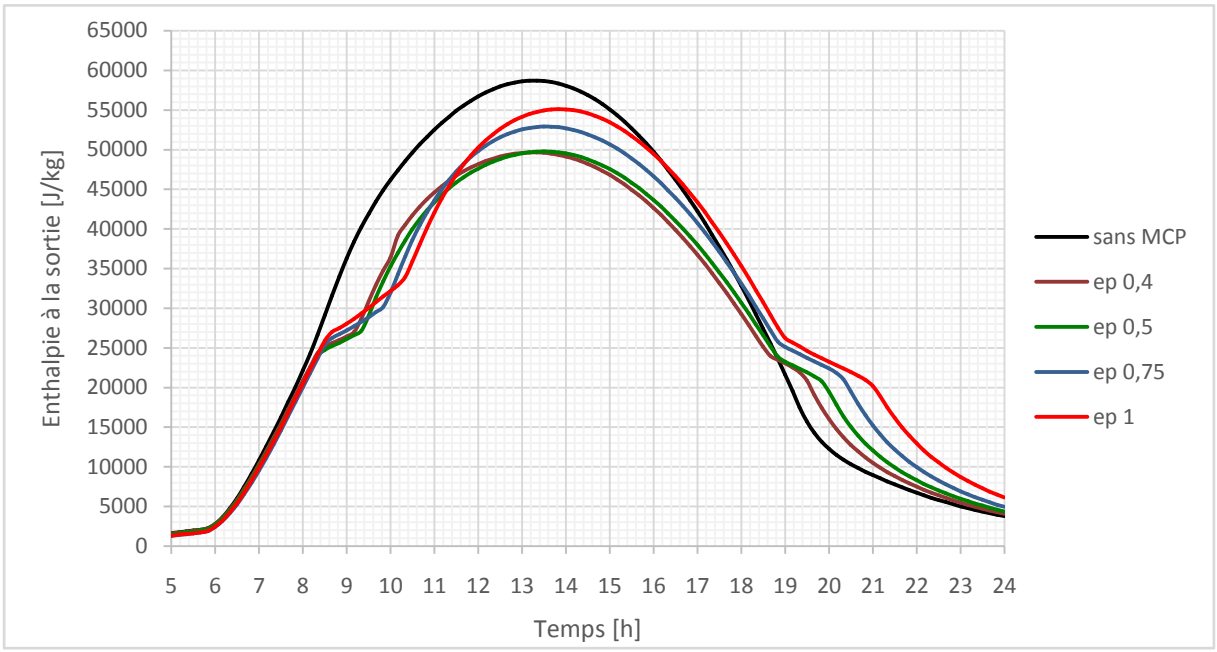


Figure (4.15) : Variation de l'enthalpie à la sortie du capteur en fonction de temps

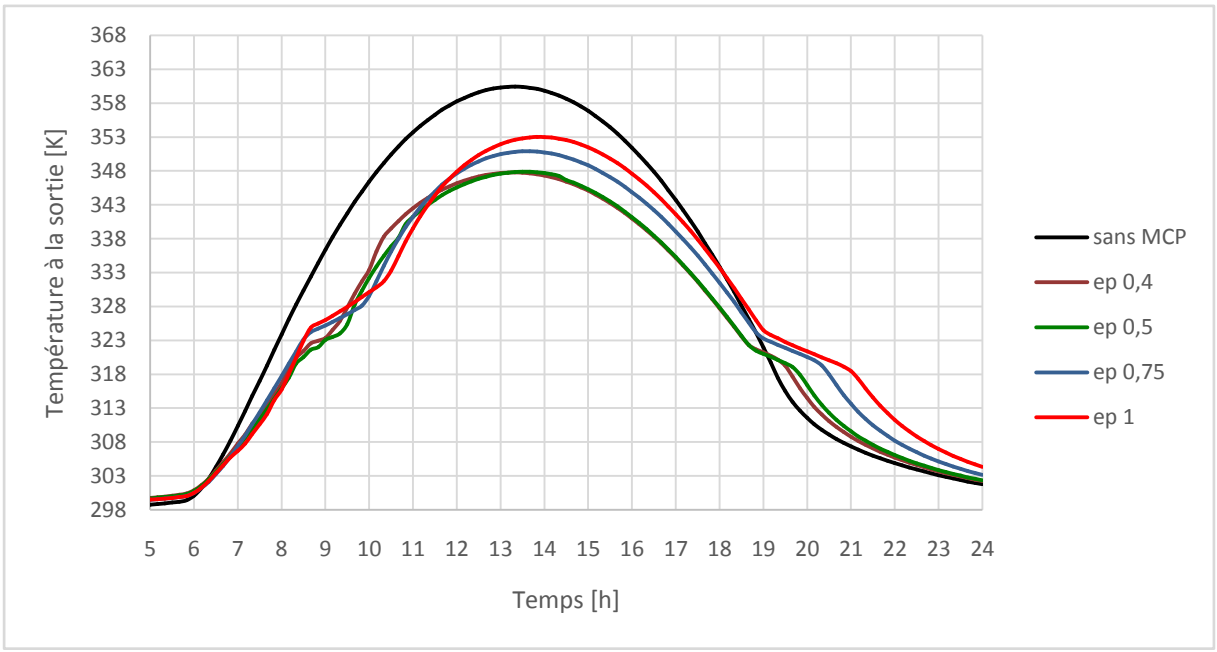


Figure (4.16) : Variation de la Température à la sortie du capteur en fonction de temps

Dans l'objectif de vérifier le comportement du MCP en stockage et déstockage nous avons présenté sur la figure (4.17) la fraction liquide de MCP en fonction du temps pour différentes épaisseurs. On remarque que la fusion de MCP commence à 8:30 h et la solidification à 18 :20. Cette figure montre que la réfraction des courbes précédentes est l'effet de changement de phase de MCP. Nous remarquons aussi, que pour toutes les épaisseurs étudiées, la totalité du volume du MCP participe au changement de phase dans ses deux directions ce qui indique que le maximum possible de chaleur a été extrait.

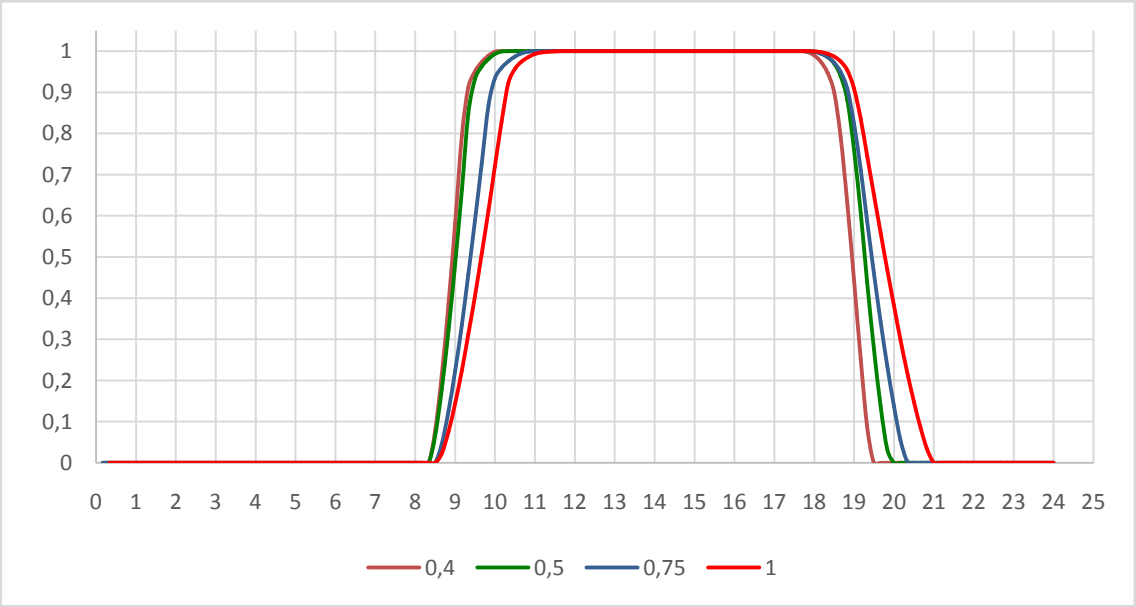


Figure (4. 17) : Fraction de liquide du MCP en fonction de temps

4.4.2 Effet de la nature du matériau à changement de phase

Les matériaux à changement de phase sont caractérisés par une température de fusion et chaleur latente déterminé. A partir d'utilisation des différents MCP avec une épaisseur fixe (1cm) l'influence de ces configurations a été représentée dans cette partie d'étude.

Les MCP utilisée sont représenté au tableau (4.1) :

Tableau (4.1) : les prophéties thermo-physique de MCP

MCP	Propriétés thermo-physiques	
	Température de fusion [K]	Chaleur Latente [kJ/kg]
Paraffine	345	224
Paraffine	333	213
Paraffine wax	326,5	266
Paraffine wax	307,5	244,4

Les courbes de la figure (4.18) subissent des réfractions dans des températures différentes correspondant la température de fusion de chaque MCP, l'absorbeur est en contact direct avec le MCP donc pendant le temps de changement de phase l'absorbeur va donner une quantité d'énergie obtenue par rayonnement aux MCP qui utilisent cette dernière pour changer leurs phases. On remarque aussi que le déphasage, notamment au point du moment de pic, augmente quand on intègre des MCP avec des températures de fusion faibles, par contre il diminue quand on intègre des MCP avec une chaleur latente de fusion plus forte.

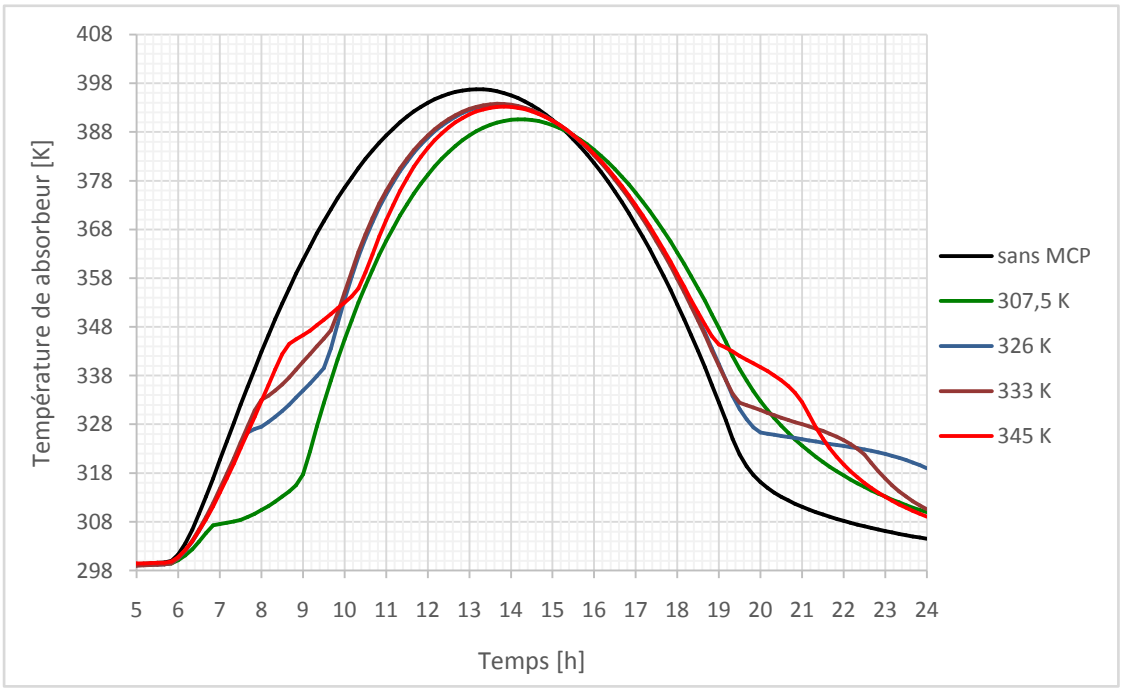


Figure (4.18) : Température de l'absorbeur en fonction de temps pour différents MCP

Les figures (4.19) et (4.20) représentent respectivement la variation de la température et de l'enthalpie à la sortie du capteur. On remarque que la différence entre les températures de fusion et les chaleurs latentes influe directement, premièrement sur la durée de fonctionnement du capteur après le coucher du soleil et deuxièmement sur la température et l'enthalpie de la sortie dans cette période. Le choix du meilleur MCP revient au couplage des deux différents facteurs précédents qui n'évoluent pas nécessairement dans le même sens. Pour cela nous avons choisi de calculer l'énergie gagnée par utilisation de chaque MCP. Cette énergie est déterminée graphiquement par la différence des surfaces (intégration graphique) entre les courbes de températures (et d'enthalpies) du cas avec MCP et la courbe du cas sans MCP depuis 19h à 24h. Les résultats de calcul sont représentés sur tableau (4.2) suivant.

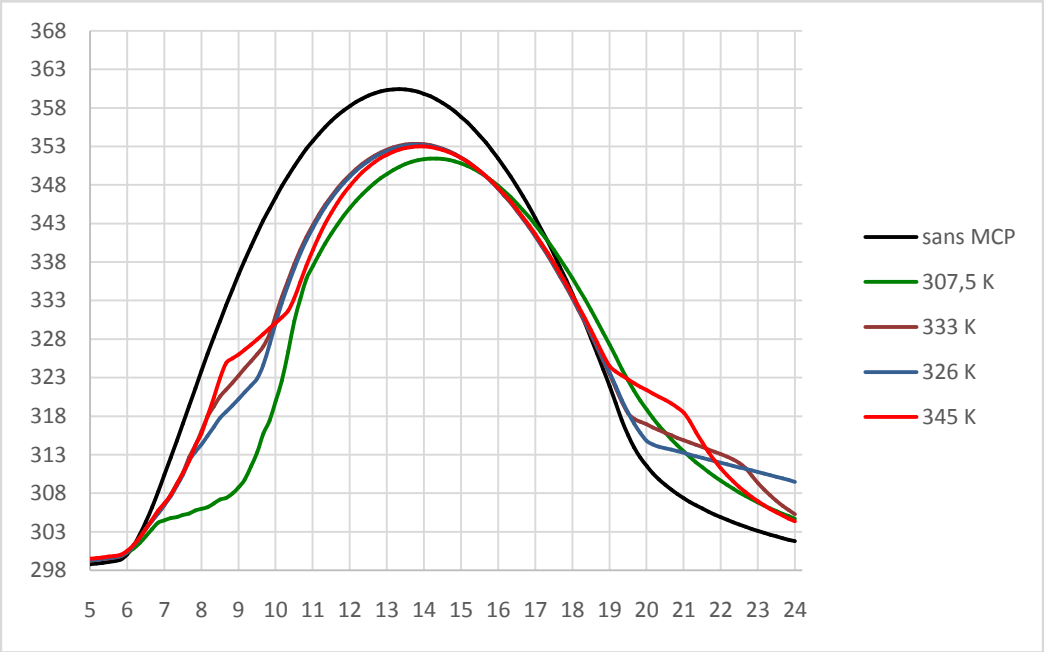


Figure (4.19) : Température à la sortie de capteur en fonction de temps pour différents MCP

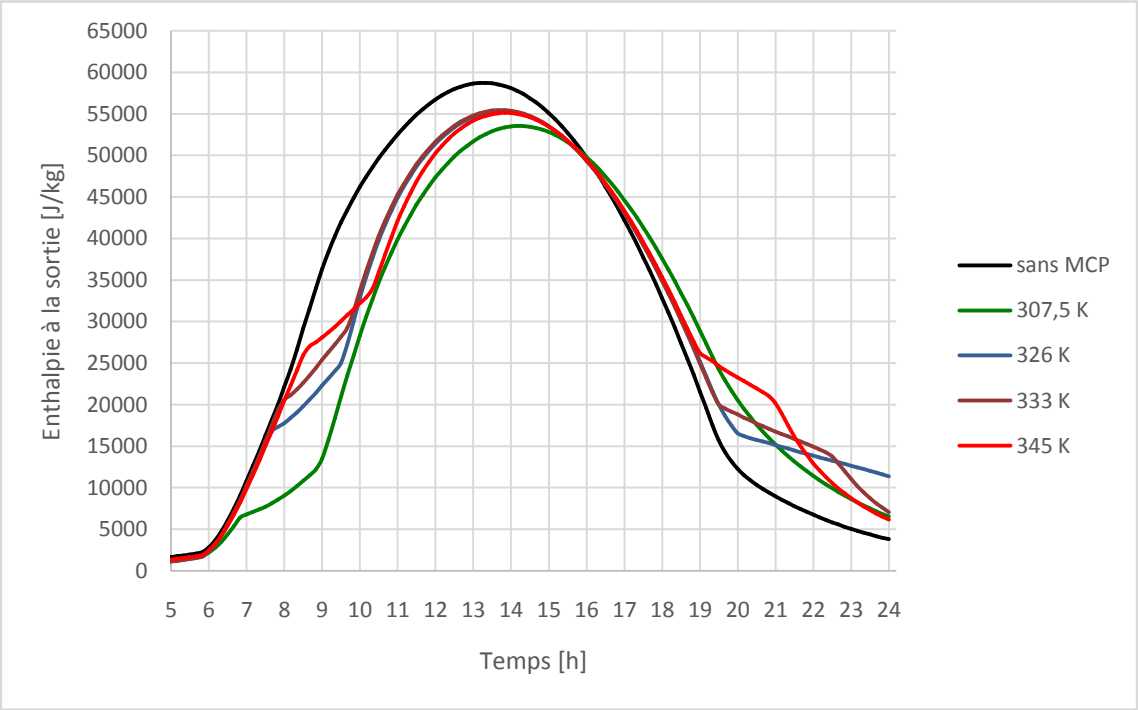


Figure (4.20) : Enthalpie à la sortie de capteur en fonction de temps pour différents MCP

Les données du tableau (4.2) montrent clairement que le meilleur MCP est la paraffine qui avec une température de fusion 345K et une chaleur latente de 224 kJ/kg.

Tableau (4.2) : Amélioration des apports thermiques dans la période de 19h à 24h selon la nature des MCP utilisés

MCP	Base de la température moyenne [K.h]	Base de l'enthalpie Moyenne [J.h]
Paraffine (307 K)	33,18	29 349
Paraffine (326 K)	35,30	31 766
Paraffine (333 K)	36 ,26	32 597
Paraffine (345 K)	40	36 983

La figure (4.21) ci-dessus représente la fraction de liquide du volume total de MCP placé au dessous de l'absorbeur. On remarque que trois des MCP testés ont achevé au maximum leur cycle de changement de phase (solide-liquide et liquide-solide). Tandis qu'on peut remarquer aussi qu'une partie de MCP avec température de fusion 326 K ne revient pas à l'état solide et donc que le MCP concerné a travaillé partiellement, ce qui laisse penser à la necessité d'une approche d'optimisation.

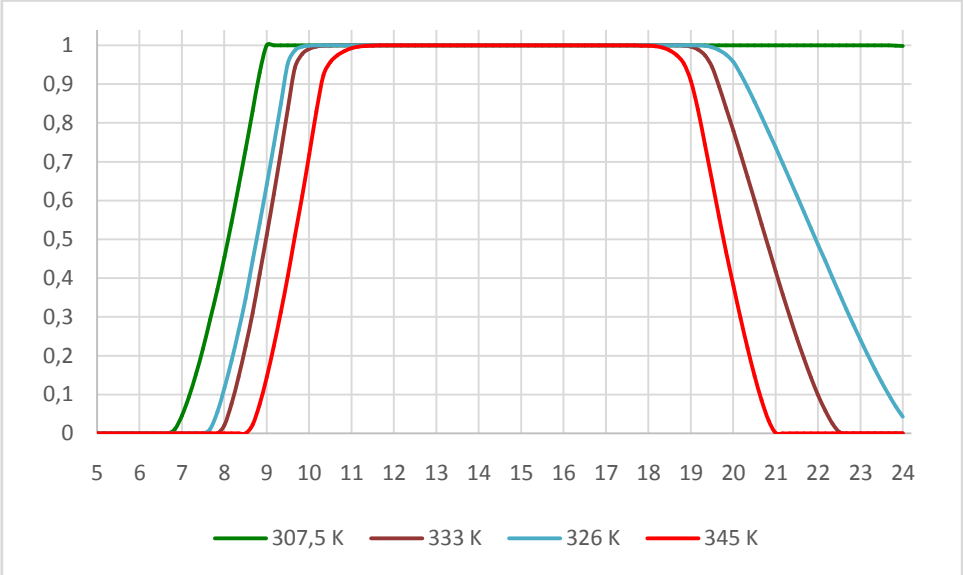


Figure (4.21) : Fraction de liquide en fonction de temps pour différents MCP

Le travail ainsi présenté dans la partie précédente de ce chapitre concerne la contribution à l'étude d'amélioration des apports thermiques d'un capteur solaire plan à air pouvant être destiné aux applications du séchage solaire, particulièrement dans les périodes de faible ou non ensoleillement.

Les résultats obtenus dans cette partie, dans le cas d'absence de MCP, n'ont pas révélé d'améliorations sensibles pour les différentes configurations proposées. Par ailleurs, les résultats issus du cas d'intégration d'une couche de MCP ont montré une nette amélioration du comportement thermique, notamment en période après coucher du soleil. En effet parmi les épaisseurs testées la couche de 1cm donnait un meilleur apport thermique pour deux heures de non ensoleillement, tandis que le MCP à température de fusion à 72°C se montrait meilleur parmi les autres matériaux testés.

Partie 2 : Amélioration des performances d'un séchoir solaire indirect naturellement ventilé par une cheminée solaire

4.5 Introduction

Le séchage solaire est un procédé de conservation et de valorisation qui favorise la conservation et le stockage des aliments et qui utilise l'énergie solaire comme source de chauffage. Dans un procédé de séchage indirect, le système est principalement composé d'un capteur solaire plan, d'un compartiment de séchage et d'une cheminée solaire permettant d'évacuer l'air humide vers l'extérieur [84,85]. Une cheminée solaire, appelée également cheminée provençale ou cheminée thermique, est un dispositif permettant d'améliorer la ventilation naturelle d'un séchoir en utilisant le mouvement convectif de l'air chauffé passivement dans un conduit exposé au rayonnement solaire [86,87]. En effet l'extraction de l'air humide de la chambre d'un séchoir est une opération permettant d'éviter la saturation de l'air et préserver le pouvoir évaporatoire de l'air de séchage dans un niveau permettant la continuité du processus de séchage. Le bon choix et la conception adéquate de la cheminée d'extraction peuvent influencer la qualité des produits séchés par amélioration de l'homogénéité des champs de températures et vitesses. La durée de séchage et donc le cout du traitement peuvent aussi être améliorés par l'augmentation de la vitesse d'extraction.

Dans le but d'évaluer les performances thermiques d'un séchoir solaire utilisant une cheminée d'extraction solaire, ce papier présente une étude numérique par un modèle dynamique moyennant la méthode des volumes finis mise en œuvre sur le code de calcul CFD "Fluent" [88].

4.6 Etude numérique du comportement thermique de la chambre de séchage avec cheminée solaire sans MCP

Dans cette deuxième partie du présent chapitre, nous allons présenter et discuter les résultats de l'ensemble des essais de simulation numérique conduits dans notre cas d'étude. La procédure de résolution et la présentation des résultats sont basées sur les deux étapes suivantes :

Etape 1 : Validation du modèle numérique adopté, faisant recours à des résultats expérimentaux relevés sur un séchoir solaire indirect, conçu et réalisé au laboratoire de développement des énergies nouvelles et renouvelables en zones arides (LENREZA, Univ. Ouargla, Algérie), et ce dans le cadre de travaux de master antérieurs [72], [89].

Etape 2 : Simulation du séchoir solaire sans intégration de MCP avec des différents cas dans le sens de montrer les effets des différents paramètres de conception (type de cheminée, positionnement de cheminée et la lame d'air de la cheminée solaire) sur le comportement thermique du système de séchage.

4.6.1 Validation du modèle numérique

Avant d'entamer la simulation numérique traitant les différents paramètres d'influence, nous avons commencé par un essai de validation, sur la base des données expérimentales mesurées sur un séchoir solaire indirect dans le cadre des mémoires de master génie énergétique et génie des procédés [90], [91] (année 2014/2015 et 2015/2016). A cet effet nous avons utilisé un maillage convenable pour notre cas d'étude, se basant sur la comparaison des températures simulées à la sortie de capteur et de cheminée et aux différents endroits dans la chambre à celles mesurées expérimentalement dans les mêmes points.

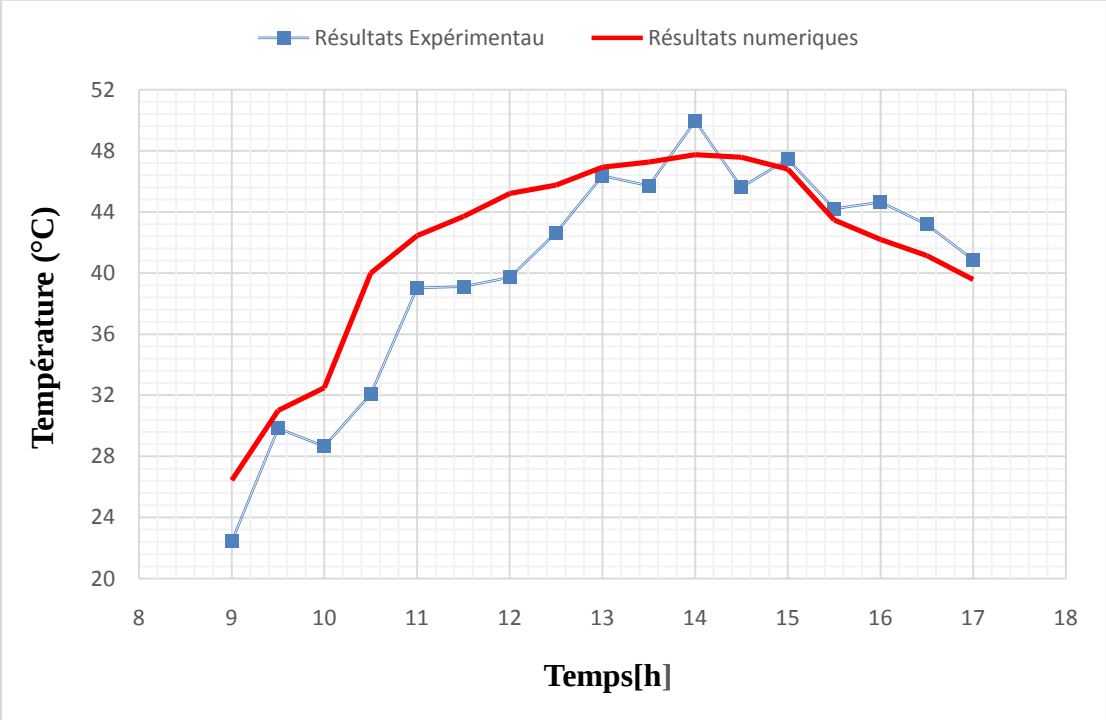


Figure (4.22) : Températures mesurées et simulées dans la chambre de séchage

4.6.2 Simulation du séchoir solaire sans intégration de MCP

Dans cette partie nous montrons les résultats de simulation du séchoir solaire sans intégration de matériaux de changement de phase (MCP) comme première étape d'étude du comportement thermique du séchoir. Différents cas de configuration sont considérés de

manière à tester progressivement les paramètres d'influence et choisir un cas optimal sur lequel on va intégrer l'effet des MCP.

Le modèle de travail adopté pour notre étude est donné par la figure (4.23). Ce modèle est considéré comme une chambre de séchage de forme cubique de dimension (1m x 1m x 1m). Afin de suivre les évolutions des distributions de température dans le séchoir nous avons déterminé les points, les lignes et les colonnes suivants : points sortie de capteur et de cheminée, trois étages (Etage1, Etage2, Etage3) et trois colonnes (colonne1, colonne2, colonne3). La partie supérieure de cette chambre est équipée d'une cheminée solaire verticale, et de dimension 1m x 0.085m, et la partie inférieure est équipée d'un capteur solaire. Pour éliminer le transfert de chaleur avec le milieu ambiant, tous les côtés de la chambre sont thermiquement isolés.

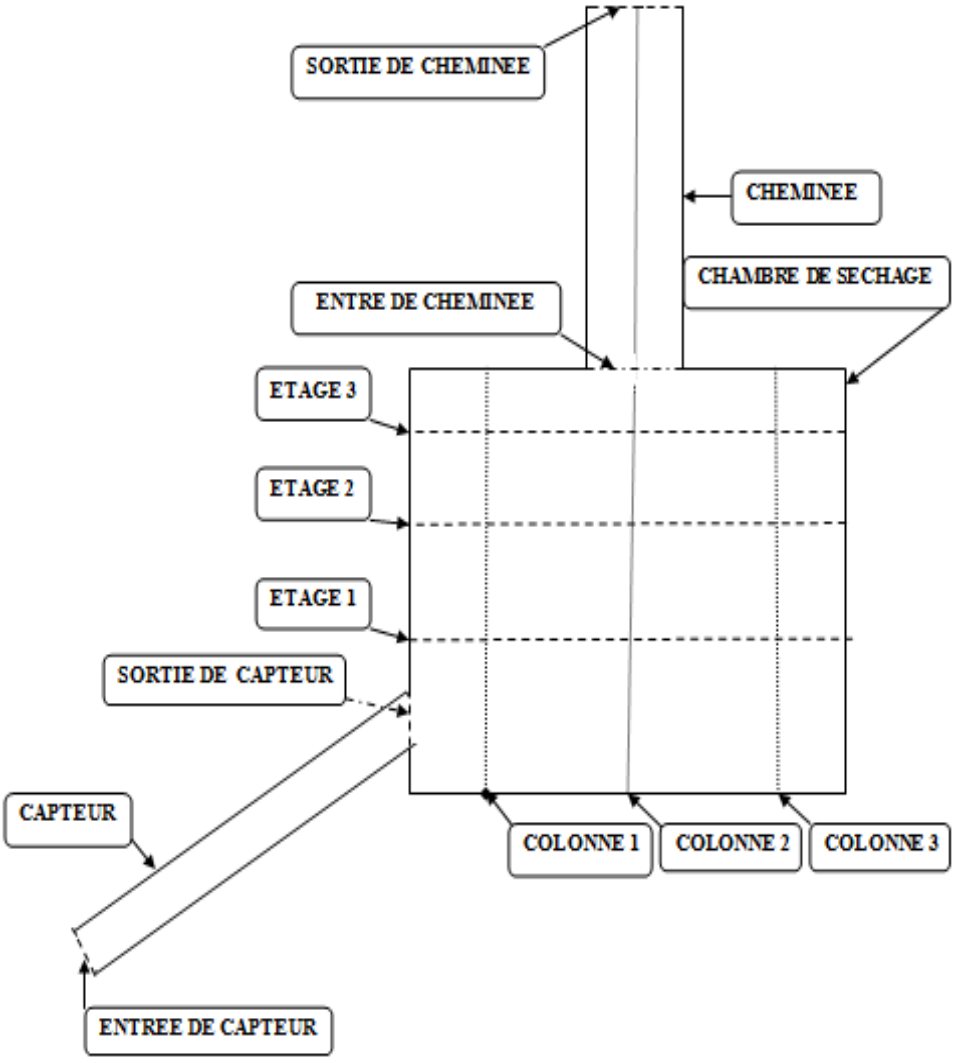


Figure (4.23) : Schéma descriptif des endroits de mesure

En ce qui concerne la nature de la cheminée, nous avons considéré deux types de cheminées, ordinair**e** et solaire avec les mêmes dimensions et sous les mêmes conditions climatiques. Les constituants de chacune des cheminées sont montrés ci-dessous sur la figure (4.24).

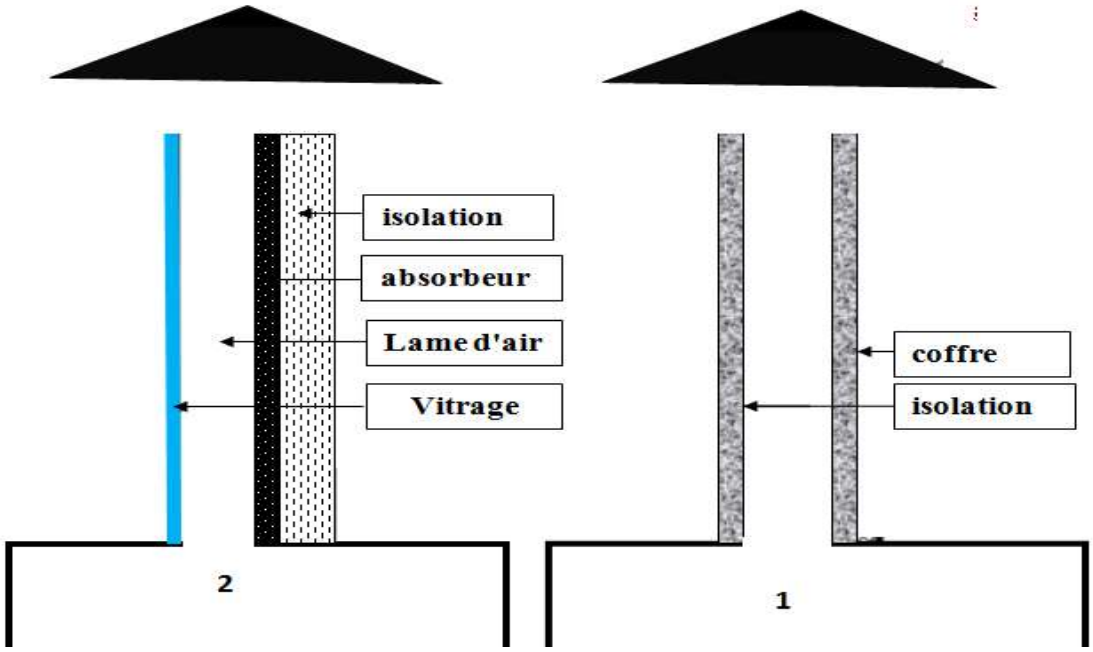


Figure (4.24) : Schéma descriptif : cheminée ordinaire (1), cheminée solaire (2)

4.6.3 Effet de la nature de la cheminée

La distribution de la température dans la séchoir avec les deux types de cheminée est représentée dans la figure (4-25), la première vision générale de cette figure (4.25), indique que la distribution de température est peu homogène soit avec la cheminée ordinaire ou solaire. D'autre part en comparant les deux cas, on peut remarquer que l'homogénéité de distribution est relativement meilleure par la cheminée solaire que celle ordinaire, sauf sur le coté sud de la chambre où intervient l'influence de la vitesse d'entrée d'air à une valeur 0,5 m/s. Cette différence d'homogénéité entre les deux types de cheminés explique l'effet remarquable de la cheminée solaire qui permet d'augmenter la vitesse de ventilation ou l'extraction de l'air vers l'extérieur par la création de gradient de densité du au gradient de température ΔT entre l'entrée et la sortie de la cheminée. Par comparaison des valeurs de vitesse à la sortie des cheminées on trouve que la cheminée solaire assure la valeur de (0,49m/s) et la cheminée ordinaire reste dans la limite de (0,3m/s).

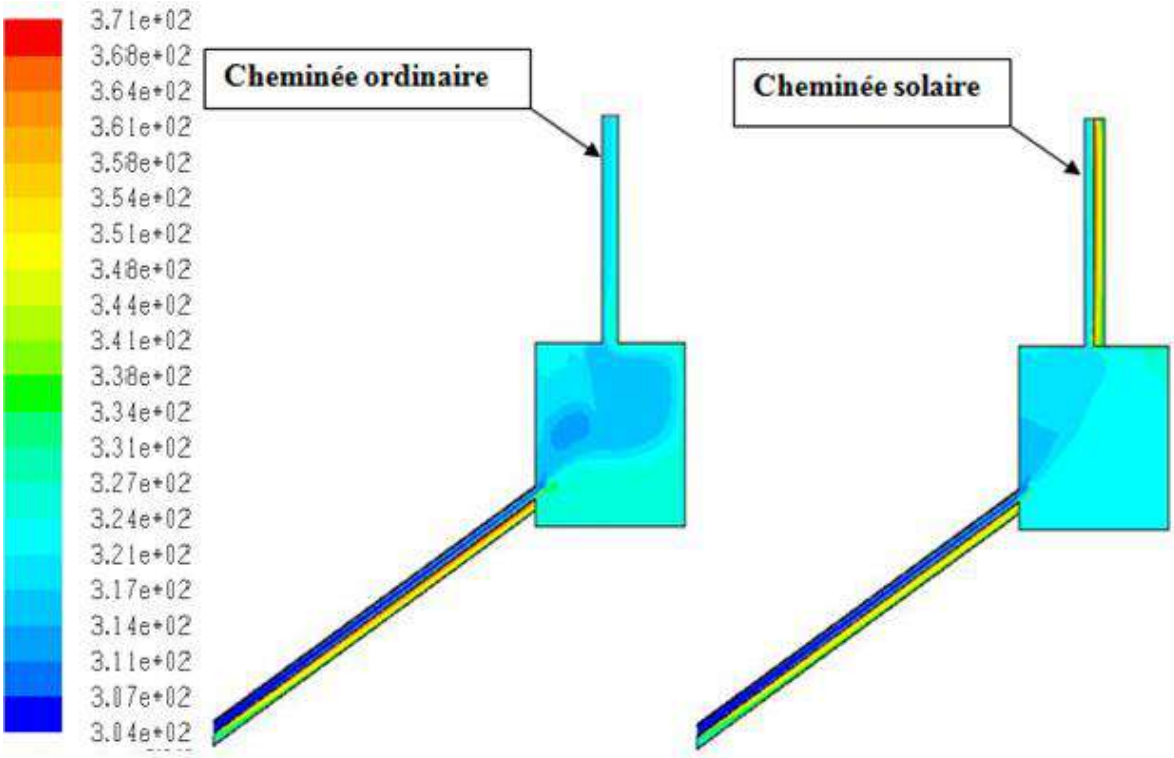


Figure (4.25) : Distribution de température à 14 h dans le séchoir pour les deux cheminées

L'analyse des figures (4.26) et (4.27), montre que l'impact du type de cheminée sur le phénomène de séchage sachant que pour une cheminée ordinaire, la température à la sortie du capteur est supérieure à la température de sortie de cheminée avec un écart de température $\Delta T = 3°C$. Par contre à la sortie de la cheminée solaire la température est supérieure à celle constatée à la sortie du capteur avec un écart de température ($\Delta T = 7°C$). Dans le cas de cette cheminée l'homogénéité est meilleure à cause de l'évacuation de l'air humide de la chambre vers l'extérieur. Tandis que avec la cheminée ordinaire il y a eu une stagnation de température à l'intérieur de la chambre particulièrement dans les cotés supérieurs, latéraux (Est, Ouest) de la chambre [72], [89], phénomène pouvant contribuer à la dégradation des produits séchés [72]. Sur ce on peut déjà accepter, dans cette première étape, que le choix de la cheminée solaire est bien justifié comme élément d'amélioration du comportement thermique du système de séchage.

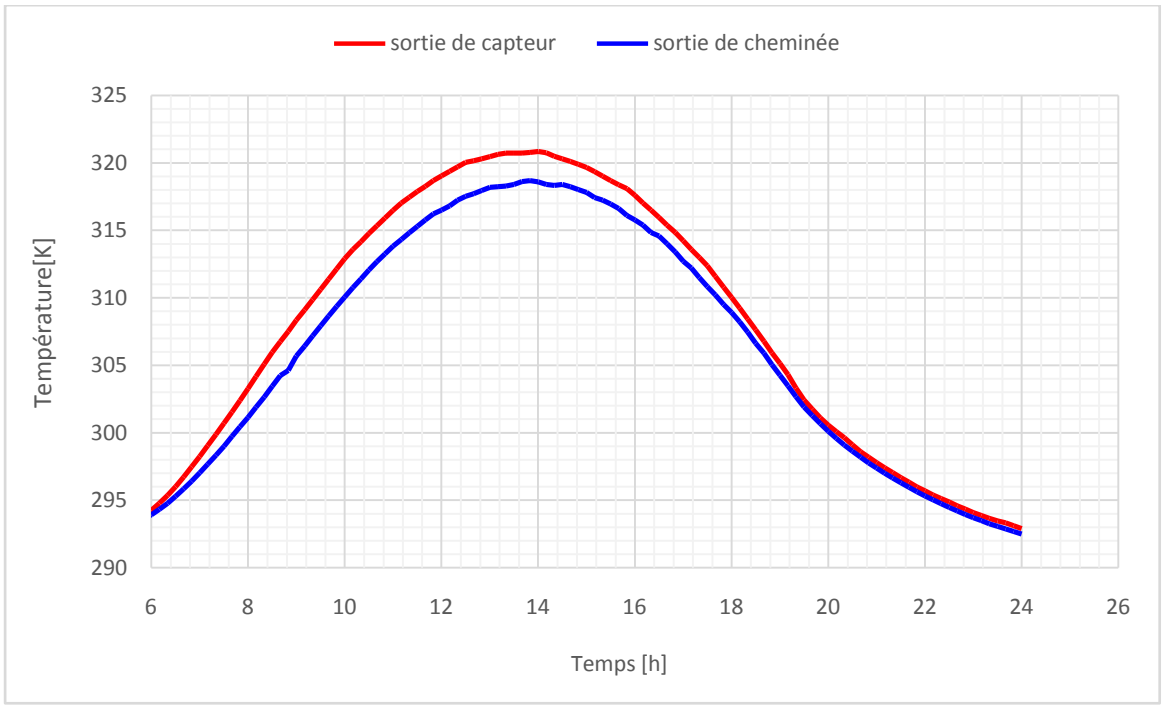


Figure (4.26): Courbes des températures à la sortie du capteur et de la cheminée ordinaire

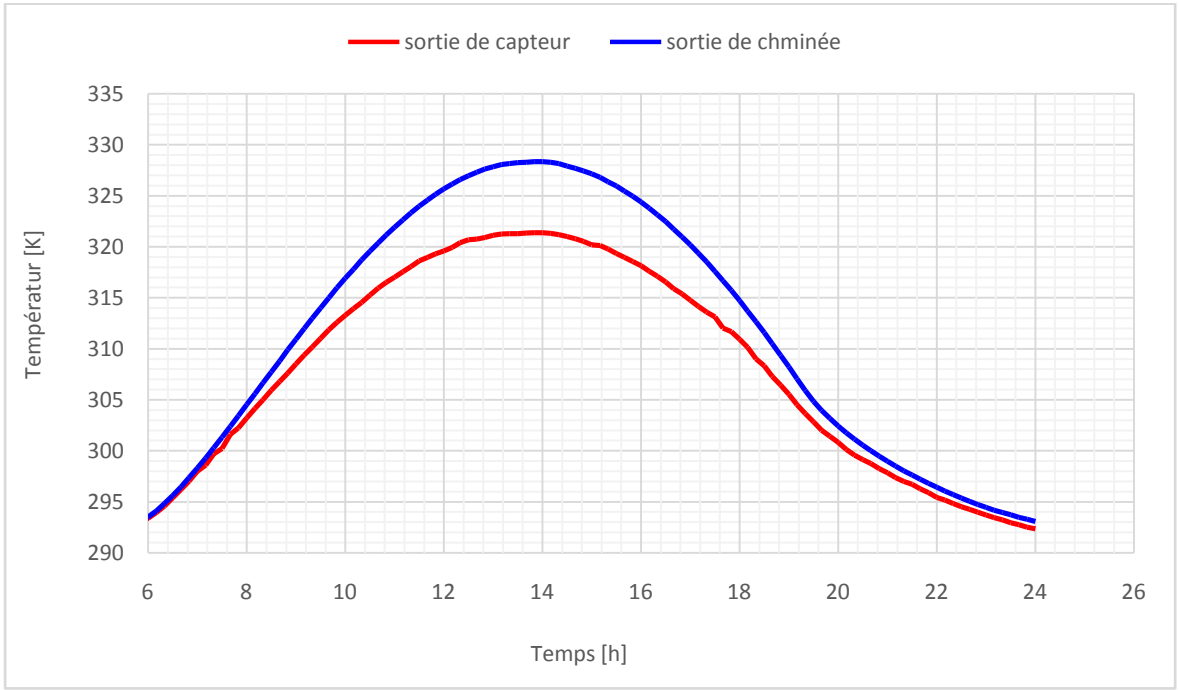


Figure (4.27): Courbes des températures à la sortie de capteur et de la cheminée solaire

4.6.4 Effet du positionnement de la cheminée solaire

L'analyse de la figure (4.28) relative à la distribution de la température dans le séchoir solaire pour différentes positionnement de la cheminée solaire montre que le changement du positionnement de la cheminée induit une différence notable sur l'état d'homogénéité de distribution des températures dans la chambre de séchage. En effet, la cheminée solaire placée au coté Nord (ou à droite, en 2D) présente une homogénéité presque totale dans la chambre de séchage avec une température (T=47°C). Il est à noter ici, que ce choix du positionnement au Nord est en accord avec les données de littérature disponible où la majorité des cheminées solaires étudiées expérimentalement ou numériquement ont été placées en face à l'ouverture d'entrée d'air au niveau haut dans la toiture [92]. L'objectif, bien entendu, dans tout cela est de faciliter l'évacuation de l'air vers l'extérieur et assurer l'effet de cheminée expliqué par la tendance du fluide qui en s'échauffant s'élève, en raison de la diminution de sa densité, résultant des différences de température et d'humidité.

Nous pouvons alors conclure ~~dire~~ que ce choix de positionnement de la cheminée est favorable pour le séchage des produits agricoles par rapport à la position au centre de la chambre de séchage, et ce du point de vue homogénéité de distribution des températures. Pour ce qui est de la vitesse d'extraction de l'air à la sortie de la cheminée elle est au voisinage de 0,5 m/s restant un peut faible pour répondre au besoin d'évacuer la totalité d'air humide en cas de traitement de produits agro-alimentaires

En outre, les courbes de température au niveau des étages représentées sur la figure (4.29) confirment le résultat d'homogénéité de la température dans toute la chambre à partir des valeurs de températures calculées aux niveaux des étages horizontaux prédéfinis au début de ce chapitre. La température est quasi-stable à la valeur de 47°C dans les différents cotés de la chambre ce qui prouve l'absence de la stratification thermique comme il a été déjà mentionné par les études précédentes [72], [89].

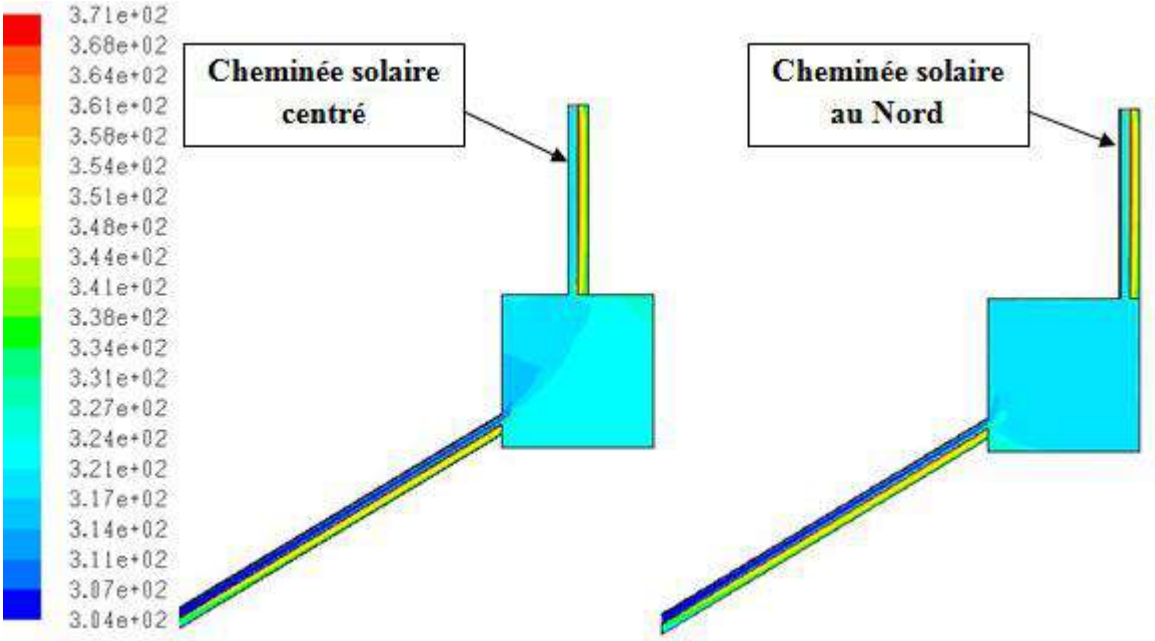


Figure (4.28): Distribution des températures dans le séchoir pour les deux positionnements de la cheminée solaire

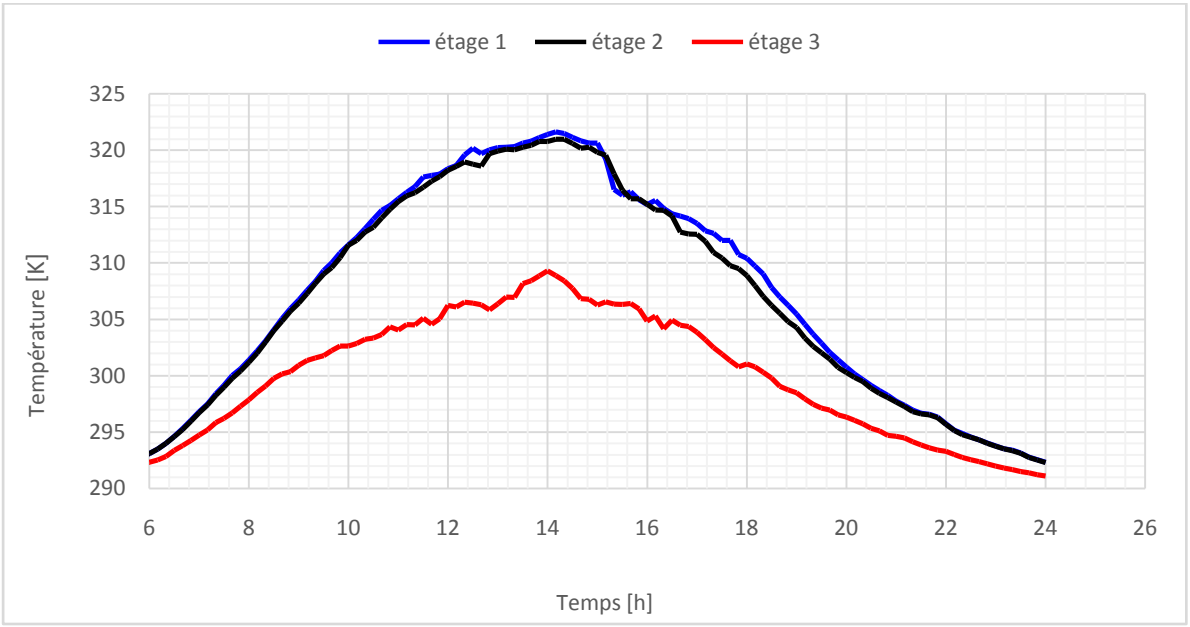


Figure (4.29): Courbes des températures aux niveaux horizontaux avec une cheminée solaire centrée

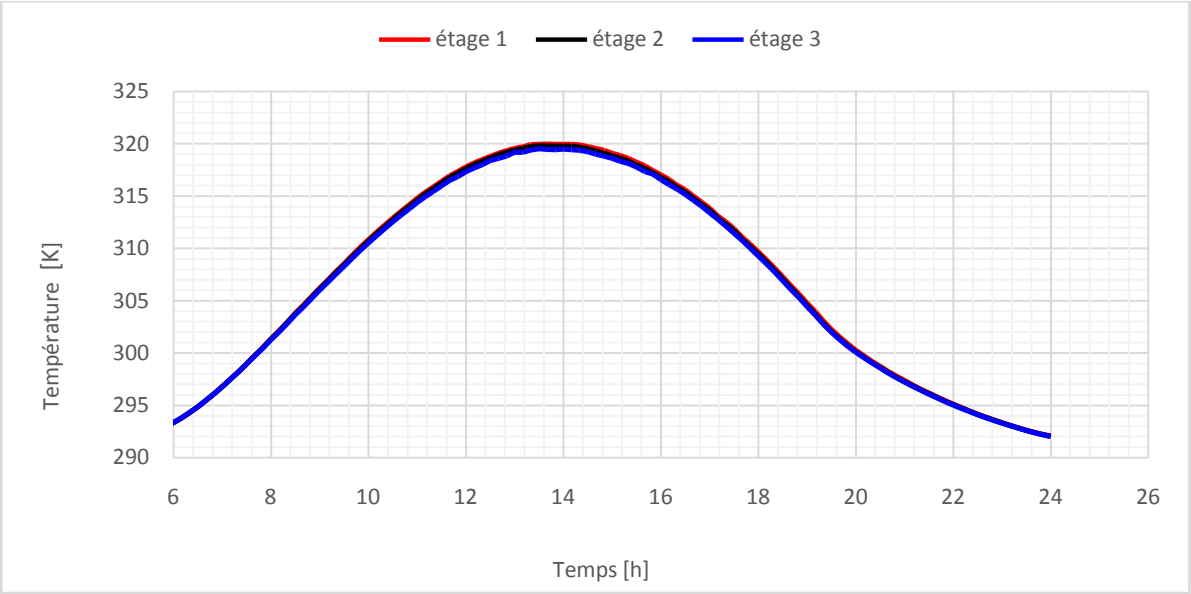


Figure (4.30): Courbes des températures aux étages avec une cheminée solaire au nord

4.6.5 Etude de l'effet de la lame d'air (vitesse de ventilation)

Dans cette partie nous avons testé la simulation numérique pour trois épaisseurs de la lame d'air respectivement 3, 4 et 5 cm. La distribution de la température dans le séchoir solaire est représentée sur les figures (4-31) et (4-32). L'examen de ces figures montre que le paramètre de la lame d'air, appelé aussi la section de passage d'air vers l'ambiance, est très important puisqu'il commande la vitesse de dégagement de l'air humide. En effet un faible dégagement de l'air humide provenant de la chambre de séchage peut être en cause de problèmes tels que stratification thermique, dégradation des produits séchés et allongement du temps de séchage [72].

Les résultats des simulations numériques indiquent aussi qu'une faible homogénéité de distribution des températures avec les épaisseurs de 3 et 4 cm. Contrairement, avec l'épaisseur 5cm qui a donné une distribution nettement plus homogène. Par considération simultanée des critères homogénéité de distribution et intensité de la vitesse d'extraction, le choix judicieux s'oriente vers l'épaisseur de lame d'air de 3cm. Pour cette épaisseur la vitesse d'air est de l'ordre de 0,7-0,8 m/s comparée à une moyenne de 0,5 m/s obtenue pour les autres cas.

La figure (4.33) nous explique l'importance de la vitesse de ventilation naturelle pour évacuer de l'air humide vers l'extérieur dans le domaine de séchage des produits agricoles.

Nous constatons que la lame d'air 3cm assure à la sortie de cheminée une température de 58°C par contre les lames d'air de (4 et 5 cm) ne dépasse pas 54°C à la sortie de cheminée.

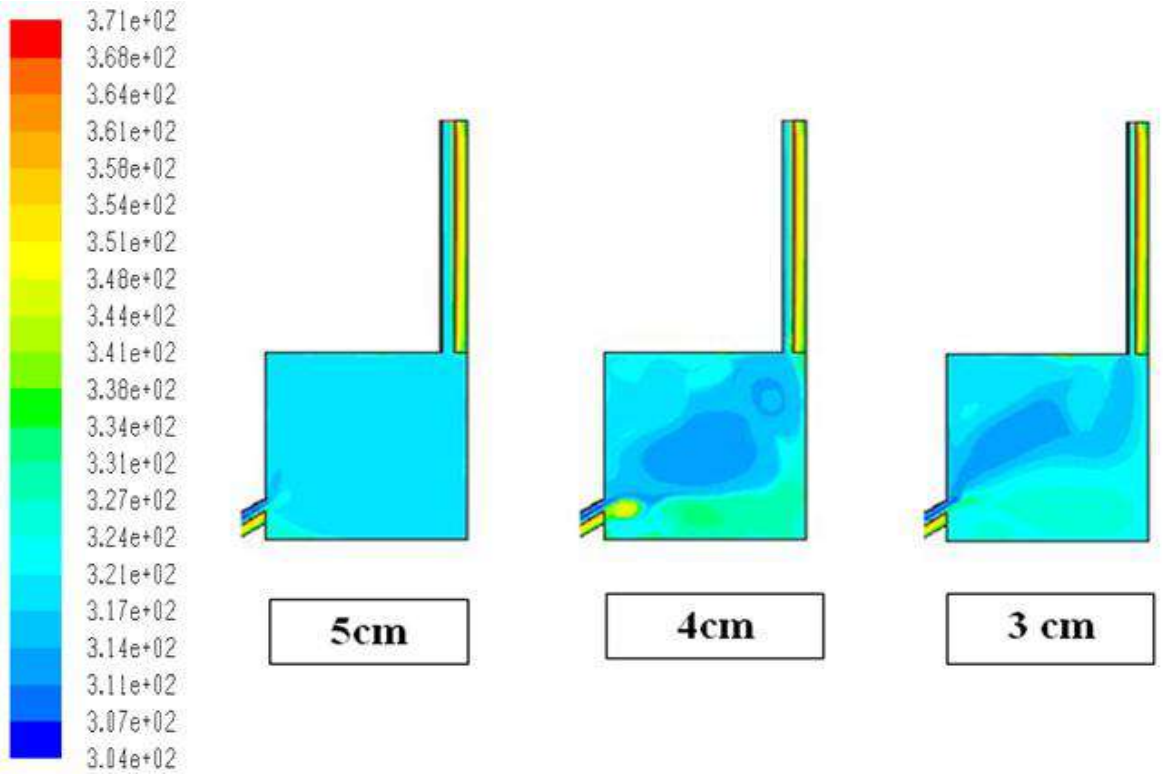


Figure (4.31): Distribution des températures pour les différentes épaisseurs de la lame d'air

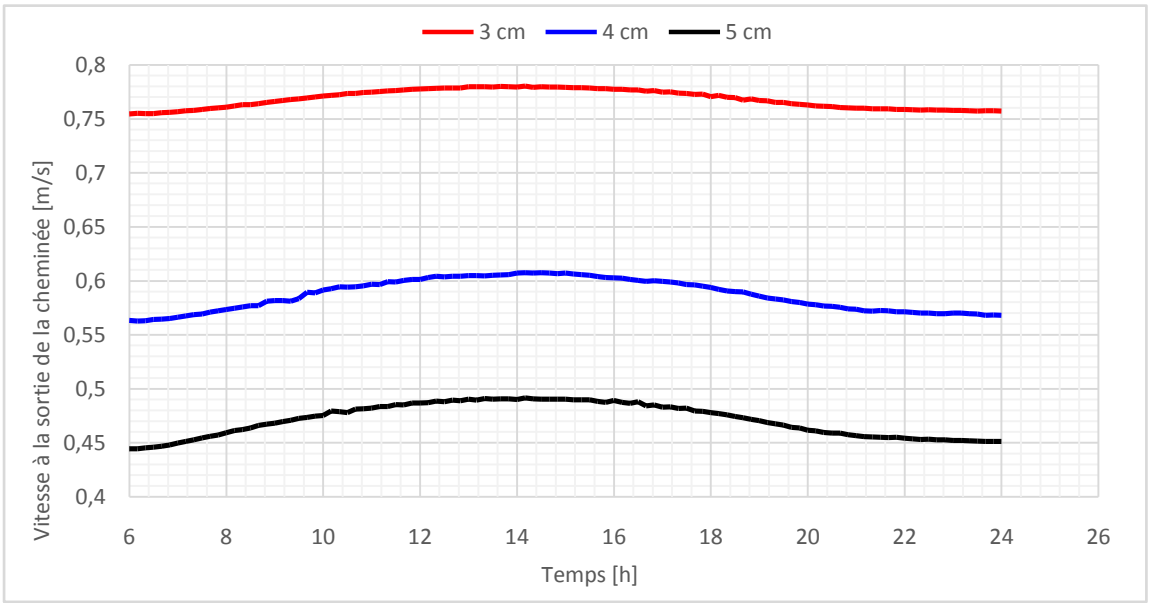


Figure (4.32) : Courbes des vitesses à la sortie de la cheminée solaire pour les différentes lames d'air

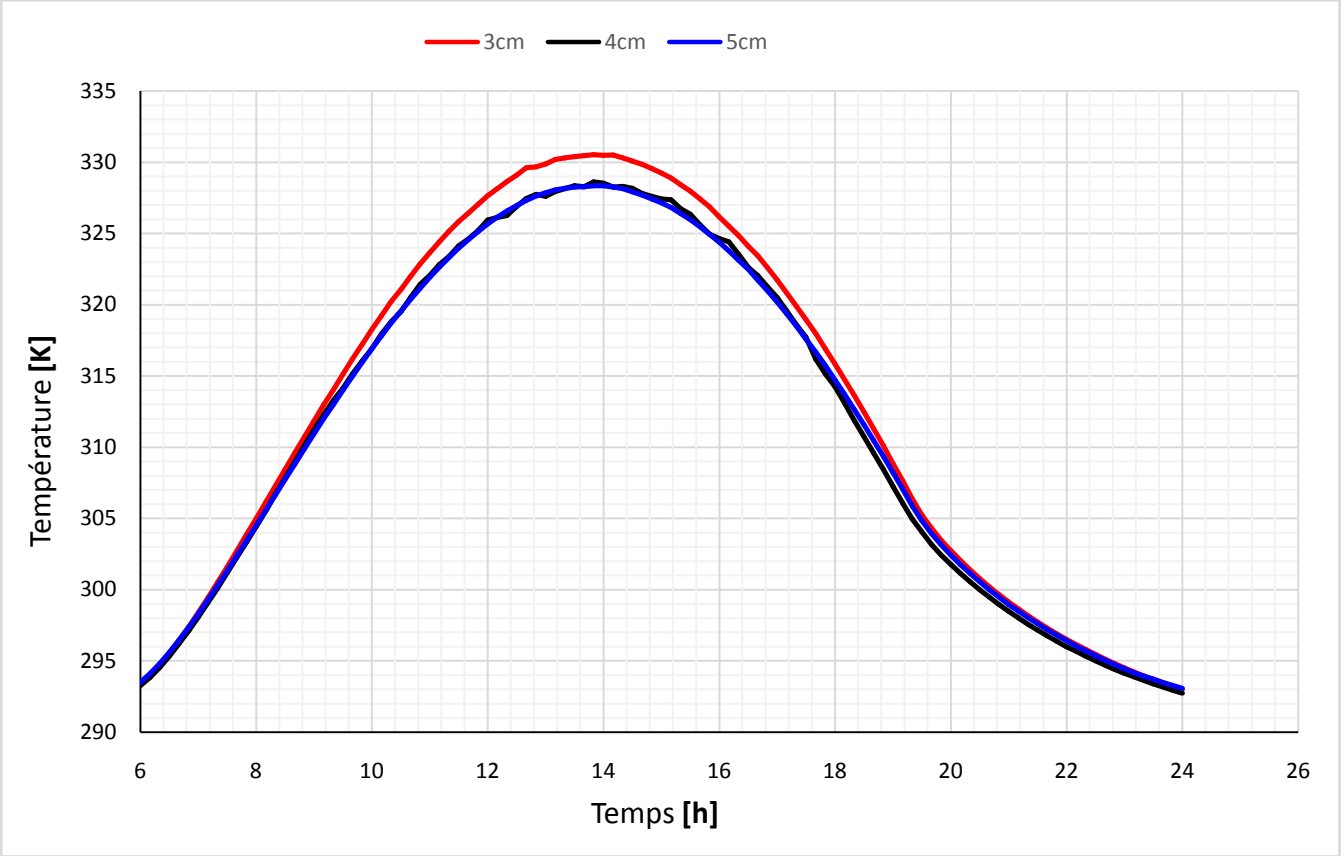


Figure (4.33) : Courbes des températures à la sortie de la cheminée solaire pour différentes épaisseurs de la lame d'air

Afin d'atteindre l'objectif de cette partie de l'étude et faciliter au lecteur le suivi de la progression logique de nos traitements numériques, nous avons récapitulé les différentes étapes de la méthodologie de résolution sur l'organigramme donné par la figure (4.34) ci-dessous. Rappelons ici que la méthodologie adoptée repose sur l'élimination des cas.

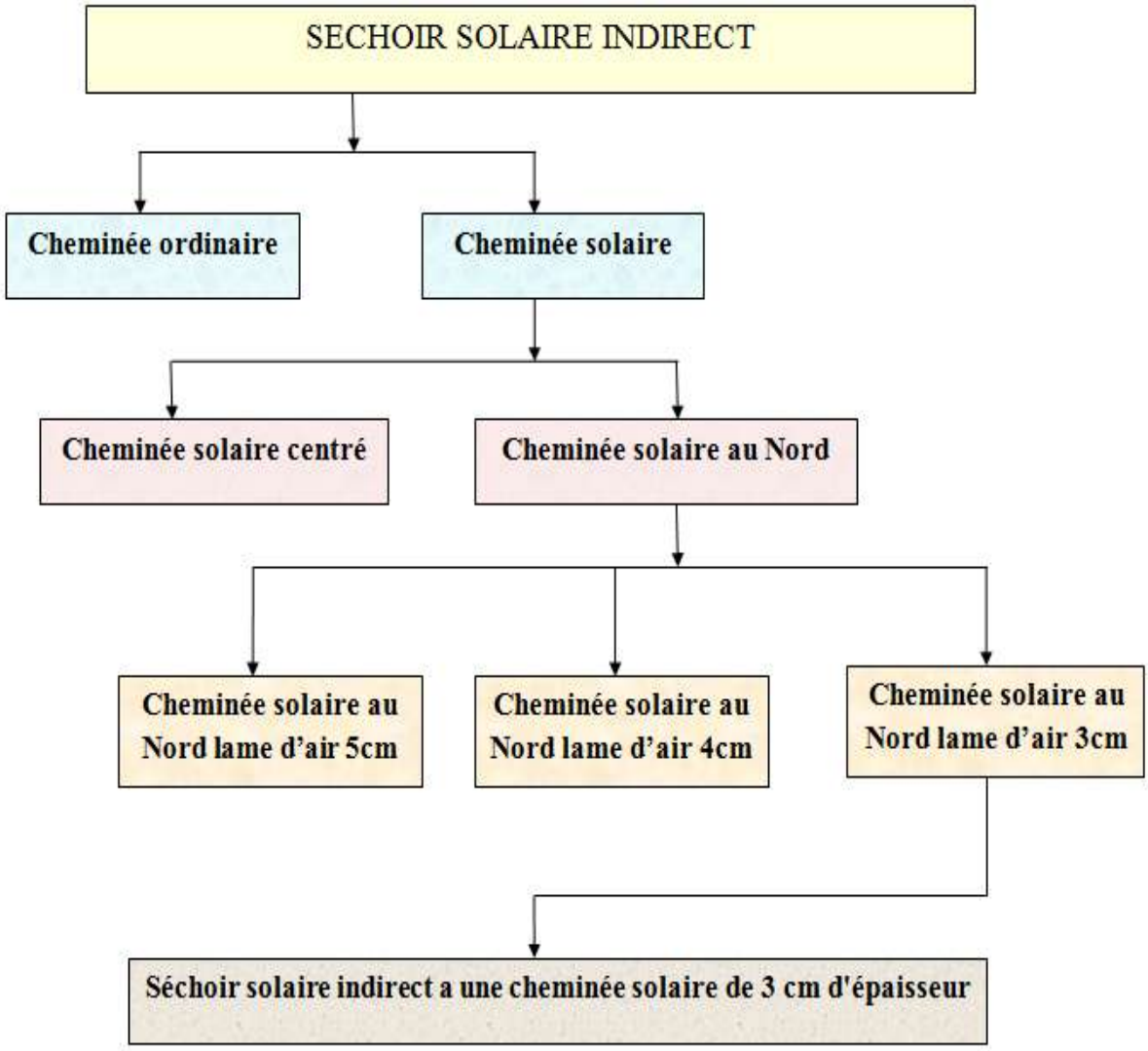


Figure (4.34) : Diagramme des étapes de simulation

Sur la base des résultats de simulation numérique sans intégration des matériaux de changement de phases on peut dire que pour un système de séchage solaire des produits agroalimentaires, nous pouvons accepter le choix d'une cheminée solaire à épaisseur de lame d'air de 3cm positionnée au coté nord du système de séchage. Cette conception assure une vitesse de ventilation naturelle de 0,7m/s, une température à la sortie de cheminée de 58°C et une température de séchage convenable, à condition de trouver une solution pour l'homogénéité de distribution de température à l'intérieur de la chambre de séchage. Toutefois la lame d'air 5cm garantie plus d'homogénéité de distribution mais avec une température et une vitesse d'extraction un peu plus faibles. Cette épaisseur peut être utile pour les applications de séchage de certains produits agroalimentaires thermosensibles.

4.7 Etude numérique du comportement thermique de la chambre de séchage avec intégration d'une couche de MCP

Suite aux résultats précédents on se propose d'étudier dans cette partie du chapitre une dernière amélioration qui consiste à ajouter une couche plane rectangulaire d'un matériau MCP en dessous de la plaque absorbante du capteur solaire plan d'admission. Le type de matériau à changement de phase utilisé est la paraffine choisie en référence à la majorité des travaux antérieurs qui s'intéressent aux MCP et qui ont utilisé les paraffines en raison de leur disponibilité et aussi leur considération économique (prix moins cher).

Les résultats des simulations ont focalisé sur l'évolution des températures de l'air à différents niveaux, à savoir des niveaux horizontaux, des colonnes verticales, à la sortie du capteur, intégré par une couche de MCP, et à la sortie de la cheminée solaire. Ce cas a été simulé et comparé avec la même configuration sans MCP.

Dans cette partie d'étude qui constitue une continuité du travail de Messaoud Sandali et *al.* [93], nous nous sommes intéressés à étudier l'effet de l'intégration de MCP au niveau du capteur solaire plan figure (4.35) sur l'opération de séchage d'une part, et d'autre part sur la ventilation naturelle par cheminée solaire tel que c'est montré par les parties précédentes.

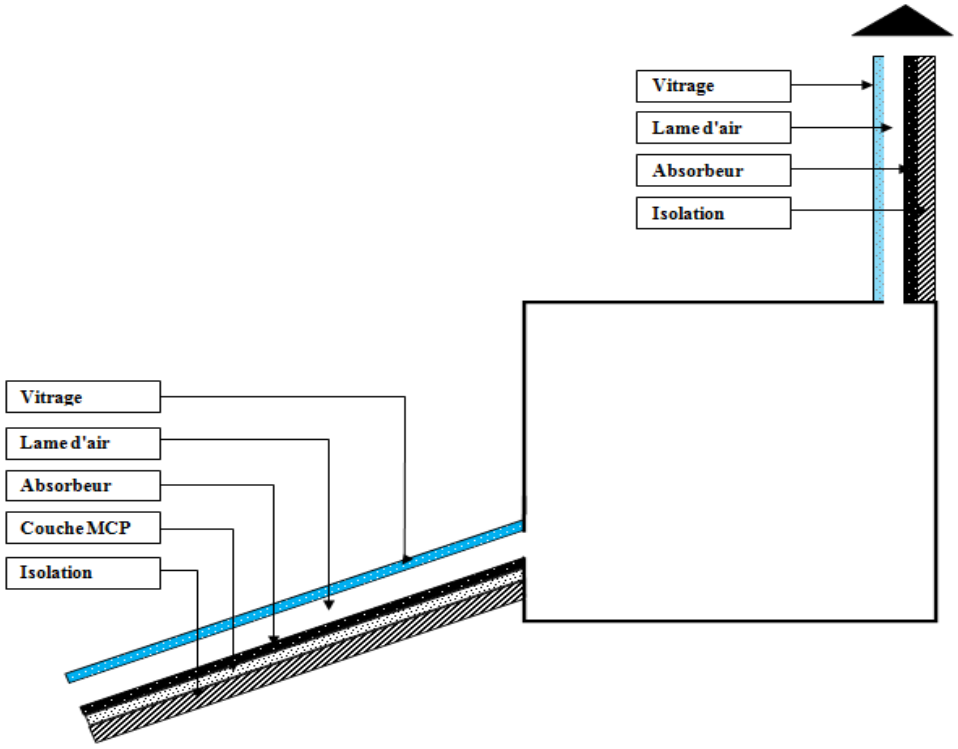


Figure (4.35) : Schéma descriptif du séchoir avec intégration de MCP au capteur d'admission

4.7.1 Distribution de température dans le séchoir

Le comportement thermique du séchoir solaire avec et sans intégration de MCP au niveau du capteur d'admission est représenté sur la figure (4-36). L'examen de cette figure indique clairement une absence d'homogénéité dans les deux cas de capteur sans et avec MCP, et la température à l'intérieur de la chambre est presque la même avec un petit écart ΔT=2°C ou le cas sans MCP à une température T= 47°C et le cas avec MCP à une température de 45°C, sachant que ce résultat est pris à 14h où il n'y a pas l'influence de déstockage de MCP.

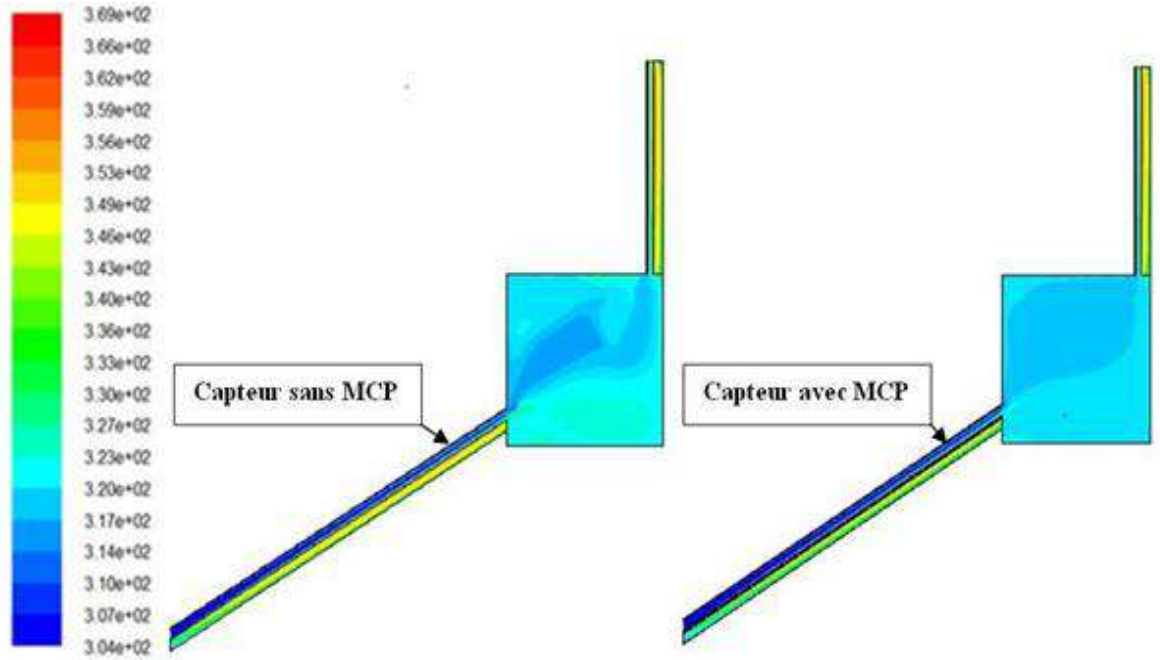


Figure (4.36) : Champ de température au sein du séchoir dans le cas de capteur sans et avec MCP

4.7.2 Variation des températures dans différents points du séchoir

Les figures (4.37) et (4.38) représentent la variation de la température dans la chambre de séchage au niveau des étages en fonction de temps et à la sortie du capteur et de la cheminée dans le cas d'intégration d'une épaisseur de 1cm d'une couche de MCP dans le capteur d'admission. On remarque que les valeurs des températures dans la chambre de séchage aux différents étages de la chambre indiquent que le taux d'homogénéité est convenable, mais à un écart de température ΔT de [2 à 3 °C]. D'autre part nous avons

remarqué l'augmentation de température à la sortie de la cheminée à une valeur de T=59°C. Cela explique l'effet de la cheminée solaire sur l'augmentation de la vitesse de ventilation (0,76m/s) en raison du gradient de température entre l'entrée et la sortie de la cheminée.

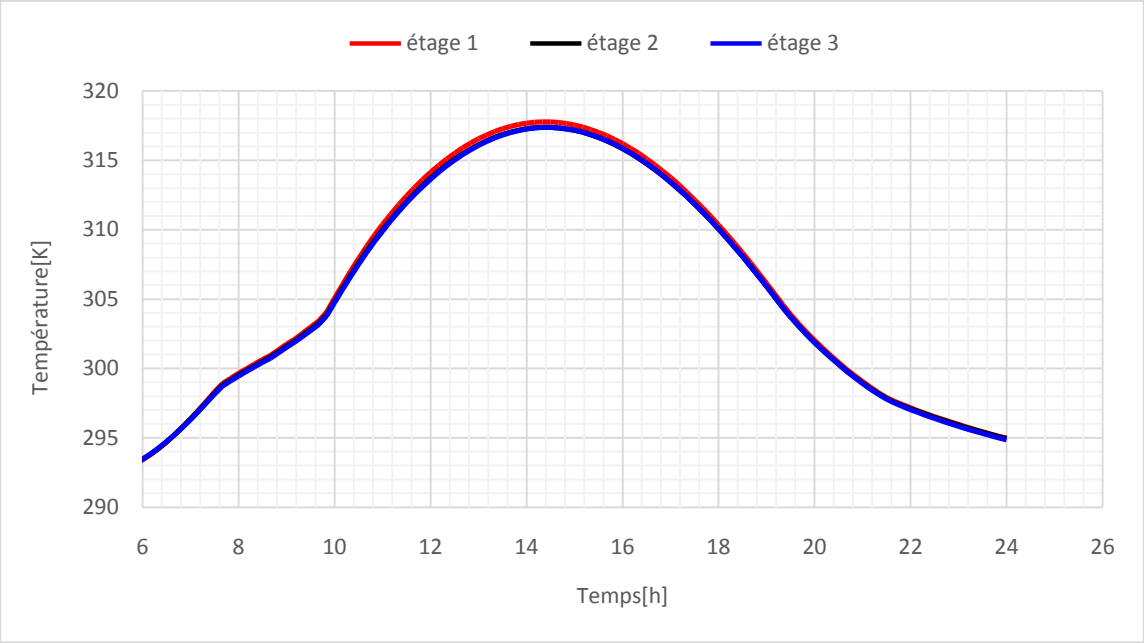


Figure (4.37) : Température dans la chambre au niveau des étages horizontaux

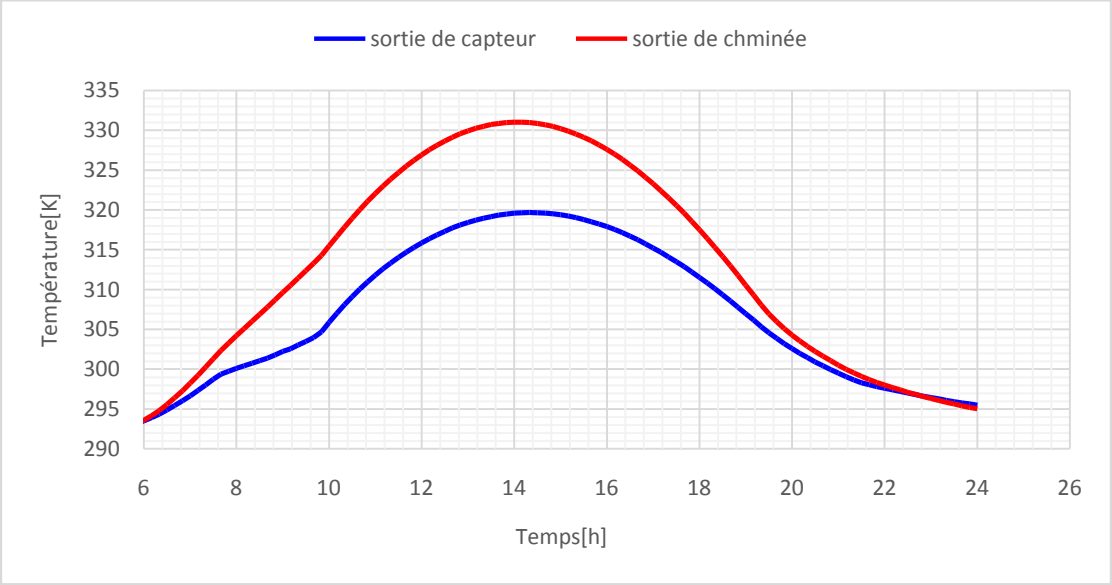


Figure (4.38) : Température aux sorties de la cheminée et du capteur avec MCP

7.4.3 Comparaison de la variation de température à la sortie du capteur et la cheminée dans le cas du capteur avec MCP

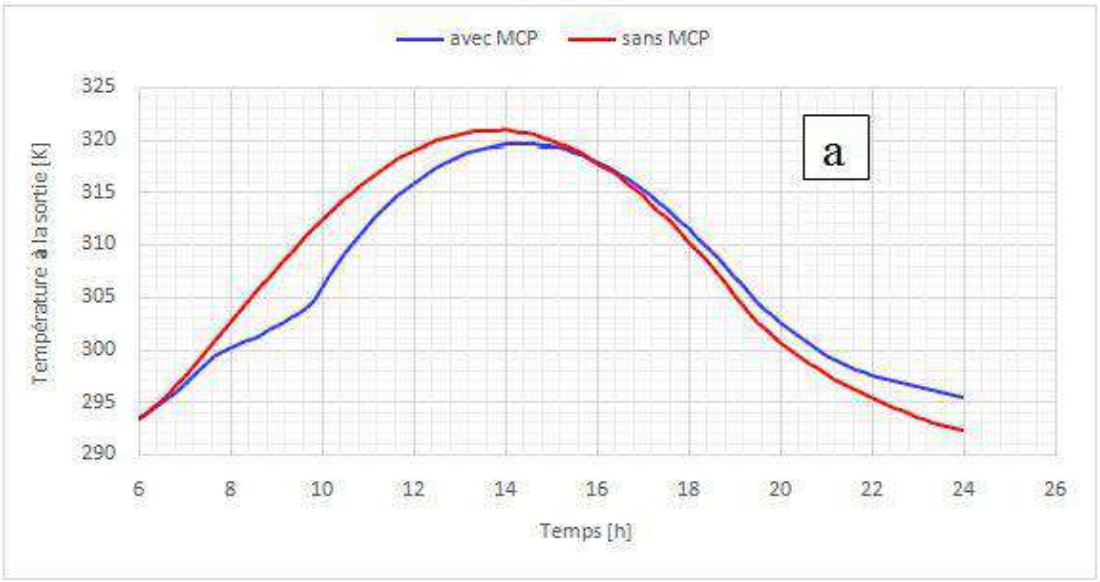
La variation de la température à la sortie du capteur et de la cheminée avec et sans MCP est représenté sur la figure (4-39) a et b. Sur la base de l'analyse des résultats obtenus on peut décomposer la courbe relative à la variation de la température de la figure (439) a en trois périodes :

- [7:30h - 14:00] dans cette période la courbe de MCP présentent une inflexion à 7:30 h avec une température entre 27 et 32 °C ; cette inflexion revient aux changements de phase, la durée de changement de phase est maximale puisque le MCP stocke une quantité de chaleur latente.

- [10 - 16 :15] On remarque que la courbe sans MCP est supérieure par rapport celle avec MCP puisque le MCP fait le stockage de la chaleur sensible jusqu'à 14 :30 h.

- [16 :15 - 00 :00] la courbe de MCP présente une deuxième inflexion à l'environ de 18 h, la température de la courbe avec MCP reste supérieure à celle sans MCP dans la période de décroissance des températures. L'importance de cette période est qu'elle présente l'effet de déstockage de la chaleur latente du MCP sur la température de sortie du capteur. Le gain en température dû au déstockage de la chaleur va nous garantir l'extension du temps de séchage.

La figure (4.39)b représente la comparaison entre la variation de température à la sortie de la cheminée solaire dans les cas de capteur avec et sans MCP, on peut remarquer que la température à la sortie de cheminée (capteur sans MCP) est supérieure à celle correspondante au capteur avec MCP à un petit écart de température de 2°C entre (7h30-13h), cette dernière période est la période de stockage d'énergie par la chaleur sensible du MCP et après jusqu'à 00:00 les courbes de ces deux cas se conversent puisque c'est la période de déstockage de l'énergie. Ce phénomène assure une vitesse de ventilation convenable pour une application de séchage.



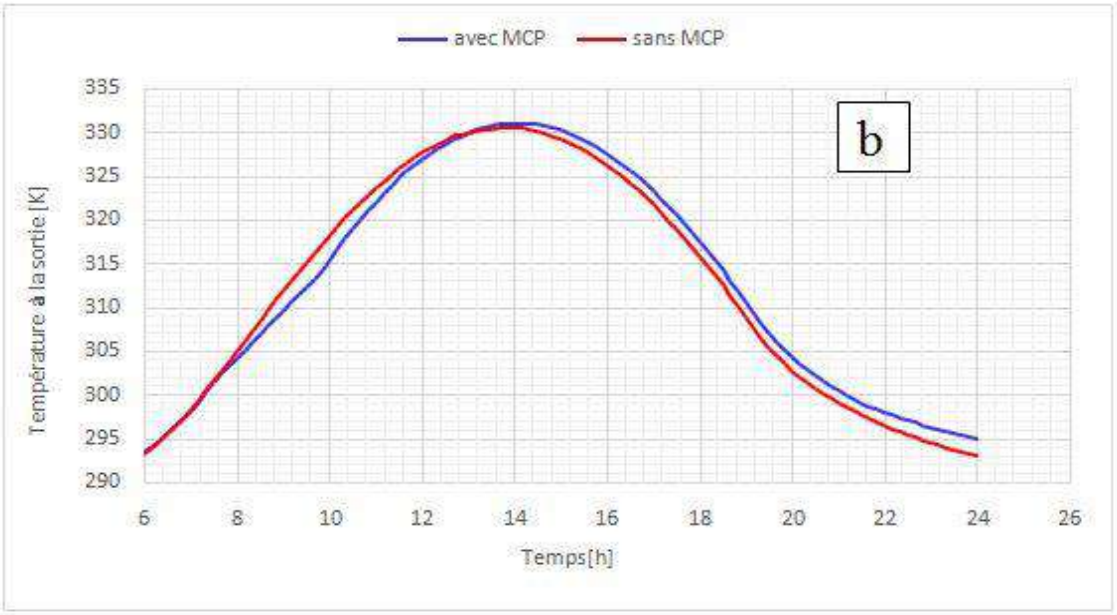


Figure (4.39) : Variation de température à la sortie de capteur (a), et de cheminée (b)

Conclusion générale

Le travail présenté dans cette thèse concerne la contribution à l'étude d'amélioration des performances thermiques d'un capteur solaire plan à air pouvant être destiné aux applications du séchage solaire. On s'est intéressé à étudier, par les moyens de l'expérience et celui de la simulation numérique, l'influence de certains paramètres de performances du séchage solaire indirect par convection libre de l'air chaud qui est assuré par un capteur solaire plan à air, ce dernier étant connecté directement à une chambre de séchage.

Une investigation expérimentale à été menée en vue d'examiner les effets des paramètres géométriques et thermo-physiques sur la performance des capteurs solaires plans utilisés avec les séchoirs solaires. L'étude à porté sur différents prototypes de capteurs, conçus et réalisés au laboratoire LENREZA de l'université de Ouargla, qui se distinguent par leurs dimensions, par la nature de leurs composants (absorbeur, isolation..) et par le parcours d'écoulement d'air (simple passage et double passage).

Une première série d'expérience a été faite sur 04 prototypes de capteurs aux mêmes dimensions avec différents matériaux isolants. Les résultats correspondants montrent que l'utilisation d'isolation thermique à base de bio-matériaux locaux tels que les fibres de palmier offre une bonne efficacité du capteur comparée aux autres capteurs avec un moindre cout. Une deuxième série d'essais a porté sur deux capteurs de plus grande taille conçus pour simple et double passage de l'air. Les résultats, dans ce cas, ont montré que les performances du capteur à simple passage sont meilleures que celui à double passage. Cette même constatation a été revérifiée lors de la troisième série d'expériences où les capteurs étaient raccordés à la même chambre de séchage.

Dans la suite du travail accompli par l'outil de simulation numérique, nous avons adopté le capteur solaire choisi à partir des résultats expérimentaux, celui-ci a été ensuite modifié selon différentes configurations simulées. L'effet des modifications apportées sur la configuration géométrique a été alors étudié et discuté. Les modifications de la forme géométrique du capteur solaire consistaient à limiter ou minimiser les points d'accumulation de température au sein de la chambre (stratification thermique) avec un choix judicieux des composants des capteurs. Les résultats obtenus des différentes simulations ont montré que dans le cas de la conception réelle, pour les différentes journées considérées, la distribution des températures dans la chambre de séchage était non homogène et l'écart de température entre l'entrée et la sortie du capteur était sensiblement faible en cas de vitesse d'entrée élevée

(vent). Par ailleurs en cas de faible vitesse d'air à l'entrée du capteur, la distribution des températures au sein de la chambre de séchage est presque homogène et même l'écart de température entrée/sortie du capteur est important. Suite aux modifications proposées sur la géométrie du capteur (longueur/largeur) dans les deux jours typiques de Mai et Novembre (forte et faible vitesse de l'air entrant) par ordre, on a pu conclure que le prototype avec une longueur de 4m et une largeur de 2m donne une bonne influence sur la distribution des températures dans la chambre spécialement pour les jours ayants une vitesse élevée à l'entrée du capteur. Les résultats de simulation numérique obtenus à partir des différentes catégories de capteurs solaires considérés (longueur et largeur) permettent de conclure que les modifications de la géométrie ont donné une vision d'un choix meilleur de séchoir solaire à partir des facteurs importants de la forme.

D'autre part on a étudié l'amélioration des apports thermiques d'un capteur solaire plan à air dans les périodes de faible ou non ensoleillement. Cette étude a porté sur la simulation numérique du capteur solaire sans et avec intégration d'une couche plate d'un matériau à changement de phase dans l'objectif de stocker partiellement l'énergie thermique par chaleur latente. Les résultats obtenus dans cette partie d'étude, dans le cas d'absence de MCP, n'ont pas révélé d'améliorations sensibles pour les différentes configurations proposées. Par ailleurs, les résultats issus du cas d'intégration d'une couche de MCP ont montré une nette amélioration du comportement thermique, notamment en période après coucher du soleil. En effet parmi les épaisseurs testées la couche de 1cm donnait un meilleur apport thermique pour deux heures de non ensoleillement, tandis que le MCP à température de fusion à 72°C se montrait meilleur parmi les autres matériaux testés, avec une ventilation naturelle convenable de l'ordre de 0,7 à 0,9 m/s.

Sur la base des résultats de simulation numérique sans intégration des matériaux de changement de phases on peut dire que pour un système de séchage solaire des produits agroalimentaires nous pouvons accepter le choix d'une cheminée solaire à épaisseur de lame d'air de 3cm positionnée coté nord. Cette conception assure une vitesse de ventilation naturelle de 0,7m/s, une température à la sortie de cheminée de 58°C et une température de séchage convenable, à condition de trouver une solution de l'homogénéité de distribution de température à l'intérieur de la chambre de séchage. La lame de passage d'air de 5cm garantie plus d'homogénéité de distribution mais avec une température et une vitesse d'extraction un peu faibles. Cette épaisseur peut être utile pour les applications de séchage de certains produits agroalimentaires thermosensibles.

Enfin les différentes investigations expérimentales et numériques entamées au cours de cette thèse confirment l'utilité des différentes techniques étudiées dans l'objectif d'amélioration des résultats des opérations de séchage solaire par solutions techniques apportées sur les capteurs solaires plans comme étant la source d'apport de chaleur nécessaire au processus de séchage.

Références bibliographique

[1] Eddine, BoukeliaTaqiy, and Mecibah Med Salah. "Solid waste as renewable source of energy: current and future possibility in Algeria." *International Journal of Energy and Environmental Engineering* 3.1 (2012): 17.

[2] Stambouli, Amine Boudghene. "Promotion of renewableenergies in Algeria: strategies and perspectives." *Renewable and SustainableEnergyReviews* 15.2 (2011): 1169-1181.

[3] Mr. Amraoui Mohammed Amine, "Etude numérique d'un capteur solaire plan à air Influence de la forme de la rugosité" Mémoire de magister, 2012

[4] Dharmalingam, R., et al. "OptimizationStudies on the Performance Characteristics of Solar Flat-Plate CollectorUsingTaguchiMethod." *Middle-East Journal of Scientific Research*23.5 (2015): 861-868.

[5] Duffie, John A., and William A. Beckman. "Solar engineering of thermal processes. Hoboken." (2013).

[6] M. Capderou, "Atlas solaire de l'Algérie", Tome 1, Vol. 1 et 2 ; OPU, 1987.

[7] A.Mefti, M.Y.Bouroubi, and H. Mimouni. "Evaluation du potentiel énergétique solaire." *Bulletin des énergies renouvelables* 2 (2002).

[8] Amraoui, Mohammed Amine. "NumericalStudy of the Three-dimensional Flow in a Flat Plate SolarCollectorwithBaffles."*Congrès français de mécanique*. AFM, Association Française de Mécanique, 2015.

[9] Chassériaux, Jean-Michel. *Conversion thermique du rayonnement solaire*. Dunod, 1984.

[10] N. Hamani et al Simulation de la température de sortie de l'eau dans un capteur solaire cylindro-parabolique dans le site de Biskra, Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°2 (2007) 215 – 224

[11] Kamel Abdeladimet and al, "RENEWABLE ENERGIES IN ALGERIA: CURRENT SITUATION AND PERSPECTIVES", *29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Conference Paper* · September 2014, DOI: 10.13140/2.1.1600.4808

[12] Stambouli, Amine Boudghene. "Promotion of renewableenergies in Algeria: strategies and perspectives." *Renewable and SustainableEnergyReviews* 15.2 (2011): 1169-1181.

[13] Tian, Yuan, and Chang-Ying Zhao. "A review of solarcollectors and thermal energystorage in solar thermal applications."*Appliedenergy* 104 (2013): 538-553.

[14] Pandey, Krishna Murari, and Rajesh Chaurasiya. "A review on analysis and development of solar flat plate collector."*Renewable and SustainableEnergyReviews* 67 (2017): 641-650.

[15] Jannot, Yves. "Thermique Solaire', 2011."

[16] Alghoul, M. A., et al. "Review of materials for solar thermal collectors." *Anti-Corrosionmethods and materials* (2005).

[17] Tian, Yuan, and Chang-Ying Zhao. "A review of solarcollectors and thermal energystorage in solar thermal applications."*Appliedenergy* 104 (2013): 538-553.

[18] Bouzaffa Med, "Les Capteurs Solaires Plans », mémoire magister", Université de Ouargla. 2010

[19] SANDALI, Messaoud. Etude dynamique et thermique d'un capteur solaire à air à double passe avec milieu poreux. Diss. 2014.

[20] Aliane, K., and M. A. Amraoui. "Etude numérique d'un capteur solaire plan à air ayant une rugosité rectangulaire." *Revue des Energies Renouvelables* 16.1 (2013): 129-141.

[21] M. Sandali, A.N. Korti, "Amélioration des performances thermiques du capteur solaire" 10èmes Journées de Mécanique de l'EMP (JM'10–EMP), November 2016

[22] Dalila, A. "Optimisation Du Rendement D'un Capteur Solaire Par Minimisation Des Pertes Convectives."Mémoire de Magister, Université ELHADJ LAKHDAR, BATNA (Algerie) (2009).

[23] Yeh, Ho-Ming, and Tong-Tshien Lin. "The effect of collector aspect ratio on the collectorefficiency of flat-plate solar air heaters." *Energy* 20.10 (1995): 1041-1047.

[24] Mohamad, A. A. "High efficiencysolar air heater." *Solar energy*60.2 (1997): 71-76.

[25] Benkhelifa, A. "Optimisation d'un capteur solaire plan." *Revue des Energies Renouvelables* (1998): 13-18.

[26] Ahmad, N. T. "Agricultural solar air collector made fromlow-cost plastic packing film." *RenewableEnergy* 23.3-4 (2001): 663-671.

[27] Ahmed-Zaïd, A., et al. "Amelioration des performances des capteurs solaires plans a air: application au sechage de l'oignon jaune et du hareng." Rev. Energ. Ren 4 (2001): 69-78.

[28] Kurtbas, Irfan, and EmreTurgut. "Experimental investigation of solar air heaterwith free and fixed fins: efficiency and exergyloss." International Journal of Science &Technology 1.1 (2006): 75-82.

[29] Aoues, K., et al. "Amélioration des performances thermiques d'un capteur solaire plan à air: Etude expérimentale dans la région de Biskra." Revue des Energies Renouvelables 12.2 (2009): 237-248.

[30] Ahmed-Zaïd, A., et al. "Amelioration des performances des capteurs solaires plans a air: application au sechage de l'oignon jaune et du hareng." Rev. Energ. Ren 4 (2001): 69-78.

[31] MA, Amraoui. "Numericalanalysis of a threedimensionalfluid flow in a flat plate solarcollector." International Journal of Sustainable and Green Energy 3.3 (2014): 68.

[32] Wang, Chongjie, et al. "Numerical simulation study on transpiredsolar air collector." (2006).

[33] Amraoui, Mohammed Amine. "NumericalStudy of the Three-dimensional Flow in a Flat Plate SolarCollectorwithBaffles."Congrès français de mécanique. AFM, Association Française de Mécanique, 2015. http://hdl.handle.net/2042/57085

[34] A.Fudholi et al, "Heat Transfer Correlation for the V-Groove Solar Collector", 8th WSEAS International Conference on SIMULATION, MODELLING and OPTIMIZATION (SMO '08) Santander, Cantabria, Spain, September 23-25, 2008 ISS

[35] Youcef, A. "Simulation numérique du comportement dynamique et thermique d'un écoulement d'air à travers un canal muni des chicanes sous forme aile (Application aux capteurs solaires plans à air)." Revue des Energies Renouvelables 20.3 (2017): 521-529.

[36] Ndiaye, Mame Mor Diarra. Optimisation d'un capteur solaire double passe à air et estimation des échanges de chaleur paroi-fluide. Diss. 2018.

[37] Yelles, Fayza Ben, et al. "Comparaison entre un capteur à aérogel de silice et d'autres capteurs plans." 2007.

[38] Turgut, Oğuz, and NevzatOnur. "Threedimensionalnumerical and experimentalstudy of forced convection heattransfer on solarcollector surface." International Communications in Heat and Mass Transfer 36.3 (2009): 274-279.

[39] Musa, Elradi A., K. Sopian, and Shahrir Abdullah. "Heattransferanalysis and pressure drop correlations for the double-passsolarcollectorwithporous media." Journal of Energy&Environment 3 (2004): 15-24.

[40] Kabeel, AbdElnaby, et al. "Solar air heaters: Design configurations, improvementmethods and applications–A detailedreview." Renewable and SustainableEnergy Reviews70 (2017): 1189-1206.

[41] Sandali, Messaoud, et al. "A simulation study of a solarcollectorusing phase change materials for air heating application needs."AIP ConferenceProceedings. Vol. 1814. No. 1. AIP Publishing LLC, 2017.

[42] Les Centrales Solaires à Concentration Université de Liège Faculté des sciences appliquées Mai 2007 Quoilin Sylvain Ingénieur Civil Electromécanicien/Energéticien

[43] Tagliafico, Luca A., Federico Scarpa, and Mattia De Rosa. "Dynamic thermal models and CFD analysis for flat-plate thermal solarcollectors–A review." Renewable and SustainableEnergyReviews 30 (2014): 526-537.

[44] Guehza Med lazhar and A Kaabi " Effect of the Space between Two Glasses on the Solar Sensor Performance of Plan in Double-Glazed Collector" Journal of Fundamental and Applied Sciences 2010, 2(1), 122-137

[45] BENLAHMIDI, Said. Etude du séchage convectif par l'énergie solaire des produits rouges. Diss. Université Mohamed Khider–Biskra, 2013.

[46] Benkhelfellah, Ryad, et al. "'Séchoirs solaires. Etude comparative de la cinétique de séchage des produits agroalimentaires dans des modèles de type direct et indirect."12èmes Journées Internationales de Thermique, Morocco(2005): 259-262.

[47] Mennouche, D., et al. "Amélioration d'un procédé de séchage solaire direct destiné pour le séchage de la pâte de tomate.", Algérie(2005).

[48] Mennouche, D., et al. "Séchage solaire de la tomate dans un séchoir indirect à convection naturelle." Conférence Internationale sur le Génie des Procédés-CIGP, Algeria(2007).

[49] ELkhadraoui, Aymen, et al. "Experimental investigation and economicevaluation of a new mixed-mode solargreenhousedryer for drying of redpepper and grape." Renewableenergy 77 (2015): 1-8.

[50] Chouicha, Samira, et al. "Contribution à l'amélioration énergétique d'un séchoir solaire hybride utilisant l'appoint d'énergie par cellules photovoltaïques.", Algérie(2012).

[51] Boubekri, A., Et Al. "Exploitation D'un Sechoir Solaire Hybride Pour La Valorisation Des Dattes SechesPrehydratees." , Maroc(2010).

[52] Tabet, Ismail. "Étude, Réalisation et simulation d'un capteur solaire." (2016).

[53] Oudjedi, S., et al. "Etude théorique et expérimentale d'un capteur solaire à air destiné au séchage (Partie: 1)."Journal of Renewable Energies SMSTS 8 (2009): 237-248.

[54] Kaoulal, Rabéa, et al. "Modélisation numérique d'un capteur solaire plan à air fonctionnant en régime transitoire en vue d'intégration au bâtiment." Conférence IBPSA France-Arras-2014.

[55] Aissa, Walid, Mostafa El-Sallak, and Ahmed Elhakem. "An experimental investigation of forced convection flat plate solar air heaterwithstoragematerial." Thermal Science16.4 (2012): 1105-1116.

[56] Rencontre nationale sur le séchage (Bousmail, Alger 17-18 Fév. 2018)

[57] Bahrehmand, D., and M. Ameri. "Energy and exergyanalysis of differentsolar air collectorsystemswithnatural convection." RenewableEnergy 74 (2015): 357-368.

[58] Rahman, S. M. A., R. Saidur, and M. N. A. Hawlader. "An economicoptimization of evaporator and air collector area in a solarassistedheatpumpdrying system." Energy conversion and management 76 (2013): 377-384.

[59] Khouya, Ahmed, JaâfarBenabdelouhab, and Abdeslam Draoui. "Simulation numérique des transferts thermiques dans un système de séchage solaire du bois." 2007.

[60] El Khadraoui, Aymen, et al. "Thermal behavior of indirect solardryer: Nocturnal usage of solar air collectorwith PCM." Journal of cleaner production 148 (2017): 37-48.

[61] Ayadi, M., I. Zouari, and A. Bellagi. "Simulation d'une association d'un capteur solaire à air et un stock pour une unité de séchage solaire." Revue des Énergies Renouvelables SMSTS 8 (2009): 25-34.

[62] M. Sandali, A.N. Korti, "Amélioration des performances thermiquesdu capteur solaire", 10ème édition des journées de Mécanique (JM'10–EMP) les 12 et 13 avril 2016

[63] Ferdjani, Ahmed Taha. "Développement d'un logiciel de simulation des performances thermiques des capteurs solaires plans." (2013).

[64] Moummi, N., et al. "Le rafraîchissement par la géothermie: étude théorique et expérimentale dans le site de Biskra."Revue des Energies Renouvelables 13.3 (2010): 399-406.

[65] Baissi, M., et al. "Etude paramétrique théorique et expérimentale d'un capteur solaire plan à air.", Algérie(2014).

[66] Hassan, Marwa M., and Yvan Beliveau. "Design, construction and performance prediction of integratedsolar roof collectorsusingfiniteelementanalysis." Construction and Building Materials 21.5 (2007): 1069-1078.

[67] Zhang, Ruichao, and Jibo Long. "Study on dryinguniformity of staticsmall-sizeddrying box for fruits and vegetables."Procedia Engineering 205 (2017): 2615-2622.

[68] Abdulmalek, ShaymaaHusham, et al. "A comparative analysis on the uniformityenhancementmethods of solar thermal drying." Energy 148 (2018): 1103-1115.

[69] Song, Myeongho, Kyoungyoun Kim, and Hyung-Kee Yoon. "NumericalStudy of the Enhancement of Flow Uniformity in a TrayDryerChamber." *신재생에너지*/12.3 (2016): 68-73.

[70] Misha, Suhaimi, et al. "The prediction of dryinguniformity in traydryer system using CFD simulation." International Journal of Machine Learning and Computing 3.5 (2013): 419.

[71] Tzempelikos, D. A., et al. "Analysis of air velocity distribution in a laboratory batch-type tray air dryer by computationalfluiddynamics." International journal of mathematics and computers in simulation 5.6 (2012): 413-421.

[72] A. Babahani, D. Halassa, A. Boubekri, D. Mennouche, H. Belahia, INVESTIGATION EXPERIMENTALE D'UN SECHOIR SOLAIRE INDIRECT EN VUE DE STABILISATION DES CONDITIONS OPERATOIRES , Proc. of 5ème Séminaire Maghrébin sur les Sciences et les Technologies du Séchage, Ouargla - Algeria, (2015) 419-424

[73] M. O. Hamdan et al., Renewable Energy: Generation and Applications, (eds.), ICREGA'14 - 2014

[74] Zalba, Belen, et al. "Review on thermal energystoragewith phase change: materials, heattransferanalysis and applications." Applied thermal engineering 23.3 (2003): 251-283.

[75] Caron-Soupart, A. Stockage de chaleur dans les matériaux à changement de phase. Diss. Thèse de Doctorat, sous la direction de Philippe Marty, Université Grenoble Alpes-Spécialité Mécanique des fluides, énergétiques et procédés, 2015.

[76] Ango, Serge Ekomy. Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment: développement d'un système actif à matériaux à changement de phase. Diss. 2011.

[77] Ahmad, Maha. Nouveaux composants actifs pour la gestion énergétique de l'enveloppe légère des bâtiments. Couplage matériaux à changement de phase, super-isolation, apports solaires. Diss. Grenoble 1, 2004.

[78] S. Buflino, Les matériaux à changement de phase, 2008 Dossier thématiques "Enterprise Europe network

[79] Gil, Antoni, et al. "Materialselection and testing for thermal energystorage in solarcooling." RenewableEnergy 57 (2013): 366-371.

[80] Sharma, Atul, et al. "Review on thermal energystoragewith phase change materials and applications." Renewable and Sustainableenergyreviews 13.2 (2009): 318-345.

[81] Abhat, A. "Lowtemperature latent heat thermal energystorage: heatstoragematerials." Solarenergy 30.4 (1983): 313-332.

[82] Alam, Tanvir E., et al. "Macroencapsulation and characterization of phase change materials for latent heat thermal energystoragesystems." AppliedEnergy 154 (2015): 92-101.

[83] Xu, Ben, Peiwen Li, and Cholik Chan. "Application of phase change materials for thermal energystorage in concentratedsolar thermal power plants: a review to recentdevelopments." AppliedEnergy 160 (2015): 286-307.

[84] Murthy, MV Ramana. "A review of new technologies, models and experimental investigations of solardriers."Renewable and SustainableEnergyReviews 13.4 (2009): 835-844.

[85] HOUHOU, HATEM. Etude théorique et expérimentale du séchage solaire de certains produits agro-alimentaires. Diss. Université Mohamed Khider–Biskra, 2012.

[86] Shinada, Yoshiteru, et al. "Natural ventilation system for a school building combinedwithsolarchimney and underground pit." Proceedings of Clima. 2007.

[87] Mathur, J., and Mathur S. Anupma. "Experimental investigation on four different types of solarchimneys."Advances in EnergyResearch 12.6 (2006): 151-156.

[88] Données de source « Data base » de Fluent.

[89] D. Halassa, A. Arbia, O. Chaoubi, A. Boubekri, M. Announ, H. Belahya, ETUDE NUMERIQUE DES TRANSFERTS THERMIQUES D'UN CAPTEUR SOLAIRE PLAN A AIR DESTINE AUX APPLICATIONS DE SECHAGE, Proc. of 5ème Séminaire Maghrébin sur les Sciences et les Technologies du Séchage, Ouargla-Algeria, (2015) 82-86

[90] Alam, Tanvir E., et al. "Macroencapsulation and characterization of phase change materials for latent heat thermal energystoragesystems." AppliedEnergy 154 (2015): 92-101.

[91] Khalifa, Abdul Jabbar N., Kadhim H. Suffer, and Mahmoud Sh Mahmoud. "A storagedomesticsolar hot water system with a back layer of phase change material." Experimental Thermal and Fluid Science 44 (2013): 174-181.

[92] AKCHICHE, Zineb. "Etude de comportement d'une cheminée solaire en vue de l'isolation thermique." Mémoire de magistère, Université KasdiMerbah, Ouargla (2011).

[93] Sandali, Messaoud, et al. "A simulation study of a solarcollectorusing phase change materials for air heating application needs." AIP ConferenceProceedings. Vol. 1814. No. 1. AIP Publishing LLC, 2017.

[94] Lati, M., et al. "Experimental investigation on effect of an absorber plate covered by a layer of sand on the efficiency of passive solar air collector." International journal of green energy 16.6 (2019): 413-422.

[95] Les données du Data base de Fluent.

[96] Chen, Zhenqian, MingweiGu, and Donghua Peng. "Heattransfer performance analysis of a solar flat-plate collectorwith an integratedmetalfoamporous structure filledwithparaffin." Applied Thermal Engineering 30.14-15 (2010): 1967-1973.

[97] Khalifa, Abdul Jabbar N., Kadhim H. Suffer, and Mahmoud Sh Mahmoud. "A storagedomesticsolar hot water system with a back layer of phase change material." Experimental Thermal and Fluid Science 44 (2013): 174-181.

[98] Benmansour, Nadia. "Etude des performances de produits renouvelables et locaux adaptés aux applications de l'isolation thermique dans le bâtiment." Mémoire de magister, Université El Hadj Lakhdar-Batna, Algérie (2011).

[99] Benmansour, Nadia, et al. "Thermal and mechanical performance of naturalmortarreinforcedwith date palm fibers for use as insulatingmaterials in building." Energy and Buildings 81 (2014): 98-104.

[100] Chikhi, Mourad. Métrologie et Modélisation des Transferts dans les Composites Naturels à Faible Coût pour l'Isolation Thermique dans le Bâtiment en Algérie. Diss. Thèse de Magister Université Hadj Lakhdar, Batna, 2010.

[101] Oudjedi, S., et al. "Etude paramétrique d'un capteur solaire plan à air destiné au séchage (Partie: 2)." Revue des Energies Renouvelables SMSTS 8 (2008): 255-266.

[102] Naphon, Paisarn. "Effect of porous media on the performance of the double-pass flat plate solar air heater."International communications in heat and mass transfer32.1-2 (2005): 140-150.