

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعلیم العالی و البعث العلمی

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

En : Génie Mécanique

**Spécialité : Energie
Renouvelable en Mécanique**

Par :

M. BARKA Lakhdar

Mlle. MERAHI Djihane

Sujet

**Étude comparative entre les différentes techniques de séchage
solaire des feuilles de menthe**

Soutenu publiquement, le / 06 / 2022, devant le jury composé de :

M.AZZI Ahmed	Pr	Université de Tlemcen	Président
M.SELADJI Chakib	Pr	Université de Tlemcen	Examineur
Mme. KHALDI Souheyla	MCB	Université de Tlemcen	Encadrant
M. KORTI Abdelillah Nabil	Pr	Université de Tlemcen	Co-Encadrant

Année universitaire : 2021 /2022

Dédicace

De la part de BARKA LAKHDAR

*Un grand remerciement pour mes chers parents, qui Je n'oublierai jamais
leurs sacrifices et leur soutien*

A mes grands parents

A mon oncle, ABDERRAHMEN qui ma aider et encourager tout le temps

A ma famille BARKA, mes frères, mes sœurs, mes cousins

A tous mes amis de ma promotion ER qui mon aider à réussir ce mémoire

A tous ceux qui me connaissent de près ou de loin.

Dédicace

Merci Dieu le tous miséricordieux, ton amour et tes grâces à mon égard m'ont donné à persévérance et le courage pour accomplir ce travail.

Je dédie ce modeste travail

A mes chers parents, Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être Je vous remercie pour tous le soutien et l'amour que vous me porter depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours. Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices .puisse dieu le très haut vous accorder santé, bonheur et longue vie.

A mes tantes, Que ce modeste travail, soit l'expression des vœux que vous n'avez cessé de formuler dans vos prières. Que Dieu vous préserve santé et longue vie.

A mes sœurs et mon frère, que Dieu vous accorde chance, bonheur et réussite

Remerciement

Nous adressons nos plus sincères sentiments de reconnaissance et de remerciement envers LE BON DIEU, le clément et le miséricordieux le quel nous a accordé la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Nous remercions vivement et chaleureusement à Dr. KHALDI SOUHEILA encadrant et à Pr. KORTI ABDEL ILLAH NABIL Co- encadrant de ce mémoire, pour nos avoir soutenus et guidé tout au long de ce mémoire. Nous les remercions particulièrement pour la confiance qu'ils nous ont accordée, pour leur rigueur scientifique, pour leur patience et pour leurs conseils judicieux qui ont contribué à la réalisation et à l'accomplissement de ce travail.

Nous remercions également Dr. MEDIANI.AHMED et Mme. BELGACEMZOHRA pour leurs temps et leurs efforts tout au long de la période de notre stage

Nous remercions également, les responsables de l'URERMS et les ingénieurs de labo de séchage TIGANI CHERIF ET DJABER ABDELKRIM.

Nous remercions aussi Dr. MOUNGAR HOUSSINE pour les conseils qu'il nous a donné.

Nous remercions monsieur Dr. AZZI AHMED d'accepter de présider la commission de jury. On remercie aussi Pr. SELADJI CHAKIB d'examiner notre travail et le mettre en valeur.

Nous remercions tout ce qui nous a aidés de loin ou de près pour réussir ce travail.

Résumé

Le séchage est un procédé de conservation des produits agroalimentaires et des plantes aromatiques et médicinales. Il existe plusieurs types de séchage selon la nature du produit à sécher. Pour les plantes aromatiques qui admettent une teneur en eau élevée, le séchage à basse température comme le séchage solaire se présente comme une solution adéquate, économe en énergie et respectueuse de l'environnement. Elle ne détériore pas le produit et elle conserve les arômes et les huiles essentielles. Afin d'étudier et d'améliorer le procédé de séchage solaire des plantes aromatiques, on a réalisé dans ce travail une étude expérimentale de séchage de feuilles de menthe verte à l'air libre et par l'intermédiaire d'un séchoir solaire indirect et direct à convection forcée, fabriqué à (URER.MS). Cette étude, nous a permis de déterminer le comportement thermique des trois procédés de séchages (direct, indirect, l'air libre) et la cinétique de séchage du produit, aussi l'influence de types de séchoir sur la durée de séchage.

Mots clés

Séchage solaire, menthe verte, séchoir direct, séchoir indirect, séchage à l'air libre, cinétique de séchage.

Abstract

Drying is a conservation process for food products and aromatic and medicinal plants. There are several types of drying process depending on the nature of the product to be dried. For the aromatic plants which admit a high level of water content, the drying at low temperature like the solar drying appears as an adequate solution, it is economic in energy, and respectful to the environment. It does not deteriorate the product and preserves the aromas and essential oils. To study and improve the process of solar drying of aromatic plants, an experimental study was conducted for the drying of green mint leaves through three solar drying processes: direct, indirect, and open air drying. The solar dryer used is designed, manufactured and tested at the research unit URER-MS in Adrar, Algeria. This study allowed us to analyze the thermal behavior of the three drying processes and the drying kinetics of the product.

Keywords

Solar drying, green mint, direct dryer, indirect dryer, open air drying, drying kinetics.

المخلص

التجفيف هو عملية للحفاظ على المنتجات الغذائية والنباتات العطرية والطبية. هناك عدة أنواع من التجفيف حسب طبيعة المنتج المراد تجفيفه. بالنسبة للنباتات العطرية التي تحتوي على نسبة عالية من الماء فإن التجفيف يكون في درجات حرارة منخفضة، مثل التجفيف الشمسي، يقدم على أنه حل مناسب وموفر للطاقة وصديق للبيئة. لا يفسد المنتج ويحافظ على الروائح والزيوت الأساسية. لدراسة وتحسين عملية التجفيف الشمسي للنباتات العطرية، قمنا بتنفيذ هذا العمل، وهو دراسة تجريبية لتجفيف أوراق النعناع بواسطة الهواء الطلق ومجفف شمسي غير مباشر ومباشر، تم تصنيعه في وحدة أبحاث الطاقات المتجددة في البيئة الصحراوية (URER.MS) سمحت لنا هذه الدراسة بتحليل السلوك الحراري لعمليات التجفيف الثلاث وحركية التجفيف للمنتج.

الكلمات المفتاحية:

التجفيف الشمسي، النعناع الأخضر، التجفيف المباشر، التجفيف غير المباشر، التجفيف بالهواء الطلق، حركية التجفيف.

Table des matières

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

CHAPITRE I: INTRODUCTION AU SECHAGE SOLAIRE

I.1. Introduction.....	4
I.2. Généralités sur le séchage.....	4
I.2.1. Définition.....	4
I.2.2. Terminologie de séchage	5
I.3. Différents modes de séchage.....	8
I.4. Le mécanisme de séchage par entrainement (convection)	9
I.5. Les trois phases de séchage	11
I.6. Les paramètres influents sur la cinétique de séchage.....	12
I.12.1. Influence de la température de l'air de séchage (T_a) :.....	13
I.12.2. Influence de l'humidité de l'air de séchage(H_r) :	13
I.12.3. Influence de la vitesse de l'air de séchage (V_a):	13
I.12.4. Influence de taux de recyclage de l'air de séchage :	13
I.7. Types de modifications de la qualité du produit à sécher :	13
I.8. Séchage traditionnel	14
I.9. Le séchage solaire	14
I.10. Le séchoir solaire	15

I.11. Principe de fonctionnement du séchoir solaire	15
I.12. Classification des séchoirs solaires	16
I.12.1. Les séchoirs solaires directs.....	17
I.12.2. Séchoir solaire indirect	18
I.12.3. Le séchoir solaire mixte.....	19
I.12.4. Séchoir solaire hybride	20
I.13. La menthe	21
I.13.1. Les types de la menthe [13]	22
I.13.2. Objectif de séchage de la menthe.....	23

CHAPITRE II : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

II.1. Introduction	25
II.2. L'amélioration des performances du capteur solaire.....	25
II.3. L'intégration du stockage thermique.....	26
II.4. L'utilisation d'un ventilateur.....	30
II.5. L'utilisation d'une cheminée.....	33
II.1. Conclusion.....	35

CHAPITRE III: ETUDE EXPERIMENTALE DE SECHAGE DE LA MENTHE

III.1. Introduction	37
III.2. Materiel et méthodes.....	37
III.2.1 Position du problème.....	37
III.3. Protocole expérimentale	40
III.3.1 Les instruments de mesure expérimentale :	40
III.4. L'emplacement des thermocouples dans les séchoirs.....	43
a. Séchoir direct	43
b. Séchoir indirect	44
III.5. Conditions climatiques.....	44

a) Rayonnement solaire..... 44
3.1 b) Température ambiante 45

CHAPITRE IV : Résultats et interprétations

IV.1. Introduction47
IV.2. Comportement thermique des deux séchoirs solaires.....47
 IV.2.1. Séchoir solaire indirect 47
 IV.2.2. Séchoir solaire direct 49
IV.3. Cinétique du séchage solaire de la menthe verte50
 IV.3.1. Séchoir solaire direct 51
 IV.3.2. Séchoir solaire indirect 52
 IV.3.3. Séchage à l'air libre 53

Conclusion général.....56

Références bibliographiques

Liste des tableaux

Tableau III. 1: Evolution de masse de menthe pendant le séchage dans le four.....42
Tableau III. 2 : Quantité d'eau dans les trois enchantions dementhe.....43

Liste des figures

CHAPITRE I : Introduction au séchage solaire

FIGURE I. 1: VITESSE DE DETERIORATION DES ALIMENTS EN FONCTION DE L'ACTIVITE DE L'EAU (LABUZA, 1968).	6
FIGURE I. 2: ISOTHERMES DE SORPTION ILLUSTRANT LE PHENOMENE D'HYSTERESIS.	7
FIGURE I. 3:PRESENTATION SCHEMATIQUE D'UN PRODUIT HUMIDE.	10
FIGURE I. 4 : COURBE DE SECHAGE.	11
FIGURE I. 5 : PRINCIPE DE SECHAGE A L'AIR LIBRE.	14
FIGURE I. 6 : CLASSIFICATION DES SECHOIRS SOLAIRE.	16
FIGURE I. 7: DIFFERENTS TYPES DE SECHOIRS SOLAIRES [6].	17
FIGURE I. 8 : SECHOIR SOLAIRE DIRECT [9].	18
FIGURE I. 9 : SECHOIR SOLAIRE INDIRECT.	19
FIGURE I. 10 : SECHOIR SOLAIRE MIXTE.	20
FIGURE I. 11 : SECHOIR SOLAIRE HYBRIDE.	20
FIGURE I. 12 : LA MENTHE.	21

CHAPITRE II : Etude bibliographique

FIGURE II. 1: SCHEMA DU SECHOIR SOLAIRE ACTIF INDIRECT.	25
FIGURE II . 2: GEOMETRIES DES SACS ; A) SAC A PLAQUE PLATE ; B) SAC A PLAQUE PLATE AVEC DES AILETTES PLATES ; C) SAC PLAT AVEC DES AILETTES EN ZIGZAG.	26
FIGURE II . 3: (A) SECHOIR SOLAIRE CONVENTIONNEL, (B) SECHOIR SOLAIRE AVEC ITSD-TSS.	27
FIGURE II. 4: MONTAGE EXPERIMENTAL MISD AVEC UNITE DE STOCKAGE THERMIQUE ET DE SECHAGE.	28
FIGURE II. 5 : SECHOIR SOLAIRE EXPERIMENTE (A) INSTALLATION COMPLETE (B) INTERIEUR DE LA SALLE DE SECHAGE.	29
FIGURE II. 6 : UNE VUE DU SECHOIR SOLAIRE ET DE LA PLAQUE D'ABSORPTION A BOBINE UTILISEES DANS LE COLLECTEUR.	29
FIGURE II. 7 : (A) SECHOIR SOLAIRE DE TYPE INDIRECT DEVELOPPE AU NIT WARANGAL, INDE POUR CONVECTION NATURELLE (B) CONVECTION FORCEE.	30
FIGURE II. 8: A) TENEUR EN EAU, B) TAUX DE SECHAGE.	31
FIGURE II. 9: (A) LE SECHOIR SOLAIRE ETUDIE (B) UN COLLECTEUR SOLAIRE.	31
FIGURE II. 10: SCHEMA D'UN ISD INTEGRE A UN CONDUIT TRAPEZOÏDAL.	32
FIGURE II . 11: REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL.	33
FIGURE II. 12 : LA VUE SCHEMATIQUE DU SECHOIR SOLAIRE UTILISE POUR LA MODELISATION.	34

CHAPITRE III : Etude expérimentale de séchage de la menthe

FIGURE III. 1: SCHEMA DESCRIPTIF DU SECHOIR SOLAIRE INDIRECT ET DIRECT.	38
FIGURE III. 2: VENTILATEUR.	39
FIGURE III. 3: CLAIE A L'AIR LIBRE.	39
FIGURE III. 4: MENTHE VERTE AVANT LE SECHAGE	39
LE RAYONNEMENT SOLAIRE GLOBALE REÇUE SUR LE PLAN DU CAPTEUR EST MESURE EN W/M ² PAR LA STATION DE MESURES METEOROLOGIQUES DE L'URER/MS D'ADRAR AVEC LE PYRANOMETRE KIPP ET ZONEN CM11	40
FIGURE III. 5: PYRANOMETRE KIPP ET ZONEN CM11.	40
FIGURE III. 6: SYSTEME D'ACQUISITION	41
FIGURE III. 7 : SONDE OPUS 208.	41
FIGURE III. 8: BALANCE DE TYPE PIONEER OHAUS.	41

FIGURE III. 9 : SECHAGE DE MENTHE DANS LE FOUR	42
FIGURE III. 10: EMLACEMENT DES THERMOCOUPLES ET LA SONDE DANS LE SECHOIR DIRECT.	43
FIGURE III. 11 : EMLACEMENT DES THERMOCOUPLES ET LA SONDE DANS LE SECHOIR INDIRECT.	44
FIGURE III. 12 : RAYONNEMENT SOLAIRE LE 31/04/2022.	45
FIGURE III. 13 : TEMPERATURE AMBIANTE DE 31 MARS 2022.	45

Chapitre IV : Résultats et interprétations

FIGURE IV. 1 : L'EVOLUTION DES DIFFERENTES TEMPERATURES DANS LE CAPTEUR SOLAIRE	47
FIGURE IV. 2 : COMPARAISON DES TEMPERATURES DE L'AIR A LA SORTIE DE CAPTEUR ET A L'ENTREE DE LA CHAMBRE DE SECHAGE.	48
FIGURE IV. 3 : EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DES DIFFERENTS COMPOSANTS DU SECHOIR DIRECT.	49
FIGURE IV. 4 :EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DE L'AIR SUR LES CLAIES DANS LES SECHOIRS DIRECT, INDIRECT ET A L'AIR LIBRE.....	50
FIGURE IV. 5: EVOLUTION (A) DE L'HUMIDITE D'AIR SUR LA CLAIE ET (B) DE LA MASSE DES MENTHES AVEC SECHAGE DIRECT.....	51
LA FIGURE IV.6 PRESENTE L'EVOLUTION DE L'HUMIDITE D'AIR SUR LA CLAIE ET DE LA MASSE DES MENTHES.	51
FIGURE IV. 7: LA MENTHE APRES LE SECHAGE DANS LE SECHOIR DIRECT.....	52
FIGURE IV. 8: EVOLUTION (A) DE L'HUMIDITE DE L'AIR DANS LA CHAMBRE ET (B) DE LA MASSE DES MENTHES DANS LES DEUX CLAIES AVEC SECHAGE INDIRECT.	52
FIGURE IV. 9 : LA MENTHE APRES LE SECHAGE DANS LES DEUX CALIES DE SECHOIR INDIRECT	53
FIGURE IV. 10: EVOLUTION AU COURS DU TEMPS (A) DE L'HUMIDITE DE L'AIR AU NIVEAU DE LA CLAIE ET (B) DE LA MASSE AVEC SECHAGE A L'AIR LIBRE.	53
FIGURE IV. 11:LA MENTHE APRES LE SECHAGE A L'AIR LIBRE.	54
FIGURE IV. 12: VARIATION DE LA TENEUR EN EAU POUR LES TROIS CAS: SECHAGES DIRECT, INDIRECT ET A L'AIR LIBRE.....	54

Nomenclature

Lettres latines		Unité
X	teneur en eau du produit en base sèche	
X_h	teneur en eau en base humide	%
m_e	masse d'eau	
m_s	matière sèche	(g) Gramme
m	masse du produit	
Aw	l'activité de l'eau	
P	pression de vapeur d'eau au-dessus de la surface	
P_0	pression de vapeur d'eau de l'eau pure	(Pa) pascal
T_{pr}	température des pierres	
$T_{s,cp}$	température à la sortie du capteur	
$T_{e,cp}$	température à l'entrée du capteur	
$T_{a,i}$	température de l'absorbeur	
$T_{v,i}$	température de a vitre	
$T_{e\ ch,i}$	température à l'entrée de a chambre	(C°)degré celsius
$T_{c,i}$	température de l'air sur la claie de séchoir indirect	
T_a	température de l'absorbeur du séchoir direct	
T_v	température de vitre du séchoir direct	
T_c	température de l'air sur la claie dans le séchoir direct	
$T_{e, ch}$	température de l'air à l'entrée de séchoir direct	
$T_{s, ch}$	température à la sortie de chambre de séchage direct	

Introduction Générale

L'utilisation de l'énergie a pris de l'ampleur, et l'exploitation de nouvelles formes d'énergie est devenue une nécessité pour assurer le niveau de vie actuel de l'humanité.

Dans les pays en voie de développement, dont le degré d'ensoleillement est considéré très important tout au long de l'année, le séchage par le biais de l'énergie solaire est une alternative raisonnable.

Le séchage des fruits et légumes est l'une des plus anciennes méthodes de conservation des aliments connues par l'homme, car il a un grand effet sur la qualité des produits secs.

L'objectif majeur dans le séchage des produits agricoles est la réduction de la teneur en humidité à un niveau qui permet le stockage en toute sécurité sur une période prolongée.

Il entraîne également une réduction du poids ainsi que de volume, ce qui réduit l'emballage, le stockage et les frais de transport.

Le choix d'aliment à sécher s'est posé sur la menthe verte (*Mentha viridis*) qui est une plante riche en substances très recherchées appelées huiles essentielles, alcaloïdes, tanins, etc... Cette richesse et cette diversification dans la composition moléculaire de la menthe en font d'elle une plante aromatique et médicinale par excellence. De par ses propriétés toniques, stimulantes digestives et analgésiques, cette plante est très utilisée dans la fabrication pharmaceutique. Sa faveur a permis à cette plante d'entrer dans les domaines de la parfumerie, confiserie et liquoristerie.

L'utilisation de séchoirs solaires aide à maintenir une utilisation optimale pour les produits agricoles (plantes Feuillues la menthe verte dans notre cas).

Cette thèse vise à étudier, expérimentalement le séchage solaire de la menthe
Par trois types (direct, indirect et à l'air libre)

Le document comporte quatre chapitres :

Le premier chapitre présente l'état de l'art sur le séchage solaire comportant une vue générale sur les techniques de séchage solaire des produits agro-alimentaires, les types des séchoirs solaires utilisés ainsi que l'avantage et les inconvénients du séchage solaire.

Le deuxième chapitre est une étude bibliographique sur les recherches effectuées dans le domaine de séchage en particulier le séchoir solaire

Le troisième chapitre : décrit le séchoir solaire qu'on a utilisé dans notre expérience.

Le quatrième chapitre : comprend certains des résultats du séchage du produit choisis. Enfin, il résume la conclusion générale et le contenu de cette étude.

CHAPITRE I

INTRODUCTION AU SECHAGE SOLAIRE

Table des matières

I.1.	Introduction.....	4
I.2.	Généralités sur le séchage.....	4
I.3.	Différents modes de séchage.....	8
I.4.	Le mécanisme de séchage par entrainement (convection).....	9
I.5.	Les trois phases de séchage	11
I.6.	Les paramètres influents sur la cinétique de séchage	12
I.7.	Types de modifications de la qualité du produit à sécher :.....	13
I.8.	Séchage traditionnel	14
I.9.	Le séchage solaire	14
I.10.	Le séchoir solaire	15
I.11.	Principe de fonctionnement du séchoir solaire	15
I.12.	Classification des séchoirs solaires	16
I.13.	La menthe	21

I.1. Introduction

Dès sa découverte, la menthe est utilisée comme une plante médicinale et aromatique. Ses feuilles sont utilisées pour parfumer, infusions du thé et épicer. Après la cueillette, les menthes sont utilisées fraîches ou disséquées le plus souvent. Sécher de la menthe consiste à éliminer une grande partie de l'eau qu'il contient de façon à permettre sa bonne conservation.

Le séchage solaire des menthes se présente comme une solution adéquate et économe en énergie tout en gardant une bonne qualité de produit.

Dans ce chapitre nous allons présenter quelques généralités sur le séchage et le séchage solaire en citant les paramètres essentiels qui gouvernent le phénomène de séchage, les différents théoriques de séchage, les caractéristiques de l'air humide et de solide humide enfin une présentation des différents types de séchoir utilisé.

I.2. Généralités sur le séchage

I.2.1. Définition

Le séchage est défini comme étant l'opération unitaire qui consiste à éliminer totalement, ou partiellement le solvant (très souvent l'eau) contenu à l'intérieur d'un matériau poreux. Dans cette opération ils interviennent deux phénomènes, le transfert d'énergie thermique, de l'environnement vers le liquide à évaporer, et le transfert de masse, de l'intérieur du solide vers sa surface et ensuite vers l'environnement. La vitesse du séchage est directement liée à ces deux modes de transfert.

On peut distinguer divers procédés de séchage :

- Les procédés mécaniques (décantation, filtration et compression centrifugation).
- Les procédés thermiques par élévation de température et diminution de la pression de vapeur de la phase gazeuse, dont l'humidité est extraite par évaporation et diffusion
- Le procédé chimique (par l'utilisation des produits déshydratants, tel que le chlorure de calcium pour extraire l'eau).

I.2.2. Terminologie de séchage

- **Humidité** : ce terme désigne le liquide contenu dans le corps solide, liquide, et devant être éliminé au cours du séchage.
- **Teneur en eau** : appelée aussi degré d'humidité. C'est un paramètre fondamental du séchage. Il s'agit du rapport entre la masse d'eau dans le produit et la masse totale de ce produit, qui est la somme de la masse d'eau et de la masse de matière sèche qu'il contient.

Il ne faut pas confondre la matière sèche m_s , qui est ce qui reste lorsque le produit a perdu la totalité de son eau (obtenue par un long séjour en étuve) et le produit sec, qui est le produit final après séchage et qui contient encore un peu d'eau.

- Tout produit contient de l'eau, on peut donc distinguer dans tout produit de masse totale m :
 - Une masse m_e d'eau
 - La masse restante $m_s = m - m_e$ appelée masse ou matière sèche.

on définit l'humidité ou teneur en eau du produit en base sèche par :

$$X = \frac{m_e}{m_s} \quad (\text{I.1})$$

L'humidité d'un produit peut aussi être définie par la teneur en eau en base humide

$$X_h = \frac{m_s}{m} \quad (\text{I.2})$$

Les deux grandeurs sont liées par les relations :

$$X = \frac{X_h}{1-X_h} \quad (\text{I.3})$$

$$X_h = \frac{X}{1+X} \quad (\text{I.4})$$

On utilise plus souvent la teneur en eau base sèche, lorsque l'on parlera de teneur en eau sans autre précision ils'agira donc de cette dernière

- **L'activité de l'eau**

La conservation et la stabilité des produits alimentaires sont liées à l'**activité de l'eau** "aw". Par exemple, la plupart des bactéries pathogènes se développent à des valeurs d'aw supérieures à 0,91. Par ailleurs, les mouvements d'eau à l'intérieur des aliments composés de couches différentes à l'origine de modifications organoleptiques résultent de l'équilibration des pressions partielles de vapeur d'eau.

A_w est mesurée à l'aide d'un appareil appelé A_w -mètre selon le principe suivant :

L' a_w d'un corps est le rapport entre la pression de vapeur d'eau P au-dessus de la surface de celui-ci et la pression de vapeur d'eau P_o de l'eau pure soit :

$$A_w = \frac{P}{P_o} \quad (I.5)$$

L'activité de l'eau d'un produit est toujours inférieure ou égale à 1. Lorsque l'eau contenue dans un produit a une activité proche de 1, elle s'évapore comme de l'eau pure à l'air libre. Par analogie, on dit que ce produit contient de l'eau libre. C'est le cas de produits organiques très hydratés. Lorsque l'activité de l'eau d'un produit est inférieure à 1, cela signifie que les constituants du produit fixent partiellement l'eau et diminuent ainsi sa capacité à se vaporiser. On parle alors d'eau liée, plus ou moins fixée au produit par absorption.

Un produit alimentaire contient en général dans le même temps plusieurs sortes d'eau : de l'eau libre, des eaux faiblement liées et des eaux fortement liées, ces dernières étant retenues aux molécules de matière sèche par des forces relativement importantes.

Au cours du séchage, c'est d'abord l'eau libre qui va être évaporée, puis l'eau de plus en plus liée. La quantité d'énergie nécessaire pour vaporiser la même quantité d'eau augmente donc au cours du séchage. Le dernier gramme d'eau évaporée coûte beaucoup plus d'énergie que le premier.

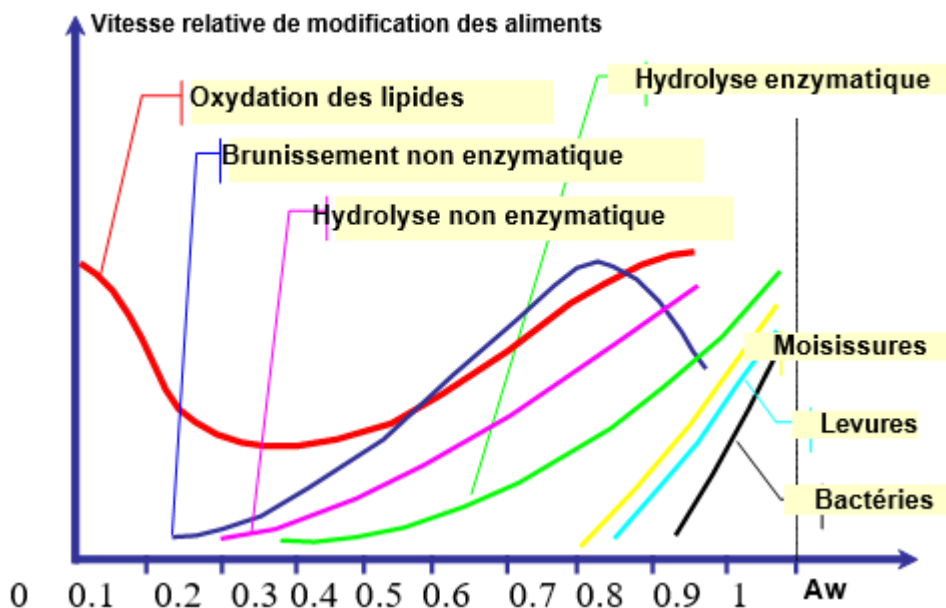


Figure I. 1: Vitesse de détérioration des aliments en fonction de l'activité de l'eau (Labuza, 1968).

• **Isotherme de sorption**

Définition :

L'activité de l'eau A_w dans un produit dépend principalement de sa teneur en eau X et de sa température.

La courbe représentant pour une température donnée la teneur en eau X d'un produit en fonction de la valeur de l'activité de l'eau A_w ou de l'humidité relative de l'air en équilibre HRE est appelée :

- Isothermes d'adsorption si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit sec,
- Isothermes de désorption si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit saturé en eau.

La figure 2.1.2 montre que les deux courbes sont en général différentes car le séchage d'un produit (passage de $A_w = 1$ à $A_w = 0,6$) entraîne des modifications de structure et de porosité. Il y a un phénomène d'hystérésis.

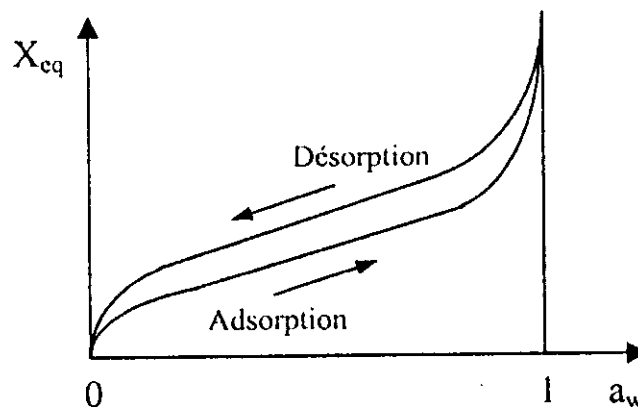


Figure I. 2: Isothermes de sorption illustrant le phénomène d'hystérésis.

Forme générale des isothermes

Les isothermes d'adsorption/désorption présentent en général trois zones (Figure I. 2).

Chaque zone correspond à un mode de fixation particulier de l'eau sur le produit :

- Zone 1 : Constitution d'une monocouche moléculaire à la surface du produit.

Elle est caractéristique de l'action des forces de Van Der Waals entre les groupements hydrophiles et les molécules d'eau. L'adsorption des molécules d'eau se fait progressivement jusqu'à constituer une monocouche recouvrant toute la surface externe et les surfaces des pores du produit.

L'eau est dans un état rigide en raison de l'importance des forces de liaisons entre les molécules d'eau et la surface. Le passage à la zone suivante s'effectue quand toute la surface est saturée.

- Zone 2 : Adsorption des molécules sur la monocouche initiale.

L'isotherme est linéaire dans cette zone et l'eau est dans un état intermédiaire entre solide et liquide.

- Zone 3 : Eau présente à l'état liquide dans les pores du matériau.

L'épaisseur de la pellicule est suffisante pour que l'eau soit présente à l'état liquide dans les pores du matériau. L'eau micro capillaire constitue une phase continue.

I.3. Différents modes de séchage

L'opération de séchage peut se faire de plusieurs façons. Le critère de classification le plus utilisé repose sur le mode de transfert de chaleur entre le produit et la source de chaleur [1].

a) Séchage par conduction

Le produit à sécher est mis en contact direct avec une paroi solide chaude où l'échange de chaleur se fait par contact entre la surface de la paroi chaude et le produit. Ce mode de séchage est très utilisé dans l'industrie du textile et de la papeterie.

b) Séchage par convection (ou par entrainement)

On envoie sur le produit à sécher un flux d'air chaud pour éliminer l'eau du produit. Ce mode de séchage représente plus de 85 % des séchoirs industriels [2] et est très utilisé dans le domaine agro-alimentaire.

c) Séchage par rayonnement

Un rayonnement infrarouge est appliqué sur le produit. Il permet un chauffage rapide des produits en couches minces (500 μ m). La génération du rayonnement se fait soit par des dispositifs électroniques (micro-ondes) soit par élévation de la température d'un émetteur infrarouge. Ce mode est très appliqué dans l'industrie des peintures et des pellicules photographiques.

d) Séchage par micro-ondes

Les ondes pénètrent dans les matériaux et subissent une atténuation de puissance liée au transfert. Avec des micro-ondes, on peut sécher à des épaisseurs plus importantes qu'avec l'infrarouge.

e) La lyophilisation

La lyophilisation combine l'action du froid et du vide pour réaliser la sublimation de cristaux de glace c'est-à-dire un passage direct de l'état solide (glace) à l'état vapeur. Cette dernière est ensuite enlevée de la chambre de séchage par des pompes à vide mécaniques ou des éjecteurs à jet de vapeur.

I.4. Le mécanisme de séchage par entraînement (convection)

Pour sécher un produit, il suffit de le ventiler par de l'air suffisamment chaud et sec. Un échange de chaleur et d'humidité se produit entre cet air et le produit humide.

L'air chaud transmet une partie de sa chaleur au produit qui développe une pression partielle en eau à sa surface supérieure à la pression partielle de l'eau dans l'air utilisé pour le séchage. Cette différence de pression entraîne un transfert de matière de la surface du solide vers l'air de séchage. Il existe donc deux facteurs importants pour contrôler les processus de séchage. [3]

- Le transfert de chaleur pour fournir la chaleur latente de vaporisation nécessaire.
- Le mouvement de l'eau ou de la vapeur d'eau à travers le produit humide pour l'extraire des produits.

Un produit humide peut se représenter schématiquement comme sur la figure I.1. Le solide a un film d'eau adhérent à sa surface externe par des forces superficielles.

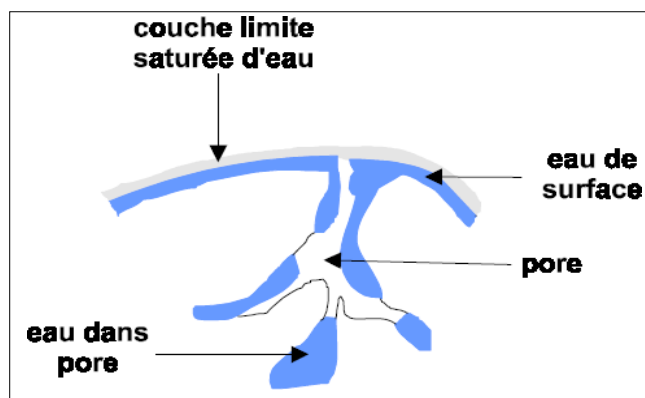


Figure I. 3:Présentation schématique d'un produit humide.

Au contact de l'air chaud, l'eau de la surface externe du produit va être évacuée sous l'effet du gradient d'humidité entre l'air et le produit. L'eau osmotique va migrer à l'état liquide de l'intérieur du grain vers cette périphérie séchée par différence de pression osmotique se définit comme la pression minimale qu'il faut exercer pour empêcher le passage d'un solvant d'une solution moins concentrée à une solution plus concentrée. Au cours de cette migration, des poches d'air apparaissent pour remplacer les pertes en eau. Au cours du séchage, la diffusion de cellule à cellule sera de plus en plus freinée par les cellules qui auront tendance à retenir leur eau. Les derniers points d'humidité seront donc plus difficiles à retirer que les premiers.

L'eau liquide sera entièrement évaporée à l'exception de l'eau fortement retenue. Le produit rentre en équilibre hygrométrique avec son environnement ; ce qui correspond à la fin du séchage.

Bien sécher, c'est pouvoir maîtriser trois paramètres fondamentaux.

- L'énergie thermique apportée qui chauffe le produit et provoque la migration de l'eau vers la surface et sa transformation en vapeur d'eau.
- La capacité de l'air environnant (appelé aussi air d'entraînement) à absorber la vapeur d'eau dégagée par le produit. Cette capacité dépend du pourcentage de vapeur d'eau déjà contenue dans l'air avant son arrivée dans le séchoir et de la température à laquelle il a été porté.
- La vitesse de cet air au niveau du produit qui, surtout en début de séchage, doit être élevée (jusqu'à une certaine limite) de manière à accélérer l'entraînement de la vapeur d'eau.

Il faut pouvoir sécher suffisamment rapidement (pour éviter le pourrissement du

produit) mais pas trop vite (une croûte risque alors de se former en surface) à trop haute température (le produit se dénature, noircit).

I.5. Les trois phases de séchage

Quelques soit le mode de séchage, le produit humide passe par trois phases de séchage comme il est montré sur la Fig. I. 2 :

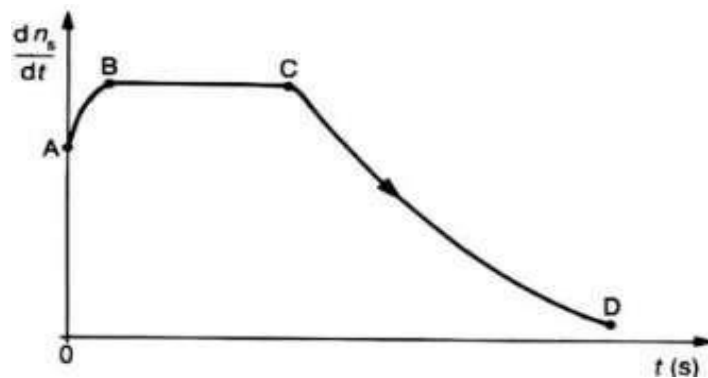


Figure I. 4 : Courbe de séchage.

a. La période de mise en température [AB]

Elle est souvent très courte et se caractérise par une vitesse de séchage croissante et correspond à la montée en température du produit jusqu'à une température d'équilibre. Lorsque le produit reçoit autant de chaleur de l'air qu'il doit en fournir à l'eau, il est alors en phase de sa vaporisation. Cette température d'équilibre n'est pas atteinte de suite puisque le produit avait au départ du séchage une température plus basse, et une inertie thermique relativement importante. La vitesse de séchage sera croissante puisque l'échange d'eau entre le produit et l'air sera d'autant plus efficace que le produit sera réchauffé.

b. La période de vitesse de séchage constante [BC]

Elle correspond à l'évaporation de l'eau libre en surface de produit, sans cesse renouvelée par de l'eau venant de l'intérieur du produit (en partie similaire au phénomène de transpiration). La température du produit reste constante.

c. Phases de ralentissement du séchage [CD]

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 :

- **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 [4].
- **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.
- **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.

I.6. Les paramètres influents sur la cinétique de séchage

- Température de l'air de séchage (T_a)
- Humidité relative de l'air de séchage (H_r)
- La vitesse de l'air de séchage (V_a)
- Le taux de recyclage de l'air de séchage
- L'épaisseur du produit à sécher (E_p)

I.12.1. Influence de la température de l'air de séchage (T_a) :

La température de l'air asséchant influe considérablement sur la vitesse de séchage. Cette influence est due à l'apport de chaleur au produit qui croît avec la température de l'air. Elle est aussi due à la température du produit qui est d'autant plus importante que la température de l'air élevée. Par conséquent, les vitesses de diffusion de l'eau dans le produit deviennent importantes [4].

I.12.2. Influence de l'humidité de l'air de séchage (H_r) :

La teneur en eau de l'air, joue un rôle important sur le comportement des cinétiques de séchage de certains produits, il semble que cette influence est plus importante au début de séchage et diminue lorsque la température de l'air augmente [4].

I.12.3. Influence de la vitesse de l'air de séchage (V_a):

La vitesse de l'air agit positivement sur la cinétique de séchage surtout au début de l'opération. Cependant, pour des produits dont la cinétique de séchage est contrôlée par la migration interne de l'eau, l'influence de la vitesse de séchage de l'air devient très faible [4].

I.12.4. Influence de taux de recyclage de l'air de séchage :

Le recyclage est d'une grande importance dans les opérations de séchage car quoique l'air sortant du séchoir soit plus humide, sa température est élevée [5].

I.7. Types de modifications de la qualité du produit à sécher :

L'exposition pendant une certaine durée d'un produit biologique à une température de séchage élevée peut provoquer des modifications dans sa composition chimique. Ces modifications, généralement considérées comme indésirables, sont nombreuses. Mais les plus importantes sont les suivantes :

- Modification biochimiques dues à la température tel que : la destruction de vitamines et la dénaturation des protéines.
- Pertes d'arômes : l'eau contenue dans le produit à sécher est éliminée avec d'autre produit volatil existant également dans le produit, c'est les arômes.

- Modifications physiques et mécaniques tel que : la modification de forme et la fusion de matières grasses.

I.8. Séchage traditionnel

Le séchage traditionnel ou le séchage à l'air libre est l'une des méthodes de conservation des aliments les plus fréquentes et les plus longues dans un grand nombre de pays en raison de sa simplicité et de l'abondance du rayonnement solaire. Dans ce procédé, l'énergie solaire est utilisée pour chauffer directement les produits qui sont placés sur une plateforme (sol, tapis, béton, figure I.3.). Ils sont laissés jusqu'à ce qu'ils soient asséchés jusqu'à atteindre la teneur en humidité souhaitée.

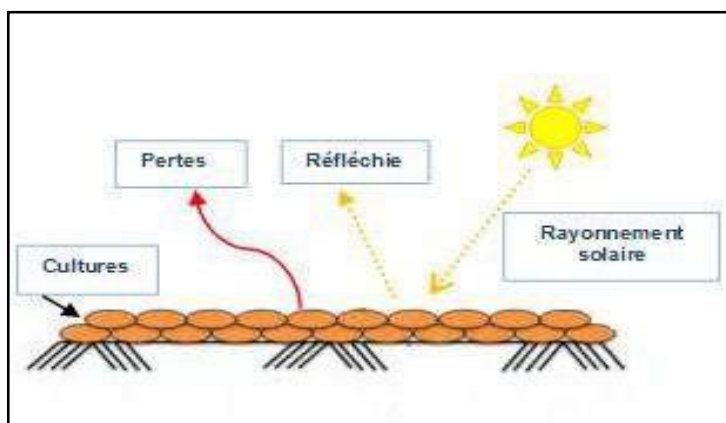


Figure I. 5 : Principe de séchage à l'air libre.

I.9. Le séchage solaire

Le séchage solaire consiste à accumuler l'énergie du soleil à l'intérieur d'un dispositif de collecte de la chaleur, puis à créer un flux d'air chaud par convection naturelle ou forcée. Lorsqu'il passe sur les aliments, l'air chaud et sec élimine l'humidité qui se dissipe dans l'atmosphère par une cheminée installée à l'autre extrémité. Les niveaux de sophistication des dispositifs de séchage solaire varient en fonction des critères du produit final. Les séchoirs solaires traditionnels utilisent la convection naturelle de l'air chaud, tandis que les approches innovantes sont équipées d'un ventilateur alimenté à l'énergie photovoltaïque qui déplace l'air artificiellement à l'intérieur du séchoir pour accroître son efficacité. Contrairement au séchage conventionnel au soleil, le séchage

solaire a généralement lieu dans un endroit clos afin de protéger les produits contre les impuretés extérieures. Les différents types de séchoirs solaires sont de complexité variable : le séchage direct, le séchage indirect, le séchage mixte et le séchage hybride sont les principales solutions disponibles en fonction des besoins.

I.10. Le séchoir solaire

Les séchoirs solaires sont utilisés dans l'agriculture pour le séchage des aliments et des récoltes, ainsi que pour les processus de séchage industriels, peuvent être considérés comme le dispositif le plus utile du point de vue de la conservation de l'énergie. Il n'économise non seulement d'énergie mais aussi beaucoup de temps, occupe moins de surface, améliore la qualité du produit, rend le processus plus efficace et protège également l'environnement.

Les séchoirs solaires contournent certains des principaux inconvénients du séchage classique. Le séchage solaire peut être utilisé pour l'ensemble du processus de séchage ou pour compléter les systèmes de séchage artificiels, réduisant ainsi la quantité totale d'énergie combustible requise.

Le séchoir solaire est un appareil qui élimine la teneur en eau des aliments. La teneur en eau est différente d'un aliment à l'autre. Ainsi, les besoins du séchoir solaire sont également différents et le temps de séchage varie également en fonction de la teneur en eau.

Si la teneur en eau est moindre, le temps de séchage est moindre et si la teneur en eau est élevée, le temps de séchage est également élevé.

I.11. Principe de fonctionnement du séchoir solaire

Les principes de base utilisés dans un séchoir solaire sont les suivants :

- Convertir la lumière en chaleur : Tout corps noir à l'intérieur d'un séchoir solaire améliore l'efficacité de la transformation de la lumière en chaleur.
- Piégeage de la chaleur : Isoler l'air à l'intérieur du séchoir de l'air à l'extérieur du séchoir fait une différence importante. L'utilisation d'un solide transparent, comme un sac en plastique ou un couvercle en verre, permet à la lumière de pénétrer mais une fois absorbée et convertie en chaleur, le sac en plastique ou le couvercle en verre

emprisonne la chaleur à l'intérieur. Cela permet d'atteindre des températures similaires les jours froids et venteux et les jours chauds.

- Déplacement de la chaleur vers les aliments. Le séchoir à convection naturelle et le séchoir à convection forcée utilisent la convection de l'air chauffé pour déplacer la chaleur vers les aliments.

I.12. Classification des séchoirs solaires

Il existe une très grande diversité de type de séchoirs développés pour servir les divers buts de sécher des produits agro-alimentaires selon le besoin local et la disponibilité.

Les systèmes de séchage solaire sont classés en fonction de la méthode de circulation de l'air, du mode de chauffage et du type de chambre de séchage. D'une manière générale, ils peuvent être classés dans deux groupes majeurs,

- Les systèmes de séchage d'énergie solaire actifs (à circulation d'air forcée)
- Les systèmes de séchage d'énergie solaire passifs (conventionnellement appelés les séchoirs solaires à circulation naturelle de l'air de séchage).

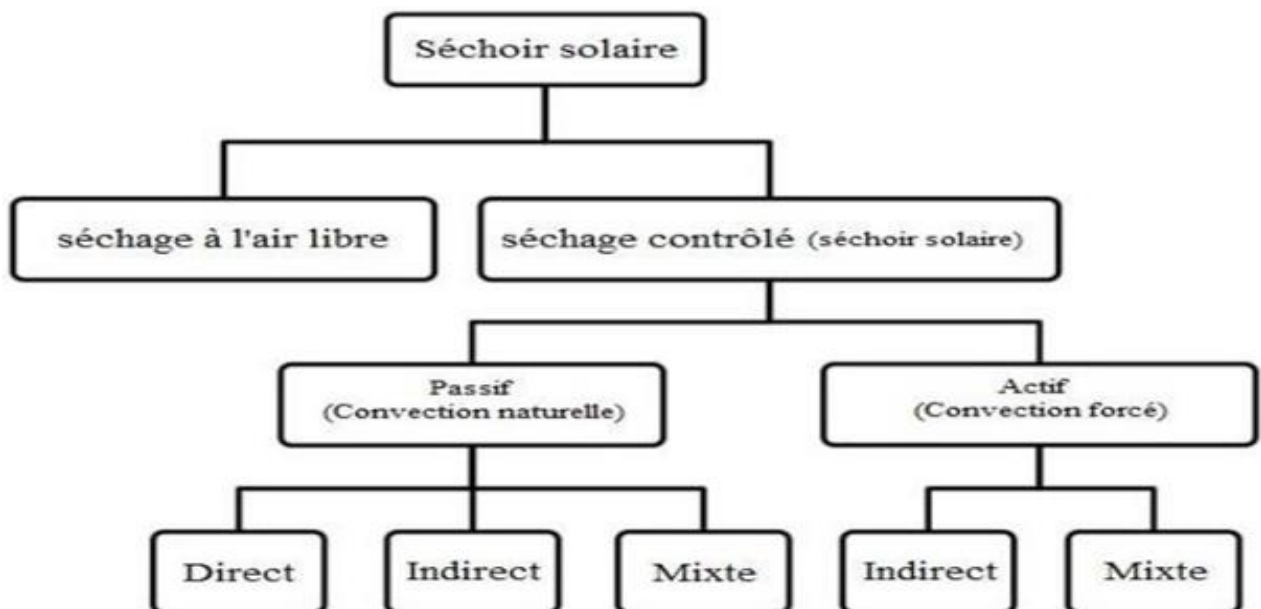


Figure I. 6 : Classification des séchoirs solaire.

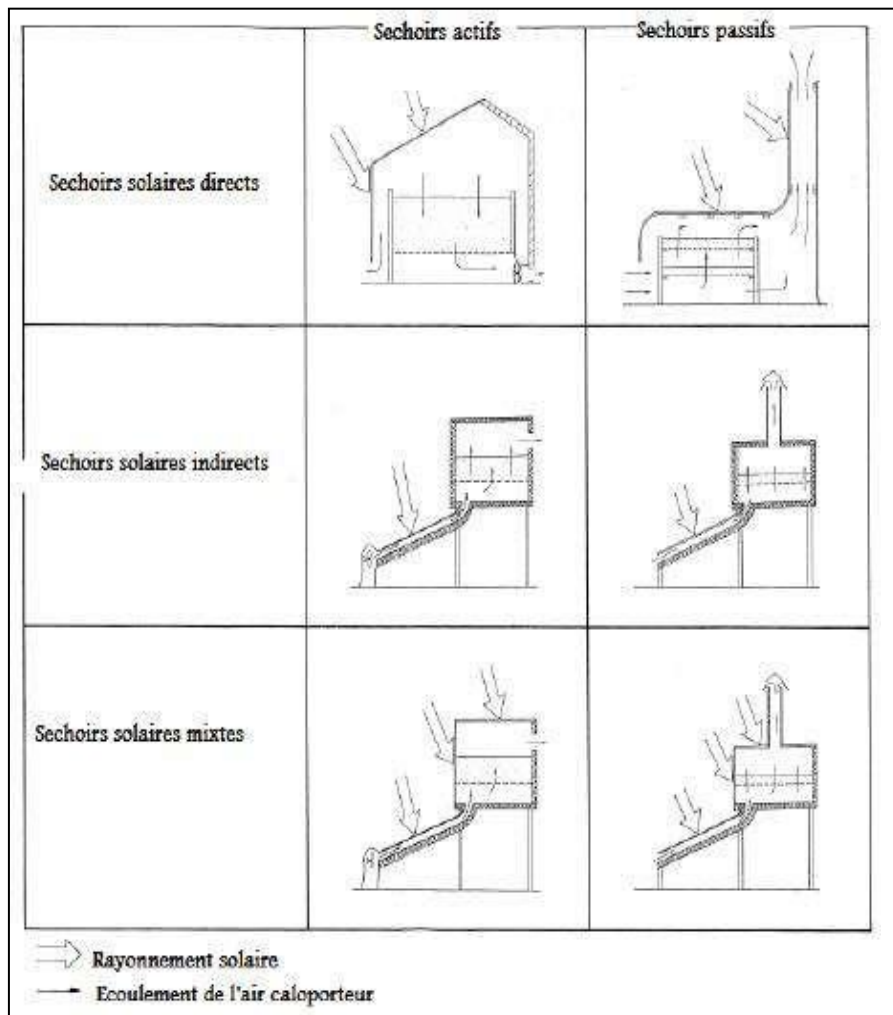


Figure I. 7: Différents types de séchoirs solaires [6].

I.12.1. Les séchoirs solaires directs

Le séchoir solaire direct comme illustré dans la figure I.6 est composé d'une chambre de séchage recouverte d'un vitrage transparent en plastique ou en verre [7]. Dans le séchoir solaire direct, le produit est placé dans une enceinte à couvercle transparent. Le rayonnement solaire est absorbé par le matériau, et les surfaces internes de la chambre de séchage générant de la chaleur. Ensuite, la chaleur évapore l'humidité du produit et le sèche [8].

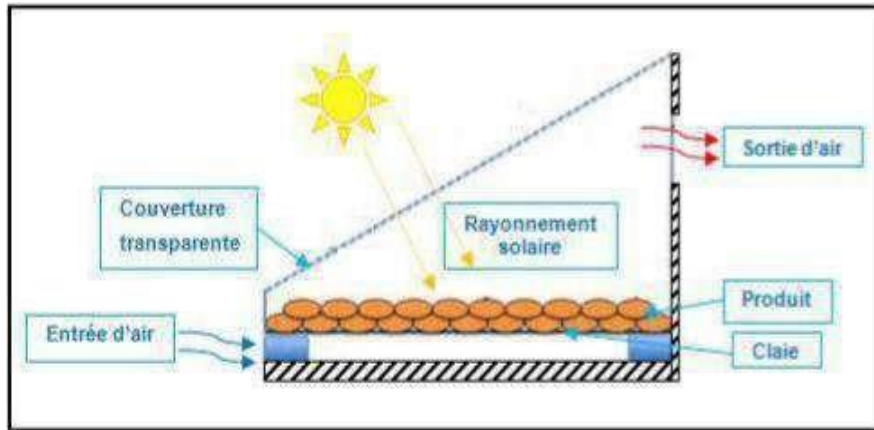


Figure I. 8 : Séchoir solaire direct [9].

Avantage :

- Les produits sont mieux protégés de l'attaque des mouches et autres insectes.
- Ils sont soumis à un effet de serre au même titre qu'un absorbeur de capteur plan, d'où une amélioration du bilan radiatif et une élévation de la température du produit à sécher, ce qui permet de diminuer notablement les temps de séchage par rapport aux systèmes traditionnels [9].

Inconvénients :

- Dégradation de la qualité par exposition directe au soleil, destruction de la vitamine A et C, flétrissement, décoloration.
- Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement.
- Température relativement élevée dans le séchoir qui contribue avec l'exposition au soleil à la destruction des nutriments.
- Faible circulation de l'air qui limite la vitesse du séchage et augmente les risques de moisissure.

I.12.2. Séchoir solaire indirect

La figure I.7 explique ce type de séchoir qui se compose généralement de deux parties :

Un capteur solaire, qui peut être un capteur à plaque fixe ou un capteur de type concentré pour chauffer l'air atmosphérique, dans lequel le produit n'est pas exposé directement au rayonnement solaire. et une chambre de séchage qui contient le produit à sécher. L'air pénètre dans le collecteur qui s'échauffe (sa température augmente), et par

l'effet de convection naturelle, l'air chauffé monte à la chambre de séchage pour sécher le produit. La durée du séchage reste très variable selon les conditions météorologiques et la ventilation du séchoir [10].

Ce type de séchoir est souvent plus compliqué et plus coûteux à construire que le séchoir direct. Il peut être réalisé à des échelles diverses, et il est surtout employé pour des produits très sensibles au rayonnement solaire ou dont le niveau de température doit être contrôlé [11].

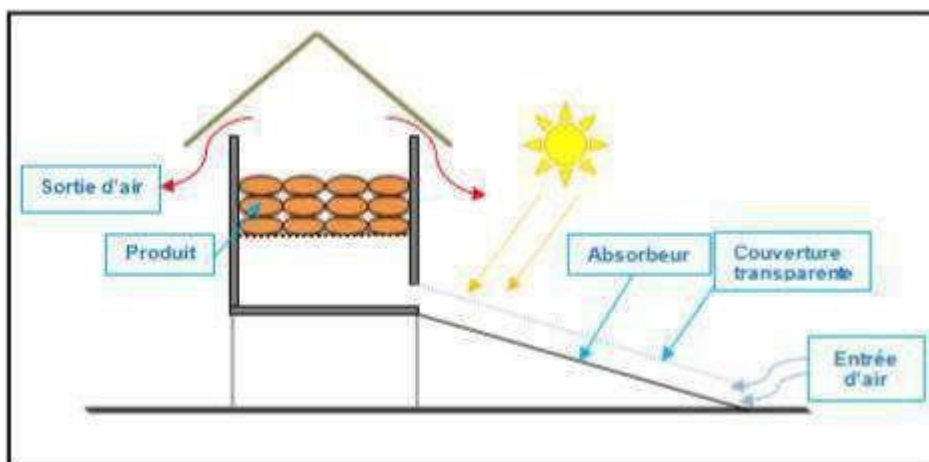


Figure I. 9 : séchoir solaire indirect.

Avantage :

- Le produit n'est pas exposé directement au soleil. Il conserve mieux sa couleur et sa valeur nutritionnelle (notamment les vitamines A et C).
- Leur fonctionnement n'exige pas une énergie électrique ou des combustibles fossiles.

Inconvénients :

- Rapidité de séchage très variable suivant les conditions climatiques la conception du séchoir.
- Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement.

I.12.3. Le séchoir solaire mixte

Le séchoir solaire mixte a le taux de séchage le plus élevé par rapport aux séchoirs directs et indirects. En outre, il peut atteindre rapidement une température beaucoup plus élevée que la température ambiante, ce qui permet d'atteindre un niveau approprié

d'humidité dans le produit. Mais c'est complexe et de coût initial élevé [12].

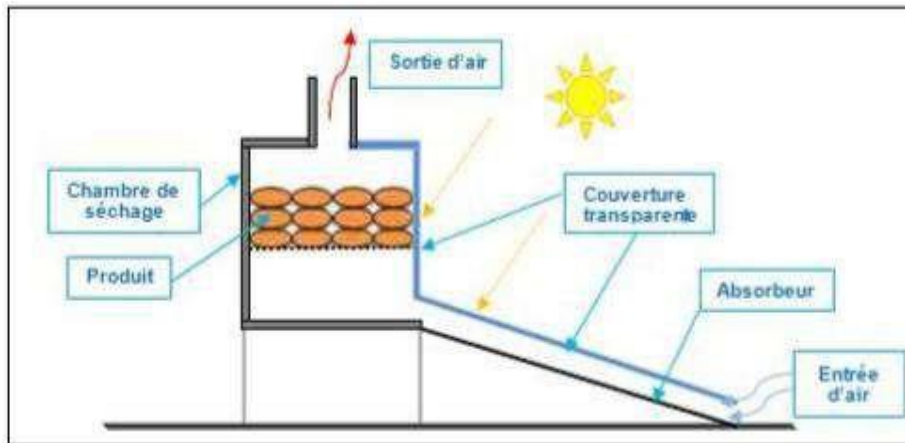


Figure I. 10 : Séchoir solaire mixte.

I.12.4. Séchoir solaire hybride

Les séchoirs solaires hybrides figure I.9 sont des séchoirs qui dépendent de l'énergie solaire et d'une autre source, telle que la biomasse ou les combustibles fossiles. De tels séchoirs ont la capacité de fonctionner sans énergie solaire, ce qui réduit le risque de perte de nourriture. Ainsi, le séchoir solaire hybride réduit le temps de séchage par rapport à un autre séchoir solaire. D'autre part, les séchoirs solaires hybrides sont coûteux et peuvent conduire à une dépendance au combustible, l'objectif principal des séchoirs solaires étant de réduire la dépendance au combustible. La différence substantielle entre les séchoirs solaires mixtes et les séchoirs solaires hybrides réside dans le fait que, dans les séchoirs solaires mixtes, l'unique source d'énergie est l'énergie solaire ; toutefois, le mode de fonctionnement inclut une combinaison de sécheurs solaires directs et indirects. Cela dit, les séchoirs solaires hybrides ne dépendent pas uniquement de l'énergie solaire, ils couplent plusieurs sources d'énergie telles que l'énergie solaire et la biomasse.

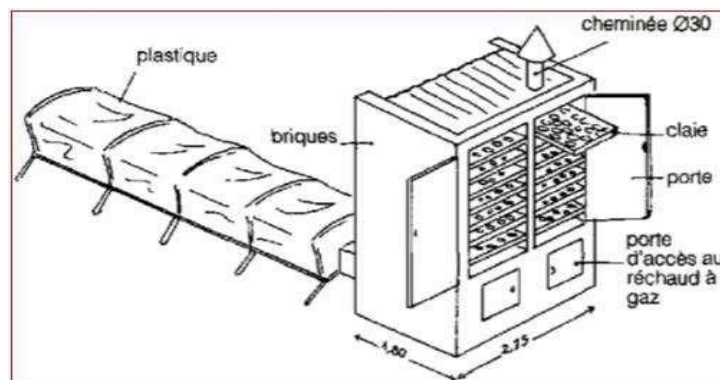


Figure I. 11 : Séchoir solaire hybride.

Avantage :

- Affranchissement par rapport aux conditions climatiques.
- Meilleur contrôle du séchage.
- Forte augmentation de la productivité par rapport aux autres types des séchoirs solaires, car le matériel peut fonctionner la nuit ou en saison des pluies si besoin.

Inconvénients :

- Coût de production et d'investissement élevé.
- Nécessité d'approvisionnement local en carburant, électricité, gaz.
- Personnel qualifié pour la maintenance.

I.13. La menthe

La menthe verte est une plante vivace de la famille des Lamiacées , à fleurs roses ou blanches cultivée comme plante aromatique.

Le terme « menthe » est apparu dans la langue en 1275. Il vient du latin (mentha), qui l'a emprunté au grec (minthê). Elle viendrait d'une vaste région englobant le Nord de l'Afrique, le bassin méditerranéen et l'Ouest de l'Asie. [19]

Elle est l'une des plantes médicinales les plus célèbres. Elle aurait des vertus digestives, carminatives, antiseptiques, toniques et stimulantes. Elle participerait à l'équilibre digestif et améliorerait le tonus général.



Figure I. 12 : La menthe.

I.13.1. Les types de la menthe [13]

➤ Menthe poivrée

Origine : La plupart des menthes est originaire de l'Europe et de l'Asie. On trouve quelques espèces en Amérique, en Afrique du sud et en Australie. La menthe poivrée, est originaire de l'Angleterre. Actuellement elle est cultivée sur des grandes et des petites superficies (ABRIEL, 1975). Historique : Dans la mythologie grecque, «Minthe» a déjà été une nymphe qui a été adorée par Pluton, mais elle a été transformée par sa femme jalouse en plant de menthe. Les Grecs du temps de Périclès en font un parfum, les herbes également, d'où les reproches que Jésus adresse aux scribes et pharisiens pour s'en procurer et négligeaient la justice et la miséricorde. Les Grecs interdisaient à leurs soldats de manger de la menthe car, elle incite à l'amour et diminue le courage (ROLET, 1998).

➤ La menthe pouliot

Origine : C'est une plante qui pousse à l'état sauvage dans le sud de l'Europe. En France, cette espèce est largement cultivée. Morphologie : C'est une plante vivace qui présente une tige principale terminée par trois ou quatre bifurcations et qui peut atteindre une hauteur de 40 à 90 cm. Ses feuilles sont ovales et duveteuses. Ses fleurs bleu lavande ou rose poussent en épis terminaux de 15 à 30 cm.

➤ La menthe verte ou douce

Origine : Elle est connue depuis longtemps dans les pays arabes et dans tout le monde. Morphologie : La menthe douce est caractérisée par sa couleur verte différente des autres espèces de menthe. De forme allongée, lancéolée ses feuilles sont d'un vert printanier, profondément nervurées, avec des nervures très rapprochées. Sa tige verticale centrale peut atteindre 30 à 60 cm de hauteur. A l'extrémité de chaque pédoncule glabre fleurit un long épi portant des minuscules fleurs blanches teintées de mauve ou de rose.

I.13.2. Objectif de séchage de la menthe

Le séchage des plantes médicinales par l'air chaud est une opération unitaire très utilisée dans les industries agricoles et alimentaires, tant par la qualité que par la diversité des produits traités, il permet de prolonger la conservation de ces produits par diminution de l'activité (ou diminution de la teneur en eau).

La menthe verte est employée très couramment comme herbe aromatique, principalement dans les cuisines méditerranéennes, par exemple dans le thé à la menthe ou le taboulé, et asiatiques (vietnamienne) avec les nems et les salades. En France, la menthe poivrée est très cultivée pour les besoins pharmaceutiques (notamment contre les démangeaisons), en particulier dans les régions de Milly-la-Forêt et de Chemillé, près d'Angers. Elle renferme de 44 à 83 % de menthol, à l'origine de la sensation de fraîcheur ou de froid (car stimulant les mêmes récepteurs que ceux qui dans la bouche sont sensibles au froid). La menthe poivrée contient aussi des terpènes. L'odeur est caractéristique de la saveur camphrée. L'essence de menthe verte est moins soutenue car elle est plus pauvre en menthol, remplacée par la carvone, principe actif du carvi. Par ailleurs, l'huile essentielle de menthe est très utilisée en aromathérapie (surtout la menthe poivrée), en phytothérapie et dans la médecine japonaise (surtout la menthe des champs). Elle ne doit pas être mise en contact avec les muqueuses tant qu'elle n'est pas diluée. Alcool de menthe, liqueur de menthe et sirop de menthe sont des boissons courantes, généralement colorées artificiellement en vert ou bien incolores.

CHAPITRE II

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Table des matières

II.1.	Introduction	25
II.2.	L'amélioration des performances du capteur solaire	25
II.3.	L'intégration du stockage thermique.....	26
II.4.	L'utilisation d'un ventilateur	30
II.5.	L'utilisation d'une cheminée	33
II.1.	Conclusion.....	34

II.1. Introduction

Ce chapitre présente une synthèse bibliographique succincte et récente apportée sur les séchoirs solaires type indirects et les différentes technologies utilisées pour améliorer ses performances. Parmi ces technologies on cite :

- L'utilisation des ventilateurs pour assurer une convection forcée à travers la chambre de séchage,
- L'intégration des stockeurs thermiques pour prolonger la durée de séchage,
- L'amélioration des performances du capteur solaire en utilisant des ailettes, et
- L'utilisation d'une cheminée pour améliorer l'extraction de l'air à travers le séchoir.

II.2. L'amélioration des performances du capteur solaire

S. Singh, R.S. Gill et al (2021) ont présenté un nouveau séchoir solaire indirect à mode actif composé d'un collecteur à tubes sous vide à haut rendement pour le chauffage de l'air. Un ventilateur à courant continu alimenté par un module solaire photovoltaïque (PV) est prévu pour la circulation forcée de l'air dans ce séchoir. La chambre de séchage est de type plateau avec une capacité de chargement de 6 kg à 45 kg selon le produit à sécher. Le séchoir a été évalué pour sécher des feuilles de fenugrec et le curcuma en mode semi-continu.

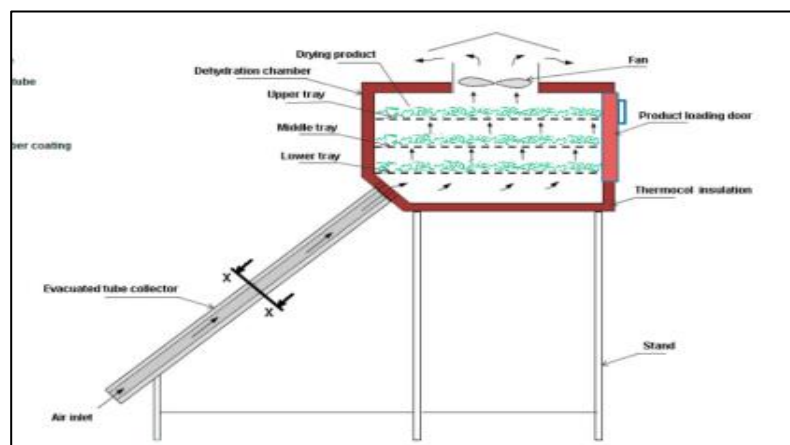


Figure II. 1: Schéma du séchoir solaire actif indirect.

L'efficacité thermique globale respective s'est avérée être de 34,1% et 23,6%. Et celle dans le séchage en plein soleil était de 5,7 % et 5,4 %. La qualité des feuilles de fenugrec et du curcuma séchés est relevée meilleure que dans le séchage plein air.[14]

A.E. Gürel et al (2021) ont développé un système de séchage solaire contenant un lit fluidisé et un capteur solaire plan. Dans un premier temps, le comportement thermique du capteur solaire à air a été étudié numériquement. Trois types d'absorbeurs ont été testés, plat, avec ailettes planes et avec ailette en zigzag.

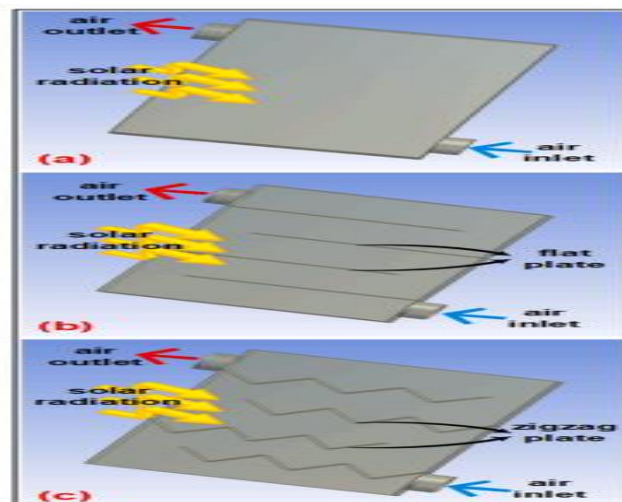


Figure II . 2: Géométries des SACs ; a) SAC à plaque plate ; b) SAC à plaque plate avec des ailettes planes ; c) SAC plat avec des ailettes en zigzag.

Dans l'étape suivante, les performances du système de séchage ont été étudiées expérimentalement. Le rendement global du système s'est avéré être de 64%. L'efficacité énergétique maximale des capteurs solaires à air plats était à 7,2 % et en zigzag a été calculée à 11,6%. Les résultats généraux des analyses numériques, expérimentales et de modélisation de cette recherche ont montré le succès du système de séchage solaire à lit fluidisé développé.[15]

II.3. L'intégration du stockage thermique

A.J. Cetina-Quinones et al (2021) ont étudié l'évaluation expérimentale de deux matériaux de stockage thermique sensible provenant de l'État du Yucatan Mexique, qui ont été incorporés dans trois compartiments d'un séchoir solaire de type indirect avec un système de stockage (ITSD-TSS).

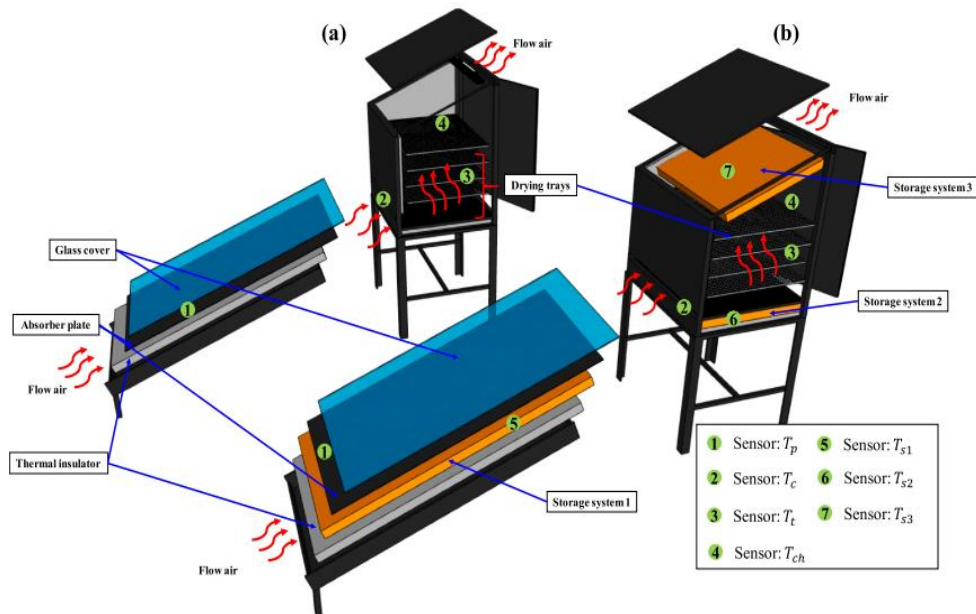


Figure II . 3: (a) séchoir solaire conventionnel, (b) séchoir solaire avec ITSD-TSS.

Les tests expérimentaux ont été réalisés dans différentes conditions environnementales et comparés aux résultats obtenus avec un séchoir solaire conventionnel sans stockage thermique. La température et l'humidité ont été mesurées pendant les différents tests et divers indicateurs ont été utilisés pour comparer les deux systèmes de séchage.

Les résultats ont révélé que le séchoir solaire qui utilisait de la pierre calcaire comme matériau de stockage indiquait meilleures performances que le séchoir qui utilisait du sable de plage, puisque l'efficacité de séchage avec le calcaire était plus élevée de 1,55% a permis d'extraire 0,0257 kg d'eau en plus par unité de kWh. De même, le sable de plage stockait 1,5 fois plus d'énergie que la pierre calcaire, cependant, ce matériau est très sensible aux variations du rayonnement solaire, il n'est donc pas recommandé de le mettre en œuvre dans les zones à forte nébulosité. Enfin, la mise en œuvre des trois compartiments de stockage dans le SSTI a permis d'augmenter de 3 à 4 % l'efficacité du séchage par rapport au séchoir solaire conventionnel. [16]

D. Saikia, P,et al (2021), ont décrit la conception et la performance d'un séchoir solaire indirect couplé à une unité de stockage d'énergie thermique pour le séchage du dhekia (*Diplazium esculentum*). Le séchoir solaire est composé d'un capteur solaire, d'un système de stockage de l'énergie thermique et d'une chambre de séchage. Les expériences sont menées dans trois cas différents, le séchage en plein soleil (cas-I), le séchoir à plateaux (cas-II). Et le

séchoir solaire indirect avec système de stockage thermique (cas III). La teneur en humidité du dhekia se réduit de 83,1% à 3,46%.

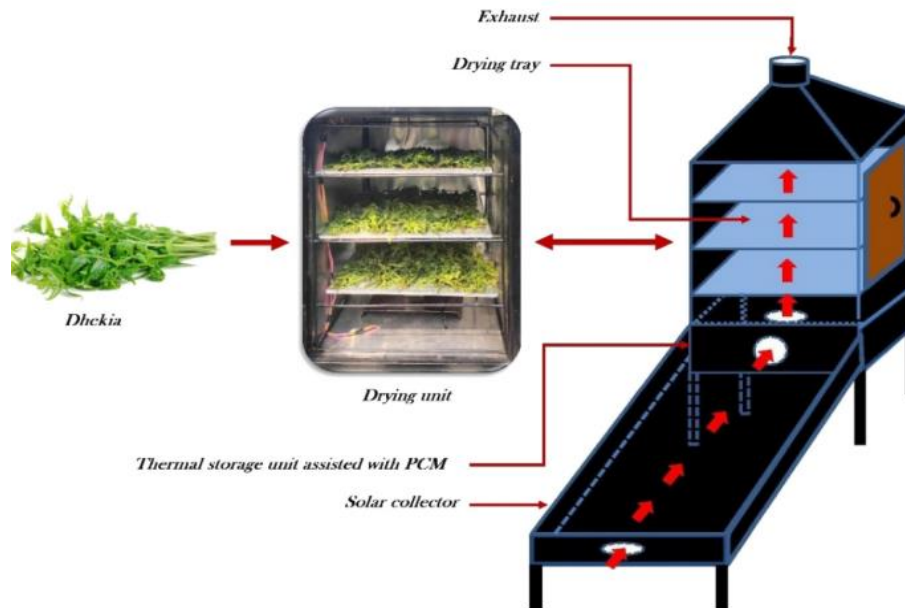


Figure II. 4: Montage expérimental MISD avec unité de stockage thermique et de séchage

Le temps de séchage était de 270 min dans le séchoir solaire et 420 min pour le séchage en plein soleil. A partir des analyses thermiques et de qualité, il a été observé que le séchoir solaire développé avec le TES réduit le temps de séchage et améliore les attributs de qualité par rapport aux deux autres cas. [17]

Dans le travail, **N. Vigneshkumar, et al** ont fabriqué un séchoir solaire de type indirect à convection forcée à passage unique et de la paraffine a été intégrée au capteur solaire comme matériau à changement de phase (PCM) utilisé comme stockage thermique pour améliorer les performances du séchoir solaire en dehors des heures d'ensoleillement. Les paramètres du processus tels que le taux d'élimination de l'humidité et la température d'entrée du séchoir ont été étudiés pour le séchage de pommes de terre en tranches dans deux cas, à savoir, un séchoir solaire sans PCM (séchoir ordinaire) et un séchoir solaire avec PCM (séchoir PCM). Le débit massique d'air a été maintenu à 0,065 kg/s et le séchoir a fonctionné de 10h00 à 19h00.

Les résultats ont démontré que la présence de PCM dans le capteur solaire a augmenté la température de la chambre de séchage de manière significative deux heures de plus après la période ensoleillée. En outre, le pourcentage d'élimination de l'humidité des tranches de pommes de terre a été amélioré de 5,1 % par jour à l'aide de la paraffine. [18]

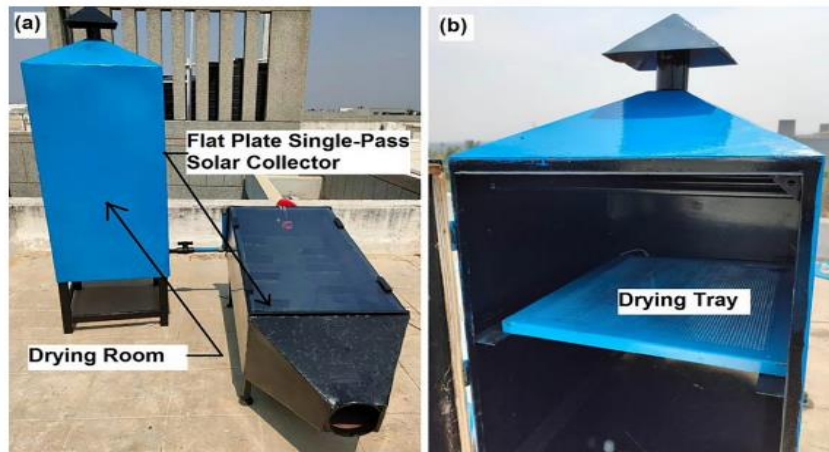


Figure II. 5 : Séchoir solaire expérimenté (a) Installation complète (b) Intérieur de la salle de séchage.

Dans l'étude de **M. Rezaei et al**, pour la première fois, un métal et des tuyaux contenant un PCM (matériau à changement de phase) ont été utilisés comme barrière sur la plaque absorbante. Les résultats ont montré que l'utilisation d'une plaque d'absorption à bobines et de PCM dans le séchoir améliore l'efficacité moyenne du collecteur et du séchoir de 28,5 % et 52,1 % respectivement par rapport à la plaque d'absorption plate sans PCM et de 26,4 % et 36,3 % par rapport à une plaque d'absorption à bobine sans PCM, et de 12,2% et 12,9% par rapport à la plaque d'absorption plate avec PCM. Bien qu'il ait fallu environ 4,5h pour atteindre le taux d'humidité cible avec le séchoir, il a fallu environ 3 jours pour atteindre le même taux d'humidité lorsque le persil a été séché dans la chambre de séchage.[19]



Figure II. 6 : Une vue du séchoir solaire et de la plaque d'absorption à bobine utilisées dans le collecteur.

II.4. L'utilisation d'un ventilateur

M.C. Gilago et al (2021) ont effectué une étude des performances des séchoirs solaires de type indirect à convection naturelle et forcée a été réalisée en séchant la gourde de lierre. L'installation à convection naturelle a été modifiée en installant une conduite trapézoïdale et des ventilateurs d'unité centrale de traitement alimentés par des panneaux photovoltaïques pour favoriser la convection forcée.

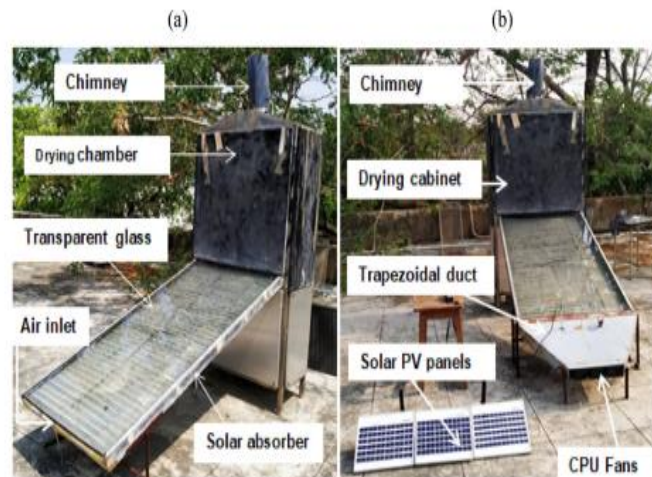


Fig. 2. Indirect type solar dryer developed at NIT Warangal, India for (a) natural and (b) forced convection.

Figure II. 7 : (a) Séchoir solaire de type indirect développé au NIT Warangal, Inde pour convection naturelle (b) convection forcée.

Les données de l'expérience ont été utilisées pour estimer les rendements des collecteurs et des séchoirs, la diffusivité effective de l'humidité, les coefficients de transfert, la consommation d'énergie spécifique et le taux d'extraction d'humidité spécifique. La chaleur moyenne réelle fournie était de 776,6 W pour la convection naturelle et 997,76 W pour la convection forcée. L'efficacité et rendement moyens des capteurs étaient de 62,56 % et 77,2 %, respectivement. Les valeurs moyennes de l'énergie d'activation, du transfert de masse, de transfert de chaleur et de diffusion ont été estimées à 39,85 et 35,54 kJ/mol, 7,06 10⁹ et 8,35 10⁹ m²/s, 0,0033 et 0,0043 m/s, et 3,85 et 4,93 W/m²K, pour les configurations à convection naturelle et forcée respectivement. [20]

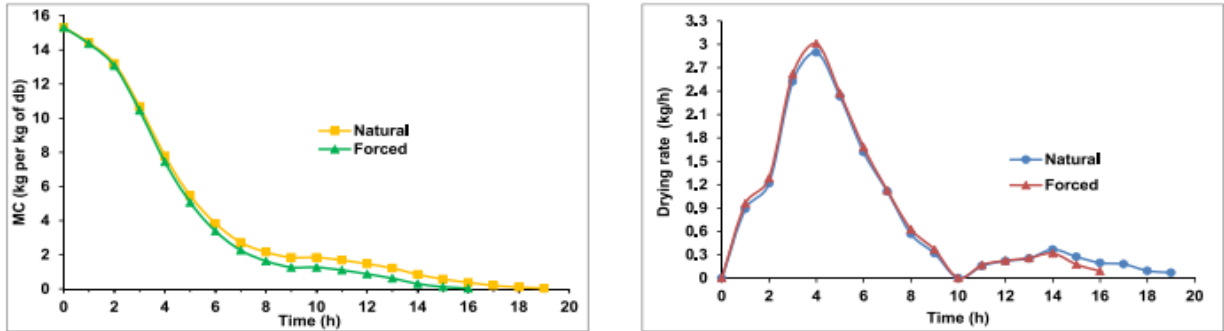


Figure II. 8: a) Teneur en eau, b) taux de séchage.

M. Simo-Tagne Tagne et al (2021) ont étudié numériquement un séchage solaire des fèves de cacao en convection naturelle, forcée et combinée (forcée et naturelle) pour prédire leur efficacité dans un environnement tropical. L'analyse des coûts et le potentiel d'atténuation du CO₂ du séchoir solaire ont également été présentés. Ils ont utilisé la méthode des différences finies et la méthode Runge Kutta de quatrième ordre pour résoudre les équations itératives. La cinétique du séchage, le taux de séchage, l'atténuation des émissions de CO₂, l'efficacité thermique et le délai de récupération ont été estimés.[21]

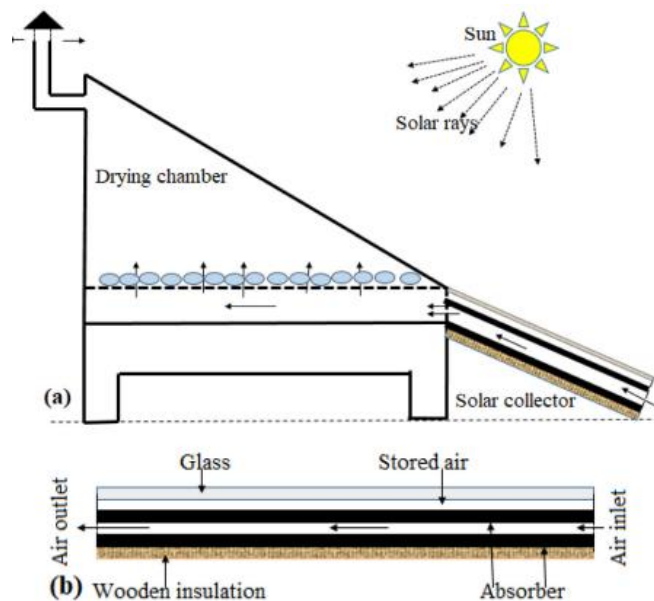


Figure II. 9: (a) le séchoir solaire étudié (b) un collecteur solaire.

Le meilleur mode de fonctionnement est d'utiliser la convection forcée pendant la période ensoleillée et la convection naturelle pendant la période non ensoleillée. Avec un taux d'humidité initial de 1,2 kg/kg ms, il a fallu 32 h de séchage pour obtenir un taux d'humidité final de 0,15 kg/(kg ms). L'efficacité thermique du capteur solaire est supérieure à 30%, tandis

que l'efficacité thermique globale varie de 5 à 18 %. Le potentiel d'atténuation des émissions de CO₂ par masse d'eau évaporée se situe entre 15 et 25 g de CO₂ par kg d'eau évaporée en une journée. Le délai de récupération calculé sur période de remboursement calculée était de 2,19 ans.[21]

V.R. Mugi et al (2021) ont présenté une étude expérimentale du séchage solaire du gombo (*Abelmoschus esculentus*). Le séchoir solaire utilisé est de indirect (S.S.I) sous la convection forcée et naturelle. Les résultats ont été comparés pour mieux évaluer les performances du séchoir solaire indirect et optimiser le processus de séchage en tenant compte de la quantité d'énergie. L'efficacité moyennes étaient de 74.98% et 24.95% sous la convection forcée et 61.49% et 20.13% sous la convection naturelle pour le CSA et du séchoir, respectivement.

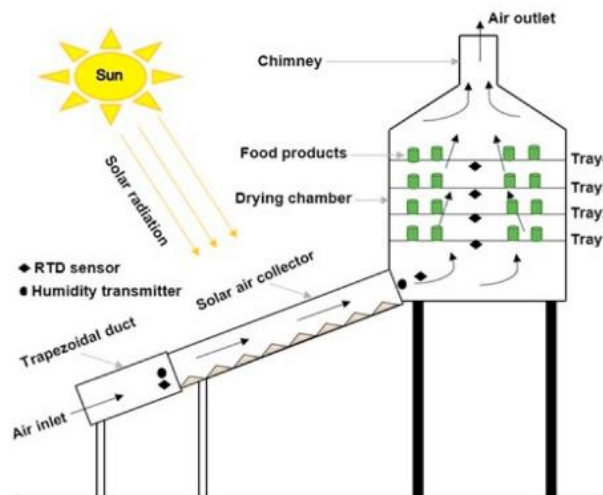


Fig. 2. Schematic of ISD integrated with trapezoidal duct.

Figure II. 10: Schéma d'un ISD intégré à un conduit trapézoïdal.

Les flux d'énergie ont été déterminés pour le capteur et la chambre de séchage pour les deux configurations. Le flux sortant d'énergie du CSA était dans une gamme de 1.04-46.85 W en mode convection naturelle et 1.13-50.94 W, en mode convection forcée.

La perte d'énergie pour la chambre de séchage variait de 0.062 à 21.99 W en convection naturelle et de 0,394 à 24,99 W en convection forcée. Les valeurs des efficacités énergétiques moyennes pour le CSA et la chambre de séchage en convection forcée SSI étaient de 2.03 et 59.32%, tandis qu'en convection naturelle, elles étaient de 2,44 et 55,45%.

L'analyse a révélé que les performances de la convection forcée était meilleure que celle de la convection naturelle. [22]

II.5. L'utilisation d'une cheminée

A. Benhamza et al, ont étudié numériquement les performances d'un séchoir solaire muni d'une cheminée passive. Les meilleures conditions de conception et de fonctionnement sont mises en évidence par une étude paramétrique utilisant un modèle de dynamique des fluides computationnelle (CFD), L'effet de l'ajout d'une cheminée passive et l'effet de trois débits massiques sur la distribution de l'air de séchage ont été étudiés à l'aide du code ANSYS FLUENT. La température moyenne a augmenté de 16, 11 et 8 K pour le débit massique de 0.0141, 0.0636, et 0.0872 kg/s respectivement. L'uniformité de la température de l'air a été améliorée de manière significative de 21,7 et 20,3 % pour le débit massique de 0.0141 et 0.06 kg/s respectivement, tandis qu'elle a été marginalement augmentée pour 0,08 kg/s.

L'utilisation d'une cheminée a amélioré la température de l'air de séchage de 7 degrés. [23]

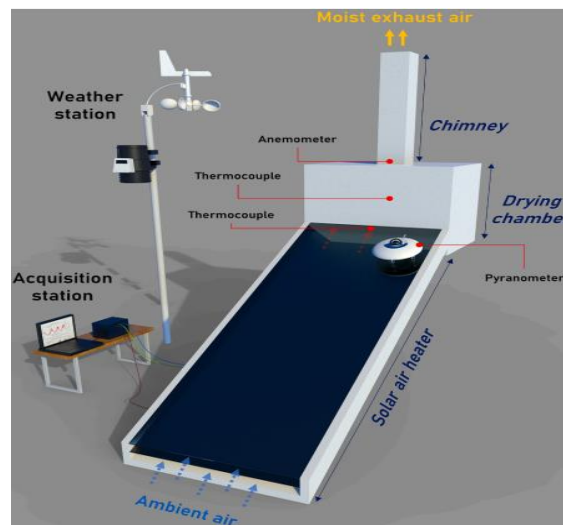


Figure II . 11: Représentation schématique du dispositif expérimental.

S. Hatami, et al (2021), présentent un modèle dynamique dans lequel le calcul du rayonnement solaire reçu dans la surface du capteur, la variation de la température le long du capteur, la réduction de l'humidité et la variation de la température du produit à séché ont été pris en considération. Le modèle a été validé et confirmé avec une grande précision par des résultats d'essais dans trois états de débit massique d'air. L'effet de la vitesse de l'air, de

l'épaisseur de la couverture en verre et de la longueur de la cheminée ont été étudiés dans l'analyse en tant que paramètres efficaces. L'analyse thermique a été réalisée en utilisant l'analyse énergétique et l'analyse exégétique.

Le modèle a révélé deux taux d'humidité critiques de 0,75 et 0,23 dans le processus de séchage de sorte que la destruction maximale d'énergie a été observée au premier et que l'efficacité maximale d'énergie était de 22 %. [24]

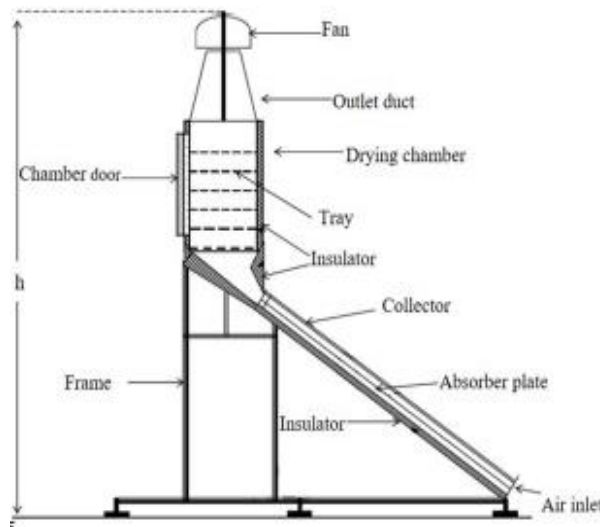


Figure II. 12 : La vue schématique du séchoir solaire utilisé pour la modélisation.

II.1. Conclusion

A travers cette étude bibliographique qui regroupe les différentes technologies utilisées pour améliorer les performances thermiques des séchoirs solaires, on a pu constater les remarques suivantes :

1. Les capteurs solaires avec absorbeur inversé fournissent de meilleures performances thermiques puisqu'ils assurent des températures plus élevées et diminuent les pertes thermiques.
2. La présence d'une cheminée solaire dans un séchoir solaire à convection naturelle a entraîné l'amélioration du processus du séchage en augmentant le débit d'air, et donc, l'extraction de l'humidité.
3. Le séchage continu est un facteur important pour certains types de produits. Cette condition ne peut être assurée avec les séchoirs solaires à cause de la nature intermittente du

rayonnement solaire. L'introduction d'une unité de stockage thermique dans le séchoir a permis de surmonter ce problème et d'assurer un fonctionnement plus continu du séchoir solaire durant les heures non ensoleillées.

CHAPITRE III : Etude expérimentale de séchage de la menthe

Table des matières

III.1.	Introduction	37
III.2.	Materiel et méthodes.....	37
III.3.	Protocole expérimentale.....	40
III.4.	L'emplacement des thermocouples dans les séchoirs	43
III.5.	Conditions climatiques.....	44

III.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons décrire le dispositif de séchage solaire existant à l'Unité de Recherche sur Energies Renouvelables en Milieu Saharien (URERMS) d'Adrar Algérie. Le fonctionnement de ce dispositif ainsi l'influence de certains paramètres sur la cinétique de séchage ont été étudiés par Wafa Braham Chaouch et al. L'objectif principale dans cette partie est présenter les dispositifs utilisés pour le séchage solaire de la menthe et les conditions météorologiques dans lesquelles l'expérience a été menée.

III.2. Matériel et méthodes

III.2.1 Position du problème

Cette étude est réalisée pour trois processus de séchage solaire : le séchage à l'air libre et le séchage en utilisant deux séchoirs solaires différents. Comme produit à sécher, nous avons choisi les menthes vertes.

Les deux séchoirs solaires utilisés sont superposés. En bas on trouve un séchoir convectif indirect et en haut un séchoir convectif direct, voir Fig. III.1. Les éléments constitutifs des deux séchoirs sont :

- a) **Séchoir solaire indirect** : Il contient un capteur solaire couplé à une chambre de séchage.
 - Le capteur solaire plan simple d'une surface de captation de $1 \times 0.95 \text{ m}^2$, inclinée de 28° (l'altitude de la ville de Adrar) et orienté vers le sud est placé au-dessus de la chambre de séchage. Le rayonnement solaire incident sur le capteur est transmis par un vitrage en verre ordinaire et est absorbé par une plaque absorbante en acier inoxydable peinte en noire de 0.005m d'épaisseur.
 - Un débit d'air circule dans un passage de 0.04m prévu entre l'absorbeur et le vitrage pour assurer son renouvellement et sa circulation à travers le capteur solaire. Cela provoque l'augmentation de la température d'air qui sera orienté par la suite vers la chambre de séchage. A l'entrée du capteur des orifices équidistants sont percées pour assurer une circulation uniforme d'air. Un lit thermique en pierre est prévu en bas du capteur pour stocker une partie de l'énergie thermique reçue par le capteur.
- Enfin, pour limiter les pertes thermiques vers l'extérieur, une couche en polystyrène de 0.03 m d'épaisseur est prise en sandwich entre une couche en aluminium (face extérieure) et une couche de contreplaqué (face intérieure).

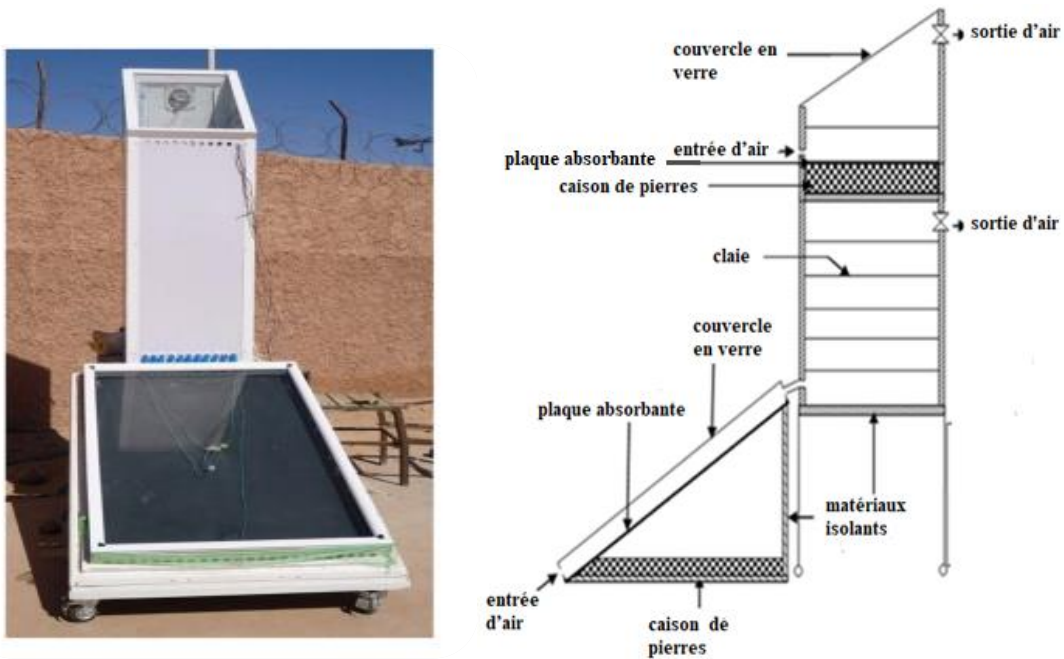


Figure III. 1: Schéma descriptif du séchoir solaire indirect et direct.

- La chambre de séchage ayant pour dimension de $90 \times 60 \times 50 \text{ cm}^3$. Elle est constituée de plusieurs claies sur lesquelles s'étale le produit à sécher. Les claies sont superposées à une distance de 15 cm (pour cette étude nous avons utilisé les deux premières claies)
 - L'air à la sortie du capteur solaire passe à travers une série de canaux en plastique de faible diamètre (2,5cm) pour pénétrer dans la chambre de séchage.
 - L'air chaud traverse ensuite les claies pour sécher les produits alimentaires (les menthes). Il est aspiré ensuite par un ventilateur placé à la partie droite en haut de la chambre de séchage.
- b) **Séchoir solaire direct** : Il est constitué d'une chambre triangulaire de dimension de $(50 \times 60 \times 50) / 2 \text{ m}^3$. Les parois extérieures de la chambre sont identiques à ceux du séchoir indirect. La surface supérieure est en verre transparent assurant la transmission directe du rayonnement solaire vers les claies de séchage. L'absorbeur (en acier inoxydable peint en noire de 0.005m d'épaisseur) est placé à la partie inférieure de la chambre. Au milieu,
- Un lit de stockage thermique sous forme de pierre est placé en dessous de l'absorbeur.

- Sur la paroi gauche de la chambre une entrée d'air est placée entre l'absorbeur et la claie. L'air venant de l'extérieur balaie l'absorbeur avant s'écoulé vers la claie. L'air chargé en humidité quitte ensuite la chambre à l'aide d'un ventilateur placé au sommet.
- Un ventilateur d'une puissance électrique de 6 W (Figure III.2) sert à évacuer l'air humide vers l'extérieur.



Figure III. 2: Ventilateur.

- c) Séchage à l'air libre : a été testé aussi. Il s'agit d'une claie de séchage placée à l'air libre à l'abri du rayonnement solaire.



Figure III. 3: Claie à l'air libre.

Produit à sécher : pour cette étude nous avons choisi les menthes vertes. Une masse totale de 600 g est répartie de manière uniforme sur quatre claies de séchage : deux claies sont placées dans la chambre de séchage indirect, une claie dans la chambre directe et une claie à l'abri du rayonnement solaire (séchage à l'air libre). Chaque claie de séchage porte une masse de 150g de menthes vertes.



Figure III. 4: Menthe verte avant le séchage

III.3. Protocole expérimentale

Les échantillons de menthes sont pesés puis uniformément réparties sur les quatre claies.

Avant d'introduire les produits à sécher, il faut attendre au minimum 30 min pour que le séchoir atteigne un régime thermique établi. Les pesées des menthes sont effectuées à l'extérieur du séchoir à des intervalles de 60 min.

La mesure à l'instant t nous donne la masse humide du produit $X_h(t)$. L'expérience de séchage est arrêtée lorsque trois mesures successives de la masse des menthes affichent une différence n'excédant pas 0.01 g.

III.3.1 Les instruments de mesure expérimentale :

A. La mesure du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire globale reçue sur le plan du capteur est mesuré en W/m^2 par la station de mesures météorologiques de l'URER/MS d'Adrar avec le pyranomètre Kipp et Zonen CM11 Figure III. 5.



Figure III. 6: Pyranomètre Kipp et Zonen CM11.

B. Mesure de la température

Pour les mesures de la température dans le capteur solaire nous avons utilisé des thermocouples de type **k** relié à un système d'acquisition constitué d'une centrale d'Acquisitions de données Fluke 2638A de précision de 0,0024 % ,(Figure III.5) piloté par un ordinateur. La température est enregistrée à des intervalles de temps de 5 minutes à l'aide d'un ordinateur. Pour la mesure de la température dans la chambre de séchage nous avons utilisé une sonde à affichage numérique de marque Opus 208 de précision 0,1 %. L'enregistrement est fait chaque 20 minute. Le même type de sonde est utilisé pour le séchage à l'air libre, intervalles de l'enregistrement dans ce cas est 1h. (Figure III.6.)



Figure III. 7: Système d'acquisition

C. Mesure de L'Humidité

L'humidité relative de l'air dans la chambre de séchage est mesurée à l'aide de la même sonde Opus 208 utilisée pour la mesure de la température. (Figure.III.7)



Figure III. 8 : Sonde Opus 208.

D. Mesure de poids

La masse humide et sèche du produit est mesurée à l'aide d'une balance à affichage numérique de marque PIONEER OHAUS de précision de 0,001%. (Figure III.8)



Figure III. 9: Balance de type PIONEER OHAUS.

E. Mesure de la teneur en eau de la menthe

La détermination de la teneur en eau a été effectuée de la façon suivante : trois échantillons de menthe sont introduits pendant 24 heures à 105 °C dans une étuve., puis pesée sur une balance.



Figure III. 10 : Séchage de menthe dans le four

➤ La teneur en eau est calculée selon la formule suivante :

$$Me = \frac{M_1 - M_2}{m_0} \times 100$$

M_e : la teneur en eau

M_1 : la masse de la capsule + matière fraîche avant le séchage (g)

M_2 : la masse de la capsule + matière fraîche après le séchage à la vapeur (g)

m_0 : la masse de l'échantillon d'essai (g)

Tableau III. 1: Evolution de masse de menthe pendant le séchage dans le four.

Les enchantions chantions	chantions 1	chantions 2	chantions 3
Les masses (g)			
Cuve vide	25.944	24.906	24.748
Masse de menthe m_0	2.005	2.005	2.005
m_0 + cuve vide= M_1	27.947	26.911	26.753
Après 24h M_2	26.516	25.441	25.384

Tableau III. 2 : Quantité d'eau dans les trois enchantions de menthe.

	Me 1	Me% 2	Me% 3
Me	0.71	0.73	0.68

La teneur en eau est prise comme étant la moyenne des trois valeurs obtenues.

$$Me = 70 \%$$

- D'après cette expérience, la menthe se compose de 70% d'eau et 30% matière sèche.

III.4. L'emplacement des thermocouples dans les séchoirs

Pour mesurer la température des différents composants du séchoir solaire indirect, nous avons placé des thermocouples à différentes positions : à l'entrée du capteur ($T_{e,cp}$), au milieu de la plaque absorbante ($T_{a,i}$), sur le milieu du vitrage ($T_{v,i}$), à la sortie du capteur ($T_{s,cp}$) et sur la pierre (T_{pr}). Les températures mesurées sont présentées sur la figure III.11.

a. Séchoir direct

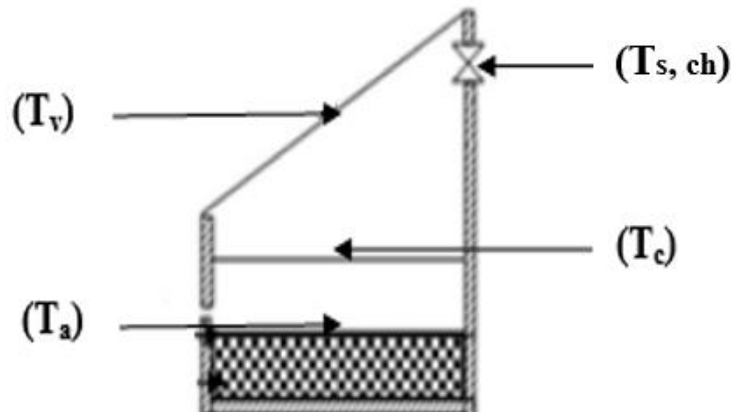


Figure III. 11: Emplacement des thermocouples et la sonde dans le séchoir direct.

La figure III.10 présente l'emplacement des différents thermocouples placés dans le séchoir direct, à savoir : l'absorbeur (T_a), le vitrage (T_v), la claie de séchage (T_c) et l'air à l'entrée ($T_{e, ch}$) et à la sortie ($T_{s, ch}$) de chambre de séchage.

b. Séchoir indirect

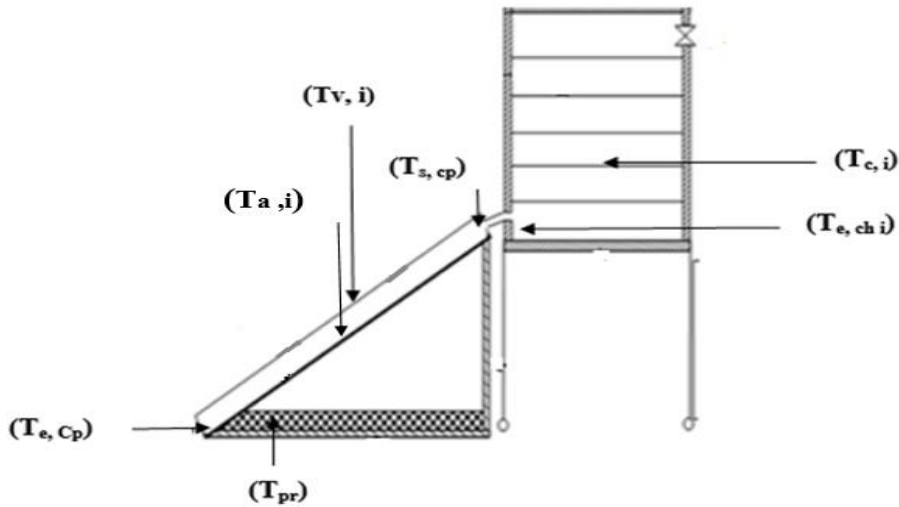


Figure III. 12 : Emplacement des thermocouples et la sonde dans le séchoir indirect.

Pour mesurer la température des différents composants du séchoir solaire indirect, nous avons placé des thermocouples à différentes positions : à l'entrée du capteur ($T_{e,cp}$), au milieu de la plaque absorbante ($T_{a,i}$), sur le milieu du vitrage ($T_{v,i}$), à la sortie du capteur ($T_{s,cp}$) et sur la pierre (T_{pr}). Les températures mesurées sont présentées sur la figure III.11.

III.5. Conditions climatiques

Les essais ont été effectués sur la plate-forme expérimentale de l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien au cours du mois de Mars 2022 à la willaya d'Adrar, Algérie. Une zone sahariennes située à $27^{\circ}53'$ Nord et $0^{\circ}17'$ Ouest à 257 m d'altitude. Le processus de séchage de la menthe a été effectué en trois méthodes différentes : séchage direct, indirect et à l'air lib

a) Rayonnement solaire

L'ensoleillement est un facteur climatique qui a une forte influence sur le procédé de séchage, Figure III .12 présente la variation du rayonnement solaire global pour la journée de l'essai 31/03/2022.

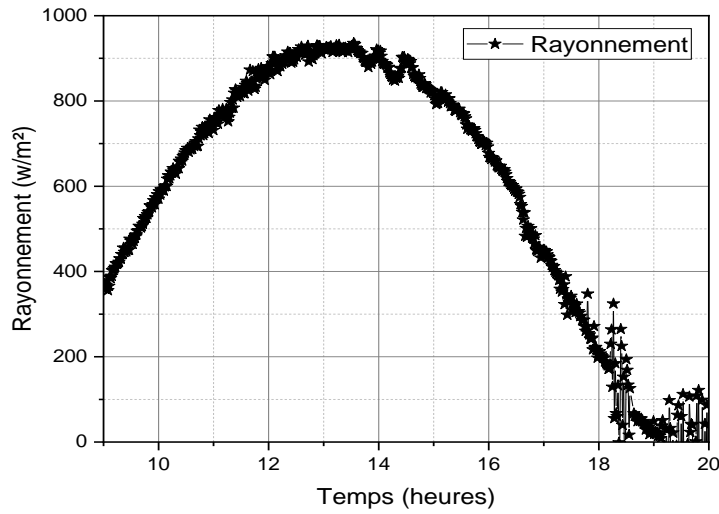


Figure III. 13 : rayonnement solaire le 31/04/2022.

L'intensité du rayonnement solaire augmente progressivement jusqu'à arriver à un maximum d'environ 940 W/m^2 vers 13h puis il marque une baisse l'après-midi. Des fluctuations sont enregistrées à cause du passage des nuages.

3.1 b) Température ambiante

Un comportement similaire est enregistré pour la température ambiante, la température arrive à un maximale d'environ 40°C vers 15h puis elle diminue. Nous remarquons que le passage nuageux constate sur la variation du rayonnement global incident a un impact immédiat et direct sur l'évolution de la température ambiante Figure III .13.

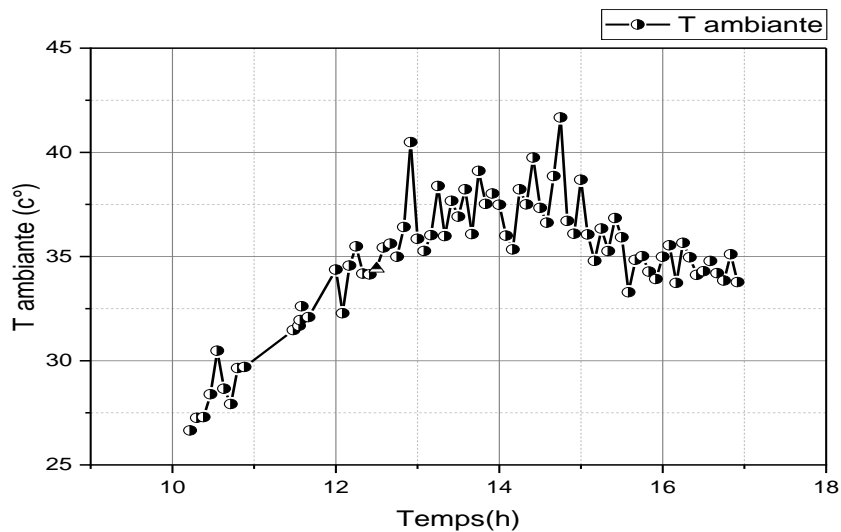


Figure III. 14 : Température ambiante de 31 mars 2022.

CHAPITRE IV :

Résultats et interprétations

Table des matières

IV.1.	Introduction.....	47
IV.2.	Comportement thermique des deux séchoirs solaires	47
IV.3.	Cinétique du séchage solaire de la menthe verte	50

IV.1. Introduction

Les expériences de séchage ont été réalisées pendant le mois de Mars 2022 pour les feuilles de la menthe verte au sein du laboratoire de recherche (URER-MS). Dans ce chapitre, nous allons présenter et discuter les résultats expérimentaux obtenus. Ce chapitre comprend deux parties. La première s'intéresse aux comportements thermiques des deux séchoirs solaires direct et indirect. La deuxième partie traite la cinétique du séchage solaire de la menthe verte.

IV.2. Comportement thermique des deux séchoirs solaires

IV.2.1. Séchoir solaire indirect

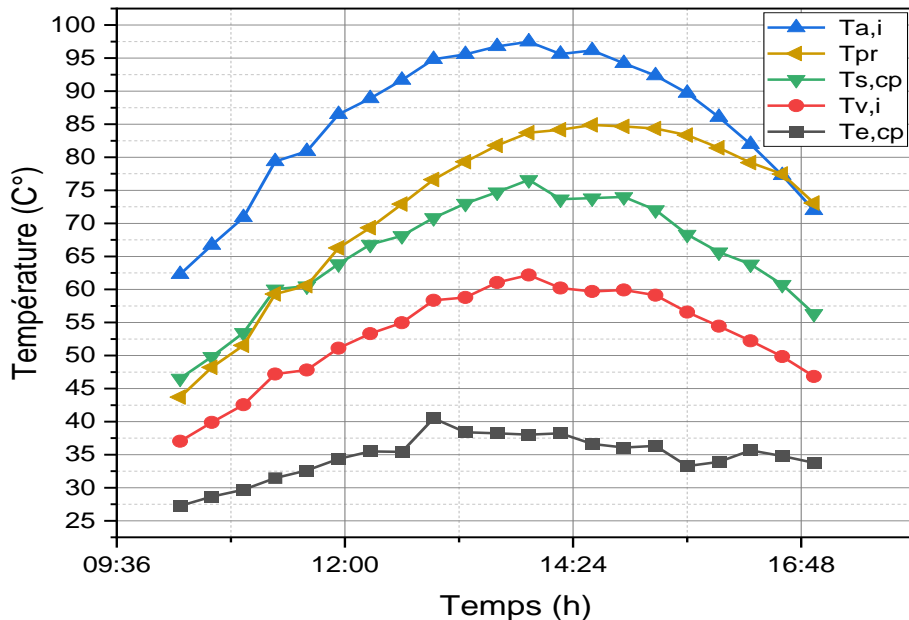


Figure IV. 1 : L'évolution des différentes températures dans le capteur solaire

La figure IV.1 présente l'évolution temporelle de la température des différents composants du capteur solaire. Nous remarquons une augmentation de la température des différents composants pendant la matinée (jusqu'à 14h) suivie par une baisse l'après-midi. Celle-ci est due aux augmentations du rayonnement solaire et de la température ambiante le matin et de leur diminution l'après-midi. L'absorbeur s'échauffe rapidement en absorbant le rayonnement solaire. Il cède une partie de sa chaleur à l'écoulement d'air venant de l'extérieur, et l'autre partie est stockée par les pierres. L'absorbeur atteint une température maximale d'environ 97°C vers 14h au moment où celle de l'air, des pierres et vitrage

atteignent 77°C, 85°C et 62°C, respectivement. L'air à la sortie du capteur peut gagner jusqu'à 35°C par rapport à sa température d'entrée.

Entre 14h et 17h, la température de l'absorbeur diminue par 23°C alors que celle des pierres diminue par 8°C. L'effet de déstockage thermique des pierres est donc assez faible en raison de son mauvais emplacement dans le capteur. Durant cette période, la diminution de la température de l'air est autour de 22.5°C assez proche de celle de l'absorbeur. Donc, l'air n'arrive pas à récupérer la chaleur restituée par les pierres puisqu'il n'y pas un contact direct des pierres avec l'air. Pour améliorer le fonctionnement du lit de stockage il est souhaitable de faire passer l'air à travers les pierres en utilisant un capteur à double passes.

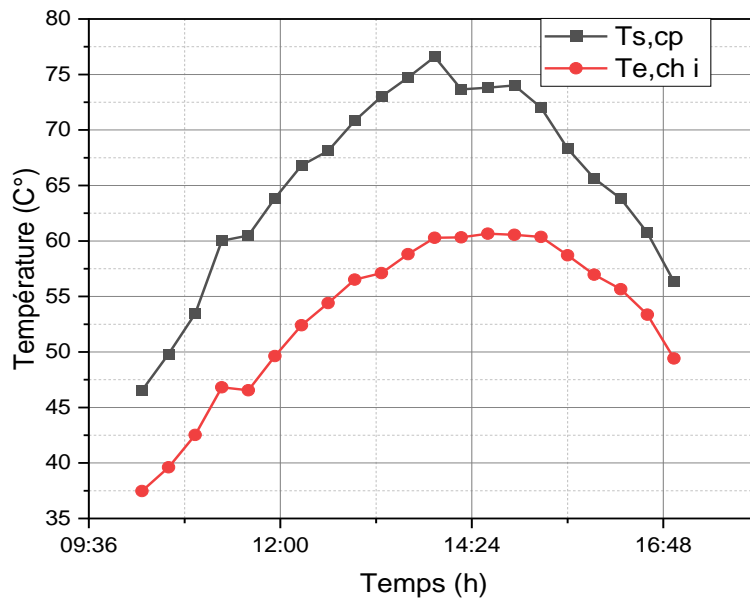


Figure IV. 2 : Comparaison des températures de l'air à la sortie de capteur et à l'entrée de la chambre de séchage.

La figure IV.2 montre une comparaison entre la température de l'air à la sortie du capteur et celle à l'entrée de la chambre de séchage ($T_{e,chi}$). La température maximale mesurée à l'entrée de la chambre est de l'ordre de 60°C. Une diminution importante est observée entre les deux températures qui peut atteindre en moyenne 12°C. Cette diminution est due aux pertes thermiques à travers les conduites reliant le capteur solaire et la chambre de séchage. Les conduites étaient fissurées, mal isolées et de faibles diamètres créant ainsi un obstacle au passage de l'air. Pour minimiser ces pertes il est nécessaire de revoir cette liaison et d'entretenir fréquemment les conduites.

IV.2.2. Séchoir solaire direct

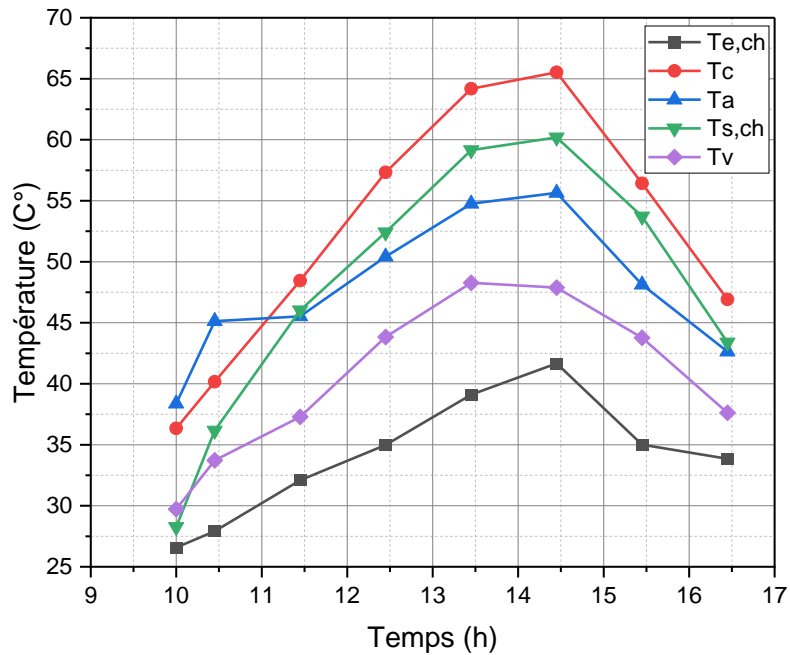


Figure IV. 3 : Evolution de la température des différents composants du séchoir direct.

La figure IV.3 présente l'évolution de la température des différents composants du séchoir direct, à savoir : l'absorbeur (T_a), le vitrage (T_v), la claie de séchage (T_c) et l'air à l'entrée ($T_{e, ch}$) et à la sortie ($T_{s, ch}$) de chambre de séchage. L'évolution de toutes les températures est similaire à l'évolution du rayonnement solaire, une augmentation le matin suivi par une réduction à partir de l'après-midi. Au début de l'expérience entre 10h et 11h, la température de l'absorbeur est la plus importante puisque le séchoir était déjà placé sous rayonnement solaire et que les claies étaient vides. Ensuite, en plant la menthe sur les claies, la température de cette dernière devient plus importante et peut atteindre jusqu'à 65 °C (à 14h). La claie reçoit la quasi-totalité du rayonnement solaire, ce qui met l'absorbeur en ombre. Cela entraîne la diminution de la température de l'absorbeur par rapport à la claie de séchage. Donc l'absorbeur ne joue plus son rôle comme chauffeur de l'air. Le lit de stockage thermique placé en dessous de l'absorbeur joue un rôle assez faible dans ce séchoir solaire.

Nous remarquons aussi que la température de l'air à la sortie peut atteindre un maximum d'environ 60°C et diminue à environ 45°C vers 16h30. Cette plage de température est favorable pour le séchage et peut nous encourager à ajouter une autre claie de séchage dans cette chambre.

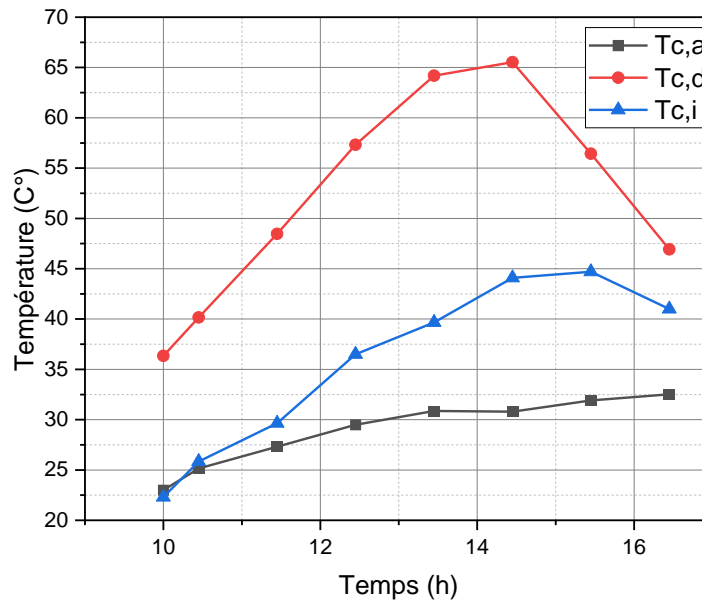


Figure IV. 4 :Evolution de la température de l’air sur les claies dans les séchoirs direct, indirect et à l’air libre.

La figure IV.4 présente l’évolution de la température de l’air au niveau de la claie dans les trois cas : séchoirs direct, indirect et à l’air libre. Les températures des claies dans les séchoirs montrent un comportement similaire, une augmentation importante le matin suivi par une baisse l’après-midi. Le maximum de température enregistré est de 65°C et 45°C pour les séchoirs direct et indirect, respectivement. Pour le séchage à l’air libre, la température maximale atteinte est de l’ordre de 32.5°C. Ces résultats montrent clairement l’influence du rayonnement solaire par effet de serre et l’importance des séchoirs dans l’élévation de température de l’air.

IV.3. Cinétique du séchage solaire de la menthe verte

La courbe de séchage représente la variation de la teneur en eau X dans le produit à sécher en fonction du temps t . Elle indique la vitesse de séchage en fonction du temps t . Les courbes obtenues expérimentalement s’obtiennent en suivant l’évolution de la masse humide du produit M_h en cours de séchage par pesées successives jusqu’à atteindre la teneur en eau finale X_{fin} .

IV.3.1. Séchoir solaire direct

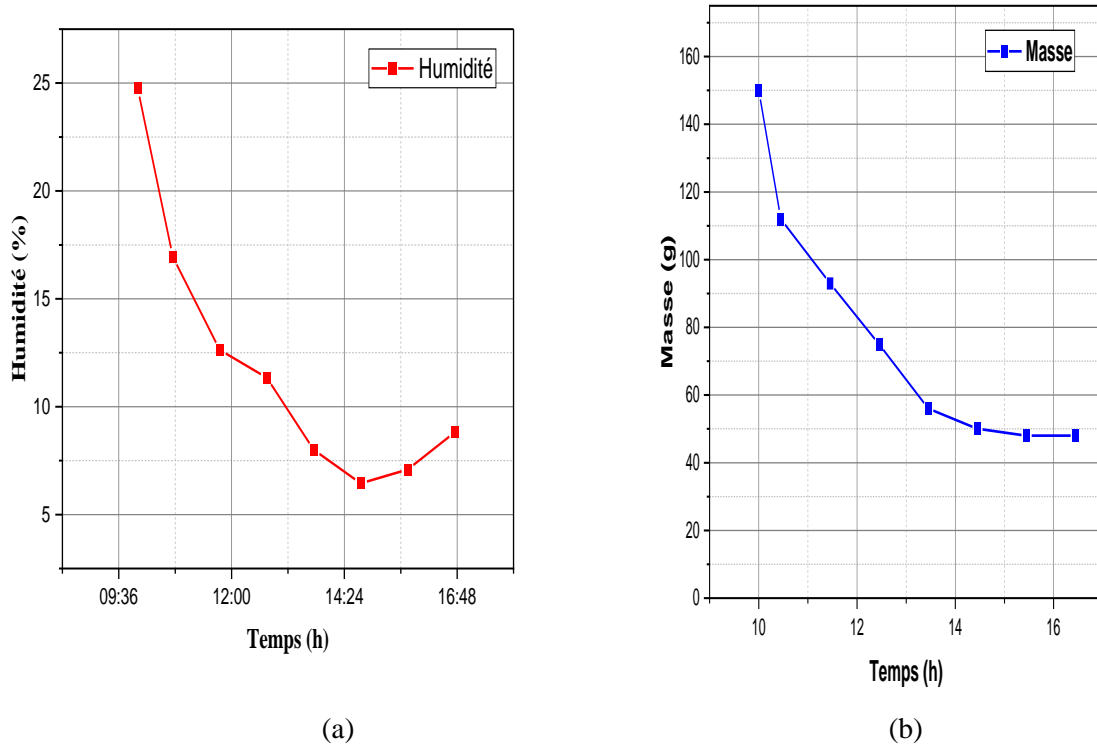


Figure IV. 5: Evolution (a) de l'humidité d'air sur la claie et (b) de la masse des menthes avec séchage direct.

La figure IV.6 présente l'évolution de l'humidité d'air sur la claie et de la masse des menthes. Durant le processus de séchage, l'humidité de l'air varie dans la chambre de séchage particulièrement au niveau de la claie où l'air porte l'eau évaporée par les menthes. Initialement, les menthes contiennent une masse importante de l'eau (70%) qui s'évapore rapidement au début de séchage et diminue avec le temps. La vapeur d'eau est évacuée par l'air ce qui explique la montée rapide de l'humidité au début de séchage (25%) et sa diminution au cours du temps. Ce phénomène se traduit par la diminution de la masse du produit. La masse des menthes a diminué de 150 gr au début de séchage à environ 49 gr vers 14h30. Ensuite, une stabilisation de la masse des menthes est enregistrée marquant la fin de séchage (figure IV.6). Nous remarquons une augmentation de l'humidité qui revient à la diminution du rayonnement solaire et de la température de l'air car l'humidité varie inversement avec la température.



Figure IV. 7: La menthe après le séchage dans le séchoir direct.

IV.3.2. Séchoir solaire indirect

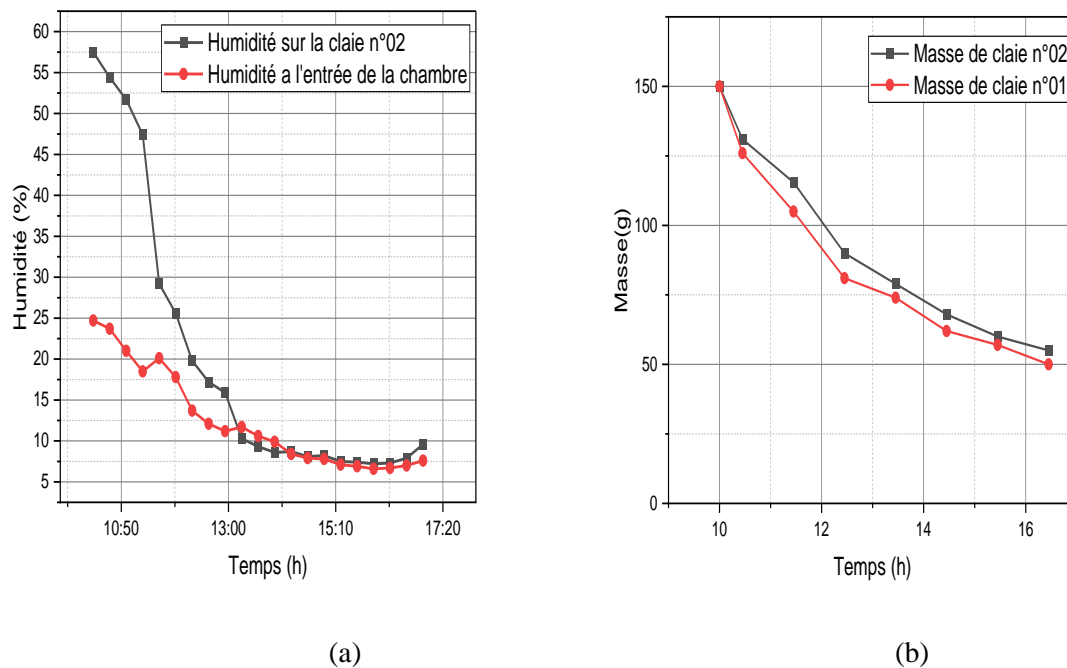


Figure IV. 8: Evolution (a) de l'humidité de l'air dans la chambre et (b) de la masse des menthes dans les deux claies avec séchage indirect.

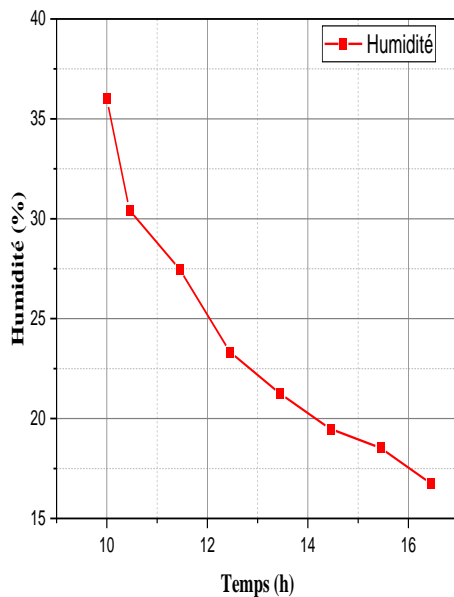
La figure IV.7 (a) présente la variation de l'humidité à l'entrée de la chambre de séchage et sur la deuxième claie. On remarque une humidité importante de l'air au niveau de la claie-2 au début de séchage (57%). L'air venant du capteur passe tous d'abord à travers la première claie chargée en menthe puis la deuxième. Ainsi, il absorbe la vapeur d'eau dégagée par la première claie plus la vapeur de la deuxième claie, ce qui explique la différence entre l'humide à l'entrée de la chambre et au niveau de la claie-2. A partir de 14h, l'humidité au niveau de la

claie 2 est légèrement supérieure à celle de l'entrée, l'eau dans le produit est presque épuisée, c'est la fin de séchage. L'évaporation de l'eau entraîne la diminution de la masse du produit. La figure IV.b montre une diminution de la masse des menthes dans les deux claies de 150 gr à environ 50 gr. Une légère différence est remarquée entre les deux claies due à ses positions vis à vis l'écoulement d'air.

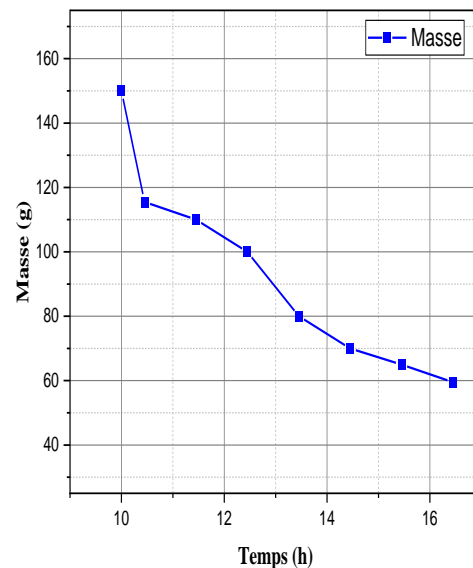


Figure IV. 9 : La menthe après le séchage dans les deux claies de séchoir indirect

IV.3.3. Séchage à l'air libre



(a)



(b)

Figure IV. 10: Evolution au cours du temps (a) de l'humidité de l'air au niveau de la claie et (b) de la masse avec séchage à l'air libre.

La figure IV.9 (a) présente la variation de l'humidité au niveau de la claie et la masse des menthes en fonction du temps. L'humidité initiale dans ce cas est légèrement plus élevée (36%) par rapport au séchoir direct car l'air n'a pas subi un chauffage avant passé à travers la claie. Comme les cas précédents, l'humidité et la masse diminuent rapidement au début de séchage et lentement à la fin du séchage. A 17h, les menthes arrivent à une masse de 60 gr sans marquer une stabilisation du poids. Le processus de séchage n'est pas encore terminé et nécessite plus du temps.



Figure IV. 11: La menthe après le séchage à l'air libre.

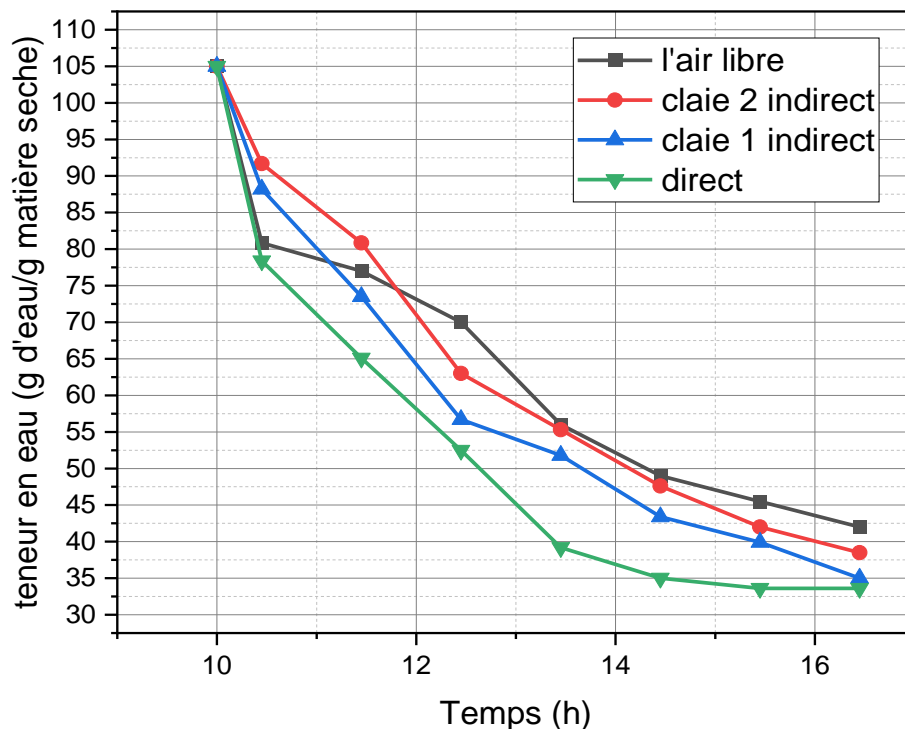


Figure IV. 12: Variation de la teneur en eau pour les trois cas: séchages direct, indirect et à l'air libre.

La variation de la teneur en eau avec le temps pour différentes configurations de séchage est présentée sur la figure IV. 11. Il est évident que la variation de la teneur en eau comporte deux périodes, une période de diminution rapide suivi par une période où la diminution devient lente. La vitesse de diminution varie d'un cas à un autre à cause de variation des conditions de la température et d l'humidité à l'entourage des claies. Plus la température est élevée plus la vitesse de séchage est importante, cela apparait clairement dans le cas du séchoir solaire direct.

IV .4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats obtenus à travers les différents tests expérimentaux réalisés pour analyser le comportement thermique de trois systèmes de séchages solaire, à savoir : direct, indirect et à l'air libre

Ces expériences ont permis de déterminer l'évolution de l'humidité relative de l'air et la température des différents composants des séchoirs solaires.

La cinétique de séchage a été analysée en suivant la réduction de la masse humide des menthes au cours de séchage. Les principales conclusions tirées sont :

- Dans le séchoir solaire indirect, une fluctuation de 22.5°C est marquée dans l'évolution de la température de l'air de séchage. La pierre est loin de l'écoulement d'air ce qui empêche la restitution de la chaleur stocké vers l'air.
- Une perte thermique considérable (jusqu'à 12°C) est observée entre la sortie du capteur et l'entrée de la chambre de séchage ce qui peut provoquer une réduction des performances du séchoir.
- La comparaison entre la température de séchage dans les trois modes de séchage a montré l'influence du rayonnement solaire et l'importance d'utiliser un séchoir solaire pour élever la température de l'air de séchage.

Conclusion Générale

Le travail élaboré dans le cadre du présent mémoire de fin d'études porte sur l'analyse expérimentale du comportement thermique du séchage solaire des menthes par trois procédés du séchage : direct, indirect et à l'air libre. La qualité du séchage obtenu porte sur l'analyse de la cinétique de séchage des menthes en suivant l'évolution de la réduction de la masse humide contenue dans le produit au cours du temps. Le séchoir solaire utilisé a été conçu, fabriqué et testé à l'unité URER-MS à Adrar, Algérie. Les expériences se sont déroulées durant le mois de mars 2022. Les principales conclusions tirées à la fin de cette étude sont :

1. La température de l'air à la sortie du séchoir direct est assez élevée, nous proposons d'ajouter une deuxième claie dans la chambre de séchage pour valoriser cette chaleur perdue.
2. La comparaison entre la température de séchage dans les trois modes de séchage a montré l'intérêt du rayonnement solaire dans le séchage des produits alimentaires.
3. L'analyse de la cinétique de séchage a montré que la teneur en eau dans la menthe a diminué plus rapidement dans le séchoir solaire direct grâce à la température élevée atteinte dans ce dernier.
4. Dans le capteur solaire du séchoir solaire indirect, la température de l'air à la sortie diminue rapidement par 22.5°C après 14h. Loin de l'écoulement d'air, la position du lit thermique réduit considérablement la récupération de la chaleur stockée. Un changement d'emplacement est donc nécessaire pour améliorer le fonctionnement du lit stockage.
5. Des pertes thermiques considérables (jusqu'à 12°C) sont observées entre la sortie du capteur et l'entrée de la chambre de séchage qui réduit les performances du séchoir. Un entretien technique des conduites ou un remplacement par un canal plus large semble nécessaire pour minimiser ces pertes.
6. Dans le séchoir solaire direct, positionner l'absorbeur sous les claies de séchage ne remplit pas son rôle. Ainsi, l'unité de stockage thermique placée en dessous de l'absorbeur ne peut pas fonctionner correctement.

Référence

- [1] Mujumdar, A.S. and A.S. Menon, *Drying of solids: principles, classification, and selection of dryers*. Handbook of industrial drying, 1995. **1**: p. 1-39.
- [2] Mujumdar, A.S., *Guide pratique du séchage industriel Application, principes, équipements et nouveau développement*. Sakamon Devahastin, Montréal Exegex Corporation, Quebec., 2000.
- [3] S.Khalidi. Etude numérique du comportement thermique d'un séchoir solaire utilisant un lit thermique pour le stockage d'énergie. Autre. Université Bourgogne Franche-Comté; Université Abou Bekr Belkaid (Tlemcen, Algérie), 2018. Français. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01879901/document>.
- [4] D.MENNOUCHE.(2006).Valorisation des produits agro-alimentaires et plantes médicinales par les procédés de séchage solaire. Mémoire de Magister: Université Kasdi Merbah. Ouargla.
- [5] M.Kouhila, A.Belghit, B.C.Boutaleb. Etude Expérimentale du Séchage Convectif de la SAUGE dans un Séchoir Solaire muni d'un Appoint Electrique. Revue des Energies Renouvelables. pp. 33-38, Algérie, 2000.
- [6] Bennamoun, L., Reviewing the experience of solar drying in Algeria with presentation of the different design aspects of solar dryers. Renewable and Sustainable
- [7] Rahman, M., Prospect & future of solar dryer in bangladesh. International Conference on Mechanical Engineering and Renewable Energy 2013, December 2013.
- [8] Megha S. Sontakke, P.S.P.S., Solar Drying Technologies. Journal of Engineering and Science (IRJES), April 2015. **4**(4): p. 29-35.
- [9] Yuan, G., et al., Experimental Investigation of a Solar Dryer System for Drying Carpet. EnergyProcedia, 2015. **70**: p. 626-633.
- [10] Mustayen, A.G.M.B., S. Mekhilef, and R. Saidur, Performance study of different solar dryers: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014. **34**: p. 463-470.
- [11] Pranav C. Phadke, P.V.W., and Vilayatrai M. Kriplani, INDIRECT SOLAR DRYERS. ARPNJournal of Engineering and Applied Sciences, MAY 2015. **10**.

[12] Abdallah, L.A.-B., Etude Numérique d'une Cheminée Solaire à MCP Intégré Destinée à la Ventilation d'un Séchoir Solaire 2016 /2017, kasdi merbah -ouargla.

[13] /http://www.theses.rnu.tn/fr/dynamique/uploads/af8acf1791bd19fc4db9b3a4a3409a10.pdf

[14] <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.119956>

[15] <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101703>

[16] <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.05.040>

[17] <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.255>

[18] <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.562>

[19] <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101863>

[20] <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.11.038>

[21] <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.02.015>

[22] <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124421>

[23] <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101466>

[24] <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118809>

[25] <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.09.037>

Résumé

Le séchage est un procédé de conservation des produits agroalimentaires et des plantes aromatiques et médicinales. Il existe plusieurs types de séchage selon la nature du produit à sécher. Pour les plantes aromatiques qui admettent une teneur en eau élevée, le séchage à basse température comme le séchage solaire se présente comme une solution adéquate, économe en énergie et respectueuse de l'environnement. Elle ne détériore pas le produit et elle conserve les arômes et les huiles essentielles. Afin d'étudier et d'améliorer le procédé de séchage solaire des plantes aromatiques, on a réalisé dans ce travail une étude expérimentale de séchage de feuilles de menthe verte à l'air libre et par l'intermédiaire d'un séchoir solaire indirect et direct à convection forcée, fabriqué à (URER.MS). Cette étude, nous a permis de déterminer le comportement thermique des trois procédés de séchages (direct, indirect, l'air libre) et la cinétique de séchage du produit, aussi l'influence de types de séchoir sur la durée de séchage.

Mots clés

Séchage solaire, menthe verte, séchoir direct, séchoir indirect, séchage à l'air libre, cinétique de séchage.

Abstract

Drying is a conservation process for food products and aromatic and medicinal plants. There are several types of drying process depending on the nature of the product to be dried. For the aromatic plants which admit a high level of water content, the drying at low temperature like the solar drying appears as an adequate solution, it is economic in energy, and respectful to the environment. It does not deteriorate the product and preserves the aromas and essential oils. To study and improve the process of solar drying of aromatic plants, an experimental study was conducted for the drying of green mint leaves through three solar drying processes: direct, indirect, and open air drying. The solar dryer used is designed, manufactured and tested at the research unit URER-MS in Adrar, Algeria. This study allowed us to analyze the thermal behavior of the three drying processes and the drying kinetics of the product.

Keywords

Solar drying, green mint, direct dryer, indirect dryer, open air drying, drying kinetics.

المخلص

التجفيف هو عملية للحفاظ على المنتجات الغذائية والنباتات العطرية والطبية. هناك عدة أنواع من التجفيف حسب طبيعة المنتج المراد تجفيفه. بالنسبة للنباتات العطرية التي تحتوي على نسبة عالية من الماء، فإن التجفيف بدرجة حرارة منخفضة، مثل التجفيف الشمسي، يقدم على أنه حل مناسب وموفر للطاقة وصديق للبيئة. لا يفسد المنتج ويحافظ على الروائح والزيوت الأساسية. لدراسة وتحسين عملية التجفيف الشمسي للنباتات العطرية، قمنا بتنفيذ هذا العمل، وهو دراسة تجريبية لتجفيف أوراق النعناع بواسطة الهواء الطلق ومجفف شمسي غير مباشر ومباشر، تم تصنيعه في وحدة أبحاث الطاقات المتجددة في البيئة الصحراوية (URER.MS) سمحت لنا هذه الدراسة بتحليل السلوك الحراري لعمليات التجفيف الثلاث وحركية التجفيف للمنتج.

الكلمات المفتاحية:

التجفيف الشمسي، النعناع الأخضر، التجفيف المباشر، التجفيف غير المباشر، التجفيف بالهواء الطلق، حركية التجفيف