

N° d'ordre 3216

# THESE

En vue de l'obtention du : **DOCTORAT**

Centre de Recherche : Centre de Recherche en Energie  
Structure de Recherche : Equipe d'Energie Solaire et d'Environnement  
Discipline : Physique  
Spécialité : Energétique

Présentée et soutenue le 29/06/2019 par :

**Hajar Essalhi**

**Etude, conception et réalisation  
d'un séchoir solaire à séchage indirect**

## JURY

Mohammed REGRAGUI	PES, Université Mohammed V, Faculté des Sciences, Rabat	Président
Rachid TADILI	PES, Université Mohammed V, Faculté des Sciences, Rabat	Directeur
Najem HASSANAIN	PES, Université Mohammed V, Faculté des Sciences, Rabat	Rapporteur/Examinateur
Abdellah MECHAQRANE	PES, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Faculté des Sciences et Techniques, Fès	Rapporteur/Examinateur
Med Najib BARGACH	PES, Université Mohammed V, Faculté des Sciences, Rabat	Invite

Année Universitaire : 2018-2019

# Dédicaces

Je remercie mes parents et ma sœur qui ont su me soutenir, me supporter, m'encourager...pendant toute la durée de ma thèse et plus particulièrement durant les derniers mois de rédaction qui n'ont pas toujours été des plus agréables. Cette thèse et moi vous devons beaucoup. Merci ma famille.

## Remerciements

Ce travail de thèse a été réalisé au Laboratoire d'Énergie Solaire et d'Environnement (LESE) au Département de Physique à la Faculté des Science de l'Université Mohammed V Rabat.

J'aimerais tout d'abord remercier mon directeur de thèse, le Professeur **Rachid TADILI**, pour la confiance qu'il m'a accordée en acceptant d'encadrer mon travail. Ses multiples conseils, sa patience, sa disponibilité et sa capacité d'analyse et son enthousiasme m'ont montré que le monde de la recherche pouvait être un univers passionnant. J'ai beaucoup appris à ses côtés. Ses nombreuses relectures et corrections de cette thèse ont été très appréciables et je lui adresse toute ma gratitude.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à Monsieur, **Mohammed REGRAGUI**, Professeur à la Faculté des Science Rabat pour avoir accepté de présider le jury de la soutenance de ce travail.

Je tiens à remercier Monsieur **Najem HASSANAIN**, Professeur à la Faculté des Science Rabat pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail en acceptant de participer à mon jury de thèse en qualité de rapporteur de mon travail.

Je suis très honorée de remercier Monsieur **Abdellah MECHAQRANE**, Professeur à Faculté des Sciences et Techniques de Fès, pour sa participation à mon jury de thèse en qualité de rapporteur de mon travail et pour toutes ses remarques intéressantes qu'il m'a faites.

J'adresse mes remerciements à Monsieur **Mohammed Najib BARGACH**, Professeur à la Faculté des Sciences Rabat, pour ses conseils jugés aussi bien nombreux que profitables, qui a accepté de juger et de faire partie du jury de notre travail.

Ce travail été soutenu par l'Institut de Recherche en Energie Solaire et Energie Nouvelles au Maroc (IRESEN) dans le cadre du projet Inno Project Solar Thermal-13-FSS.

Je remercie toute l'équipe du laboratoire pour son soutien et pour les années de coopération passées ensemble.

Enfin, je remercie l'ensemble des étudiants de PFE et du Master qui ont contribué à ce travail.

## Résumé

Le séchage est un procédé important dans la chaîne agroalimentaire. Il consiste à éliminer totalement ou partiellement l'eau d'un produit humide. L'énergie solaire est une alternative pour les pays en voie de développement, tel que: le Maroc, et qui sont dépourvus de richesses énergétiques conventionnelles. Le séchage solaire est donc un procédé de conservation qui favorise le stockage des aliments et qui utilise l'énergie solaire comme source de chauffage. Un séchoir solaire indirect a été conçu et construit au Laboratoire d'Énergie Solaire et d'Environnement (LESE). L'étude expérimentale menée dans ce mémoire a porté sur l'évaluation du rendement du capteur solaire à air, ainsi que sur le rendement global du séchoir solaire indirect et l'effet de stockage d'énergie sur le procédé de séchage pendant la nuit. Cette étude a révélé que le mode de convection naturelle est le mieux adapté pour notre séchoir qui nous permet d'avoir une température d'air asséchant élevée, un débit convenable et un rendement du capteur de 65%. La dernière partie du travail a été réservée à l'étude des caractéristiques de la cinétique de séchage des raisins lors du séchage à l'air libre et dans le séchoir solaire indirect. Les résultats expérimentaux ont été confrontés avec dix modèles mathématiques de séchage existant dans la littérature.

---

**Mots-clefs:** séchage solaire, séchage à l'air libre, rendement, cinétique de séchage, modèle de séchage.

## Abstract

Drying is an important process in the food chain. It consists of completely or partially removing water from a wet product. Solar energy is an alternative for developing countries, such as: Morocco, which lack of conventional energy wealth. Therefore, solar drying is a conservation process that promotes food storage and uses solar energy as a source of heat. An indirect solar dryer was designed and constructed at the Solar Energy and Environment Laboratory (LESE). The experimental study conducted in this thesis focused on the evaluation of the efficiency of the solar air collector, as well as on the overall efficiency of the indirect solar dryer and the effect of energy storage on the drying process during the night. This study revealed that the natural convection mode is best suited for our dryer that allows us to have a high drying air temperature, a suitable flow rate and a collector efficiency of 65%. The last part of the work was devoted to studying the characteristics of the drying kinetics of grapes during drying in the open air and in the indirect solar dryer. *The experimental results were compared with ten mathematical models of drying existing in the literature.*

---

**Key Words:** solar drying, open sun drying, efficiency, drying kinetics, drying model.

# Table des matières

Dédicaces.....	i
Remerciements.....	ii
Table des matières .....	iv
Nomenclature.....	vii
Table de figures .....	ix
Liste de Tableaux.....	xii
Introduction générale.....	1
Chapitre I Généralités sur le séchage .....	4
I. Introduction.....	4
II. Différentes techniques de séchage .....	4
II.1 Le séchage à l'air libre .....	4
II.2 Séchage solaire .....	6
III. Différents matériaux séchés.....	11
IV. Différents aliments séchés .....	12
V. Revue bibliographique sur les séchoirs solaires.....	14
VI. Conclusion .....	21
Chapitre II Etude et conception des capteurs solaires thermiques .....	22
Partie I                      Etude des capteurs solaires thermiques .....	22
I. Introduction.....	22
II. Généralités sur les capteurs solaires plans.....	22
II.1 Caractéristiques techniques des éléments constituant les capteurs solaires plans.....	22
II.2 Différents types de capteurs solaires plans à air.....	30
II.2.1 Classification selon la configuration de l'écoulement du canal d'air .....	30
II.2.1.1 Flux unique passage simple .....	31
II.2.1.2 Double flux passage simple .....	32
II.2.1.3 Flux unique passage double .....	33
II.2.1.4 Flux unique passage double Recyclé .....	34
II.2.2 Classification selon la conception du canal d'air .....	35
II.2.2.1 Plaque plane .....	35
II.2.2.2 Surface étendue assistée.....	36
II.2.2.3 Milieu poreux.....	37
II.3 Modèles de capteurs solaires plans à air .....	38
III. Conclusion .....	43

---

iv

Partie II Conception et réalisation d'un capteur solaire plan à air avec absorbeur en polyéthylène..	45
I. Introduction.....	45
II. Conception et réalisation du capteur solaire à air .....	45
II.1 Etapes de réalisation du capteur solaire à air .....	45
II.2. Résultats expérimentaux.....	51
III. Conclusion .....	53
Partie III Conception et réalisation d'un capteur solaire .....	54
plan à air avec absorbeur en aluminium ondulé.....	54
I. Introduction.....	54
II. Conception et réalisation du capteur solaire à air .....	54
II.1 Etapes suivies pour la réalisation du capteur solaire à air .....	54
III. Résultats expérimentaux du capteur .....	55
III.1 Rendement .....	57
III. Conclusion .....	59
Chapitre III Etude et réalisation d'un séchoir solaire indirect .....	60
Partie I Etude et conception d'un séchoir solaire indirect.....	60
I. Introduction.....	60
II. Réalisation d'un séchoir solaire indirect.....	60
II.1 Description du séchoir solaire indirect.....	62
III. Tests expérimentaux .....	64
III.1 Amélioration de l'étanchéité.....	67
III.2 Variations de la température de l'ambiance de la chambre après son isolation.....	68
IV. Applications sur le séchage de quelques aliments.....	72
IV.1 Séchage de la poire .....	72
IV.1.2 Les résultats des performances thermiques .....	72
IV.1.4 Rendement du séchoir solaire indirect .....	74
IV.2 Séchage du kiwi .....	76
IV.2.1 Résultats des performances thermiques .....	76
IV.2.2. Résultats de séchage .....	78
V. Conclusion .....	79
Partie II Réalisation d'un système de stockage.....	80
I. Introduction.....	80
II. Stockage d'énergie thermique .....	80
II.1 Stockage de chaleur sensible.....	81
II.2 Système de stockage de chaleur sensible (Matériaux solides) .....	83

II.3 Système de stockage de chaleur sensible (liquide) .....	84
II.4 Stockage de chaleur latente .....	86
II.5 Stockage d'énergie thermochimique.....	87
III. Test sur le stockage .....	88
III.1 Description du système de stockage .....	88
III.2 Résultats .....	89
III.3 Limite des performances du séchoir .....	90
III.4 Etude de dimensionnement du nouveau système de stockage.....	92
III.4.1 Dimensionnement de la masse du fluide de stockage .....	93
IV. Conclusion .....	96
Chapitre IV Etude de la cinétique du séchage solaire .....	97
I. Introduction.....	97
II. Matériel et méthode .....	98
II.1 Description du système de séchage .....	98
II.2 Protocole expérimental.....	98
II.3 Grandeurs mesurées .....	99
II.3.1 Mesure des températures et de l'humidité de l'air .....	99
II.3.2 Mesure de la vitesse de l'air asséchant.....	99
II.3.3 Mesure des masses humides et sèches du produit.....	99
III. Modélisation des cinétiques de séchage.....	99
III.1 Courbes de séchage.....	99
III.2 Modèle de séchage en couche mince .....	102
III.2.1 Teneur en eau réduite et vitesse de séchage.....	102
III.2.2 Equation à couche mince .....	102
III.3 Paramètres statistiques utilisés.....	107
III.3.1 La diffusivité effective.....	109
IV. Résultats et discussion .....	110
IV.1 Cinétiques de séchage du Raisin .....	110
IV.2. Variations des paramètres climatiques pour un jour représentatif du séchage du Raisin .....	114
IV.3 Lissage des courbes de séchage du Raisin.....	117
V. Conclusion .....	120
Conclusion générale .....	121
Références .....	124
Annexes .....	132

## Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
$A_c$	Surface du capteur	$m^2$
$C_p$	Chaleur spécifique	J/kg K
$D_{eff}$	Diffusivité effective	-
$E$	Epaisseur	cm
$E_t$	Equation du temps exprimée en minutes	min
$H_a$	Hauteur de la plaque alvéolaire	m
$h_l$	Chaleur latente de vaporisation de l'eau	kJ/kg
$I$	Irradiation solaire sur le plan du capteur	Wh/ $m^2$
$K$	Conductivité thermique	W/m K
$L_a$	Longueur des alvéoles	m
$l_a$	Largeur des alvéoles	m
$M$	Masse du fluide de stockage	Kg
$m_e$	Masse d'eau	Kg
$M_h$	Masse humide du produit	Kg
$M_s$	Masse sèche du produit	Kg
$\dot{m}$	Débit massique	kg/s
$N_b$	Nombre d'alvéoles	-
$P$	Pente	-
$Q$	Densité de flux	W/ $m^2$
$Q_a$	Pertes par le renouvellement d'air	W
$Q_c$	Pertes par la couverture	W
$Q_u$	Puissance utile	W
$R$	Coefficient de corrélation linéaire	-
$r$	Rayon de l'échantillon	m

RMSE	Erreur quadratique moyenne	-
S	Surface	m <sup>2</sup>
T	Température	°C
TL	Temps légal	h
TSV	Temps solaire vrais	h
TU	Temps universel	h
V	Volume	m <sup>3</sup>
X	Teneur en eau	kg d'eau / kg de matière sèche
X <sub>e</sub>	Teneur en eau d'équilibre	kg d'eau / kg de matière sèche
X <sub>t</sub>	Teneur en eau à tout moment	kg d'eau / kg de matière sèche
X <sub>t+Δt</sub>	Teneur en eau aux moments t+Δt	kg d'eau / kg de matière sèche
X <sub>0</sub>	Teneur en eau initiale	kg d'eau / kg de matière sèche
X*	Teneur en eau réduite	X* = X <sub>t</sub> / X <sub>0</sub>
α	Coefficient d'absorption	-
Δt	Durée nécessaire pour évaporer l'eau contenue dans l'aliment	H
ε	Coefficient d'émission	-
ξ	Taux de transmission	%
η	Rendement du capteur plan	%
η <sub>d</sub>	Rendement du séchoir	%
λ	Longueur d'onde	μm
ρ	Masse volumique	kg/m <sup>3</sup>
χ <sup>2</sup>	Khi carré réduit	-
φ	Flux	W

# Table de figures

## Chapitre I

Figure I- 1 : Différents types de séchoirs solaires.....	6
Figure I- 2: Séchoir solaire type direct .....	8
Figure I- 3: Séchoir solaire indirect .....	9
Figure I- 4: Caractéristiques d'un séchoir solaire type mixte à circulation naturelle.....	10
Figure I- 5: Schéma du principe du séchoir solaire à biomasse .....	11
Figure I- 6: Principe de fonctionnement du séchage solaire indirect .....	14
Figure I- 7: Montage expérimental du séchoir solaire (dimensions en cm).....	15
Figure I- 8: Une illustration de (a) une vue en coupe transversale du séchoir solaire à convection naturelle de type indirect; position des thermocouples et (b) diagramme de circulation d'air .....	16
Figure I- 9: Une illustration de (a) photo du séchoir solaire portable ferme PAU (b) de la vue de côté du séchoir (c) détails de l'étagère à claies multiples.....	17
Figure I- 10: Séchoir solaire indirect à convection forcée .....	18
Figure I- 11: Photo d'un système de séchage solaire .....	19
Figure I- 12: Séchoir solaire indirect à convection forcée et à déshydratant.....	20
Figure I- 13: Schéma et photo du séchoir solaire (LISPAM, ENS Marrakech).....	21

## Chapitre II

Figure II- 1: Schéma du principe d'un capteur solaire plan .....	22
Figure II- 2: Transmissivité d'une vitre en fonction de la longueur d'onde.....	24
Figure II- 3: Peinture noir sur un absorbeur .....	26
Figure II- 4: Vue schématique du flux unique passage simple dans un capteur solaire à air.....	32
Figure II- 5: Vue schématique du double flux passage simple dans un capteur solaire à air.....	33
Figure II- 6: Vue schématique du capteur solaire à air, à flux simple, à passage double et à absorbeur plat	34
Figure II- 7: Vue schématique du capteur solaire à air à flux unique à double passage recyclé.....	35
Figure II- 8: Vue schématique d'un capteur solaire plan à air.....	36
Figure II- 9: Vue schématique plaque absorbante à ailette .....	37
Figure II- 10: Vue schématique d'un capteur solaire à air à milieu poreux.....	38
Figure II- 11: Plaques rectangulaires minces orientées parallèlement à l'écoulement .....	39
Figure II- 12: Les différentes structures de l'absorbeur .....	41
Figure II- 13: Les types de plaques absorbantes.....	42
Figure II- 14: Schéma du système (a) SSA et (b) vue de face du capteur .....	43
Figure II- 15: Schéma des parois à la température $T_1$ et $T_2$ .....	46
Figure II- 16: Schéma du capteur solaire à air .....	47
Figure II- 17: L'emplacement de l'isolant dans le coffre du capteur.....	49
Figure II- 18: Absorbeur constitué par une plaque en polyéthylène alvéolaire et plaque métallique .....	49
Figure II- 19: L'emplacement de la vitre.....	50
Figure II- 20: Le système de ventilation.....	50
Figure II- 21: (a) Boîte de séchage lié au capteur; (b) Boîte de séchage de référence.....	51
Figure II- 22: Evolution des températures du capteur en polyéthylène sous ventilation forcée et du rayonnement global en fonction du temps.....	52
Figure II- 23: Emplacement de l'absorbeur ondulé .....	54
Figure II- 24: Emplacement de la vitre.....	55

Figure II- 25: L'évolution de la température en fonction du temps pour la journée du 21 juin 2015 pour le capteur solaire à air à absorbeur ondulé sous convection naturelle .....	56
Figure II- 26: L'évolution de la température en fonction du temps pour la journée du 24 juin 2015 pour le capteur solaire à air à absorbeur ondulé sous convection forcée .....	57
Figure II- 27: La variation du rendement du capteur solaire à air à absorbeur ondulé .....	58

## Chapitre III

Figure III- 1: Support du séchoir solaire indirect .....	60
Figure III- 2: Chambre de séchage .....	61
Figure III- 3: Séchoir solaire indirect.....	61
Figure III- 4: Schéma des éléments du séchoir solaire indirect.....	63
Figure III- 5: Évolution de la température ambiante, température de la chambre de séchage et l'irradiation solaire pour la journée perturbée du (21/04/2015).....	64
Figure III- 6: Évolution de la température ambiante, température de la chambre de séchage et l'irradiation solaire pour la journée ensoleillée du (23/04/2015).....	65
Figure III- 7: Evolution de la température d'air des différentes claies et de la sortie du capteur pour la journée perturbée du (21/04/2015).....	66
Figure III- 8: Evolution de la température d'air des différentes claies et de sortie du capteur pour la journée ensoleillé du (23/04/2015).....	66
Figure III- 9: Supports en contreplaqués non remplis avec la laine de verre .....	67
Figure III- 10: Support en contreplaqué remplis avec la laine de verre .....	67
Figure III- 11: Chambre de séchage isolée.....	68
Figure III- 12: (a) Anciennes claies; (b) Nouvelles claies.....	68
Figure III- 13: Evolution de la température ambiante, la température ambiante moyenne dans la chambre de séchage et l'irradiation solaire globale pour la journée perturbée du (28/04/2016).....	69
Figure III- 14: Evolution de la température ambiante, la température ambiante moyenne dans la chambre de séchage et l'irradiation solaire globale pour la journée ensoleillé du (22/04/2016).....	70
Figure III- 15: Evolution de la température d'air des différentes claies et de la sortie du capteur pour la journée perturbée du (28/04/2016).....	71
Figure III- 16: Evolution de la température d'air des différentes claies et de la sortie du capteur pour la journée ensoleillé du (22/04/2016) .....	71
Figure III- 17: Variation de la température de l'air dans la chambre de séchage sous convection naturelle	73
Figure III- 18: Variation de la température d'air dans la chambre de séchage (après le coucher du soleil)...	73
Figure III- 19: (a) Échantillons de la poire avant séchage; (b) Échantillons de la poire après séchage .....	74
Figure III- 20: Evolution de la température de la chambre de séchage sous convection naturelle .....	76
Figure III- 21: Evolution de la température de l'air de la chambre de séchage sous convection forcée .....	77
Figure III- 22: Variation de la température dans la chambre de séchage (après le coucher du soleil) .....	77
Figure III- 23: (a) Échantillons du kiwi avant séchage; (b) Échantillons du kiwi après séchage .....	78
Figure III- 24: Les différents types de stockage thermique de l'énergie solaire.....	81
Figure III- 25: Schéma des capteurs solaires à tubes sous vide et du stockage thermique .....	84
Figure III- 26: Schéma d'un réservoir de stockage thermique d'eau typique.....	86
Figure III- 27: Changements de température et de chaleur pendant le changement de phase .....	87
Figure III- 28: Echangeur de chaleur.....	88
Figure III- 29: Réservoir de stockage d'eau .....	89

Figure III- 30: Evolution horaire du rayonnement solaire, de la température ambiante, de la température de l'eau à la sortie, de la température de l'eau à l'entrée, de la température de l'eau du réservoir et de la température de la chambre pendant le jour et la nuit. ....	89
Figure III- 31: Variations horaire du rayonnement solaire mesuré, de la température ambiante, de la température de l'absorbeur, de la température de l'air à l'entrée et à la sortie et de la température de la claie 1 pendant une journée.....	91
Figure III- 32: Variations horaires du rayonnement solaire mesuré, de la température ambiante, de la température de l'air à la sortie et de la température de la claie 1 pendant la nuit.....	91
Figure III- 33: Vue schématique de dessus du capteur solaire air-eau.....	92

## Chapitre IV

Figure IV- 1: Période de séchage .....	100
Figure IV- 2: Variation des teneurs en eau expérimentales du séchage à l'air libre et indirect des raisins en fonction du temps de séchage .....	111
Figure IV- 3: Variation de la vitesse de séchage en fonction du temps de séchage.....	112
Figure IV- 4: Variations du rayonnement solaire et de la température ambiante mesurés d'un jour représentatif de la campagne de séchage des raisins à l'air libre.....	115
Figure IV- 5: Evolution horaire du rayonnement solaire mesuré, de la température ambiante, de la température de sortie, de la température de la claie1, de la température du raisin et de l'humidité pendant une journée représentative du séchage soleil indirect du raisin .....	116
Figure IV- 6: Evolution horaire de la température ambiante mesurée, de la température des raisins, de la température de la claie 1 et de l'humidité d'un jour représentatif de séchage solaire indirect du raisin après le coucher du soleil.....	116
Figure IV- 7: Données expérimentales de la teneur en eau réduite en fonction du temps de séchage ajustée avec le modèle Midilli et al.....	117
Figure IV- 8: La teneur en eau réduite prédite par Midilli et al, modèle en fonction de la teneur en eau réduite expérimentale ( $X^*$ ) .....	118
Figure IV- 9: Impacts du type de séchage sur le coefficient de diffusion effectif du raisin.....	119

# Liste de Tableaux

## Chapitre I

Tableau I- 1: Avantages et inconvénients du séchage sous séchoir solaire et du séchage à l'air libre.....	5
---	---

## Chapitre II

Tableau II- 1: Transmissivité de divers type de couverture dans les gammes du visible .....	25
Tableau II- 2: Différents traitements de surface .....	27
Tableau II- 3: Le coefficient d'absorption $\alpha$ et le coefficient d'émission $\epsilon$ pour les supports les plus utilisés comme absorbeur .....	27
Tableau II- 4: Conductivité thermique de quelques matériaux.....	29

## Chapitre III

Tableau III- 1: Résultats du séchage de la poire sous convection naturelle.....	74
Tableau III- 2: Rendements des séchoirs solaire dans la littérature .....	75
Tableau III- 3: Résultats du séchage du kiwi sous deux modes de convection .....	78
La capacité de stockage de la chaleur sensible de certains matériaux solides / liquides sélectionnés est indiquée dans le tableau III- 4.. .....	81
Tableau III- 5: Liste de matériaux solides / liquides sélectionnés pour le stockage de chaleur sensible .....	82

## Chapitre IV

Tableau IV- 1 : Modèles mathématiques appliqués aux courbes de séchage du raisin dans la littérature..	107
Tableau IV- 2: Les constantes et les paramètres des modèles pour le séchage solaire indirect du raisin ...	113
Tableau IV- 3: Constantes et paramètres des modèles pour le séchage des raisins à l'air libre.....	114
Tableau IV- 4: Valeurs de la diffusivité effective des raisins .....	119

## **Introduction générale**

Le Maroc, bien qu'il manque traditionnellement de combustibles fossiles, il possède une richesse environnementale importante, des terres disponibles et un potentiel solaire élevé. En effet, il se caractérise par une irradiation solaire intensive. La durée annuelle d'ensoleillement varie de 2700 h au nord à plus de 3500 h au sud, avec une moyenne de 5,3 kWh / m<sup>2</sup> pendant un jour [1]. Pour tirer profit de cette énergie abondante, il faut développer les systèmes de conversion convenables en fonction du secteur d'utilisation.

Un des systèmes utilisés pour exploiter cette énergie solaire est le capteur solaire plan. Simple de principe et de conception, il est utilisé dans beaucoup d'applications nécessitant des températures basses et modérées, telles que le chauffage d'eau sanitaire, le chauffage d'air pour le séchage des produits agricoles, le chauffage et la climatisation dans l'habitat et dans les serres agricoles.

Au Maroc, la surface agricole utile (SAU) est estimée à 8 700 000 hectares, la SAU est forte d'une richesse en systèmes agro-climatiques qui lui permet de produire une très large gamme de produits agricoles. Les principales productions végétales du pays sont constituées par les céréales (blé, orge), les agrumes (oranges, clémentines), les olives, les rosacées fruitières (amandes, pommes, abricots...), les betteraves à sucre, les légumineuses alimentaires, les cultures maraichères dont les pommes de terre et les tomates. Le secteur floral au Maroc couvre une superficie qui varie entre 285ha et 341ha. Les superficies florales sous serres totalisent 258ha et celles en plein champ 55 ha. La production de plantes aromatiques et médicinales au Maroc met en exploitation aussi bien les plantes spontanées que les plantes cultivées, fraîches ou séchées. La production est globalement assurée par les PAM spontanées, alors que la part des PAM cultivées demeure très faible (2%). La cueillette des plantes spontanées représente plus de 98 % de la production nationale. Cette catégorie englobe une large gamme de plantes dont les plus importantes sont le thym, le romarin, le caroubier, la menthe pouliot, l'origan, l'arganier et les feuilles de laurier. Parmi les principales PAM cultivées au Maroc, on peut citer: Le géranium, la lavande, la rose, le jasmin, la verveine, la menthe et le safran. La culture des

plantes aromatiques et médicinales est répandue dans plusieurs régions du pays et concerne environ une trentaine d'espèces. Il n'exporte en moyenne que 12% de la production des fruits et légumes [2].

Beaucoup de produits sont perdus à cause de la surproduction pendant la période des récoltes, le manque de moyen de stockage, les manipulations inadéquates et le transport. Le séchage solaire des produits agricoles constituera une solution avantageuse pour la réduction des pertes après récolte. Cependant, il faut développer ce type de séchage pour le rendre hygiénique, améliorer ses performances et son efficacité et réduire son coût pour qu'il soit à la portée des agriculteurs.

Ainsi, au cours des dernières années, de nombreuses études ont été menées pour tirer profil de cette énergie solaire, renouvelable et non polluante dans le domaine de l'agriculture. Les systèmes de chauffage et de climatisation des serres agricoles ont été développés afin de maintenir une température favorable pour la production des produits agricoles en dehors de la saison de culture et aussi pour réduire les coûts de chauffage [3-6]. Afin de contribuer au stockage des produits agricoles plusieurs travaux sur le séchage, ont été effectués en particulier le séchage solaire [7-9].

Dans ce cadre, le présent travail présente une contribution au séchage solaire des produits agricoles. Il concerne la conception et la réalisation d'un séchoir solaire indirect pour le séchage des aliments. Il comporte quatre chapitres, le premier est une étude bibliographique sur les recherches effectuées dans le domaine des séchoirs solaires en mode indirect. Nous y donnons quelques généralités sur les différentes techniques de séchage solaire ainsi que les différents aliments séchés.

Le deuxième chapitre comporte trois parties. La première présente une étude bibliographique sur les différents types de capteurs solaires plans. Puis, nous y introduisons les modèles de capteurs solaires plans à air présent dans la littérature. La deuxième, présente la méthode de réalisation du capteur solaire plan à air avec absorbeur en polyéthylène, les résultats expérimentaux ainsi que les recommandations pour améliorer la conception du capteur. La troisième donne la méthode de réalisation du capteur solaire plan à air avec absorbeur en aluminium ondulé. Puis présente les résultats

de la campagne de mesures réalisée dans le but d'évaluer les performances thermiques de ce capteur pour une éventuelle utilisation dans le séchage des produits agroalimentaires.

Le troisième chapitre comporte deux parties. La première présente les étapes de réalisation du séchoir solaire indirect, les tests expérimentaux effectués avant et après isolation de la chambre de séchage ainsi que les résultats expérimentaux du séchage de deux aliments la poire et le kiwi. La deuxième partie est dédiée au dimensionnement d'un système de stockage pour le séchoir solaire indirect qu'on a conçu, afin de résoudre les inconvénients liés à l'arrêt du processus de séchage pendant la nuit.

Le quatrième chapitre est consacré à l'étude de la cinétique du séchage solaire. Le cas d'étude a porté sur le séchage du raisin. L'étude de la cinétique a été effectuée pour les deux types de séchage: le séchage du raisin à l'air libre et son séchage dans le séchoir solaire indirect. Dans les deux cas de séchage, les données expérimentales ont été ajustées pour suggérer le meilleur modèle mathématique permettant de calculer la diffusivité effective pour le séchage du raisin.

Enfin, une conclusion rassemble l'ensemble des résultats obtenus et donne quelques perspectives qui pourraient constituer une suite favorable pour optimiser davantage notre séchoir solaire indirect.

## Chapitre I Généralités sur le séchage

### I. Introduction

Le séchage est une opération ayant pour but d'éliminer partiellement ou totalement l'eau d'un corps humide par évaporation de cette eau. Cette opération met en jeu un transfert de chaleur (la chaleur fournie permet le changement de phase du liquide) et un transfert de masse (le liquide imprégnant le solide passe à l'état de vapeur dans l'air asséchant).

Ce chapitre est consacré à la définition des différentes techniques de séchage et à la présentation de quelques travaux sur les séchoirs solaires en mode indirect qui fait l'objet de ce travail.

### II. Différentes techniques de séchage

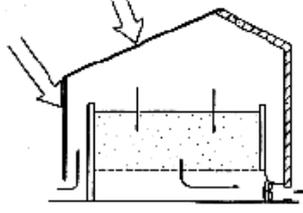
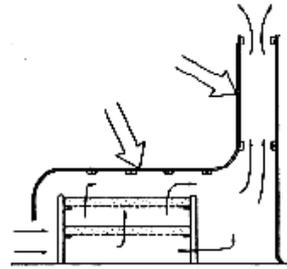
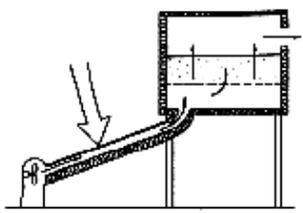
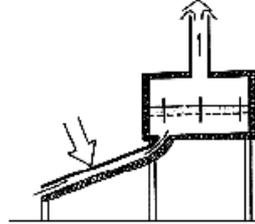
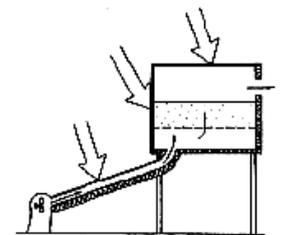
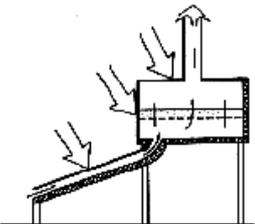
#### II.1 Le séchage à l'air libre

C'est la méthode traditionnelle utilisée depuis des siècles dans le monde entier. Les produits à sécher, tels que les abricots, raisins, figues, sont exposés directement au soleil et étalés en plein air. La période de séchage se déroule en général durant les mois de juin, juillet et août, où les conditions climatiques sont en général favorables. Ce procédé de séchage solaire est peu coûteux, néanmoins, il présente des inconvénients. Un tableau comparatif a été dressé mettant en évidence les avantages et les inconvénients du séchage à l'air libre et sous séchoir solaire. Pour améliorer ces techniques traditionnelles, les professionnels se sont orientés vers le séchage artificiel en développant plusieurs prototypes de séchoirs solaires.

Tableau I- 1: Avantages et inconvénients du séchage sous séchoir solaire et du séchage à l'air libre

<p><b>Séchage sous séchoir solaire</b></p>	<p><b>Avantages</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Réduction du temps de séchage</li> <li>- Maîtrise de la teneur en eau finale désirée.</li> <li>- Protection du produit contre le rayonnement ultraviolet.</li> <li>- A l'abri des intempéries, des insectes et des champignons.</li> <li>- Maîtrise de l'opération de séchage.</li> <li>- Energie gratuite</li> </ul> <p><b>Inconvénients</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Consommation de l'énergie conventionnelle (électricité, gaz, bois....) si système hybride.</li> <li>- Investissement relativement important.</li> <li>-Main d'œuvre qualifiée.</li> </ul>
<p><b>Séchage à l'air libre</b></p>	<p><b>Avantages</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Procédé simple et non coûteux.</li> <li>- N'exige ni matériel ni main d'œuvre qualifiée.</li> <li>- Source d'énergie solaire gratuite et non polluante.</li> <li>- Pas de dépense d'énergie.</li> <li>- Séchage doux grâce à l'alternance jour et nuit.</li> </ul> <p><b>Inconvénients</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Une longue durée de séchage (possibilité de moisissure).</li> <li>- Altération de la qualité du produit par le rayonnement solaire.</li> <li>- l'efficacité du processus est faible compte tenu des nombreux aléas (météorologie, constituants du produit sensibles aux rayonnements ultra violets, insectes, rongeurs, perte de vitamine...etc.).</li> <li>- changement de couleur.</li> </ul>

II.2 Séchage solaire

	Séchoirs actifs	Séchoirs passifs
Séchoirs solaires directs		
Séchoirs solaires indirects		
Séchoirs solaires mixtes		

 Irradiation solaire  
 Ecoulement d'air

Figure I- 1 : Différents types de séchoirs solaires [10]

Il existe une très grande diversité de type de séchoirs, aussi grande que la diversité des produits à sécher. Les débits de produit à sécher et leur temps de séjour dans le séchoir diffèrent d'un produit à un autre, de même, l'opération de séchage peut prendre quelques heures [11] jusqu'à plusieurs dizaines de jours.

Généralement, pour les produits agro-alimentaires, les systèmes de séchage solaire sont classés selon le mode de chauffage (direct par rayonnement et par convection, indirect par

---

conduction, par rayonnement infrarouge), le mode d'apport de chaleur (direct ou indirect) et le mode de manipulation du produit (accessibilité).

On distingue deux grandes classes de séchoir solaire pour produits agricoles:

1- Séchoir solaire passif ou à convection naturelle

Le séchage par convection naturelle utilise l'énergie solaire, qui chauffe l'air, jouant le rôle de fluide caloporteur, et lui donne une capacité supplémentaire d'accueil de vapeur d'eau. Cet air chauffé a tendance à monter vers le haut et sort par une cheminée en emportant avec lui l'humidité extraite des produits à sécher. L'écoulement de l'air asséchant ici se fait par effet de cheminée. L'énergie solaire seule assure le fonctionnement, ces séchoirs sont particulièrement adaptés aux régions éloignées de toute sorte de distribution d'énergie. L'un des inconvénients de ce type de séchoir est le risque de dépassement de la température maximale admise par le produit, souvent due à la mauvaise circulation de l'air, fréquente dans ces systèmes.

2- Séchoir solaire actif ou à convection forcée

La circulation de l'air asséchant est forcée par un ventilateur, ce qui permet une augmentation du pouvoir évaporateur du séchoir. Généralement, la convection forcée l'emporte largement sur la convection naturelle qui ne permet pas encore, étant donné l'état des recherches en cette matière, de contrôler le déroulement du processus du séchage.

Cette classe de séchoir solaire permet un meilleur contrôle de l'opération de séchage et une bonne amélioration du temps de séchage par rapport au séchoir passif, car l'air asséchant est évacué en vitesse et d'une façon continue. Néanmoins, ce type de séchoir a pour inconvénients le coût de production et d'investissement relativement élevé par rapport au séchoir passif, et la nécessité d'approvisionnement local en électricité conventionnelle ou photovoltaïque pour faire fonctionner le ventilateur.

### 3- Séchoir solaire direct

Les rayons solaires frappent directement les produits. Le séchoir solaire direct se compose d'une seule pièce qui fait office à la fois de chambre de séchage et de capteur solaire. Le fond de la chambre de séchage est peint en noir pour augmenter la capacité d'absorption de chaleur, une feuille de plastique ou polyéthylène transparent sert généralement de toit mais on peut également utiliser d'autres matériaux plus chers comme le verre ou les plastiques spéciaux (polyéthylènes agricoles). Néanmoins l'interaction directe rayonnement solaire produit engendre la dégradation de la qualité du produit et la destruction des nutriments [12].

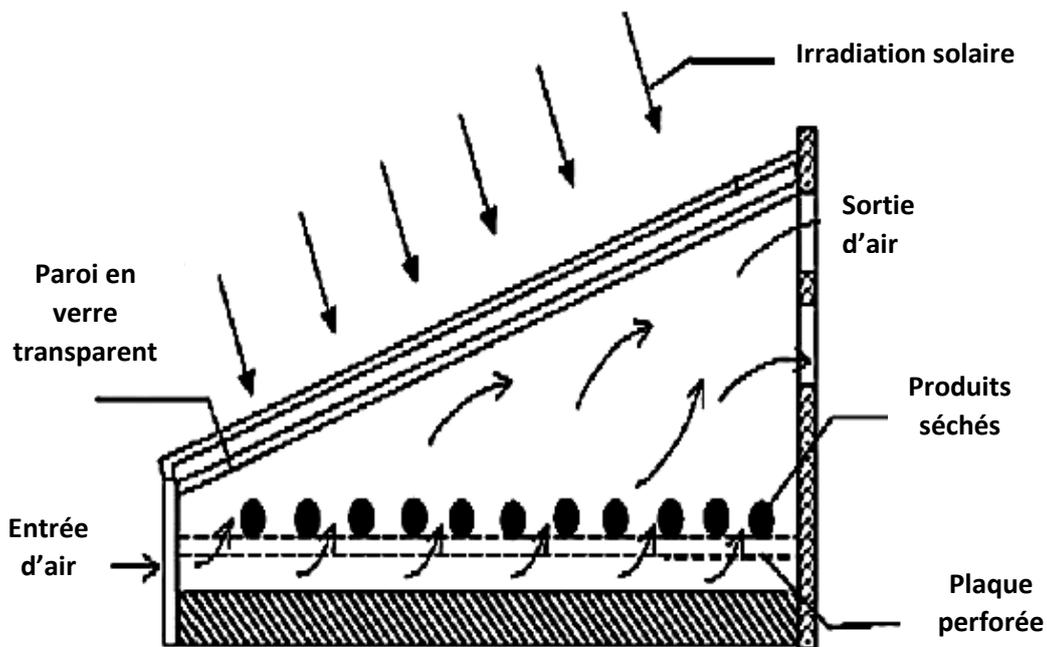


Figure I- 2: Séchoir solaire type direct [13]

### 4- Séchoir solaire indirect

Le séchoir solaire indirect (Figure I-3) se compose essentiellement de deux parties: en amont un capteur solaire qui convertit le rayonnement solaire en chaleur et une chambre de séchage où est placé le produit à sécher. L'air asséchant est chauffé et monte par convection naturelle ou forcée jusqu'à la chambre de dessiccation contenant les produits à sécher où un transfert de chaleur de l'air vers

le produit et un transfert de masse du produit vers l'air se produisent au cours du parcours du fluide caloporteur. Ce dernier est évacué vers l'extérieur de la chambre de dessiccation par le biais d'une cheminée en emportant avec lui l'humidité extraite des produits. Ces systèmes possédant des capteurs solaires plans en amont sont plus performants et plus répandus que les séchoirs directs. Ils présentent l'avantage de mieux préserver les caractéristiques de l'aliment : (couleur, propriétés organoleptiques, valeur nutritive...etc) [14]. Ils sont donc particulièrement adaptés au séchage des produits agroalimentaires.

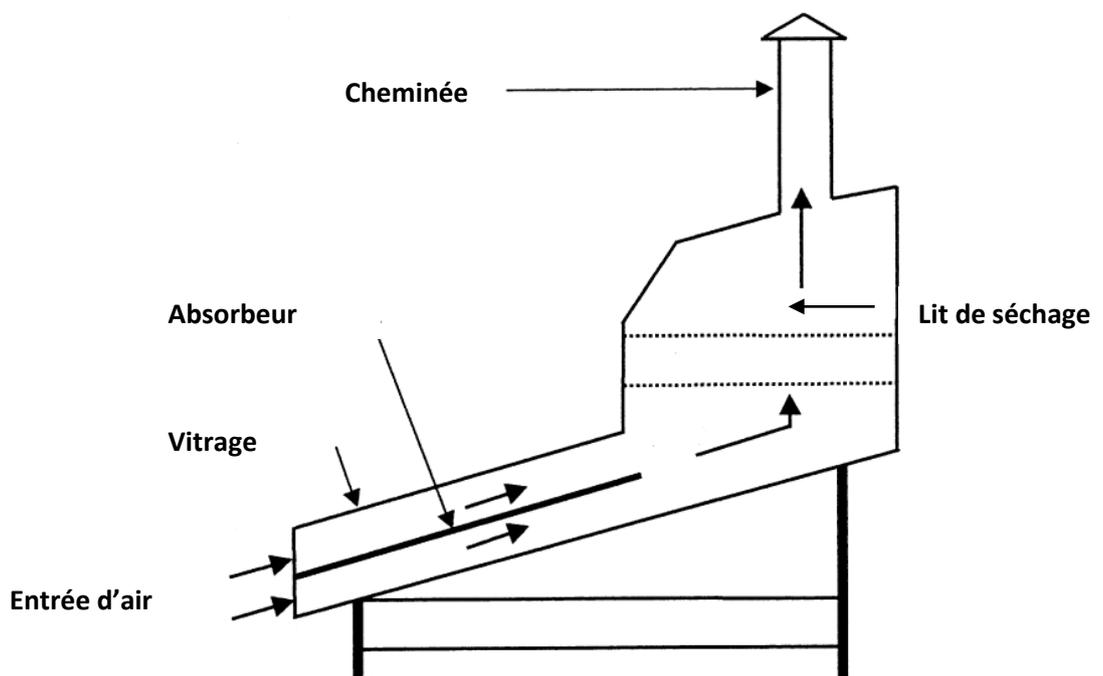


Figure I- 3: Séchoir solaire indirect [14]

#### 5- Séchoirs solaires mixtes

Ces séchoirs combinent les dispositifs des séchoirs directs et indirects. Dans ce type de séchoir, 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 [15-17].

Dans le type de système de séchage en mode mixte, l'air chauffé provenant du capteur solaire séparé passe à travers une chambre de séchage et en même temps,

la chambre de séchage absorbe l'énergie solaire directement à travers un couvercle transparent.

Le produit est séché simultanément par le rayonnement traversant les parois transparentes de la chambre de séchage et la chaleur provenant de l'air chaud du capteur solaire à air [15-17].

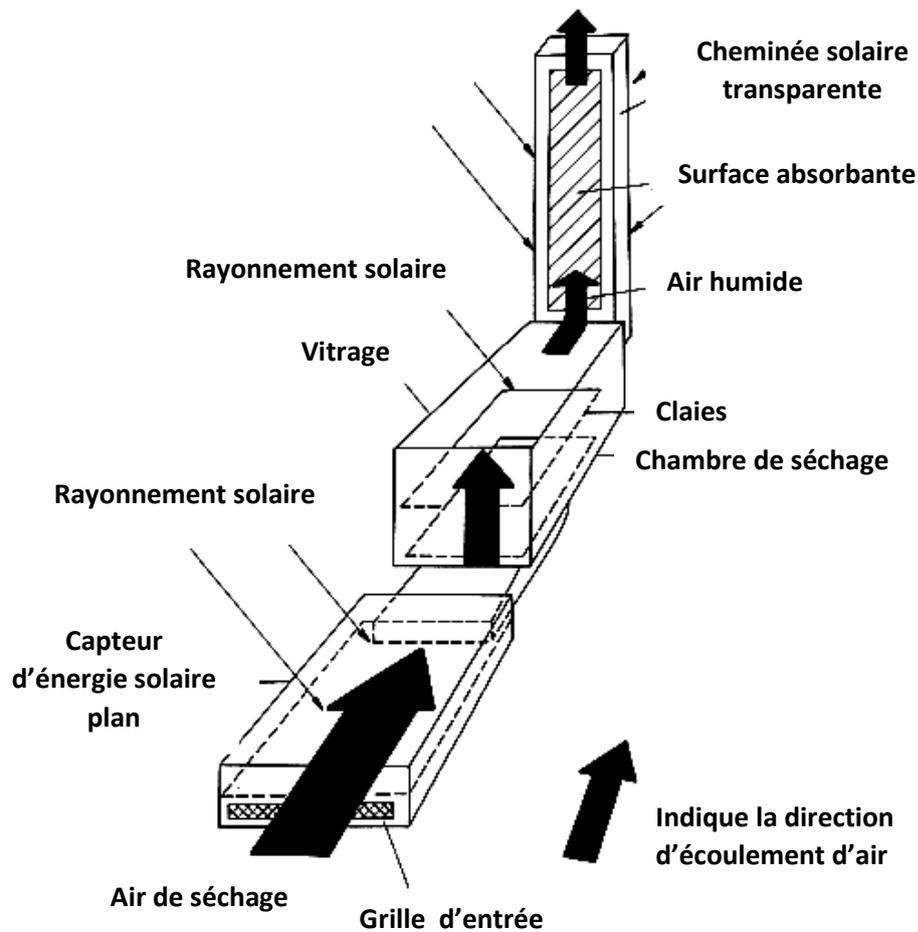


Figure I- 4: Caractéristiques d'un séchoir solaire type mixte à circulation naturelle

#### - Séchoirs solaires hybrides

Dans ce type de séchoir hybride (Figure I-5) on utilise une source d'énergie auxiliaire (électrique, gaz, fuel, bois, biomasse.....) pour ajuster la température de l'air asséchant à une température constante fournie au séchoir. 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 son coût de production et d'investissement relativement élevé

par rapport au séchoir passif, et nécessite l'approvisionnement local de la source d'énergie auxiliaire.

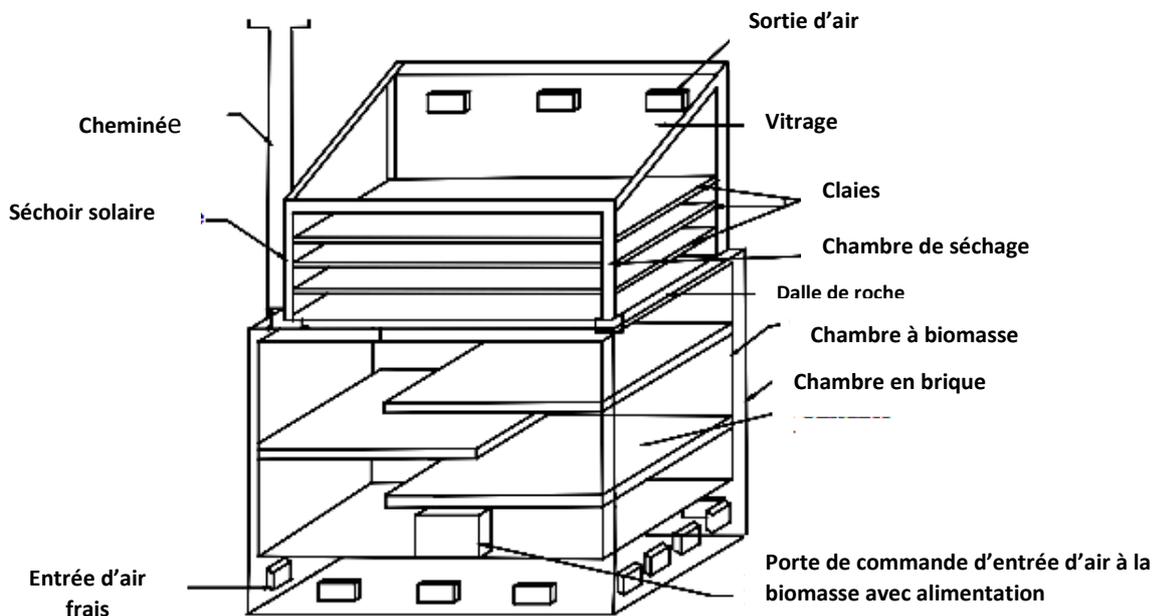


Figure I- 5: Schéma du principe du séchoir solaire à biomasse [18]

### III. Différents matériaux séchés

Dans l'industrie, l'opération de séchage est d'une grande importance, par rapport à toutes les autres opérations mises en jeu [19]. Bien que c'est généralement la dernière étape du processus industriel, il est souvent appliqué à un grand nombre de matériaux solides : minerais, brique, bois, argile, etc. Il est couramment reconnu que dans un procédé industriel, l'étape de séchage est la plus consommatrice d'énergie. Nous présentons ci-dessous quelques matériaux séchés dans l'industrie.

- **Bois**

L'une des applications les plus importantes du séchage est l'industrie du bois et du bois de construction. Par exemple, lorsque le bois doit être utilisé dans un but spécifique, comme le mobilier ou le combustible, il doit être séché car la quantité substantielle d'eau présente dans le bois vert engendre des problèmes potentiels, tels que le rétrécissement et la modification des formes, sinon le bois sera difficile à brûler [20]. Pour des raisons de simplicité et d'économie, les séchoirs solaires à bois, en particulier ceux du type à serre

---

simple, ont une technologie appropriée pour réaliser des économies d'énergie importantes dans les pays en développement [21].

- **Brique et carrelage**

La fabrication de briques et de carrelages comprend différents processus qui ont un impact notable sur la qualité des produits, tels que la préparation des matières premières à partir de la terre, le moulage, le séchage et la cuisson. Le processus de séchage prépare la brique et le carrelage à la cuisson en réduisant lentement et uniformément la teneur en humidité de la brique verte tendre [22-24]. La littérature publiée révèle que de l'énergie réservée au procédé de séchage constitue la part la plus importante de l'énergie totale de production [24-25]. Le séchage de la brique dans le processus de fabrication de la brique nécessite environ 100 kcal / kg de briques, soit environ 19% de l'énergie totale nécessaire à la production de briques [27,28]. Les séchoirs de type tunnel sont largement utilisés dans l'industrie en raison des avantages importants qu'ils possèdent, comme le rendement élevé, des caractéristiques d'économie d'énergie, entretien facile, séchage homogène et très sensible, et cycles de séchage courts [29-34].

- **Céramique**

Les systèmes d'énergie solaire peuvent également être utilisés uniquement pour un processus de pré-séchage dans la production de céramique, ce qui supprime une partie de la charge de séchage avant que la source d'énergie principale ne commence à fonctionner [35,36]. Ces systèmes de séchage à assistance solaire utilisent partiellement l'énergie renouvelable, donc économisent de l'énergie.

#### **IV. Différents aliments séchés**

Les fruits sont des produits végétaux avec une saveur aromatique et qui sont généralement et naturellement sucrés. Ils sont une source importante et indispensable de vitamines et de minéraux, bien qu'ils soient des sources médiocres de protéines et de matières grasses. Les légumes jouent également un rôle important dans la nutrition en apportant de la saveur, de la couleur, et de la variété au régime alimentaire. Les fruits et légumes ont pris une place importante au niveau commercial et constituent un secteur

---

important de l'industrie agricole. Les développements récents dans la technologie agricole ont considérablement augmenté la production mondiale des fruits et légumes. Au Maroc, le secteur des fruits et légumes occupe une superficie de près de 700.000 ha dont 460.000 ha de plantations fruitières (non compris l'olivier) et 240.000 ha de cultures maraîchères. La production globale moyenne est de l'ordre de 10 millions de tonnes dont près de 3 millions de tonnes de fruits et plus de 7 millions de tonnes de légumes en (2012) [2].

Les exportations moyennes du Maroc des fruits et légumes ne représentent que 12 % de la production [2]. Cependant la plupart des fruits et des légumes contiennent plus de 80% d'eau et sont donc hautement périssables. Beaucoup de produits sont perdus à cause des manipulations inadéquates, du transport, des installations de stockage et de l'excès de production. Les fruits et les légumes saisonniers sont disponibles et consommés pendant une très courte période. Ils doivent donc être conservés pour être consommée en dehors de la saison de récolte. L'utilisation du séchage dans les industries agroalimentaires peut cependant résoudre ces problèmes et avoir des buts multiples comme:

- Accroître la durée de conservation des produits (viandes, poissons, fruits, graines, pâtes, épices, thé, champignons, ...).
- Stabiliser les produits agricoles (maïs, luzerne, riz, lait, ...) et amortir le caractère saisonnier de certaines activités.
- Favoriser la transformation des produits par des réactions biochimiques ou biologiques (produits de salaison, touraillage de malt, ...).
- Stabiliser des co-produits industriels pour l'alimentation animale (pulpes de sucrerie ou d'amidonnerie, drêches de brasserie, farines de viande et de poisson ...).
- Produire des ingrédients ou des additifs pour une seconde transformation, également appelés Produits Alimentaires Intermédiaires (PAI). Ce sont, par exemple, des légumes pour les potages, des oignons pour la charcuterie, des fruits pour la pâtisserie, des épaississants, arômes, colorants, ... [37].

## V. Revue bibliographique sur les séchoirs solaires

Plusieurs travaux sur le séchage ont été effectués aussi bien à l'échelle nationale qu'internationale. L'objectif de cette étude bibliographique est de rassembler les différentes recommandations dégagées lors des expériences effectuées dans le but d'optimiser aussi bien la conception que le fonctionnement du séchoir solaire indirect. Nous présentons alors ci-dessous les résultats de quelques travaux sur le séchage.

Les séchoirs solaires indirects peuvent être classés sur la base de la circulation de l'air qui peut être soit passif ou actif. Les séchoirs passifs fonctionnent par effet thermosiphon, tandis que les séchoirs actifs sont équipés d'un ventilateur.

- **Séchage solaire indirect en mode passif**

Le séchoir indirect en mode passif est l'un des séchoirs utilisé pour sécher les produits agricoles [38]. Il se compose généralement d'une chambre de séchage et d'un capteur solaire. L'énergie solaire est collectée dans un équipement séparé appelé capteur solaire, recouvert par une couverture transparente en verre ou en plastique. Le capteur est lié à une chambre de séchage où le produit à sécher est placé. Le produit n'est pas directement exposé au rayonnement solaire afin de minimiser la décoloration et les fissures à la surface des produits. La figure montre la simplicité du séchoir solaire indirect et les principes de fonctionnement du séchage solaire indirect.

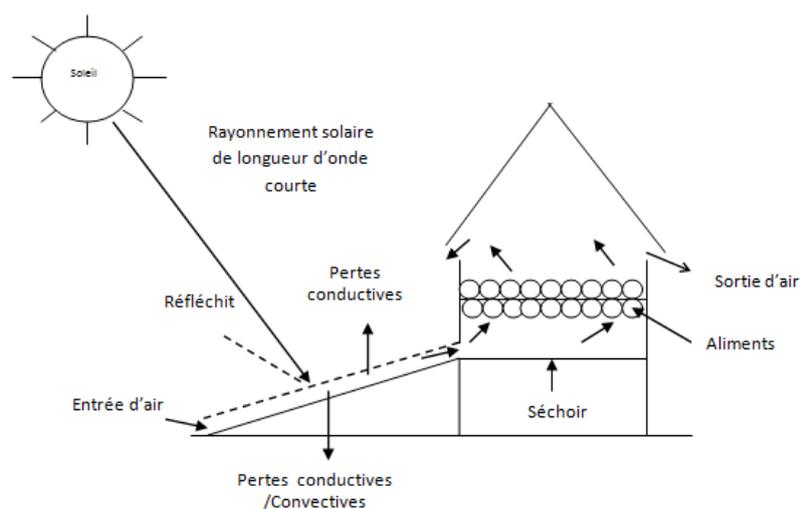


Figure I- 6: Principe de fonctionnement du séchage solaire indirect [38]

Ezeike (1986) a mis au point un système de séchage modulaire composé de trois unités fonctionnelles: un capteur plan à air à triple passage, une armoire de séchage et une chambre de déshumidification. L'armoire de séchage solaire comporte deux capteurs muraux situés sur la ligne est-ouest pour fournir un gain de chaleur supplémentaire et les claies sont espacées de manière égale sur les entretoises. La chambre de déshumidification de séchage solaire est une boîte rectangulaire équipée de trois claies perforées contenant le déshydratant, le gel de silice. Elle est utilisée pour maintenir le processus de séchage solaire essentiellement la nuit et pendant les périodes de faible ensoleillement. Les résultats du séchage du riz paddy et des tranches d'igname montrent que le système a séché le riz paddy d'une teneur en eau initiale de 25,93%(kg d'eau / kg de matière sèche) à une teneur moyenne en eau de 5,31%(kg d'eau / kg de matière sèche) en 10 h et de tranches d'igname d'une teneur en eau initiale de 65%(kg d'eau / kg de matière sèche) à une teneur moyenne en eau de 11% (kg d'eau / kg de matière sèche) en 31 h.

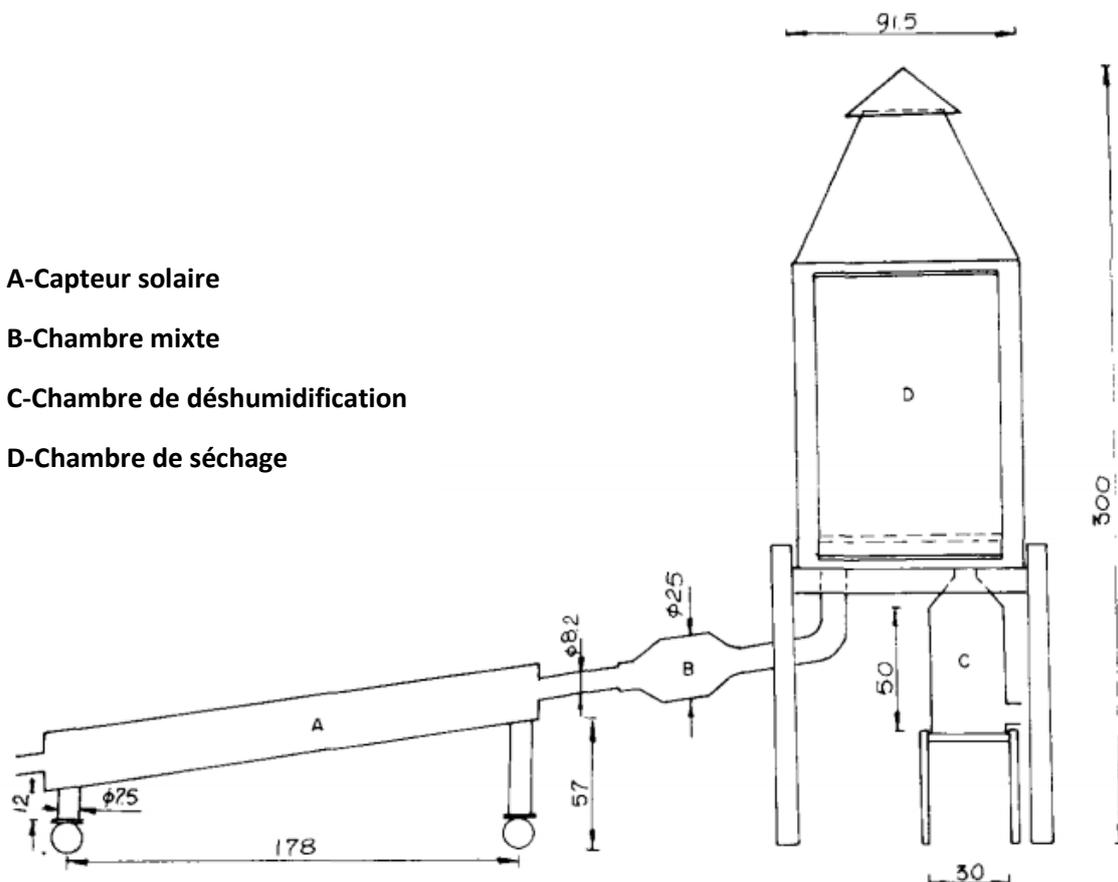


Figure I- 7: Montage expérimental du séchoir solaire (dimensions en cm)

El-Sebail et al. (2002) ont conçu, réalisé et étudié un séchoir solaire à convection naturelle de type indirect. Ils l'ont expérimenté dans les conditions météorologiques dominantes de Tanta (Egypte) (figure I-8). Cette installation consiste en un capteur plan à air connecté à une armoire agissant comme une chambre de séchage. Le capteur est conçu pour pouvoir insérer divers matériaux de stockage sous la plaque d'absorption afin d'améliorer le processus de séchage. Le sable est utilisé comme matériau de stockage. Le séchoir fonctionnait avec et sans matériel de stockage. Les tests de séchage ont été réalisés sur quelques variétés de fruits, tels que les raisins sans pépins, les figues et les pommes, ainsi que sur des légumes, tels que les pois verts, les tomates et les oignons. Ils ont noté que la teneur en eau d'équilibre pour les raisins sans pépins est atteinte après 60 h lorsque le système de séchage est utilisé avec stockage et à 72 h lorsqu'il est utilisé sans matériel de stockage. Par conséquent, le matériau de stockage a réduit le processus de séchage de 12 h [40].

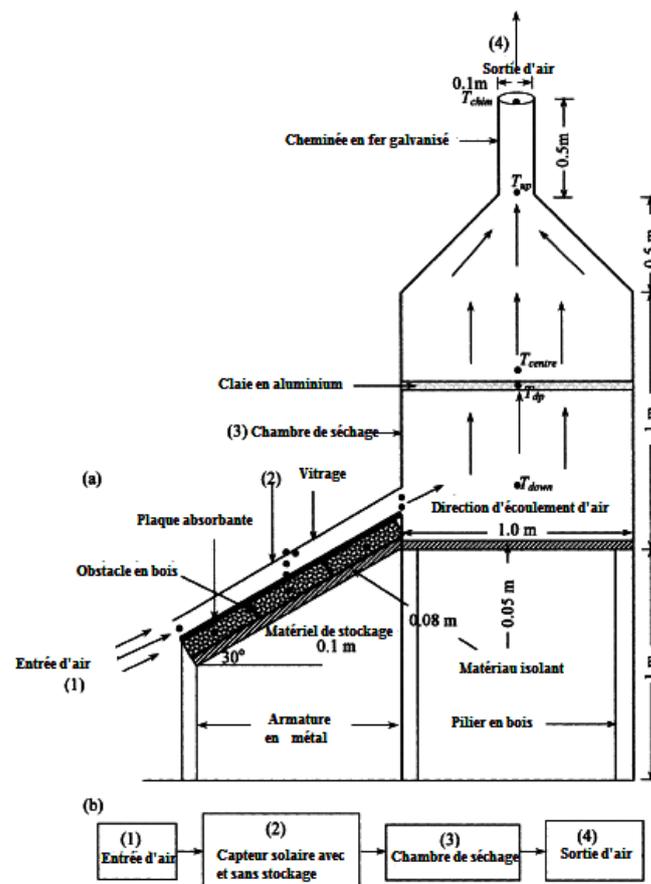


Figure I- 8: Une illustration de (a) une vue en coupe transversale du séchoir solaire à convection naturelle de type indirect; position des thermocouples et (b) diagramme de circulation d'air

Singh, Singh et Dhaliwal (2004) ont mis au point un séchoir solaire pour permettre aux agriculteurs indiens d'ajouter de la valeur à leurs produits en les séchant à la ferme (figure I-9). Il pourrait également être utilisé dans les industries artisanales dans des endroits reculés. Ce séchoir est conçu de manière multi choix avec un séchoir solaire passif, intégral, direct / indirect et portable. Le chauffage intermédiaire de l'air entre les claies entraîne un séchage uniforme sur toutes les claies. Cependant, le séchoir à la ferme ne sera probablement pas utilisé toute l'année et sera donc portable.

Une caractéristique unique de ce séchoir est que le produit peut être séché à l'ombre ou autrement selon les besoins. La conception de celui-ci nécessite peu de capital et implique donc un faible coût. La limite maximale de la température de stagnation était de 75 ° C en novembre à Ludhiana (31 ° N), en Inde.

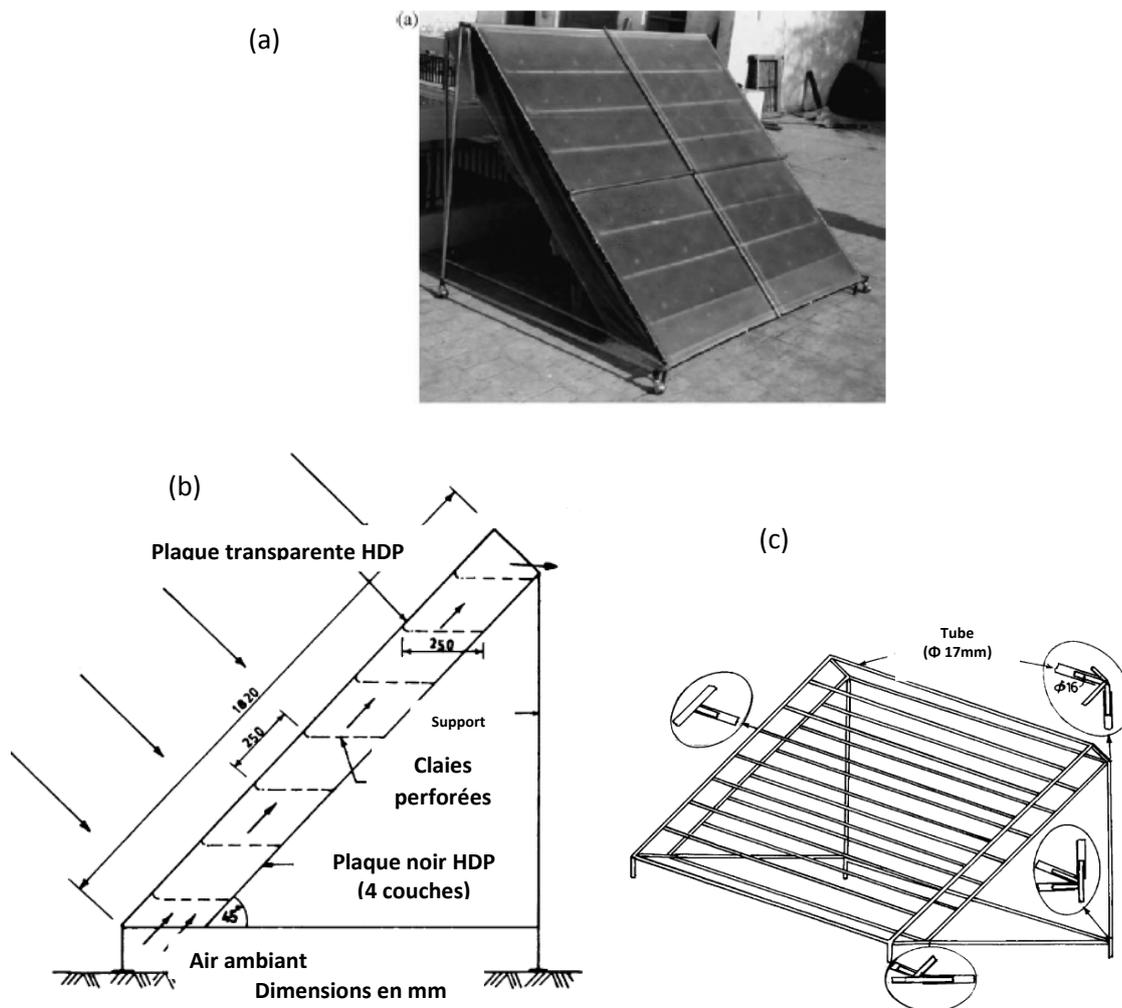


Figure I- 9: Une illustration de (a) photo du séchoir solaire portable ferme PAU (b) de la vue de côté du séchoir (c) détails de l'étagère à claies multiples

- **Séchage solaire indirect en mode actif**

Les séchoirs solaires actifs, ou séchoirs à convection forcée, sont conçus en incorporant des moyens externes, tels que des ventilateurs ou des pompes, permettant de transporter l'énergie solaire sous forme d'air chauffé de la zone des capteurs aux lits de séchage. Les appareils externes sont utilisés pour la circulation de l'air. L'air chauffé est forcé dans la chambre de séchage où il augmentera la vitesse de séchage, ainsi que l'efficacité thermique et réduira le temps de séchage. C'est un séchoir plus efficace et approprié pour une utilisation à grande échelle dans l'industrie alimentaire.

Oosthuizen a étudié l'effet d'un petit ventilateur sur un séchoir indirect passif de type armoire, le ventilateur étant suffisamment petit pour être alimenté par une batterie à faible coût ou un système photovoltaïque (figure I-10). Les résultats de cette étude indiquent que l'utilisation d'un petit ventilateur nécessitant une puissance inférieure à 2 W, peut donner des vitesses de séchage bien supérieures à celles obtenues avec un séchoir passif et à celles obtenues avec un séchage au soleil [42].

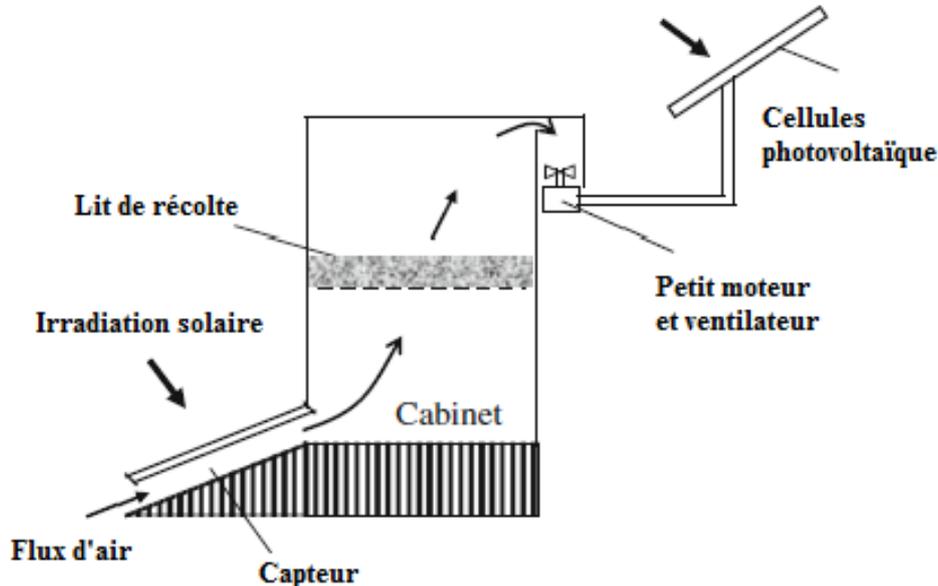


Figure I- 10: Séchoir solaire indirect à convection forcée

La figure I- 11 montre un séchoir solaire à double passage [43]. Ce type de séchoir solaire pourrait être utilisé pour le séchage de produits agricoles et marins. Les expériences sur le séchoir solaire ont été menées au Green Parc d'innovation en technologies de l'énergie, Université Kebangsaan Malaysia.

Ce séchoir solaire utilise un système de séchage à convection forcée composé d'un chauffage auxiliaire et d'un ventilateur, d'une chambre de séchage de 4,8 m x 1 m x 0,6 m et d'un réseau de capteurs solaires à double passage de 1,2 m x 4,8 m en tant que composant principal composé de quatre capteurs mis en une série. Les résultats expérimentaux du test de séchage avec des feuilles de palmier ont montré que le système était capable de sécher 100 kg de feuilles de palmier, ce qui donnait une teneur en eau de 38 kg, soit 60% (masse humide) et 10% (masse du produit) en 22 heures à un rayonnement solaire moyen d'environ 557 W / m<sup>2</sup> et un débit d'air de 0,1278 kg / s.



Figure I- 11: Photo d'un système de séchage solaire

Shanmugam et Natarajan (2007) ont étudié la performance d'un séchoir solaire indirect à convection forcée et à déshydratant. Il a été utilisé pour sécher les pois verts, et les tranches d'ananas avec et sans le miroir réfléchissant comme le montre la figure I-12. L'ajout d'un miroir réfléchissant sur le lit déshydratant augmentait considérablement le potentiel de séchage. Une augmentation de température d'environ 10 ° C a été obtenue avec le miroir. Il a réduit le temps de séchage de 2 h et 4 h pour les pois verts et les ananas, respectivement. Le matériau déshydratant (un mélange de 60% de bentonite, 10% de chlorure de calcium, 20% de vermiculite et 10% de ciment.) était en bon état même après un fonctionnement continu pendant plus d'un an. Ce séchoir peut être utilisé pour le séchage de divers produits agricoles.



**Figure I- 12: Séchoir solaire indirect à convection forcée et à déshydratant**

S. Lahsani et all (2004) ont étudié l'effet des conditions de l'air de séchage sur la cinétique de séchage du fruit de figue de Barbarie dans un séchoir solaire indirect à convection forcée.

L'appareil expérimental comprend un capteur solaire à air, un chauffage auxiliaire, un ventilateur et une armoire de séchage, comme illustré à la Figure I-13. Le capteur solaire à air avait des dimensions de 1 m sur 2,5 m. Une tôle de fer galvanisée ondulée peinte en

noir a été utilisée comme plaque absorbante pour absorber le rayonnement solaire incident. L'armoire de séchage a été construite avec des murs isolés (dimensions: 1,40 m (longueur), 0,5 m (largeur) et 0,90 m (profondeur)) et comporte 10 étagères. Un ventilateur centrifuge ( $0,0833 \text{ m}^3 / \text{s}$ ; 80 mm CE, 220 V) raccordé au côté nord de l'armoire de séchage fournit une vitesse maximale de  $1,7 \text{ m} / \text{s}$  et permet de faire varier le débit d'air de séchage de  $0,0227$  à  $0,0833 \text{ m}^3 / \text{s}$ . Le ventilateur de circulation pour fournir de l'air frais a une puissance de 0,1 kW. Le chauffage auxiliaire a une puissance de 4 kW. Il a été connecté à l'entrée du boîtier de commande.

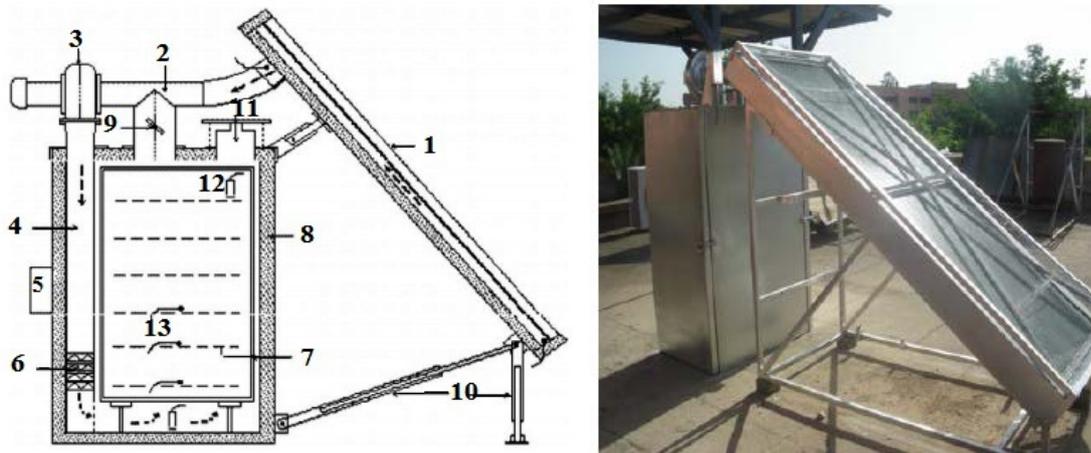


Figure I- 13: Schéma et photo du séchoir solaire (LISPAM, ENS Marrakech)

(1) insolateur, (2) conduite de ventilation, (3) ventilateur, (4) conduit d'aspiration, (5) boîte de commande, (6) appoint électrique, (7) claie contenant le produit, (8) armoire de séchage, (9) volet d'air, (10) entrée d'air, (11) sortie d'air, (12) sonde d'humidité, (13) thermocouple.

## VI. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné une revue bibliographique assez détaillée sur les performances des séchoirs solaires type indirect conçu pour le séchage des produits agro-alimentaires, en particulier dans les pays en voies de développement. La conception des séchoirs solaires indirects se base principalement sur deux éléments, un capteur solaire à air qui joue un rôle central dans le procédé de séchage et la chambre de séchage.

Dans le chapitre qui suit, on fera une étude détaillée sur l'élément le plus important de l'exploitation de l'énergie solaire qui est le capteur solaire.

## Chapitre II Etude et conception des capteurs solaires thermiques

### Partie I Etude des capteurs solaires thermiques

#### I. Introduction

L'élément le plus important de l'exploitation de l'énergie solaire est le capteur solaire. Dans cette partie de ce chapitre, on présente une étude bibliographique sur les capteurs solaires plans à air et les différents types de capteurs. Ensuite, on introduit les modèles de capteurs solaires plans à air présent dans la littérature.

#### II. Généralités sur les capteurs solaires plans

##### II.1 Caractéristiques techniques des éléments constituant les capteurs solaires plans

Le rôle d'un capteur solaire thermique est de transformer le rayonnement solaire qu'il reçoit en énergie calorifique utilisable, le plus souvent par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur (eau, air, ...). La paroi absorbante s'échauffe sous l'effet de l'absorption du rayonnement solaire incident. Le fluide qui circule sous cette paroi récupère par conduction une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température  $T_{fs} - T_{fe}$  à la traversée du capteur. Le schéma du principe d'un capteur solaire plan est illustré sur la (figure II-1).

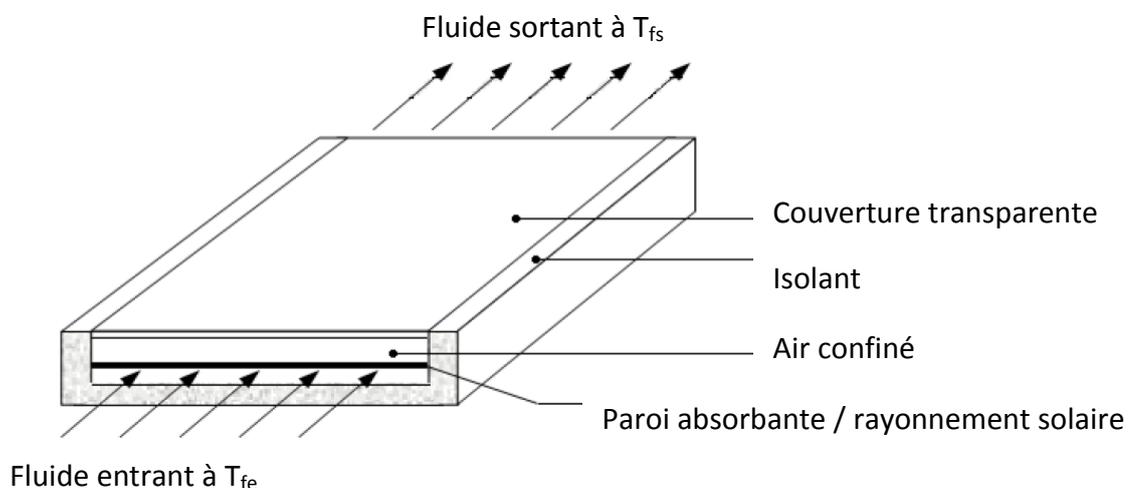


Figure II- 1: Schéma du principe d'un capteur solaire plan

---

Le capteur solaire plan se compose essentiellement des éléments suivants :

- Une plaque opaque qui absorbe le rayonnement solaire et le transmet au fluide caloporteur.
- Une isolation thermique arrière et latérale.
- Une couverture transparente en simple ou en double vitrage qui assure l'effet de serre et évite le refroidissement de l'absorbeur en le protégeant du vent.

➤ **La couverture transparente**

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

Parmi les couvertures transparentes utilisées dans la conception des capteurs solaire plans, on distingue :

- **Le verre**

La propriété physique intéressante du verre est qu'il permet de laisser passer le rayonnement solaire visible et d'arrêter le rayonnement infrarouge d'un émetteur tel que celui de l'absorbeur. La chaleur est donc bloquée entre l'absorbeur et la couverture : c'est l'effet de serre [46].

La couverture doit présenter une bonne résistance aux chocs, aux brusques variations de températures ainsi qu'aux températures élevées.

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

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

La qualité du verre est caractérisée par son rendement optique ou taux de transmission  $\xi$  qui dépend de la nature et de l'épaisseur du vitrage ainsi que de l'angle d'incidence  $i$  et de la nature du rayonnement (direct ou diffus) (valeur habituelle de  $\xi$  : 0,91).

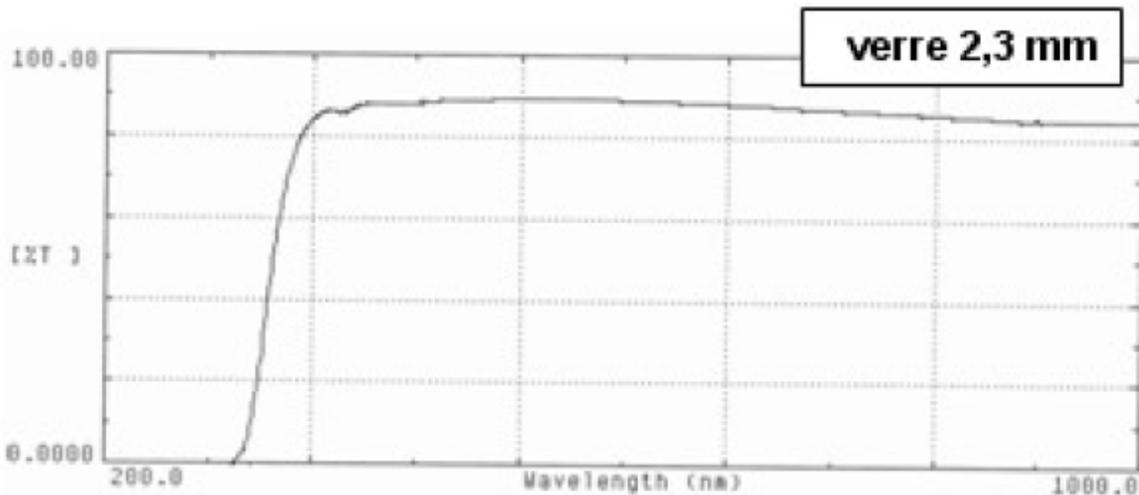


Figure II- 2: Transmissivité d'une vitre en fonction de la longueur d'onde[47]

- **Le polycarbonate**

Sont des dérivés de matières plastiques à double et à triple lame très fine, reliées entre elles par une multitude de parois pour former des cavités alvéolaires. Ces dernières réduisent le mouvement de l'air incarcéré dans cet espace, et permettent de minimiser les pertes thermiques par convection vers l'avant. Leur coefficient de transmission au rayonnement solaire, est de l'ordre de 83% sous une incidence normale à l'état neuf, qui diminue légèrement avec le temps (79% au bout de cinq ans). Il faut noter que l'effet de serre est nettement meilleur avec des couvertures transparentes en verre et en particulier avec des plaques alvéolaires à double paroi. Les polycarbonates, en comparaison avec des couvertures en verre, présentent l'avantage d'avoir une bonne résistance aux chocs thermomécanique.

**Tableau II- 1: Transmissivité de divers type de couverture dans les gammes du visible et de l'infrarouge**

Matériaux	Transmissivité à incidence normale	
	$\lambda = 0,4 - 2,5 \mu m$	$\lambda = 2,5 - 0,4 \mu m$
Le verre	0,83 – 0,91	0,00 – 0,03
Les plastiques en feuilles	0,76 – 0,92	0,02 – 0,06
Les plastiques en films	0,85 – 0,87	0,2 – 0,26

### ➤ L'absorbeur

Deux fonctions incombent à l'absorbeur :

- Absorber la plus grande partie du rayonnement solaire possible.
- Transmettre la chaleur produite vers le fluide caloporteur avec un minimum de pertes.

Les absorbeurs sont généralement réalisés avec des feuilles minces de métaux présentant une bonne conductibilité et une bonne tenue mécanique. C'est pourquoi, la plupart du temps, les absorbeurs sont réalisés au moyen d'un support en cuivre de 0,2 mm et sont recouverts par un traitement de surface.

L'absorbeur en général est disposé de 25 mm à 30 mm d'isolant, son rôle est de capter au maximum le rayonnement et d'en réémettre le moins possible.

Ces types de surfaces absorbant au maximum le visible et réémettant au minimum l'infrarouge ont été nommées surfaces « sélectives ».

La sélectivité de l'absorbeur est très importante; elle est améliorée au moyen de traitements de surface qui ajoutent au support des caractéristiques telles que le rayonnement solaire est très bien absorbé et que le rayonnement infrarouge émis (dû à l'échauffement) est limité [48].

Deux coefficients déterminent les caractéristiques de ces absorbeurs:

- $\alpha$  : coefficient d'absorption (0 à 1, optimum : 1)
- $\varepsilon$  : coefficient d'émission (0 à 1, optimum : 0)

Un tel traitement de surface peut être obtenu par des procédés électrochimiques ou électro physiques de nombreux progrès ont été réalisés dans ce domaine les plus importants, classés par ordre d'apparition, seront présentés et comparés par rapport à la peinture noire.

- **Les différents revêtements possibles**

- la peinture noire

La peinture mate noire du commerce permet d'obtenir un coefficient d'absorption  $\alpha$  compris entre 0,9 et 0,95, mais le coefficient d'émission  $\epsilon$  lui est très élevé (0,85).

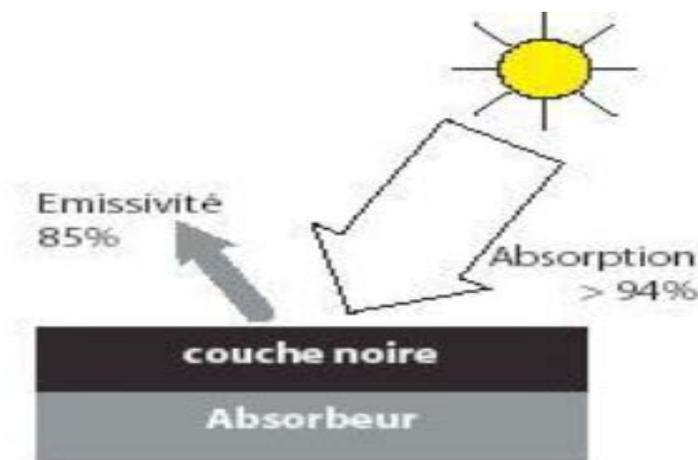


Figure II- 3: Peinture noir sur un absorbeur

- Oxyde de chrome

Le revêtement en "black chrome" (couleur noire) est composé d'oxyde de chrome déposé sur une sous-couche de nickel, le tout formant une couche extrêmement fine sur un support métallique son coefficient d'absorption  $\alpha$  est de 0,95 et son coefficient d'émission  $\epsilon$  de 0,12 à 0,18.

- Traitement sous vide

Ce revêtement sélectif a été mis au point en 1995 et est facilement reconnaissable de par sa couleur bleu marine, ce procédé consiste à déposer différents métaux (titane, ...) sur la surface absorbante en présence du vide. Le coefficient d'absorption  $\alpha$  obtenu est supérieur à 0,85 et le coefficient d'émission  $\epsilon$ , inférieur à 0,56.

Tableau II- 2: Différents traitements de surface [49]

Revêtement	Absorption : $\alpha$	Emission : $\epsilon$
Peinture noire	0,9 - 0,95	> 0,85
Chrome noir	0,95	0,12 - 0,18
Dépôt sous vide	> 0,85	< 0,56

Actuellement le procédé de revêtement sous vide a pris une grande place sur le marché grâce :

- ✓ à ses performances.
- ✓ à sa faible consommation en énergie lors de la fabrication (1kWh par m<sup>2</sup> d'absorbeur, c'est à dire moins de 10% de l'énergie nécessaire pour les autres revêtements).
- ✓ à son respect au niveau écologique (pas de dégagements de gaz ou solides, pas de pollution de l'eau).

On donne un tableau pour les valeurs de  $\epsilon$  et  $\alpha$  pour les matériaux absorbeur les plus utilisés dans les capteurs solaires plan:

Tableau II- 3: Le coefficient d'absorption  $\alpha$  et le coefficient d'émission  $\epsilon$  pour les supports les plus utilisés comme absorbeur [49]

Support	$\alpha$	$\epsilon$
Nickel noir	0,91	0,66
Chrome noir	0,96	0,62
Cuivre noir	0,98	0,63
Acier inoxydable poli	0,42	0,11
kanigen-alliage de nickel	0,45	0,08
Peinture époxy en aluminium	0,77	0,81
Peinture blanche 3M-401	0,25	0,91

---

### ➤ Le fluide caloporteur

Un fluide caloporteur (aussi appelé calorporteur), est un fluide ayant la capacité particulière de capter efficacement et durablement la chaleur ambiante. Il est donc utilisé dans différents systèmes (moteurs, chauffe-eau solaires, réfrigérateurs, etc.) pour transporter d'un point à un autre de la chaleur, en vue de produire un certain effet. Le liquide caloporteur a des caractéristiques propres, qui déterminent son efficacité dans son rôle de "transporteur de chaleur" : la viscosité du mélange, sa capacité d'acheminement de la chaleur dans le temps, sa capacité à absorber de la chaleur par conduction, sa température d'ébullition, sa température de congélation, sa corrosivité... et son coût.

Les fluides caloporteurs les plus utilisés sont :

- L'air

L'air comme agent de transport de calories a un grand avantage par son abondance et sa gratuité, est par l'absence des problèmes de gel et de corrosion ce qui donne au capteur une grande durée de vie et moins de travaux d'entretien. Mais pour transporter une quantité raisonnable d'énergie, il faut utiliser des volumes d'air très importants car sa masse volumique et sa capacité calorifique sont relativement faibles.

- L'eau

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

- les gyltherms

Des liquides organiques à base de polyphényles hydrogénés ou d'hydrocarbures linéaires traités pour ne pas présenter les mêmes défauts que l'eau, leur chaleur massique est 0,5 kcal/kg.K.

Ces hydrocarbures se détériorent en présence des traces d'eau ou d'air et combustibles à haute température.

### ➤ L'isolant

Pour réduire les pertes thermiques vers l'extérieur du capteur, l'utilisation d'un isolant est primordiale. Les isolants généralement utilisés sont la laine de verre et les mousses polyuréthanes. Leur épaisseur varie de 4 à 8 cm.

Un bon isolant doit avoir les qualités suivantes :

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

On distingue trois types d'isolants :

- Isolants minéraux : la laine de verre, la vermiculite.
- Isolants d'origine végétale : le bois bien sec, la sciure de bois.
- Isolants organiques : les matières plastiques, la mousse de polyuréthane, le polystyrène.

**Tableau II- 4: Conductivité thermique de quelques matériaux Isolants[50]**

Désignation	k (W/m K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Température Maxi d'utilisation (°C)	Observation
Laine de verre	0,034 - 0,053	70	150	Sensible à l'humidité
Mousse de verre	0,057	123	150	Sensible à l'humidité
Bois	0,13 - 0,4	123	150	
Liège exposé	0,045	100		
Polystyrène	0,042	15	85	Moulé comprimé
Polyuréthane	0,035	35	85	Moulé comprimé

---

➤ **Le coffre ou le cadre**

Le coffre du capteur renferme les différents éléments. Il devra donc assurer une protection efficace aux agents atmosphériques. Les coffres de capteurs sont réalisées soit en fine feuille de métal (acier galvanisé, aluminium, inox) avec protection par revêtement stable aux intempéries.

## **II.2 Différents types de capteurs solaires plans à air**

Les capteurs solaires à air peuvent être divisés en deux catégories principales. La première catégorie est liée à la configuration d'écoulement du canal d'air. Les différentes configurations peuvent être exprimées en quatre sous-titres dans cette catégorie. Les sous-catégories sont; un seul passage, un seul passage double flux, un double passage simple flux et un double passage recyclé simple flux.

La deuxième catégorie est liée à la conception du canal d'air. La conception du canal d'air affecte considérablement l'efficacité du système. Pour cette raison, différentes configurations de conception peuvent être utilisées dans les capteurs solaires.

La deuxième catégorie peut également être exprimée en trois sous-catégories telles que; plaque plane, surface étendue assistée, supports poreux assistés. Toutes les catégories principales et secondaires sont expliquées ci-dessous.

D'autres études existent qui ne peuvent être intégrées dans aucune de ces catégories. Ces études sont classées en tant que modèles spéciaux.

### **II.2.1 Classification selon la configuration de l'écoulement du canal d'air**

La première catégorie d'études sur les capteurs solaires à air est la «Classification selon la configuration d'écoulement du canal d'air». Cette catégorie est classée en quatre configurations différentes. Puisque la configuration du canal d'écoulement d'air est un paramètre important qui affecte l'efficacité et la température de sortie du capteur solaire, les chercheurs ont étudié de nombreux types de configurations de canaux d'écoulement d'air. Dans cette partie, différents configurations d'écoulement de canal d'air sont expliquées.

### II.2.1.1 Flux unique passage simple

Flux unique passage simple est le type de capteur solaire à air le plus courant et le plus simple. Ce type de capteur solaire à air se compose principalement d'un canal d'écoulement d'air, d'une couverture transparente, d'un absorbeur et d'un matériau isolant posé au-dessous l'absorbeur comme le montre la figure II-4. L'absorbeur est placé en dessous du canal d'écoulement d'air, et le haut du canal est recouvert d'une feuille transparente à une ou plusieurs couches, telle que du verre. L'absorbeur est fabriqué à partir d'un matériau hautement conducteur tel que l'aluminium avec des valeurs élevées d'absorptivité solaire. Généralement, une plaque noire est utilisée pour son taux élevé d'absorption solaire et en tant qu'une plaque absorbante sélective. Le canal d'écoulement d'air est isolé sur les côtés inférieurs et latéraux pour empêcher les pertes de chaleur vers l'environnement. Les matériaux d'isolation peuvent être de la laine de verre, de la laine de roche ou du polyuréthane. Le rayonnement solaire traverse la couverture transparente et est absorbé par la plaque absorbante. La température de la plaque absorbante augmente puisque la partie inférieure du capteur est isolée. La chaleur est transférée de la plaque absorbante chauffée à l'air circulant dans le canal. Dans le capteur solaire à un seul passage et écoulement unique, il y a une entrée et une sortie de l'air permettant à l'air d'entrer et de sortir facilement des canaux. C'est pourquoi ce type de capteur solaire à air est nommé «Flux unique passage simple» dans cette étude [51].

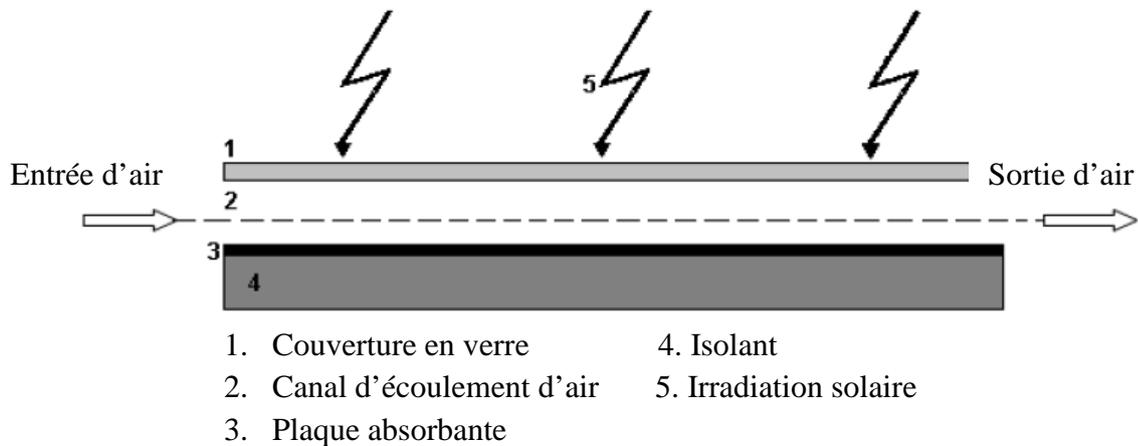


Figure II- 4: Vue schématique du flux unique passage simple dans un capteur solaire à air

### II.2.1.2 Double flux passage simple

Le capteur solaire à air à passage simple à double flux est très similaire au capteur à passage simple flux simple. La principale différence entre eux est le nombre de canaux d'écoulement d'air. Dans un capteur solaire à air à un seul passage à double flux, il y a deux canaux d'air comme illustré à la figure II-5. Le canal supérieur est composé d'un absorbeur solaire et d'une couverture en verre. Le second canal, qui est situé sur la partie inférieure du premier canal est constitué de la même plaque d'absorbeur (en haut) et de la plaque isolée (en bas). L'air entrant dans le collecteur est divisé; la moitié passe dans le canal supérieur tandis que le reste traverse le canal inférieur. Pour les deux canaux, le flux d'air pénètre dans le canal et le quitte directement. C'est pourquoi ce type de capteur solaire à air s'appelle un "Double Flux passage simple ". L'utilisation d'un capteur solaire à air à passage unique à double flux augmente la surface de transfert de chaleur et la performance thermique du système peut être supérieure à celle d'un modèle à un seul passage pour un même débit massique.

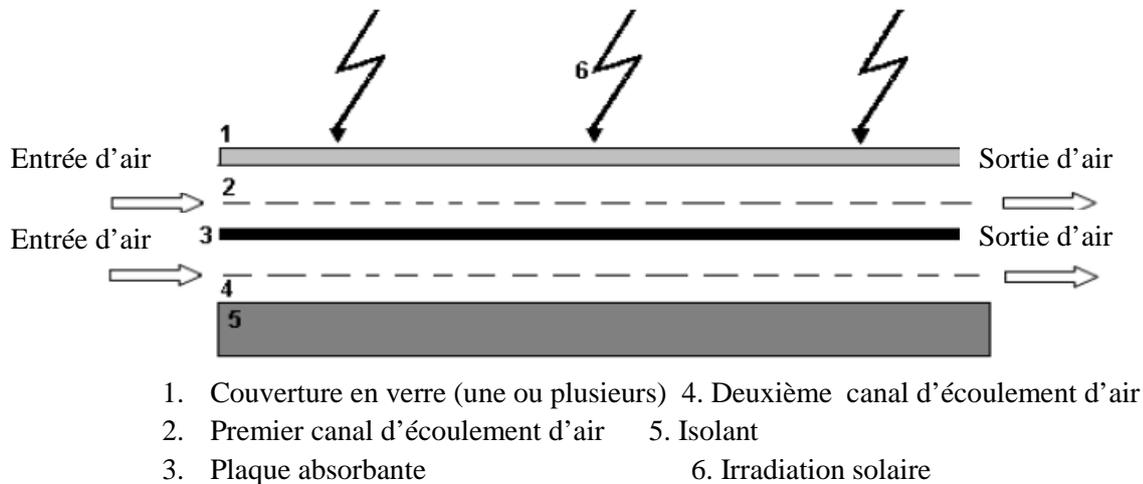
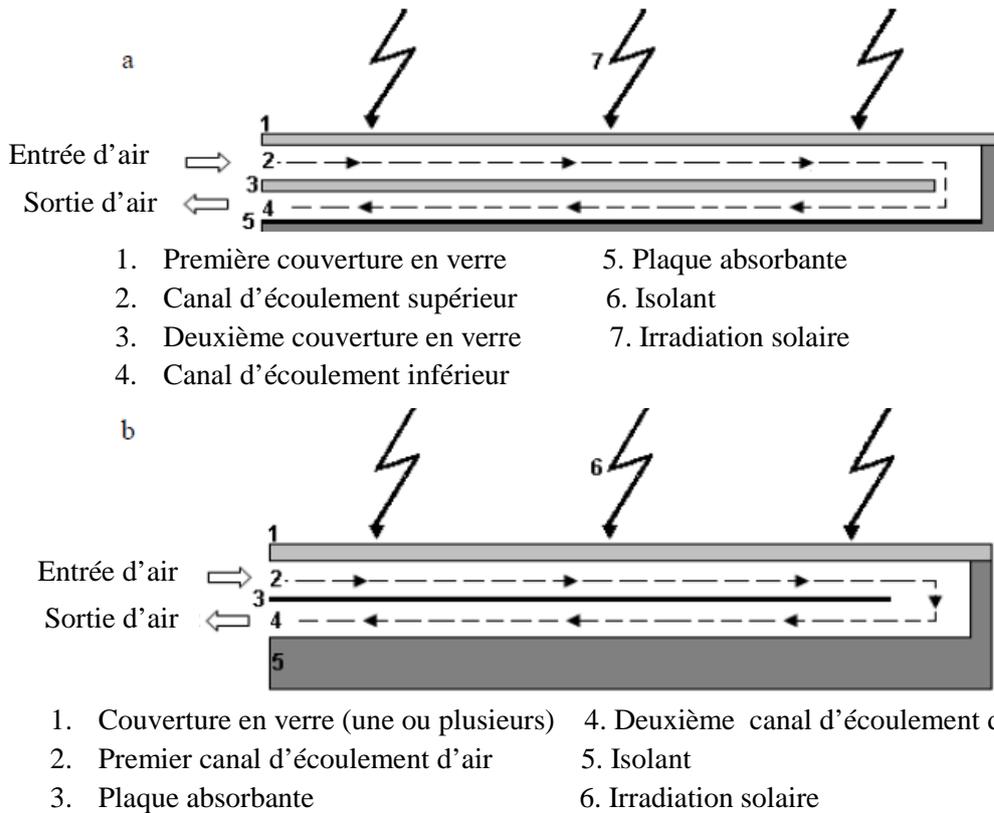


Figure II- 5: Vue schématique du double flux passage simple dans un capteur solaire à air

### II.2.1.3 Flux unique passage double

Il y a deux canaux d'écoulement d'air qui se chevauchent dans un capteur solaire à air à un seul flux double passage. L'air s'écoule du canal supérieur, change de direction à l'extrémité du canal et pénètre dans le canal inférieur. Il coule directement à travers le canal du bas. C'est pourquoi ce type de capteur solaire à air est appelé un " flux simple passage double". Deux constructions différentes d'un seul flux à double passage de capteur solaire à air sont rapportées dans la littérature. La figure II-6 (a) illustre l'un d'eux. Comme on peut le voir, il y a deux canaux d'écoulement d'air qui se chevauchent. Ces canaux sont séparés les uns des autres par un verre (ou une feuille transparente) et un absorbeur est placé sur le côté inférieur du canal inférieur. L'air s'écoule de la première et de la seconde feuille transparente et est reçu par l'absorbeur. Le côté inférieur de l'absorbeur est isolé. Dans la deuxième conception, la plaque d'absorbeur est placée en tant que séparateur entre les canaux supérieurs et inférieurs comme illustrés à la figure II-6 (b). Le canal d'écoulement d'air supérieur est formé par la couverture en verre et la plaque d'absorbeur où le canal d'écoulement d'air inférieur est situé entre la même plaque d'absorbeur et la plaque inférieure isolée.



a) capteur solaire à air à séparateur en verre    b) capteur solaire à air à séparateur en absorbeur

Figure II- 6: Vue schématique du capteur solaire à air, à flux simple, à passage double et à absorbeur plat

### II.2.1.4 Flux unique passage double Recyclé

L'utilisation de l'air chauffé recyclé dans la conception d'un capteur solaire à air peut améliorer l'efficacité et ajuster la température de sortie d'air. La circulation partielle de l'air chauffé peut fournir la température d'air désirée à la sortie du flux d'air si la température de sortie est différente de la température désirée. Comme illustré à la figure II-7, le capteur solaire à air est constitué de deux canaux. Le canal supérieur est formé par la couverture en verre (en haut) et la plaque d'absorbeur (en dessous). Les parois de l'autre canal sont isolées. Une partie de l'air chauffé est transférée dans le canal inférieur et s'écoule ensuite dans le canal d'écoulement d'air principal. Il y a une seule entrée et une sortie dans le système, la raison pour laquelle ce type de capteur solaire à air est appelé un "capteur solaire à air à flux unique à double passage recyclé".

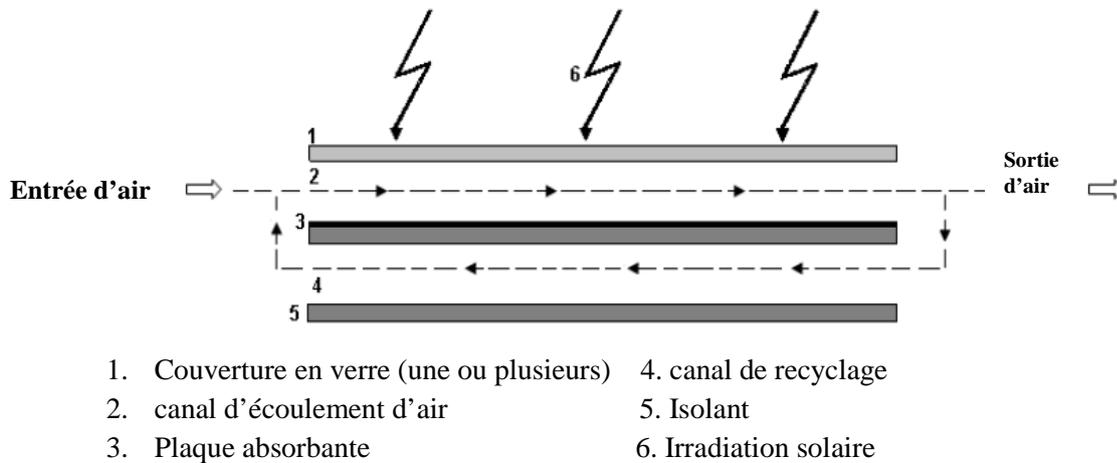


Figure II- 7: Vue schématique du capteur solaire à air à flux unique à double passage recyclé

## II.2.2 Classification selon la conception du canal d'air

Les capteurs solaires à air dans la littérature peuvent également être classés en fonction de la conception des canaux d'air. La conception du canal du capteur solaire à air peut être classée en quatre configurations différentes. En modifiant la conception du canal d'air, l'efficacité d'un capteur solaire à air peut être considérablement améliorée. Dans cette partie de cette revue bibliographique, différentes conceptions de canaux d'air sont brièvement expliquées.

### II.2.2.1 Plaque plane

Le type de plaque plane est la forme la plus simple de l'absorbeur du capteur solaire à air. Ce type de capteur solaire à air comprend une ou plusieurs couvertures en verre et une plaque absorbante (figure II-8). Tous les côtés du capteur solaire, à l'exception de la couverture en verre, doivent être bien isolés pour éviter la perte de chaleur. L'air peut circuler soit sur ou sous la plaque d'absorbeur. Les capteurs solaires à air à plaques planes peuvent être conçus en un seul passage, double passage, double flux ou recyclés. La plaque absorbante est généralement une plaque lisse et elle ne contient pas d'ailette, d'obstacle ou d'élément de rugosité.

La construction d'un capteur solaire à air à canal d'air plat est simple; par conséquent, il a un faible coût. Comme aucun mécanisme ou procédé n'est utilisé pour améliorer le transfert de chaleur dans le canal, l'efficacité de ce type de capteur solaire à air est plus faible que les autres types.

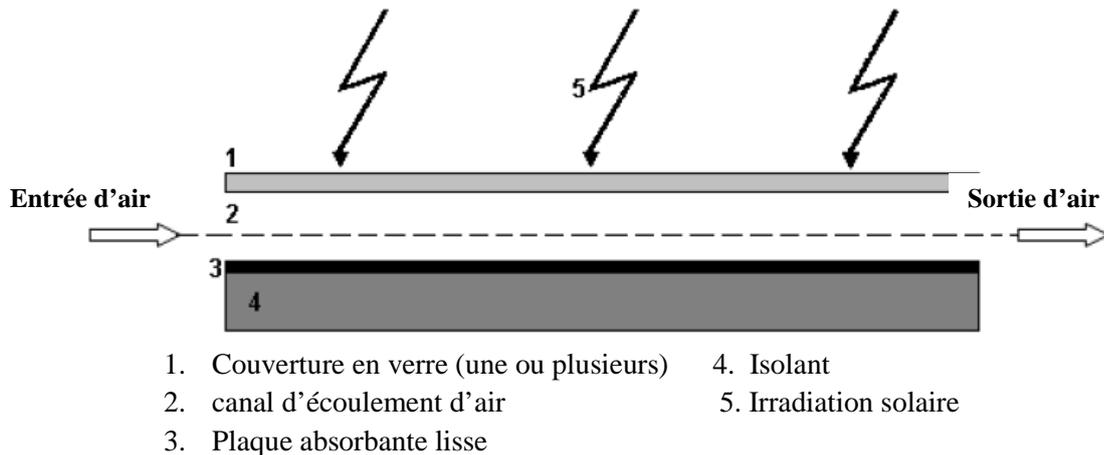


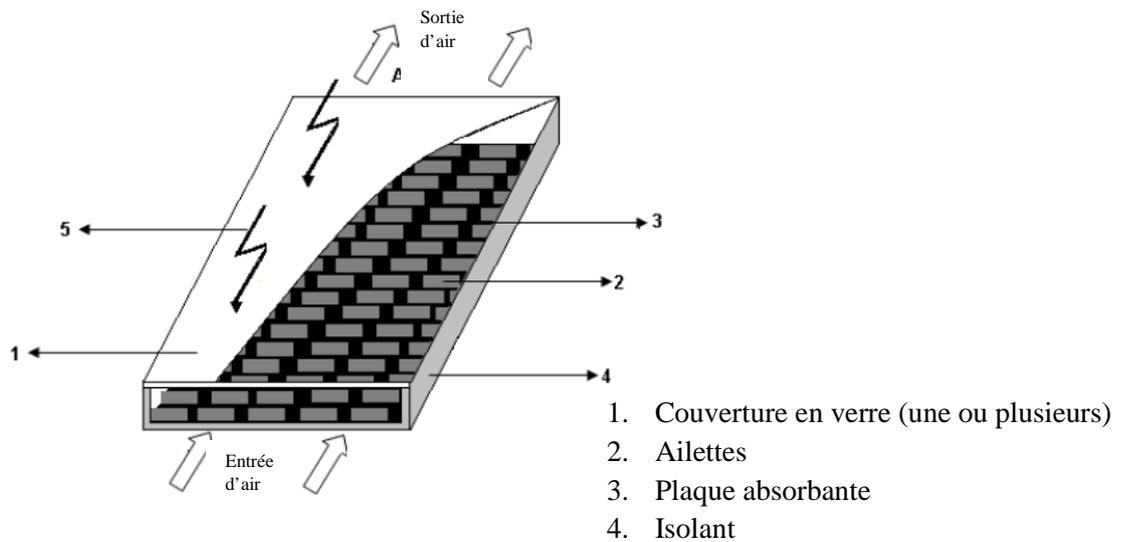
Figure II- 8: Vue schématique d'un capteur solaire plan à air

### II.2.2.2 Surface étendue assistée

Plusieurs conceptions ont étudié comment augmenter le faible rendement thermique des capteurs solaire à air à canal d'air plat. Puisque le type de plaque absorbante est l'un des paramètres les plus importants qui affectent le rendement thermique des capteurs solaires à air, de nombreuses conceptions d'absorbeurs ont été étudiées. L'extension de la surface de la plaque absorbante peut être un moyen efficace d'améliorer les performances des capteurs solaires à air. Fixer des ailettes, des nervures, des obstacles ou tout autre élément de rugosité (tout élément qui cause la rugosité sur la plaque d'absorbeur) sur la plaque d'absorbeur pourrait augmenter la surface du capteur solaire à air. Un capteur solaire à air assisté par une surface étendue de canal d'air a une couverture transparente, un matériau d'isolation et une plaque absorbante rugueuse qui absorbe le rayonnement solaire.

L'élément ou les ailettes de rugosité montés sur la plaque absorbante étendent non seulement la zone d'absorption mais assurent également le mélange de l'air circulant dans

le canal et augmentent par conséquent le coefficient de transfert de chaleur. Bien que l'utilisation d'éléments de rugosité ou d'ailettes augmente la surface et le coefficient de transfert de chaleur, la perte de charge à travers le canal sera augmentée en même temps. Une augmentation de la perte de charge du canal se produira, car une augmentation de la puissance requise du ventilateur ou de la soufflante qui fournit l'air au capteur est également nécessaire. C'est pourquoi de nombreuses recherches ont porté sur la conception de l'élément de rugosité ou des géométries des ailettes.



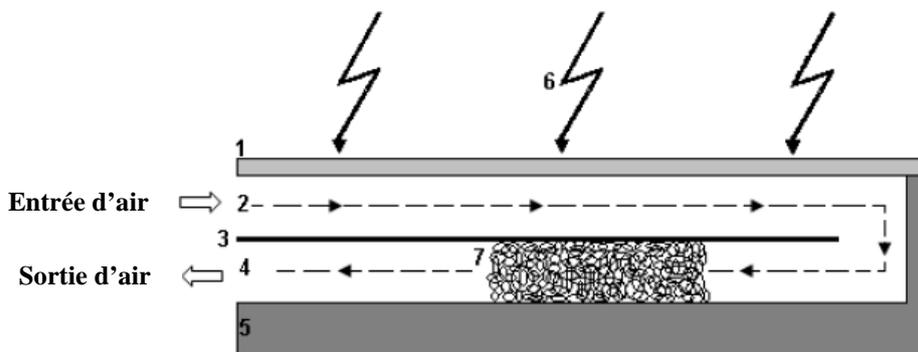
Les canaux d'écoulement seront un ou plusieurs selon la conception

Figure II- 9: Vue schématique plaque absorbante à ailette

### II.2.2.3 Milieu poreux

L'ajout d'un milieu poreux au canal d'air d'un capteur solaire pourrait être un moyen utile pour augmenter la température de sortie d'air et le rendement thermique. L'utilisation de milieux poreux dans le canal d'écoulement d'un capteur solaire à air favorise l'échange entre le flux d'air et la zone de transfert de chaleur. Ces capteurs solaires se composent d'une couverture transparente, d'un matériau isolant, d'une plaque absorbante et de milieux poreux (Figure II-10). Le milieu poreux est inséré dans le canal d'écoulement du capteur solaire à air. L'air circule dans le canal en contact avec le milieu poreux qui est en contact avec l'absorbeur. Les capteurs solaires munis de milieu poreux

peuvent être conçu en un seul passage, double passage ou recyclé mais ils sont généralement des systèmes à simple flux à double passage. Les milieux poreux peuvent être choisis parmi les matériaux hautement conducteurs pour accélérer le transfert de chaleur entre les milieux poreux et le flux d'air à travers le canal. La porosité du milieu poreux est un paramètre très important pour indiquer la chute de pression (baisse de pression) à travers le canal. Bien que la diminution de la porosité augmente le coefficient de transfert de chaleur efficace, il augmente aussi la perte de charge dans le canal.



- |   |                        |
|---|------------------------|
| 1. Couverture en verre (une ou plusieurs) | 5. Isolant             |
| 2. Premier canal d'écoulement d'air       | 6. Irradiation solaire |
| 3. Plaque absorbante                      | 7. Milieu poreux       |
| 4. Deuxième canal d'écoulement d'air      |                        |

Les canaux d'écoulement seront un ou plusieurs selon la conception

Figure II- 10: Vue schématique d'un capteur solaire à air à milieu poreux

### II.3 Modèles de capteurs solaires plans à air

- **Etude et optimisation des performances thermiques de la plaque rectangulaire avec ailettes coudé aux plaques d'absorbeur**

Ce modèle de capteur à air, développé en France par l'équipe du Laboratoire de Mécanique et d'Energétique de l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, est doté de plusieurs plaques rectangulaires minces orientées parallèlement à l'écoulement et soudées à la face inférieure de l'absorbeur.

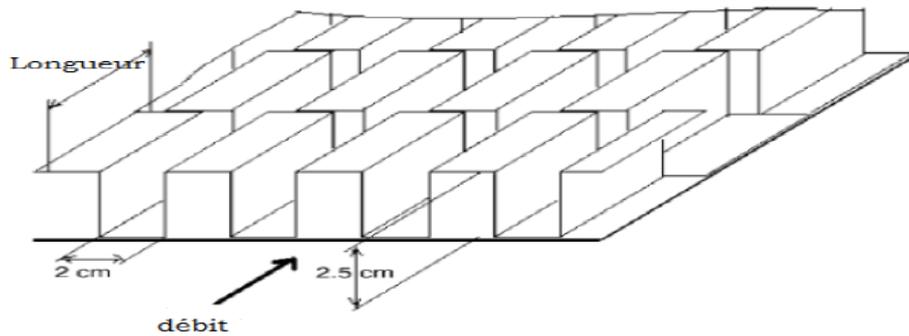


Figure II- 11: Plaques rectangulaires minces orientées parallèlement à l'écoulement

L'étude expérimentale menée sur ce modèle montre que les plaques ajoutées augmentent le transfert thermique entre l'absorbeur et l'air ce qui réduit ses pertes vers l'extérieur, et par conséquent un rendement supérieur à celui d'un capteur avec un absorbeur plat et simple. Ainsi que la couverture triple donne des performances plus importantes que celles doubles, qui sont dues à la minimisation des pertes vers l'extérieur [52].

- **Etude comparative sur la performance d'un nouveau capteur solaire à air avec différentes formes de surface**

Dans le but d'étudier l'influence de la conception et de la forme géométrique de l'absorbeur sur les performances thermiques d'un capteur solaire à air, une étude expérimentale sur quatre configurations d'absorbeurs a été menée au sein du Campus de l'Université de Zhengzhou dans la ville de Zhengzhou en Chine [53].

Les principales caractéristiques des quatre capteurs solaires à air testés sont les suivantes :

Le type I de l'absorbeur est plat. Le type II est nommé en tant que plaque en saillie. Dans ce type, la hauteur de la rugosité relative<sup>1</sup> ( $R / D$ ) est de 5 et la saillie est une distribution de diamant régulière (Figure II-12.a).

<sup>1</sup> Rugosité est la moyenne distances saillies-creux de la surface. Ces saillies et creux peuvent être dues aux arrachements, fentes, stries, sillons, rouille ...

Rugosité relative est le rapport de la rugosité moyenne ( $R$ ) sur le diamètre ( $D$ ) des conduits appelé rugosité relative ( $D$  et  $R$  dans la même unité):  $R/D$ .

Le type III est nommé plaque ondulée sinusoïdale. Dans ce type, la longueur d'onde est égale à 2 fois l'amplitude (Figure II-12.b).

Le type IV est appelé plaque sinusoïdale ondulée et saillie, qui est la combinaison de type II et de type III (Figure II-12.c).

Cette étude expérimentale a permis de tester les quatre configurations citées précédemment et de déduire que le rendement du capteur s'améliore avec l'augmentation des débits massiques en raison d'un transfert de chaleur amélioré. Aussi le rendement des capteurs d'air augmente en fonction de la géométrie de la surface du capteur et de l'extension de la conduite d'écoulement d'air. Lorsque la rugosité de surface augmente, le transfert de chaleur et la perte de charge augmentent.

La surface absorbante ondulée a une zone d'échange thermique relativement grande, de sorte que le transfert de chaleur augmente. La surface de la plaque absorbante en saillie peut produire des courants tourbillonnants et secondaires, entraînant une augmentation du coefficient de convection du transfert de chaleur.

On conclut que le changement de la forme de la plaque absorbante est meilleur que d'adapter la forme plane.

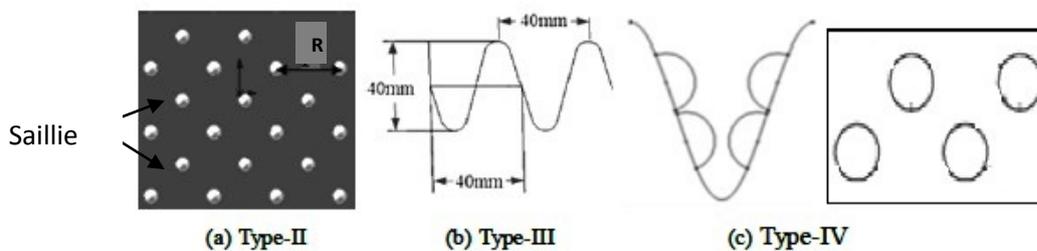
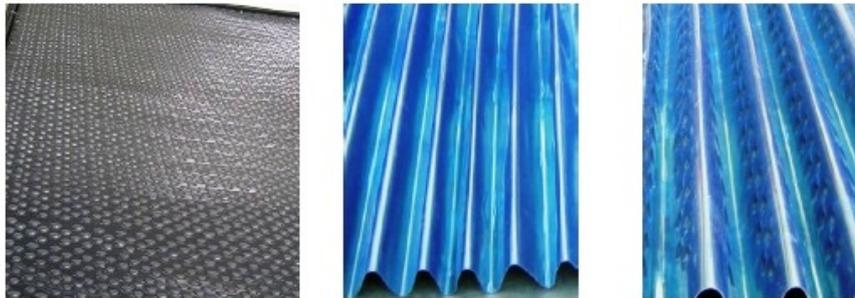


Figure II- 12: Les différentes structures de l'absorbeur

- **Analyse expérimentale de l'énergie et de l'exergie d'un capteur solaire à air à double flux ayant différents obstacles sur des plaques absorbantes**

Ce travail présente une analyse expérimentale d'énergie et d'exergie pour un capteur solaire à air à double flux avec et sans obstacles. Quatre types de plaques absorbantes en acier inoxydable avec des revêtements sélectifs chromés noirs ont été utilisés (figure II-13). Les mesures ont été effectuées à différentes valeurs du débit massique d'air et à différents niveaux de plaques absorbantes dans le conduit du canal d'écoulement. Après l'analyse

des résultats, la valeur optimale de l'efficacité est quand la plaque absorbante se trouve au niveau moyen (Etat-II) du capteur pour toutes les conditions de fonctionnement. Le capteur à double flux muni d'obstacles semble significativement meilleur que celui sans obstacles. Le capteur de type III donnait toujours un rendement supérieur à celui du type I (sans obstacles). Les obstacles assurent un bon écoulement de l'air au-dessus et au-dessous des plaques d'absorbeur, créent la turbulence et réduisent les zones mortes dans le capteur. A la fin de cette étude, les relations exergetiques sont livrées pour différents capteurs solaires à air.

Les résultats montrent que la plus grande irréversibilité se produit au capteur plat (sans obstacles), puisque, seule une petite partie de l'énergie solaire absorbée par le capteur peut être utilisée dans l'analyse exergetique [54]. De plus, cette étude nous a permis de conclure que l'introduction d'obstacles dans les canaux d'air est un facteur très important pour l'amélioration de l'efficacité des capteurs. Cependant, la forme, les dimensions, l'orientation et la disposition des obstacles influencent aussi considérablement sur l'efficacité du capteur.

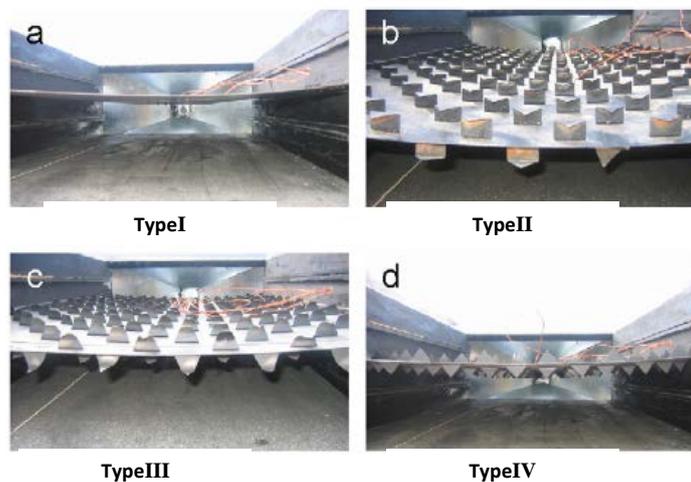


Figure II- 13: Les types de plaques absorbantes

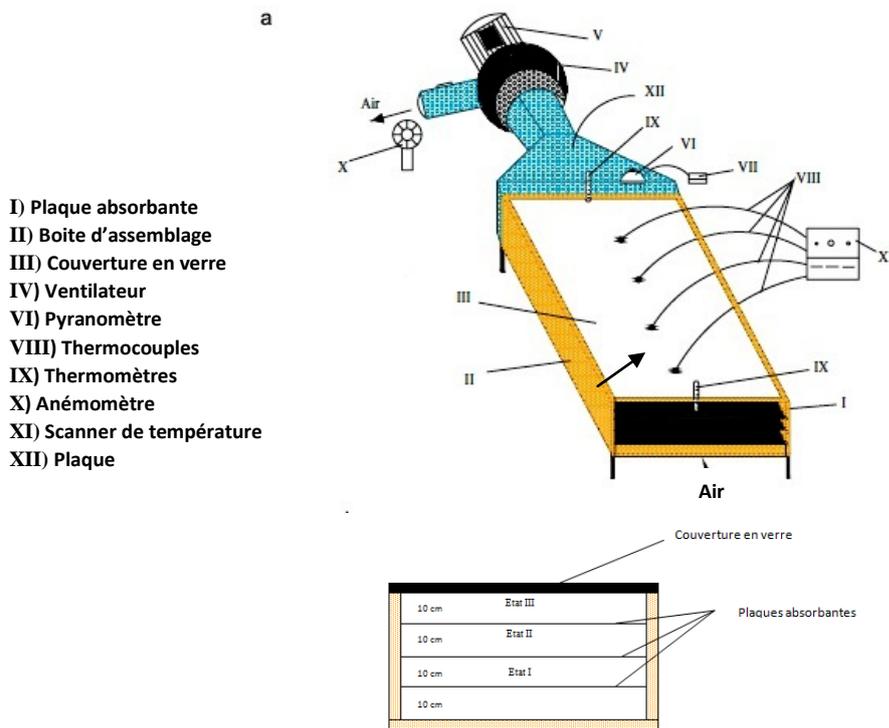


Figure II- 14: Schéma du système (a) SSA et (b) vue de face du capteur

### III. Conclusion

De nombreuses recherches théoriques et expérimentales ont été menées dans le passé concernant l'amélioration des performances des capteurs solaires à air. À partir de l'analyse bibliographique que nous avons réalisée, nous pouvons conclure que :

- La Fixation des ailettes, des nervures, des obstacles ou tout autre élément de rugosité sur la plaque d'absorbeur augmentent non seulement la zone d'absorption mais assurent également le mélange de l'air circulant dans le canal et augmentent par conséquent le coefficient de transfert de chaleur.
- L'introduction d'obstacles dans les canaux d'air est un facteur très important pour l'amélioration de l'efficacité des capteurs. Cependant, la forme, les dimensions, l'orientation et la disposition des obstacles influencent aussi considérablement sur l'efficacité du capteur.

- La modification de la forme de la plaque absorbante est meilleure que de maintenir la forme plane.

Dans la partie suivante, nous présentons la conception, la réalisation d'un capteur solaire plan à air avec absorbeur en polyéthylène et ces performances thermiques.

---

## Partie II Conception et réalisation d'un capteur solaire plan à air avec absorbeur en polyéthylène

### I. Introduction

Les capteurs solaires à air sont utilisés dans beaucoup d'applications nécessitant des températures basses et modérées, telles que le chauffage des locaux et le séchage qui est une opération souvent nécessaire dans de nombreux processus (agro-alimentaire, matériaux de construction, bois...).

Dans cette partie, on présente les résultats des essais effectués sur le capteur solaire à air. En premier lieu, on donne la méthode de réalisation du prototype expérimental en se référant aux modèles standards des capteurs à air, ensuite une campagne de mesures a été menée afin d'évaluer les performances thermiques de ce capteur pour une éventuelle utilisation dans le séchage des produits agroalimentaires.

### II. Conception et réalisation du capteur solaire à air

La conception de ce capteur repose sur l'utilisation d'un absorbeur constitué d'une plaque alvéolaire en polyéthylène associée à une plaque en acier. L'idée étant d'exploiter les alvéoles de la plaque en polyéthylène pour y faire circuler l'air.

#### II.1 Etapes de réalisation du capteur solaire à air

- **Dimensionnement de la couche d'isolation du capteur**

Lors de la réalisation du capteur solaire à air, on doit savoir la quantité d'isolant nécessaire pour réduire au minimum les pertes de chaleur. Puisque l'isolant est intercalé entre l'absorbeur et le boîtier d'assemblage, on est alors amené à déterminer l'épaisseur de la couche d'isolation.

Le flux de chaleur échangé entre l'absorbeur à la température  $T_1$  et la face externe du boîtier à la température  $T_2$  fait intervenir essentiellement le transfert par conduction. Soient alors les deux parois, l'une à la température  $T_1$  et l'autre à la température  $T_2$  et l'isolant d'épaisseur  $e$  intercalé entre ces deux parois.

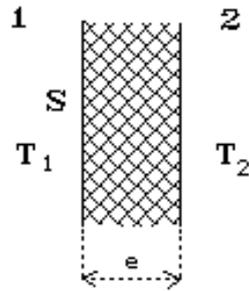


Figure II- 15: Schéma des parois à la température  $T_1$  et  $T_2$

La théorie de la conduction repose sur la loi de Fourier : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température :

$$q = -k \cdot \overrightarrow{\text{grad}T} \quad (\text{II-1})$$

Où  $q$  est la densité de flux. Elle s'exprime en  $\text{W}/\text{m}^2$ .

$k$  est appelé conductivité thermique du milieu. Il s'exprime en  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

$\overrightarrow{\text{grad}T}$  est le gradient de température. Il s'exprime en  $\text{K} \cdot \text{m}^{-1}$ .

La densité de flux s'écrit :

$$q = -\frac{k}{e} \cdot (T_1 - T_2) \quad (\text{II-2})$$

Le flux thermique qui traverse une section  $S$  du milieu est :

$$\Phi = q \cdot S = \frac{k}{e} \cdot S \cdot (T_2 - T_1) \quad (\text{II-3})$$

$S$  étant la surface en  $\text{m}^2$ ,

$\Phi$  est le flux thermique en  $\text{W}$ ,

$T_1$  : Température moyenne du capteur, à la face extérieure du capteur

$T_2$  : Température moyenne à l'entrée du capteur.

D'où l'épaisseur est :

$$e = \frac{[(T_2 - T_1)(kS)]}{\Phi} \quad (\text{II-4})$$

Le calcul du flux thermique  $\phi$  :

Nous estimerons le flux de chaleur échangé entre l'air qui circule dans le capteur et l'ambiance extérieure. Tout d'abord on fixe les pertes de chaleur qu'on peut tolérer.

$$\phi = X \cdot Q_u \tag{II-5}$$

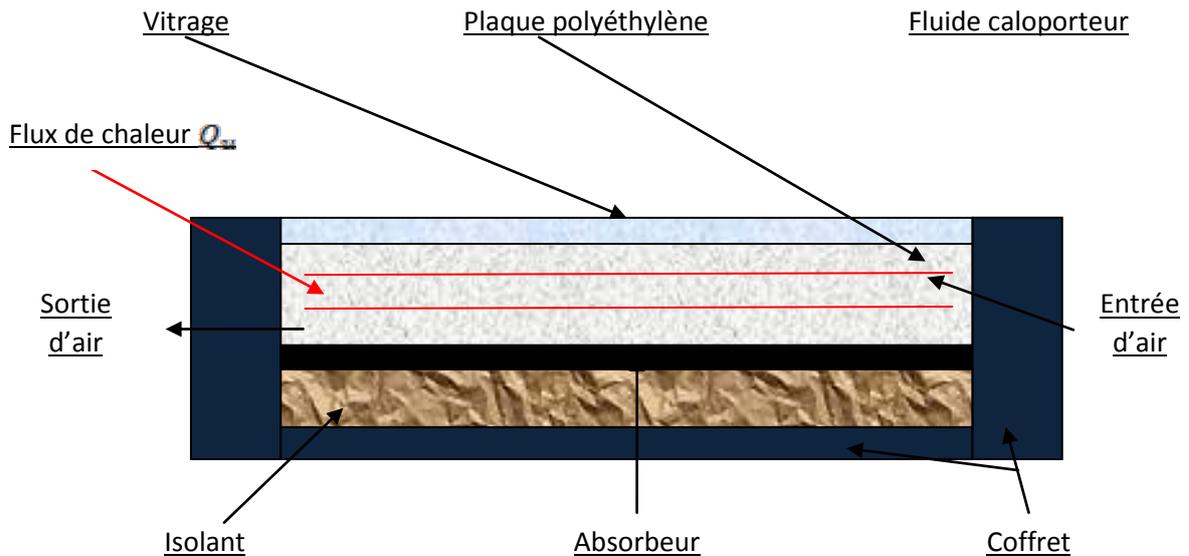


Figure II- 16: Schéma du capteur solaire à air

Le flux de chaleur :

$$Q_u = \dot{m} c_p \Delta T \tag{II-6}$$

- X est le pourcentage de perte de chaleur qu'on peut tolérer et qu'on a fixé à 8 %.

Avec :

$\dot{m}$ : Débit massique d'air en  $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ .

$c_p$ : Chaleur spécifique d'air =  $1004 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

Application numérique :

$$e = \frac{[(T_2 - T_1)(kS)]}{\phi} \tag{II-4}$$

- Le flux thermique  $\phi$  :

Les pertes de chaleur tolérées sont de 8 %.

$$\phi = X \cdot Q_u \quad (II-8)$$

Avec :

$$Q_u = \dot{m} c_p \Delta T$$

$$\dot{m} = \frac{\rho \cdot V}{t}$$

Où :

$\Delta T$  : l'écart entre la température de l'air entre le milieu du capteur et son entrée.

$\rho$  : la masse volumique de l'air = 1,204 kg.m<sup>3</sup> à la température moyenne du fonctionnement du capteur.

$K$  : la conductivité du liège = 0,045 W.m<sup>-1</sup>.k<sup>-1</sup>.

$S$  : la surface = 1 m<sup>2</sup>.

$V = N_b \cdot (L_a \cdot l_a \cdot H_a) = 78(0,01 \cdot 0,01 \cdot 1,2) = 9,36 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$

D'où:  $\dot{m} = 0,0114 \text{ Kg/s}$

$$Q_u = 196,40 \text{ W}$$

$$\phi = 15,71 \text{ W}$$

Donc:

$$e = \frac{[(T_2 - T_1)(kS)]}{\phi} \quad (II.4)$$

$$e = \frac{[(17,13)(0,045 \cdot 1)]}{15,71} = 0,049 \text{ m} = 5 \text{ cm}$$

- **Assemblage des différents éléments du capteur**

- L'isolation de la boîte d'assemblage

Afin d'isoler le capteur, des plaques de liège de 5 cm d'épaisseur ont été placées au fond de la boîte d'assemblage.



Figure II- 17: L'emplacement de l'isolant dans le coffre du capteur

➤ L'absorbeur

L'absorbeur est constitué d'une plaque en polyéthylène alvéolaire associée à une plaque métallique sous jacente. La section des alvéoles est de  $1 \text{ cm}^2$ , ces alvéoles permettent à l'air de circuler suivant un circuit serpentin à l'intérieur de la plaque en polyéthylène.



Figure II- 18: Absorbeur constitué par une plaque en polyéthylène alvéolaire et plaque métallique

➤ La vitre

La couverture est constituée d'une vitre d'épaisseur 6 mm. La vitre est fixée sur les bords supérieurs de la boîte d'assemblage en laissant un espace d'air entre elle et la plaque en polyéthylène afin d'éviter les pertes de chaleur par conduction.



Figure II- 19: Emplacement de la vitre

➤ Système de ventilation

Le système de ventilation comporte un ventilateur avec un débit variable jusqu'à  $320(\text{m}^3/\text{h})$ , lié à une conduite conique afin d'injecter l'air vers les alvéolaires du capteur.



Figure II- 20: Système de ventilation

➤ Chambres de séchage



**Figure II- 21: (a) Boîte de séchage lié au capteur; (b) Boîte de séchage de référence**

Sept thermocouples ont été placés sur le système, pour étudier l'évolution de la température de l'air le long du capteur. Ils ont été placés comme suit :

- à l'entrée du capteur (T entrée).
- à la sortie du capteur (T sortie).
- à 1/3 de la surface du capteur (T milieu 1).
- à 2/3 de la surface du capteur (T milieu 2).
- au milieu de la surface de l'absorbeur (T absorbeur).
- dans la boîte de séchage lié au capteur (T B.C).
- dans la boîte de séchage de référence (T B.R).

## II.2. Résultats expérimentaux

Le capteur a été constitué sur la base d'une plaque alvéolaire en polyéthylène. A l'entrée du capteur, on a branché un ventilateur ayant un débit relativement élevé (320 m<sup>3</sup>/h), l'air est alors propulsé à travers le capteur et dirigé jusqu'à la chambre de séchage. Afin d'évaluer ses performances, une campagne de mesure a été réalisée en mai 2014.

Les mesures effectuées ont porté sur l'irradiation solaire globale reçue par le plan du capteur solaire, les températures de l'air en plusieurs endroits du capteur depuis son entrée jusqu'à sa sortie ainsi que la température de l'air dans les chambres de séchage. Les

prises de ces mesures ont été réalisées au bout de chaque 5 secondes ensuite cumulées, moyennées sur une heure et stockées dans le module de stockage.

Signalons que ce protocole expérimental a été géré automatiquement à l'aide d'un programme informatique qu'on a introduit dans le système d'acquisition.

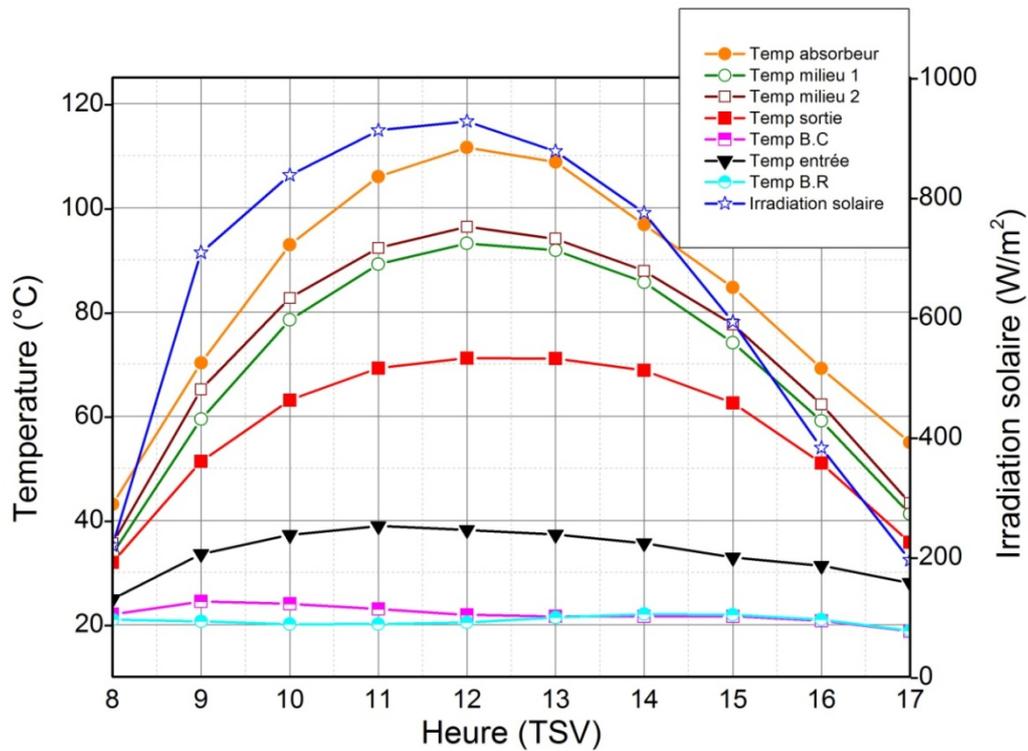


Figure II- 22: Evolution des températures du capteur en polyéthylène sous ventilation forcée et du rayonnement global en fonction du temps

D’après la figure II-22, la température d’air maximale au milieu 1 du capteur est de 93°C et celle du milieu 2 est de 96°C. Par ailleurs, on a constaté qu’au cours de la journée la température à l’intérieur de la chambre de séchage est demeurée pratiquement identique à la température de la chambre de référence, qui est très faible par rapport à la température 71°C enregistrée à la sortie du capteur. Nous pouvons dire que l’air chaud n’arrive pas à circuler librement jusqu’à la sortie du capteur pour arriver à la chambre de séchage.

On peut interpréter ce résultat par les pertes de charges énormes au niveau du capteur qui sont proportionnelles à la longueur de la conduite et inversement proportionnelle à sa section. En effet, la circulation en serpentin augmente la longueur

du trajet et sachant que la section de l'alvéole est faible de  $1 \text{ cm}^2$ , ces deux facteurs augmentent les frottements d'air sur les parois ce qui empêche sa circulation libre. L'air chaud s'échauffe et reste stagné dans le capteur sans atteindre la sortie ou la chambre de séchage.

### III. Conclusion

D'une manière générale les capteurs à air ont des performances thermiques relativement faibles par rapport aux capteurs solaires à eau. En effet, l'air comme fluide caloporteur a des propriétés physiques beaucoup plus faibles que celles de l'eau : sa capacité thermique est quatre fois plus faible que celle de l'eau, sa conductivité thermique est vingt fois plus faible que celle de l'eau et sa masse volumique est mille fois plus petite que celle de l'eau. C'est ainsi que l'air est utilisé mieux comme isolant thermique que conducteur de chaleur. De ce fait, on doit apporter un soin particulier pour la conception et la réalisation des capteurs solaires à air.

L'étude expérimentale qu'on a réalisée a certainement fourni la réponse d'une façon partielle à notre problématique de départ, qui est l'amélioration de la température d'un capteur solaire plan à air.

Par ailleurs, pour améliorer davantage les performances thermiques de notre capteur solaire plan à air, on recommande d'éviter l'utilisation d'une circulation en serpentins car bien qu'elle augmente la durée du séjour de l'air dans le capteur pour recevoir le maximum de rayonnement solaire elle introduit des pertes de charge croissant avec la longueur du circuit. On recommande l'utilisation des conduites d'air direct avec des sections importantes pour favoriser la circulation même en absence de ventilateur.

## Partie III Conception et réalisation d'un capteur solaire plan à air avec absorbeur en aluminium ondulé

### I. Introduction

Dans cette partie, on présente les résultats des essais effectués sur un capteur solaire à air à absorbeur ondulé. D'abord, on présente la méthode de réalisation du dispositif expérimental de ce capteur, puis une campagne de mesures a été réalisée dans le but d'évaluer les performances thermiques de ce capteur pour une éventuelle utilisation dans le séchage des produits agroalimentaires.

### II. Conception et réalisation du capteur solaire à air

#### II.1 Etapes suivies pour la réalisation du capteur solaire à air

➤ L'absorbeur

Deux plaques ondulées en aluminium sont placées au-dessus d'une plaque de liège d'épaisseur de 5 cm, peintes en peinture noir mate et groupées en opposition afin de former sept cylindres parallèles jouant le rôle d'absorbeur et assurant la circulation de l'air tout au long du capteur.



Figure II- 23: Emplacement de l'absorbeur ondulé

➤ La couverture

La couverture est constituée par une vitre d'épaisseur 6 mm. Elle a été fixée sur les bords supérieurs de la boîte d'assemblage en laissant un espace d'air entre l'absorbeur et la vitre.



Figure II- 24: Emplacement de la vitre

### III. Résultats expérimentaux du capteur

Le capteur solaire étudié a été conçu et réalisé au laboratoire d'Énergie Solaire et d'Environnement de la Faculté des Sciences de Rabat. Il est d'une surface égale à  $1\text{m}^2$ , d'une longueur  $1,20\text{ m}$ , d'une largeur  $0,90\text{ m}$  et d'une épaisseur  $0,16\text{ m}$ . Il a été placé face au sud, incliné d'un angle de  $34^\circ$  par rapport à l'horizontale correspondante à la latitude de Rabat. L'air ambiant entre par le bas du capteur, il est chauffé grâce à son contact avec l'absorbeur. Pour déterminer les performances thermiques de ce capteur, des tests ont été effectués pendant des journées assez ensoleillées.

La figure II-25 montre les variations de températures, de l'air à l'entrée et à la sortie du capteur, de l'absorbeur ondulé et l'irradiation solaire pour une journée claire de juin 2015 sous une convection naturelle.

On constate que la température de l'absorbeur est beaucoup plus élevée que les autres températures à différents points du capteur. On observe aussi que la température de l'air à la sortie du capteur atteint  $67^\circ\text{C}$  à midi TSV. Ainsi pour une température de l'air à l'entrée de  $22^\circ\text{C}$ , le capteur a permis une élévation de la température d'environ  $45^\circ\text{C}$ .

Dans la figure II-26, on a présenté l'évolution de la température de l'air à l'entrée et à la sortie du capteur sous convection forcée pendant une journée ensoleillée de juin 2016.

Pour un débit de ventilateur de 150 m<sup>3</sup>/h, on constate que la température de l'air à la sortie du capteur a diminué par rapport au cas précédent où l'air est sous convection naturelle. Ainsi elle n'atteint que 36°C au lieu de 67°C pour le cas de la convection naturelle. Ces résultats montrent donc que la température de sortie d'air diminue en augmentant le débit d'air, ce résultat est en accord avec celui de Choudhury et Garg [55].

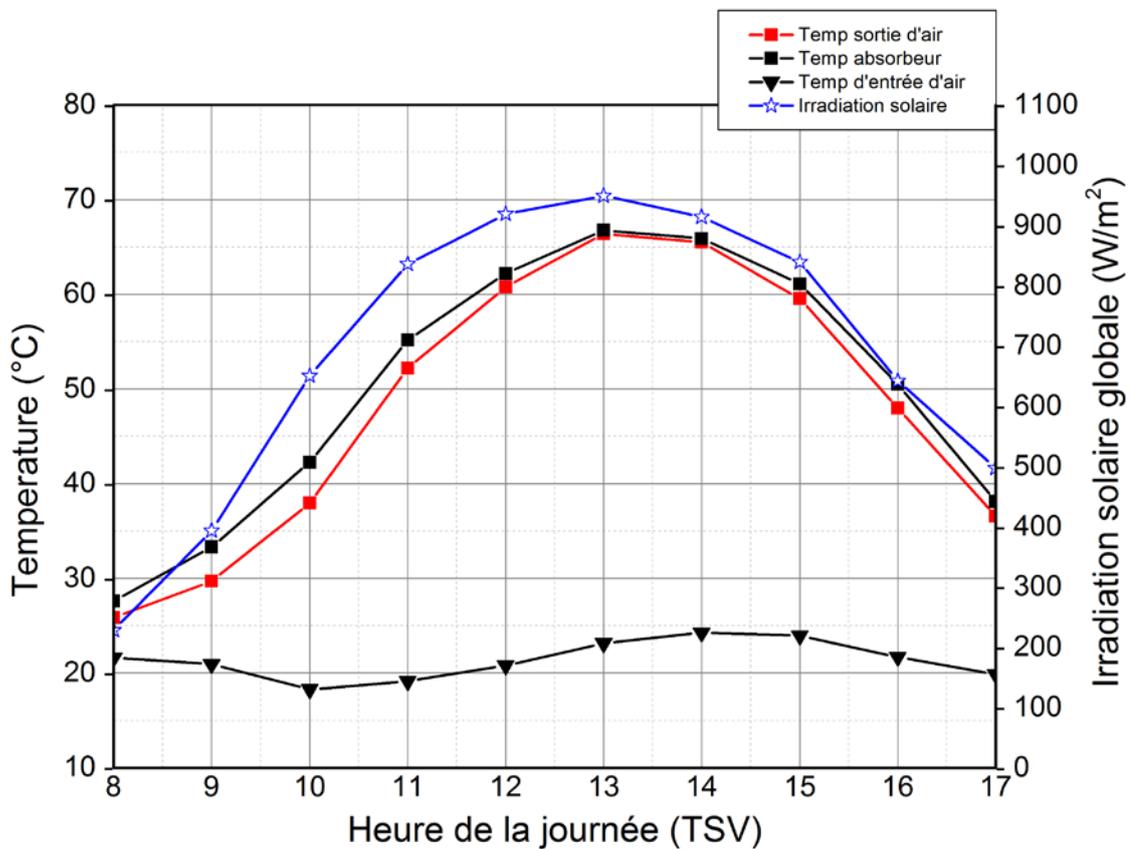


Figure II-25: L'évolution de la température en fonction du temps pour la journée du 21 juin 2015 pour le capteur solaire à air à absorbeur ondulé sous convection naturelle

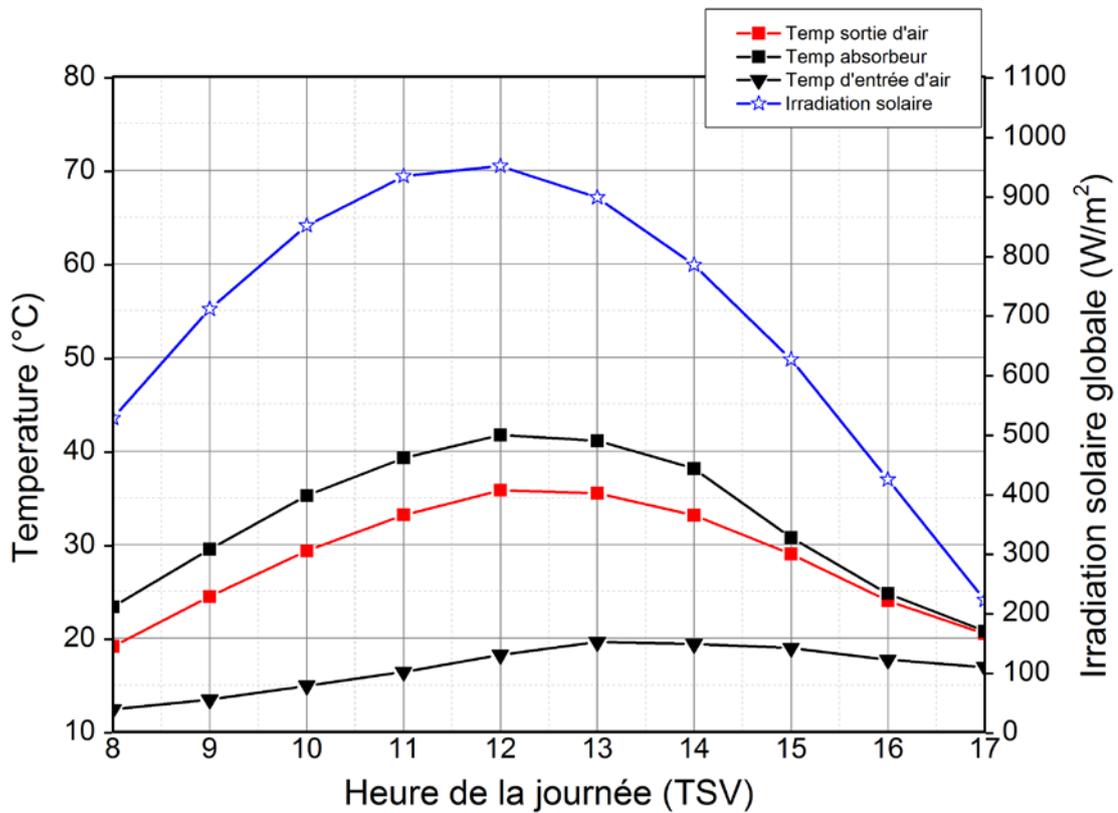


Figure II- 26: L'évolution de la température en fonction du temps pour la journée du 24 juin 2015 pour le capteur solaire à air à absorbeur ondulé sous convection forcée

### III.1 Rendement

Le rendement thermique d'un capteur est défini par le rapport de l'énergie utile a l'énergie solaire incidente [56,57]. Il est donné par l'équation :

$$\eta = \dot{m} c_p (T_s - T_e) / (IA_c) \tag{II-10}$$

Où:

$\dot{m}$ (kg/s) est le débit d'air,

$C_p$  (J.kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>) est la chaleur spécifique du fluide,

$A_c$  (m<sup>2</sup>) est la surface du capteur,

$T_e$  (°C) est la température du fluide à l'entrée du capteur,

$T_s$  (°C) est la température du fluide à la sortie du capteur,

$I$  (Wh/m<sup>2</sup>) Irradiation solaire sur le plan du capteur.

Le débit d'air utilisé pour le calcul du rendement pour la convection naturelle est de 48 m<sup>3</sup>/h.

La figure II-27 présente la variation du rendement dans le cas de l'absorbeur ondulé fabriqué en plaques d'aluminium pour des journées ensoleillées. D'après les résultats obtenus, le capteur solaire à air à absorbeur ondulé a un rendement élevé. En effet, le diamètre qu'on a fixé de 9 cm des canalisations de l'absorbeur améliore le transfert de chaleur par turbulence entre l'air et les parois des canalisations de l'absorbeur, ce qui augmente le rendement du capteur. L'étude a révélé que le capteur sous convection forcée pour un débit d'air de 150 (m<sup>3</sup> / h) atteint un rendement maximum de 77%, alors qu'avec convection naturelle atteint un maximum de 65% [58]. En effet le rendement dépend du produit  $\dot{m} \Delta T$  et ce résultat expérimental montre que le rendement du capteur est dominé beaucoup plus par l'élévation du débit que par l'écart de température. Ces résultats sont similaires à ceux trouvés par Gao et .all [59].

Conformément à nos résultats et aux références citées, un canal d'air dont la largeur est comprise entre 7,5 cm et 10 cm entraîne une amélioration significative des performances du capteur. En outre, le rendement du capteur s'améliore avec une valeur optimale entre le débit massique et la variation des températures d'entrée et de sortie du capteur.

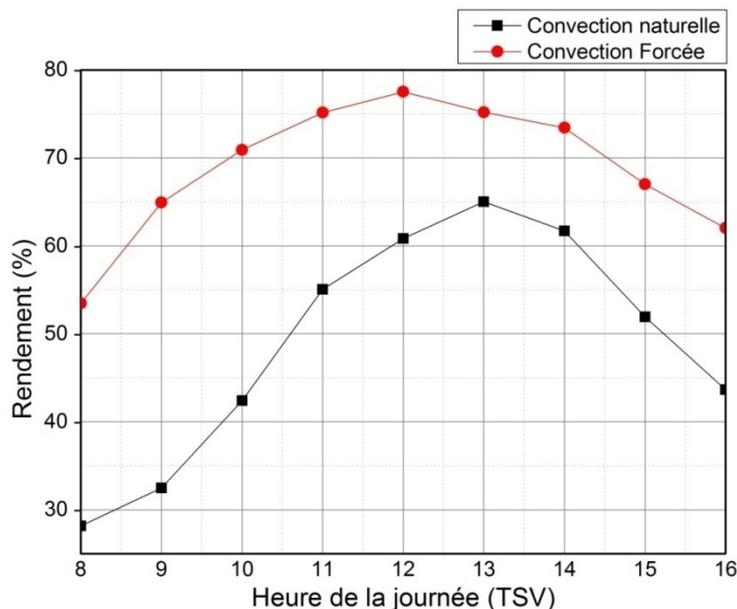


Figure II-27: La variation du rendement du capteur solaire à air à absorbeur ondulé

### III. Conclusion

L'objectif principal de cette étude était de développer et de réaliser un capteur solaire de type air avec un meilleur compromis coût/performance approprié pour le séchage solaire des aliments. La réalisation de ce capteur est facile à reproduire et basée sur des éléments et des matériaux à coût relativement faible et à la portée des agriculteurs marocains. La réalisation a été effectuée selon plusieurs étapes. Une recherche expérimentale de la configuration optimale du capteur solaire a été réalisée à l'aide de plusieurs essais expérimentaux.

Notre étude nous a permis de tirer plusieurs conclusions judicieuses. L'absorbeur constitue un élément essentiel au capteur. La forme ondulée de notre absorbeur favorisant la circulation d'air. Grâce à la largeur des cylindres constituant l'absorbeur et la valeur optimale du produit débit et variation de température, le rendement de notre capteur a augmenté.

## Chapitre III Etude et réalisation d'un séchoir solaire indirect

### Partie I Etude et conception d'un séchoir solaire indirect

#### I. Introduction

Cette partie est consacrée, dans un premier temps, à la réalisation du séchoir solaire indirect. Dans un deuxième temps, nous présentons des tests expérimentaux avant et après isolation de la chambre de séchage. Ensuite, nous présentons les résultats expérimentaux du séchage de deux aliments poire et kiwi.

#### II. Réalisation d'un séchoir solaire indirect

Le système étudié est un séchoir solaire indirect couplé à un capteur solaire à air fonctionnant en convection naturelle. Il est construit suivant les étapes indiquées ci-dessous :

Etape 1 :

- Fabrication des supports de la chambre de séchage et du capteur solaire à air.



Figure III- 1: Support du séchoir solaire indirect

Etape 2: Fixation, sur le support, du bois Trespa constituant la chambre de séchage et installation des claies.



Figure III- 2: Chambre de séchage

Etape 3 :

- Installation de la cheminée et du capteur solaire à air.



Figure III- 3: Séchoir solaire indirect

---

## II.1 Description du séchoir solaire indirect

Le séchoir solaire se compose d'un capteur solaire à air, d'une chambre de séchage contenant le produit humide à sécher et une cheminée pour évacuer l'air humide.

### 1- Capteur solaire à air

Le capteur est constitué de deux plaques d'aluminium ondulées, peintes en peinture noire mate. Les deux plaques ondulées sont superposées en opposition pour former des cylindres parallèles, d'un diamètre de 9 cm, permettant à l'air de circuler le long du capteur. Une vitre de 6 mm d'épaisseur a été utilisée comme couverture. Une plaque de liège de 5 cm d'épaisseur a été placée sous l'absorbeur ondulé afin de minimiser les pertes de chaleur au fond du capteur solaire à air. L'air chauffé traverse les canaux de l'absorbeur pour atteindre la chambre de séchage par convection naturelle.

### 2- Chambre de séchage

La chambre de séchage est de forme parallélépipédique, en bois Trespa. Elle est équipée d'une double porte battante de longueur 95,5 cm et de largeur 48,2cm pour faciliter le chargement et le déchargement des aliments à sécher. Quatre claies rectangulaires de longueur 95,5 cm et de largeur 26,2 cm distants entre elles de 24cm. La partie supérieure de la chambre de séchage est équipée d'une cheminée verticale en aluminium d'une hauteur de 70cm. La chambre de séchage est posée sur un support métallique de hauteur 86 cm comme illustrée à la figure III-4.

La chambre de séchage est de forme parallélépipédique en bois Trespa, ayant pour dimensions 1,47 m de hauteur, 32 cm de profondeur et 96,5 cm de largeur. Elle est constituée de quatre claies.

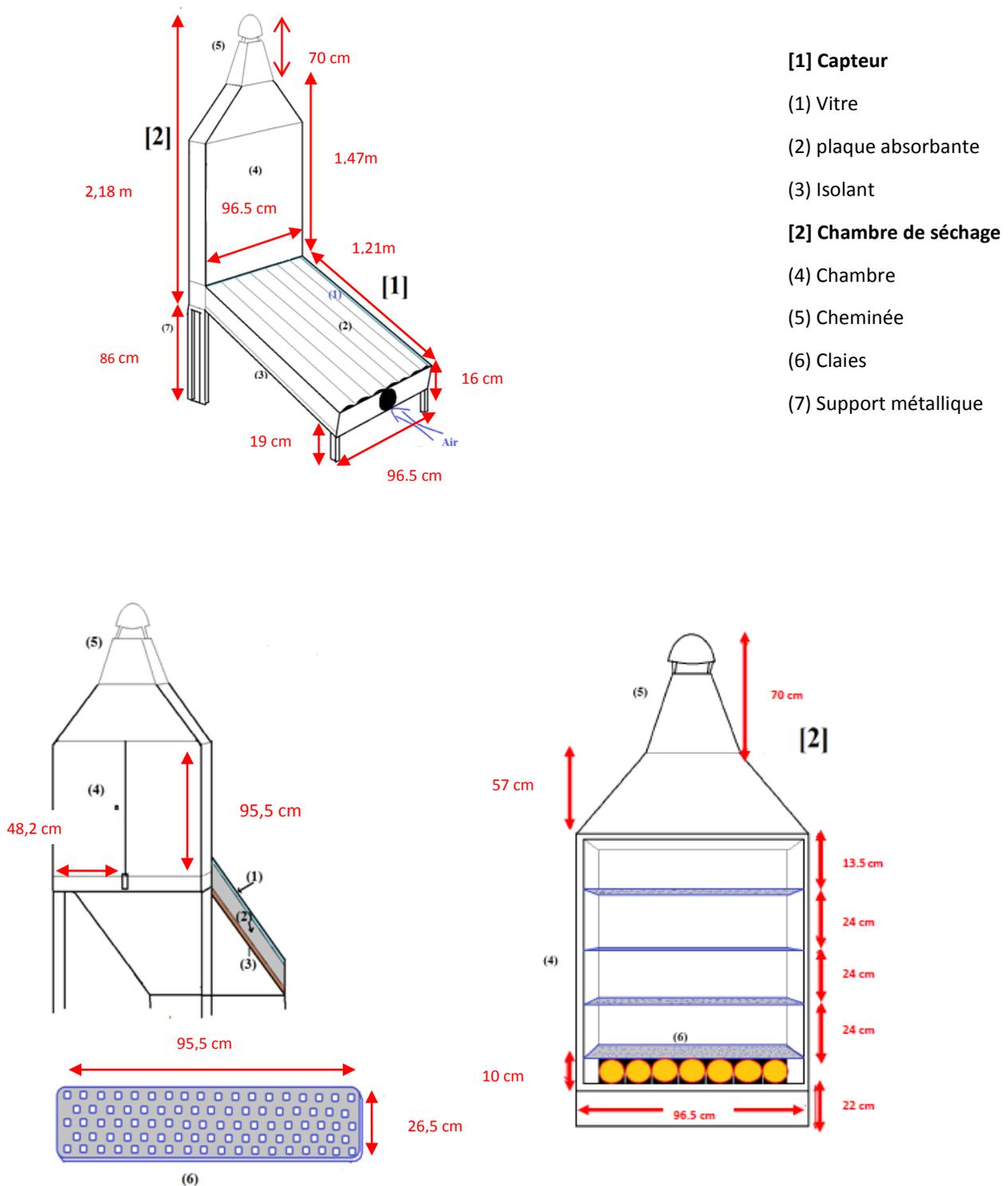


Figure III- 4: Schéma des éléments du séchoir solaire indirect

### III. Tests expérimentaux

#### 1- Mesures des températures avant isolation dans la chambre de séchage

Les figures III-5 et III-6, nous renseignent, respectivement, sur l'évolution de la température ambiante et celle de la chambre de séchage pour les deux journées du 21/04/2015 (Perturbée) et 23/04/2015 (ensoleillé).

Les figures III-5 et III-6 décrivent l'évolution de la température ambiante, la température de la chambre de séchage de 9h:00 jusqu'à 23h:00 et l'irradiation solaire globale pour respectivement, une journée perturbée et ensoleillé. On constate une différence de température qui atteint 20°C à 14h00 entre l'ambiance de la chambre de séchage et l'ambiance extérieure pour la journée perturbée et une différence de 23°C à 13h:00 pour la journée ensoleillée. Cet écart diminue progressivement pour s'annuler vers 20h00. D'après les mêmes figures, on constate aussi que dans la chambre de séchage il y a un retour à la température ambiante au bout de 5h où les apports de chauffage deviennent inférieurs aux déperditions thermiques de la chambre. Ce phénomène présente un inconvénient majeur pour le séchoir puisqu'il retarde le processus de séchage. Donc une isolation de la chambre apparaît nécessaire.

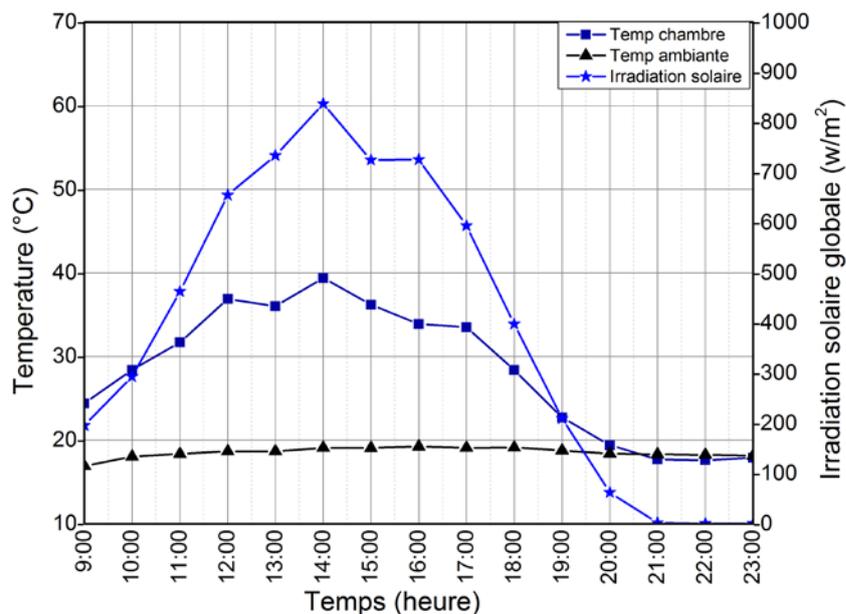
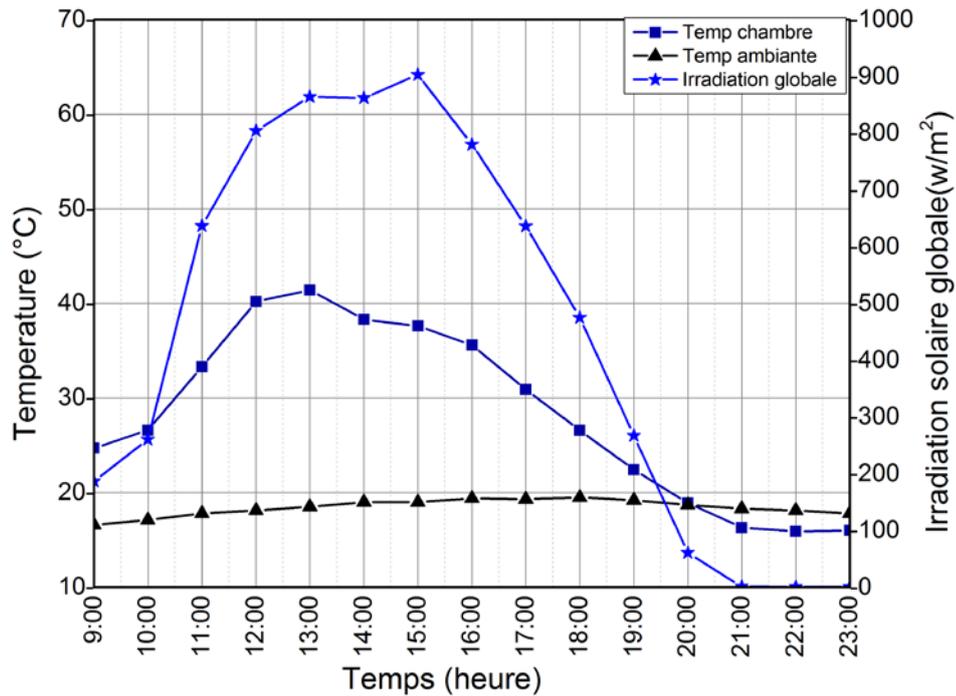


Figure III- 5: Evolution de la température ambiante, température de la chambre de séchage et l'irradiation solaire pour la journée perturbée du (21/04/2015)



**Figure III- 6: Evolution de la température ambiante, température de la chambre de séchage et l'irradiation solaire pour la journée ensoleillée du (23/04/2015)**

Les figures III-7 et III-8 présentent l'évolution de la température d'air aux niveaux des différentes claies et à la sortie du capteur. D'après les deux figures, on constate que le profil de température des différentes claies prend la forme de celui de la température de l'air à la sortie du capteur. On note un gradient important de températures entre les différentes claies, en effet l'écart de température entre la claie 1 et la claie 2 peut atteindre 6,9°C, et entre la claie 1 et la claie 3 il peut atteindre 2,6°C.

Ces écarts de températures s'expliquent par la conception et la nature du matériau constituant les claies. En effet, elles sont fabriquées en aluminium qui absorbe la chaleur transportée par l'air chaud pénétrant dans la chambre de séchage. En plus l'air chaud se déplace, par effet de densité, vers le haut de la chambre et l'air chaud en provenance du capteur se trouve en bas de la chambre. Puisque les claies ne permettent pas la circulation de l'air, il se crée une zone relativement froide au milieu de la chambre (voir Figure III-12(a)). Pour homogénéiser l'ambiance de la chambre de séchage et résoudre ce problème, on a procédé à la conception de nouvelles claies.

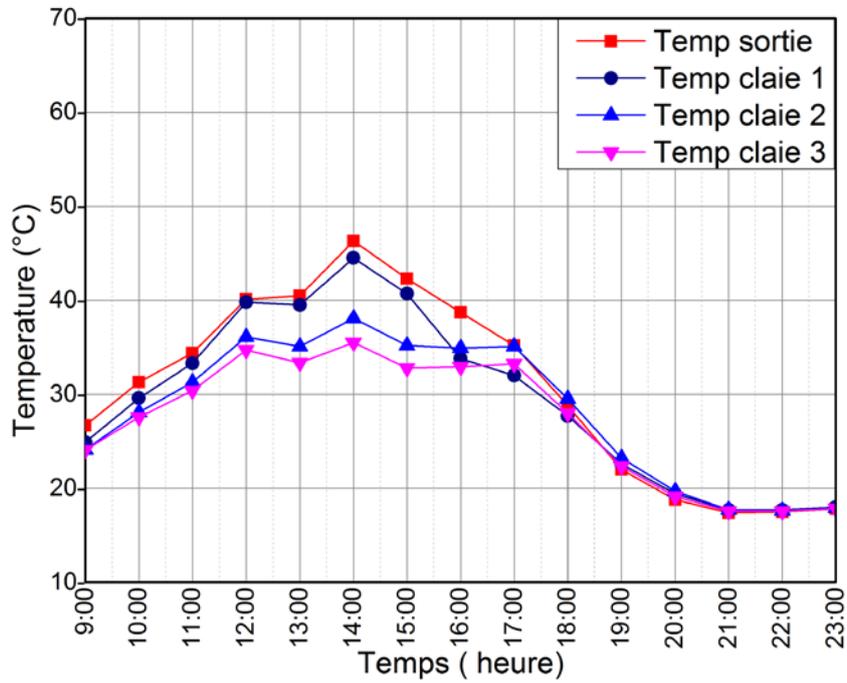


Figure III- 7: Evolution de la température d'air des différentes claies et de la sortie du capteur pour la journée perturbée du (21/04/2015)

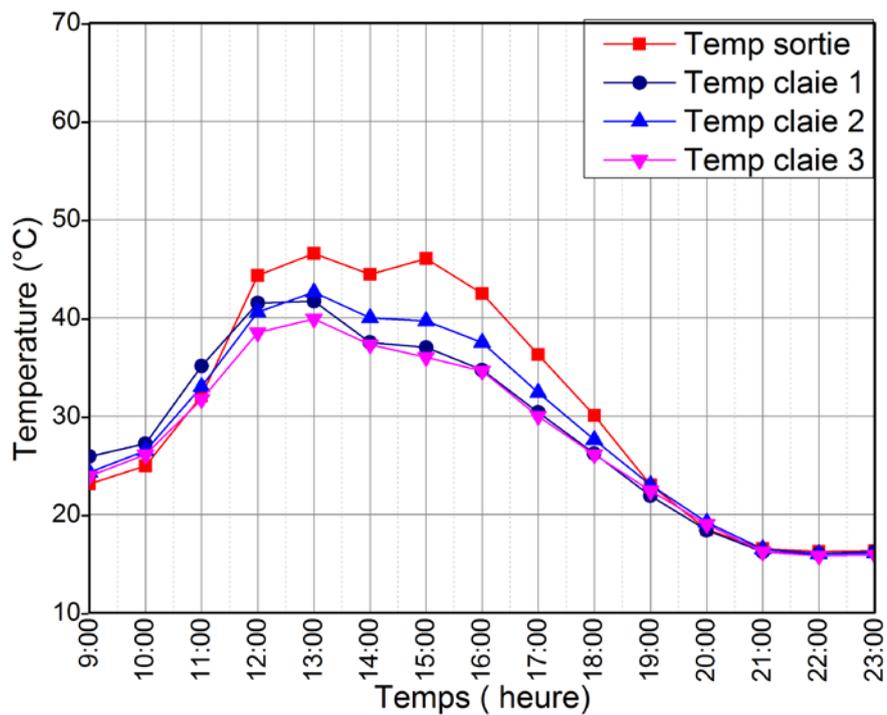


Figure III- 8: Evolution de la température d'air des différentes claies et de la sortie du capteur pour la journée ensoleillé du (23/04/2015)

### III.1 Amélioration de l'étanchéité

Afin d'éviter l'échange thermique entre l'intérieur de la chambre de séchage et l'air ambiant, l'isolation de la chambre de séchage s'avérait primordiale. Pour cela plusieurs tâches techniques ont été réalisées au sein du laboratoire d'Energie Solaire et d'Environnement :

Etape 1 : Nettoyage de la chambre et fermeture des fuites d'air par silicone.

Etape 2 : Isolation des différentes faces de la chambre de séchage par la conception et la réalisation des cadres en contre plaqués d'épaisseur 1,9 mm renfermant la laine de verre comme isolant.



Figure III- 9: Supports en contreplaqués non remplis avec la laine de verre



Figure III- 10: Support en contreplaqué remplis avec la laine de verre

Etape 3 : Fixation des cadres en contreplaqués sur les différentes faces et isolation des ponts thermiques de la chambre par l'Armaflex qui est un isolant thermique flexible.



Figure III- 11: Chambre de séchage isolée

Etape 4 : Changement des claies en aluminium par de nouvelles claies de forme rectangulaire en fer galvanisé, ayant pour dimensions 95,5 cm longueur et 26 cm de largeur.

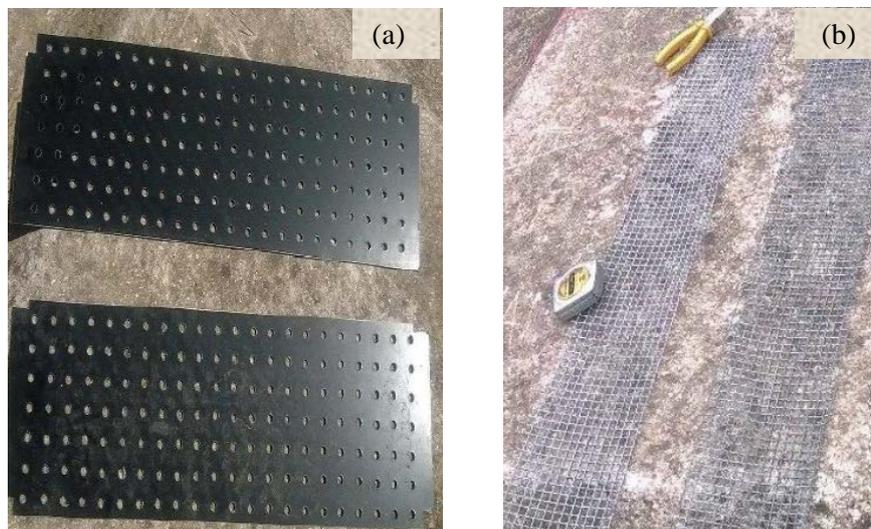


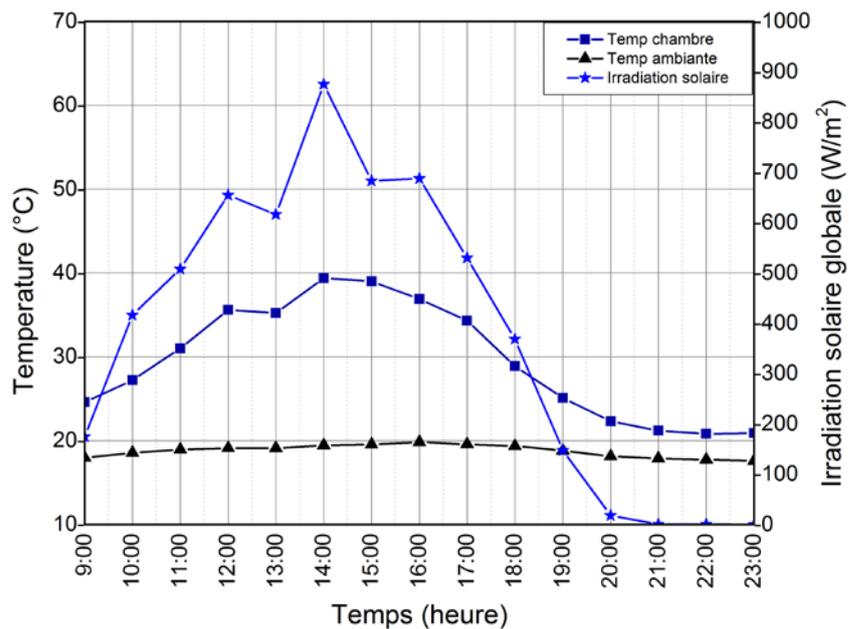
Figure III- 12: (a) Anciennes claies; (b) Nouvelles claies

### III.2 Variations de la température de l'ambiance de la chambre après son isolation

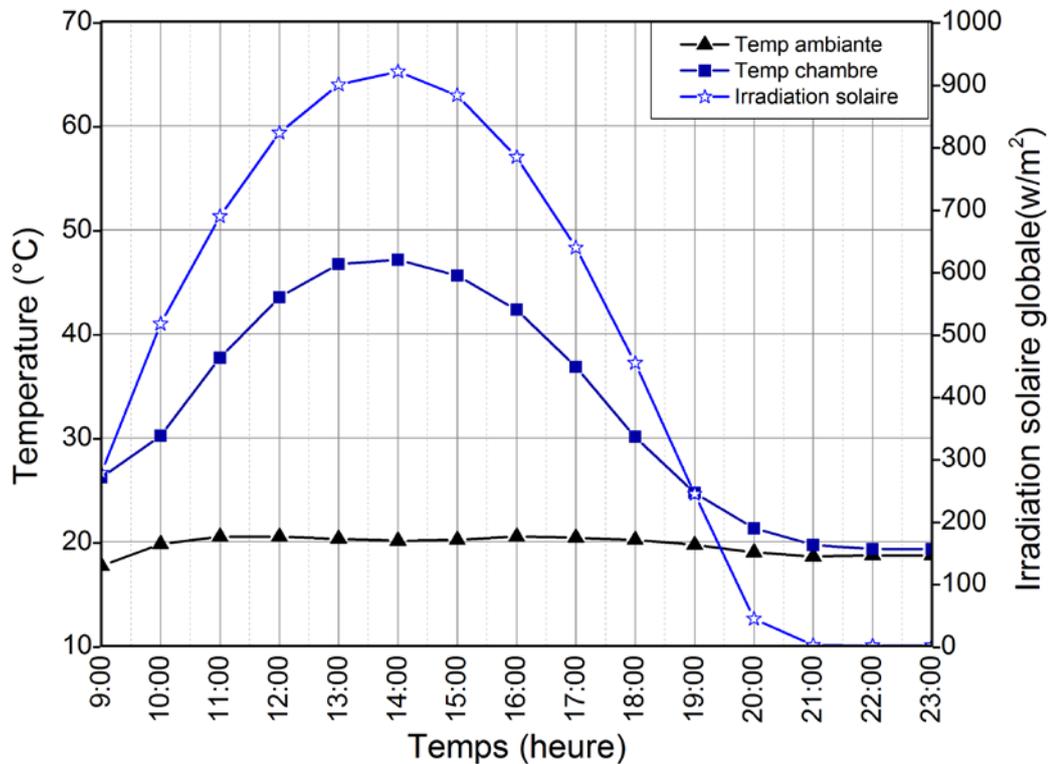
Les figures III-13 et III-14, indiquent, respectivement, l'évolution de la température ambiante et celle de la chambre de séchage pour les deux journées du 22/04/2016 (Ensoleillé) et du 28/04/2016 (Perturbée).

La figure III-13 décrit l'évolution de la température ambiante, la température ambiante moyenne dans la chambre de séchage de 9 h jusqu'à 23 h et l'irradiation solaire globale. On constate que l'écart de température entre l'ambiance de la chambre de séchage et l'ambiance extérieure peut atteindre jusqu'à 20°C vers 14h. Cet écart décroît jusqu'à 3,2°C et reste maintenu même après 20h, ceci montre l'impact de l'isolation qui empêche la chute de température dans la chambre de séchage pendant la nuit.

La figure III-14 présente un écart maximal de température entre l'ambiance de la chambre de séchage et l'ambiance extérieure de 27°C à 14h:00 pour la journée ensoleillée du 22/04/2016. D'après la même figure, on observe que cet écart diminue progressivement jusqu'à 1,1 °C et reste constant après 21h, Ceci montre que l'isolation de la chambre a bien jouée son rôle.



**Figure III- 13: Evolution de la température de la température ambiante, la température ambiante moyenne dans la chambre de séchage et l'irradiation solaire globale pour la journée perturbée du (28/04/2016)**



**Figure III- 14: Evolution de la température de la température de la température ambiante, la température ambiante moyenne dans la chambre de séchage et l'irradiation solaire globale pour la journée ensoleillé du (22/04/2016)**

Les figures III-15 et III-16 indiquent l'évolution de la température d'air aux niveaux des différentes claies et à la sortie du capteur pour les deux journées 22/04/2016(ensoleillé) et 28/04/2016(perturbée). On remarque que le profil de température des trois claies suit celui de la sortie du capteur, d'autre part la différence de température entre les trois claies varie de 1 à 2°C, or la différence variait de 0,1 à 6,9 avant isolation.

Cet amélioration est due aux nouvelles claies qui ont été placées à l'intérieure de la chambre. Elles permettent une bonne circulation d'air chaud provenant du capteur à travers toute la chambre de séchage.

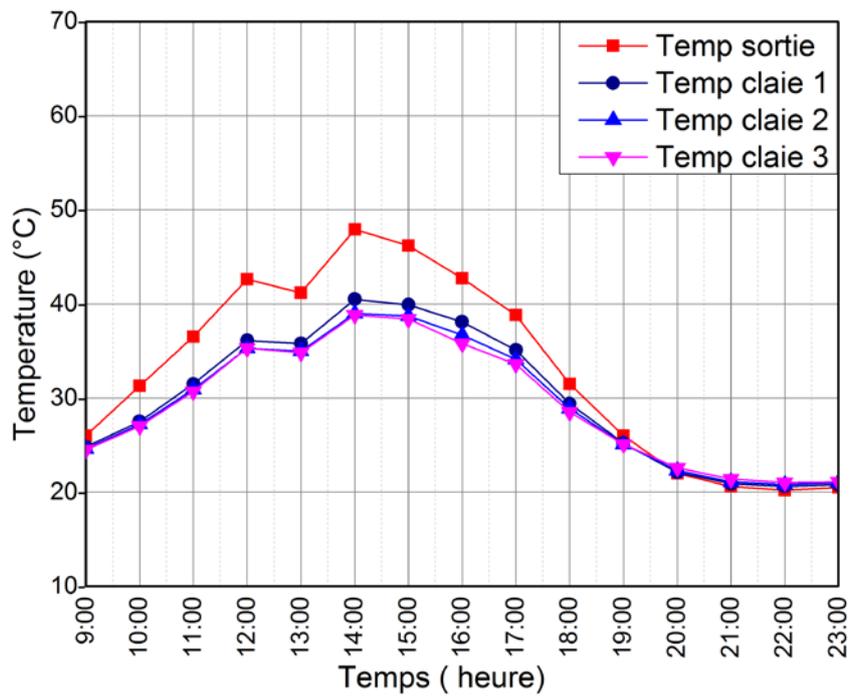


Figure III- 15: Evolution de la température d'air des différentes claies et de la sortie du capteur pour la journée perturbée du (28/04/2016)

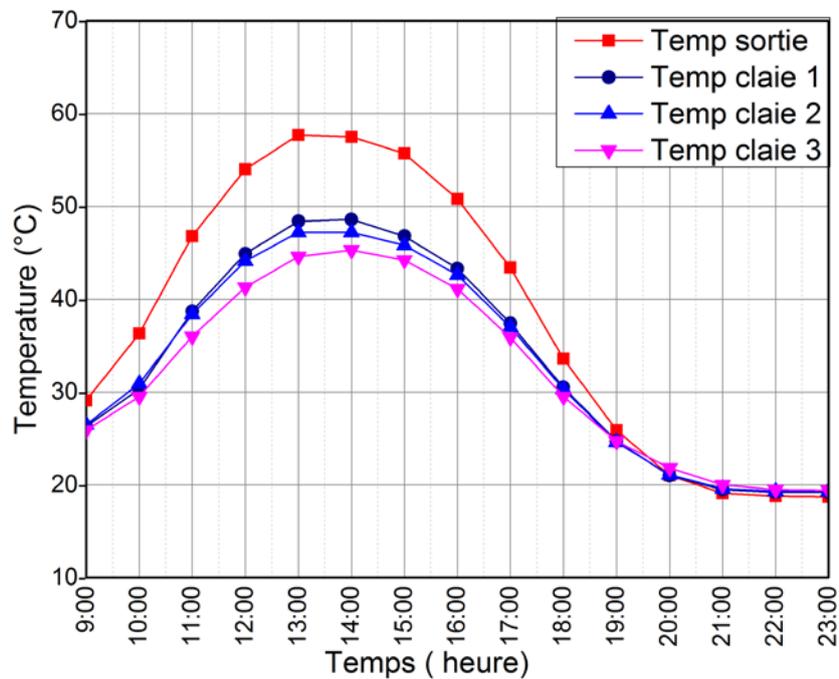


Figure III- 16: Evolution de la température d'air des différentes claies et de la sortie du capteur pour la journée ensoleillé du (22/04/2016)

---

## IV. Applications sur le séchage de quelques aliments

L'eau contenue dans les aliments permet la prolifération des micro-organismes et / ou le développement des réactions chimiques qui les entravent. Lorsqu'il est nécessaire de conserver les aliments pendant un certain temps, l'alternative est de les sécher. À savoir, retirer l'eau qu'ils contiennent. Il existe plusieurs méthodes pour y parvenir.

### IV.1 Séchage de la poire

La campagne de mesure a été réalisée au cours des mois d'Avril, Mai 2016. Les mesures de température en différents emplacements dans le séchoir ont été effectuées à l'aide des thermocouples de type T. Le programme d'acquisition des données a été élaboré pour que ces mesures soient relevées au bout de chaque 5 secondes, ensuite intégrés et stockés à la fin de chaque heure.

D'autre part, le capteur solaire à air a été placé face au sud, incliné d'un angle de 34° correspondant à la latitude de Rabat.

- Prétraitement du produit :

Avant le séchage de la poire, les préparations préliminaires suivantes sont effectuées:

- Lavage à l'eau propre.
- Epluchage de la poire.
- Coupage de la poire en anneaux de même épaisseur (5mm).
- Trempage des anneaux de la poire dans le jus de citron pour éviter leur oxydation.

#### IV.1.2 Les résultats des performances thermiques

La figure III-17 illustre la variation de la température d'air dans la chambre de séchage sous convection naturelle pour les trois jours de séchage, les valeurs de la température d'air à la sortie du capteur d'air variait entre 25 et 57°C tout au long de la période de séchage. Pour le deuxième jour de séchage, on remarque que les températures de l'air des trois claies sont respectivement 48, 46 et 44°C.

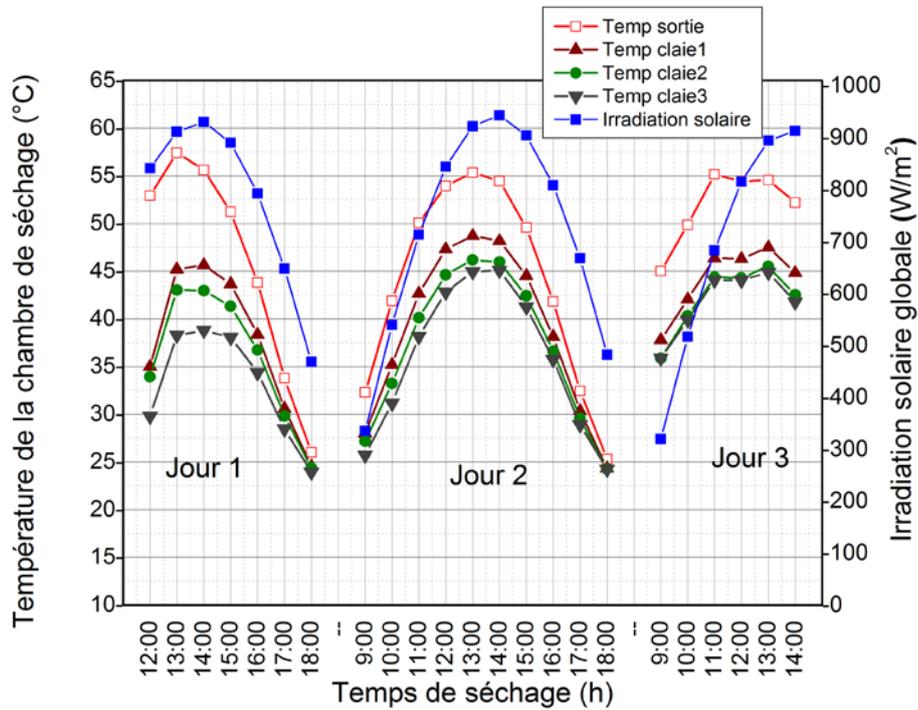


Figure III- 17: Variation de la température de l'air dans la chambre de séchage sous convection naturelle

La figure III-18 montre la variation de la température dans la chambre de séchage (après le coucher du soleil). On remarque que la différence de température d'air entre les trois claies et la sortie du capteur est très faible. On en déduit que la chambre de séchage est bien isolée.

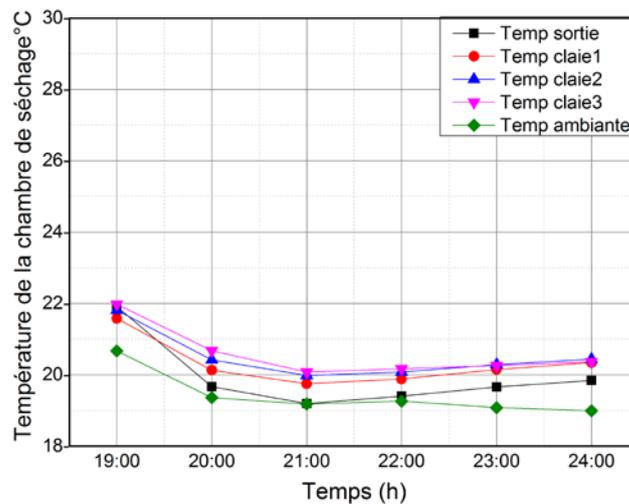


Figure III- 18: Variation de la température d'air dans la chambre de séchage (après le coucher du soleil)

### IV.1.3 Les résultats de séchage

Le Tableau III-1, résume les résultats du séchage de la poire sous convection naturelle. La masse de la poire a été réduite de 997,3 g à 135,1 g pendant 24 heures de séchage. Comme le montre la figure 19, à la fin du séchage, les poires séchées conservaient une bonne couleur et un bon goût.

Tableau III- 1: Résultats du séchage de la poire sous convection naturelle

Produit	Masse initiale (g)	Masse finale (g)	Temps de séchage (h)
Poire	997,3	135,1	24



Figure III- 19: (a) Échantillons de la poire avant séchage; (b) Échantillons de la poire après séchage

### IV.1.4 Rendement du séchoir solaire indirect

L'efficacité du système de séchage est évaluée par le rapport entre l'énergie nécessaire pour évaporer l'eau contenue dans le produit à sécher à l'énergie fourni au séchoir [60]. Elle est calculée par la relation Eq. (III-1):

$$\eta_s = \frac{m_e h_l}{A_c I \Delta t} \quad (\text{III-1})$$

$h_l$  : chaleur latente de vaporisation de l'eau (kJ/kg)

$I$  : Eclairement solaire ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$\Delta t$ : durée nécessaire pour évaporer l'eau contenue dans l'aliment (h)

$m_e$ : masse d'eau (kg)

$\eta_s$ : Rendement du séchoir

$A_c$ : Surface du capteur

La masse initiale de l'échantillon de poire était de 0,9973 kg. Après 24 heures de séchage solaire indirect, la masse finale séchée était de 0,1351 kg. Par conséquent, 0,8621 kg d'eau au total ont été évaporées de l'échantillon. Le rendement thermique du séchoir est de 11,11% [61]. Ce résultat obtenu dans cette étude est similaire à ceux indiqués dans la littérature, comme est illustré dans le tableau III-2.

**Tableau III- 2: Rendements des séchoirs solaire dans la littérature**

<b>Aliments (kg)</b>	<b>Méthode de séchage</b>	<b>Rendement du séchoir (%)</b>	<b>Références</b>
<b>Banane 2</b>	Séchoir solaire indirect	22,38	[62]
<b>Bambo 40</b>	Séchoir solaire à double passage à convection forcée	23,11	[63]
<b>3</b>	séchoir solaire à convection naturelle de type armoire	15,83	
<b>Piment rouge 80</b>	Séchoir solaire tunnel	28	[64]
<b>Piment rouge bangi 24</b>	Séchoir solaire indirect à convection forcée	6	[65]
<b>Algue 40</b>	Séchoir solaire à double passage à convection forcée	27	[66]
<b>Arachides 60</b>	Séchoir solaire type mixte à convection naturelle	23	[67]

IV.2 Séchage du kiwi

IV.2.1 Résultats des performances thermiques

On constate que la température de l'air à la sortie du capteur solaire variait entre 24 et 51 °C tout au long de la période de séchage. La température de l'air des deux claies est respectivement 48 et 45 °C à 13h00 durant le deuxième jour de séchage. Une différence de température de l'air de (3 °C max) est observée pour les températures mesurées en différents emplacements du séchoir solaire (sortie, première et deuxième claies).

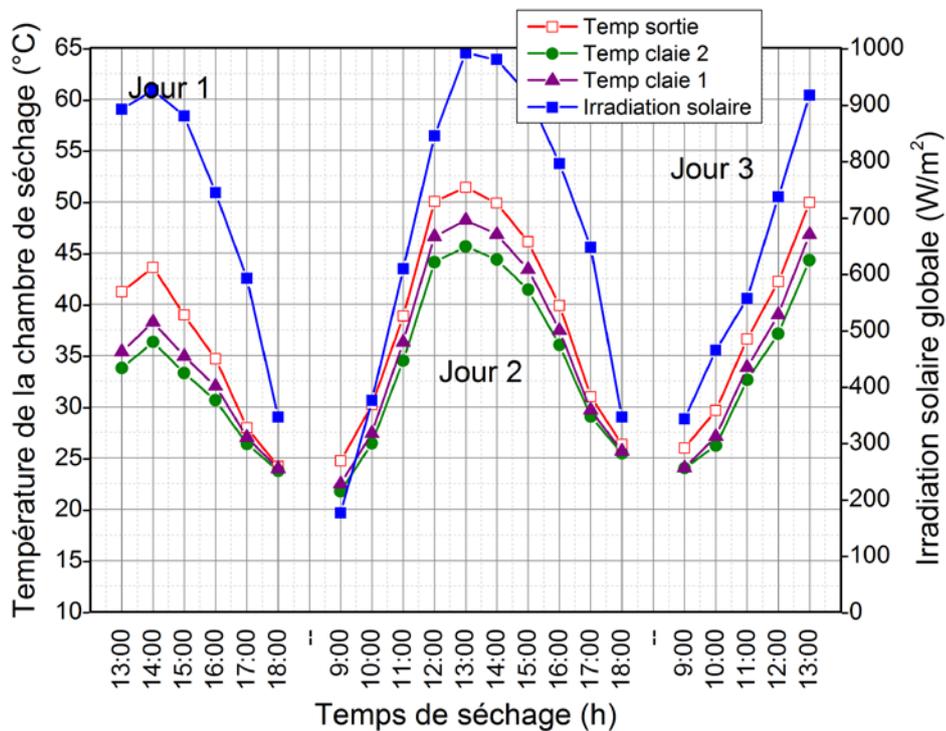


Figure III- 20: Evolution de la température de la chambre de séchage sous convection naturelle

Une différence de température de (8 °C max) entre l'air à la sortie du capteur et au niveau des deux claies est observée. Pendant toute la période de séchage, la différence de température de l'air entre les claies 1 et 2 est de (1 °C max) à l'exception du deuxième jour de séchage qui est de (3 °C max). Ces résultats peuvent s'expliquer par le fait que l'utilisation d'un ventilateur diminue la température de sortie d'air du capteur solaire, ce qui affecte de manière significative les autres températures du système de séchage. Nous déduisons des résultats des figures (III-20, III-21) que la conception de notre absorbeur permet une bonne circulation de l'air sans recourir à un ventilateur.

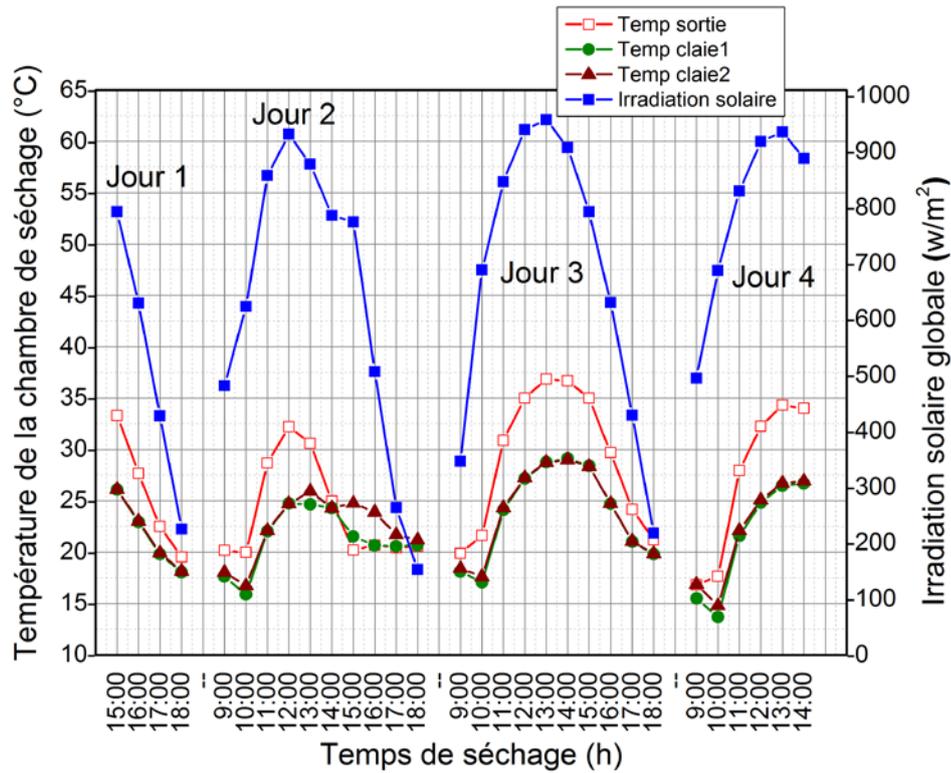


Figure III- 21: Evolution de la température de l'air de la chambre de séchage sous convection forcée

La figure III-22 montre la variation de la température d'air dans la chambre de séchage (après le coucher du soleil). La différence de température de l'air pendant la nuit entre les deux claies et à la sortie du capteur n'est pas significative car elle est très faible. Cependant, la température dans la chambre de séchage reste plus élevée en le comparant à la température ambiante. Cela montre que la chambre de séchage est bien isolée.

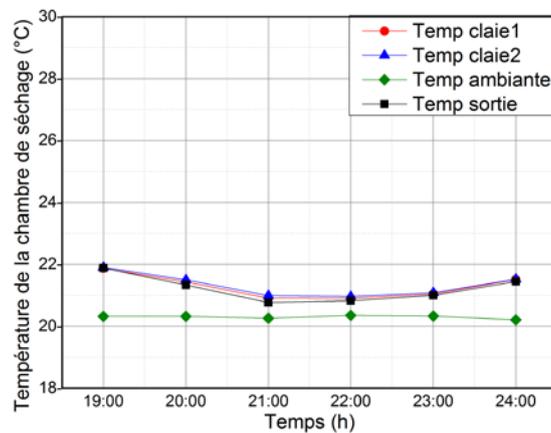


Figure III- 22: Variation de la température dans la chambre de séchage (après le coucher du soleil)

### IV.2.2. Résultats de séchage

Le tableau III-3 présente une comparaison de séchage du kiwi sous deux modes de convection (naturelle et forcée) dans un séchoir solaire indirect. Sous convection naturelle, la masse du kiwi est réduite de 509 g à 87 g pendant 18 heures de séchage et celle sous convection forcée de 509 g à 87 g pendant 26 heures de séchage. La durée de séchage n'est pas la même pour les deux modes de convection, le temps de séchage augmente avec la diminution de la température, suite à l'utilisation d'un ventilateur à débit élevé de ( $150 \text{ m}^3/\text{h}$ ). Donc il faut plus d'énergie ainsi que plus de temps pour extraire la même quantité d'eau du produit par convection forcée.

On en déduit que c'est le paramètre de température élevé qui influence plus le procédé de séchage que le paramètre débit. L'augmentation de la température de l'air asséchant donne à ce dernier un pouvoir évaporateur plus important; ce qui engendre un temps de séchage très court. Cela nous amène à choisir le mode de convection naturelle pour notre séchoir qui nous permis d'avoir une température d'air asséchant élevée et un débit convenable.

Tableau III- 3: Résultats du séchage du kiwi sous deux modes de convection

Produit	Méthodes de séchage	Masse initiale (g)	Masse finale (g)	Quantité d'eau extraite (%)	Temps de séchage (h)
Kiwi	Avec ventilation	509	87	82	26
	Sans ventilation	509	87	82	18



Figure III- 23: (a) Échantillons du kiwi avant séchage; (b) Échantillons du kiwi après séchage

---

## V. Conclusion

Un séchoir solaire indirect a été développé et étudié pour le séchage de la poire et le kiwi. Des tests expérimentaux en convection naturelle et forcée ont été réalisés pour évaluer ses performances thermiques. Les conclusions suivantes ont été tirées des résultats:

- la température dans la chambre de séchage reste plus élevée par rapport à la température ambiante due à l'isolation de cette chambre.
- Les résultats du séchage de la poire révèlent qu'après 24 heures de séchage, la masse des échantillons était réduite de 997,3 g à 135,1 g.
- L'efficacité thermique de la chambre de séchage lors du séchage de la poire était de 11,11%. Ce rendement est d'environ 33%, si la chambre de séchage est complètement remplie.
- Les résultats du séchage du kiwi montrent que le paramètre température d'air est le plus influençant sur le processus de séchage du produit. La durée de séchage diminue sous convection naturelle, c'est dû au débit faible entrant par les canaux de l'absorbeur qui assure l'augmentation de la température de sortie d'air. Ce qui en découle que la conception de notre séchoir solaire indirect lui permet de bien fonctionner sous convection naturelle.

---

**Partie II****Réalisation d'un système de stockage****I. Introduction**

En général l'optimisation du fonctionnement des systèmes solaires nécessite l'intégration d'un système de stockage d'énergie, afin de remédier au problème d'intermittence du rayonnement solaire. L'objectif des systèmes de stockage est d'emmagasiner l'énergie solaire pendant la journée pour la restituer durant la nuit. Afin de maintenir le processus de séchage même après le coucher du soleil, l'ajout d'un système de stockage dans le séchoir solaire indirect est essentiel. Par conséquent, l'objectif principal de cette partie est de dimensionner un système de stockage pour un séchoir solaire indirect, afin de résoudre les inconvénients de l'énergie solaire intermittente.

**II. Stockage d'énergie thermique**

Le stockage de l'énergie est une question clé à prendre en compte pour permettre aux sources d'énergie intermittentes, généralement renouvelables, de faire correspondre l'offre d'énergie à la demande. Il existe de nombreuses technologies pour stocker l'énergie sous diverses formes, notamment l'énergie mécanique, électrique et thermique [68]. L'énergie thermique peut être stockée dans des fluides ou des solides biens isolés sous la forme d'une modification de l'énergie interne d'un matériau, telle que la chaleur sensible, la chaleur latente et thermo-chimique ou une combinaison de ceux-ci. La figure III-24 [69] donne un aperçu des principales techniques de stockage de l'énergie thermique solaire.

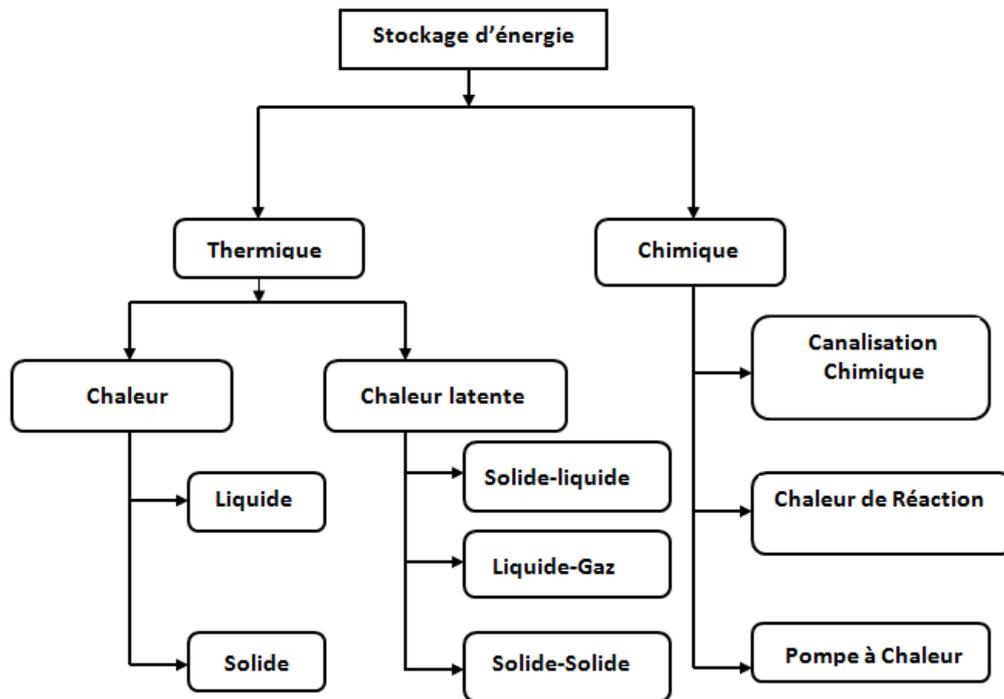


Figure III- 24: Les différents types de stockage thermique de l'énergie solaire

## II.1 Stockage de chaleur sensible

Dans le stockage de la chaleur sensible, l'énergie thermique est stockée en augmentant la température d'un liquide ou d'un solide, en utilisant la capacité thermique et le changement de température du matériau au cours du processus de charge et de décharge. La quantité de chaleur stockée dépend de la chaleur spécifique du fluide, du changement de température et de la quantité de matériau de stockage [70].

$$Q = \int m C_{ap} dT \quad (III-1)$$

$$Q = m C_{ap} (T_f - T_i) \quad (III-2)$$

La capacité de stockage de la chaleur sensible de certains matériaux solides / liquides sélectionnés est indiquée dans le tableau III- 4[71].

L'eau semble être le meilleur liquide de stockage de chaleur sensible disponible, car elle est peu coûteuse et a une chaleur spécifique élevée. Cependant, les sels fondus, les huiles et les métaux liquides, etc., sont utilisés à plus de 100 ° C. Les matériaux de stockage de type lit de roche sont utilisés pour le chauffage de l'air.

Tableau III- 5: Liste de matériaux solides / liquides sélectionnés pour le stockage de chaleur sensible

Matériaux	Type de fluide	Intervalle de température (°C)	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Chaleur spécifique (J/kg K)
Roche (galet)		20	2560	879
Brique		20	1600	840
Béton		20	1900-2300	880
Roche de sable minéraux		200-300	1700	1300
Béton armé		200-400	2200	850
Fonte		200-400	7200	560
Nacl		200-500	2160	850
briques réfractaires en silice		200-700	1820	1000
Briques réfractaires de magnesia		200-1200	3000	1150
Eau		0-100	1000	4190
Caloria HT43	Huile	12-260	867	2200
Huile moteur	Huile	Jusqu'à 160	888	1880
Ethanol	Liquide organique	Jusqu'à 78	790	2400
Propanol	Liquide organique	Jusqu'à 97	800	2500
Butanol	Liquide organique	Jusqu'à 118	809	2400
Isobutanol	Liquide organique	Jusqu'à 100	808	3000
Isopentanol	Liquide organique	Jusqu'à 148	831	2200
Octane	Liquide organique	Jusqu'à 126	704	2400

Source: [71, 72]

---

## II.2 Système de stockage de chaleur sensible (Matériaux solides)

Les matériaux solides de stockage de chaleur sensible présentent des avantages par rapport aux liquides, à cause de leur intervalle de température très élevé (tableau III- 6). Il convient de noter que, dans le stockage thermique sensible, il n'y a pas de changement de phase du milieu de stockage que ce soit liquide ou solide. Les milieux de stockage solides ne fondent pas et ne coulent pas, par conséquent, aucune fuite n'est prévue dans le réservoir de stockage. La Figure III- 25 montre un schéma des capteurs solaires à tubes sous vide et du stockage thermique. Au-dessous de la dalle de garage se trouve le stockage solaire thermique qui contient du sable fin et du gravier comme milieu de stockage thermique. Les quatre côtés du lit de sable ont été isolés avec 0,2 m de panneau de mousse de polystyrène sur les deux côtés d'un mur de fondation en béton coulé de 0,2 m pour un total de 0,4 m de mousse isolante. Les capteurs solaires chauffent une solution eau-glycol, qui en fonctionnement normal, passe dans un échangeur thermique pour chauffer le ballon d'eau chaude sanitaire. Lorsque le ballon d'eau chaude domestique ne réclame pas de chaleur, la chaleur excédentaire est envoyée dans le lit de sable (stockage thermique) situé sous le plancher du garage pour le chauffage [73]. Le système a un double objectif: chauffer le garage par rayonnement et convection et chauffer l'eau domestique.

Une règle approximative pour le dimensionnement consiste à utiliser 300 à 500 kg de roche par mètre carré de surface de captage pour les applications de chauffage de locaux [74]. Les stockages en roche ou en lit de galets peuvent également être utilisés pour des températures beaucoup plus élevées, jusqu'à 1000 ° C [74].

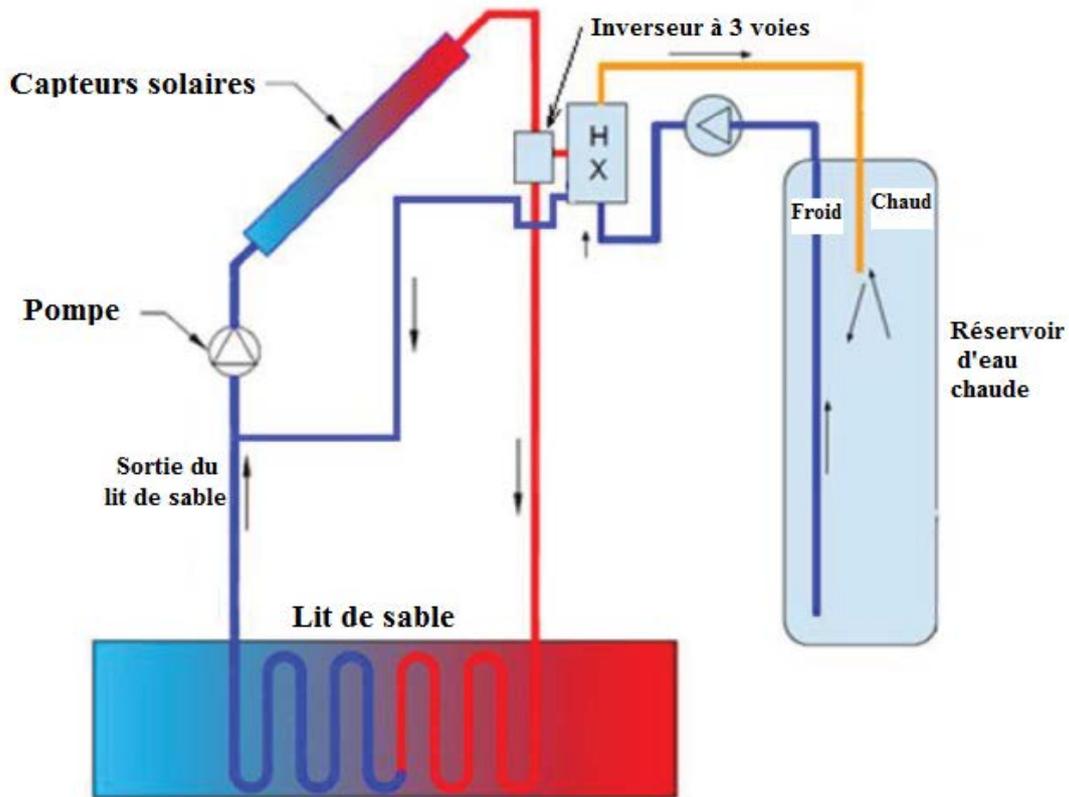


Figure III- 26: Schéma des capteurs solaires à tubes sous vide et du stockage thermique

### II.3 Système de stockage de chaleur sensible (liquide)

Pour les systèmes de stockage de chaleur (liquide), la plage de température qui peut être atteinte est limitée par leurs points d'ébullition. Le type de liquide utilisé comme milieu de stockage est déterminée par la température de stockage souhaitée. L'eau, avec sa chaleur spécifique élevée, est le milieu de stockage le plus courant en dessous de 100 ° C. Stockage thermique économique à grande échelle est possible en utilisant les eaux souterraines d'origine naturelle confiné comme les aquifères. L'eau chaude est pompée pour être stockée dans de telles nappes, déplaçant ainsi les eaux souterraines froides existantes. Cela réduirait le coût du stockage thermique car le seul investissement requis est le coût des ouvertures de forage pour l'injection et le prélèvement (retrait) d'eau. Si l'eau est utilisée pour des applications à haute température (température supérieure à 100 ° C), il doit être mis sous pression, ce qui augmente le coût. Dans un tel cas, la limite de l'eau est son point critique, à savoir 374 ° C [75].

Les liquides organiques et les huiles de haut poids moléculaire sont également efficaces à haute température. Bien qu'il existe des huiles sur le marché, telles que le Terminol, qui peut être utilisé sans pression dans la plage de 10 à 320 ° C, elles présentent toutefois l'inconvénient d'être de faible chaleur spécifique (2,3 kJ / kg K par rapport 4,19 kJ / kg K pour l'eau). En outre, les huiles sont susceptibles au craquage à haute température, à la polymérisation et à la formation de produits volatils. Les avantages et les inconvénients de l'eau en tant que milieu de stockage sont énumérés ci-dessous [74].

**Avantages:**

- Relativement peu coûteux, facilement disponible, non toxique et incombustible,
- L'eau a une chaleur spécifique relativement élevée et une densité élevée,
- Les échangeurs de chaleur peuvent être évités si de l'eau est utilisée comme caloporteur dans le capteur,
- Le chargement et le déchargement simultanés du réservoir de stockage sont possibles
- Le réglage et le contrôle d'un système d'eau sont variables et flexibles.

**Inconvénients:**

- Congélation ou ébullition,
- Propriétés corrosives,
- Les températures de travail sont limitées à moins de 100 ° C.

La figure III-26 présente un schéma d'un système de stockage thermique muni d'un réservoir d'eau. Dans ce système, un capteur solaire thermique fournit la chaleur d'entrée et une charge est alimentée par circulation d'eau chaude dans l'échangeur de chaleur. Dans le schéma présenté, le système peut également être utilisé pour les systèmes d'eau chaude sanitaire car l'échangeur thermique empêche la contamination de l'eau potable dans les systèmes d'eau chaude sanitaire. Les systèmes de stockage d'eau chaude utilisés comme stockage tampon pour l'alimentation en eau chaude domestique se situent généralement dans une plage allant de 500 L à plusieurs mètres cubes. Cette technologie est également utilisée dans les installations thermiques solaires pour la production d'eau chaude sanitaire combinée à des systèmes de chauffage de bâtiment [72].

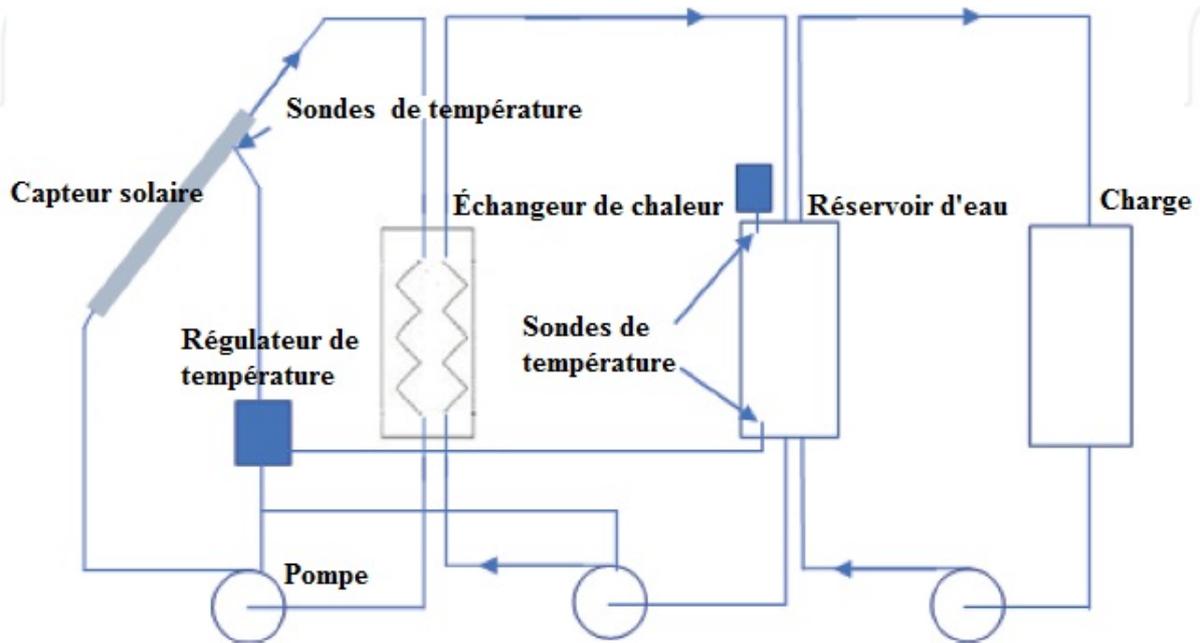


Figure III- 27: Schéma d'un réservoir de stockage thermique d'eau typique

#### II.4 Stockage de chaleur latente

Le stockage de chaleur latente (LHS) est l'absorption ou le dégagement de chaleur lorsqu'un matériau de stockage subit un changement de phase de solide à liquide ou de liquide à gaz ou inversement à une température constante présentée graphiquement sur la figure III-27 [76]. La capacité de stockage du système de stockage de chaleur latente avec un milieu en matériau à changement de phase (PCM) [70] est donnée par :

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} m c_p dT + m a_m \Delta h_m + \int_{T_m}^{T_f} c_p dT \quad (\text{III-3})$$

$$Q = m[C_{SP} (T_m - T_i) + a_m \Delta h_m + C_{IP} (T_f - T_m)] \quad (\text{III-4})$$

Avec :

$Q$  = quantité de chaleur stockée (J)

$m$  = masse du milieu de stockage de chaleur (kg)

$C_p$  = chaleur spécifique (J / kg K)

$C_{sp}$  = Chaleur spécifique moyenne entre  $T_i$  et  $T_m$  (kJ / kg K)

$C_{ip}$  = Chaleur spécifique moyenne entre  $T_m$  et  $T_f$  (J / kg K)

$a_m$  = fraction de fusion

$\Delta h_m$  = chaleur de fusion par unité de masse (J / kg)

$T_m$  = Température de fusion (°C)

$T_i$  = Température initiale (°C)

$T_f$  = Temperature finale (°C)

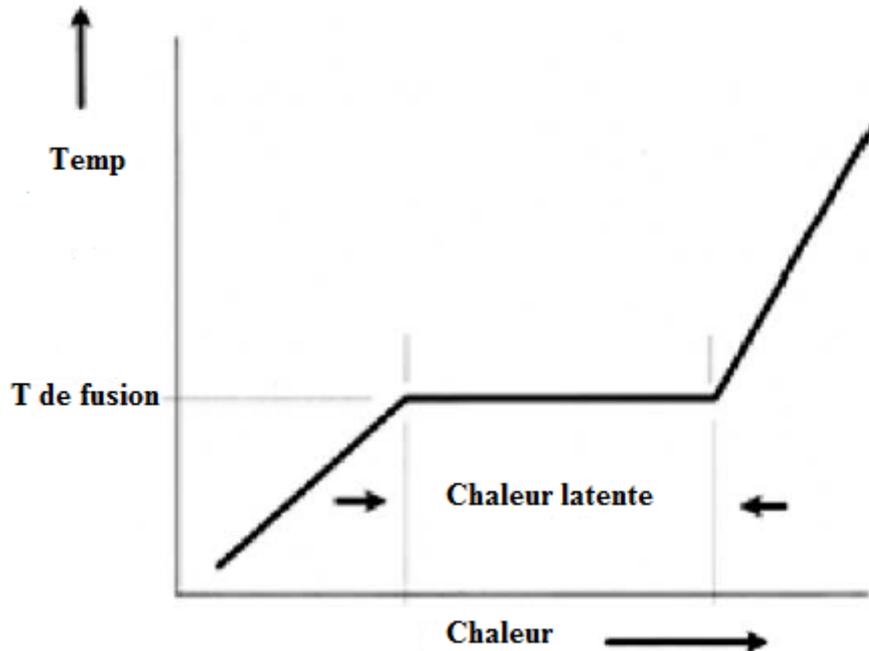


Figure III- 28: Changements de température et de chaleur pendant le changement de phase

Source: Nuckols [77]

## II.5 Stockage d'énergie thermochimique

Les systèmes thermochimiques reposent sur l'énergie absorbée et libérée lors de la rupture et du reformage de liaisons moléculaires lors d'une réaction chimique complètement réversible. Dans ce cas, la chaleur stockée dépend de la quantité de matériau de stockage, de la chaleur de réaction endothermique et du degré de conversion.

$$Q = a_r m \Delta h_r \quad (\text{III-5})$$

Avec :

$Q$  = quantité de chaleur stockée (J)

$a_r$  = fraction de réaction

$m$  = masse du milieu de stockage de chaleur (kg)

---

$\Delta h_r$  = chaleur de réaction endothermique

Parmi les techniques de stockage de chaleur thermique ci-dessus, le stockage de chaleur thermique à chaleur latente est particulièrement attrayant en raison de sa capacité à fournir une densité de stockage de haute énergie par unité de masse et par unité de volume dans un processus plus ou moins iso-thermique, c'est-à-dire stocker la chaleur à une température constante correspondant à la température de transition de phase du matériau à changement de phase.

### III. Test sur le stockage

#### III.1 Description du système de stockage

Le système de chauffage est constitué d'un échangeur de chaleur et d'un réservoir de stockage. L'échangeur de chaleur est un tube de cuivre de 12 mm de diamètre, en serpent, intégré dans la structure du capteur solaire à air et fixé entre la face supérieure de l'absorbeur et le vitrage figure III-28. Les deux extrémités des tubes en cuivre sont reliées au réservoir de stockage d'eau. Le réservoir de stockage est de forme cylindrique, placée horizontalement à l'intérieur de la chambre de séchage et installés sur un support métallique, comme illustré sur la figure III-29. Ce réservoir de stockage d'eau a une longueur de 0,76 m et un diamètre de 0,13 m. Pendant la journée, l'eau circule lentement dans les tubes de l'échangeur, s'échauffe et se déplace par effet thermosiphon vers le réservoir en circuit fermé. Pendant la nuit, l'effet thermosiphon s'arrête et la circulation de l'eau aussi, ce qui permet à l'eau dans le réservoir de transférer la chaleur stockée à l'ambiance de la chambre de séchage.



Figure III- 29: Echangeur de chaleur



Figure III- 30: Réservoir de stockage d'eau

### III.2 Résultats

La figure III-30 rassemble les courbes de variations des températures, du réservoir d'eau, de l'eau à l'entrée et à la sortie du réservoir, l'ambiance de la chambre de séchage, l'air ambiant extérieur et du rayonnement solaire sur le plan du capteur. La température de l'eau dans le réservoir a augmenté jusqu'à 42,7 °C à 14 (TSV). La chambre de séchage a maintenu une température supérieure à la température ambiante toute la nuit. Par conséquent, l'intégration d'un système de stockage a une influence directe sur le climat interne de la chambre de séchage.

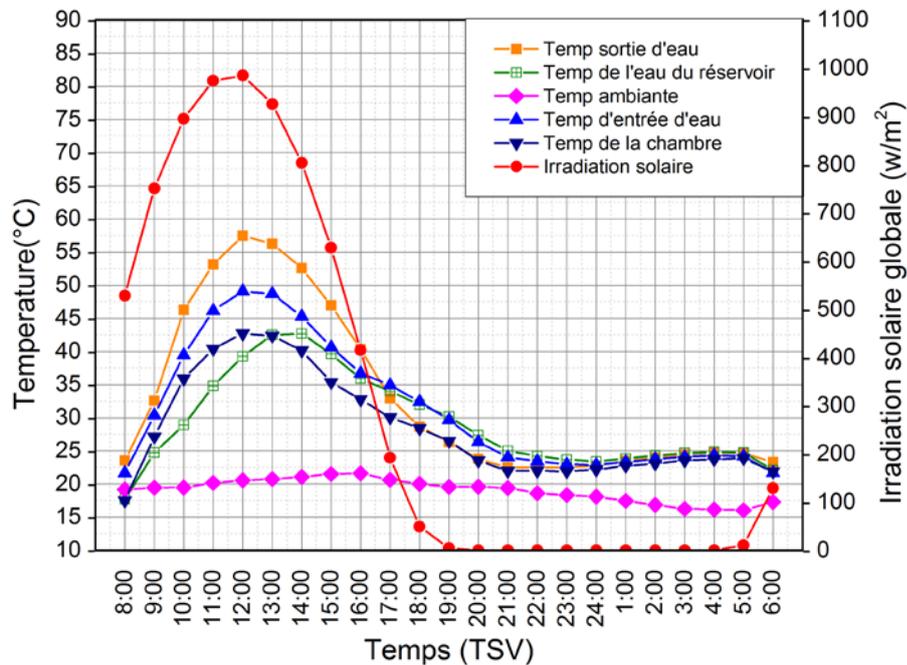


Figure III- 31: Evolution horaire du rayonnement solaire, de la température ambiante, de la température de l'eau à la sortie, de la température de l'eau à l'entrée, de la température de l'eau du réservoir et de la température de la chambre pendant le jour et la nuit.

---

### III.3 Limite des performances du séchoir

La figure III-31 montre la variation horaire du rayonnement solaire mesuré, de la température ambiante, de la température de l'absorbeur, de la température de l'air à l'entrée et à la sortie du capteur et de la température de la première claie pendant une journée. Au début de la journée, la température de l'air à la sortie du capteur est faible et augmente lentement, puis augmente nettement avec l'augmentation du rayonnement solaire à un maximum de 52,6 °C.

La figure III-32 montre les variations horaires du rayonnement solaire mesuré, la température ambiante, la température de l'air à la sortie du capteur et la température de la première claie pendant la nuit avant l'ajout du système de stockage d'énergie. Sachant qu'après le coucher du soleil, le rayonnement solaire s'annule et les températures des différents éléments du séchoir commencent à diminuer à partir de 18h 00 pour se stabiliser à partir de 20h 00. Pendant toute la nuit, on remarque que tous les éléments du séchoir ont approximativement la même température. La différence moyenne entre la température de la claie 1 et la température ambiante était de 1,8 ° C. La température interne de la chambre de séchage se rapproche de la température extérieure. Ce phénomène ralentit le processus de séchage et c'est du principalement à la capacité de stockage faible du réservoir. C'est la raison qui nous a conduits à développer un nouveau système de stockage.

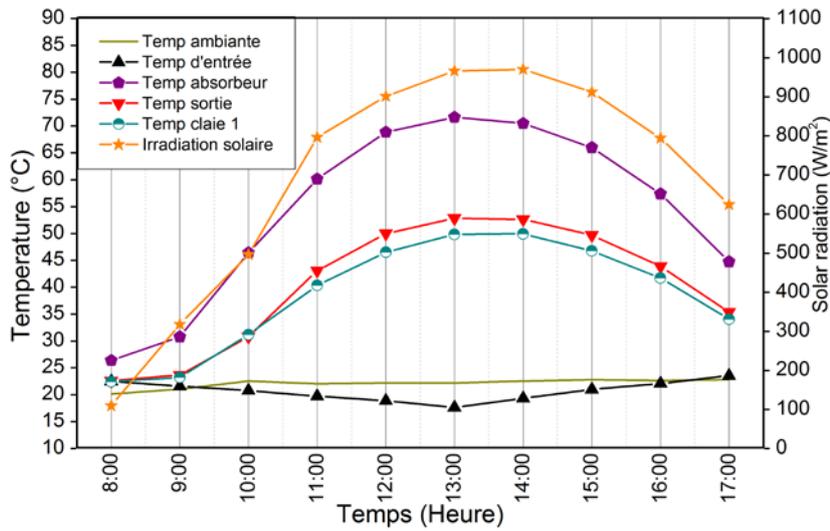


Figure III- 32: Variations horaire du rayonnement solaire mesuré, de la température ambiante, de la température de l'absorbeur, de la température de l'air à l'entrée et à la sortie et de la température de la claie 1 pendant une journée

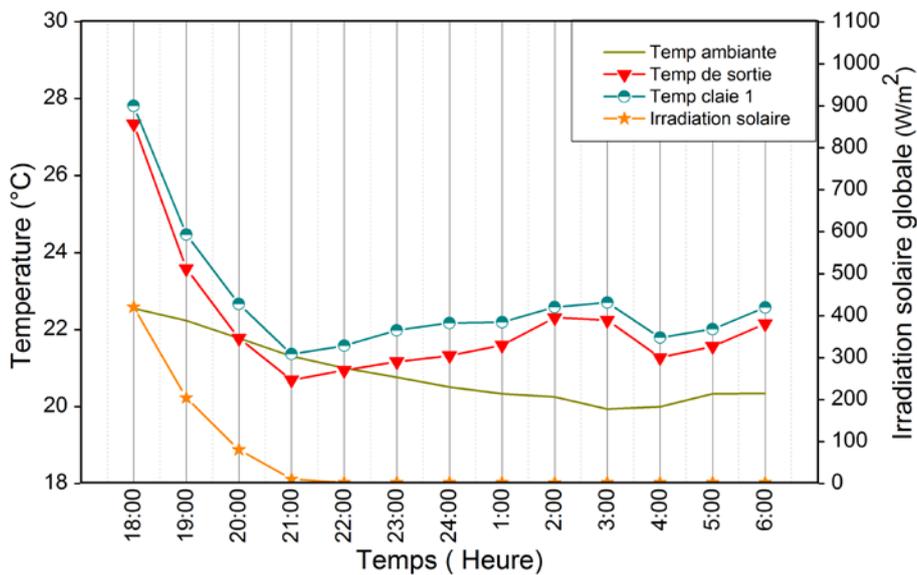


Figure III- 33: Variations horaires du rayonnement solaire mesuré, de la température ambiante, de la température de l'air à la sortie et de la température de la claie 1 pendant la nuit

### III.4 Etude de dimensionnement du nouveau système de stockage

Le nouveau système de chauffage se compose de deux éléments reliés les uns aux autres, l'échangeur de chaleur et le réservoir d'eau. L'échangeur de chaleur est fabriqué de tubes en cuivre de 12 mm de diamètre, fixé sur la plaque supérieure d'absorbeur et à 5 mm en dessous du vitrage Figure III-33. L'échangeur de chaleur est composé de 10 tubes. Les deux extrémités des tubes en cuivre sont reliées au réservoir de stockage d'eau.

Le réservoir de stockage est fabriqué à partir de feuilles d'acier inoxydable sous une forme cylindrique. Pendant la journée, l'eau circule lentement dans les tubes de l'échangeur, s'échauffe et se déplace par effet thermosiphon vers le réservoir en circuit fermé. Pendant la nuit l'effet thermosiphon s'arrête, l'eau stockée dans le réservoir transfère la chaleur dans l'environnement de la chambre de séchage.

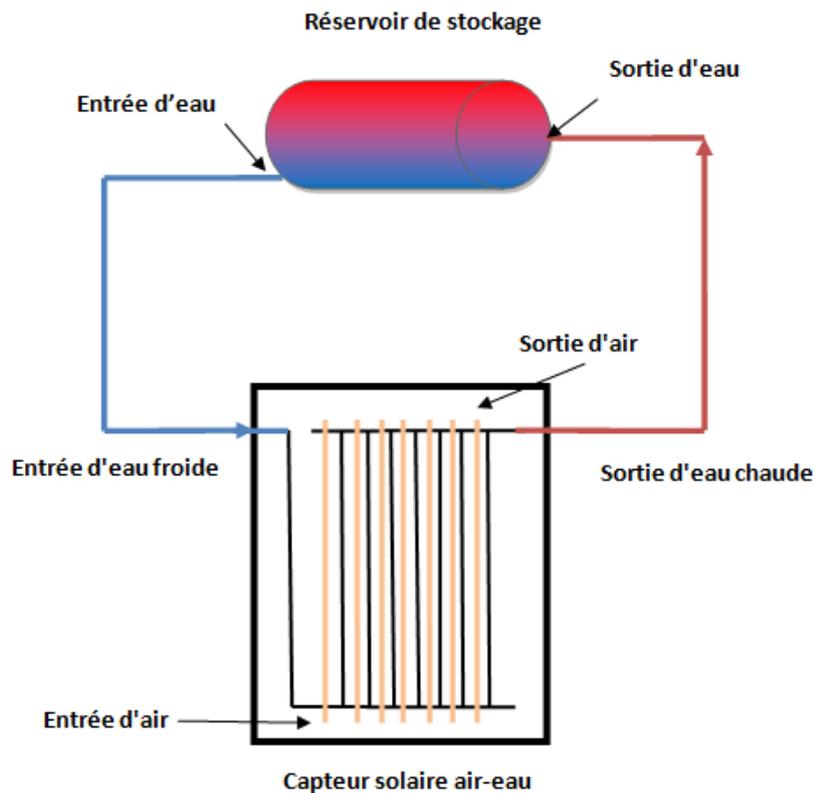


Figure III- 34: Vue schématique de dessus du capteur solaire air-eau

### III.4.1 Dimensionnement de la masse du fluide de stockage

En fonction des besoins énergétiques de la chambre de séchage, nous allons estimer la masse du fluide caloporteur (eau) qu'il faut stocker pour maintenir la température de consigne désirée pendant la nuit.

Pour estimer la masse du fluide, nous allons estimer la consommation énergétique de la chambre de séchage à l'aide d'un modèle statique qui présente l'avantage d'être simple et d'utilisation rapide.

- Calcul de la puissance utile

La puissance utile  $Q_u$  représente les besoins en énergie de la chambre nécessaire pour compenser l'ensemble de ses pertes de chaleur. Celles-ci ont deux origines possibles :

- Les pertes de chaleur par la couverture :  $Q_c$
- Les pertes par renouvellement d'air (fuites) :  $Q_a$

La puissance utile sera la somme de ces pertes :

$$Q_u = Q_c + Q_a \text{ (III.6)}$$

Plusieurs données sont nécessaires pour effectuer ce calcul :

- La surface de la couverture  $S_c$  ( $m^2$ )
- Le volume de la chambre de séchage  $V$  ( $m^3$ )
- La température d'air intérieure désirée  $T_{ai}$  ( $^{\circ}C$ )
- La température extérieure de base  $T_{ae}$  ( $^{\circ}C$ ) : on prendra en général comme température extérieure de base la température minimale dont la fréquence est de 5 jours pendant une saison d'hiver.
- Il sera également nécessaire de connaître :
  - o La nature du matériau de couverture.
  - o L'état d'étanchéité de la chambre de séchage.

- **Pertes de chaleur par la couverture  $Q_c$**

Les pertes de chaleur par la couverture  $Q_c$  dépendent tout d'abord de la nature du matériau de couverture. Chaque matériau est caractérisé par un coefficient de déperditions thermiques global  $K_c$  ( $W/m^2/^{\circ}C$ ) déterminé expérimentalement dans les

conditions les plus défavorables (ciel clair). La taille de la surface de la couverture  $S_c$  influe également sur ces pertes. Enfin ces dernières dépendent aussi de l'écart de température entre l'air intérieur et l'air extérieur.

$$Q_c = K_c \cdot S_c \cdot (T_{ai} - T_{ae}) \quad (III.7)$$

- **Pertes de chaleur par renouvellement d'air**

Les pertes de chaleur par renouvellement d'air  $Q_a$  (W) dépendent de l'étanchéité de la chambre, du type de couverture et de la vitesse du vent.

$$Q_a = 0,34 \cdot R \cdot V \cdot (T_{ai} - T_{ae}) \quad (III.8)$$

0,34 est la chaleur spécifique de l'air ( $Wh/m^3/^\circ C$ ).

R : taux de renouvellement d'air horaire, c'est le nombre de volumes de la chambre renouvelés pendant une heure.

V : est le volume de la chambre

La technique la plus utilisée pour quantifier l'échange d'air entre une enceinte et son environnement est celle du gaz traceur. Elle consiste en la mesure de la décroissance logarithmique de la concentration du gaz (en général le dioxyde de carbone  $CO_2$  ou le protoxyde d'azote  $N_2O$ ) après une injection initiale donnée.

- **Application**

**Données utilisées :**

- . Coefficient de déperditions thermiques global de la couverture  $K_c = 6,1 \text{ W/m}^2/^\circ C$ ,
- . Surface de la couverture  $S_c = 2,97 \text{ m}^2$ ,
- . Volume de la chambre  $V = 0,28 \text{ m}^3$ ,
- . Chaleur spécifique du fluide (l'eau)  $C_p = 4182 \text{ J/Kg/}^\circ C = 1,16 \text{ Wh/Kg/}^\circ C$ ,
- . Taux de renouvellement d'air  $R = 1 \text{ volume / h}$ ,
- . Température de consigne recommandée pour maintenir le séchage:  $T_{ai} = 18^\circ C$ ,
- . Température minimale de l'air extérieur :  $T_{ae} = 5^\circ C$ ,

. Température moyenne du fluide caloporteur :  $T_f = 43^\circ\text{C}$ ,

Pertes par la couverture :  $Q_c = 0,115 \text{ kW}$

Pertes par le renouvellement d'air :  $Q_a = 1,24 \cdot 10^{-3} \text{ kW}$

Puissance utile :  $Q_u = Q_c + Q_a = 0,116 \text{ kW}$

Sachant que la durée où le chauffage est nécessaire pendant la nuit est en moyenne de 5 heures (de 00h à 5h du matin), l'énergie utile sera :

$$E_u = Q_u \cdot \Delta t = 0,58 \text{ kWh} \quad (\text{III.9})$$

Par ailleurs la quantité de chaleur cédée à l'ambiance de la chambre de séchage, par le fluide de masse  $M$  ayant la température moyenne  $T_f$  est donnée par :

$$Q = M \cdot c_p (T_f - T_{ai}) \quad (\text{III.10})$$

Cette énergie cédée par le système doit représenter l'énergie utile au séchoir. En tenant compte de l'émissivité  $e_c$  du métal constituant le réservoir de stockage, ( $e_c = 0,9$ ) on a :

$$e_c \cdot M \cdot c_p \cdot (T_f - T_{ai}) = E_u \quad (\text{III.11})$$

Soit :  $M = E_u / [e_c \cdot c_p \cdot (T_f - T_{ai})]$  (III.12)

On trouve :  $M = 22,22 \text{ kg}$

C'est ainsi que le stockage du fluide a été réalisé dans un réservoir pouvant renfermer jusqu'à 28 litres.

#### **IV. Conclusion**

Dans cette partie, nous avons présenté une étude expérimentale sur le stockage d'énergie dans notre séchoir solaire indirect. L'analyse des résultats obtenus lors du test de stockage montre que le système de stockage a maintenu la température interne de la chambre de séchage à presque un degré de plus de la température extérieure. Ce qui ralentit le processus de séchage. Afin d'assurer la continuité du procédé de séchage, le chauffage nécessaire pendant la nuit est en moyenne de 5 heures (de 00h à 5h du matin). C'est la raison qui nous a conduits à dimensionner un système de stockage adéquat à notre séchoir. Nos résultats montrent que la masse du fluide de stockage nécessaire pour maintenir une longue période de séchage est de 22 litres.

## Chapitre IV Etude de la cinétique du séchage solaire

### I. Introduction

Le séchage consiste à diminuer l'activité de l'eau des produits séchés jusqu'à une valeur assurant leur conservation. Le processus doit respecter certains critères de qualité liés au produit tout en garantissant, pour la chaîne de production, une cadence et un coût raisonnable.

Des études portant sur le comportement des fruits et des légumes au cours de l'opération de séchage ont été rapportées par de nombreux chercheurs. ELkhadraoui, Kooli, Hamdi et Farhat (2015) ont présenté une analyse expérimentale pour étudier les performances d'un séchoir solaire à effet de serre et à convection forcée utilisé pour sécher le poivron rouge et le raisin sultana. Ils ont découvert que l'opération de séchage solaire du poivron rouge et du raisin en plein soleil et sous serre avait lieu pendant la période de ralentissement.

De leur côté, Kaya, Aydın et Demirtaş (2009) ont présenté une analyse expérimentale et théorique des caractéristiques de séchage de la carotte. Les résultats montrent que le temps de séchage diminue avec l'augmentation de la température ou de la vitesse de l'air, alors qu'il diminue avec la diminution de l'humidité relative. En outre, Caglar, Togrul, et Togrul(2009) ont déterminé l'humidité et de la diffusivité thermique des raisins sans pépins sous séchage infrarouge. Ils ont rapporté que la diffusivité de l'humidité et la diffusivité thermique augmentent avec la diminution de la teneur en eau et avec l'augmentation de la température.

Récemment, plusieurs chercheurs ont étudié la cinétique de séchage en couche mince de divers aliments. Les modèles en couches minces qui décrivent le processus de séchage des fruits et des légumes tombent dans trois catégories: théorique, semi-théorique et empirique.

Bingol, Roberts, Balaban et Devres (2012) ont utilisé des modèles en couches minces pour décrire les courbes de séchage des raisins pour les prétraitements par immersion. Les

caractéristiques de séchage en couches minces des aliments agricoles ont été décrites dans la littérature; comme les raisins ensemencés (Cakmak & Yıldız, 2011), les bananes, les mangues et le manioc (Koua, Fassinou, Gbaha et Touré, 2009), les abricots, les pêches, les figues et les prunes (Turgrul & Pehlivan, 2004).

L'objectif principal de ce chapitre est d'étudier les caractéristiques de séchage dans un séchoir solaire de type indirect avec un système de stockage d'énergie solaire. Ces caractéristiques sont ensuite comparées à celle du séchage naturel à l'air libre. Lors des deux procédés de séchage, le raisin a été choisi comme cas d'étude pour le séchage. Les mesures relevées durant les deux procédés de séchage ont été ensuite ajustées pour suggérer le meilleur modèle mathématique permettant de calculer la diffusivité effective pour le séchage du raisin.

## **II. Matériel et méthode**

### **II.1 Description du système de séchage**

Le système étudié est un séchoir solaire indirect avec stockage d'énergie, fonctionnant en convection naturelle. Il est constitué d'un capteur solaire à air, d'une chambre de séchage et d'un système de stockage d'énergie. Le système de stockage est composé d'échangeur de chaleur et d'un réservoir de stockage.

### **II.2 Protocole expérimental**

Le diamètre moyen des raisins est de  $1,50 \pm 0,1$  cm. Les échantillons choisis sont lavés à la main avec de l'eau potable pour éliminer la poussière. Le prétraitement des raisins est effectué en les plongeant dans un bain d'eau chaude pendant 7 secondes, puis en les refroidissant dans de l'eau froide.

La première étude expérimentale consiste au séchage des raisins dans un séchoir solaire indirect à convection naturelle (chapitre 3, figure III-3), avec un capteur solaire à air, une chambre de séchage, une cheminée et un système de stockage d'eau permettant de chauffer la chambre de séchage pendant la nuit. La masse de raisins utilisée dans le processus de séchage solaire indirect est de  $(300,84 \pm 0,01)$  g. Les échantillons sont répartis uniformément sur la première claie de la chambre de séchage.

La masse des raisins utilisée dans la deuxième étude expérimentale est de  $(300,42 \pm 0,01)$  g; les échantillons de raisin sont répartis sur une étagère exposé directement au soleil pendant 8 h par jour.

## **II.3 Grandeurs mesurées**

### **II.3.1 Mesure des températures et de l'humidité de l'air**

Les températures sont mesurées à différents emplacements dans le séchoir solaire indirect par des thermocouples de type T (0,2 mm de diamètre) connectés à un système d'acquisition de données (CR10X).

La température de l'air ambiant et l'humidité relative ambiante durant le séchage à l'air libre et le séchage solaire indirect sont mesurés par la sonde HMP45AC, avec une précision de lecture de  $\pm 0,2$  ° C et de  $\pm 2\%$ , respectivement.

### **II.3.2 Mesure de la vitesse de l'air asséchant**

La vitesse de l'écoulement de l'air est mesurée à l'aide d'un anémomètre à hélice testo 410-1 avec hélice intégrée de 40 mm. La précision des mesures est de l'ordre de  $\pm 0,2$  m/s.

### **II.3.3 Mesure des masses humides et sèches du produit**

Les pertes de masse sont mesurées à des intervalles de 2 h via une balance Sartorius (modèle BL1500S). La balance a une plage de mesure de 0 à 1500 g avec une précision de  $\pm 0,01$  g. Pour un bon stockage, les échantillons de raisin sont séchés jusqu'à une teneur en eau finale minimale de 20,2% (masse sèche). La teneur en eau initiale moyenne des échantillons de raisins est de  $79,8 \pm 0,1\%$ , valeur obtenue en plaçant les échantillons dans un four à 100 ° C pendant 24 h.

## **III. Modélisation des cinétiques de séchage**

### **III.1 Courbes de séchage**

Les courbes de séchage sont soit les courbes représentant les variations de la teneur en eau X en fonction du temps t, soit celles donnant la vitesse de séchage en fonction du temps t ou de la teneur en eau.

La courbe obtenue expérimentalement s'obtient-en suivant l'évolution de la masse humide du produit  $M_h$  au cours de séchage par pesées successives jusqu'à atteindre la teneur en eau finale:

$$X = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (\text{IV.1})$$

Où:

$X$  : Teneur en eau

$M_h$  : Masse humide du produit

$M_s$  : Masse sèche du produit

Trois grandes phases de séchage peuvent être observées dans la courbe de séchage.

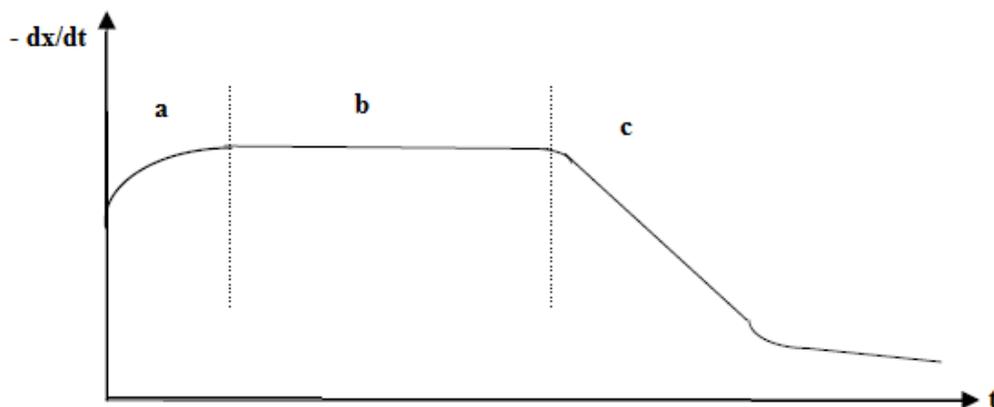


Figure IV- 1: Période de séchage

### Période initial (région a)

Quand un produit d'une température de surface  $T_s$  et d'une pression partielle de vapeur d'eau  $P_s$  est brassé par un courant d'air chaud, des échanges de chaleur et de matière ont lieu entre le produit et l'air asséchant. Pour être emportées sous forme de vapeur les quantités d'eau contenues dans le produit exigent un apport correspondant de l'énergie de vaporisation, l'excès de chaleur fournie par l'air amène le produit à s'échauffer davantage ce qui aboutit à un équilibre du bilan de chaleur, si par contre, la température de surface du produit est trop élevée, le déficit énergétique entraînerait un refroidissement de produit. La période initial est courte et n'apparaît véritablement que si les produits sont de

grandes tailles, ou si la différence de température entre l'air et le produit est importante [84].

### **Période à allure constante (région b)**

Cette période n'existe que si l'eau libre s'évapore en surface, l'évaporation s'effectue à la température de bulbe humide, l'activité de l'eau ( $A_w$ )<sup>2</sup> à la surface du produit est alors égale à 1 et le séchage est dit isenthalpique. Pour cette période, le flux de chaleur entrant est égal aux flux nécessaire à l'évaporation de l'eau sortant du produit [84,85].

### **Période de ralentissement (région c)**

Cette période est caractérisée par une diminution de la vitesse de séchage, le ralentissement de l'allure de séchage est expliqué par les phénomènes suivants [85] :

**-Disparition de l'eau libre en surface de produit** : ce phénomène correspond au début du ralentissement de l'allure de séchage. En admettant que la migration de l'eau libre et de l'eau liée contenues dans le produit s'effectuent consécutivement sous forme liquide et vapeur, il faut envisager l'existence d'un front de vaporisation qui s'enfonce progressivement à l'intérieur du produit.

**-L'épaisseur du produit** : si cette épaisseur est de plus en plus croissante, cela signifie que la vapeur d'eau doit traverser un parcours plus long expliquant ainsi et en grande partie ce ralentissement de l'allure de séchage.

**-La diffusivité de l'eau dans le produit** : elle varie avec la teneur du produit en eau, plus ce dernier est sec, moins il devient perméable à l'eau.

**-La résistance mécanique des parois cellulaires intactes** : Les parois cellulaires intactes empêchent la vapeur d'eau de passer en grande quantité à l'extérieur du produit.

**-Le croutage** : Certains composés solubles notamment les sucres et les sels accompagnent l'eau évaporée pendant la période à allure constante (région b) et sont disposés à la surface. Ce phénomène appelé croutage est à l'origine de fortes concentrations en surface de ces composés solubles qui bouchent les pores du produit. L'accumulation et l'assèchement de ces solutés imperméabilisent la surface du produit.

---

<sup>2</sup>L'activité de l'eau dans le produit ( $A_w$ ) est une grandeur liée à l'humidité du produit. G. Lewis & M. Randall, 1923 [84], G. Scott, 1957 [85], M. Loncin, 1961 [86], ont défini l'activité de l'eau  $a_w$  dans le produit par le rapport de la pression partielle de vapeur d'eau à la surface du produit ( $P_{vp}$ ) à la pression de vapeur de l'air saturé ( $P_{vs}$ .)

## III.2 Modèle de séchage en couche mince

### III.2.1 Teneur en eau réduite et vitesse de séchage

La teneur en eau réduite ( $X^*$ ) et la vitesse de séchage ( $\frac{dX}{dt}$ ) des raisins dans les deux expériences de séchage a été établi en utilisant les équations ci-dessous [77]:

$$X^* = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} \quad (IV-2)$$

$$\frac{dX}{dt} = \frac{X_{t+\Delta t} - X_t}{\Delta t} \quad (IV-3)$$

Où:

$X_t$  est la teneur en eau à tout moment (kg d'eau / kg de matière sèche).

$X_0$  est la teneur en eau initiale (kg d'eau / kg de matière sèche).

$X_e$  est la teneur en eau d'équilibre des échantillons (kg d'eau / kg de matière sèche).

$X_{t+\Delta t}$  est la teneur en eau aux moments  $t+\Delta t$  (kg d'eau / kg de matière sèche).

La teneur en eau réduite ( $X^*$ ) dans cette étude a été simplifiée à  $X_t / X_0$  conformément à (Akpınar, 2008; Diamante et Munro, 1993; Doymaz, 2005; Kingsly, Goyal, Manikantan et Ilyas, 2007; Pala, Saygi et Sadikoglu, 1993; Yaldiz et Ertekin, 2001).

La modélisation des courbes de séchage solaire consiste à définir une fonction vérifiant l'équation :  $X^* = f(t)$  dite équation caractéristique de séchage.

### III.2.2 Equation à couche mince

Les équations à couche mince sont souvent utilisées pour décrire la cinétique de séchage de divers types de matériaux poreux. Les modèles de séchage à couche mince qui décrivent le phénomène de séchage des matériaux biologique relèvent principalement de trois catégories: théoriques, Semi-théorique et empirique. La première ne tient compte que de la résistance interne au transfert d'humidité, tandis que les deux autres ne tiennent compte que de la résistance externe au transfert d'humidité entre le produit et l'air (Fortes et Okos, 1981, Whitaker et al., 1969). En supposant que la résistance au flux d'humidité est uniformément répartie à l'intérieur du matériau isotrope homogène, le coefficient de diffusion  $D$  est indépendant de la teneur en eau locale, et si le retrait volumique est négligeable, la seconde loi de Fick peut être dérivée comme suit:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \nabla^2 X \quad (\text{IV-4})$$

Les modèles semi-théoriques sont généralement obtenus en simplifiant les solutions de série générales de la seconde loi de Fick, ou une modification de modèles simplifiés et valables dans la plage de température, d'humidité relative, de vitesse de circulation de l'air et de teneur en eau pour laquelle elles ont été développées (Fortes and Okos 1981).

Parmi les modèles semi-théoriques de séchage en couche mince, le modèle de Lewis (Eq. IV-6), le modèle de Henderson et Pabis (Eq. IV-7), le modèle de Page (Eq. IV-8), le modèle Page modifiée (Eq. IV-9), le modèle Logarithmique (Eq. IV-10), le modèle à deux termes (Eq. IV-11), le modèle exponentiel à deux paramètres (Eq. IV-12), le modèle exponentiel modifié à deux paramètres (Eq. IV-13), le Modèle de Verma (Eq. IV-14), le modèle Midilli et al. (Eq. IV-15) et le modèle Wang and Singh (Eq. IV-17) sont largement utilisés.

#### - **Modèle de Lewis**

Le modèle Lewis (Lewis 1921) est la solution générale de l'équation de Fick. Ce modèle ne considère que la diffusion basée sur la migration de l'eau. Le modèle simple de Lewis est exprimé comme suit :

$$\frac{dX}{dt} = -k(X - X_e) \quad (\text{IV-5})$$

Après intégration

$$X^* = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-kt) \quad (\text{IV-6})$$

Où : k est une constante de séchage, qui dépend de la température, l'humidité absolue et la vitesse de l'air ainsi du diamètre du produit utilisé.

#### - **Modèle Henderson et Pabis**

Le modèle de Henderson et Pabis est le premier terme d'une solution de série générale de la deuxième loi de Fick (Henderson et Pabis 1969)

$$X^* = \frac{X-X_e}{X_0-X_e} = a \exp(-kt) \quad (IV-7)$$

Ce modèle a été utilisé avec succès pour modéliser le maïs (Henderson et Pabis 1969), le blé (Watson et Bhargava 1974) et les arachides (Moss et Otten 1989). La pente de ce modèle, le coefficient  $k$ , est liée à la diffusivité effective lorsque le processus de séchage n'a lieu que pendant la période de ralentissement et que la diffusion du liquide contrôle le processus (Madamba et al., 1996).

#### - **Modèle de page**

Le modèle de Page est une modification du modèle de Lewis pour surmonter ses défauts. (Page 1949) a modifié le modèle de Lewis pour obtenir un modèle plus précis en ajoutant une constante sans dimension empirique ( $n$ ). Ce modèle a donné de bons résultats dans la prédiction du séchage du grain et du riz brut (Wang et Singh 1978), du maïs décortiqué (Agrawal et Singh 1977) et de l'orge (Bruce 1985).

$$X^* = \frac{X-X_e}{X_0-X_e} = \exp(-kt^n) \quad (IV-8)$$

Où :  $k$  et  $n$  sont des constantes de séchage qui dépendent de la température de l'air et de la nature du produit.

#### - **Modèle modifié de Page**

Overhults et al. (1973) ont également modifié le modèle Page pour décrire le séchage du soja.

$$X^* = \frac{X-X_e}{X_0-X_e} = \exp(-kt)^n \quad (IV-9)$$

#### - **Modèle Logarithmique**

Chandra and Singh (1995) ont proposé un nouveau modèle dérivé du modèle de Henderson et Pabis avec l'addition d'un terme empirique :

$$X^* = \frac{X-X_e}{X_0-X_e} = a \exp(-kt) + c \quad (IV-10)$$

### - Modèle à deux paramètres

Henderson (1974) a présenté un modèle à deux termes pour corriger les lacunes du modèle Henderson et Pabis. Ce modèle est les deux premiers termes de la solution de la série générale à la solution analytique d'Équation (IV-11). Le modèle à deux termes a la forme :

$$X^* = \frac{X-X_e}{X_0-X_e} = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t) \quad (\text{IV-11})$$

Où : a, b sont les constantes du modèle (sans dimension), et  $k_0$ ,  $k_1$  sont les constantes cinétiques du séchage. Ces constantes sont obtenues à partir de données expérimentales.

### - Modèle exponentiel à deux paramètres

Sharaf-Eldeen et al. (1980) ont modifié le modèle à deux paramètres en réduisant le nombre de constantes (3 au lieu de 4) en supprimant la constante b. Ils ont souligné que b dans le modèle à deux paramètres (Eq. IV-11) devait être égale à (1 - a) pour  $t = 0$  et  $MR = 1$  et ont donc proposé la modification suivante :

$$X^* = \frac{X-X_e}{X_0-X_e} = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat) \quad (\text{IV-12})$$

### - Modèle exponentiel modifié à deux paramètres

Verma et al. (1985) ont modifié le deuxième terme du modèle exponentiel à deux paramètres en ajoutant une constante empirique et ils l'ont appliqué au séchage du riz :

$$X^* = \frac{X-X_e}{X_0-X_e} = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt) \quad (\text{IV-13})$$

### - Modèle d'approximation de diffusion

Kassem (1998) a réarrangé le modèle de Verma en faisant apparaître la constante de séchage k dans la seconde exponentielle :

$$X^* = \frac{X-X_e}{X_0-X_e} = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt) \quad (\text{IV-14})$$

Cette forme modifiée (Eq. IV-14) est connue comme une première approche du modèle diffusionnel.

---

- **Modèle Midilli et al.**

Midilli et al. (2002) ont proposé un nouveau modèle avec l'ajout d'un terme supplémentaire empirique intégrant le temps  $t$  au modèle Henderson et Pabis. Ce nouveau modèle est la combinaison d'un terme exponentiel et d'un terme linéaire.

Ils ont appliqué ce nouveau modèle pour le séchage du pollen, de champignons, et de pistache pour différentes méthodes de séchage.

$$X^* = \frac{X-X_e}{X_0-X_e} = a \exp(-kt^n) + bt \quad (\text{IV-15})$$

Où:  $b$  est une constante empirique

- **Modèle parabolique**

Yagcioglu et al. (1999) ont présenté un modèle pour décrire les caractéristiques de séchage des feuilles de laurier dans différentes conditions, selon l'équation suivante :

$$X^* = \frac{X-X_e}{X_0-X_e} = a + bt + ct^2 \quad (\text{IV-16})$$

Ce modèle a été utilisé par Sharma et al (2004).

- **Modèle Wang and Singh**

Singh and Wang (1978) ont proposé un modèle empirique, pour décrire les caractéristiques de séchage du produit, selon l'équation suivante :

$$X^* = \frac{X-X_e}{X_0-X_e} = 1 + at + bt^2 \quad (\text{IV-17})$$

Où :  $a$  et  $b$  sont des constantes de séchage.

Les modèles empiriques établissent une relation directe entre la teneur en eau réduite et le temps de séchage. Ces modèles contiennent des constantes qui sont ajustées pour concorder avec les courbes expérimentales de séchage. Par conséquent, elles sont valables seulement dans le domaine d'étude expérimentale pour lequel elles ont été établies (S. Lahsasni, & al., 2004b et 2004c et S. Simal, & al., 2005).

Les modèles empiriques considérés dans ce travail sont: Lewis, Henderson et Pabis, Logarithmique, à deux paramètres, Exponentiel à deux paramètres, Exponentiel modifié à deux paramètres, Approximation of diffusion, Midilli et Kucuk, Parabolique et Wang and Singh comme indiqué dans le tableau IV-1.

Tableau IV- 1 : Modèles mathématiques appliqués aux courbes de séchage du raisin dans la littérature

N° Modèle	Nom du modèle	Équation du modèle	Références
1	Lewis	$X^* = \exp(-kt)$	[85,96]
2	Henderson et Pabis	$X^* = a \exp(-kt)$	[97]
3	Logarithmique	$X^* = a \exp(-kt) + c$	[117]
4	À deux parameters	$X^* = a \exp(-k_0t) + b \exp(k_1t)$	[93, 83]
5	Exponentiel à deux parameters	$X^* = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$	[118]
6	Exponentiel modifié à deux paramètres	$X^* = a \exp(-kt) + (1-a)\exp(-gt)$	[109]
7	Approximation de diffusion	$X^* = a \exp(-kt) + (1-a)\exp(-kbt)$	[93]
8	Midilli et al.	$X^* = a \exp(-kt^n) + bt$	[111, 119, 120]
9	Parabolique	$X^* = a + bt + ct^2$	[121]
10	Wang and Singh	$X^* = 1 + at + bt^2$	[102]

### III.3 Paramètres statistiques utilisés

La modélisation du comportement de séchage de différents produits nécessite souvent des méthodes statistiques d'analyse de régression et de corrélation. Les modèles de régression linéaire et non linéaire sont des outils importants utilisés pour trouver la relation entre différentes variables, en particulier celles pour lesquelles aucune relation empirique n'existe.

Dans la littérature, il existe plusieurs critères pour évaluer la pertinence d'un modèle aux données expérimentales. Le coefficient de corrélation (R) est l'un des critères pour analyser la précision de l'équation qui décrit les courbes de séchage. En plus de R, les paramètres statistiques chi-carré réduits ( $\chi^2$ ) et l'erreur quadratique moyenne RMSE sont utilisés pour étudier la précision du lissage (T. L. Togrul, & D. Pehlivan, 2003).

Dans cette étude, les constantes et les coefficients du modèle le mieux adapté sont déterminés en ajustant les dix modèles utilisés aux courbes de séchage expérimentales. Une évaluation par régression non linéaire a été utilisée pour ajuster les dix modèles mathématiques du séchage du raisin au fichier de données expérimentales.

Les critères de comparaison utilisés pour évaluer la qualité de l'ajustement comprennent l'erreur quadratique moyenne (RMSE), le khi carré réduit ( $\chi^2$ ) et le coefficient de corrélation R. Ces indicateurs statistiques sont calculés comme suit :

Le coefficient de corrélation linéaire R mesure la force et la direction d'une relation linéaire entre deux variables sur un diagramme de dispersion. Il donne une idée sur l'allure qu'a le nuage de points. La valeur de R est toujours comprise entre +1 et -1. Le signe indique le sens de la pente de régression. Il est défini comme suit:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{\text{exp},i}^* - \bar{X}_{\text{exp},i}^*) (X_{\text{pre},i}^* - \bar{X}_{\text{pre},i}^*)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_{\text{exp},i}^* - \bar{X}_{\text{exp},i}^*)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (X_{\text{pre},i}^* - \bar{X}_{\text{pre},i}^*)^2}} \quad (\text{IV-18})$$

Avec :

$$\bar{X}_{\text{exp},i}^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{\text{exp},i}^*$$

$$\bar{X}_{\text{pre},i}^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{\text{pre},i}^*$$

La statistique Khi-carré réduite est une mesure de la qualité de l'ajustement des données au modèle, définie comme suit :

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{\text{exp},i}^* - X_{\text{pre},i}^*)^2}{N-Z} \quad (\text{IV-19})$$

L'erreur quadratique moyenne (RMSE) se réfère simplement à la moyenne de l'écart quadratique entre le paramètre d'erreur quadratique moyenne (MSE) prédit et le paramètre observé [44]. Elle est définie comme suit :

$$\text{RMSE} = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{\text{pre},i}^* - X_{\text{exp},i}^*)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{IV-20})$$

L'erreur quadratique moyenne est une valeur unique fournissant des informations sur la qualité de l'ajustement de la droite de régression, car des valeurs plus faibles impliquent des erreurs d'amplitude plus petites.

Où:

$X_{\text{exp},i}^*$  est le i-ème la teneur en eau réduite observer expérimentalement.

$X_{\text{pre},i}^*$  est le i-ème la teneur en eau réduite prédite.

N est le nombre d'observations et Z est le nombre de constantes [88,90].

Les données de séchage sont ajustées aux différents modèles semi-théoriques / empiriques mentionnés dans le tableau IV-1 et les résultats des modèles de séchage sont comparés aux valeurs expérimentales. Les modèles sont évalués sur la base des coefficients de corrélation (R), des valeurs réduites du khi-deux ( $\chi^2$ ) et RMSE.

### III.3.1 La diffusivité effective

L'eau migre de l'intérieur vers la surface du produit sous l'action de divers mécanismes qui peuvent se combiner. Il est généralement admis que l'écoulement capillaire<sup>3</sup> est l'un des mécanismes fondamentaux dans les produits poreux riches en eau. Dans les produits alimentaires, on préfère souvent attribuer le transport d'eau à une diffusion d'eau liquide sous l'effet du gradient de concentration. La diffusivité effective est l'une des propriétés physiques qui permet de caractériser les transferts de masse au sein des milieux poreux. La mesure du paramètre ( $D_{\text{eff}}$ ) est indispensable lors de la modélisation de séchage.

La diffusivité effective,  $D_{\text{eff}}$ , est calculée en utilisant la méthode des pentes telle que décrite par Doymaz (2004) et Panchariya et al., (2002). Elle est déterminée en ajustant les données expérimentales en utilisant la seconde loi de l'équation de diffusion de Fick [128]:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{\text{eff}} \nabla^2 X \quad (\text{IV-21})$$

Dans cette équation,  $D_{\text{eff}}$  est la diffusivité effective ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ), t est le temps de séchage (s) et X est la teneur en eau. La solution analytique de la seconde loi de Fick (Eq. IV-22) en

<sup>3</sup>(L'écoulement capillaire est le mouvement du liquide à travers les capillaires, les pores d'interconnexion dans un solide, ou sur la surface du solide par l'attraction moléculaire entre le liquide et le solide (Srikiatden & Roberts, 2007)

tenant compte des hypothèses; que la température de séchage constante, la migration par diffusion et le retrait sont négligeables est donnée ci-dessous [129]:

$$X^* = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-n^2 \pi^2 \frac{D_{\text{eff}} t}{r^2}\right) \quad (\text{IV-22})$$

Pour des temps de séchage très longs, Equation (IV-23) peut être réduite au premier terme de la solution en série et s'exprimer ainsi sous une forme logarithmique [130]:

$$\ln\left(\frac{X}{X_0}\right) = \ln\left(\frac{6}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{r^2}\right) \quad (\text{IV-23})$$

La diffusivité effective est obtenue en traçant les données expérimentales en fonction du temps  $\ln(X^*)$  vis-à-vis du temps. Généralement, une diffusivité efficace est utilisée en raison des informations limitées sur le mécanisme du mouvement de l'humidité pendant le séchage et de la complexité du processus. Conformément à l'équation (IV-24), un graphique de  $\ln(X^*)$  dépend du temps donne une ligne droite avec une pente de (P), dans laquelle:

$$P = \frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{r^2} \quad (\text{IV-24})$$

Où:

$D_{\text{eff}}$  est la diffusivité effective en  $\text{m}^2/\text{s}$ ,

$r$  est le rayon de l'échantillon en m.

Dans cette étude, le rayon des échantillons de raisin était de  $7,5 \cdot 10^{-3}$  m. Le rayon était uniforme pour tous les échantillons.

## IV. Résultats et discussion

### IV.1 Cinétiques de séchage du Raisin

La figure IV-2 présente les variations de la teneur en eau en fonction du temps de séchage des raisins lors du séchage à l'air libre et dans un séchoir solaire indirect. On remarque que la teneur en eau diminue nettement en fonction du temps de séchage. Comme le montre la figure IV-2, le temps nécessaire pour sécher les raisins dans le séchoir solaire indirect et en plein air sont respectivement de 120 h et 201 h. La figure IV-3 indique les variations des vitesses de séchage des raisins lors du séchage à l'air libre et dans le

séchoir solaire indirect. La vitesse de séchage a diminué de façon continue avec le temps de séchage. On constate que la période à allure constante n'existe pas, seule la période de ralentissement qui existe. Cette période de ralentissement apparaît car la surface du fruit n'est plus saturée d'eau. Les résultats obtenus sont très similaires à ceux indiqués par Doymaz et Pala [127], et Turgrul et Pehlivan [83]

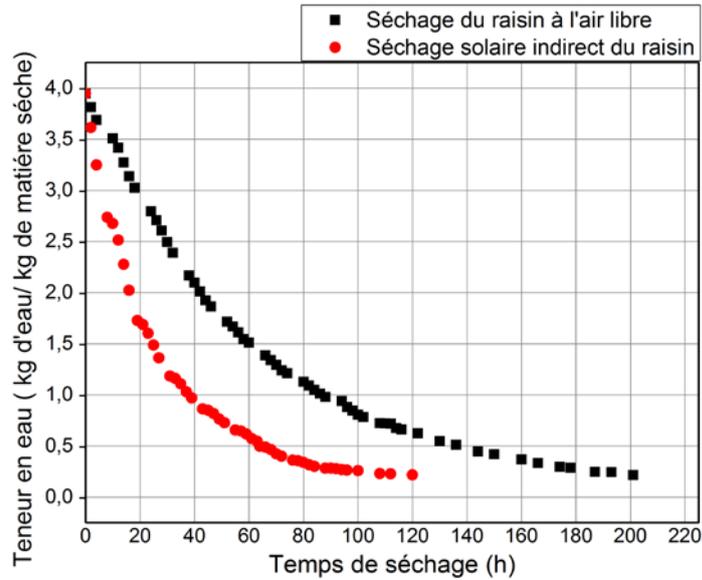
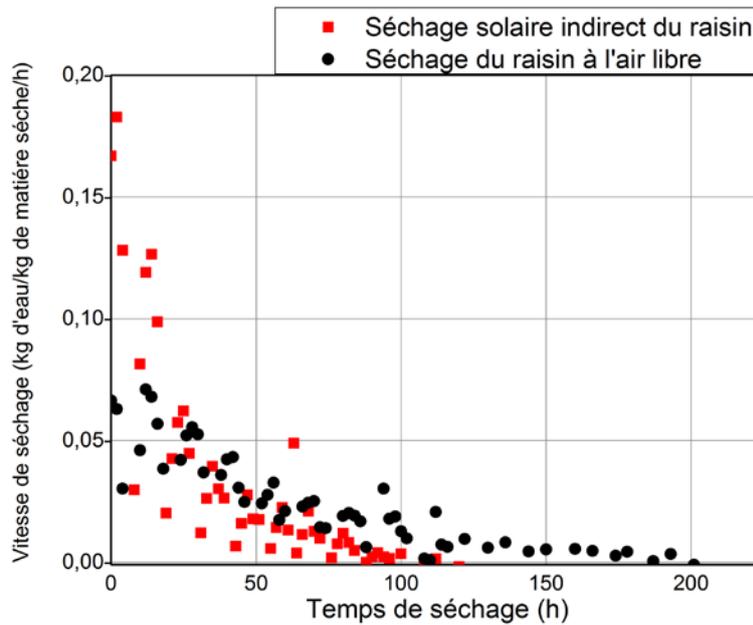


Figure IV- 2: Variation des teneurs en eau expérimentales du séchage à l'air libre et indirect des raisins en fonction du temps de séchage



**Figure IV- 3: Variation de la vitesse de séchage en fonction du temps de séchage**

Les tableaux IV-2 et IV-3 résument les constantes et les paramètres des modèles pour le séchage solaire indirect et en plein air des raisins. Les modèles de séchage choisis sont évalués en fonction des trois paramètres statistiques;  $R$ ,  $\chi^2$  et RMSE. Le meilleur modèle approprié définissant les comportements de séchage en couche mince des raisins est choisi en considérant les valeurs de  $R$  les plus élevées et les valeurs de  $\chi^2$  et RMSE les plus basses. Dans le cas du séchage à l'air libre, les valeurs de  $R$  pour les modèles ont variés de 0,99369 à 0,99951, RMSE de 0,00851 à 0,03229, et  $\chi^2$  de 0,000072 à 0,00104. Dans le cas du séchage solaire indirect, les valeurs de  $R$  pour les modèles ont variés entre 0,97438 et 0,99901, RMSE entre 0,01096 et 0,06636,  $\chi^2$  entre 0,00012 et 0,0044. L'amplitude étroite de la variation de ces indicateurs statistiques indique que les dix modèles de séchage testés prédisent un bon ajustement. Le modèle Midilli et.al a la plus grande valeur de  $R$  et la plus faible des valeurs  $\chi^2$  et RMSE. De ce fait, le modèle Midilli et.al est le modèle le plus approprié pour être compatibles avec les données expérimentales qui en résultent du séchage solaire indirect et à l'air libre, et pour décrire le séchage solaire indirect et le séchage à l'air libre du raisin.

Tableau IV- 2: Les constantes et les paramètres des modèles pour le séchage solaire indirect du raisin

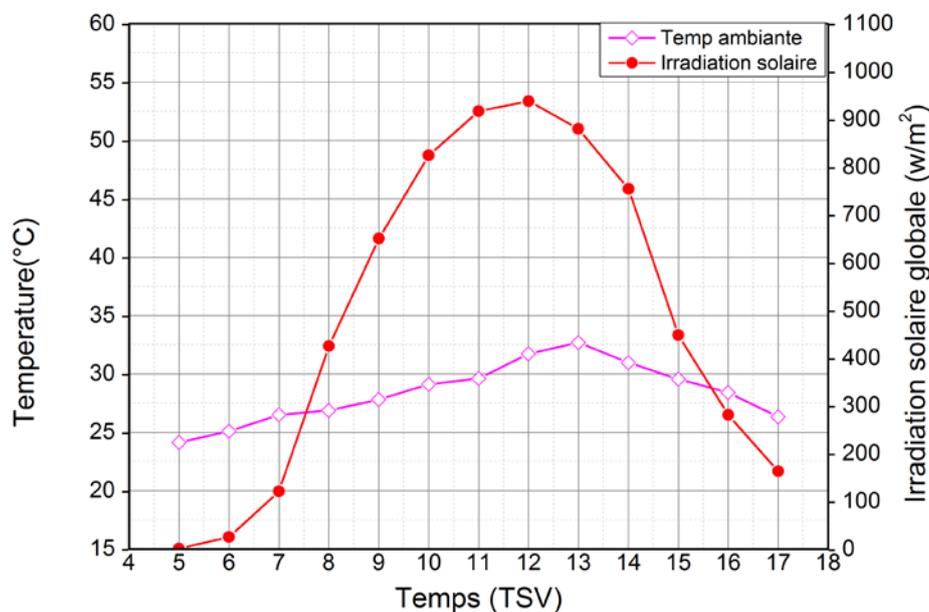
Modèles	Constantes de séchage	R	RMSE	$\chi^2$
Lewis	k = 0,03579	0,99704	0,02084	0,000435
Middili et all	k = 0,05929 a 1,00926 n 0,87253 b 0,00028	0,99901	0,01096	0,000120
Henderson et Pabis	k 0,03327 a 0,93516	0,99523	0,02477	0,000614
À deux paramètres	a 0,39822 b 0,61143 k <sub>0</sub> -0,08681 k <sub>1</sub> 0,02423	0,99892	0,0115	0,000132
Exponentiel à deux paramètres	a 0,29894 k 0,09034	0,99873	0,01266	0,000160
Exponentiel modifié à deux paramètres	a 1,05181 k 0,03579 g 0,03579	0,99704	0,02084	0,000435
Logarithmique	a 0,91993 k 0,04134 c 0,05690	0,99855	0,01329	0,000177
App de diffusion	a -3,74951 k 0,03579 b 0,99999	0,99704	0,02085	0,000435
Parabolique	a 0,83187 b -0,01808 c 0,00010	0,97722	0,05118	0,002620
Wang and singh	a -0,02387 b 0,00015	0,97438	0,06636	0,00440

Tableau IV- 3: Constantes et paramètres des modèles pour le séchage des raisins à l'air libre

Modèles	Constantes de séchage	R	RMSE	$\chi^2$
Lewis	k 0,01559	0,99913	0,01128	0,000127
Middili et all	k 0,01332 a 1,00653 n 1,04946 b 0,00016	0,99951	0,00851	0,000072
Henderson et Pabis	k 0,01581 a 1,01259	0,99923	0,01077	0,000116
À deux paramètres	a 12,81625 b -11,80291 k <sub>0</sub> 0,01580 k <sub>1</sub> 0,01580	0,99924	0,01072	0,000115
Exponentiel à deux paramètres	a 0,00061 k 25,72406	0,99913	0,01132	0,000128
Exponentiel modifié à deux paramètres	a -6,17290 k 0,01473 g 0,01485	0,99912	0,01136	0,000129
Logarithmique	a 0,99981 k 0,01670 c 0,02112	0,99940	0,00941	0,000089
App de diffusion	a -5,60583 k 0,01559 b 0,99999	0,99913	0,01128	0,000127
Parabolique	a 0,93328 b -0,01056 c 0,00003	0,99389	0,02944	0,000866
Wang and singh	a -0,01197 b 0,00004	0,99369	0,03229	0,001040

#### IV.2. Variations des paramètres climatiques pour un jour représentatif du séchage du Raisin

Les variations du rayonnement solaire et de la température ambiante mesurés pendant une journée représentative de séchage du raisin est présentée à la Figure IV-4, Le rayonnement solaire maximum observé est d'environ 938 W / m<sup>2</sup> et la température ambiante est de 32 °C, Pour le séchoir solaire indirect, la vitesse moyenne de l'air au cours de l'expérience est de 0,7 m / s.



**Figure IV- 4: Variations du rayonnement solaire et de la température ambiante mesurés d'un jour représentatif de la campagne de séchage des raisins à l'air libre**

La Figure IV-5 montre les variations du rayonnement solaire mesuré, la température ambiante, la température de sortie du capteur solaire, la température de la première claie, la température des raisins et de l'humidité dans la chambre de séchage d'un jour représentatif de séchage solaire indirect des raisins. En analysant les résultats obtenus, on constate que la température de sortie du capteur augmente jusqu'à un maximum de 46,8 °C à 12 (TSV) et commence à diminuer en suivant l'évolution du rayonnement solaire. Nous avons observé que l'humidité dans la chambre de séchage est faible entre 9 et 16 (TSV). Les résultats de la figure IV-6 révèlent que la température du raisin après le coucher du soleil est supérieure à la température ambiante en raison du transfert de chaleur de l'eau emmagasiné dans le réservoir de stockage, L'humidité à l'intérieur de la chambre de séchage est nettement plus basse que celle à l'extérieur.

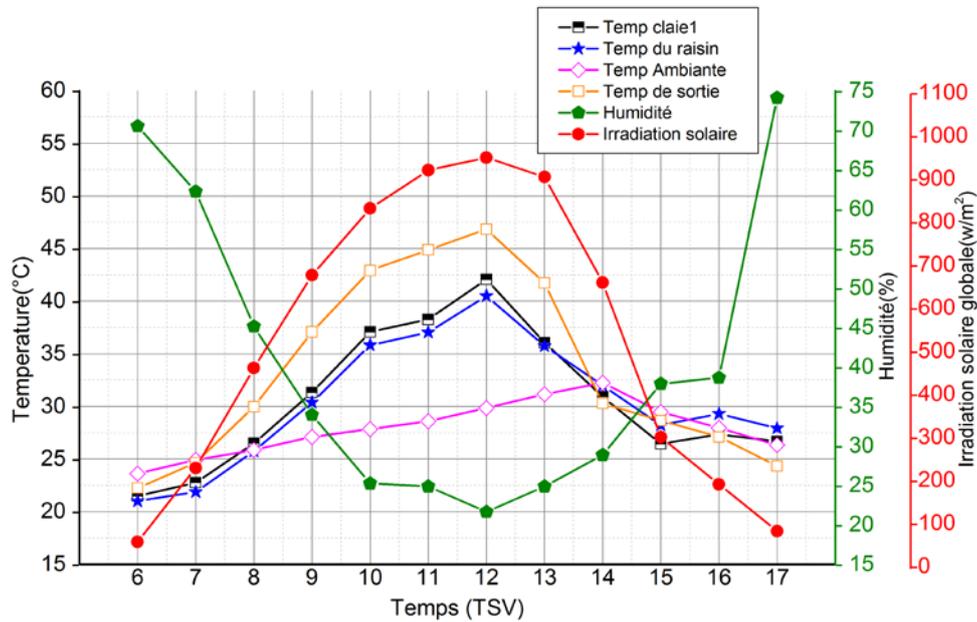


Figure IV- 5: Evolution horaire du rayonnement solaire mesuré, de la température ambiante, de la température de sortie, de la température de la claie1, de la température du raisin et de l'humidité pendant une journée représentative du séchage soleil indirect du raisin

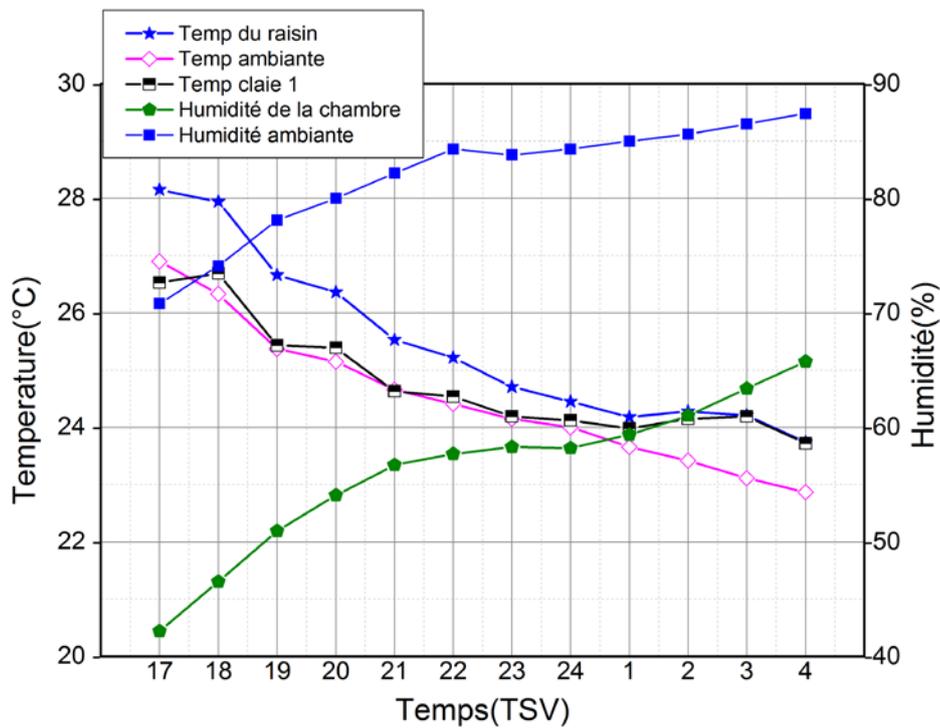


Figure IV- 6: Evolution horaire de la température ambiante mesurée, de la température des raisins, de la température de la claie 1 et de l'humidité d'un jour représentatif de séchage solaire indirect du raisin après le coucher du soleil

### IV.3 Lissage des courbes de séchage du Raisin

Les Figures IV-7 et IV-8 révèlent une concordance idéale entre la teneur en eau réduite expérimentale et celle prédite en utilisant le modèle de Midilli et al, pour les raisins séchés à l'air libre et au séchoir solaire indirect. La prédiction utilisant ce modèle a montré que le nuage de points des valeurs prédites en fonction des valeurs expérimentales est bien réparti sur la 1ère bissectrice, ce qui prouve que ce modèle est approprié pour décrire les caractéristiques de séchage des raisins. Cette observation est en accord avec le résultat rapporté par Bingol et al. [80] et Akbulut et Durmus [132].

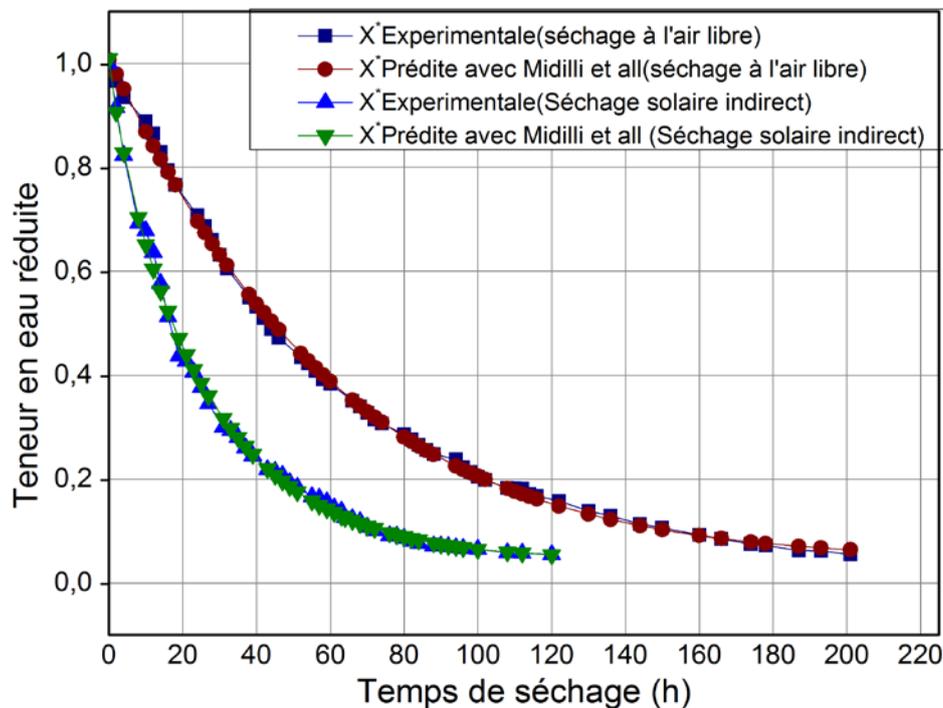
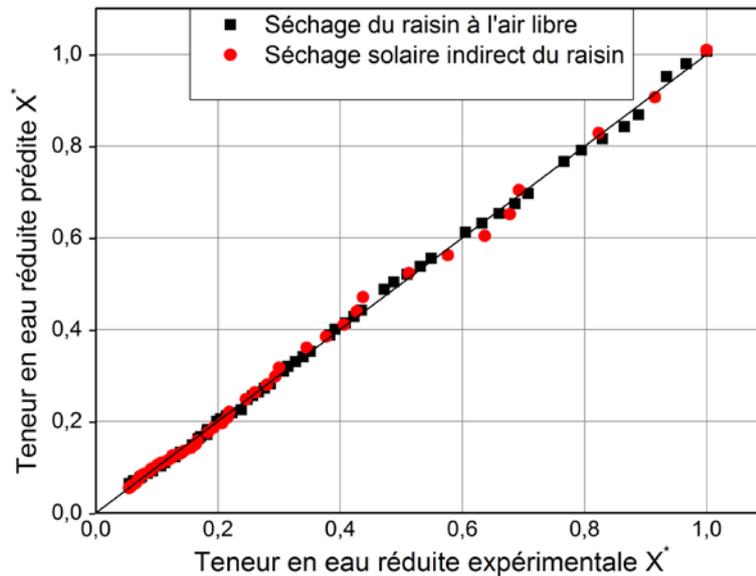


Figure IV- 7: Données expérimentales de la teneur en eau réduite en fonction du temps de séchage ajustée avec le modèle Midilli et al



**Figure IV- 8: La teneur en eau réduite prédite par Midilli et all, modèle en fonction de la teneur en eau réduite expérimentale ( $X^*$ )**

La figure IV-9 montre les effets du type de séchage sur le coefficient de diffusion effectif du raisin, Le graphique a été tracé entre les logarithmes naturels de la teneur en eau réduite ( $\ln X^*$ ) en fonction du temps de séchage. On remarque une augmentation rapide de la diffusion effective lors du séchage solaire indirect avec le temps de séchage. Les valeurs de la diffusivité effective ont été calculées sur la base de l'Eq. (IV-24) et obtenus comme  $2,34 \times 10^{-11} \text{ m}^2 / \text{s}$  pour le séchage à l'air libre des raisins et comme  $4,08 \times 10^{-11} \text{ m}^2 / \text{s}$  pour le séchage solaire indirect des raisins. On constate que, lors du séchage à l'air libre, les valeurs de la diffusivité effectives de l'humidité sont plus petites, Les raisins ont été séchés à une température supérieure moyenne de  $41,9 \text{ }^\circ\text{C}$  dans le séchoir solaire indirect, ce qui a augmenté l'activité des molécules d'eau conduisant à la diffusivité plus élevée de l'humidité. Les valeurs de  $D_{\text{eff}}$  obtenues dans cette étude sont similaires à celles indiquées dans la littérature, comme est illustré dans le tableau IV-4. Conformément à ces références, les valeurs de diffusivité effective de l'humidité obtenues se situent dans la gamme de  $10^{-11}$  à  $10^{-10} \text{ m}^2 / \text{s}$  pour le séchage des raisins [138]. Dans cette recherche, la valeur de la diffusivité effective de l'humidité trouvée pour le séchoir solaire indirect est correcte.

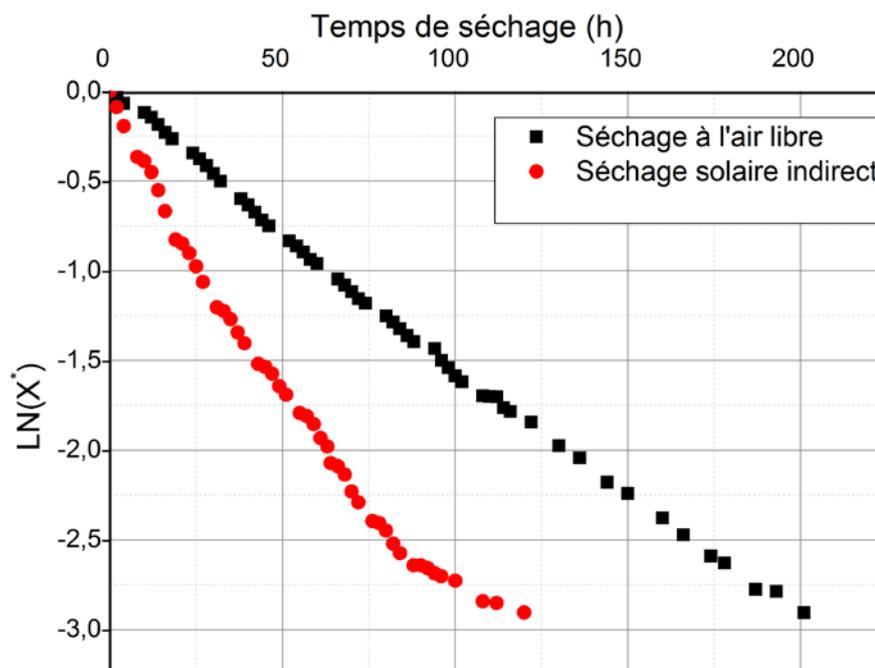


Figure IV- 9: Impacts du type de séchage sur le coefficient de diffusion effectif du raisin

Tableau IV- 4: Valeurs de la diffusivité effective des raisins

Aliments	Méthodes de séchage	Diffusivité effective ( $m^2/s$ )	Références
Raisins sans pépins	Séchage à l'air chaud	$1,82 \times 10^{-10}$ - $5,84 \times 10^{-10}$	[133]
Raisins sans pépins	Séchage à l'air chaud	$2,40 \times 10^{-10}$ - $6,22 \times 10^{-10}$	[134]
Raisins sans pépins	Séchage solaire	$0,95 \times 10^{-10}$ - $1,05 \times 10^{-10}$	[135]
Raisins sans pépins	Séchage à l'air chaud	$7,91 \times 10^{-10}$ - $24,5 \times 10^{-10}$	[136]
Raisins	Déshydrateur de plateau (Excalibur, Sacramento, CA).	$5 \times 10^{-11}$ - $3,5 \times 10^{-10}$	[80]
Raisins sans et avec pépins	Séchage à l'air libre	$1,02 \times 10^{-11}$ $1,66 \times 10^{-11}$	[137]
Raisins	Séchage à l'air libre	$2,34 \times 10^{-11}$	Présent travail
Raisins	Séchage solaire indirect	$4,08 \times 10^{-11}$	Présent travail

---

## V. Conclusion

Les caractéristiques de séchage des raisins ont été étudiées lors du séchage à l'air libre et dans un séchoir solaire indirect. Pour décrire les caractéristiques de séchage des raisins, dix modèles de séchage en couche mince ont été utilisés. Les conclusions suivantes ont été tirées des résultats:

-L'intégration du réservoir de stockage d'eau dans le séchoir solaire indirect a permis de maintenir la température du raisin supérieure à la température ambiante pendant les heures d'hors ensoleillement.

– Le système de stockage utilisé dans le séchoir solaire indirect a permis de réduire le temps de séchage des raisins par rapport au séchage à l'air libre.

– Le système de stockage a un impact direct sur le climat interne de la chambre de séchage.

- Le modèle Midilli et al, a donné le meilleur ajustement (avec une valeur de R de 0,99901, une valeur de RMSE de 0,01096 et une valeur de  $\chi^2$  de 0,000120) pour le séchage solaire indirect et pour le séchage à l'air libre (avec une valeur de R de 0,99951, une valeur de RMSE de 0,00851 et une valeur de  $\chi^2$  de 0,000072).

-Les valeurs de la diffusivité effective pour les raisins séchées à l'air libre et au séchoir solaire indirect sont respectivement  $2,34 \times 10^{-11}$  et  $4,08 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s.

## **Conclusion générale**

Ce travail de thèse porte sur le procédé de séchage des aliments, il présente une contribution concrète au profil des agriculteurs marocains en vue de valoriser leurs productions agricoles. Entre le séchage naturel à inconvénients hygiéniques multiples et le séchage artificiel utilisant les sources d'énergies classiques présentant un coût prohibitif, on a développé un séchoir utilisant le rayonnement solaire comme source d'énergie.

L'objectif principal était de développer et de réaliser un séchoir solaire indirect avec une nouvelle conception de l'absorbeur constituant le capteur solaire à air. Plusieurs variantes d'absorbeurs ont été étudiées et expérimenté. La première configuration portait sur un absorbeur constitué par une plaque en polyéthylène alvéolaire associée à une plaque métallique sous jacente. Bien que techniquement cette configuration présente l'avantage de renfermer des alvéoles où l'air pouvait éventuellement circuler, le rendement du capteur était relativement faible. En effet, la section étroite des alvéoles de  $1 \text{ cm}^2$  engendrait des pertes de charges sur les bords des alvéoles ce qui empêchait l'acheminement de l'air chaud vers la chambre de séchage. Sur la base des résultats obtenus lors de ce premier test, une deuxième configuration de l'absorbeur a été élaborée. L'absorbeur est alors constitué de deux plaques ondulées, en aluminium. Les deux plaques sont superposées en opposition pour former des cylindres parallèles jouant le rôle d'absorbeur et de conduite d'air le long du capteur.

Pour évaluer les performances de ce capteur solaire doté de l'absorbeur à plaques ondulées, une étude expérimentale a été menée sous convection naturelle avec un débit d'air de  $48 \text{ m}^3/\text{h}$  et sous convection forcée avec un débit de  $150 \text{ m}^3/\text{h}$ . Les résultats obtenus montrent que, le rendement du capteur augmente pour le débit élevé sous convection forcée. En effet, bien que la température de l'air à la sortie du capteur diminue lorsque le débit augmente, le produit entre le débit massique et la variation des températures de l'air aux bornes du capteur devient élevé. Or c'est ce produit qui affecte directement le rendement du capteur. Ces résultats obtenus sont conformes à ceux trouvés par d'autres auteurs Choudhury et Garg[55], Li et.al[53], Gao et .all [59].

Les tests expérimentaux du séchage du kiwi sous convection naturelle et forcée montrent que la durée de séchage du kiwi sous convection forcée est élevée par rapport à la durée sous convection naturelle. Donc c'est le paramètre température de sortie du capteur qui influence plus le processus de séchage que le paramètre débit. L'augmentation de la température de l'air de sortie du capteur qui n'est d'autre que la température d'entrée d'air à la chambre de séchage constitue le paramètre le plus important dans l'opération de séchage puisque elle provoque un pouvoir évaporateur plus important. Ceci entraîne une durée de séchage plus courte. Cela nous amène à choisir le mode de convection naturelle pour notre séchoir qui nous permet d'avoir une température d'air asséchant élevée, un débit convenable et un rendement du capteur de 65%.

Par ailleurs l'étude de l'effet de stockage d'énergie sur le procédé de séchage pendant la nuit a montré que la durée moyenne de chauffage nécessaire est de 5h. D'après les résultats du dimensionnement du système de stockage, la masse d'eau, constituant le fluide caloporteur de stockage, nécessaire pour maintenir la continuité du procédé de séchage est d'environ 22 litres.

L'étude des caractéristiques de séchage des raisins lors du séchage à l'air libre et dans le séchoir solaire indirect muni d'un système de stockage d'énergie solaire nous a permis d'obtenir un ensemble de courbes de séchage. Le processus de séchage a duré 201 h à l'air libre et seulement 120 h dans le séchoir solaire indirect. On a constaté que toutes les courbes ont une allure décroissante et la présence de la phase de ralentissement. Les résultats expérimentaux obtenus ont été ajustés avec dix modèles mathématiques existant dans la littérature. Après le calcul des paramètres statistiques ( $R$ ,  $RMSE$ ,  $\chi^2$ ), on a déduit que le modèle Midilli et al est le plus approprié pour décrire les courbes de séchage pour les deux processus. Le coefficient de diffusion effectif calculé augmente en fonction de la nature du processus de séchage. Autrement dit, il augmente avec l'augmentation de la température.

En vue d'enrichir cette étude de séchage, il serait souhaitable d'obtenir des connaissances des éléments nutritifs, vitamines, propriétés organoleptiques du produit et

leurs évolutions au cours du séchage. De ce fait, une collaboration avec des biologistes et des agronomes est fortement recommandée.

Afin d'optimiser l'opération de séchage et pour ne pas perturber les mécanismes le transfert de chaleur et de masse du produit, les méthodes de mesure et de suivie des masses de l'aliment au cours de séchage devront être de préférence automatisées et connectées directement au système d'acquisition des données.

---

## Références

- [1] Ouammi, A., Zejli, D., Dagdougui, H., & Benchrifa, R. (2012). Artificial neural network analysis of Moroccan solar potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 4876-4889.
- [2] Ministère de l'Agriculture, de la Pêche Maritime, du Développement Rural et des Eaux et Forêts, (<http://www.agriculture.gov.ma>).
- [3] Tadili, R., & Dahman, A. S. (1997). Effects of a solar heating and climatisation system on agricultural greenhouse microclimate. *Renewable energy*, 10(4), 569-576.
- [4] Bargach, M. N., Tadili, R., Dahman, A. S., & Boukallouch, M. (2004). Comparison of the performance of two solar heating systems used to improve the microclimate of agricultural greenhouses in Morocco. *Renewable energy*, 29(7), 1073-1083.
- [5] Bargach, M. N., Tadili, R., Dahman, A. S., & Boukallouch, M. (2000). Survey of thermal performances of a solar system used for the heating of agricultural greenhouses in Morocco. *Renewable energy*, 20(4), 415-433.
- [6] Bargach, M. N., Dahman, A. S., & Boukallouch, M. (1999). A heating system using flat plate collectors to improve the inside greenhouse microclimate in Morocco. *Renewable Energy*, 18(3), 367-381.
- [7] Amer, B. M. A., Hossain, M. A., & Gottschalk, K. (2010). Design and performance evaluation of a new hybrid solar dryer for banana. *Energy conversion and management*, 51(4), 813-820.
- [8] Dissa, A. O., Bathiebo, J., Kam, S., Savadogo, P. W., Desmorieux, H., & Kouliadiati, J. (2009). Modelling and experimental validation of thin layer indirect solar drying of mango slices. *Renewable energy*, 34(4), 1000-1008.
- [9] Slama, R. B., & Combarous, M. (2011). Study of orange peels dryings kinetics and development of a solar dryer by forced convection. *Solar energy*, 85(3), 570-578.
- [10] Ekechukwu, O. V., & Norton, B. (1999). Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology. *Energy conversion and management*, 40(6), 615-655.
- [11] Téllez, M. C., Figueroa, I. P., Téllez, B. C., Vidaña, E. C. L., & Ortiz, A. L. (2018). Solar drying of Stevia (*Rebaudiana Bertoni*) leaves using direct and indirect technologies. *Solar Energy*, 159, 898-907.
- [12] Anon, R. (1965). How to make a solar cabinet Dryer for Agricultural produce Do it yourself leaflet L6. Brace research Institute, Sainte Annede Bellevue, Canada, 9.
- [13] Grabowski S, Mujumdar AS. Solar-assisted osmotic dehydration. In: MujumdarAS, Suvachittanont S, editors. *Developments in drying vol. 1: food dehydration*. Bangkok: Kasetsart University Press; 2000. p. 142–78.
- [14] Madhlopa, A., Jones, S. A., & Kalenga Saka, J. D. (2002). A solar air heater with composite-absorber systems for food dehydration. *Renewable energy*, 27(1), 27-37.

- [15] Fleming, P. D., Ekechukwu, O. V., Norton, B., & Probert, S. D. (1987). Design, installation, and preliminary testing of a natural circulation solar energy tropical crop dryer. In *Solar drying in Africa: proceedings of a workshop held in Dakar, Senegal, 21-24 July 1986*. IDRC, Ottawa, ON, CA.
- [16] Norton, B., Fleming, P. D., & Ekechukwu, O. V. (1987). Passive autarkic solar drying techniques. In *Physics and Technology of Solar Energy* (pp. 447-466). Springer, Dordrecht.
- [17] FLEMING, P. D., NORTON, B., EKECHUKWU, O. V., et al. A large-scale facility for experimental studies of natural-circulation solar-energy tropical crop dryers. In : *Proc Int Drying Symp (Drying'86)*. Cambridge, Mass., USA, Hemisphere Pub Coy Washington. 1986. p. 685-93.
- [18] Prasad, J., Vijay, V. K., Tiwari, G. N., & Sorayan, V. P. S. (2006). Study on performance evaluation of hybrid drier for turmeric (*Curcuma longa* L.) drying at village scale. *Journal of Food Engineering*, 75(4), 497-502.
- [19] Rosen, H. N. (1995). Chapter 29. *Handbook of industrial drying. Drying of wood and wood products*. NY.
- [20] Gustafsson, S. I. (2000). Optimization of drying kiln operation. *International journal of energy research*, 24(1), 19-26.
- [21] Johansson, L., & Westerlund, L. (2000). An open absorption system installed at a sawmill: description of pilot plant used for timber and bio-fuel drying. *Energy*, 25(11), 1067-1079.
- [22] KEEY, Roger Brian. *Drying: principles and practice*. Elsevier, 2013.
- [23] Lockington, D. A., Parlange, J. Y., Barry, D. A., & Leech, C. A. (2003). Drying of porous building materials: hydraulic diffusivity and front propagation. *Materials and Structures*, 36(7), 448-452.
- [24] Shakir, A. A., & Mohammed, A. A. (2013). Manufacturing of Bricks in the Past, in the Present and in the Future: A state of the Art Review. *International Journal of Advances in Applied Sciences*, 2(3), 145-156.
- [25] Musielak, G., & Mierzwa, D. (2009). Permanent strains in clay-like material during drying. *Drying Technology*, 27(7-8), 894-902.
- [26] Mačiulaitis, R., & Malaiškiene, J. (2009). The regulation of structural parameters of ceramics depending on the drying regime. *Journal of Civil Engineering and Management*, 15(2), 197-204.
- [27] Pirasteh, G., Saidur, R., Rahman, S. M. A., & Rahim, N. A. (2014). A review on development of solar drying applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 133-148.
- [28] Hajizadeh K, Toriki F, Hajiaghameemar M, Masaeli H. Clay brick industry in Iran. In: *Proceedings of the 6th international energy congress, Isfahan; 2007*.
- [29] Abou-Ziyan, H. Z. (2004). Convective heat transfer from different brick arrangements in tunnel kilns. *Applied Thermal Engineering*, 24(2-3), 171-191.
- [30] Oba, R., Possamai, T. S., & Nicolau, V. P. (2014). Thermal analysis of a tunnel kiln used to produce roof tiles. *Applied Thermal Engineering*, 63(1), 59-65.
- [31] Mancuhan, E., Kucukada, K., & Alpman, E. (2011). Mathematical modeling and simulation of the preheating zone of a tunnel kiln. *J. Therm. Sci. Technol*, 31(2), 79-86.
- [32] Mançuhan, E. (2009). Analysis and optimization of drying of green bricks in a tunnel dryer. *Drying Technology*, 27(5), 707-713.

- [33] Mancuhan, E., & Kucukada, K. (2006). Optimization of fuel and air use in a tunnel kiln to produce coal admixed bricks. *Applied Thermal Engineering*, 26(14-15), 1556-1563.
- [34] da Silva Almeida, G., da Silva, J. B., e Silva, C. J., Swarnakar, R., de Araújo Neves, G., & de Lima, A. G. B. (2013). Heat and mass transport in an industrial tunnel dryer: modeling and simulation applied to hollow bricks. *Applied Thermal Engineering*, 55(1-2), 78-86.
- [35] Büyükkakın, M. K., & Öztuna, S. (2014). Effective Parameters of Solar Water Heating System on Ceramic Drying. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 555, pp. 440-445). Trans Tech Publications.
- [36] Büyükkakın, M. K., Öztuna, S., & Demir, H. (2017). Design and thermodynamic analysis of a solar-assisted cini ceramic drying system. *Renewable Energy*, 111, 147-156.
- [37] BONAZZI, C., & BIMBENET, J. J. (2003). Séchage des produits alimentaires Principes. *Techniques de l'ingénieur. Agroalimentaire*, 2(F3000), F3000-1.
- [38] Sharma, A., Chen, C. R., & Lan, N. V. (2009). Solar-energy drying systems: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(6-7), 1185-1210.
- [39] Ezeike, G. O. I. (1986). Development and performance of a triple-pass solar collector and dryer system. *Energy in agriculture*, 5(1), 1-20.
- [40] El-Sebaili, A. A., Aboul-Enein, S., Ramadan, M. R. I., & El-Gohary, H. G. (2002). Experimental investigation of an indirect type natural convection solar dryer. *Energy Conversion and Management*, 43(16), 2251-2266.
- [41] Singh, S., Singh, P. P., & Dhaliwal, S. S. (2004). Multi-shelf portable solar dryer. *Renewable energy*, 29(5), 753-765.
- [42] Oosthuizen, P. H. (1996). An experimental study of simulated indirect solar rice dryer fitted with a small fan. *Journal of Engineering for International Development*, 3(1), 22-29.
- [43] Ruslan, M. H., Fudholi, A., Othman, M. Y., Azmi, M. M., Yahya, M., Zaharim, A., & Sopian, K. (2011, October). The double-pass solar dryer for drying palm oil fronds. In *Proc. of the 10th WSEAS Int. Conf. on system science and simulation in engineering (ICOSSSE'11)* (Vol. 2011, pp. 143-49).
- [44] Shanmugam, V., & Natarajan, E. (2007). Experimental study of regenerative desiccant integrated solar dryer with and without reflective mirror. *Applied Thermal Engineering*, 27(8-9), 1543-1551.
- [45] Lahsasni, S., Kouhila, M., Mahrouz, M., & Jaouhari, J. T. (2004). Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*). *Journal of Food Engineering*, 61(2), 173-179.
- [46] Schittich, C. (2001). *Construire en verre*. PPUR presses polytechniques.
- [47] Serge ETIENNE, *Les verres à couches*, 2<sup>ème</sup> partie, 2009.
- [48] Spitz, J., Aubert, A., Behaghel, J. M., Berthier, S., Lafait, J., & Rivory, J. (1979). Matériaux sélectifs pour la conversion photothermique de l'énergie solaire. *Revue de physique appliquée*, 14(1), 67-80.
- [49] Henninger, J. H. (1984). *Solar Absorptance and Thermal Emittance of Some Common Spacecraft Thermal-Control Coatings* (No. NASA-RP240400-1121). NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION WASHINGTON DC.

- [50] Philippe Marty, COURS DE TRANSFERTS THERMIQUES Conduction et rayonnement, 2012-2013.
- [51] Maraba, G. (2012). An experimental study on enhancement of heat transfer in a solar air heater collector by using porous medium (Master's thesis, Izmir Institute of Technology).
- [52] Youcef-Ali, S. (2005). Study and optimization of the thermal performances of the offset rectangular plate fin absorber plates, with various glazing. *Renewable Energy*, 30(2), 271-280.
- [53] Li, S., Wang, H., Meng, X., & Wei, X. (2017). Comparative study on the performance of a new solar air collector with different surface shapes. *Applied Thermal Engineering*, 114, 639-644.
- [54] Esen, H. (2008). Experimental energy and exergy analysis of a double-flow solar air heater having different obstacles on absorber plates. *Building and Environment*, 43(6), 1046-1054.
- [55] Choudhury, C., Andersen, S. L., & Rekstad, J. (1988). A solar air heater for low temperature applications. *Solar Energy*, 40(4), 335-343.
- [56] Aldabbagh, L. B. Y., Egelioglu, F., & İlkan, M. (2010). Single and double pass solar air heaters with wire mesh as packing bed. *Energy*, 35(9), 3783-3787.
- [57] Dejchanchaiwong, R., Arkasuwan, A., Kumar, A., & Tekasakul, P. (2016). Mathematical modeling and performance investigation of mixed-mode and indirect solar dryers for natural rubber sheet drying. *Energy for Sustainable Development*, 34, 44-53.
- [58] Essalhi, H., Tadili, R., & Bargach, M. N. (2018). Comparison of Thermal Performance Between Two Solar Air Collectors for an Indirect Solar Dryer. *Journal of Physical Science*, 29(3), 55-65.
- [59] Gao, W., Lin, W., Liu, T., & Xia, C. (2007). Analytical and experimental studies on the thermal performance of cross-corrugated and flat-plate solar air heaters. *Applied Energy*, 84(4), 425-441.
- [60] Sharma, A., & Sharma, N. (2012). Construction and performance analysis of an indirect solar dryer integrated with solar air heater. *Procedia engineering*, 38, 3260-3269.
- [61] Hajar, Essalhi, Tadili Rachid, and Bargach Mohammed Najib. "Conception of a Solar Air Collector for an Indirect Solar Dryer. Pear Drying Test." *Energy Procedia* 141 (2017): 29-33.
- [62] Lingayat, A., Chandramohan, V. P., & Raju, V. R. K. (2017). Design, development and performance of indirect type solar dryer for banana drying. *Energy Procedia*, 109, 409-416.
- [63] Banout, J., & Ehl, P. (2010). Using a Double-pass solar drier for drying of bamboo shoots. *Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics (JARTS)*, 111(2), 119-127.
- [64] Hossain, M. A., & Bala, B. K. (2007). Drying of hot chilli using solar tunnel drier. *Solar Energy*, 81(1), 85-92.
- [65] Fudholi, A., Ruslan, M. H., Ngatiman, M. F., Azmi, M. S., Azran, Z., Othman, M. Y., & Sopian, K. (2012). Performance of solar drying for solar drying with rotating rack for Malaysian red chili (chili Bangi). In *Proc. of the 10th WSEAS Int. Conf. on environment, ecosystem and development (EED'12)* (pp. 132-37).
- [66] Fudholi, A., Sopian, K., Othman, M. Y., & Ruslan, M. H. (2014). Energy and exergy analyses of solar drying system of red seaweed. *Energy and Buildings*, 68, 121-129.

- [67] Tarigan, E., & Tekasakul, P. (2005, November). A mixed-mode natural convection solar dryer with biomass burner and heat storage back-up heater. In Proceedings of the Australia and New Zealand Solar Energy Society Annual Conference (pp. 1-9).
- [68] Khartchenko NV. Advanced energy systems. Berlin: Institute of Energy Engineering & Technology University; 1997.
- [69] Bal, L. M., Satya, S., & Naik, S. N. (2010). Solar dryer with thermal energy storage systems for drying agricultural food products: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(8), 2298-2314.
- [70] Lane, G. A. (1983). Solar heat storage: latent heat materials.
- [71] Sharma, A., & Tyagi, W. (2009). Chen Cr., Buddhi D.: Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable energy reviews*, 13(2), 318-45.
- [72] Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2018). A comprehensive review of thermal energy storage. *Sustainability*, 10(1), 191.
- [73] Hailu, G., Hayes, P., & Masteller, M. (2017). Seasonal solar thermal energy sand-bed storage in a region with extended freezing periods: Part I experimental investigation. *Energies*, 10(11), 1873.
- [74] Shah, Y. T. (2018). Thermal energy: sources, recovery, and applications. CRC Press.
- [75] Dincer, I. (2002). On thermal energy storage systems and applications in buildings. *Energy and buildings*, 34(4), 377-388.
- [76] Nuckols, M. L. (1999). Analytical modeling of a diver dry suit enhanced with micro-encapsulated phase change materials. *Ocean Engineering*, 26(6), 547-564.
- [77] ELkhadraoui, A., Kooli, S., Hamdi, I., & Farhat, A. (2015). Experimental investigation and economic evaluation of a new mixed-mode solar greenhouse dryer for drying of red pepper and grape. *Renewable energy*, 77, 1-8.
- [78] Kaya, A., Aydın, O., & Demirtaş, C. (2009). Experimental and theoretical analysis of drying carrots. *Desalination*, 237(1-3), 285-295.
- [79] Çağlar, A., Toğrul, İ. T., & Toğrul, H. (2009). Moisture and thermal diffusivity of seedless grape under infrared drying. *Food and Bioprocess Technology*, 87(4), 292-300.
- [80] Bingol, G., Roberts, J. S., Balaban, M. O., & Devres, Y. O. (2012). Effect of dipping temperature and dipping time on drying rate and color change of grapes. *Drying Technology*, 30(6), 597-606.
- [81] Çakmak, G., & Yıldız, C. (2011). The drying kinetics of seeded grape in solar dryer with PCM-based solar integrated collector. *Food and bioprocess processing*, 89(2), 103-108.
- [82] Koua, K. B., Fassinou, W. F., Gbaha, P., & Toure, S. (2009). Mathematical modelling of the thin layer solar drying of banana, mango and cassava. *Energy*, 34(10), 1594-1602.
- [83] Toğrul, İ. T., & Pehlivan, D. (2004). Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. *Journal of Food Engineering*, 65(3), 413-425.
- [84] El Hisse, M. (1987). Modélisation, identification et simulation d'un séchoir solaire agro-alimentaire (Doctoral dissertation, Perpignan).

- [85] G. Lewis & M. Randall, 1923, *Thermodynamics*, New-York, Addition-Wesley Publishing Company.
- [86] Scott, W. J. (1957). Water relations of food spoilage microorganisms. In *Advances in food research* (Vol. 7, pp. 83-127). Academic Press.
- [87] Loncin, M. (1961). Les opérations unitaires du génie chimique (No. 660 L6).
- [88] Akpınar, E. K. (2008). Mathematical modelling and experimental investigation on sun and solar drying of white mulberry. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 22(8), 1544-1553.
- [89] Diamante, L. M., & Munro, P. A. (1993). Mathematical modelling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. *Solar energy*, 51(4), 271-276.
- [90] Doymaz, I. (2005). Sun drying of figs: an experimental study. *Journal of Food Engineering*, 71(4), 403-407.
- [91] Kingsly, R. P., Goyal, R. K., Manikantan, M. R., & Ilyas, S. M. (2007). Effects of pretreatments and drying air temperature on drying behaviour of peach slice. *International journal of food science & technology*, 42(1), 65-69.
- [92] Pala, M., Saygi, Y. B., & Sadikoglu, H. (1993). Study on the drying of sultana grapes by different techniques and effective parameters. *Developments in food science*.
- [93] Yaldiz, O., Ertekin, C., & Uzun, H. I. (2001). Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. *Energy*, 26(5), 457-465.
- [94] Fortes, M., & Okos, M. R. (1981). Non-equilibrium thermodynamics approach to heat and mass transfer in corn kernels. *Transactions of the ASAE*, 24(3), 761-0769.
- [95] Whitaker, T., Barre, H. J., & Hamdy, M. Y. (1969). Theoretical and experimental studies of diffusion in spherical bodies with a variable diffusion coefficient. *Transactions of the ASAE*, 12(5), 668-0672.
- [96] Lewis, W. K. (1921). The rate of drying of solid materials. *Industrial & Engineering Chemistry*, 13(5), 427-432.
- [97] Hendorson, S. M. (1961). Grain Drying Theory (I) Temperature Effect on Drying Coefficient. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 6(3), 169-174.
- [98] Watson, E. L., & Bhargava, V. K. (1974). Thin-layer drying studies on wheat. *Canadian Agricultural Engineering*.
- [99] Moss, J. R., & Otten, L. (1989). A relationship between colour development and moisture content during roasting of peanuts. *Canadian Institute of food science and technology journal*, 22(1), 34-39.
- [100] Madamba, P. S., Driscoll, R. H., & Buckle, K. A. (1996). The thin-layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of food engineering*, 29(1), 75-97.
- [101] Page, G. E. (1949). Factors Influencing the Maximum Rates of Air Drying Shelled Corn in Thin layers.
- [102] Wang, G. Y., & Singh, R. P. (1978). SINGLE LAYER DRYING EQUATION FOR ROUGH RICE. Paper-American Society of Agricultural Engineers.

- [103] Agrawal, Y. C., & Singh, R. P. (1978). Thin-layer drying studies on short-grain rough rice. Paper-American Society of Agricultural Engineers.
- [104] Bruce, D. M. (1985). Exposed-layer barley drying: three models fitted to new data up to 150 C. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 32(4), 337-348.
- [105] Overhults, D. G., White, G. M., Hamilton, H. E., & Ross, I. J. (1973). Drying soybeans with heated air. *Transactions of the ASAE*, 16(1), 112.
- [106] Chandra, P. K., & Singh, R. P. (2017). *Applied numerical methods for food and agricultural engineers*. CRC Press.
- [107] Henderson, S. M. (1974). Progress in developing the thin layer drying equation. *Transactions of the ASAE*, 17(6), 1167-1168.
- [108] Sharaf-Eldeen, Y. I., Blaisdell, J. L., & Hamdy, M. Y. (1980). A model for ear corn drying. *Transactions of the ASAE*, 5(4), 1261-1265.
- [109] Verma, L. R., Bucklin, R. A., Endan, J. B., & Wratten, F. T. (1985). Effects of drying air parameters on rice drying models. *Transactions of the ASAE*, 28(1), 296-0301.
- [110] Kassem, A. S. (1998, February). Comparative studies on thin layer drying models for wheat. In 13th international congress on agricultural engineering (Vol. 6, pp. 2-6).
- [111] Midilli, A., Kucuk, H., & Yapar, Z. (2002). A new model for single-layer drying. *Drying technology*, 20(7), 1503-1513.
- [112] Yagcioglu, A. D. A. C. F. (1999). Drying characteristic of laurel leaves under different conditions. In *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International congress on agricultural mechanization and energy*, 1999 (pp. 565-569). Faculty of Agriculture, Cukurova University.
- [113] Lahsasni, S., Kouhila, M., Mahrouz, M., Idlimam, A., & Jamali, A. (2004). Thin layer convective solar drying and mathematical modeling of prickly pear peel (*Opuntia ficus indica*). *Energy*, 29(2), 211-224.
- [114] Lahsasni, S., Kouhila, M., Mahrouz, M., & Jaouhari, J. T. (2004). Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*). *Journal of Food Engineering*, 61(2), 173-179.
- [115] Simal, S., Femenia, A., Cárcel, J. A., & Rosselló, C. (2005). Mathematical modelling of the drying curves of kiwi fruits: influence of the ripening stage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(3), 425-432.
- [116] Ayensu, A. (1997). Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow. *Solar energy*, 59(4-6), 121-126.
- [117] Vega-Gálvez, A., Lemus-Mondaca, R., Tello-Ireland, C., Miranda, M., & Yagnam, F. (2009). Kinetic study of convective drying of blueberry variety O'Neil (*Vaccinium corymbosum* L.). *Chilean Journal of Agricultural Research*, 69(2), 171-178.
- [118] Midilli, A., & Kucuk, H. (2003). Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy. *Energy conversion and Management*, 44(7), 1111-1122.
- [119] Bingol, G., Pan, Z., Roberts, J. S., Devres, Y. O., & Balaban, M. O. (2008). Mathematical modeling of microwave-assisted convective heating and drying of grapes. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 1(2), 46-54.

- [120] Boughali, S., Benmoussa, H., Bouchekima, B., Mennouche, D., Bouguettaia, H., & Bechki, D. (2009). Crop drying by indirect active hybrid solar–Electrical dryer in the eastern Algerian Septentrional Sahara. *Solar energy*, 83(12), 2223-2232.
- [121] Sharma, G. P., & Prasad, S. (2004). Effective moisture diffusivity of garlic cloves undergoing microwave-convective drying. *Journal of Food Engineering*, 65(4), 609-617.
- [122] Toğrul, İ. T., & Pehlivan, D. (2002). Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers. *Journal of Food Engineering*, 55(3), 209-216.
- [123] Ertekin, C., & Yaldiz, O. (2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of food engineering*, 63(3), 349-359.
- [124] Akpınar, E. K., Bicer, Y., & Yildiz, C. (2003). Thin layer drying of red pepper. *Journal of food engineering*, 59(1), 99-104.
- [125] Gunhan, T., Demir, V., Hancıoğlu, E., & Hepbaslı, A. (2005). Mathematical modelling of drying of bay leaves. *Energy Conversion and Management*, 46(11-12), 1667-1679.
- [126] Doymaz, İ. (2004). Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *Journal of food engineering*, 61(3), 359-364.
- [127] Panchariya, P. C., Popovic, D., & Sharma, A. L. (2002). Thin-layer modelling of black tea drying process. *Journal of food engineering*, 52(4), 349-357.
- [128] Fick, A. (1855). Ueber diffusion. *Annalen der Physik*, 170(1), 59-86.
- [129] Crank, J. (1975). *The Mathematics of Diffusion*, 2nd edn Clarendon Press.
- [130] Tütüncü, M. A., & Labuza, T. P. (1996). Effect of geometry on the effective moisture transfer diffusion coefficient. *Journal of Food Engineering*, 30(3-4), 433-447.
- [131] Doymaz, İ., & Pala, M. (2002). The effects of dipping pretreatments on air-drying rates of the seedless grapes. *Journal of Food Engineering*, 52(4), 413-417.
- [132] Akbulut, A., & Durmuş, A. (2009). Thin layer solar drying and mathematical modeling of mulberry. *International journal of energy research*, 33(7), 687-695.
- [133] Xiao, H. W., Pang, C. L., Wang, L. H., Bai, J. W., Yang, W. X., & Gao, Z. J. (2010). Drying kinetics and quality of Monukka seedless grapes dried in an air-impingement jet dryer. *Biosystems Engineering*, 105(2), 233-240.
- [134] Pahlavanzadeh, H., Basiri, A., & Zarrabi, M. (2001). Determination of parameters and pretreatment solution for grape drying. *Drying technology*, 19(1), 217-226.
- [135] Raouzeos, G. S., & Saravacos, G. D. (1986). Solar drying of raisins. *Drying Technology*, 4(4), 633-649.
- [136] İsmail, O., Keyf, S., Beyribey, B., & ÇORBACIOĞLU, B. (2008). Effects of dipping solutions on air-drying rates of the seedless grapes. *Food science and technology research*, 14(6), 547-547.
- [137] Doymaz, İ. (2012). Sun drying of seedless and seeded grapes. *Journal of food science and technology*, 49(2), 214-220.
- [138] Essalhi, H., Benchrifa, M., Tadili, R., & Bargach, M. N. (2018). Experimental and theoretical analysis of drying grapes under an indirect solar dryer and in open sun. *Innovative food science & emerging technologies*, 49, 58-64.

## Annexes

### Annexe 1 : Temps solaire vrai TSV

#### Temps solaire vrai TSV

Il permet de connaître la position du soleil dans la journée. On l'exprime en fonction du temps solaire moyen et en tenant compte de la correction de l'équation du temps :

$$\text{TSV} = \text{TSM} + \text{Et} = \text{TL} - \text{C}_1 + \text{C}_2 + \text{C}_3 + \text{Et}$$

Temps légal TL : C'est le temps des montres, il dépend du pays.

Temps universel TU : C'est le temps au méridien de Greenwich.

Correction de saison C1 :

Au Maroc :

- pendant l'hiver, TL correspond à TU, on a  $C_1=0$  :  $TU = TL$
- pendant l'été, le temps légal est avancé d'une heure par rapport à TU

$$C_1 = 1 : TU = TL - 1$$

Correction du fuseau horaire : un fuseau horaire est une zone sur la terre comprise entre deux méridiens distants de  $15^\circ$  de longitude. Le fuseau horaire origine s'étend de part et d'autre du méridien de Greenwich entre  $7.5^\circ$  de longitude Ouest et  $7.5^\circ$  de longitude Est. La terre est subdivisée en 24 fuseaux.

$$TU = TL - C_1 + C_2$$

La correction  $C_2$  qui tient compte du fuseau horaire est un entier exprimé en heure, positif vers l'est, négatif vers l'ouest.

Exemples : Au Maroc Rabat  $L= 6.77^\circ\text{W} \rightarrow C_2 = 0$

Algérie, Lybie et Tunisie  $C_2 = +1\text{h}$ , Egypte  $C_2 = +2\text{h}$ , Arabie Saoudite  $C_2 = +3\text{h}$

France :  $C_2 = +1h$ , Russie :  $C_2 = +12h$ , USA :  $C_2 = - 9h$

Temps solaire moyen :

Pour un site donné, lorsqu'on tient compte de la correction de longitude dans le temps universel on obtient le temps solaire moyen.

$C_3$  : correction de longitude : deux points de la surface de la terre séparés par  $1^\circ$  de longitude voient passer le soleil à leur méridien avec 4 min de différence.

→  $C_3 = + 4mn /^\circ$  de longitude Est

$C_3 = - 4mn /^\circ$  de longitude Ouest

La correction Et peut être calculé par la formule :

$$Et = 9,9 \sin (2(0,986 j + 100)) - 7,7 \sin (0,986 j - 2)$$

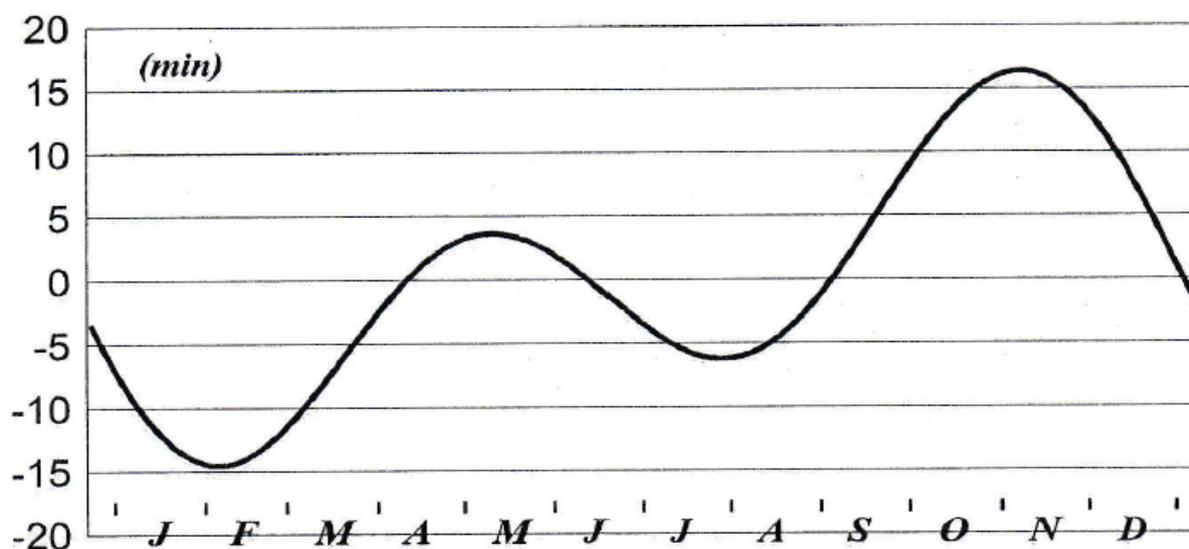


Figure-: Variation de l'équation du temps au cours d'une année

Annexe 2 : Les instruments de mesures



Pyranomètre Kipp and Zonen S LITE



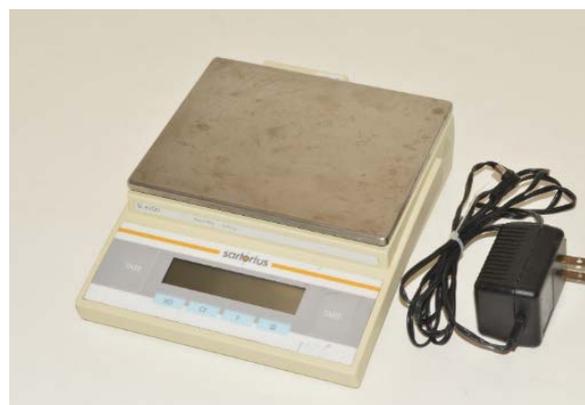
Sonde HMP45AC



L'abri à ventilation naturelle



Anémomètre à hélice testo



Balance Sartorius (modèle BL1500S)