

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université des frères Mentouri Constantine 01
Faculté des Sciences de la Technologie
Département de Génie Climatique

N° d'ordre :

N° de Série :

Thèse intitulée :

**CONTRIBUTION À
L'AMÉLIORATION DES
PROCÉDÉS DE SÉCHAGE**

**Présentée par :
Raouf Amouiri**

**Pour l'obtention du diplôme de
Doctorat LMD en Sciences & Technologie**

Option : Génie Climatique

Soutenue le : 29/09/2022

Devant le jury de thèse :

Président :	Abdennacer KABI	Pr	Univ des frères Mentouri. Constantine 1
Rapporteur :	Azeddine BELHAMRI	Pr	Univ des frères Mentouri. Constantine 1
Examineurs :	Zinelabidine MAHRI	Pr	Univ des frères Mentouri. Constantine 1
	Cherif BOUGRIOU	Pr	Univ Mustapha Ben Boulaid. Batna 02
	Messaoud GUELLAL	Pr	Univ Ferhat Abbas. Sétif 01

Département de Génie Climatique

2022

الملخص

أصبح تأثير الزيادة المفرطة في تكلفة الطاقة محسوسا على عمليات التصنيع أو التحويل التي تستعمل التجفيف. ويعتبر تجفيف النباتات الطبية والعشبية واحد من هاته التطبيقات التحويلية. كما تعد النباتات الطبية والعشبية مستودع هائل للعديد من المكونات النشطة والزيوت الأساسية التي تستخدم بشكل أساسي في إنتاج المستحضرات الصيدلانية والادوية.

في إطار هذا العمل، تم إجراء تجارب عملية بالإضافة إلى محاكاة عددية (رقمية) من اجل التحليل الدقيق لعملية تجفيف أوراق الريحان *Myrtus Communis* وكماتم استخلاص حركية تجفيف *Drying kinetics* لأوراق الريحان *Myrtus Communis* من خلال مجفف شمسي لا يعرض المنتج الي اشعة الشمس المباشرة، في مدينة قسنطينة، بالجزائر، وتم تحديد تجارب الامتصاصية *Sorption Isotherm* في المختبر باستخدام طريقة القياس الثابتة. حيث استخدمت هذه البيانات التجريبية القيمة في المحاكاة الرقمية، لتقريب النمذجة من ظاهرة التجفيف الحقيقية .

تم إجراء الحساب الرقمي من خلال طريقة العناصر المنتهية *FEM* باستخدام برنامج *Comsol Multiphysics*. تساعد النمذجة الرقمية في التنبؤ بتوزيع الهواء داخل المجفف الشمسي وبالتالي تساهم في تجنب نمو الميكروبات وتسمم الاوراق.

كلمات مفتاحية: تجارب الامتصاصية، حركية التجفيف، مجفف شمسي غير مباشر، ورق الريحان، تشخيص تجريبي، محاكات عددية، انتشار الحرارة وسريان المواد، تدفق صفحي، تدفق غير منتظم، اشعة الشمس، حركية الموائع.

Résumé

Récemment, Les plantes herbacées et médicinales sont des contenances massives de multiples composants actifs et des huiles essentielles, qui sont principalement utilisées dans la production pharmaceutique, la parfumerie etc.

Dans ce travail, des expériences en plus des simulations numériques ont été réalisées pour bien analyser la procédure de déshydratation des feuilles de *Myrtus Communis* L. La cinétique de séchage des feuilles de *Myrtus Communis* L a été déterminée dans un séchoir solaire indirect construit dans la région de Constantine, en Algérie. Les isothermes de sorption ont été obtenues au laboratoire en utilisant de la méthode gravimétrique statique. Ces données expérimentales ont été utilisées dans la simulation numérique pour rapprocher la modélisation au phénomène réel.

Le calcul numérique a été établi par la méthode des éléments finis en utilisant le software Comsol Multiphysics.

La modélisation numérique aide à limiter la croissance microbienne et la contamination due à la distribution inadéquate de l'air asséchant et permet d'optimiser le design des séchoirs.

Mots Clés : Séchoir solaire indirect, *Myrtus Communis* L, Caractérisation expérimentale, Cinétique de séchage, Courbe de sorption, Simulation numérique Transferts de masse et de la chaleur, Écoulement laminaire et turbulent, Irradiation Solaire, CFD.

Abstract

Recently the influence of the huge increase in energy cost has had an impact on the Manufacturing or transformation process where drying is implemented. Herbal and medicinal plants dehydration is among these applications.

Medicinal plants are a massive holder of multiple active components, and essential oils, which are principally used in pharmaceutical production, perfumery... etc.

In the present study, experiments besides a simulation have been carried out for analysing well the *Myrtus Communis* leaves dehydration procedure.

Drying kinetics for the *Myrtus Communis* leaves has been pointed out in an indirect solar dryer in Constantine area, (Algeria), and sorption isotherms experiments have been defined in a laboratory using the static gravimetric method. These valuable experimental data have been used in the numerical simulation in order to approximate the modelling to the real phenomena.

Numerical simulation has been carried out using the finite element method by the use of the closed source package Comsol Multiphysics.

Predict airflow distribution inside a solar dryer helps in avoiding microbial growth and contamination, as well as optimizing dryers design.

Key Words: Indirect Solar dryer, *Myrtus Communis* L, Experimental Characterisation, Drying kinetics, Sorption isotherms, Numerical simulation, Heat and mass transfer, Laminar and turbulent flow, Solar irradiation, CFD.

Table De Matière

ملخص.....	i
Résumé.....	ii
Abstract.....	iii
Table De Matière	v
Liste des Figures	x
Liste des Tableaux	xiii
Liste des Abréviations.....	xiv
Remerciements.....	xvi
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
Objectives de la these.....	2
CHAPITRE 1 : LE SÉCHAGE INDUSTRIEL ET SOLAIRE	4
1.1. Introduction	5
1.2. Le séchage dans les différents secteurs.....	5
a) Le séchage dans les différents secteurs.....	5
b) Les graines et les céréales	5
c) Fruits et végétales	6
d) Viand	6
e) Suspensions	6
f) Industrie pharmaceutique.....	6
g) Plantes et herbes médicinales	6
h) Papier	7
i) Matériaux de construction (bois & céramique.....	7
j) La boue	7
1.3. Modes de séchage	8
1.3.1. Séchage solaire a air libre	8
1.3.2. Séchage convectif.....	8
1.3.3. Séchage par atomisation	8
1.4. Les sècheurs solaires	10
1.4.1. Classification des sècheurs solaires.....	11
1.4.1.1. Classification selon l'exposition au soleil.....	11
1.4.1.1.1. Séchoir solaire direct.....	11
1.4.1.1.2. Séchoir solaire indirect.....	12
1.4.1.1.3. Séchoir mixte	13
1.4.1.2. Le mouvement d'air à l'intérieur de séchoir.....	13

1.4.1.2.1. Système passive (circulation d'air naturelle).....	13
1.4.1.2.2. Système active (circulation d'air forcé).....	14
1.4.1.3. La masse de production.....	14
1.4.1.3.1. Cabine	14
1.4.1.3.2. Tunnel	14
1.4.1.4. La forme du capteur solaire.....	16
1.4.1.4.1. Plan.....	16
1.4.1.4.2. Cylindro-parabolique	16
1.4.2. Les séchoirs hybrides.....	17
1.4.2.1. Électrique	18
1.4.2.2. Pompe à chaleur	18
1.4.2.3. Biomasse	19
1.4.2.4. LPG (gaz de pétrole liquéfiés).....	20
1.4.2.5. Diesel.....	22
1.4.2.6. Eau usée & géothermique.....	23
1.4.3. Les systèmes de stockage d'énergie utilisé dans le séchage solaire	24
1.4.3.1. L'utilisation de matériaux à changement de phase (mcp).....	24
1.4.3.2. L'utilisation des matériaux de stockage par chaleur sensible.....	25
1.5. Séchage des herbes et plantes médicinales.....	25
CHAPITRE 2 : CINÉTIQUES DE SÉCHAGE & MODÈLES DE COUCHE MINCE.....	27
2.1. Cinétique de séchage.....	28
a) Introduction	28
b) Cinétique de séchage.....	28
2.2. Matériaux poreux hygroscopique et capillaire.....	29
2.3. Traitement phénoménologique du processus dans les séchoirs.....	30
a) Séchage en couche épaisse	30
b) Séchage en couche mince.....	30
2.4. Formulation mathématique des modèles de la couche mince.....	31
2.4.1. Modèles de la couche mince.....	31
2.4.1.1 Modèles théoriques	32
2.4.1.2. Modèles semi-théorique.....	32
a) Modèles drivé depuis la deuxième loi de Fick	33
b) Modèles drivé depuis la loi de Newton	34
2.4.1.3. Modèle empiriques.....	34
CHAPITRE 3 : COURBES DE SORPTION & ACTIVITÉ DE L'EAU	35

3.1. Phenomene de sorption.....	36
3.1.1. Introduction.....	36
a) Activité en eau.....	36
b) Teneur en eau.....	37
3.1.2. Isothermes de sorption.....	37
3.1.2.1. Définition.....	37
3.1.2.2. L'effet d'hystérésis.....	38
3.1.2.3. Forme des courbes de sorption.....	38
3.2. Activité d'eau et stabilité.....	39
3.2.1. Changements influencé par la variation dans l'activité en eau.....	39
3.2.2. Le développement microbien.....	39
3.2.3. Les réactions enzymatiques.....	40
3.2.4. Les réactions non-enzymatiques et l'oxydation des lipides.....	40
3.2.5. Changement dans la texture.....	40
3.3. Méthodes expérimentales de détermination des courbes de sorption.....	41
3.3.1. Méthode gravimétrique.....	41
3.3.2. Les méthodes hygrométriques.....	43
3.3.2.3. Utilisant un système de sorption du vapeur dynamique.....	43
3.3.2.3. Utilisant du câble électrique.....	43
3.3.2.3. Utilisant des cheveux ou des polymères.....	44
3.3.3. Méthode manométrique.....	44
3.4. Les modèles empiriques et théoriques des courbes de sorption.....	44
a) Le modèle Langmuir.....	45
b) Le modèle BET.....	45
c) Le modèle GAB.....	46
d) Le modèle Halsey.....	46
e) Le modèle chung and pfost modifie.....	46
f) Le modèle de Smith.....	47
j) Le modèle Iglesias-Chirife.....	47
h) Le modèle Bradley.....	47
i) Le modèle de Curie.....	48
j) Le modèle de Chen.....	48
k) Le modèle d'Owsin.....	48
l) Le modèle de Peleg.....	48
l) Le modèle de LESPAM.....	49
3.5. La chaleur de mouillage [chaleur de sorption].....	49

CHAPITRE 4 : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE I : OBTENTION DES COURBES DE SORPTION & DE L'ACTIVITÉ DE L'EAU DU MYRTUS COMMUNIS...

.....	51
4.1. Le Myrtus Communis L.....	52
4.1.1. Introduction.....	52
4.1.2. Histoire et utilisation traditionnelle	53
4.1.3. L'utilisation de myrtus communis à travers le mode.....	53
4.1.4. Caractère botanique de Myrtus Communis L.	54
4.1.5. Composition de Myrtus Communis L.....	54
4.1.5.1. L'huile essentielle de myrte et ses composants	55
4.1.5.2. Composants phénoliques du myrte.....	55
4.2. Expérimentations	55
a) Préparation de la solution saline	57
b) Détermination d'un point sur une courbe de sorption	59
c) Détermination de la masse sèche.....	59
4.3. Analyse des donnees.....	60
4.3.1. Critères de choix d'un modèle par une régression numérique (non linéaire).	60
4.3.2. Les coefficients de régression.....	61
4.3.2.1. Chi-carré (χ^2).....	61
4.3.2.2. R-carré (r^2).....	62
4.3.3. Résultats des isothermes de sorption.	63

CHAPITRE 5 : ÉTUDES EXPÉRIMENTALES II : OBTENTION DES COURBES DE CINÉTIQUE DE SÉCHAGE & SÉCHAGE SOLAIRE DU MYRTUS COMMUNIS..... 71

5.1. Introduction.....	72
5.2. Équipements	72
5.2.1. Séchoir solaire indirect	72
a) Chambre de séchage	75
b) Panneaux solaire	75
c) Gaine flexible isolé	76
d) Instruments de mesure	76
5.2.2. Détermination de la surface d'échange.....	78
5.3. Résultats de cinétique de séchage	80

CHAPITRE 6 : MODÉLISATION MATHÉMATIQUE DES PHÉNOMÈNES DE TRANSPORT DANS UN SÉCHOIR SOLAIRE... 86

6.1. Modélisation mathématique.....	87
6.1.1. Modélisation du séchage convectif.....	87

6.1.1.1. Concept multi.....	87
6.1.1.2. Multi-échelle.....	87
6.1.1.3. Multi-physiques.....	88
6.1.1.4. Multi-phase.....	89
6.1.2. Procédure de résolution commune des problèmes du séchage convectif.....	89
6.2. Modélisation du séchoir solaire étudié.....	92
6.2.1. Formulation mathématique.....	92
6.2.1.1. Hypothèses de travail.....	92
6.3. La méthode des éléments finis.....	99
6.3.1. Procédure de la résolution.....	99
a) Les méthodes directes.....	100
b) Les méthodes itératives.....	100
6.3.2. Modélisation du processus de transport.....	100
a) Approche de couplage entier (fully coupled approach).....	100
b) Approche de ségrégation.....	101
6.3.3. Convergence et stabilité numérique.....	101
6.3.4. Stabilité numérique.....	102
6.3.4.1. Diffusion rectiligne (Streamline).....	102
6.3.4.2. Diffusion orthogonal (Crosswind).....	103
6.3.4.3. Diffusion isotrope.....	103
6.4. Maillage.....	103
6.4.1. Raffinement global par un maillage adaptatif.....	104
CHAPITRE 7 : SIMULATION & INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS (CFD).....	105
7.1. Résultats et discussions.....	106
a) Étude Paramétrique.....	110
b) Modélisation d'un séchoir dans un régime permanente avec un flux laminaire.....	111
c) Modélisation du phénomène de séchage de la menthe dans un séchoir ou le régime instationnaire avec un flux turbulent.....	111
d) Modélisation du phénomène de séchage de la plante de Myrtus Comminus L dans un séchoir ou le régime instationnaire avec un flux turbulent.....	113
7.2. Confrontation des résultats.....	115
CONCLUSION GÉNÉRALE & PERSPECTIVES.....	119
ANNEXES.....	121
REFERENCES.....	127
TRAVAUX SCIENTIFIQUE.....	138

Liste des Figures

- Figure 1.1 : Sécheur vertical à pulvérisation (Cyclone).
- Figure 1.2 : Classements des séchoirs solaires.
- Figure 1.3 : Séchoir solaire direct.
- Figure 1.4 : Séchoir solaire type indirect avec appoint électrique.
- Figure 1.5 : Séchoir solaire mixte.
- Figure 1.6 : Séchoir solaire mixte à convection forcée.
- Figure 1.7 : Tunnel de séchage installé à l'université royale d'agriculture de la Cambodge.
- Figure 1.8 : Collecteur Solaire Plan.
- Figure 1.9 : Séchoir solaire mixte avec un concentrateur cylindro-parabolique.
- Figure 1.10 : Séchoir solaire utilise un agent calorifique chauffé à travers un concentrateur cylindro-parabolique.
- Figure 1.11 : Séchoir solaire relie par une pompe à chaleur doté par un Contrôleur PID.
- Figure 1.12 : Séchoir solaire hybride type biomasse pour séchage des poissons.
- Figure 1.13 : Séchoir hybride solaire-LGP pour sécher les champignons.
- Figure 1.14 : Séchoir hybride GPL pour sécher les bananes.
- Figure 1.15 : Séchoir hybride solaire diesel pour sécher les poissons.
- Figure 1.16 : Séchoir solaire hybride avec un appoint d'énergie géothermique.
- Figure 1.17 : Séchoir solaire indirect à convection naturelle doté par des matériaux a changement de phase.
- Figure 1.18 : Collecteur d'un séchoir solaire indirect à convection forcé doté par des matériaux de stockage sensible (béton, sable, roche).
- Figure 2.1 : différents formes des courbes caractéristiques de séchages pour multiple produit (van Brakel & Heertjes, 1978).
- Figure 2.2 : la vitesse de séchage d'un matériau poreux(van Brakel & Heertjes, 1978).
- Figure 3.1 : Phénomène d'hystérésis (Arsdel, 1983).
- Figure 3.2 : Phénomène d'hystérésis au niveau des capillaires (Arsdel, 1983).
- Figure 3.3 : Les formes de courbe de sorption (Marinos-Kouris & Maroulis, 2006).
- Figure 3.4 : L'activité d'eau et les développements des micro-organismes dans les produits biologiques (Fontana & Campbell, 2004).
- Figure 3.5 : Schéma d'système dynamique à vapeur utilise dans la détermination de l'isotherme de sorption (Marinos-Kouris & Maroulis, 2006).
- Figure 4.1 : Plant de Myrtus Comminus (<http://www.medipalm.com/fr>).
- Figure 4.2 : La procédure expérimentale de la détermination des courbes de sorption.
- Figure 4.3 : Feuille de la plante Myrtus Comminus suspendu dans une solution saline.
- Figure 4.4 : Préparation de la solution saline à l'aide de la norme [NF EN ISO 12571].
- Figure 4.5 : L'emplacement des produits dans des ambiances métrisé.
- Figure 4.6 : Séchage dans une étuve a une température 105 °C.
-

Figure 4.7 : La pesée des échantillons et la détermination de la masse sèche.

Figure 4.8 : L'effet de température sur l'isotherme de l'adsorption.

Figure 4.9 : L'effet de température sur l'isotherme de désorption.

Figure 4.10 : Courbe d'adsorption à une température de 28°C régressée par le modèle de GAB.

Figure 4.11 : Courbe d'adsorption à une température de 40°C régressée par le modèle de GAB.

Figure 4.12 : Courbe d'adsorption à une température de 50°C régressée par le modèle de GAB.

Figure 4.13 : Courbe de désorption à une température de 28°C régressée par le modèle de GAB.

Figure 4.14 : Courbe de désorption à une température de 40°C régressée par le modèle de GAB.

Figure 4.15 : Courbe de désorption à une température de 50°C régressée par le modèle de GAB.

Figure 4.16 : Courbe de désorption et adsorption à une température de 28°C.

Figure 4.17 : Courbe de désorption et adsorption à une température de 40°C.

Figure 4.18 : Courbe de désorption et adsorption à une température de 50°C.

Figure 5.1 : Séchoir Solaire Indirect réalisé à Constantine.

Figure 5.2 : Conception du séchoir solaire indirect réalisé à Constantine.

Figure 5.3 : Chambre de séchage avec trois cales.

Figure 5.4 : Instruments de mesures (Anémomètre/balance).

Figure 5.5 : Instrument de mesure (Thermomètre).

Figure 5.6 : Instrument de mesure (Thermo-hygromètre).

Figure 5.7 : Détermination de surface d'échange par ImagJ.

Figure 5.8 : Détermination de surface d'échange par ImagJ.

Figure 5.9 : Détermination de surface d'échange par ImagJ.

Figure 5.10 : Les paramètres d'air au cours de séchage solaire vitesse 0.8 m/s.

Figure 5.11 : Les paramètres d'air au cours de séchage solaire vitesse 2.2 m/s.

Figure 5.12 : Régression numérique de cinétique de séchage avec le modèle two-term.

Figure 5.13 : Régression numérique de cinétique de séchage avec le modèle Logarithmique.

Figure 5.14 : Régression numérique de cinétique de séchage avec le modèle Handerson & Pabis.

Figure 5.15 : Régression numérique de cinétique de séchage avec le modèle de Midilli.

Figure 5.16 : Évolution de cinétique de séchage à une vitesse de 0.8 m/s.

Figure 5.17 : Évolution de cinétique de séchage à une vitesse de 1.7 m/s.

Figure 5.18 : Évolution de cinétique de séchage à une vitesse de 2.2 m/s.

Figure 6.1 : Schéma descriptive des procédés de traitement du séchage convectif.

Figure 6.2 : Discrétisation libre et graduelle du domaine d'études.

Figure 7.1 : Profil de température pour un espacement entre l'absorbeur et la vitre de 1cm et une vitesse égale à 0.1 m/s.

Figure 7.2 : Profil de température pour un espacement entre l'absorbeur et la vitre de 1cm et une vitesse égale à 0.3 m/s.

Figure 7.3 : Profil de température pour un espacement entre l'absorbeur et la vitre de 1cm et une vitesse égale à 0.5 m/s.

Figure 7.4 : Profil de température pour un espacement entre l'absorbeur et la vitre de 3cm et une vitesse égale à 0.1 m/s.

Figure 7.5 : Profil de température pour un espacement entre l'absorbeur et la vitre de 3cm et une vitesse égale à 0.3 m/s.

Figure 7.6 : Profil de température pour un espacement entre l'absorbeur et la vitre de 3cm et une vitesse égale à 0.5 m/s.

Figure 7.7 : Profil de température pour un espacement entre l'absorbeur et la vitre de 5cm et une vitesse égale à 0.1 m/s.

Figure 7.8 : Profil de température pour un espacement entre l'absorbeur et la vitre de 5cm et une vitesse égale à 0.3 m/s.

Figure 7.9 : Profil de température pour un espacement entre l'absorbeur et la vitre de 5cm et une vitesse égale à 0.5 m/s.

Figure 7.10 : Profil de température pour un collecteur avec une longueur de 1m.

Figure 7.11 : Profil de température pour un collecteur avec une longueur de 2m.

Figure 7.12 : Profil de température pour un collecteur avec une longueur de 3m.

Figure 7.13 : Profil de vitesse avec une vitesse d'entrée de 0.5 m/s.

Figure 7.14 : Profile de température pour un séchoir solaire indirect reçu 700 W/m^2 .

Figure 7.15 : Profil de la vitesse après 10 min.

Figure 7.16 : Isothermes de la température après 100 minutes.

Figure 7.17 : Profil de température après 100 minutes.

Figure 7.18 : Profil d'humidité relative après 10 minutes.

Figure 7.19 : Profil d'humidité relative après 120 minutes.

Figure 7.20 : Profil d'humidité relative après 240 minutes.

Figure 7.21 : Profil de température après 120 minutes avec une vitesse de 0.8m/s.

Figure 7.22 : Profil de la vitesse après 10 min avec une vitesse de 0.8 m/s.

Figure 7.23 : Profil d'humidité relative après 10 minutes avec une vitesse de 0.8 m/s.

Figure 7.24 : Profil d'humidité relative après 120 minutes avec une vitesse de 0.8 m/s.

Figure 7.25 : Profil d'humidité relative après 240 minutes avec une vitesse de 0.8 m/s.

Figure 7.26 : Profil d'humidité relative après 360 minutes avec une vitesse de 0.8 m/s.

Figure 7.27 : Profil de distribution température dans un séchoir solaire performé par (Demissie et al., 2019).

Figure 7.28 : Profil distribution température pour notre séchoir solaire.

Figure 7.29 : Distribution de la vitesse d'air dans un séchoir solaire performé par (Demissie et al., 2019).

Figure 7.30 : Distribution de la vitesse d'air dans notre séchoir solaire performé.

Figure 7.31 : Isothermes d'adsorption et désorption des feuilles de henné à 30 (a), 40 (b), and 50°C (c) (S. Bennaceur et al., 2015).

Figure 7.32 : Isothermes d'adsorption et désorption des feuilles de Myrtus Comminus à 28, 40, et 50°C.

Liste des Tableaux

Tableau 01 : limites de désactivation des micro-organismes en fonction d'activité d'eau de certains produits.

Tableau 02 : humidité relatif en fonction des sels et des températures [NF EN ISO 12571].

Tableau 03 : paramètres des modèles de sorption obtenu par régression numérique pour les modèles de BET et LESPAM.

Tableau 04 : paramètres des modèles de séchage obtenu par une régression numérique.

Tableau 05 : paramètres des modèles de sorption obtenu par régression numérique pour les modèles de GAB et Chung and Pfof.

Tableau 06 : Échelle de traitement du phénomène de séchage d'après (Defraeye, 2014)

Nomenclature

a_w	Activité de l'eau [-]
C	Concentration de vapeur [mol/m ³]
C_p	Chaleur spécifique [J/kg K]
d_z	La largeur du séchoir. [m]
D	Diffusivité massique [m ² /s]
G	Source de la matière [g/m ³].
I	La matrice d'identité [-]
M_v	Masse molaire de la vapeur d'eau [g/mol]
n	Indice de réfraction [-]
P	Pression [Pa]
q_s	Flux de chaleur par conduction [W/m ²]
Q	Source (puits) de chaleur [W/m ³]
Q_p	Dissipation de la chaleur due au changement de pression [W/m ³]
Q_{vd}	Dissipation de la chaleur due à la viscosité [W/m ³]
Re	Nombre de Reynolds [-]
T	Température [K]
t	Temps [s]
u	Vecteur de la vitesse [m/s]
X	Teneur en eau [% base sèche]

Lettres grecs

μ	Viscosité dynamique [Pa s]
ε	Émissivité [-]
ρ	Masse volumique [kg/m ³]
ρ	Réfectivité [-]
κ	Constant de Von Karman [-]
σ	Coefficient de transmission [-]
μ_T	Viscosité dynamique turbulente [Pa s]
λ	Conductivité thermique [W/m K]
δ_{ij}	Kronecker Delta [-]
ε	Dissipation de l'énergie cinétique turbulente [s ² /m ³]
∇	Gradient operator [-]

∇. Divergence [-]

Indices

amb Ambiance [-]

d Diffusé [-]

eq Equilibre [-]

p Pression [-]

s Sec [-]

sat Saturation [-]

sol Solaire [-]

T Turbulent [-]

v Vapeur [-]

vd Dissipation visqueuse [-]

w Eau [-]

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier ALLAH le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience durant ces longues années d'étude et d'accomplir ce modeste travail.

Mes remerciements à mes parents pour leur contribution, leur soutien, leur patience et leur prise en charge total financière.

En second lieu, La première personne que je tiens à remercier est mon encadreur Pr. BELHAMRI Azeddine (Professeur à l'université des frères Mentouri Constantine 1), pour l'orientation, la confiance, la patience qui ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port. Qu'il trouve dans ce travail un hommage vivant à sa haute personnalité.

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury : Mr. Mahri Zinelabiddine (professeur à l'université des frères Mentouri Constantine 1), Mr. Abdennacer Kabi (professeur à l'université des frères Mentouri Constantine 1), Mr. Chérif Bougriou (professeur à l'université de Batna 02) et Mr. Messaoud Geullal (professeur à l'université de Ferhat Abbas, Sétif), pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Je remercie toutes les personelles du CRBT, chercheurs, dirigeants pour leur aide, leurs encouragements et leur bonne humeur de tous les jours.

Je remercie vivement le Directeur du laboratoire de mycologie Ali Debbi, et le Directeur du laboratoire du Food Alla le Directeur du laboratoire agroalimentaire Hatem de m'y avoir accueilli au sein de son laboratoire.

Je tiens à remercier les directeurs et toutes le personelles de SARL ECRC d'avoir accepté de nous aider par fourniture en outre par un programme flexible à mes besoins.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à mes frères et mes sœurs, à tous mes proches et amis, qui m'ont toujours encouragé au cours de la réalisation de ce mémoire.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La sécurité alimentaire et énergétique et la durabilité sont parmi les sujets les plus courants ces derniers temps. Elles impliquent une intervention rapide et efficace dans ces problématiques à l'échelle internationale, afin d'atténuer les dangers, causés par l'accroissement rapide de la population mondiale, l'abaissement des réserves des ressources énergétiques conventionnelles, ainsi que l'effet de l'empreinte du carbone sur l'environnement. La consommation énergétique globale est fortement influencée par le secteur agro-alimentaire. En effet, parmi les secteurs qui consomment une bonne partie de l'énergie mondiale sont les secteurs agro-alimentaires (Matavel et al., 2021), pharmaceutiques (Müller & Heindl, 2006), industriels (Altobelli et al., 2014).

Par ailleurs, le séchage est une opération nécessaire dans plusieurs processus industriels, par exemple : dans l'industrie agro-alimentaire, pharmaceutique, textile, les matériaux de construction tel que le béton, bois, céramique, etc... C'est aussi un processus, qui consomme de l'énergie intensivement.

Le séchage solaire est une solution ancestrale à cette problématique qui reste prometteuse, car la source de l'énergie est abondante, propre et renouvelable. Cependant il implique une attention additionnelle afin de le rendre plus rentable et efficace.

Parmi les applications de séchage consommatrice d'énergie, le séchage des plantes médicinales et aromatiques. Cette opération sert à minimiser l'effet de l'eau libre sur la qualité finale du produit durant sa conservation (Bahammou et al., 2019).

Le séchage des plantes médicinales permet de prolonger leur durée de conservation, d'augmenter la capacité de production car le processus d'extraction le long de l'année est faite à partir des plantes sèche, de réduire la masse et le volume de stockage, de concentrer les composants actives et de garder les valeurs nutritionnelles des plantes.

Les plantes et herbes médicinales ont une place primordiale dans la fabrication des produits pharmaceutique, cosmétique, ainsi que dans la parfumerie. Dans ce travail nous nous intéressons au séchage solaire convectif de la plante : *myrtus Communis*.

L'intérêt du *myrtus Communis* est essentiellement lié à ses propriétés médicinales et grâce aux composants phénoliques. Cette plante possède de formidables activités biologiques (antioxydant, antiseptique, anti-inflammatoire, antidiabétique, etc...). C'est pourquoi le myrte a toujours été considéré comme un bon médicament traditionnel pour ses nombreuses propriétés thérapeutiques, comme l'hyperglycémie, la diarrhée et les infections. Le myrtus communis est répertorié dans la Pharmacopée Africaine comme une plante médicinale intéressante. Cependant, les feuilles et les baies sont davantage utilisées pour leurs valeurs nutritionnelles et diverses propriétés. Parmi les différentes utilisations rapportées dans la littérature le myrte a été principalement utilisé comme agent anti-inflammatoire, dans les maladies gastro-intestinales et comme antiseptique.

OBJECTIFS DE LA THESE

Habituellement le séchage des plantes et herbes médicinales et en général le *Myrtus Communis* particulièrement est réalisé à l'aide des protocoles purement expérimentaux et de manière empirique. Alors le but de ce travail est de caractériser et d'étudier avec des approches scientifiques le comportement de la plante *Myrtus Communis* durant un processus de séchage solaire convectif. Le but est aussi d'optimiser le « design » de séchoirs solaires afin de mieux les rentabiliser et afin d'en déduire les conditions et les paramètres optimales de fonctionnement, qui donnent un produit final avec les meilleures qualités possibles.

Le manuscrit de cette thèse se compose de :

Après une introduction générale, le premier chapitre décrit l'état de l'art et le domaine d'utilisation puis les technologies utilisées dans le séchage et particulièrement le séchage solaire,

Le deuxième chapitre s'intéresse à l'intérêt, aux méthodes d'obtention des courbes de cinétique de séchage et à leur modélisation. Particulièrement, les modèles des couches minces sont présentés.

La troisième partie est consacrée aux isothermes de sorption. Ce sont des données indispensables pour l'étude des phénomènes du séchage. La détermination de ces courbes, ainsi que leur modélisation mathématique sont discutés dans ce chapitre.

Le quatrième et le cinquième chapitre représentent la partie expérimentale de cette thèse. Elle inclue la caractérisation du produit : Myrtus Comminus. On présente à chaque fois la méthodologie utilisée, les résultats avec leur interprétation et leur modélisation.

Enfin, le dernier volet de cette thèse constitue par les chapitres six et sept comporte une étude de simulation numérique d'un séchoir solaire destiné au séchage des herbes médicinales et aromatiques (application dans menthe et le Myrtus Comminus). La modélisation CFD est effectuée sous environnement COMSOL.

L'étude est clôturée par une conclusion générale et les perspectives à développer pour cette étude.

Chapitre 1

Le séchage industriel et solaire

1.1. INTRODUCTION

L'ère industriel du séchage est apparu au 18ème siècle, après cette date le développement de l'industrie de séchage a été lié essentiellement par les guerres autour du monde, les troupes britanniques dans la Crimée en (1854-1856) ont reçu des légumes sèches de la part de la grande Bretagne. Durant la guerre de Boer (1899-1902) le gouvernement canadien a envoyé des légumes sèches en Afrique de Sud. Pendant la première guerre (1919) mondial les États Unies de l'Amérique expédié approximativement 4500 tonnes des légume sèches aux pays européennes, parmi ces produits déshydraté en USA, on trouve les haricots verts, les carottes, l'épinard, la pomme de terre, de la soupe mixte, des choux, du maïs.....etc (Ratti, 2008).

L'idée derrière l'invention des séchoirs solaires directs ou indirects a été développée dans le but de limiter ou éliminer les problèmes engendrés par le séchage à air libre (Bechoff et al., 2009). Des réalisations ont été concrétisées en 1976 (Kumar et al., 2016). La première conception était un « box » avec une couverture transparente (Kumar et al., 2016). De nombreux chercheurs ont travaillé à l'amélioration du design et en conséquence du processus entier mais jusqu'à maintenant, il n'existe pas de configuration optimale, qui répond en rigueur à toutes les exigences qualitative et quantitative du séchage.

1.2. LE SÉCHAGE DANS LES DIFFÉRENTS SECTEURS

a) Agroalimentaire

Une large gamme ou bien la majorité des produits agroalimentaire sont soumises aux différents types de séchage depuis le séchage convectif, lit fluidisé, par atomisation, surgélation, cyclone, le but de cette application est de préserver les valeurs nutritionnelles des produits après la période de récolte et de maintenir des produits en bonne qualité lors de la production en grandes quantités. Parmi les produits agroalimentaire soumis au séchage en peut citer :

b) Les graines et les céréales

Ils ont une valeur nutritionnelle élevée, ce sont des produits importants dans l'industrie alimentaire. Les céréales, en général, sont récoltées avec une teneur en eau élevée. Pour le stockage et le conditionnement, il est essentiel de diminuer la teneur en

humidité du grain par un processus de séchage efficace. Ces produits sont habituellement séchés dans des séchoirs cyclone, ou à lit fluidisés (Ratti, 2008).

c) Fruits et végétales

Les technologies proposées dans le domaine de séchage ont pour but l'extension des périodes de stockage afin de maintenir les produits valables hors saison et la minimisation des déchets, et de décroître et de stabiliser les prix des aliments...etc. de multiple produits sont séchés avec des procédés de séchage différents, on peut citer :

- Les fruits et aliments tropicaux, du café, thé, riz, les bananes, mangue, les ananas.
- Les légumes et fruits (pomme de terre, tomate, poivron rouge et vert, champignon, les pomme, les oranges, le fige, raisin, abricot, les pêches...etc).

d) Viande

Tous types de viandes sont séchés (viandes rouges, blancs, poissons, jambon, la charcuterie) par différentes techniques, solaire, lyophilisation, convective... etc.

e) Suspensions

Les produits buvables comme le lait et les omelettes pour produire la poudre de lait à travers un séchage par atomisation, les jus des fruits produits depuis une solution concentré par vaporisation et d'autres produits comme la noix de coco, et le cacao (Ratti, 2008).

f) Industrie pharmaceutique

Un granulateur sécheur par pulvérisation convertit les suspensions ou les solutions en granulés secs, sans poussière et à écoulement libre. Une suspension ou une solution de la substance à sécher est pulvérisée sur de l'air chaud, ce qui provoque le séchage et l'agglomération simultanés du produit [1]

g) Plantes et herbes médicinales

Les plantes et les herbes médicinales sont des réservoirs des huiles essentielles et les composants actifs utilisés dans la production pharmaceutique, para-pharm, confiserie, parfumerie, etc ..., pour une production de masse les plantes doivent être séchées, ensuite broyées au préalable de procéder à l'extraction.

h) Papier

La pâte de papier doit être séchée sur des rouleaux, placés en série chauffés par vapeur (Ratti, 2008). La consommation nette d'énergie suite au séchage du papier peut atteindre 4800–5700 kJ/kg d'eau évaporée (Kudra & Mujumdar, 2009).

i) Matériaux de construction (bois & céramique)

Le séchage des matériaux de construction (brique, bois, béton, céramiques... etc) a une longue histoire. Dès la découverte de la conversion de l'argile en un matériau de construction utile, utilisant le séchage (Geoffroy & Prat, 2014), jusqu'à l'utilisation des fibres naturelles dans l'isolation thermique (Norton, 2020). Produire des matériaux de construction avec des très bonnes qualités (hygroscopiques, thermiques et mécaniques) est basé sur l'amélioration dans le processus de séchage. Car ces matériaux doivent avoir des propriétés convenables pour être placé dans des conditions environnementales, sans perdre de leurs caractéristiques.

j) La boue

La boue retirée depuis les stations d'épurations est traitée par le séchage, dont le but de stimuler leur stabilisation (réduction du pouvoir fermentescible), de réduire les odeurs et de diminuer leur volume, de concentrer les éléments nutritifs au sein de la masse. Pour qu'à la fin, cette boue sera utilisée dans l'agriculture comme des engrais (Léonard, 2003).

D'autres applications nécessitent de passer par le processus du séchage tel que : le tabac, le cannabis... etc.

1.3. MODES DE SECHAGE

1.3.1. Séchage Solaire à air libre

Le séchage solaire à l'air libre représente une méthode ancienne, simple et économique (J. M.P.Q. Delgado & Barbosa de Lima, 2014), pour la conservation des produits alimentaires, différentes civilisations chinoise, égyptienne, grec, arabe, indienne, ont utilisé cette méthode intensivement, dans leur vie quotidienne (Rocha et al., 2011), parmi les produits soumis au séchage les légumes, les fruits, les plants et les herbes médicinales, viande, poisson, bois....etc. Ce type de déshydratation consiste à placer les produits sous rayonnement solaire direct le long du jour (plusieurs), dans des endroits à l'air libre l'énergie reçue depuis le soleil se transformé en énergie thermique cette dernière fait accroître la température et la pression de vapeur dans le produit afin de favoriser le transporter l'eau contenue à l'intérieur vers la surface du produit. Mais ce modèle a plusieurs inconvénients comme la perte du couleur causée par les rayons solaires directs, pareillement il est toujours susceptible au infestation d'insectes, il demande une grande surface, l'absence du controle du processus de séchage (Mujumdar, 1995), Longues durée de séchage, la détérioration du tissu, une qualité médiocre, la perte de ces valeurs nutritionnelles et des substances volatiles.

1.3.2. Séchage Convectif

L'entraînement de l'air asséchant autour d'un produit humide, avec des propriétés hygrothermique de ce fluide procède un écart positive dans la température et négatif dans l'humidité. Ces conditions servent à provoques le séchage convectif. La variation dans ces paramètres a une influence directe sur la durée de séchage, donc, sur l'énergie consommée et la qualité du produit final. Plusieurs types de séchoir utilisent ce principe de fonctionnement, à cause de la simplicité et leur cout d'investissement moins cher, et de l'absence de maintenance (J. M.P.Q. Delgado & Barbosa de Lima, 2014).

1.3.3. Séchage par atomisation

Le principe de fonctionnement de séchage par atomisation se base sur un fluide pompé à travers un jet d'atomiseur, afin de produire des gouttelettes dont leur dimension désigné par le type de séchoir utilisé (mouvement de fluide : co-courant, contre-courant). Ensuite les gouttelettes entrent dans la chambre de séchage avec l'air chaud, un transfert de masse et de chaleur aura le lieu et par conséquence les

gouttelettes sèchent et tombent au bac, et seront collectés après une filtration qui aura lieu dans un cyclone placé à la base.

Les fluides alimentés peuvent être des solutions, des émulsions, des suspensions dans l'eau ou des autres solvants, de larges gammes de viscosité peuvent être traités.

Parmi les avantages de ce type de séchage le temps de séchage réduit avec une haute efficacité car la surface d'échange est maximale, très utile pour des matières sensibles à la température, il représente une très bonne solution écologique quand il s'agit de sécher des matériaux inflammables, nocifs et explosifs (Nguyen, 2015).

Par contre le coût d'investissement pour ce type de séchoirs reste très élevé, en plus le procédé de séchage est très critique si les conditions de séchage sélectionnées ne sont pas adéquates, il y a un risque de perdre l'arôme et la couleur (Nguyen, 2015).

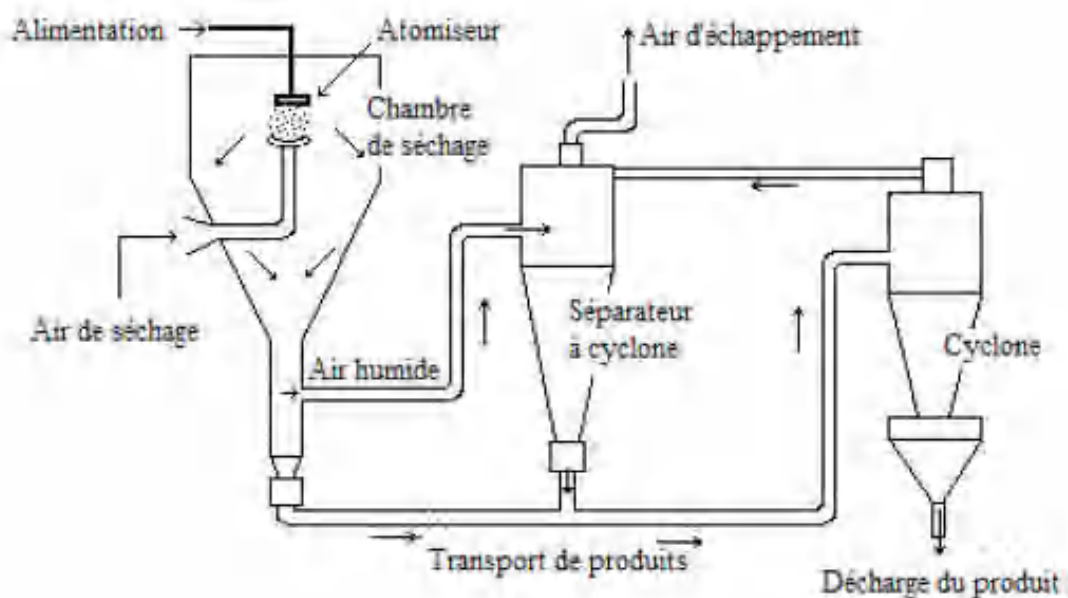


Figure 1.1 : Sécheur vertical à pulvérisation (Cyclone) (Nguyen, 2015)

1.4. LES SECHOIRS SOLAIRES

Les séchoirs solaires sont des dispositifs qui, permettent d'accélérer et d'améliorer sensiblement la durée de conservation des produits, tout en préservant leurs qualités physiques et chimiques, en utilisant une source d'énergie renouvelable (le soleil), propre et gratuite.

On peut classer ces dispositifs suivant des « designs » proposés par les constructeurs ou les utilisateurs, l'énergie d'appoint utiliser, les techniques de stockage d'énergie, le type mouvement d'air, l'emplacement et l'exposition des denrées, le contrôleetc. Mais souvent un seul séchoir peut accueillir plusieurs caractéristiques ou bien fonctionnalité (option) mentionné auparavant en même temps.

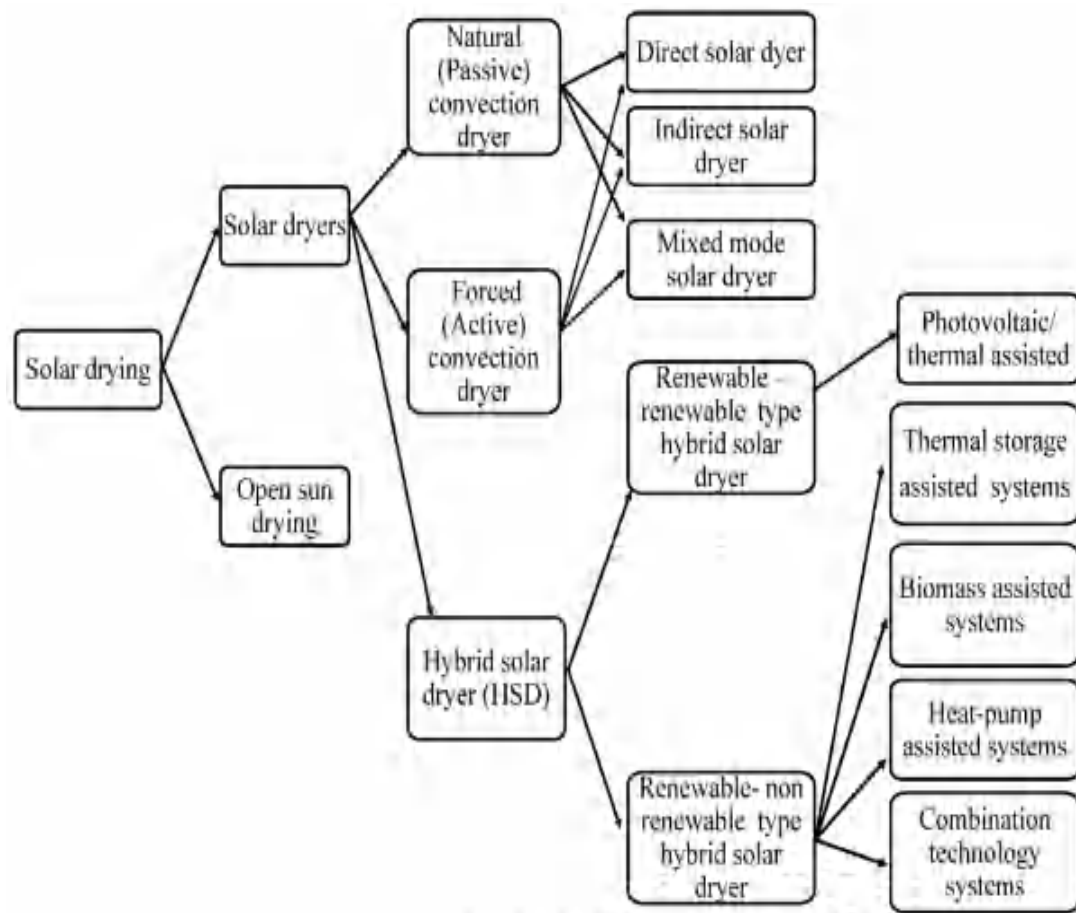


Figure 1.2: Classements des séchoirs solaire (Jha & Tripathy, 2021)

1.4.1. Classification des séchoirs solaires :

1.4.1.1. Classification selon l'exposition au soleil

1.4.1.1.1. Séchoir Solaire Directe

Dans Cette configuration le produit est exposé directement au rayonnement solaire (Dissa et al., 2011; Sallam et al., 2015). Généralement, les denrées sont entreposées sur des cales à l'intérieur d'une cabine bien isolée et couverte par un revêtement transparent, afin de piéger les ondes électromagnétiques par effet de serre. Le transfert de chaleur lors de séchage se fait principalement par rayonnement. Le mouvement d'air à l'intérieur de la chambre est dû à la gravité (Bennamoun & Belhamri, 2003). Si une ventilation est présente, le système est un système actif et par conséquence le transfert se fait par convection en accompagnant de rayonnement. Les avantages de ce type de dispositif sont d'éliminer les invasions des insectes, les attaques des rongeurs, le dépôt de la poussière, de protéger le produit des précipitations inattendues. Par ailleurs l'exposition direct au rayons va affecter les caractéristiques du produit d'une façon nocive car il va être surchauffé (carbonisé) et décoloré; cela causera une diminution considérable dans les valeurs nutritives (Bechoff et al., 2009), la capacité de séchage serait limitée (Kumar et al., 2016).



Figure 1.3 : Séchoir solaire direct (P. Singh et al., 2018)

1.4.1.1.2. Séchoir Solaire Indirecte

Dans les séchoirs indirects la source de chaleur est toujours le soleil mais l'air asséchant absorbe de la chaleur depuis un capteur solaire souvent plan, et la transmet au produit afin de le sécher. Le produit est maintenu au-dessus de cales et reçoit de la chaleur nécessaire pour vaporiser l'eau contenue dans le produit jusqu'à atteindre son état désiré. Parfois l'air chaud sort du capteur, doit traverser un organe de stockage et subi éventuellement un réchauffage additionnel à l'aide d'une source de chaleur externe (d'appoint) (Daguenet, 1985)

Ce modèle est souvent constitué d'une cabine de séchage bien isolée et des cales porteuses du produit, un ventilateur pour maintenir une convection forcée, et une cheminée d'évacuation, un capteur solaire orienté vers le sud et incliné avec un angle habituellement égal à la longitude de site où le séchoir est placé, un lit de stockage, une source d'énergie supplémentaire afin d'alimenter le séchoir en dehors des heures d'insolation (Figure 1.4).

De nombreux chercheurs ont travaillé avec ce type des séchoirs (Bennamoun & Belhamri, 2003; Khaldi et al., 2017b; Kouhila et al., 2002; Nasri & Belhamri, 2018)

- (1) Collecteur solaire.
- (2) Direction de flux massique.
- (3) Ventilateur.
- (4) La direction de l'aspiration.
- (5) Tableau de commande.
- (6) Appoint électrique.
- (7) Des étagères.
- (8) Cabinet de séchage.
- (9) Air recyclé.
- (10) Pied de contrôle.
- (11) Sortie d'air.
- (12) Senseur d'humidité.
- (13) Thermocouples.
- (14) Claies.

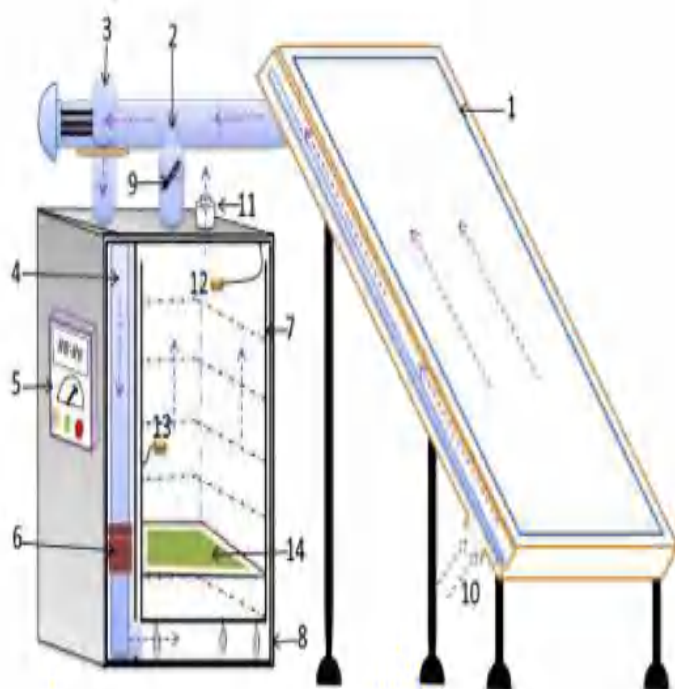


Figure 1.4 : séchoir solaire type indirect avec appoint électrique (Kouhila et al., 2002).

1.4.1.1.3. Séchoir Mixte

Cette variante est utilisée souvent pour les produits non sensibles au rayonnement solaire. Il est conçu avec une couverture transparente dans les deux compartiments essentiels du séchoir (le collecteur et la chambre), pour promouvoir la température à l'intérieur de séchoir. Le mot mixte signifie que les deux modes directe et indirecte sont utilisés. Plusieurs chercheurs ont travaillé avec ce genre de séchoir. (S. Singh & Kumar, 2012; Tripathy & Kumar, 2009)

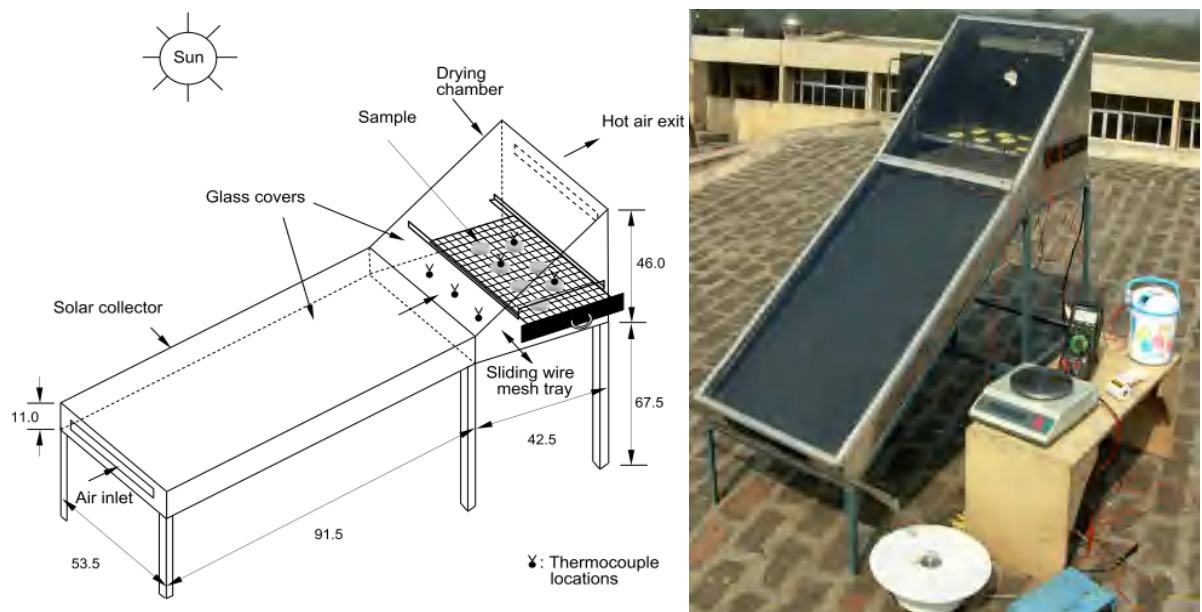


Figure 1.5: séchoir solaire mixte (Tripathy & Kumar, 2009)

1.4.1.2. Le mouvement d'air à l'intérieur de séchoir

1.4.1.2.1. Système Passif (Circulation D'air Naturelle)

Le terme passif évoque le fait que, le mouvement d'air à l'intérieur du séchoir est dû à une différence de densité d'air, causée par un gradient de la température entre l'entrée et la sortie de séchoir.

Les séchoirs passifs sont les moins chères par rapport à leur coût de fabrication et de maintenance, relativement aux séchoirs actifs (Matavel et al., 2021). par contre le temps de séchage reste long et les qualités du produit final sont médiocres (Matavel et al., 2021).

1.4.1.2.2. Système Actif (Circulation D'air Forcé)

Un système actif utilise un accélérateur de mouvement d'air (ventilateur). La circulation d'air forcé augmente l'efficacité du séchage considérablement, 24% dans les systèmes actifs contre 12% dans les systèmes passifs (Altobelli et al., 2014). Le mode actif est utilisé généralement dans les installations commerciales ou des grandes quantités sont en opération. Ce mode permet une réduction significative dans la consommation d'énergie ainsi que le coût du séchage, Les séchoirs solaires actifs conviennent bien au séchage des produits agricoles qui ont des teneurs en eau élevées (Banout, 2017).

1.4.1.3. La masse de production

1.4.1.3.1. Cabine

Construite habituellement pour une surface de séchage entre 1 à 2 m², avec une capacité de séchage dans l'ordre de quelque dizaines de kilogramme (Belessiotis & Delyannis, 2011) ce design est simple et peu cher. Elles sont destinées à l'utilisation domestique dans les régions rurales.

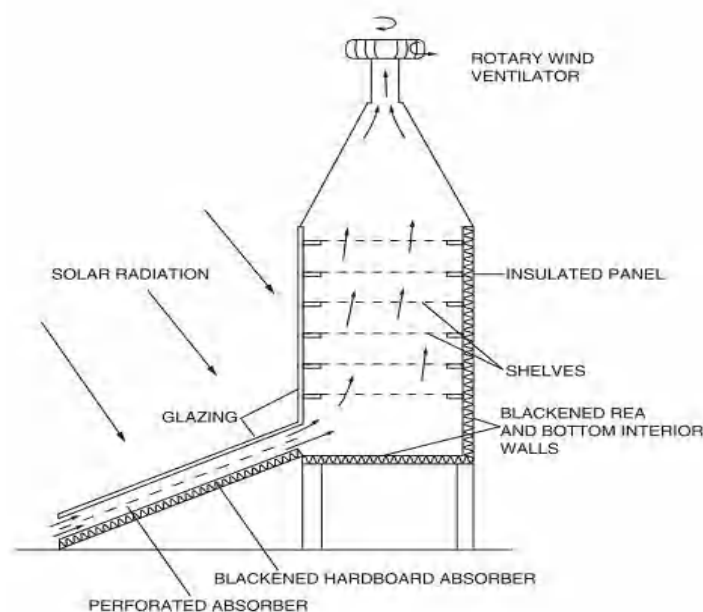


Figure 1.6 : Séchoir solaire mixte à convection forcée (Ekechukwu & Norton, 1999).

1.4.1.3.2. Tunnel

La conception des séchoirs type tunnel est simple, facile à fabriquer, avec un coût peu cher et peut être installé dans n'importe quel endroit dans le monde.

Se basant sur le mode de circulation d'air à l'intérieur de tunnel on peut classer ces séchoirs en deux catégories : passifs « Convection Forcé » ou Actifs « Convection Naturelle » (Prakash & Kumar, 2014).

Une conception typique présentée par (Banout, 2017) est schématisée sur la (figure 1.7). Elle est installée à l'université d'agriculture du Cambodge. Les dimensions de ce séchoir sont 5m largeur x10 longueurs et 2m de hauteur. Il fonctionne en mode forcé. Couvert par un revêtement en polycarbonate. La masse de production dans les tunnels de séchage peuvent atteindre jusqu'à 1000 kg (Patil & Gawande, 2016).

En conséquence les séchoirs par effet de serre ou tunnel ont une efficacité et une qualité largement supérieure par rapport aux séchoirs solaires ouverts (Nasri & Belhamri, 2018).



Figure 1.7 : Tunnel de séchage installé à l'université royale d' agriculture de la Cambodia (Banout, 2017).

1.4.1.4. La forme du Capteur Solaire :

1.4.1.4.1. Plan

De multiples configurations sont présentes dans la conception des collecteurs solaires plans avec simple (Boulemtafes-Boukadoum & Benzaoui, 2011) ou double vitrage (Chen et al., 2021; Jain & Jain, 2004) simple passage (Nasri & Belhamri, 2018) ou double passage d'air (Şevik, 2013). L'air s'échauffera en traversant le collecteur par contact avec l'absorbeur. Les collecteurs solaires plans sont peu coûteux et leur maintenance est facile, en plus ils ne demandent pas de suiveur solaire.

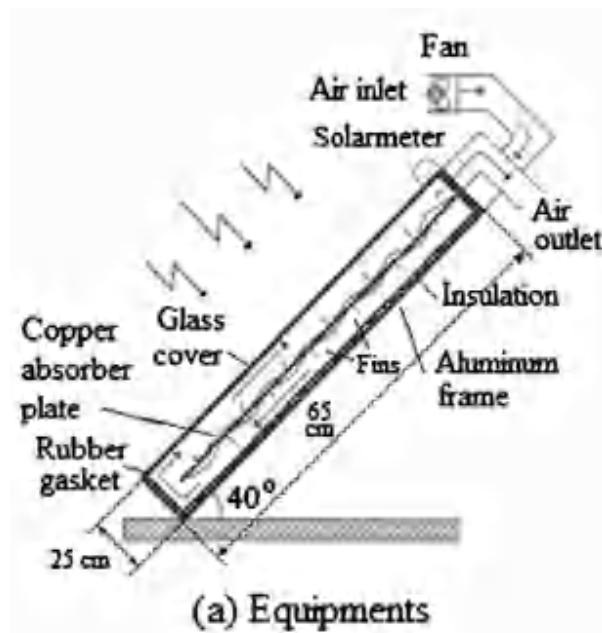


Figure 1.8 : Collecteur Solaire Plan (Şevik, 2013).

1.4.1.4.2. Cylindro-parabolique

L'organe responsable au chauffage d'air asséchant dans ce modèle groupe est basé sur des concentrateurs cylindro-paraboliques d'où une grande partie de rayonnement solaire reçu par la surface du collecteur sera réfléchi vers la base de la cabine de séchage. Cette base construite par un matériau absorbant, s'échauffera et transmettra la chaleur vers un fluide caloporteur (transfert direct vers l'air)

- (1) Réflecteur.
- (2) absorbeur 1.
- (3) lit thermique.
- (4) claie 1 de séchage.
- (5) claie 2 de séchage.
- (6) isolation.
- (7) éléments de stockage.
- (8) absorbeur 2.
- (9) vitrage.

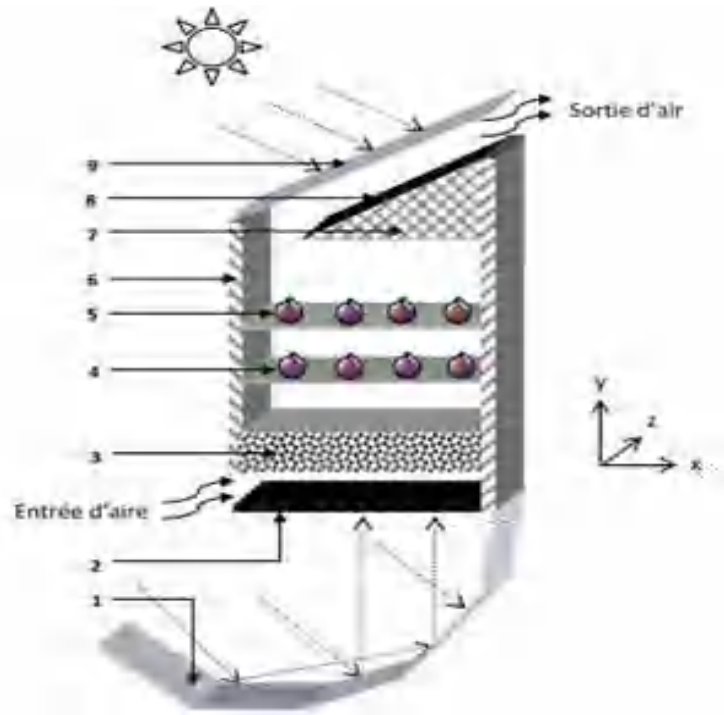


Figure 1.9 : Séchoir solaire mixte avec un concentrateur cylindro-parabolique (Khaldi et al., 2017a).

Dans d'autres configurations le concentrateur chauffe l'agent de séchage par recours d'un autre fluide caloporteur, souvent des sels fondus (Mohana et al., 2020; Ullah & Kang, 2017)

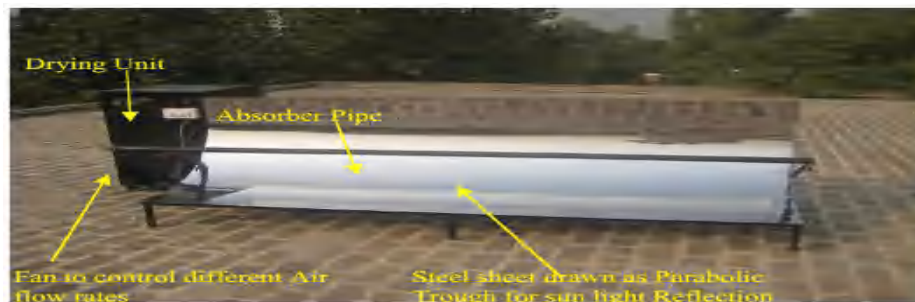


Figure 1.10 : Séchoir solaire utilise un agent calorifique chauffé à travers un concentrateur cylindro-parabolique a (Ullah & Kang, 2017).

1.4.2. Les séchoirs hybrides :

On classe les séchoirs solaires comme des séchoirs hybrides, si l'énergie solaire n'est pas la seule source d'énergie utilisée. Une autre source de la chaleur alimente le séchoir. Elle sera utilisée par alternance ou en même temps avec des énergies fossile, électrique ou biomasse. La ventilation forcée assure la circulation d'air à l'intérieur de la chambre de séchage et stimule le processus (Ullah & Kang, 2017), lors des heures de disfonctionnement (Nasri & Belhamri, 2018).

Les séchoirs hybrides sont les plus rentables et les efficaces, avec une meilleure qualité du produit final. Ils peuvent assurer des plages de température plus larges en comparaison avec d'autres types de séchoirs. Plusieurs chercheurs ont travaillé avec des séchoirs hybrides avec différents appoints.

1.4.2.1. Électrique

Dans le séchoir, sont incorporés des résistances électriques alimentées depuis un réseau domestique (Kouhila et al., 2000) Figure 1.4. (Mohajer et al., 2013) La régulation de température d'air dans ce système est convenable, facile et permet un meilleur contrôle du séchage (Banout, 2017).

1.4.2.2. Pompe à chaleur

(Şevik, 2013) a intégré une pompe à chaleur dans un séchoir destinés à de multiples produits agricoles (tomate, fraise, menthe, persil). Ce déshydrateur comprend un système de régulation PID afin de maintenir une température adéquate avec une distribution homogène à l'intérieur de la chambre de séchage. Le coût de fabrication et de maintenance de ce système est relativement élevé.

Les séchoirs munis d'une pompe à chaleur sont les plus efficaces, par rapport aux séchoirs hybrides. Ils fonctionnent sur une large plage de température et sont donc plus appropriés aux produits sensibles à la chaleur (Jha & Tripathy, 2021).

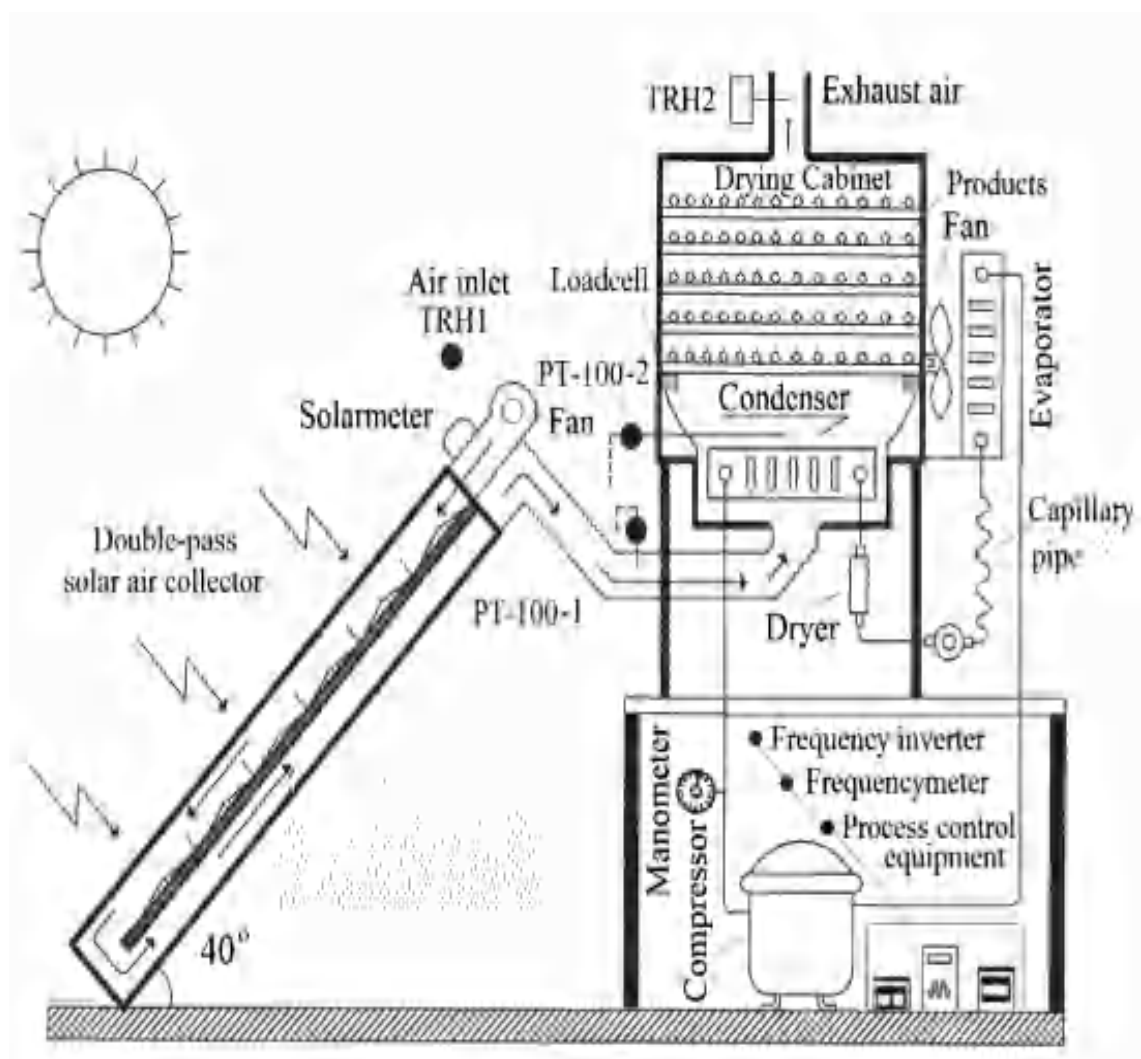


Figure 1.11 : Séchoir solaire relie par une pompe à chaleur doté par un Contrôleur PID (Şevik, 2013).

1.4.2.3. Biomasse

L'énergie utilisée pour la déshydratation des produits agroalimentaires dans les séchoirs hybrides : solaire-biomasse, est fournie depuis deux sources en alternance, pour récompenser l'absence des irradiations solaire dans la période nocturne et assister le séchage dans la période diurne. La première est le soleil et la deuxième est le Biogaz transformé à partir des déchets des fruits, végétales et particulièrement le bois, afin de l'utiliser comme un fioul. Ce type de séchoir offre l'avantage d'un coût d'utilisation très bas à mais la répartition d'air à l'intérieur reste mauvaise (Jha & Tripathy, 2021).

Dans pas mal des séchoirs hybrides biomasse l'accélération d'air à l'intérieur de la cabine de séchage n'a pas besoin d'un ventilateur, car l'utilisation d'air rejeté depuis le brûleur est suffisante pour accélérer le mouvement d'air de séchage. Ceci est connu

par la cogénération (Figure 1.12). 50 kg de biomasse par nuit peuvent assurer une température de 65°C (Yassen & Al-Kayiem, 2016).

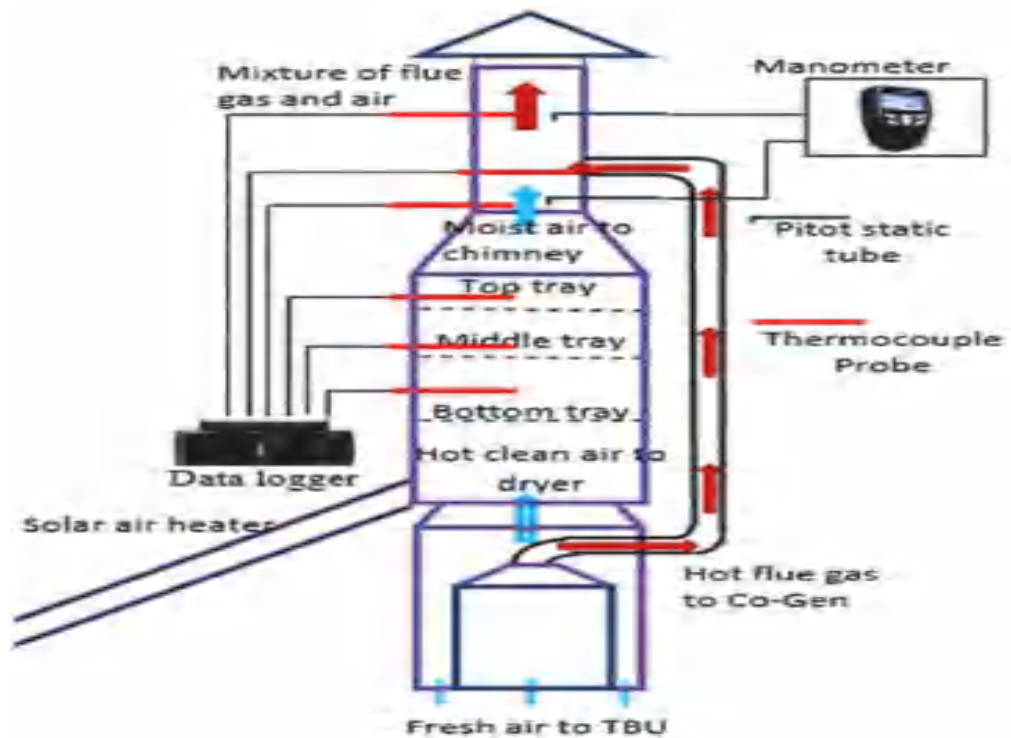


Figure 1.12 : séchoir solaire hybride type biomasse pour séchage des poissons (Yassen & Al-Kayiem, 2016).

1.4.2.4. LPG (gaz de pétrole liquéfiés)

(Murali et al., 2020), proposent un séchoir hybride solaire-LPG pour sécher les champignons où le collecteur solaire à eau alimente un réservoir de stockage, durant les périodes de forte ensoleillement le séchoir fonctionne qu'avec l'énergie calorifique fournie depuis le collecteur. Une fois la température décroît le système de chauffage auxiliaire sera utilisé. Ce système est composé d'un brûleur à gaz et un réseau d'alimentation relie par le réservoir comme schématisé dans la figure 1.13. Ce dernier assure la distribution de fluide caloporteur (eau) avec des températures favorables au séchage.

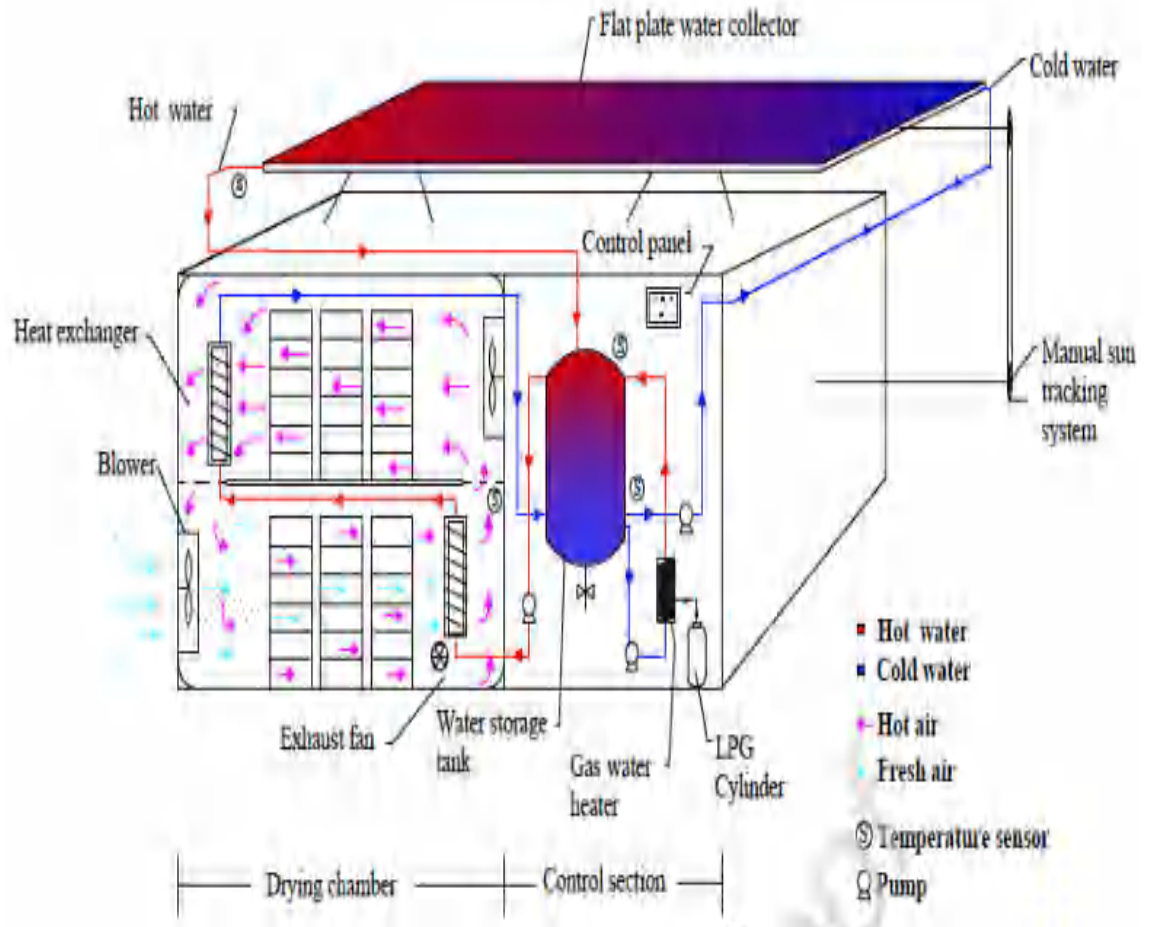


Figure 1.13 : séchoir hybride solaire-LGP pour sécher les champignons (Murali et al., 2020).

(Smitabhindu et al., 2008) ont proposé une autre variante des séchoirs hybride GPL pratiquée sur les bananes. Dans cette conception l'air est préchauffé par des collecteurs solaires plans, et avant de rentrer dans la chambre de séchage l'air sera réchauffé une autre fois par un échangeur de chaleur alimenté par un brûleur à gaz naturelle GPL. Le rendement de ce type de séchoir est très favorable.

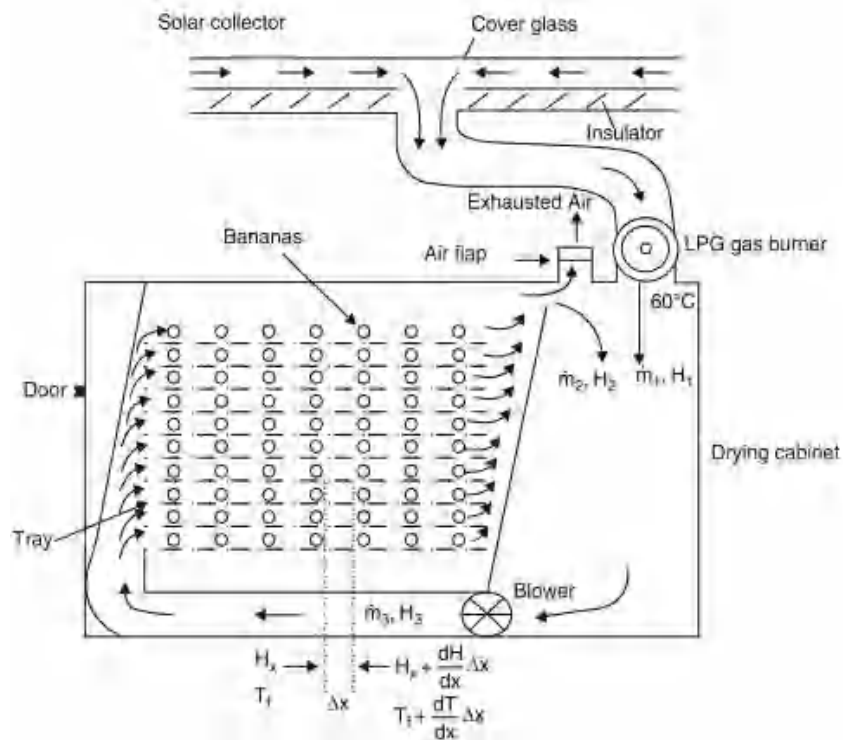


Figure 1.14 : séchoir hybride GPL pour sécher les bananes (Smitabhindu et al., 2008).

1.4.2.5. Diesel

(Smitabhindu et al., 2008), ont utilisé un séchoir hybride solaire-Diesel pour sécher des poissons kob sombre (silver jewfish) dans deux états différent salé et frais sous un mode de convection forcé. Le brûleur Diesel est monté en série avec six collecteurs solaires pour assurer l'alimentation en chaleur, et relié à la partie inférieure de chambre de séchage et muni d'un contrôleur marche /arrêt afin de contrôler la température à l'intérieur de cabinet de séchage.

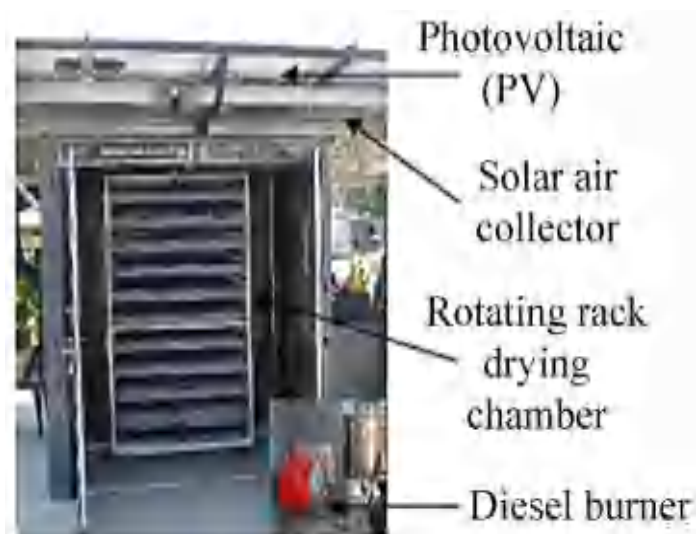


Figure 1.15 : séchoir hybride solaire diesel pour sécher les poissons (Fudholi et al., 2016).

1.4.2.6. Eau usée & géothermique

(Ashrabi et al., 2020) proposent un système de séchage hybride fondé sur l'utilisation d'une source d'énergie géothermique, un échangeur de chaleur enterré est utilisé pour préchauffer l'air entrant. Grâce à un gradient de température entre l'air ambiant et le sol, une bonne quantité de chaleur est gagnée par l'air. Et à l'aide d'une pompe centrifuge le débit d'air sera délivré vers un collecteur solaire muni d'une cuve de stockage de chaleur ; le stockage est assuré par l'utilisation d'un matériau à changement de phase 'la paraffine'. Le système global avec des faibles débits massiques présente une efficacité plus 20% par rapport aux séchoirs solaires plans traditionnels.

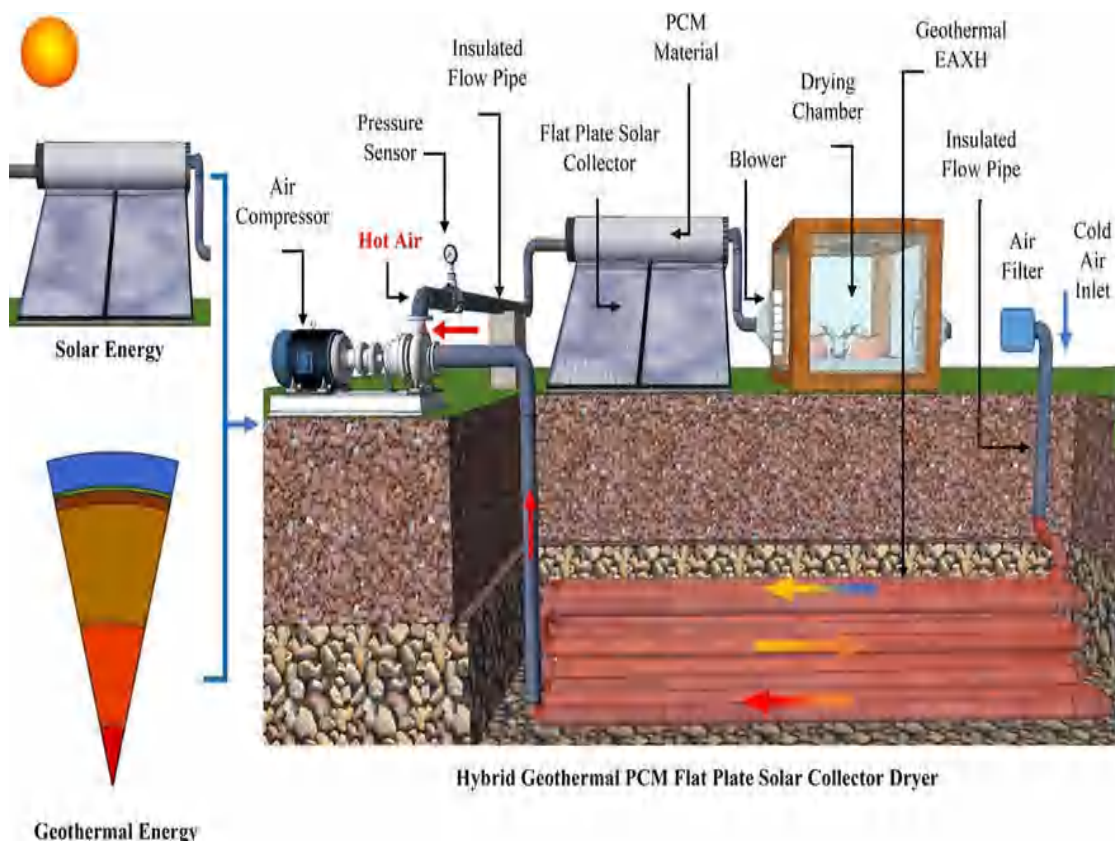


Figure 1.16 : Séchoir solaire hybride avec un appoint d'énergie géothermique (Ashrabi et al., 2020).

1.4.3. Les systèmes de stockage d'énergie utilisés dans le séchage solaire :

L'irrégularité dans la réception du rayonnement solaire, causée par l'alternance du jour et de la nuit pose un problème sérieux dans les systèmes de séchage solaire ; surtout avec les produits qui ont une teneur en eau très élevée et méritent beaucoup de temps pour atteindre des niveaux d'activité en eau, admissibles pour le stockage. Cette problématique a été et reste un grand champ de recherche.

1.4.3.1. L'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) :

Plusieurs chercheurs ont opté pour les matériaux à changement de phase dans le stockage d'énergie solaire, afin de l'utiliser dans les heures d'absence de soleil. En particulier, la paraffine est couramment utilisée dans plusieurs compositions (avec fibre de charbon (Fukai et al., 2000), graphite naturel (Zhong et al., 2010) comme élément de stockage dans les systèmes de séchage solaire. Ces matériaux ont une densité de stockage importante à température constante. Le choix de matériaux à changement de phase MCP adéquat repose sur certaines propriétés physiques essentielles, parmi ces dernières on peut citer: la chaleur spécifique et la chaleur de fusion doit être élevées, haute densité et conductivité thermique, composition stable, chimiquement inerte, et non toxique (Shalaby et al., 2014).

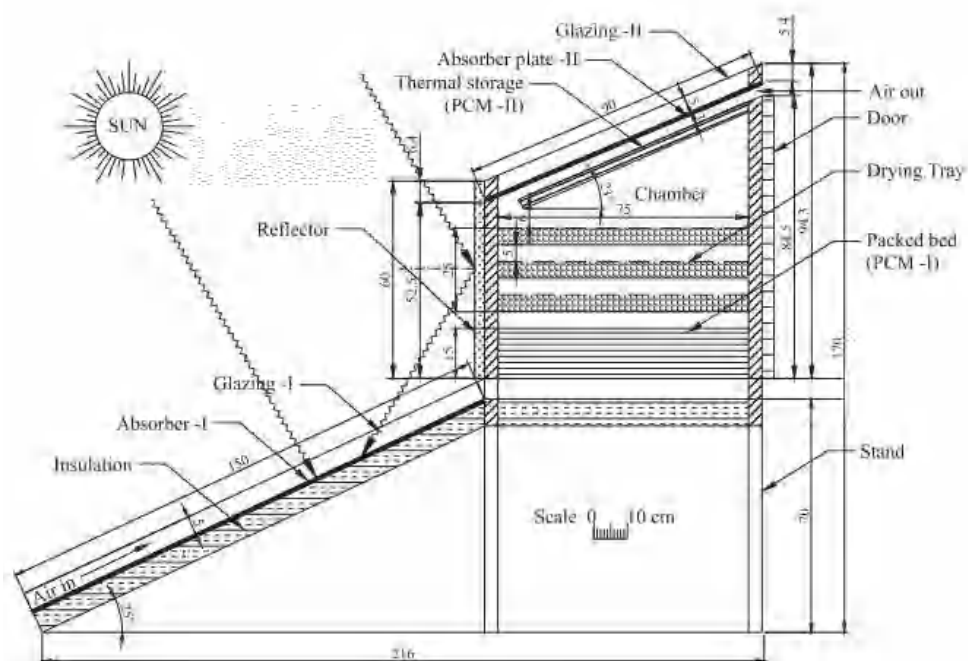


Figure 1.17 : Séchoir solaire indirect à convection naturelle doté par des matériaux à changement de phase (Jain & Tewari, 2015).

1.4.3.2. L'utilisation des matériaux de stockage par chaleur sensible :

Le stockage d'énergie utilisant des matériaux de stockage de chaleur sensible, est utilisé dans les applications où les températures atteignent jusqu'à 100 °C. L'utilisation de matériaux sensibles pour le stockage thermique offre les avantages suivants :

- Ils sont non toxiques et ininflammables
- Moins coûteux
- Ils agissent à la fois comme surface de transfert de chaleur et un moyen de stockage.

(Jain, 2005) a analysé un tunnel de séchage doté de matériaux de stockage d'énergie sensible, trois matériaux différents sont comparé expérimentalement avec un séchoir solaire a air libre. Les matériaux de stockage utilisés sont le béton, le sable et la roche. La durée de séchage a été réduite considérablement quand la roche est implantée de 178 h dans l'air libre à 58h.

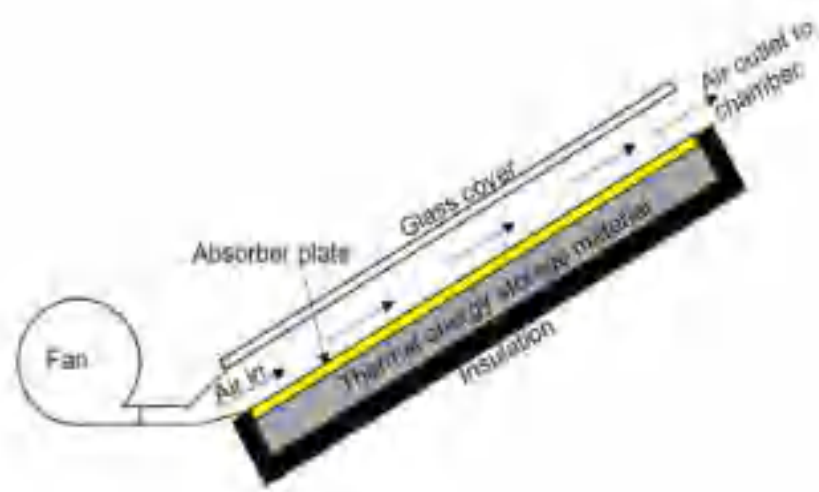


Figure 1.18 : Collecteur d'un séchoir solaire indirect à convection forcée doté par des matériaux de stockage sensible {béton, sable, roche} (Sreenarayanan, 2015).

1.5. Séchage des herbes et plantes médicinales

Ces derniers temps, une attention considérable a été donnée aux plantes médicinales avec l'accentuation des problèmes liés à leurs modes de récolte et de conservation, leurs abondance saisonnière ainsi que leurs large utilisation dans divers secteurs, tels que la cosmétique, la production pharmaceutique, et le secteur thérapeutique (Bahammou et al., 2019).

Le séchage est une méthode fondamentale, et la plus courante pour la conservation post-récolte des plantes médicinales, car il permet la conservation rapide des qualités médicinales du matériel végétal d'une manière simple et facile (Müller & Heindl, 2006).

Le séchage solaire des herbes médicinales est une pratique commune de plusieurs chercheurs comme dans le travail de (S. Bennaceur et al., 2015), qui ont déterminé les isothermes ainsi la chaleur isostérique sorptions en but de la caractérisation de la Henné. (Kouhila et al., 2000) ont exploité ainsi des résultats expérimentaux de séchage solaire de la Menthe afin d'étudier l'influence des paramètres aérothermiques sur la durée du séchage. (Kouhila et al., 2002) ont caractérisé le séchage solaire avec un appoint électrique de la plante d'Eucalyptus

(Rocha et al., 2011) ont examiné l'effet des facteurs environnementaux (vitesse, humidité et température d'air) sur le rendement des huiles essentielles, et les composants volatils, et ainsi à la composition chimique de multiples plantes médicinales et aromatiques.

Chapitre 2

Cinétiques de Séchage & Modèles de couche mince

2.1. Cinétique de séchage

a. Introduction

La caractérisation du comportement des produits lors de séchage, nécessite une combinaison complémentaire entre le travail théorique et celui expérimental. Le comportement relatif au séchage est principalement décrit par les courbes de cinétique de séchage. La forme et les paramètres de ces courbes (Figure 2.1) varient en fonction du type du produit et des conditions de séchage.

b. Cinétique de séchage

Ces courbes ont une importance extrême dans les études de séchage car elles évaluent le transfert de masse au cours du processus de séchage. En plus, elles dépendent des conditions expérimentales, en plus de la nature et de l'état du produit. En général, elles présentent trois phases :

Phase 01 : La mise en température

Avec une assez courte durée, c'est une phase transitoire où la température du produit est voisine de celle de l'air l'entourant.

Phase 02 : Vitesse de séchage constante

Durant cette période l'extraction d'eau libre contenue dans le produit est plus facile puisque la surface du produit est saturée en eau à l'état liquide (a_w autour de 1), en plus l'énergie fournie au produit est égale à l'énergie nécessaire à la vaporisation et la température sur la surface du produit est proche de la température humide de l'air asséchant (Goupy, 2006).

Phase 03 : Vitesse de séchage décroissante

Cette phase commence juste après l'évaporation totale de l'eau libre depuis la surface (a_w inférieur à 1). Le processus d'évaporation devient plus difficile car le transfert de l'humidité est dû aux différences dans la pression partielle de vapeur du produit et l'air asséchant.

Notons que, ces trois phases ne sont pas obligatoirement présentes, mais ça dépend de la nature et de la forme géométrique des produits misent au séchage. Comme le montre la configuration VIII dans la figure 2.1.

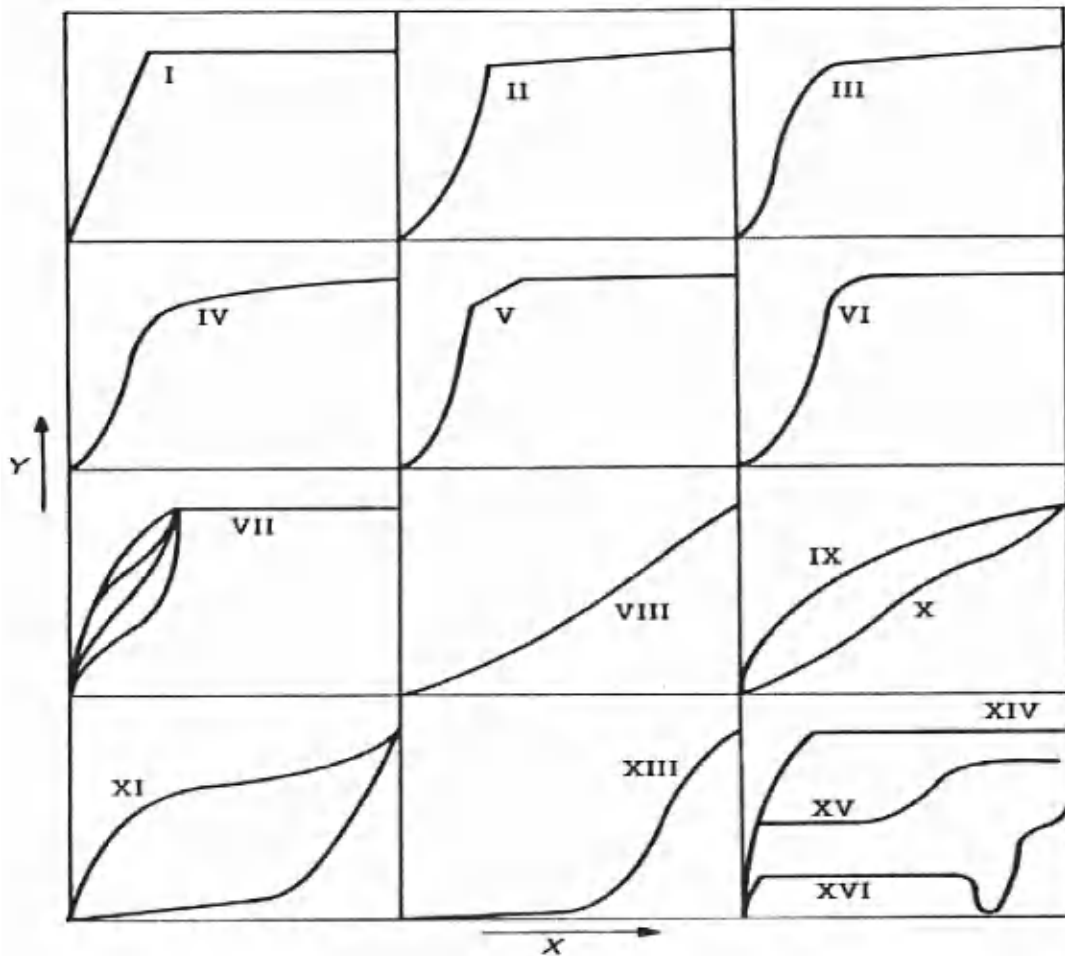


Figure 2.1 : différents formes des courbes caractéristiques de séchages pour multiple produit (van Brakel & Heertjes, 1978).

2.2. Matériaux Poreux Hygroscopique et Capillaire

Dans le séchage la distinction entre les matériaux poreux hygroscopique et capillaire est très importante car chaque famille suit un modèle différent de courbes caractéristiques de séchage, due au non existence de la période à vitesse de séchage constante dans les matériaux hygroscopiques, contrairement aux matériaux capillaires. (Geoffroy & Prat, 2014).

Dans les matériaux capillaires, l'eau est essentiellement fixée par capillarité, et sont caractérisés par des pores dont la majorité ont un diamètre supérieur à 100 nm et la partie occupé par l'eau adsorbée est négligeable (Geoffroy & Prat, 2014).

- Les matériaux capillaires ne rétrécissent pas en présence de la chaleur.
- La vapeur est une fonction de la température.

Les matériaux dits purement hygroscopiques sont caractérisés par des pores dont leur diamètre inférieur à 100 nm. Dans ce type de matériaux, une bonne partie de l'eau est fixée essentiellement, par adsorption (Geoffroy & Prat, 2014).

Il existe des produits naturels, ayant une large gamme de diamètres des pores plus et moins de 100 nm. Ce sont des matériaux capillaires hygroscopiques.

- Difficile à enlever l'eau depuis ces matériaux.
- Les matériaux hygroscopiques souvent rétrécissent en présence de la chaleur.

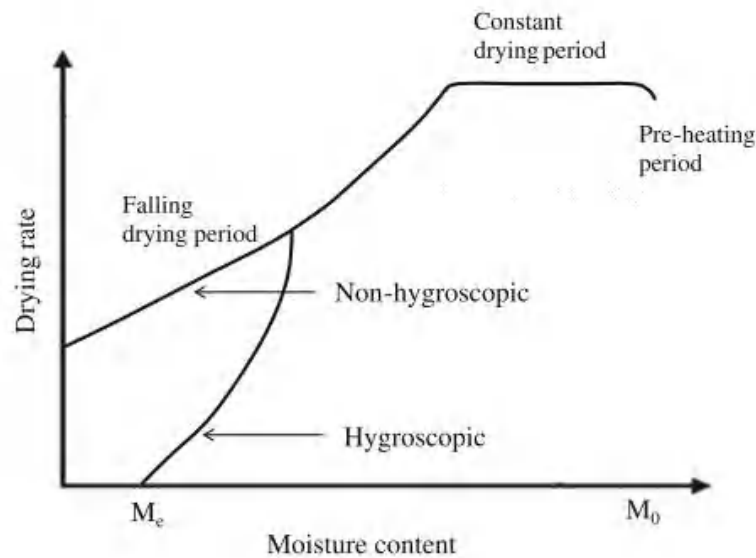


Figure 2.2 : la vitesse de séchage d'un matériau poreux (van Brakel & Heertjes, 1978).

2.3. Traitement Phénoménologique du processus dans les séchoirs

a) Séchage en Couche Épaisse

Ce phénomène représente plusieurs applications de séchage dont : la boue, le béton, le séchage des produits granulé comme le blé, maïs, le riz...etc, sont parmi les plus répandus. Dans cette configuration l'entreposage des produits à sécher est considéré comme lit profond, le séchage se produit graduellement suivants des couches (par zone), Il est évident que la zone inférieure sèche rapidement. L'air qui monte, vers les zones supérieures, sa teneur en humidité va augmenter au cours de leur chemine et se refroidit en raison de l'évaporation. Ainsi, un gradient de température et d'humidité relative se forme entre la zone inférieure et la zone supérieure (Belessiotis &

Delyannis, 2011). La température de la chambre de séchage, la profondeur du lit et le débit d'air exercé, sont les paramètres qui peuvent influencer ou bien contrôler le processus de séchage et par conséquent, la qualité finale du produit.

La vitesse de séchage est contrôlée par des mécanismes interne et externe.

b) Séchage en Couche Mince

Cette hypothèse simplificatrice décrit le phénomène de séchage d'une manière simple et facile à résoudre, en négligeant les mécanismes de transport à l'intérieur du produit et en supposant que le produit sèche en une seule couche. Ainsi, la température et l'humidité sont uniformes et ne varient pas dans le produit. Plusieurs représentations théoriques et expérimentales sont présentées dans la littérature afin de modéliser et prédire le séchage par couche mince. La déshydratation de multiples produits agroalimentaire est déjà procédée par l'utilisation de cette supposition (Belessiotis & Delyannis, 2011).

Durant ce type de modélisation la vitesse de séchage est contrôlée que par des mécanismes externes.

2.4. Formulation mathématique des modèles de la couche mince

La formulation de la couche mince a pris beaucoup d'importance dans les études de séchage à cause de la simplicité offerte par les modèles qui représentent cette forme. Elle signifie que le produit sèche comme une seule couche (Kavak Akpınar et al., 2006) (Dinçer & Zamfirescu, 2016) (Akpınar, 2006) dont la variation d températures, de pression et humidité sont négligeables à travers l'épaisseur du produit (Henderson & Pabis, 1961). En plus les paramètres qui caractérisent le produit deviennent inutiles. Alors que, la détermination de ces derniers représente un grand casse-tête pour les chercheurs. Cela permet la simplification de la modélisation mathématique des phénomènes de transport (masse et chaleur) qui prend place dans le processus de séchage. En effet, la précision dans cette configuration reste bonne. Ces modèles sont regroupés suivant trois familles principales : des modèles purement empiriques, théoriques et semi-théoriques.

2.4.1. Modèles de Couche Mince

Les modèles de la couche mince, les plus utilisés, sont :

2.4.1.1. Les modèles théoriques

Les modèles théoriques définissent le comportement du produit durant le séchage de façon très claire et sont indépendants des conditions hygrothermiques de séchage (Erbay & Icier, 2010). Cette approche est appliquée quand la cinétique de séchage à une vitesse décroissante et le transfert interne de vapeur se fait notamment, par diffusion ou par mouvement capillaire (Ratti, 2008).

Dans les problèmes où le mode de transfert de masse est supposé par diffusion, l'équation entourant le phénomène est écrite par (Ratti, 2008) :

$$\frac{\partial X}{\partial t} = z \left(D_{eff} - zX \right) \quad (2.1)$$

(Crank, 1979) propose une solution analytique à ce problème dans une seule direction pour des géométries différents (plaque infinie, cylindre infinie, sphère) mais régulière avec un coefficient de diffusivité constant dans certaines conditions aux limites :

Plaque infinie

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-(2n+1)^2 \pi^2 \frac{D_{eff}(t-t_0)}{L^2}\right] \quad (2.2)$$

Sphère

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left[-\pi^2 n^2 \frac{D_{eff}(t-t_0)}{R^2}\right] \quad (2.3)$$

Cylindre

$$MR = \frac{8}{R^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(\beta_n)^2} \exp\left[-D_{eff} \beta_n^2 (t - t_0)\right] \quad (2.4)$$

2.4.1.2. Modèles Semi-Théoriques

Cette classe est répartie en deux sous-groupes essentiels où la distinction entre ces groupes est basée sur le mode de transfert de masse : soit par convection donc les modèles dans cette catégorie suivent la loi de Newton, dans l'autre catégorie est par diffusion moléculaire et elles suivent la deuxième loi de Fick (Erbay & Icier, 2010).

a) Modèles dérivés depuis la deuxième loi de Fick

Le modèle de Henderson and Pabis (un seul terme)

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_i - M_e)} = a \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{A_2} t\right) \quad (2.5)$$

Le modèle de Logarithmic (Asymptotic)

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_i - M_e)} = a \exp(-kt) + c \quad (2.6)$$

Le modèle de Midilli

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_i - M_e)} = a \exp(-kt) + b * t \quad (2.7)$$

Le modèle modifié de Midilli

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_i - M_e)} = \exp(-kt) + b * t \quad (2.8)$$

Le modèle de Demir et al.

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_i - M_e)} = a \exp[(-kt)] n + b \quad (2.9)$$

Le modèle de Two-Term

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_i - M_e)} = a \exp(-k_1 t) + b \exp(-k_2 t) \quad (2.10)$$

Le modèle de Two-Term Exponential

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_i - M_e)} = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat) \quad (2.11)$$

Le modèle modifié de Two-Term Exponential

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_i - M_e)} = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-gt) \quad (2.12)$$

Le modèle modifié de Henderson and Pabis (Three Term Exponential)

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_i - M_e)} = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht) \quad (2.13)$$

b) Modèles drivé depuis la loi de Newton

Le modèle de Lewis (Newton)

$$\frac{dM}{dt} = -K (M - M_e) \quad (2.14)$$

Le modèle de Page

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_i - M_e)} = \exp(-kt^n) \quad (2.15)$$

Le modèle modifie de Page

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_i - M_e)} = \exp(-kt)^n \quad (2.16)$$

2.4.1.3. Modèle Empiriques

Ces modèles sont extraits purement depuis des travaux expérimentaux dans des conditions climatiques différents en grand nombre. Elles donnent toujours des meilleurs paramètres qui caractérisent convenablement le processus de séchage. Ces modèles liés avec les conditions de l'air de séchage (température, humidité, pression). Les modèles empiriques présentent une relation directe entre la teneur en eau et le temps de séchage (Ertekin & Firat, 2017).

Parmi les modèles de séchage empiriques on peut citer :

Le modèle de Thompson

$$t = a \ln (MR) + b [\ln (MR)]^2 \quad (2.17)$$

Le modèle de Wang and Singh

$$MR = 1 + b^*t + a^*t^2 \quad (2.18)$$

Le modèle de Kaleemullah

$$MR = \exp[(-c^*T + b^*)t^{(pT+n)}] \quad (2.19)$$

Chapitre 3

Courbes de sorption & Activité de l'eau

3.1. Phénomène du Sorption

3.1.1. Introduction

Les courbes de sorption ont un intérêt particulier dans les études de séchage. En effet, à travers ces isothermes on peut prédire le temps nécessaire pour la déshydratation et l'énergie nécessaire pour le séchage par la détermination de l'enthalpie de sorption (Tsami, 1991), ainsi que l'estimation de temps du stockage pour certains produits (CHIRIFE & IGLESIAS, 1978), de déterminer les conditions optimales de stockage, et les limites de contamination (Tsami, 1991), de distinguer le mode de liaison entre l'eau et la matière sèche à l'intérieur du produit.....etc.

Ces courbes sont très liées par les conditions expérimentales et à la forme physique de produit.

A) Activité d'eau

C'est la mesure de la statue énergétique (thermodynamique) de l'eau à l'intérieur des produits. Elle nous donne une idée sur la liaison entre les molécules de la matière et l'eau dans le produit. En d'autre terme, elle représente le rapport entre la pression de vapeur eau dans le matériau à celle du l'eau pure.

$$a_w = \frac{P_v}{P_w} \quad (3.1)$$

Pv : pression de vapeur d'eau

Pw : pression d'eau pure

On peut définir l'activité de l'eau par l'humidité relative du produit.

La relation entre l'activité en eau et le degré de liaisons (mass sèche – eau) peuvent être résumé dans la suite :

- Eau fortement liée $a_w < 0.3$.
- Eau suffisamment liée a_w entre 0.3 - 0.7.
- Eau faiblement liée $a_w > 0.7$.
- Eau libre $a_w \approx 1.0$.

B) Teneur en eau

La teneur en eau représente la quantité d'eau contenue dans un produit et peut être déterminée selon deux formes : par rapport à la base sèche, ou à la base humide.

La teneur d'eau en base sèche :

$$X = \frac{M - M_s}{M_s} \quad (3.2)$$

La teneur d'eau en base humide :

$$X = \frac{M - M_s}{M_h} \quad (3.3)$$

3.1.2. Isothermes de sorption

3.1.2.1. Définition :

La relation entre l'activité d'eau et la teneur en eau en équilibre thermodynamique constitue les isothermes de sorption :

L'isotherme d'adsorption est une mesure de l'hygroscopicité de matière, et elle est déterminée expérimentalement en partant d'un produit sec (Jannot, 2008).

L'isotherme de désorption est une mesure utile qui bien décrire le comportement du produit durant la déshydratation, et elle est déterminée expérimentalement en partant d'un produit saturé (Jannot, 2008).

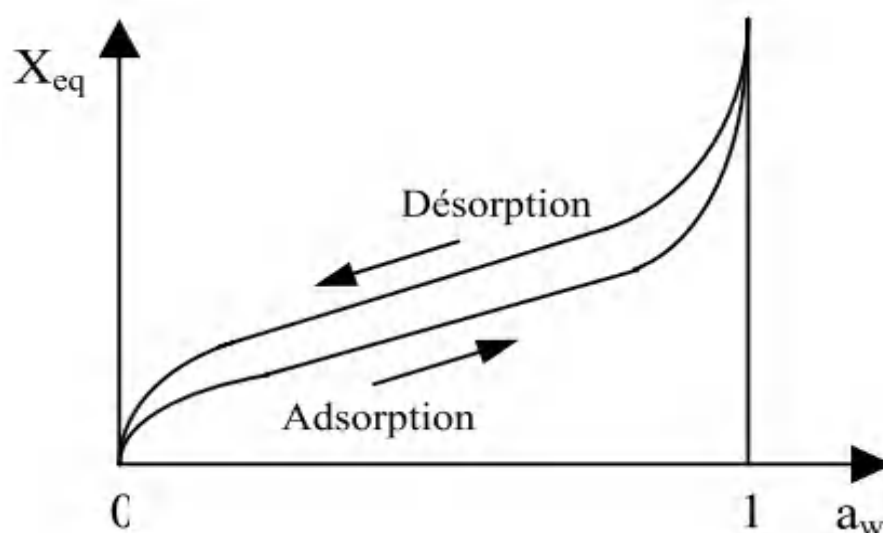


Figure 3.1 : Phénomène d'hystérésis (Arsdel, 1983).

3.1.2.2. L'effet d'hystérésis

Si on déshydrate et ensuite on réhydrate un produit, les chemins qui évaluent la désorption et l'adsorption ne sont pas les mêmes, comme le montre la figure 3.2. Ce phénomène est connu par l'effet d'hystérésis.

L'effet d'hystérésis peut être expliqué comme le résultat de l'eau condensée dans des capillaires disposée selon des formes comme schématisé dans la figure 3.2. En conséquence, l'enlèvement d'eau (désorption) est plus difficile par rapport au remplissage (adsorption) [DEHYDRATION OF FOODS].

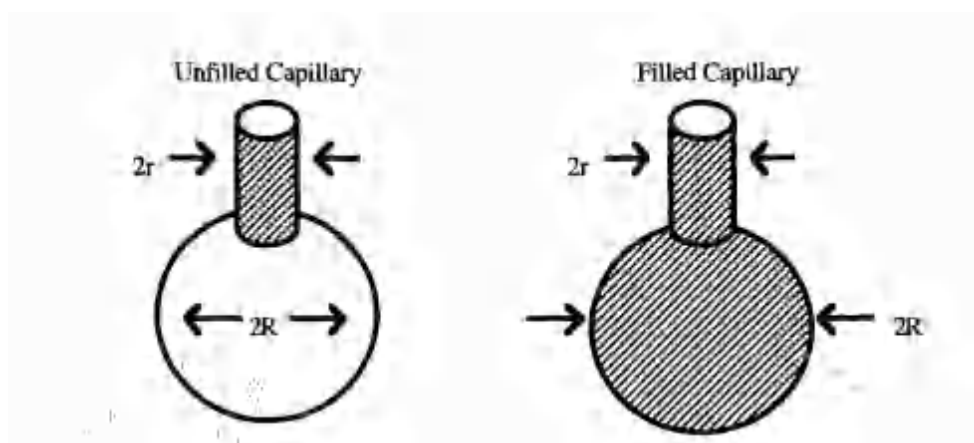


Figure 3.2 : Phénomène d'hystérésis au niveau des capillaires (Arsdel, 1983).

De nombreux modèles mathématiques ont été proposés pour décrire les isothermes d'adsorption/désorption, car il n'existe pas d'équation générale globale qui peuvent bien décrire le phénomène de sorption pour tous les produits soumis au séchage (J. M.P.Q. Delgado & Barbosa de Lima, 2014).

3.1.2.3. Forme des courbes de sorption

L'activité d'eau en fonction des contenues en eau dans un équilibre thermodynamique forme les courbes de sorption, d'où leur allures sont généralement suivent des formes comme les mentionnées dans la figure suivante :

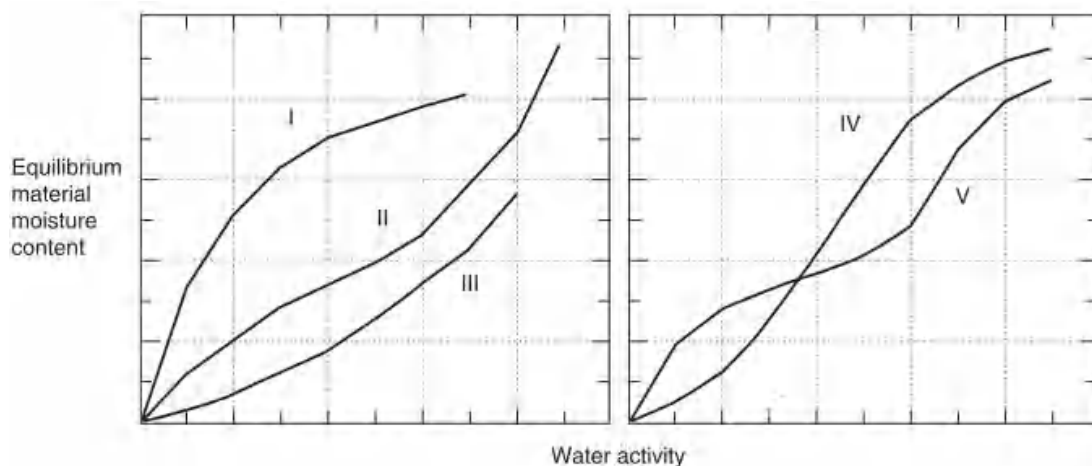


Figure 3.3: Les formes de courbe de sorption (Marinos-Kouris & Maroulis, 2006).

3.2. Activité d'eau et stabilité

Sachant que l'activité d'eau est le paramètre le plus lié aux propriétés physiques, chimiques et biologiques des aliments et autres produits biologiques. Des changements spécifiques de couleur, d'arôme, de saveur, de texture, de stabilité et d'acceptabilité de ces produits crus et transformés ont été associés à des plages d'activité d'eau relativement étroites.

3.2.1. Changements influencé par la variation dans l'activité en eau

Durant le séchage les produits agroalimentaires et biologiques subissent des variations dans leur activité d'eau, et ceci causera des changements physico-chimiques dans leur structure. Ces changements sont typiquement des développements microbien, réactions enzymatique, réaction non-enzymatique, brunissement non enzymatique et oxydation des lipides, changements dans la texture, pertes dans l'arôme et la saveur, diminution dans les protéines et vitamines plus d'autres changements ...etc (Campbell-platt, 2010; Schweigert et al., n.d.).

3.2.2. Le développement microbien

La réduction dans l'activité de l'eau sert à stabiliser les produits alimentaires. La plupart des bactéries ne se développent pas en dessous d'une activité d'égale à 0,90 et la plupart des souches de moisissures et de levures sont inhibées entre 0,88 et 0,80, bien que certaines souches de levures osmophiles puissent encore se développer jusqu'à des valeurs plus basses 0,6. (Campbell-platt, 2010; Schweigert et al., n.d.).

3.2.3. Les réactions enzymatiques

L'activité enzymatique n'est pas souhaitable car elle affecte la quantité de nutriments dans les aliments (Arsdel, 1983). Les réactions enzymatiques peuvent se produire dans les aliments à faible teneur en eau lorsque les enzymes n'ont pas été inactivées par le chauffage. Une corrélation entre l'activité des enzymes et la teneur en eau des aliments a été démontrée. Bien que cette corrélation soit complexe, il est préférable de l'exprimer en fonction de l'activité de l'eau plutôt que de la teneur en eau (Campbell-platt, 2010; Schweigert et al., n.d.).

3.2.4. Les réactions non-enzymatiques et l'oxydation des lipides

Le brunissement non enzymatique, qui implique la réaction entre les composants carbonyle et amino, et l'oxydation des lipides sont les principaux mécanismes chimiques de détérioration qui limitent la stabilité des aliments à faible et moyenne teneur en eau (activité d'eau) (Campbell-platt, 2010; Schweigert et al., n.d.).

Deux types de brunissement peuvent être définis : la caramélisation et les réactions de Maillard. Le brunissement de nombreux aliments peut être esthétiquement désirable ou indésirable en raison des couleurs, des arômes et des saveurs qui peuvent se développer. Dans de nombreux cas, éviter la réaction de brunissement empêchera la perte de nutriments essentiels tels que les acides aminés (Arsdel, 1983; Barbosa-Cánovas & Vega-Mercado, 1996).

3.2.5. Changement dans la texture

La texture est l'un des paramètres les plus importants, liés à la qualité du produit. Les propriétés texturales sont généralement liées à des tests mécaniques, qui examinent le comportement viscoélastique du matériau, durant le séchage est spécifiquement à cause de l'abaissement de conteneur en eau dans le produit à sécher (Krokida & Maroulis, 2000).

La figure 3.4 montre la stabilité en termes de limites de croissance microbienne et de taux de réactions de dégradation en fonction de l'activité de l'eau.

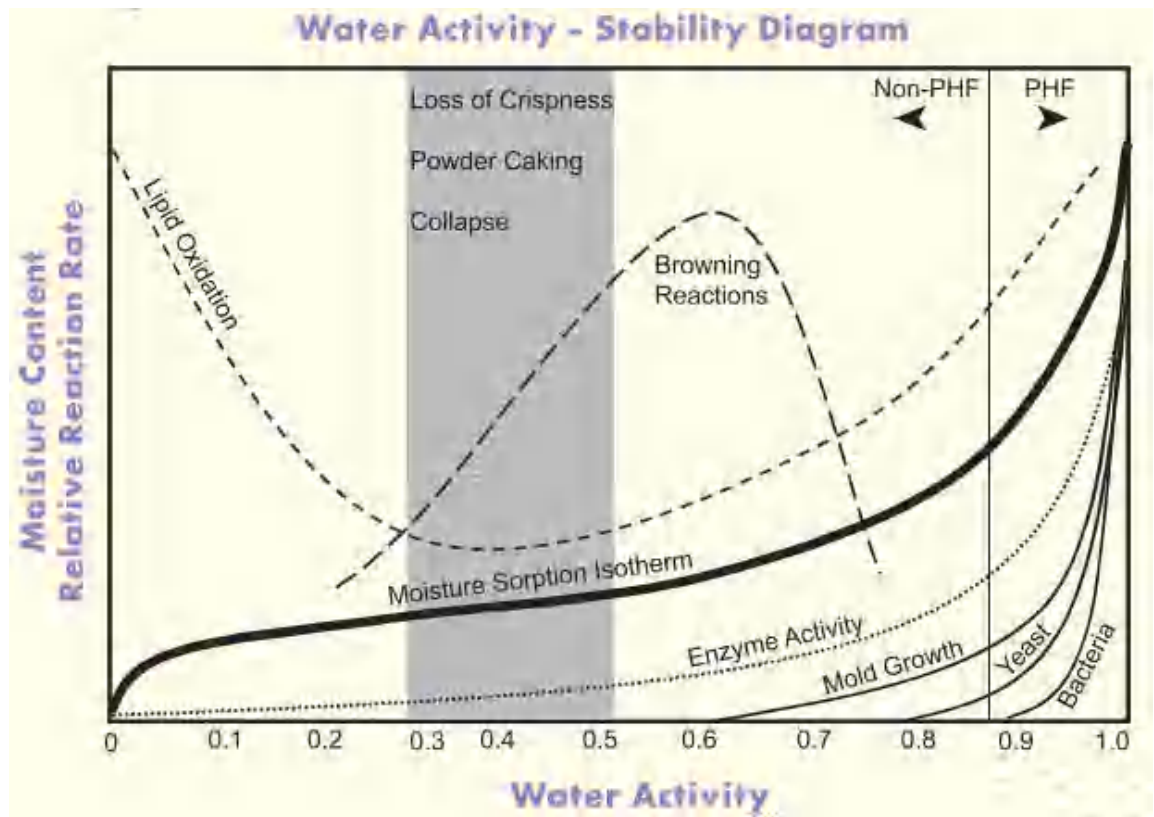


Figure 3.4 : L'activité d'eau et les développements des micro-organismes dans les produits biologiques (Fontana & Campbell, 2004).

Tableau 01 : limites de désactivation des micro-organismes en fonction d'activité d'eau de certains produits.

Range of a_w	Microorganisms generally inhibited by lowest a_w in this range	Foods generally within this range
1.00-0.95	<i>Pseudomonas</i> , <i>Escherichia</i> , <i>Proteus</i> , <i>Shigella</i> , <i>Klebsiella</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Clostridium perfringens</i> , some yeasts	Highly perishable (fresh) foods and canned fruits, vegetables, meat, fish, milk
0.95-0.91	<i>Salmonella</i> , <i>Vibrio parahaemolyticus</i> , <i>C. botulinum</i> , <i>Serratia</i> , <i>Lactobacillus</i> , <i>Pediococcus</i> , some molds, yeasts (<i>Rhodotorula</i> , <i>Pichia</i>)	Some cheeses (Cheddar, Swiss, Muenster, Provolone), cured meat (ham)
0.91-0.87	Many yeasts (<i>Candida</i> , <i>Torulopsis</i> , <i>Hansenula</i>), <i>Micrococcus</i>	Fermented sausage (salami), sponge cakes, dry cheeses, margarine
0.87-0.80	Most molds (mycotoxigenic penicillia), <i>Staphylococcus aureus</i> , most <i>Saccharomyces</i> (<i>bailii</i>) spp., <i>Debaryomyces</i>	Most fruit juice concentrates, sweetened condensed milk, syrups
0.80-0.75	Most halophilic bacteria, mycotoxigenic aspergilli	Jam, marmalade, marzipan, glacé fruits
0.75-0.65	Xerophilic molds (<i>Aspergillus chevalieri</i> , <i>A. candidus</i> , <i>Wallemia sebi</i>), <i>Saccharomyces bisporus</i>	Jelly, molasses, raw cane sugar, some dried fruits, nuts
0.65-0.60	Osmophilic yeasts (<i>Saccharomyces rouxii</i>), few molds (<i>Aspergillus echinulatus</i> , <i>Monascus bisporus</i>)	Dried fruits containing 15-20% moisture; some toffees and caramels, honey
0.60-0.50	No microbial proliferation	Dry pasta, spices
0.50-0.40	No microbial proliferation	Whole egg powder
0.40-0.30	No microbial proliferation	Cookies, crackers, bread crusts
0.30-0.20	No microbial proliferation	Whole milk powder; dried vegetables

3.3. Méthodes expérimentales de détermination des courbes de sorption.

Plusieurs techniques ont été développées ainsi utilisées pour déterminer les isothermes de sorption parmi lesquelles on peut citer :

3.3.1. Méthode gravimétrique

La méthode de dessiccateurs est la méthode de référence. Elle consiste à maintenir une température de l'air, ainsi que l'activité de l'eau constante, jusqu'à ce que la teneur en humidité de l'échantillon atteigne une valeur d'équilibre constante. L'air peut être en mouvement ou bien forcé (méthodes dynamiques) sinon stagnant (statique). Le poids du matériau peut être enregistré en continu (méthodes continues) ou en discontinu (méthodes discontinues) (Marinos-Kouris & Maroulis, 2006).

3.3.2. Les méthodes hygrométriques

3.3.2.1. Utilisant un système de sorption du vapeur dynamique

Pendant l'expérience, la teneur en humidité du matériau est maintenue constante jusqu'à ce que l'air ambiant atteigne l'équilibre thermodynamique (Marinos-Kouris & Maroulis, 2006).

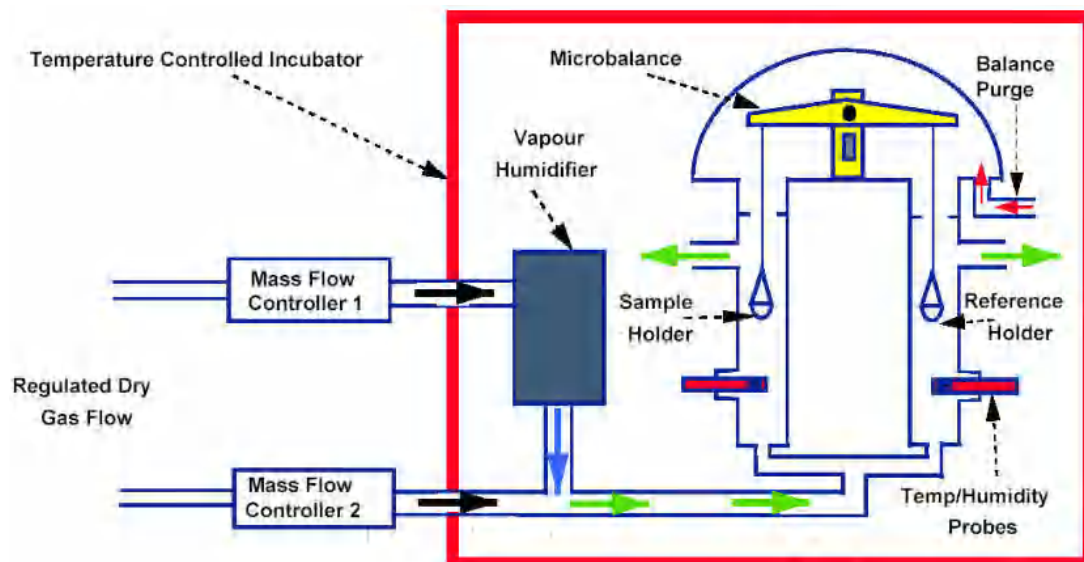


Figure 3.5 : Schéma d'un système dynamique à vapeur utilisé dans la détermination de l'isotherme de sorption (Marinos-Kouris & Maroulis, 2006).

3.3.2.2. Utilisant du câble électrique

Les fils électriques recouverts avec du sel hygroscopique ou d'un gel de polystyrène sulfoné sont de très bons hygromètres dans lequel la conductance ou la

capacité change lorsque le revêtement absorbe l'humidité depuis l'échantillon. L'inconvénient principal de ce modèle est la tendance du sel hygroscopique à être contaminé par des composés polaires, ce qui entraîne des mauvaises lectures dans l'activité de l'eau (Arsdel, 1983; Barbosa-Cánovas & Vega-Mercado, 1996).

3.3.2.3. Utilisant des cheveux ou des polymères

Cette méthode consiste à utiliser des cheveux car ce sont de bons hygromètres et une fois que la fibre est exposée à une forte activité de l'eau, la longueur de la fibre s'allongera. Ce procédé est le moins sensible que par rapport d'autres instruments ($\pm 0,03 a_w$) et l'inconvénient principal de ce type d'hygromètre est le délai de l'équilibre thermodynamique (Barbosa-Cánovas & Vega-Mercado, 1996).

3.3.3. Méthode manométrique

La pression de vapeur de l'eau en équilibre avec un aliment à une teneur en humidité donnée est mesurée par un appareil manométrique sensible (Schweigert et al., n.d.).

3.4. Les modèles empiriques et théoriques des courbes De Sorption

La difficulté d'avoir d'un modèle mathématique unique qui représente bien et décrit précisément les isothermes de sorption, (un modèle) soit théorique ou empirique dans une plage entière ou majoritaire d'activité d'eau pour différents types des matériaux, est due à certains raisons (CHIRIFE & IGLESIAS, 1978) parmi lesquelles :

- (1) La diminution de l'activité de l'eau dans certains matériaux est due à une combinaison de facteurs dont chacun peut être prédominant dans une plage donnée d'activité de l'eau.
- (2) Les isothermes de sorption des aliments représentent une intégrité des propriétés hygroscopiques de nombreux constituants dans le même produit dont les propriétés de sorption peuvent changer en conséquence d'interactions physiques et/ou chimiques induites par le chauffage ou d'autres prétraitements.

De nombreuses tentatives ont été faites pour décrire mathématiquement les isothermes de sorption. Alors que certains modèles ont été dérivés théoriquement sur la base de concepts thermodynamiques, d'autres sont une forme étendue ou modifiée

de ces modèles (Basu et al., 2006). Certains des modèles mathématiques largement utilisés sont présentés par la suite :

a) Le modèle Langmuir

C'est l'un des modèles cinétiques les plus simples, fournissant toujours un aperçu utile de la dépendance à la pression de l'étendue de l'adsorption de surface pour les matériaux biologiques. Le modèle donne d'assez bonnes prédictions dans une fourchette de a_w de 0 à 0,3 en s'appuyant sur un certain nombre d'hypothèses. Le modèle suppose que l'adsorption est limitée à la couverture monocouche alors que tous les sites de surface sont équivalents, ce qui peut accueillir au plus un atome adsorbé. Aussi, la capacité d'une molécule à adsorber des molécules d'eau sur un site donné est supposée indépendante de l'occupation des sites voisins. En théorie, si un gaz est en contact avec un solide, l'équilibre va s'établir entre les molécules en phase gazeuse et les espèces adsorbées correspondantes (molécules ou atomes) liées à la surface du solide (Barbosa-Cánovas et al., 2020).

Ce modèle est défini par :

$$a_w \left(\frac{1}{M} - \frac{1}{M_0} \right) = \frac{1}{CM_0} \tag{3.4}$$

Où M_0 est le contenu en eau de la monocouche et C : est une constante.

b) Le modèle BET

Le modèle de BET a été développé à partir de l'équation de Langmuir par Stephen Brunauer, Paul Emmet et Edward Teller (1938) spécifiquement pour les gaz non polaires sur des surfaces non polaires (Barbosa-Cánovas et al., 2020). Ce modèle a élargi la fourchette d'activité d'eau défini par Langmuir vers [0—0.55]

$$\frac{M}{M_0} = \frac{Ca_w}{(1-a_w)[1+(C-1)a_w]} \tag{3.5}$$

Ou

$$\frac{a_w}{(1-a_w)M} = \frac{1}{M_0C} + \frac{C-1}{M_0C} a_w \tag{3.6}$$

M est la teneur en humidité à l'équilibre (kg eau = kg matière sèche), M_0 est la teneur en humidité de la monocouche sur la surface interne (kg eau = kg matière sèche)

et C est un paramètre sans dimension lié à la chaleur de sorption de la région monocouche (Basu et al., 2006)

c) Le modèle GAB

L'équation de Guggenheim–Anderson–de Boer (GAB) est considérée comme le modèle le plus polyvalent, capable de s'appliquer à des situations sur une large gamme d'activités de l'eau ($0,1 < a_w < 0,9$) et à divers matériaux (inorganiques, aliments, etc.). L'équation GAB est probablement la plus adaptée à l'analyse des procédés et à la conception du séchage en raison de sa fiabilité, de sa forme mathématique simple (Marinos-Kouris & Maroulis, 2006).

$$\frac{X_e}{X_m} = \frac{CKa_w}{(1-Ka_w)[1-Ka_w+CKa_w]} \quad (3.7)$$

Le modèle GAB est dérivé depuis la théorie BET et contiens généralement trois coefficients : K, C et X_m, où C et X_m sont similaires à ceux de l'équation BET et constituent un troisième paramètre qui améliore l'ajustement à une plage plus large de teneurs en humidité (Ratti, 2008).

d) Le modèle Halsey

Halsey (Basu et al., 2006) a développé une équation pour décrire la condensation des multicouches, en supposant que l'énergie potentielle d'une molécule varie inversement à la puissance C et de sa distance à la surface. L'équation est :

$$a_w = \exp\left(-\frac{AM^{-c}}{RT}\right) \quad (3.8)$$

Ce modèle est valable dans une plage d'activité d'eau comprise entre $0.1 < a_w < 0.8$.

e) Le modèle Chung and Pfoest modifié

Chung et Pfoest ont développé un modèle basé sur l'hypothèse que le changement d'énergie libre de sorption est lié à la teneur en eau (Basu et al., 2006).

$$a_w = \exp\left(\frac{-A}{T+C} \exp(-BM)\right) \quad (3.9)$$

M C'est le contenu en eau, A, B, C sont des constants.

f) Le modèle de Smith

Le modèle de Smith a été développé par Smith (1947) en tant que modèle empirique à deux paramètres pour décrire la dernière partie courbée des isothermes de sorption pour les biopolymères à haut poids moléculaire. Les résultats expérimentaux ont montré que l'équation est limitée à un niveau a_w de 0,5 à 0,95 (Basu et al., 2006).

$$M_w = A + B \ln(1 - a_w) \quad (3.10)$$

M_w C'est le contenu en eau, A, B sont des constants.

g) Le modèle de Iglesias-Chirife

Iglesias-cherife ont proposé un modèle empirique qui décrit le comportement des isothermes de sorption pour les fruits et les produits qui ont des concentrations en sucres élevées (high-sugar level) (Barbosa-Cánovas & Vega-Mercado, 1996; CHIRIFE & IGLESIAS, 1978). Et exprimé par :

$$\ln(X_e + (X_e^2 + X_{in})^{0.5}) = b a_w + p \quad (3.11)$$

X_{in} Est le contenu en eau à l'équilibre thermodynamique à a_w égale 0.5, X_e C'est la teneur en eau à l'équilibre thermodynamique et b, p sont les paramètres du modèle.

h) Le modèle Bradley

Dans sa théorie, Bradley (1936) suppose que la surface adsorbante est de nature polaire. La première couche est sorbée à cause des dipôles fortement induits et ces dipôles, à leur tour, polarisent la deuxième couche qui à son tour polarise la troisième couche (CHIRIFE & IGLESIAS, 1978), etc.

$$\ln\left(\frac{1}{A_w}\right) = K_2 K_1^M \quad (3.12)$$

Où, K_1 et K_2 , sont des constantes, a_w fait référence à l'activité de l'eau et M c'est la teneur en eau, à base sèche. La plage d'activité d'eau de ce modèle est entre 0.05-0.95.

On peut écrire l'équation précédente comme :

$$\ln(\ln\left(\frac{1}{A_w}\right)) = \ln(K_2) + M \ln(K_1) \quad (3.13)$$

i) Le modèle de Caurie

(Caurie, 1970), a proposé l'équation suivante basée sur une manipulation purement mathématique.

$$\ln(C) = \ln(A) - rA_w \quad (3.14)$$

Ou A et r sont des constants et C représente une concentration d'eau .Cette équation est valable à partir d'une activité de l'eau nulle jusqu'à une activité de l'eau de 0,85 pour la plupart des aliments.

j) Le modèle de Chen

Le modèle développé par Chen (1971) est lié à la théorie du séchage. Son analyse est principalement dans un état stationnaire, l'équation de séchage et se limite aux situations où la diffusion est le principal mode de transport de masse (BOQUET et al., 1978). L'équation développée est,

$$A_w = \exp(k + a \exp(bM)) \quad (3.15)$$

Ou k, a et b sont des constants.

k) Le modèle d'Owsin:

Ce modèle a été développé par Oswin (1946) comme un autre modèle empirique à deux paramètres sous la forme d'un développement en série pour les courbes de forme sigmoïde (Barbosa-Cánovas et al., 2020):

$$M_w = A \left(\frac{a_w}{1-a_w} \right)^B \quad (3.16)$$

M_w C'est le contenue en eau, A, B sont des constants.

l) Le modèle de Peleg:

Dérivé par (Peleg, 1993) est un modèle empirique à quatre paramètres c'est le plus simple et mieux utilisé pour les isothermes de sorption d'eau de formes sigmoïdes et non sigmoïdes. L'équation comprend une double expansion de puissance comme suit :

$$M_w = Aa_w^C + Ba_w^D \quad (3.17)$$

A, B, C, D sont des constants Ou $C < 1$ and $D > 1$.

m) Le modèle de LESPAM

C'est un nouveau modèle développé par le laboratoire de l'énergie solaire et les plantes aromatiques et médicinales (LESPAM) (Benhamou et al., 2010) ce modèle est basé sur la théorie des diodes et les jonctions, dont l'eau à l'intérieur des produits agroalimentaires et plantes médicinales se présente sous deux formes soit : eau libre ou hydraté.

LESPAM est applicable pour une grande variété des plantes médicinales et aromatiques avec un excellent degré de certitude dans une plage d'activité d'eau comprenne entre $0 < a_w < 1$, cette qualité n'est pas offerte par les autres modèles.

Ce modèle est définit par :

$$X_{eq} = A. \exp \left(\frac{B. a_w}{\theta} \right) + C \quad (3.18)$$

A, B, C sont des constants du modèle et θ représente la température.

3.5. La chaleur de mouillage [chaleur de sorption]

Une donnée important relative à la sorption de l'eau est celui de la chaleur de mouillage. Comme déduite par (Peleg, 1993), une adsorption considérable peut se produire à de faibles pressions de vapeur causée par la force d'attraction de l'adsorbant (la mass sèche) pour la vapeur d'eau (adsorbat), étant considérablement supérieure à la force d'attraction de l'adsorbat par lui-même. Dans tous les cas, l'adsorption s'accompagne d'un dégagement de chaleur, cette quantité physique est appelé la chaleur de mouillage (Peleg, 1993).

Le calcul de la consommation d'énergie lors du séchage nécessite une connaissance de l'enthalpie de sorption (chaleur de sorption) dans toute la plage des teneurs en eau (Tsami, 1991).

Cette quantité physique communément déduite depuis la relation de Clausius Clapeyron équation :

$$\frac{d \ln a_w}{d\left(\frac{1}{T}\right)\Big|_w} = \frac{q_{st,n}}{R} \quad (3.18)$$

Avec

$$q_{st,n} = q_{st} - \Delta H_{vap} \quad (3.19)$$

Ou a_w est l'activité d'eau, $q_{st,n}$ nette chaleur iso-stérique de sorption (kJ/mol d'eau), q_{st} chaleur iso-stérique de sorption (kJ/mol d'eau), ΔH_{vap} Chaleur de vaporisation (kJ/mol d'eau).

La procédure de calcul est brièvement décrite par la suite. A une teneur en eau spécifique (M), l'activité de l'eau correspondante est déterminée à plusieurs températures, en utilisant les courbes de sorption, et la droite de régression de $\ln(a_w)$ en fonction de $1/T$ est calculée. La pente de la droite peut être utilisée pour le calcul de $q_{st,n}$. Cette procédure doit être répétée pour de nombreuses valeurs de M, afin de détecter la dépendance de $q_{st,n}$ sur la teneur en eau (IGLESIAS & CHIRIFE, 1976).

Chapitre 4

Étude expérimentale I :
Obtention des courbes de sorption &
de l'activité de l'eau du *myrtus communis*

Le but de cette partie du travail est la détermination expérimentale des isothermes de sorption pour les feuilles de myrtus communis L sous différentes températures. L'analyse de ces isothermes est faite, en comparant ces résultats avec des modèles théoriques et expérimentaux et en figurant le modèle le plus adéquat pour décrire le phénomène de sorption des feuilles de myrte.

4.1. LE MYRTUS COMMUNIS

4.1.1. Introduction

Le myrte commun (*Myrtus communis*), est un arbuste vivace typiquement méditerranéen, profondément ancré dans la culture et les croyances des peuples riverains de la grande bleue. En plus de ces croyances, on lui attribue depuis longtemps des propriétés médicinales. Le myrte appartient à la famille des Myrtacées, comme l'eucalyptus, le giroflier, le niaouli et l'arbre à thé. Ces espèces sont communément décrites comme possédant des propriétés pharmacologiques, il n'est donc pas surprenant que tant de vertus soient attribuées au myrte. Et des rencontres principalement en France, en Espagne, en Tunisie, au Maroc, en Algérie et dans les Balkans et en Yougoslavie. On peut également le trouver comme plante cultivée dans les jardins d'autres pays. Différentes parties de la plante ont des usages différents ; Une huile essentielle est obtenue à partir de feuilles et de fleurs Frais ou sèche par distillation à la vapeur et est utilisée pour aromatiser les aliments (viandes, sauces, etc.) et comme matière première en parfumerie. Ses feuilles, ses fruits, ses fleurs et ses racines sont recommandées en médecine traditionnelle (IAZZOURANE, 2015) .



Figure 4.1 : Plant de *Myrtus Communis* (<http://www.medipalm.com/fr>).

4.1.2. Histoire et utilisation traditionnelle

Le nom myrte vient du mot grec myrtos, qui signifie parfum. Comme Mersin ou Rihan chez les Arabes, ou Tarihant ou Tchilmoun (fruit) chez les Berbères et les Touaregs, c'est une plante à odeur aromatique de la famille des Myrtacées. La plante est connue depuis l'Antiquité où les scientifiques trouvaient ses branches dans les tombes des pharaons et relevaient de nombreuses recettes des papyrus pharaoniques pour le traitement de l'épilepsie, de la cystite et de la régulation urinaire. Les Romains la connaissaient et les Grecs pour la gloire et les victoires, les Musulmans utilisé et utilisé il est encore utilisé dans certains pays pour décorer les tombes lors des fêtes, Dioscuride décrit : la préparation de son huile et prescrit un extrait dans le vin contre les pneumonies et les infections de la vessie. Aujourd'hui, plusieurs pays utilisent traditionnellement le myrte pour le traitement, comme la Turquie, la Tunisie, le Maroc, la Sardaigne, l'Italie, l'Iran et l'Algérie (Wahid, 2013).

Le genre *Myrtus* appartient à la famille des Myrtaceae .Ces plantes sont originaires de la région méditerranéenne, dont certaines se trouvent également en Asie occidentale, en Amérique du Sud et en Australie. La famille des Myrtacées est une famille de plantes dicotylédones comprenant environ 3800 espèces réparties en 133 genres (Özek et al., 2000).

4.1.3. L'utilisation de *Myrtus communis* à travers le mode

Depuis plusieurs années, le myrte est utilisé en médecine traditionnelle comme antiseptique et désinfectant ; il était utilisé dans l'Égypte ancienne pour traiter les affections cutanées et les infections des sinus (Özkan & Güray, 2009). En Perse, elle était utilisée sous forme de compresse chaude pour traiter les furoncles. En Afrique du Nord, les fleurs séchées sont recommandées pour soulager l'asthme et traiter la variole. Enfin, les Afro-Américains inhalent des vapeurs chaudes de thé de myrte pour lutter contre les migraines causées par un rhume ou une grippe (Venturini, 2013). En Algérie, le myrte est utilisé comme remède contre les infections respiratoires et urinaires, les préparations à base de cette plante sont recommandées contre la bronchite, la sinusite, l'otite, la diarrhée et les hémorroïdes, les fruits sont un remède contre la dysenterie, l'entérite et les hémorragies (Beloued, 2005). Dans d'autres pays du grand Maghreb (Maroc et Tunisie), le myrte est utilisé dans le nord du pays, où le fruit (frais ou sous

forme de décoction) est recommandé pour soulager les ulcères et les douleurs d'estomac. La même décoction est préconisée en gargarisme pour traiter la gingivite, une décoction de fleurs est suggérée pour stopper les diarrhées aiguës et pour traiter la toux et la rhinite. L'huile essentielle du fruit est utilisée localement pour soulager les douleurs rhumatismales. Dans la même région l'infusion et la décoction sont utilisées comme remède contre les maladies respiratoires et la diarrhée. L'infusion est également recommandée pour les bains oculaires dans les conjonctivites, la décoction est utilisée pour imbiber les compresses appliquées sur les plaies, les abcès, les furoncles et les hémorroïdes hémorragiques, la décoction concentrée est donnée aux femmes en cas d'hémorragie du problème, le fruit est mâché contre les gingivites et les aphtes (Wahid, 2013).

4.1.4. Caractère botanique de *Myrtus communis* L.

Le myrte (*Myrtus communis*, L.) est la seule espèce de la famille des Myrtacées présente à l'état naturel en Algérie, au Maroc, en Tunisie etc... Elle pousse au niveau de la mer à une altitude de 500-800 m, elle se développe dans des matorrals thermophiles. En Algérie, il est commun dans la garrigue et les forêts côtières, Il s'adapte aux sols siliceux, calcaires, se trouve plutôt sur les sols acides, en compagnie d'*Arbutus unedo* L., Occupe principalement le sol thermo-méditerranéen (moyenne des minima des mois le plus froid entre 3 et 7°C) (Bouzabata, 2015).

C'est un arbuste de taille variable, de 2 à 5 mètres, divisé en de nombreuses branches à partir de la base.

Les feuilles opposées, à pétiole court, ovales, acuminées, entières, fermes, d'un vert clair brillant, sont constellées de petits poils transparents, et le fruit est une baie ovoïde, noire à maturité, surmontée du rameau sépal. Les fleurs blanches et parfumées visibles de mai à juillet sont portées sur une longue tige dressée et solitaire à l'aisselle des feuilles (Bouzabata, 2015; Hazn, 2021; Venturini, 2013).

4.1.5. Composition de *Myrtus communis* L.

Des études antérieures sur le myrte ont montré la présence de plusieurs composés chimiques spécifiques, huiles essentielles, acides phénoliques, flavonoïdes et tanins dans les feuilles et les fruits, et les anthocyanes, acides gras et acides organiques dans les baies;

4.1.5.1. L'huile essentielle de Myrte et ses composants

L'huile essentielle est un produit odorant et volatil composé de molécules sécrétées par certains arbres et plantes qui lui confèrent une odeur particulière. Le mot "volatile" signifie que les huiles essentielles s'évaporent très rapidement. En général, les principes aromatiques des plantes sont de minuscules gouttelettes qui se forment dans les chloroplastes des feuilles. Les organites où se déroule la photosynthèse. Ils se combinent ensuite avec le glucose et sont transportés dans toutes les parties de la plante. Selon des études antérieures de la plante *Myrtus Communis*, il a été montré que le rendement en huile essentielle de myrte est compris entre (0,2-1,2%), et que des terpènes principalement volatils sont présents. Dont les principaux composants ont été identifiés par GPC (chromatographie en phase gazeuse), sont les monoterpènes caractéristiques de l'huile essentielle de myrte (α -pinène (12,6-64%), 1,8 cinéole (5,4-40,9%), myrténol, linalol (0,74-18,92%), α -terpinéol (4,4%), limonène (3,8 %), acétate de myrtényle, acétate de bornyle (5,2 %), acétate de linalyle (4,2 %), acétate de géranyle (1,83-20,54 %) (CHERAITIA & DJEBLI, 2020).

4.1.5.2. Composants phénoliques du myrte

Le profil des extraits de *Myrtus Communis* est constitué de composés phénoliques, qui sont des molécules hydrosolubles. En raison de leur activité antibactérienne et antifongique, ils ont divers effets sur la physiologie des plantes. Les composés phénoliques sont divisés en trois grandes classes chimiques : les acides phénoliques, les tanins et les flavonoïdes (Dellaoui & Berroukche, 2019).

4.2. Expérimentations

La méthode classique statique gravimétrique est une méthode de référence. Dans ce travail nous avons utilisé cette méthode. Car elle est simple et facile à réaliser, en plus elle ne demande pas d'équipement de haute technologie ou des systèmes complexes.

Dans cette méthode il s'agit d'utiliser une solution saline saturée afin de fixer une telle humidité relative à l'intérieur d'une bocal, cette dernière sera placée dans une étuve dans le but de maintenir une température constante et un équilibre thermodynamique entre le produit et l'air interne. Par conséquent, le séchage

(désorption) ou le mouillage (adsorption) du produit à température constante sera effectué dans des micros environnements contrôlés.

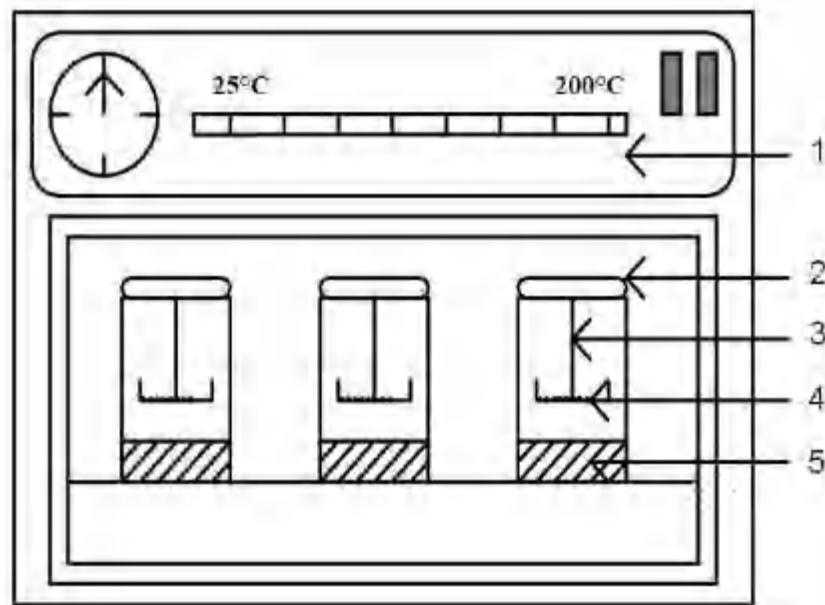


Figure 4.2 : La procédure expérimentale de la détermination des courbes de sorption.

- (1) Étuve thermostatique, (2) Bocal rempli par une solution saline, (3) Porte échantillon, (4) Produit, (5) Solution saline saturée.

Le produit sera suspendu à l'aide d'un support fixé dans la couverture, et posé sur une coupelle en aluminium trouée comme montré dans les figures 4.2-4.3.

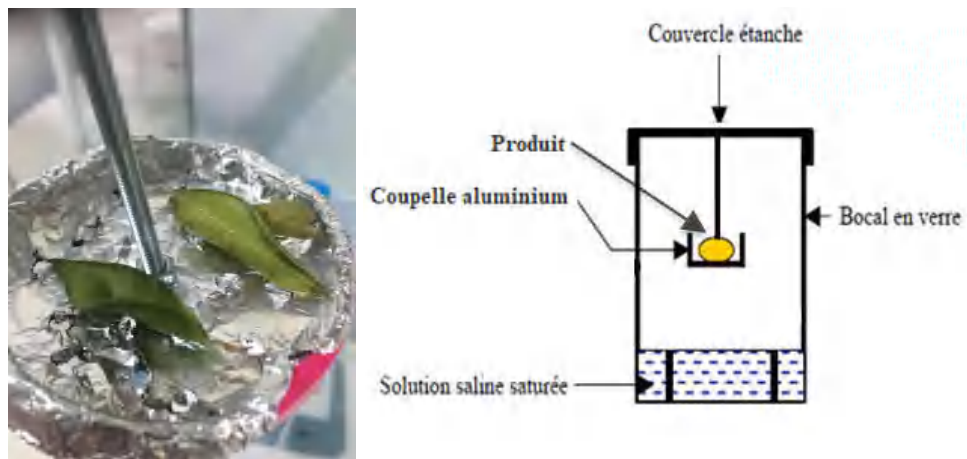


Figure 4.3 : feuille de la plante Myrtus Communis suspendu dans une solution saline.

La couverture doit être étanche afin d'éviter toutes infiltrations d'air extérieur car ceci va affecter l'équilibre thermodynamique.

Le niveau de la solution saline saturée doit atteindre 30 à 50mm comme le montre la figure précédente.

Deux échantillons sont posés à la fois dans le même dessiccateur, une initialement sèche qui va se mouiller (adsorbé l'eau) depuis l'environnement et la deuxième initialement hydratée et elle va céder de l'eau (déshydraté) jusqu'à atteindre l'équilibre.

Les pesées effectuées à travers une balance comme le montre la Figure 32 dont l'ordre de précision est de 10^{-4} g.

Trois étuves avec des températures différentes (28, 40 et 50 °C) ont été utilisées, appartenant au laboratoire de biotechnologie de Constantine durant une période totale d'environ 50 jours.

a) Préparation de la solution saline

La solution saline est constituée d'un mélange d'eau distillé avec des quantités des substances chimique prédéterminées (tableau 02). Ce mélange est chauffé à la température indiquée (à laquelle la substance en excès est juste dissoute) et ensuite il est refroidi lentement jusqu'à la température ambiante [NF EN ISO 12571].

Pour que les molécules des sels fondent complètement dans une période courte, il faut que ce processus du mélange soit, sous une agitation continue.

Les réactifs chimiques utilisés dans cette étape sont de la marque Honeywell et leur qualité est bonne. Les solutions saturées peuvent être corrosives, dangereuses et nuisibles à la santé, la préparation et la manipulation ont été manœuvrées avec précaution [NF EN ISO 12571].

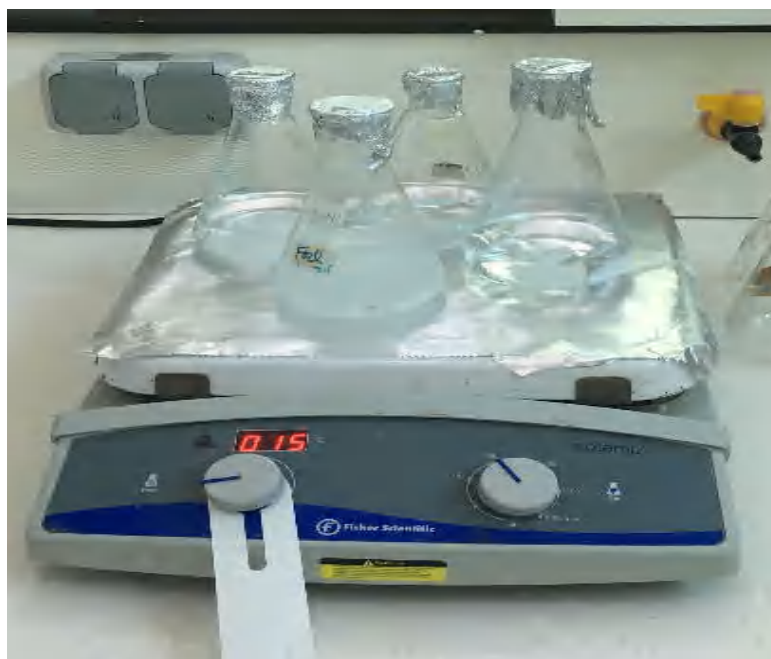


Figure 4.4 : preparation de la solution saline a l'aide de la norme [NF EN ISO 12571].

La préparation de la solution saturée permet d'obtenir l'humidité relative nécessaire dans le dessiccateur.

Chaque sel donne une humidité relative spécifique et en fonction de la température, afin de balayer une grande plage d'humidité relative plusieurs sels ont été utilisés. D'après la norme [NF EN ISO 12571] le nombre minimal des sels pour conduire une manipulation égale à quatre dans une plage de 30 à 95%.

Dans notre travail le choix de sel est fait à la base du cout et disponibilité sur le marché. Les sels utilisés sont cités dans le tableau ci-dessous.

Tableau 02 : humidité relatif en fonction des sels et des températures [NF EN ISO 12571].

Sel	Température C°		
	28	40	50
	Humidité Relatif %		
KOH	7,3	5,94	5,58
CL ₂ Mg	32,54	31,6	30,54
NaBr	55,9	51,95	45,44
NaCl	75,14	74,68	74,43
K ₂ SO ₄	97,1	96,4	95,8

On place le dessiccateur qui contient le produit dans une étuve conforme à la norme [NF EN ISO 12570] à des températures constante. Ces valeurs sont respectivement 28, 40 et 50 °C.



Figure 4.5 : L'emplacement des produits dans des ambiances métrisé.

b) Détermination d'un point sur une courbe de sorption

Les courbes d'adsorption sont obtenues à partir de plantes fraîches, et les courbes de désorption en partant de plantes humides (hydratées) initialement mouillées (placées dans l'eau pour une période de 24 heures).

Le pas de pesée est entre de 24 heures jusqu'à 5 jours.

La masse constante est atteinte lorsque la variation de masse entre trois pesées consécutives effectuées au moins de 24h d'intervalle est inférieure à 0.1% de la masse totale de l'éprouvette.

c) Détermination de la masse sèche :

Après que l'équilibre thermodynamique soit atteint (environ 50 jours) la masse sèche est obtenue par un séchage des plantes dans une étuve à une température égale à 105 °C pendant plus de 24 h (Figure 4.6). La pesée est faite par l'utilisation d'une balance de précision égale à 10^{-4} g.

L'échantillon mouillé était porté dans une enveloppe en aluminium afin de le distinguer.



Figure 4.6 : Séchage dans une étuve a une température 105 °C.



Figure 4.7 : la pesée des échantillons et la détermination de la masse sèche.

4.3. Analyse des données

4.3.1. Critères de choix d'un modèle par une régression numérique (non linéaire)

Pour la plupart des phénomènes naturels, le modèle de régression linéaire ne peut pas être utilisé car il ne correspond pas aux réalités expérimentales. Dans ce cas, la régression non linéaire est une option alternative. L'une des principales caractéristiques

de la régression non linéaire est l'énorme flexibilité du modèle par exemple, la puissance, la croissance de Weibull et Fourier font partie des analyses de régression non linéaires courantes. En raison du grand nombre d'options, il est parfois difficile de choisir la bonne fonction non linéaire pour ajuster la courbe (Joardder et al., 2021).

Malgré l'existence des différentes méthodes pour ajuster une courbe, l'identification du meilleur modèle nécessite des efforts considérables. Voici quelques points qui doivent être pris en considération avant le développement d'un modèle empirique :

- La connaissance de la pratique courante dans le séchage des produits qui ont la même nature que ceux étudiés, peuvent souvent aider.
- Le nombre adéquat de données et une bonne approche d'acquisition de ces données.
- L'utilisateur s'intéresse à une équation qui correspond le plus possible aux données expérimentales, plutôt que par l'exactitude de la théorie.
- Choisir le nombre minimum de variables indépendantes.
- La sélection d'un modèle représentative du phénomène repose sur la simplicité (c'est-à-dire un modèle avec moins de paramètres moins c'est le moins complexe) ce qui améliore la facilité d'utilisation de l'équation pour les calculs d'ingénierie.

4.3.2. Les coefficients de régression

Les valeurs de ces coefficients indiquent le degré de précision d'un modèle choisie ainsi que la dépendance des variables dépendantes à la variable indépendante.

4.3.2.1. Chi-carré (χ^2)

Le test du chi-carré (χ^2) compare l'effet de deux variables dans un tableau de contingence pour observer si elles sont interdépendantes. La valeur du chi carré (χ^2) peut être calculée à partir de l'équation suivante :

$$\chi^2 = \frac{\sum_{n=1}^N (Y_{ei} - Y_{pi})^2}{Y_{pi}} \quad (4.1)$$

p_i et e_i sont respectivement les valeurs prédites et expérimentales. Les valeurs minimale de (χ^2) ou bien s'approchant de zéro sont considérées comme optimales et peuvent être un outil pour choisir le meilleur modèle.

4.3.2.2. R-carré (R^2)

Le R-carré (R^2) est la représentation de la qualité de l'adaptation d'un modèle de régression linéaire. Les valeurs plus élevées de (R^2) donnent un meilleur ajustement pour le modèle empirique de séchage, cependant, un petit (R^2) n'est pas nécessairement mauvais pour toutes les situations.

$$R^2 = \frac{\text{Variance expliquée par la régression}}{\text{Variance totale}} \quad (4.2)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_i - MR_{pre,i}) \cdot \sum_{i=1}^N (MR_i - MR_{exp,i})}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^N (MR_i - MR_{pre,i})^2 \right] \cdot \left[\sum_{i=1}^N (MR_i - MR_{exp,i})^2 \right]}} \quad (4.3)$$

$MR_{exp,i}$ et $MR_{pre,i}$, sont respectivement le i ème contenue en eau observé expérimentalement et prédit. N est le nombre d'observations.

4.3.3. Résultats des isothermes de sorption

Il ressort clairement de ces graphiques (figures 4.8-4.9) qu'à des humidités relatives constantes, la teneur en eau augmente avec la diminution Température. Ce résultat peut s'expliquer par l'état d'excitation plus élevé des molécules d'eau à plus haute température qui conduit à la diminution des forces d'attraction entre elles.

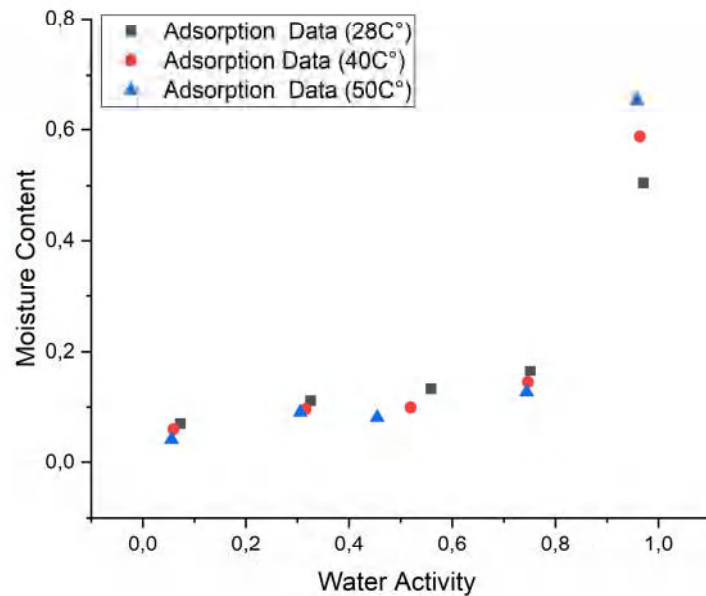


Figure 4.8 : L'effet de température sur l'isotherme de l'adsorption.

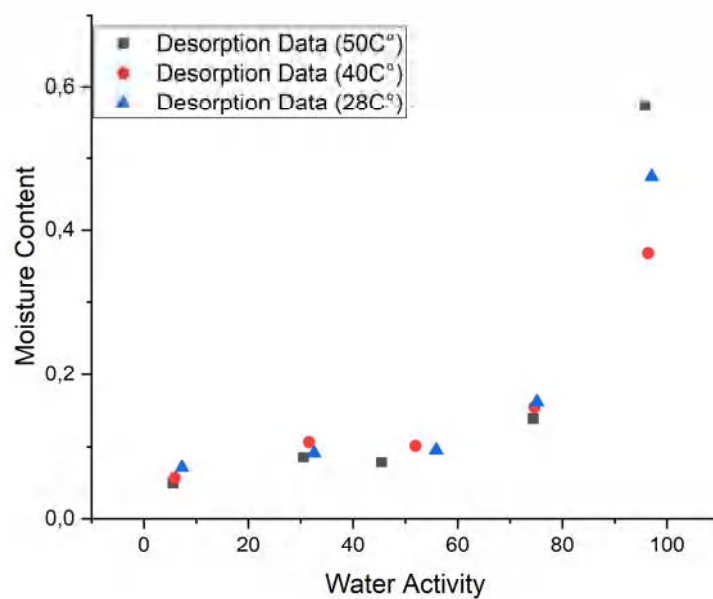


Figure 4.9 : L'effet de température sur l'isotherme de désorption.

Tableau 03 : Paramètres des modèles de sorption obtenu par une régression numérique pour les modèles de BET et LESPAM.

	Fitting Equation	B.E.T Modified		LESPAM	
	Sorption Mode	Adsorption	Desorption	Adsorption	Desorption
Temperature 28 C°	Model	BETMod	BETMod	LESPAM28C (User)	LESPAM28C (User)
	Equation	$y = x/(a+b*x-(a+b)*x^2)$	$y = x/(a+b*x-(a+b)*x^2)$	$A*\exp((B*Aw)/301)+C$	$A*\exp((B*Aw)/301)+C$
	Plot	Adsorption Data (28C°)	Desorption Data (28C°)	Adsorption Data (28C°)	Desorption Data (28C°)
	A	$-0,74644 \pm 0,95501$	$-1,0049 \pm 0,86524$	$4,33109E-4 \pm 7,8591E-4$	$4,17701E-4 \pm 2,49602E-4$
	B	$24,82177 \pm 6,53954$	$29,03046 \pm 6,3654$	$2119,63463 \pm 572,50043$	$2126,11657 \pm 179,65935$
	C			$0,09243 \pm 0,01804$	$0,07721 \pm 0,00672$
	n				
	Reduced Chi-Sqr	0,00201	0,00119	5,86E-04	8,51E-05
	R-Square (COD)	0,99335	0,99615	0,99871	0,99851
	Adj. R-Square	0,99113	0,99486	0,99741	0,99702
Temperature 40 C°	Model	BETMod	BETMod	LESPA40C (User)	LESPA40C (User)
	Equation	$y = x/(a+b*x-(a+b)*x^2)$	$y = x/(a+b*x-(a+b)*x^2)$	$A*\exp((B*Aw)/313)+C$	$A*\exp((B*Aw)/313)+C$
	Plot	Adsorption Data (40C°)	Desorption Data (40C°)	Adsorption Data (40C°)	Desorption Data (40C°)
	A	$-0,69148 \pm 1,17606$	$-0,58578 \pm 0,64888$	$0,00134 \pm 0,00226$	$6,12298E-5 \pm 9,39637E-5$
	B	$29,0973 \pm 8,85486$	$26,76229 \pm 5,10242$	$1745,65268 \pm 547,50941$	$2928,79811 \pm 483,75196$
	C			$0,07513 \pm 0,01897$	$0,08128 \pm 0,01231$
	n				
	Reduced Chi-Sqr	0,0023	8,59E-04	5,16E-04	3,69E-04
	R-Square (COD)	0,99227	0,99731	0,99885	0,99619
	Adj. R-Square	0,9897	0,99641	0,99769	0,99238
Temperature 50 C°	Model	BETMod	BETMod	LESPAM50C (User)	LESPAM50C (User)
	Equation	$y = x/(a+b*x-(a+b)*x^2)$	$y = x/(a+b*x-(a+b)*x^2)$	$A*\exp((B*Aw)/323)+C$	$A*\exp((B*Aw)/323)+C$
	Plot	Adsorption Data (50C°)	Desorption Data (50C°)	Adsorption Data (50C°)	Desorption Data (50C°)
	A	$-0,03894 \pm 0,0058$	$-0,04195 \pm 0,00407$	$1,90341E-5 \pm 4,2456E-5$	$8,32771E-5 \pm 1,07317E-4$
	B	$0,99018 \pm 9,5984E-5$	$0,99033 \pm 7,80313E-5$	$34,83692 \pm 7,29368$	$29,36523 \pm 4,22345$
	C			$0,06995 \pm 0,01514$	$0,06817 \pm 0,01099$
	n				
	Reduced Chi-Sqr	5,44E-04	0,000241659	6,30E-04	3,10E-04
	R-Square (COD)	0,99379	0,99623	0,99521	0,99678
	Adj. R-Square	0,99172	0,99498	0,99041	0,99356

Tableau 04 : Paramètres des modèles de sorption obtenu par une régression numérique pour les modèles de GAB et Chung and Pfof.

	Fitting Equation	GAB		Chung and Pfof	
	Sorption Mode	Adsorption	Desorption	Adsorption	Desorption
Temperature 28 C°	Model	GAB (User)	GAB (User)	ChungPfof28 (User)	ChungandPfof (User)
	Equation	$(A*B*C*Aw)/((1-B*Aw)*((1-B*Aw)+(B*C*Aw)))$	$(A*B*C*Aw)/((1-B*Aw)*((1-B*Aw)+(B*C*Aw)))$	$(-A*\exp(-B*M))$	$(-A*\exp(-B*M))$
	Plot	Adsorption Data (28C°)	Desorption Data (28C°)	Adsorption Data (28C°)	Desorption Data (28C°)
	A	0,06071 ± 0,00951	0,05261 ± 0,00818	-0,02488 ± 0,01527	-0,017 ± 0,0115
	B	0,90552 ± 0,02005	0,91558 ± 0,01474	-3,00666 ± 0,70928	-3,3498 ± 0,77251
	C	4,30613E45 ± 2,75717E45	-2,14322E44 ± 4,05863E45		
	n				
	Reduced Chi-Sqr	6,84E-04	3,38E-04	0,00259	0,00207
	R-Square (COD)	0,98891	0,99408	0,99143	0,9933
	Adj. R-Square	0,97782	0,98816	0,98857	0,99106
Temperature 40 C°	Model	GAB (User)	GAB (User)	ChungandPfof (User)	ChungandPfof (User)
	Equation	$(A*B*C*Aw)/((1-B*Aw)*((1-B*Aw)+(B*C*Aw)))$	$(A*B*C*Aw)/((1-B*Aw)*((1-B*Aw)+(B*C*Aw)))$	$(-A*\exp(-B*M))$	$(-A*\exp(-B*M))$
	Plot	Adsorption Data (40C°)	Desorption Data (40C°)	Adsorption Data (40C°)	Desorption Data (40C°)
	A	0,05805 ± 0,00856	0,0478 ± 0,0072	-0,03124 ± 0,01381	-0,01098 ± 0,01033
	B	0,87315 ± 0,02613	0,95284 ± 0,02126	-2,48618 ± 0,51599	-4,02373 ± 1,07545
	C	838,51463 ± 15954,60329	-2,43946E45 ± 6,78304E45		
	n				
	Reduced Chi-Sqr	4,47E-04	6,69E-04	0,00132	0,00316
	R-Square (COD)	0,98523	0,9931	0,99556	0,9901
	Adj. R-Square	0,97047	0,9862	0,99408	0,98681
Temperature 50 C°	Model	GAB (User)	GAB (User)	ChungandPfof (User)	ChungandPfof (User)
	Equation	$(A*B*C*Aw)/((1-B*Aw)*((1-B*Aw)+(B*C*Aw)))$	$(A*B*C*Aw)/((1-B*Aw)*((1-B*Aw)+(B*C*Aw)))$	$(-A*\exp(-B*M))$	$(-A*\exp(-B*M))$
	Plot	Adsorption Data (50C°)	Desorption Data (50C°)	Adsorption Data (50C°)	Desorption Data (50C°)
	A	-0,03987 ± 0,04632	-0,04304 ± 0,04461	-0,00136 ± 0,00231	-0,00373 ± 0,00462
	B	24,22597 ± 0,32884	44,72325 ± 0,51013	-0,06435 ± 0,01819	-0,05238 ± 0,01339
	C	0,9996 ± 0,00639	0,99978 ± 0,00554		
	n				
	Reduced Chi-Sqr	8,25428E-4	3,8909E-4	0,00424	0,00331
	R-Square (COD)	0,99372	0,99596	0,95162	9,48E-01
	Adj. R-Square	0,98744	0,99191	0,9355	0,93113

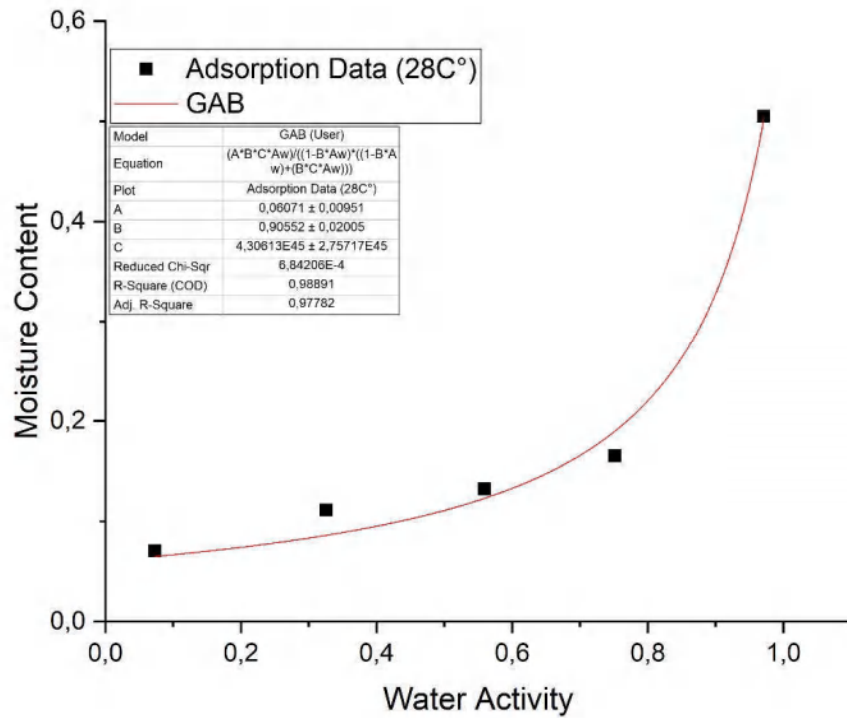


Figure 4.10 : Courbe d'adsorption a une temperature de 28°C régressée par le modèle de GAB.

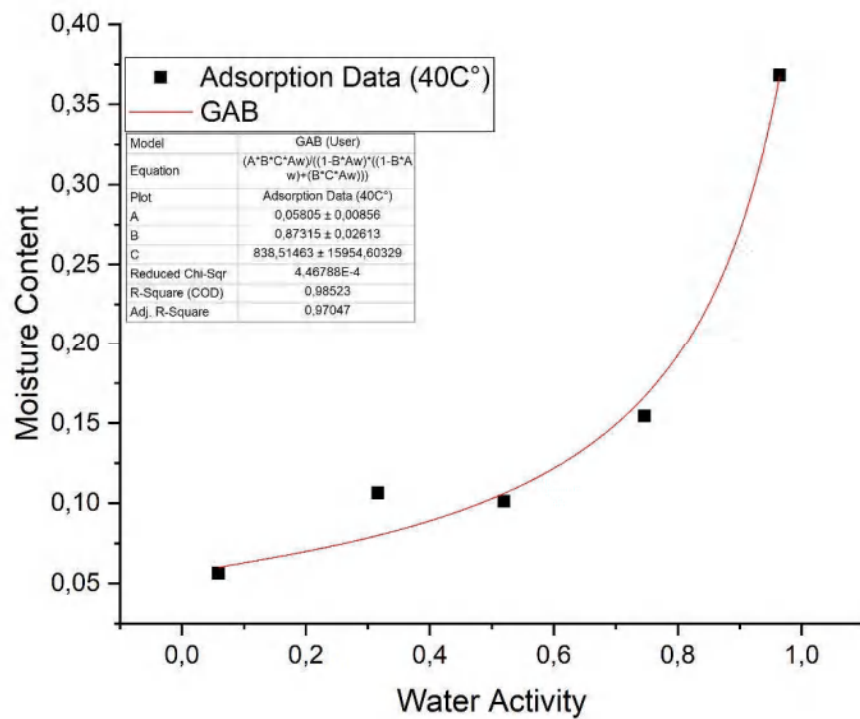


Figure 4.11 : Courbe d'adsorption a une temperature de 40°C régressée par le modèle de GAB.

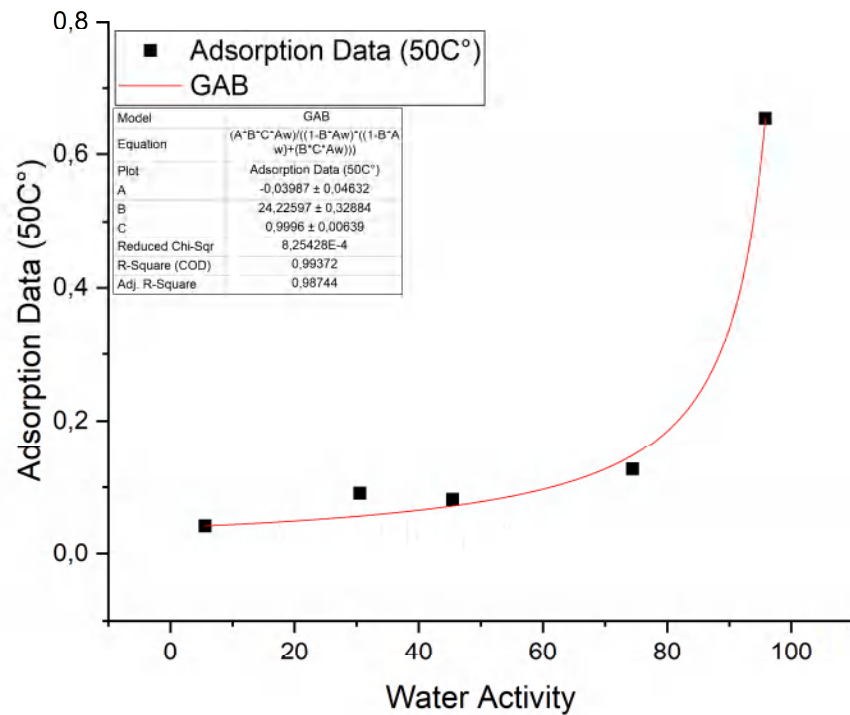


Figure 4.12 : Courbe d'adsorption a une température de 50°C régressée par le modèle de GAB.

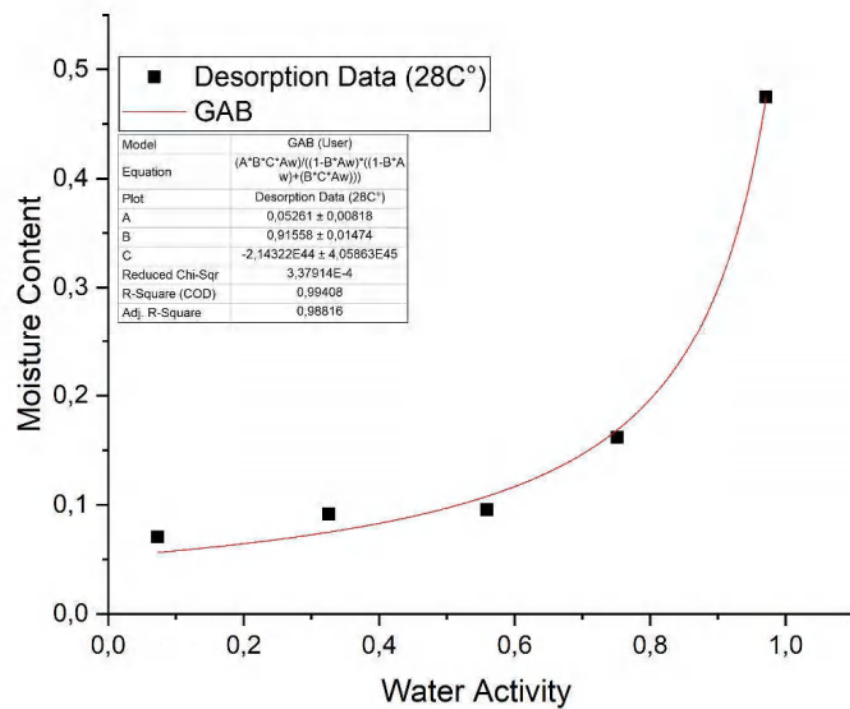


Figure 4.13 : Courbe de désorption a une température de 28°C régressée par le modèle de GAB.

D'après les tableaux 3 et 4 on voit que les résultats de lissage du modèle de BET sont sensiblement mieux que ceux du GAB, malgré le modèle choisi est ce du GAB car le domaine d'utilisation du GAB (a_w de 0.05-0.9) est plus large que ce du BET (a_w de 0.05-0.45), en conséquence le modèle du GAB représente bien le phénomène de sorption pour la plante de Myrtus Communis. Les figures (4.10- 4.15) ont justifié le choix de ce modèle.

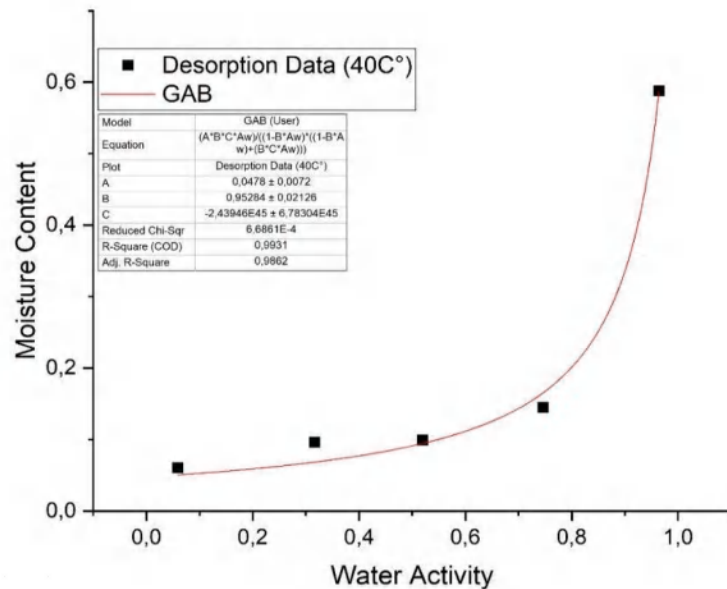


Figure 4.14 : Courbe de désorption a une température de 40°C régressée par le modèle de GAB.

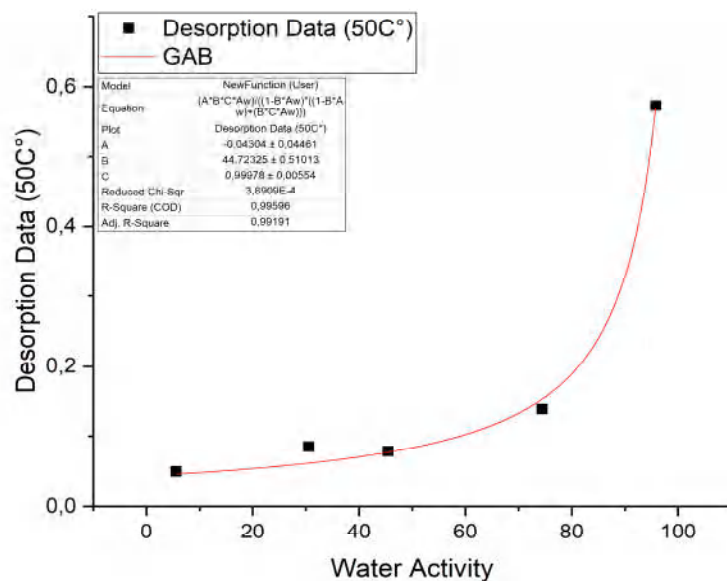


Figure 4.15 : Courbe de désorption a une température de 50°C régressée par le modèle de GAB.

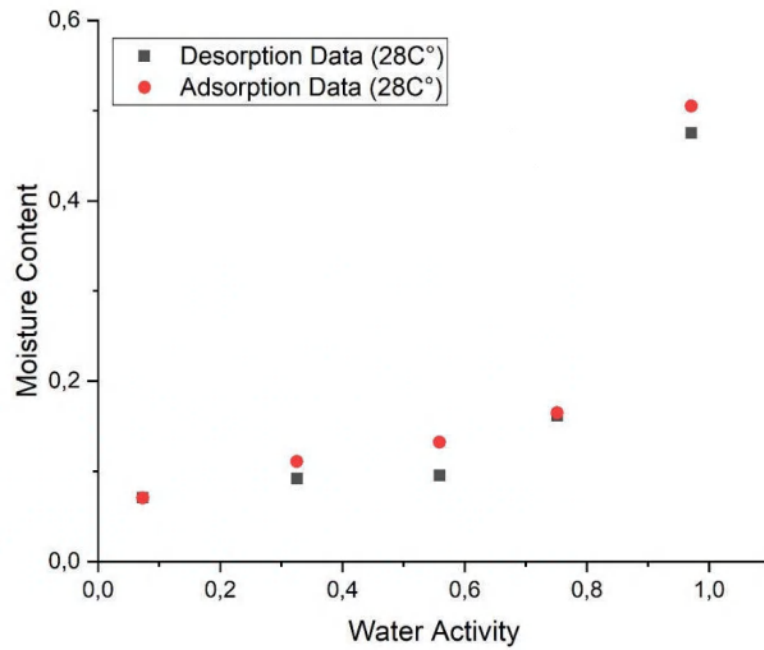


Figure 4.16 : Courbe de désorption et adsorption a une température de 28°C.

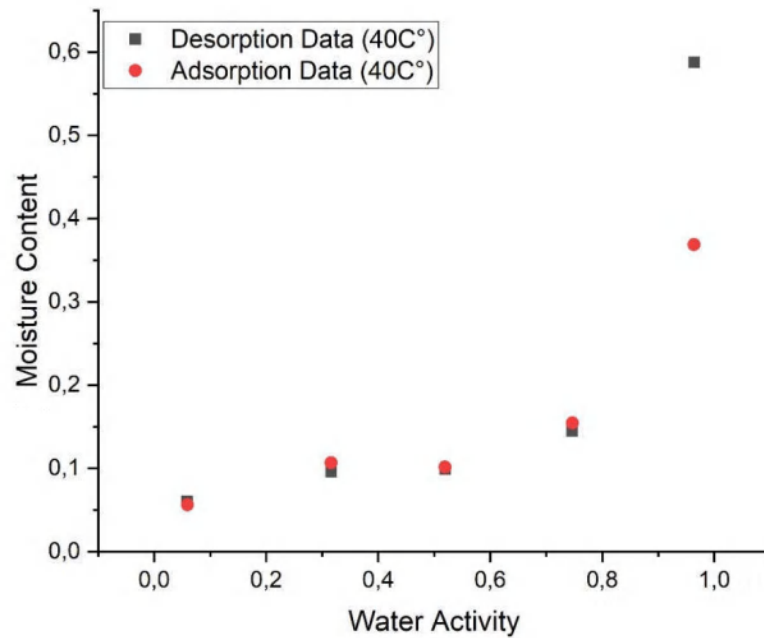


Figure 4.17 : Courbe de désorption et adsorption a une température de 40°C.

La teneur en eau d'équilibre des feuilles de Myrtus Communis augmente avec l'augmentation de l'activité de l'eau en elles figures 4.10-4.18.

L'effet de l'hystérise est clairement exposé dans la figure 4.16-4.17 où les températures sont respectivement 28 et 40°C.

Une forme sigmoïdal présente dans toutes les courbes de sorption obtenue dans les trois différents environnements équilibrés thermodynamiquement. Et elle est relative au troisième genre des courbes de sorption donné par (Marinos-Kouris & Maroulis, 2006) et mentionné dans la figure 3.3.

Des tendances similaires pour de nombreuses plantes et matières alimentaires ont rapportées dans la littérature cette tendance peut s'expliquer en considérant l'état d'excitation des molécules. À des températures élevées les molécules sont dans un état d'excitation accru, augmentant ainsi leur distance et en diminuant les forces d'attraction entre eux. Cela conduit à une diminution du degré de sorption d'eau à une humidité relative donnée avec l'augmentation de la température.

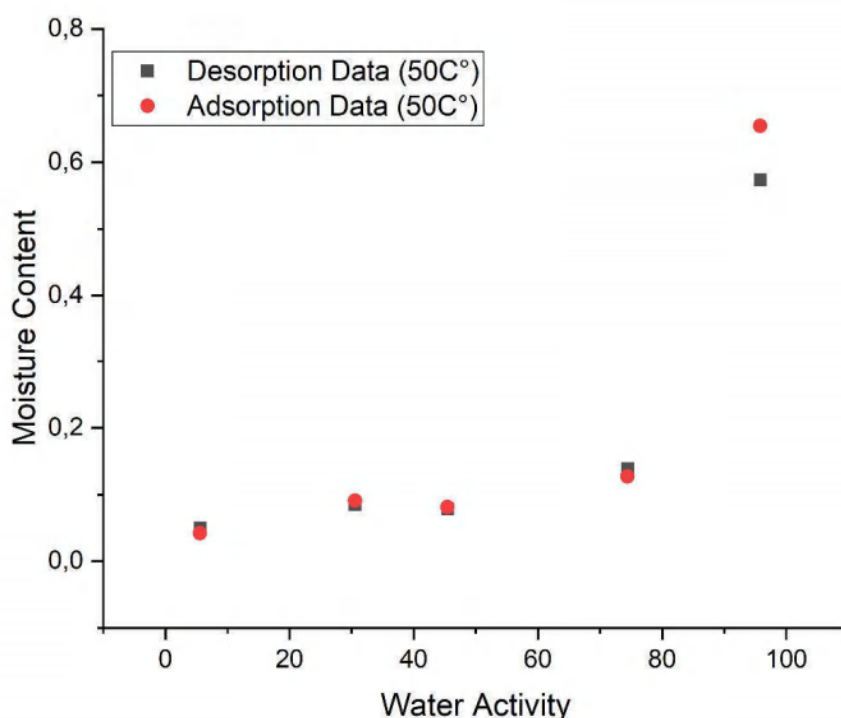


Figure 4.18 : Courbe de désorption et adsorption à une température de 50°C.

Chapitre 5

Étude expérimentale II : Obtention des courbes de cinétique de séchage & Séchage solaire du Myrtus Communis

5. Équipements et méthodologie expérimentale

5.1. Introduction

Plusieurs types de séchoir ont été cités dans la littérature **chapitre 01**, chacun de ces types présente ses propres avantages et aussi ses inconvénients.

Dans le présent travail nous avons opté pour un séchoir convectif type solaire indirect avec un appoint électrique. Notre choix est fait sur la base des caractéristiques physiques et chimiques du produit qui nous voulons étudier, car il ne supporte pas des températures très élevées, de plus que le rayonnement solaire direct impliquera sa décoloration et réduira les quantités des huiles essentielles et les antioxydants contenus dans le produit.

5.2. Équipements

La caractérisation du comportement thermodynamique du produit lors de séchage est évaluée à travers des études expérimentales dont le but de déterminer la performance globale du système (séchoir solaire et produit étudié) dans des conditions différentes et sert à déterminer celles qui sont optimales.

5.2.1. Séchoir Solaire Indirecte

Inspiré de réalisations pratiques (tirées de la bibliographie), nous avons proposé le design et la conception d'un séchoir solaire expérimental, de type indirect et muni d'un appoint électrique d'une puissance de 1.5 kW. Il a été installé dans la région de Constantine (figure 5.1).

Les matériaux utilisés ont été acquis sur le marché local et les dimensions des différents éléments ont été calculées suivant la capacité, la puissance, la température et le débit d'air requis.



Figure 5.1 : Séchoir Solaire Indirecte réalisé à Constantine.

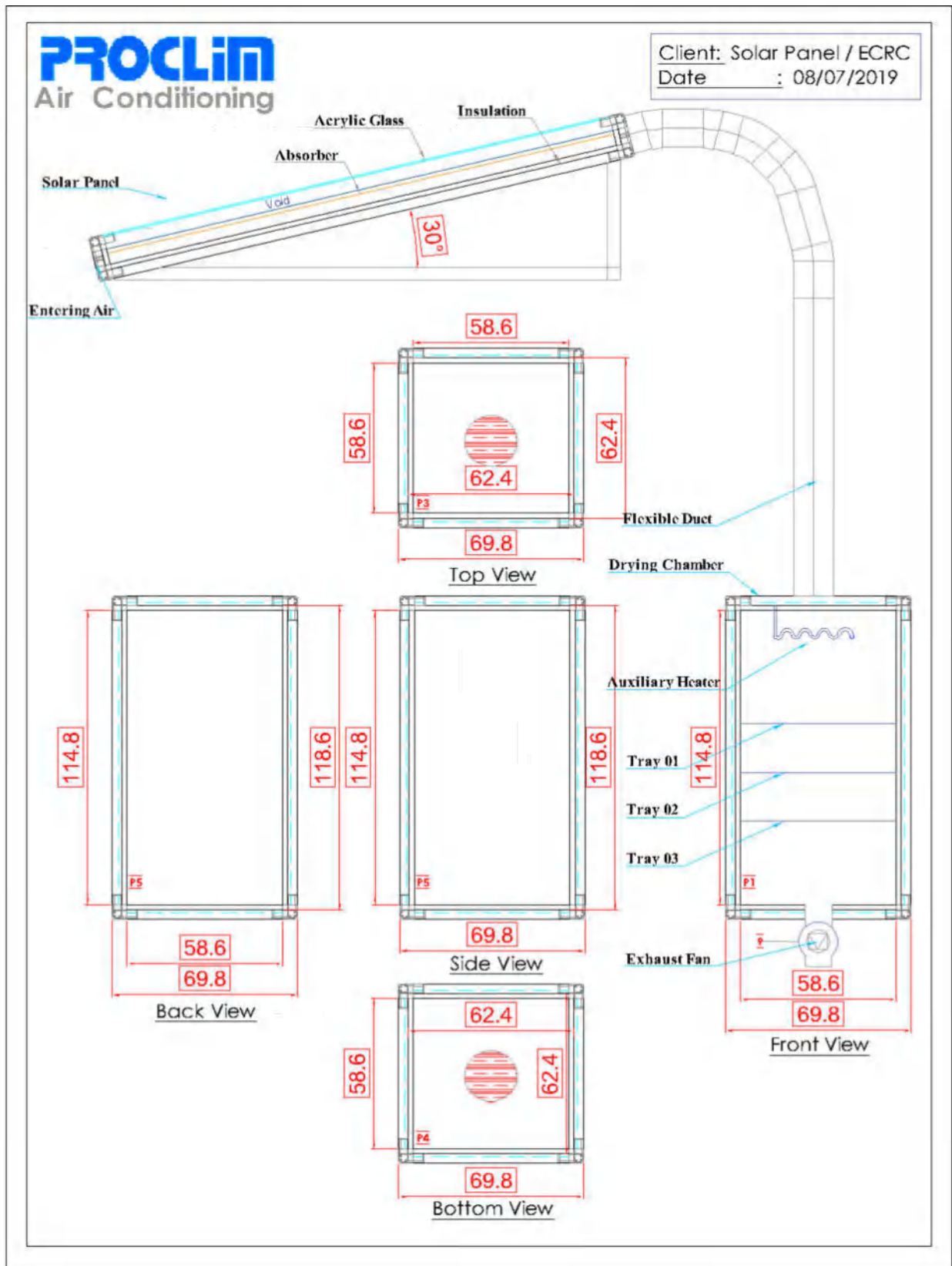


Figure 5.2 : Conception du séchoir solaire indirecte réalisé à Constantine.

a) Chambre de séchage

Le lieu de tous les échanges thermique et massique entre le produit et l'air asséchants est la chambre de séchage d'où sa grande importance dans le système global. L'amélioration dans le processus de séchage doit être accomplie principalement dans cette partie essentielle du système.

La chambre est composée d'une structure en profilé aluminium, plus d'un revêtement en panneaux d'isolant en polyuréthane, afin de réduire les déperditions de la chaleur vers l'extérieur à travers les parois. À l'intérieur de la chambre le produit est entreposé sur des cales. Ces derniers sont fabriqués à l'aide d'une matrice en inox alimentaire, un espacement de 15 cm est assuré entre les cales. Une résistance électrique assure la continuité de l'apport du flux de chaleur vers l'intérieur de la chambre. L'écoulement d'air est assuré par un ventilateur axial monté à la base de ce box La variation de la vitesse d'écoulement est contrôlée par un variateur de fréquence, monté sur le moteur de ventilateur.



Figure 5.3 : Chambre de séchage avec trois claies.

b) Panneaux solaires

Ces panneaux sont de type photo-thermique, dont l'effet de serre sert à capter et à piéger l'énergie reçue à travers les ondes électromagnétiques. Les courtes longueurs d'ondes ont la capacité à traverser la couverture en plexiglass du panneau solaire.

Cette quantité d'énergie captée se transforme en énergie thermique et transmis à l'air asséchant. Le mouvement du fluide transporte cette énergie au produit.

Le panneau solaire est composé principalement de quatre parties essentielles : le corps, l'absorbeur, la couverture transparente, le revêtement isolant.

- I. *Le corps du panneau solaire*** : fabriqué par une tôle galvanisée pliée et renforcée. Ses dimensions sont 2m de longueur par un mètre de largeur épaisseur 8cm.
- II. *L'absorbeur*** : confectionné par une tôle en aluminium peinte par une couleur noire matte afin d'absorber le maximum d'énergie reçue depuis le soleil. Ses dimensions sont 2m de longueur par 1m de largeur.
- III. *Couverture transparente*** : cette couverture est de nature transparente qui a la capacité de piéger les ondes électromagnétiques. Habituellement, le verre est le matériau plus utilisé mais dans notre montage expérimental, le plexiglass a été choisi, car il est léger, rigide et moins cher. Ses dimensions sont 2m de longueur et 1m de largeur et son épaisseur est de 5mm.
- IV. *Le revêtement isolant*** : est fait par utilisation d'un tapis de l'ArmaFlex autoadhésive d'une épaisseur de 19mm.

c) Gaine flexible isolée

Le transport de l'énergie thermique collectée par le capteur solaire photo thermique vers la chambre de séchage se fait par l'intermédiaire d'une gaine flexible de diamètre 160mm isolé par de la laine de verre.

d) Instruments de mesure

- I. *Balance de précision pour*** mesurer la variation de la masse au cours du séchage. Une balance de la précision de l'ordre de 10^{-2} g a été utilisée. L'étalonnage et l'équilibrage ont été réalisés au préalable.

II. Anémomètre KIMO LV110 cet instrument a été utilisé pour obtenir la vitesse ou bien le débit d'air, circulant dans le séchoir. L'étalonnage nécessaire a été effectué. L'anémomètre est doté d'un afficheur et d'une sonde anémométrique à hélice à double fonction de diamètre 10 cm.



Figure 5.4 : Instruments de mesures (Anémomètre/balance).

III. Thermomètres DIGI-THEC ont été utilisés pour relever la température dans plusieurs points à l'intérieur et à l'extérieur de séchoir. Ils sont bien calibrés, avec une précision de 0.1°C et un temps de réponse 0.4 s sonde thermocouple pt100.



Figure 5.5 : Instrument de mesure (Thermomètre).

IV. Thermo-hygromètres du marque REFCO THB 85 a une plage de mesure de la température allant de -40 vers $+85$ avec une précision de mesure égale à $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$, la plage de mesure de l'humidité est de $0\% \text{ _ } 100\%$ avec une précision de $\pm 2\%$ et un temps de réponse 10 s .



Figure 5.6 : Instrument de mesure (Thermo-hygrometre).

5.2.2. Détermination de la Surface d'échange

Les photos suivantes montrent le processus de détermination de la surface d'échange de la plante *Myrtus Comminus*. Ce procédé est fait à plusieurs étapes comme le montrent les figures 5.7-5.9 à l'aide d'un logiciel « ImagJ », qui possède une bonne précision.

Cette surface est utilisée dans le calcul du flux massique transporté, depuis les feuilles de myrte vers l'air asséchant au cours du processus de déshydratation.



Figure 5.7 : détermination de surface d'échange par ImagJ.

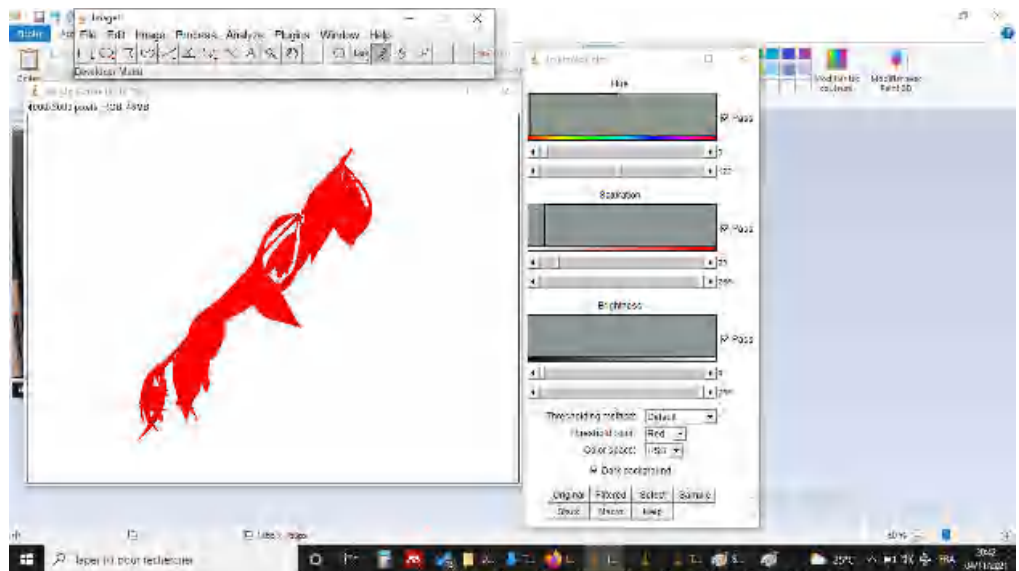
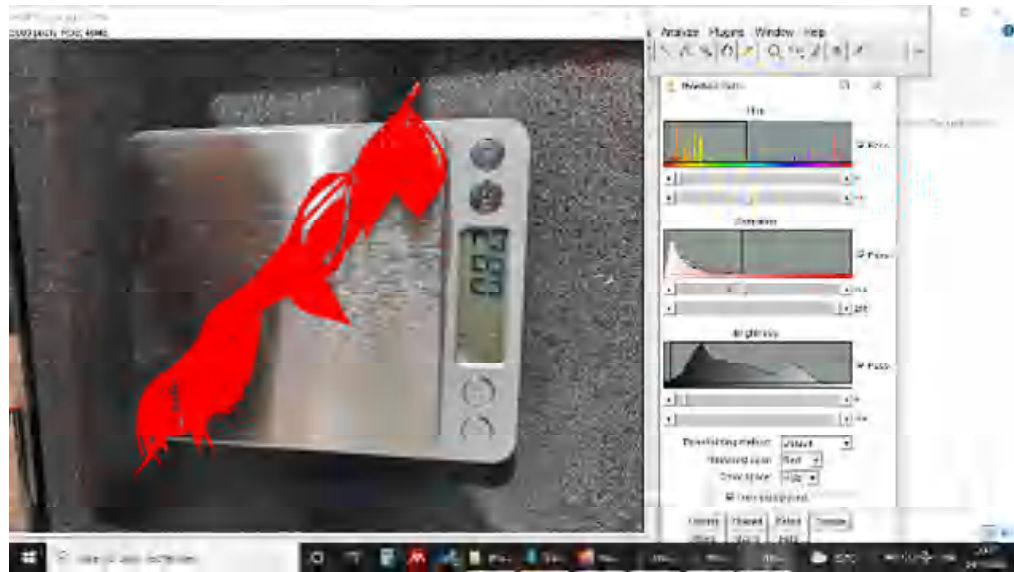


Figure 5.8 : détermination de surface d'échange par ImagJ.



Figure 5.9 : détermination de surface d'échange par ImagJ.

5.3. Résultats de cinétique de séchage

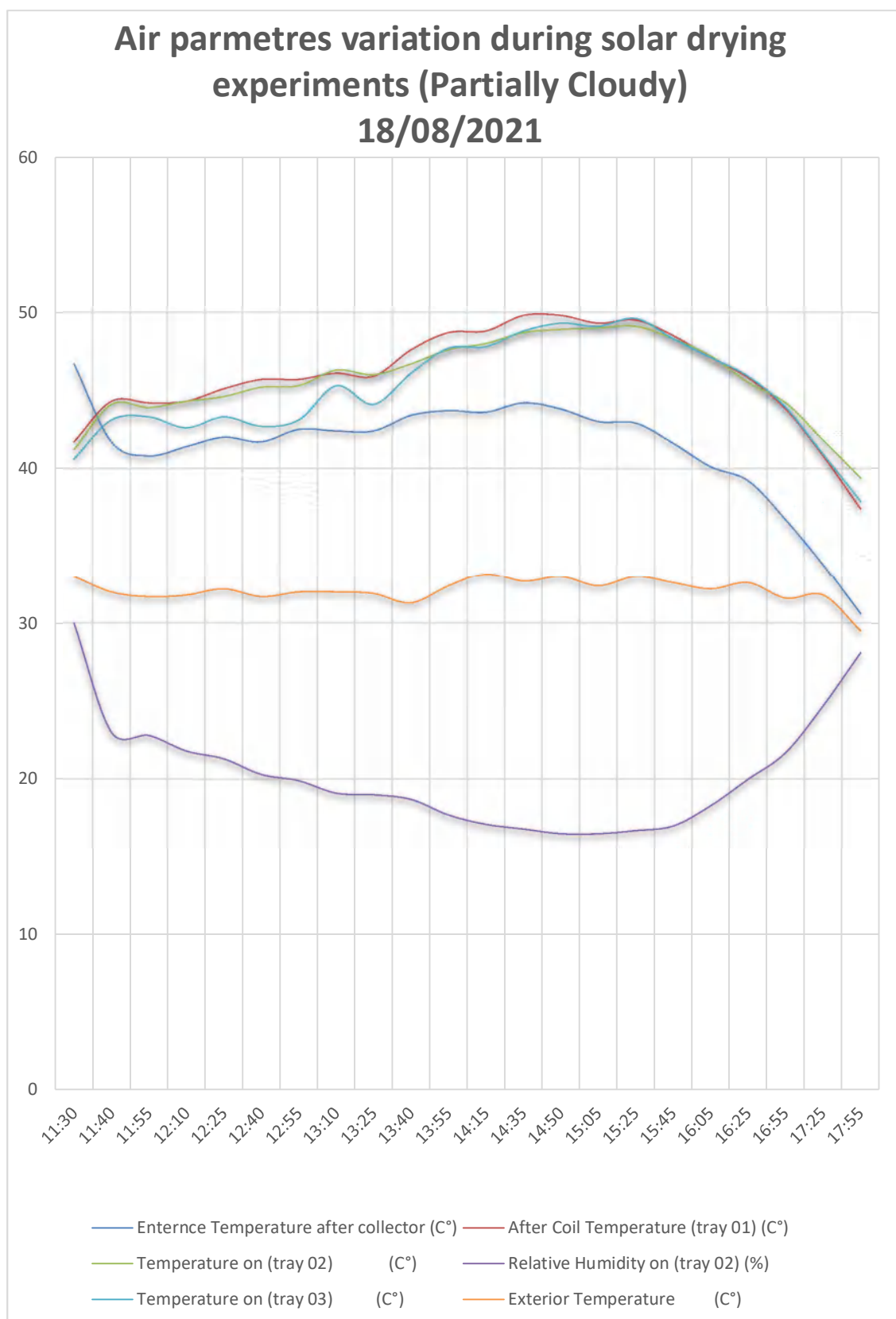


Figure 5.10 : Les Paramètres d'air au cours de séchage solaire vitesse 0.8 m/s.

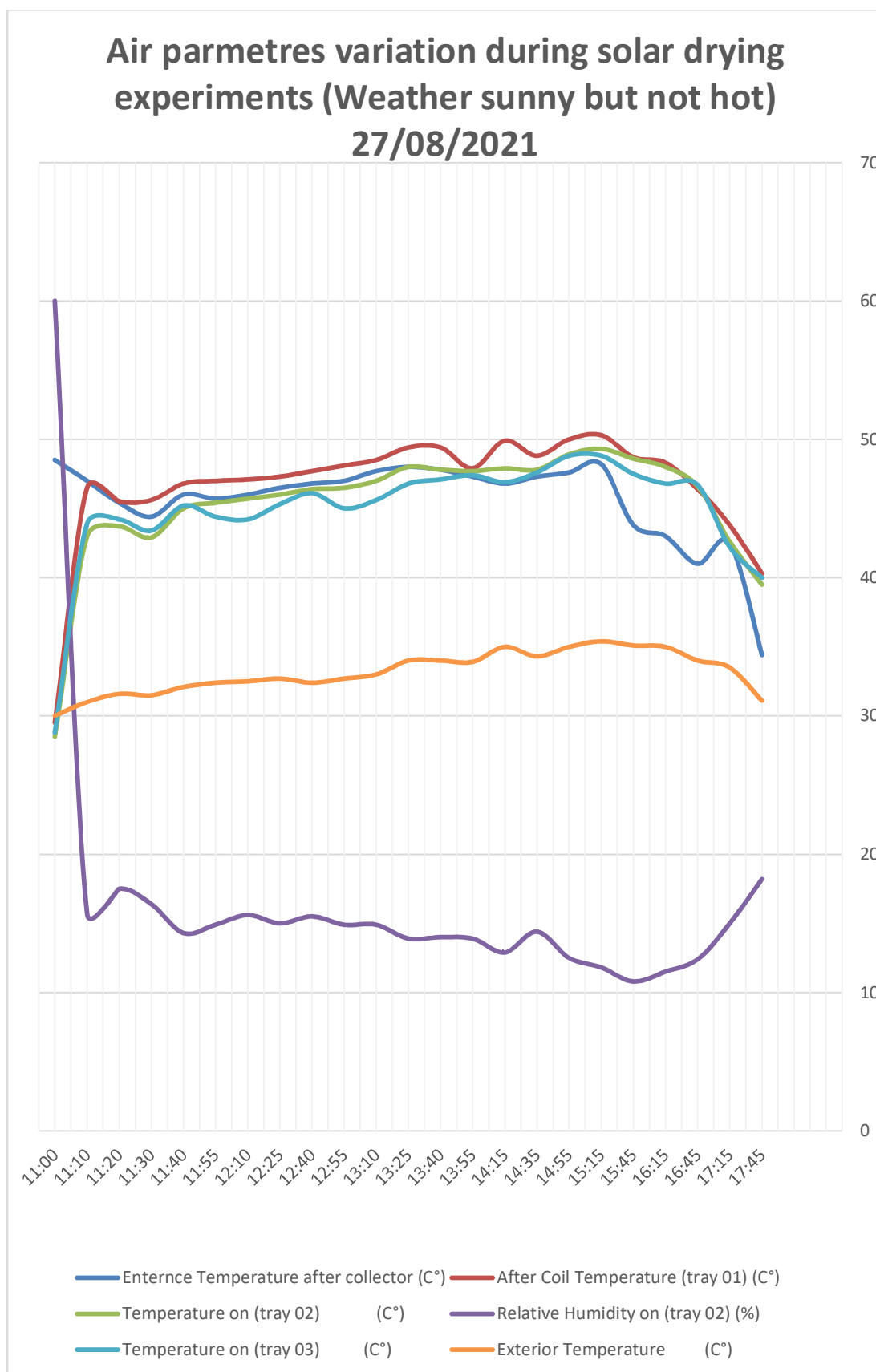


Figure 5.11 : Les Paramètres d'air au cours de séchage solaire vitesse 2.2 m/s.

Tableau 05 : Paramètres des modèles de séchage obtenu par une régression numérique.

Model	TwoTerm Modified	Henderson & Pabis	Logarithmic	Midilli
Équation	$a \cdot \exp(-k_1 \cdot x) + b \cdot \exp(-k_2 \cdot x)$	$a \cdot \exp(-k_1 \cdot x)$	$a \cdot \exp(-k_1 \cdot x) + b$	$a \cdot \exp(-k_1 \cdot x) + b \cdot x$
a	0,00157 ± 0,0031	3,4436 ± 0,2105	16,96294 ± 3,92008	11,5103 ± 1,47846
b	1,44008 ± 0,00994		0,52822 ± 0,02189	0,58716 ± 0,03245
k1	-0,01202 ± 0,0048	2,48088 ± 0,11229	7,2057 ± 0,56134	5,60502 ± 0,30452
k2	0,0021 ± 1,26513E-4			
Reduced Chi-Sqr	0,000392538	1,13E-03	2,15E-04	1,79E-04
R-Square (COD)	0,99264	0,96293	0,9933	0,99442
Adj. R-Square	0,99141	0,96117	0,99264	0,99387

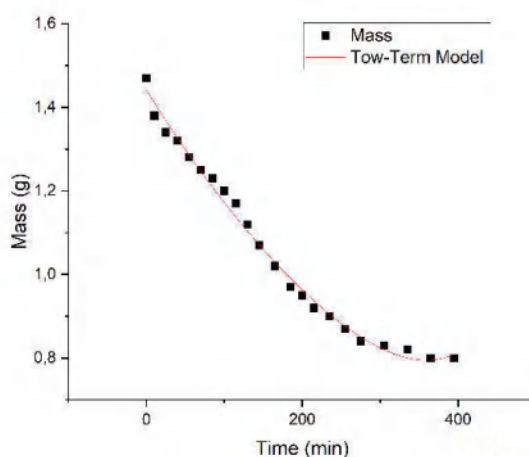


Figure 5.12 : Régression numérique de cinétique de séchage avec le modèle two-term.

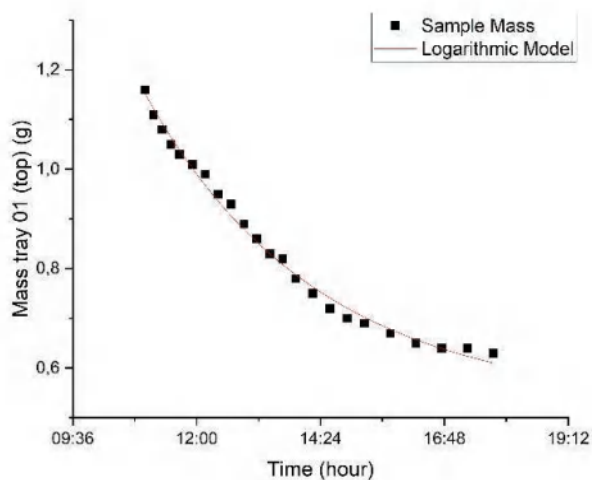


Figure 5.13 : Régression numérique de cinétique de séchage avec le modèle Logarithmique.

Les courbes de cinétique de séchage obtenues reflètent le comportement de ce type de produits au séchage. L'absence des phases de la mise en température et de séchage à vitesse constante dans les courbes de cinétique montré ici (figures 5.13 – 5.19) car le produit n'est pas saturée en eau à l'état liquide et donc y plus d'eau libre à l'intérieur du produit et c'est le cas général pour les produits agroalimentaire.

Les résultats de la cinétique de séchage présentés dans les figures de 5.15 jusqu'au 5.19 sont similaires avec celle trouvé dans la littérature pour les plantes médicinales (Said Bennaceur et al., 2012), (Kouhila et al., 2002), (Belghit et al., 2000).

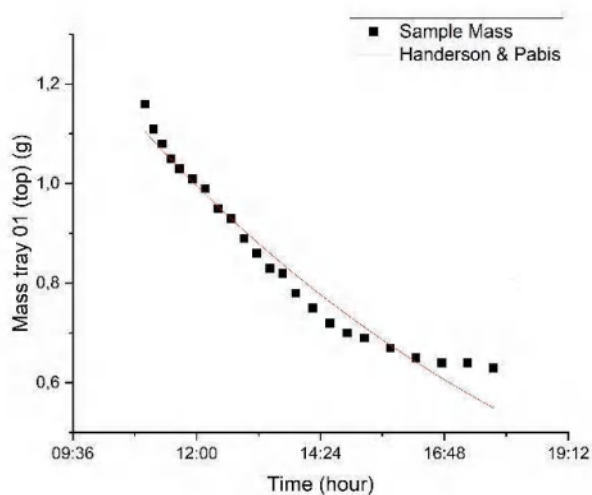


Figure 5.14 : Régression numérique de cinétique de séchage avec le modèle Handerson & Pabis.

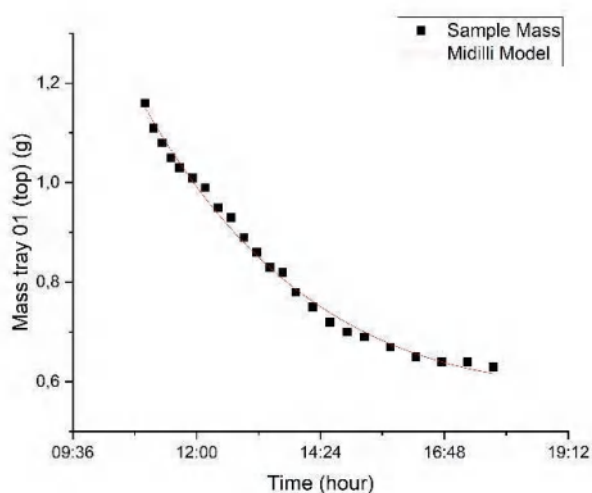


Figure 5.15 : Régression numérique de cinétique de séchage avec le modèle de Midilli.

Afin de proposer une modélisation du comportement du produit d'étude, des modèles de couches minces ont été appliqués et comparés. Les résultats de la régression numérique de la courbe de cinétique de séchage (tableau 05 & figures de 5.12 à 5.15) montrent que les modèles de deux termes et Logarithmique ainsi Midilli ont les coefficients de lissage les plus appropriés.

Influence de la vitesse de l'air :

Dans la suite de cette étude, on s'est intéressé à l'influence de la vitesse de l'air sur le séchage du produit dans notre séchoir solaire. Trois niveaux du séchoir, ont été choisis

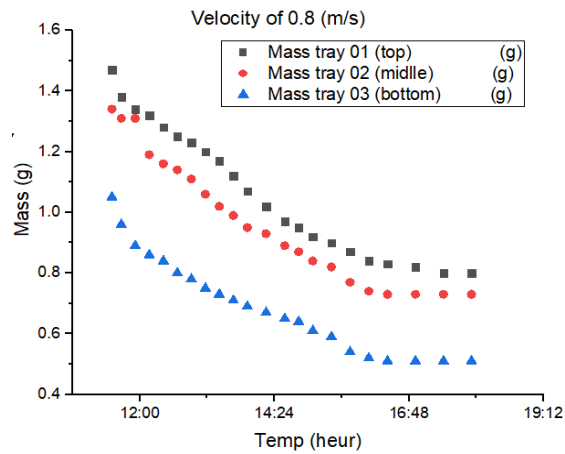


Figure 5.16 : Évolution de cinétique de séchage a une vitesse de 0.8 m/s.

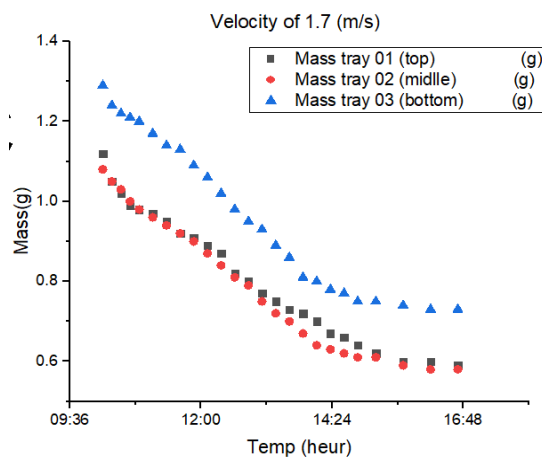


Figure 5.17 : Évolution de cinétique de séchage a une vitesse de 1.7 m/s.

Les résultats de la cinétique de séchage présentée dans les figures de 5.14 jusqu'à 5.18 sont similaires avec celle trouvée dans la littérature pour les plantes médicinales (Said Bennaceur et al., 2012), (Kouhila et al., 2002), (Belghit et al., 2000).

L'influence de la vitesse de l'air sur les courbes cinétiques de séchage est minimale car les conditions extérieures (conditions météorologiques) sont différentes.

On constate d'après les figures (5.16 à 5.18) que le temps nécessaire pour que le séchage des feuilles de la plante *Myrtus Communis* soit complet est d'environ 7 h.

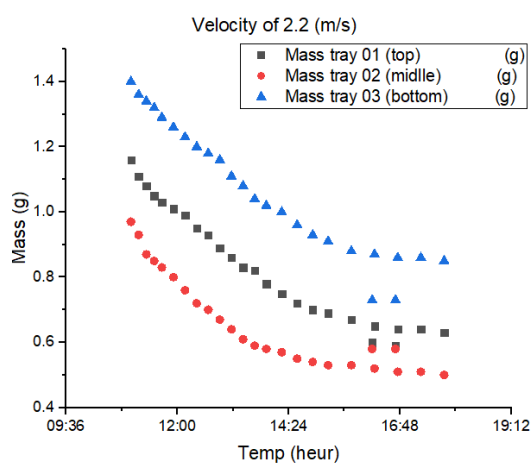


Figure 5.18 : Évolution de cinétique de séchage à une vitesse de 2.2 m/s.

Chapitre 6

**Modélisation mathématique des
phénomènes de transport dans un
séchoir solaire.**

6.1. Modélisation mathématique

6.1.1. Modélisation du Séchage Convectif

6.1.1.1. Concept multi

Les produits soumis au séchage subissent directement et indirectement différents phénomènes couplés, donc c'est une transformation multi-physiques et le traitement se fait à des échelles multi dimensionnelle depuis l'échelle nano vers le macroscopique, donc sont multi échelle. Quasiment le produit mis à la déshydratation est généralement composé physiquement de plusieurs substances aux états différents (liquide, gaz, solide). Ceci mène à un système a multi phase, le choix de type de traitement dépend de la précision des résultats et le degré de complexité désirée (Defraeye, 2014).

6.1.1.2. Multi-Échelle

Le séchage est souvent traité dans des multiples échelles depuis le (nano-micro-méso-macro-séchoirs industriels) chaque type de résolution à ses propres conditions de base et formulation mathématique, qui ne s'appliquent pas aux autres échelles.

Notant que ces échelles peuvent se chevauchées entre elles et sont liées au produit soumis au séchage.

Lors de la modélisation du séchage, la désignation de l'échelle envisagée est une tâche primordiale car le changement de système depuis une échelle vers un autre peut engendrer une grande augmentation dans le coût et le temps de calcul.

Tableau 05 : Échelle de traitement du phénomène de séchage d’après (Defraeye, 2014).

Échelle	Magnitude (m)	Niveau	Exemple
Séchoir industriel	$\sim 10^{-1} - 10^3$	Un séchoir complet (le produit a séché peut être distingué)	Produit comme un block
Macro	$\sim 10^{-2} - 10^1$	Un produit (différents composants des produits peuvent être distingués)	différents produits, les facteurs sur les produits.
Méso	$\sim 10^{-2} - 10^{-4}$	Un composant dans le produit.	macro pores, gouttelette d’eau.
Micro	$\sim 10^{-4} - 10^{-6}$	Au-dessous d’un constituant le produit.	Micro pores, micro capillaires, fibres.
Nano	$\sim 10^{-6} - 10^{-9}$	cellule	Nano capillaire, membrane de la cellule.

6.1.1.3. Multi-Physiques

Le problème de séchage conjugue différents modes de transport de masse, chaleur et d’écoulement des fluides. Ces transformations physiques de base sont bien couplées entre elles pour bien décrire le processus global d’une façon complète. Mais d’autres processus additionnels ont eu lieu dans le phénomène global de déshydratation, qui ont une importance significative. Particulièrement, dans les produits du nature biologique et on ne peut pas les négliger et qui sont les réactions chimique et biologique, qui sont les responsables des changements de couleur, d’arôme, de réduction dans les valeurs nutritives et des activités micro-biologiques (Defraeye, 2014).

Parmi les processus de transport lors de séchage on trouve : la diffusion, la conduction, le rayonnement, la convection, l’advection, le changement de phase, en

plus de la déformation, l'écoulement laminaire ou turbulent ...etc. tous ces processus ont lieu dans des états de la matière différente.

6.1.1.4. Multi-Phase

Différents états de matière existent dans les produits soumis au séchage. Ces produits sont généralement poreux, où la partie solide est représentée par la matrice sèche, et un mélange de gaz et de liquide à l'intérieur des pores. Le gaz est pratiquement la vapeur d'eau et l'air. Le liquide est représenté par l'eau sous trois états état libre, liée physiquement (adsorbé) et liée chimiquement.

Le but du séchage est d'enlever l'eau libre puisque la suppression d'eau liée physiquement et chimiquement va engendrer une détérioration du corps (généralités sur le séchage).

6.1.2. Procédure de résolution commune des problèmes du séchage convectif

Le séchage convectif est un processus complexe qui se déroule sur multi-dimension ou bien échelles, le choix de tel dimension est relié relativement par les phénomènes apercevoir. Communément le déroulement de la résolution de ces problématiques se fait sur quatre dimensions à l'échelle des pores, des réseaux des pores, dans un domaine élémentaire représentatif, et dernièrement dans une grande échelle (macroscopique) par l'utilisation de l'approche des couches minces.

Chaque dimension possède ces propre hypothèses du calcul et modélisation ainsi que des modèles adéquates, par exemple à l'échelle des pores les modèles appropriés sont celui de Lattice Boltzmann (Krüger, 2004), dissipative particule dynamique, et le modèle du point matériel (Geoffroy & Prat, 2014). À une échelle des réseaux des pores une représentation conceptuelle de l'espace poreux à l'intérieur de produit est utilisé et les réseaux sont extraits depuis une imagerie directe de la géométrie soumise aux études (micro rayon X tomographie) (Geoffroy & Prat, 2014; Prat, 2011) parmi les modèles qui appartiennent à cette famille le modèle Meshless (sans maillage).

Dans le domaine élémentaire fictif l'étude se déroule dans une partie où le milieu est continue (les trois phases de matière sont présentes). Ensuite la solution dans le domaine globale sera extraite par intégration. Parmi les modèles de cette famille on trouve les modèles de Luikov, Whitaker, Phillippe des Vries, Sherwood, Johanna, Krisher ces modèles sont groupés suivant deux groupes : un est basé sur la

thermodynamique des processus irréversibles, et l'autre sur les paramètres phénoménologiques.

La dernière représentation est celle des couches minces qui assume que le phénomène se développe en dehors des produits soumis au séchage et la seule relation entre les produits et l'air de séchage entourant est défini par les cinétiques de séchage.

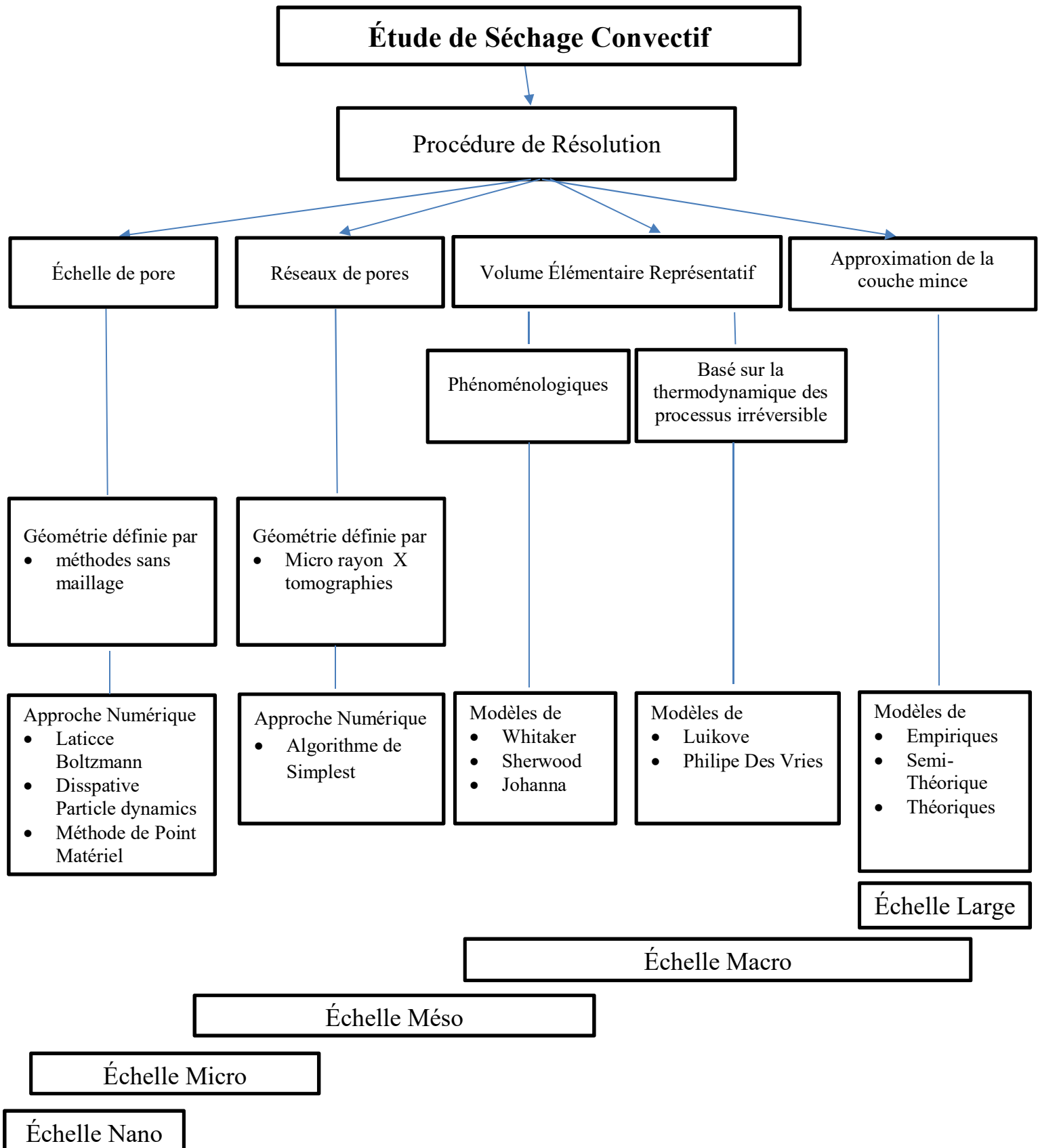


Figure 6.1 : Schéma descriptive des procédés de traitement du séchage convectif.

6.2. Modélisation du séchoir solaire étudié :

Le modèle mathématique qui représente les différents phénomènes dans la chambre de séchage et le capteur solaire, a été établi en considérant les bilans massiques et énergétiques et l'écoulement d'air.

Dans ce travail, le software COMSOL Multiphysics a été utilisé. La méthode des éléments finis est appliquée par ce logiciel, pour résoudre le système d'équations aux dérivées partielles obtenues.

6.2.1. Formulation mathématique :

6.2.1.1. Hypothèses de travail :

Dans cette partie de travail nous considérons le taux d'évaporation comme constant à la surface du produit qui correspond à la première phase de séchage (période à taux de séchage constant), car celle-ci est la phase de séchage la plus importante.

Suppositions, conditions initiales et aux limites :

- La circulation d'air à l'intérieur de séchoir est supposé laminaire, suivant deux axes (2D)
- L'air est supposé incompressible
- Le régime d'écoulement est stationnaire.
- La convection thermique et la diffusion de masse sont considérées transitoires
- L'humidité relative à la surface des échantillons égale à 100%
- Le flux de chaleur solaire entrant depuis la surface supérieure du collecteur est égale à 700 W/m^2
- La vitesse de l'air à l'entré est égale à $0,5 \text{ m/s}$.
- La température d'entrée est supposée $25 \text{ }^\circ\text{C}$
- Un flux de masse constant égal $2,5 \cdot 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ est introduit dans l'air de séchage retenue depuis échantillons
- Les propriétés thermo-physiques de l'air dépendent de la pression et de la température.
- Le transfert de chaleur influence le transport de masse et non l'inverse.

Nous avons négligé la chaleur générée par la dissipation visqueuse et le travail effectué par changement de pression

- **Cas étudié N°01 (Mouvement d'air Laminaire)**

Un flux de chaleur supposé constant, provenant de la partie supérieure du l'absorbeur dans le capteur solaire. Le phénomène de transport au sein de séchoir solaire est modélisé en considérant un écoulement d'air laminaire.

Cette problématique implique un couplage entre multi-physiques (mouvement de fluide, transfert de masse et de la chaleur). Les équations mathématiques de chaque physique sont exprimées ci-dessous :

a) Les équations gouvernantes du mouvement de fluide sont données par :

Équation de quantité de mouvement en régime stationnaire

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-\rho I + K] + F \quad (6.1)$$

La conservation de la masse

$$\rho \nabla \cdot (u) = 0 \quad (6.2)$$

Les forces visqueuses

$$K = \mu(\nabla u + (\nabla u)^T) \quad (6.3)$$

b) Transfert de chaleur dans l'air humide

Équation générale de la chaleur

$$d_z \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + d_z \rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = d_z Q + q_0 + d_z Q_p + d_z Q_{vd} \quad (6.4)$$

Flux de chaleur par conduction

$$q = -d_z \lambda \nabla T \quad (6.5)$$

c) Transport de l'humidité dans l'air asséchant

Les équations gouvernantes sont définies comme étant :

Équation d'advection-diffusion dépendante du temps

$$d_z M_v \frac{\partial c_v}{\partial t} + d_z M_v u \cdot \nabla c_v + \nabla g = d_z G \quad (6.6)$$

Flux diffusive

$$g = -d_z M_V D \nabla c_V \quad (6.7)$$

Concentration de vapeur

$$c_V = \varphi c_{sat} \quad (6.8)$$

d) Transfert de chaleur avec rayonnement solaire

Équation générale de la chaleur

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q + Q_{ted} \quad (6.9)$$

Flux de chaleur par conduction

$$q = -\lambda \nabla T \quad (6.10)$$

Flux de chaleur gagnée depuis l'absorbeur

$$-n \cdot q = \varepsilon (G - e_b(T)) \quad (6.11)$$

En tenant compte de la variation de la longueur d'onde entre le rayonnement solaire et le rayonnement ambiant, la radiosité est

$$j_i = \varepsilon_i e_b(T) FEP_i(T) + \rho_{d,i} G_i \quad (6.12)$$

L'irradiation totale est exprimée par :

$$G_i = G_{m,i}(J_i) + G_{amb,i} + G_{ext,i} \quad (6.13)$$

Le rayonnement ambiant est donné par

$$G_{amb,i} = F_{amb,i} e_b(T_{amb}) FEP_i(T_{amb}) \quad (6.14)$$

Où la puissance rayonnée sur toutes les longueurs d'onde selon Stephan Boltzmann est

$$e_b(T) = n^2 \sigma T^4 \quad (6.15)$$

La puissance émissive pour une bande spectrale est définie comme :

$$FEP_i(T) = \frac{15}{\pi^4} \int_{c_2/(\lambda_{i-1}T)}^{c_2/(\lambda_i T)} \frac{x^3}{1-e^{-x}} dx \quad (6.16)$$

L'irradiation réciproque entre deux surfaces est

$$G_m = \int_{S'} \frac{(-n' \cdot r)(n \cdot r)}{\pi \cdot |r|^4} J' ds \quad (6.17)$$

L'irradiation provenant de la source de rayonnement externe (Soleil) est :

$$G_{ext,i} = q_{s,i} + I_{diff} \quad (6.18)$$

L'équation de conservation à la surface semi-transparente (Verre Acrylique ou plexiglass) définit par :

$$\varepsilon_i + \rho_{d,i} + \rho_{s,i} + \tau_i = 1 \quad (6.19)$$

L'équation de conservation à la surface d'absorbeur donnée par

$$\varepsilon_i + \rho_{d,i} = 1 \quad (6.20)$$

- Cas étudié N°02 (Mouvement d'air turbulent)

Le régime d'écoulement à l'intérieur du séchoir est turbulent (nombre de Reynolds suffisamment élevé).

a) Modélisation de la turbulence

Les équations de Navier-Stokes moyennées (RANS - Reynolds Average Navier-Stokes) représentent des équations de transport pour les quantités moyennes d'écoulement, dont les variables d'équations de continuité et de quantité de mouvement utilisées, sont décomposées en partie moyenne (moyenne au temps) et une partie de fluctuation (Tahrour, 2016),

Le fluide est supposé incompressible et newtonien.

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i, \quad p = \bar{p} + p', \quad T = \bar{T} + T' \quad (6.21)$$

La décomposition des variables provoque l'apparition des tensions de Reynolds dans les équations de mouvement et engendre un système ouvert. La résolution de ce système nécessite des équations supplémentaires pour le clôturer (Tahrour, 2016).

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_i u_j + P \delta_{ij} - \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) + \rho \overline{u'_i u'_j} \right) = 0 \quad (6.22)$$

Les contraintes de Reynolds ont été défini par l'approximation de boussinesq:

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_l \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho \lambda_{air} + \mu_l \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) + \delta_{ij} \quad (6.23)$$

Dans ce travail la modélisation de l'écoulement d'air à l'intérieur de séchoir est faite par le modèle standard $\kappa - \varepsilon$ (Kuzmin et al., 2007), le choix est justifié par les résultats satisfaisants (Kuzmin et al., 2007; Wilcox, 1993) et les moyens de calcul disponibles.

D'après le modèle $\kappa - \varepsilon$ les équations supplémentaires pour clôturer le système global sont les équations de transport de l'énergie cinétique de la turbulence et le taux de dissipation

i) Modèle de turbulence standard k – ε

Le modèle k – ε standard repose sur la conception de Bousinesq (1877). Les termes des contraintes de Reynolds sont évalués par Launder & Spalding (1974) (Tahrour, 2016):

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = 2\mu_t S_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} - \frac{2}{3} \mu_t \delta_{ij} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \quad (6.24)$$

Et

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (6.25)$$

S_{ij} Représente le tenseur de déformation.

Les équations de quantité de mouvement peuvent aussi s'exprimer par :

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-\rho I + K] + F \quad (6.26)$$

Équation de Continuité

$$\varphi \nabla \cdot (u) = 0 \quad (6.27)$$

L'énergie cinétique de la turbulence donner par :

$$K = (\mu + \mu_T)(\nabla u + (\nabla u)^T) \quad (6.28)$$

F c'est le vecteur de la force sur le volume [N/m³]

Les équations de transport de L'énergie cinétique de la turbulence et le taux de dissipation s'exprimer par :

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)k = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \epsilon \quad (6.29)$$

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)\epsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6.30)$$

Le taux de dissipation ϵ est donné par l'équation suivante

$$\epsilon = \vartheta \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (6.31)$$

L'énergie cinétique de turbulence

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i u_i} \quad (6.32)$$

La viscosité turbulente.

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (6.33)$$

Production d'énergie cinétique de turbulence due au cisaillement avec le flux transporté à une vitesse moyenne.

$$P_k = \mu_T \left[\nabla u : (\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3} (\nabla \cdot u)^2 \right] - \frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot u \quad (6.34)$$

Ou C_μ , $C_{\epsilon 1}$, $C_{\epsilon 2}$, σ_k , σ_ϵ , des constantes du modèle $k - \epsilon$ standard et leur valeur sont respectivement égale à 0.09, 1.44, 1.92, 1.3, 1 (Ignat et al., 2000).

b) Transfert de la chaleur

L'équation générale de transfert de la chaleur :

$$d_z \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + d_z \rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = d_z Q + q_0 + d_z Q_p + d_z Q_{Va} \quad (6.35)$$

Flux de chaleur par conduction

$$q = -d_z \lambda \nabla T \quad (6.36)$$

On a négligé la dissipation de la chaleur due à la viscosité et le travail généré par changement de pression.

c) Transfert de masse

Les équations de transfert de masse sont dérivées depuis la deuxième loi de Fick

$$d_z M_v \frac{\partial C_v}{\partial t} + d_z M_v u \cdot \nabla c_v + \nabla g = d_z G \quad (6.37)$$

Le flux de masse par diffusion.

$$g = -d_z M_v D \nabla c_v \quad (6.38)$$

Concentration de vapeur.

$$c_v = \varphi c_{sat} \quad (6.39)$$

Suppositions, conditions initiales et aux limites :

- On assume que l'air est un gaz parfait (Sun, 2006).
- Les conditions initiales sont : la vitesse est de 0 m/s et pression relative de 0 Pa, température égale à 20°C plus une humidité relative de 50%
- La vitesse d'entrée égale à 0.8 m/s et la pression est atmosphérique.
- La pression d'échappement égale a 1 atm
- La condition de Non-slip est posée sur toutes les autres frontières.
- Un flux de chaleur reçu par la surface supérieure du panneaux solaire dont leur intensité égale à 700 W/m² (Benhamza et al., 2021)
- Le reste des frontières de séchoir sont bien isolées par le polypropylène
- Le flux de chaleur gagné par le produit depuis l'air asséchant est utilisé pour évaporer l'eau contenue dans le produit, et il est décrit par :

$$-n \cdot q = d_z Q_b \quad (6.40)$$

Le système d'équations couplés obtenu, est non solvable analytiquement et nécessite le recours à des méthodes numériques. Différents procédés numériques sont souvent utilisés dans la résolution de ce genre des problèmes physique, parmi ces méthodes devenus classiques : la méthode des différences finies, des éléments finis et les volumes finis.

6.3. La méthode des éléments finis :

Après la découverte des nouvelles techniques de Upwinding ou ils présentent des oscillations non-physiques qui ont permis de croire la qualité de la solution et quasiment réduire le temps de calcul considérablement (Burgerscentrum, 2015), la méthode des éléments finis est devenue la plus utilisée (Defraeye, 2014).

La base des éléments finis est la méthode du résidu pondéré qui est le meilleur arrangement pour les problèmes thermofluidiques, la méthode de résidu pondéré consiste à obtenir une formulation faible à partir d'une formulation forte, qui décrit bien le problème physique réel. Cette conversion permet la réduction en degré de complexité de la problématique (Burgerscentrum, 2015).

La méthode de éléments finis consiste à discrétiser la géométrie par maillage ce dernier est souvent libre (Perré, 2011), puisque ce type est plus performant et rapide à résoudre. Ensuite, on détermine les équations différentielles gouvernantes dans chaque maille, ces équations seront simplifiées par intégration (approximation) numérique utilisant le théorème de Green. La fonction d'approximation (discrétisation) peut être linéaire ou non linéaire. Les simplifications précédentes mènent à des équations partielles ordinaires sur chaque élément de maille, le regroupement de tous les équations dans ces domaines élémentaires va constituer un système d'équations ordinaire globale, qui représentera le problème physique original dans une géométrie complète à étudier (Burgerscentrum, 2015).

La formulation faible donne une flexibilité additionnelle à la procédure mathématique et également numérique.

Pour résoudre un système d'équations différentielles à la base de la méthode de résidu pondéré il est nécessairement suivi une des extensions suivantes (Galarkine, Least-Squares, Collocation, Sub-domain Méthode).

La méthode utilisée dans le logiciel Comsol Multiphysics est celle de Galarkine, et admet que la fonction de Base égale la fonction de test.

6.3.1. Procédure de la résolution

Une fois la matrice globale a été générée, différentes méthodes numériques sont appliquées pour la résolution du problème. Parmi ces méthodes deux grandes familles

se distinguent : les méthodes directes et les méthodes itératives (Datta & Rakesh, 2010).

a) Les méthodes directes

Essentiellement basées sur la technique de Gauss élimination, elles sont plus chères de point de vue numérique, alors dans les systèmes d'équations de grande échelle, consomme beaucoup de temps de calcul, ainsi que de la mémoire. En plus dans certains cas la résolution est carrément impossible. Mais la convergence dans les méthodes directes est assurée (Datta & Rakesh, 2010).

L'élimination par la méthode de gauss est souvent exécutée par deux techniques par substitution ou bien par factorisation LU (Datta & Rakesh, 2010).

b) Les méthodes Itératives

Dans la méthode itérative la compilation débutera par une approximation de la solution initiale, et au cours du calcul et par recours au feedback la solution doit accueillir des changements successifs jusqu'à être très proche de la solution exacte du problème (Johanson 1987).

Ces méthodes sont plus performantes par rapport à des méthodes directes, puisque elles consomment moins de mémoire et atteignent le résultat désiré plus rapidement (court temps de calcul) (Datta & Rakesh, 2010).

Par rapport aux méthodes directes, les méthodes itératives ne convergent pas toujours. Pour améliorer la convergence des pré-conditionneurs sont souvent utilisés avec les solveurs itératifs « Jacobi, Newton Raphson » (Datta & Rakesh, 2010).

6.3.2. Modélisation du processus de transport

a) Approche de Couplage Entier (Fully Coupled approach)

Cette approche propose la résolution de problématique entière à la fois dans un domaine spécifique, alors comme nous savons que les phénomènes physique réels sont composés de différents phénomènes (multi-physiques) complexe, il s'agit donc de résoudre de manière couplée plusieurs systèmes d'équations représentative, et ceci mène à un large système d'équations incluant tous les inconnues et leur couplage, afin d'être résolue dans une itération seule et unique (Datta & Rakesh, 2010).

b) Approche De Ségrégation

Dans cette méthode la résolution de problème global qui définit les différents phénomènes physiques (multi-physiques) consiste à le discrétiser en plusieurs sous problèmes, ayant une taille moindre à celle de système original et souvent chaque physique est représenté par un problème discrétisé. Parfois une physique est fractionnée en plusieurs sous problèmes de tailles inférieures, et dans d'autre cas une étape de calcul peut résoudre multi-physiques (Datta & Rakesh, 2010).

6.3.3. Convergence et stabilité numérique

Les problèmes non linéaires sont souvent difficiles à résoudre. Dans de nombreux cas, aucune solution unique n'existe. Le logiciel COMSOL Multiphysics utilise une méthode itérative de type Newton pour résoudre des systèmes non linéaires d'EDP. Cette méthode de résolution peut être sensible à l'approximation initiale de la solution. Si les conditions initiales sont trop éloignées de la solution souhaitée, la convergence peut être impossible, mais elle peut être simple à partir d'une valeur de départ différente (Multiphysics, 2018).

Plusieurs actions sont requises pour améliorer la recherche des solutions pertinentes aux problèmes non linéaires :

- Fournir les meilleures valeurs initiales possibles.
- Résoudre séquentiellement et itérer entre les équations de physique unique, ensuite résoudre le problème multi-physiques entièrement couplé après l'obtention de meilleures suppositions de départ.
- S'assurer que les conditions aux limites sont cohérentes avec la solution initiale et que les frontières voisines ont des conditions compatibles qui ne créent pas de singularités.
- Affiner le maillage dans les régions de fortes gradient.
- Pour les problèmes de type convection, introduire la diffusion artificielle pour améliorer les propriétés numériques. La plupart des interfaces physiques pour la modélisation de l'écoulement des fluides et du transport des espèces chimiques fournissent une diffusion artificielle dans le cadre des paramètres par défaut.

- La mise à l'échelle ou des variations des conditions initiales peut être un problème lorsqu'un composant de la solution est nul. Dans ces cas, la mise à l'échelle automatique peut ne fonctionner pas.

- Transformer une EDP non linéaire stationnaire en un problème dépendant du temps. Puisque les problèmes dépendants du temps convergent aisément. La résolution du problème stationnaire original, s'obtient à partir de la résolution d'un problème dépendant du temps avec un pas suffisamment long (Multiphysics, 2018).

- Utiliser le solveur paramétrique pour faire varier une propriété de matériau ou un des coefficients du PDE à partir d'une valeur, qui peuvent rendre le système d'équations différentielles aux dérivées partielles légèrement non linéaires et ceci facilite la computation. De cette façon, on résout une série des problèmes non linéaires de plus en plus difficiles. La solution d'un problème légèrement non linéaire facile à résoudre sera utilisée comme une valeur initiale pour un problème non linéaire plus difficile (Multiphysics, 2018).

6.3.4. Stabilité numérique

Les problèmes de convection-diffusion (non linéaires) peuvent facilement devenir instables s'ils sont discrétisés à l'aide de la méthode des éléments finis de Galerkin (Jerves, 2020). La stabilisation numérique est essentielle pour obtenir des solutions physiques significatives, Il existe trois types de méthodes de stabilisation disponibles pour Navier Stokes – diffusion en ligne de courants, diffusion par vent de travers et diffusion isotrope.

6.3.4.1. Diffusion Rectiligne (Streamline)

La diffusion en rectiligne (Streamline) introduit une diffusion artificielle dans la direction des lignes de courant. Ceci est souvent suffisant pour obtenir une solution numérique lisse si la solution exacte de l'équation d'advection-diffusion ne contient aucune discontinuité.

Pour les systèmes d'équations fortement couplés, la méthode de Streamline diffusion doit être appliquée au système global plutôt qu'à chaque équation séparément (Hughes & Mallet, 1986)

6.3.4.2. Diffusion orthogonal (Crosswind)

Cependant, à des gradients aigues, des sous-dépassements et des dépassements peuvent se produire dans les solutions numériques. La diffusion orthogonale (Crosswind) résout ces oscillations parasites en ajoutant une diffusion orthogonale à la direction de la ligne de courant.

6.3.4.3. Diffusion Isotrope

La diffusion isotrope ajoute une diffusion artificielle aux équations de Navier-Stokes. La diffusion isotrope réduit considérablement la précision de la solution mais fait un très bon travail pour réduire les oscillations.

6.4. Maillage

Afin de bien examiner les phénomènes parcourus dans le séchoir solaire il faut un maillage approprié et leur concentration doit être adéquats au point et limites de forte variation.

Dans le présent travail le type maillage dans le séchoir solaire pour tous les cas étudiés est libre comme le montre la figure 6.2, avec des densités variables et graduellement. La discrétisation correspondante aux physiques utilisée (mécanique des fluides, transfert de la chaleur, et du masse) est prédéterminé dans le software Comsol multi-physiques de telle façon les points et les limites de grande intérêt (ou il y'a une grande variation dans les grandeurs de système) dans le modèle ont une concentration très élevée et ainsi de suite.

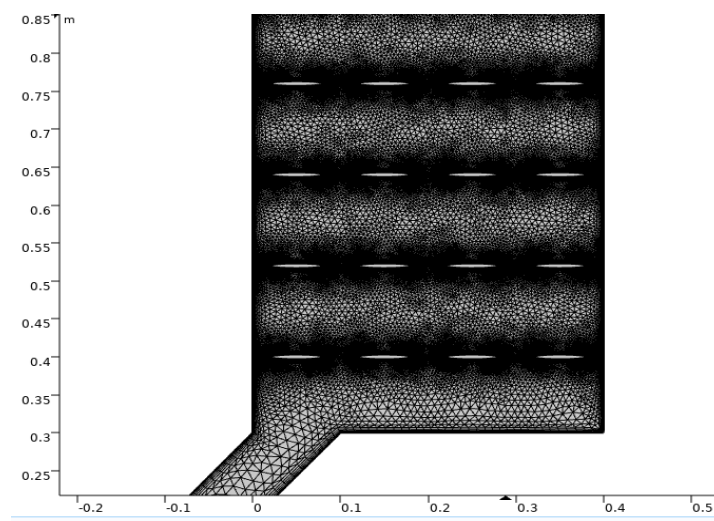


Figure 6.2 : discrétisation libre et graduelle du domaine d'études

6.4.1. Raffinement global par un maillage adaptatif

Le raffinement global par un maillage adaptatif utilise une stratégie d'estimation d'erreur pour déterminer le point dans le domaine de modélisation où l'erreur locale est la plus grande. COMSOL prend ensuite cette estimation d'erreur et utilise ces informations pour générer un maillage entièrement nouveau. Des éléments plus petits sont utilisés dans les régions où l'erreur locale est significative, et l'erreur locale dans tout le modèle est prise en compte. L'avantage ici est que le logiciel fera tout le raffinement du maillage par lui-même. L'inconvénient est que l'utilisateur n'a aucun contrôle sur le maillage. En tant que tel, un raffinement excessif du maillage peut se produire dans les régions qui présentent moins d'intérêt.

Dans notre travail le raffinement global par un maillage adaptatif a été utilisé.

Chapitre 7

Simulation & interprétation des résultats (CFD)

7.1. Résultats et discussions :

a) Étude paramétrique dans un régime permanente avec un flux laminaire

Les (figures de 7.1 -7.9) montrent l'effet de l'influence de la vitesse d'air asséchant dans le séchoir. L'augmentation de la vitesse provoque une chute considérable de la température globale.

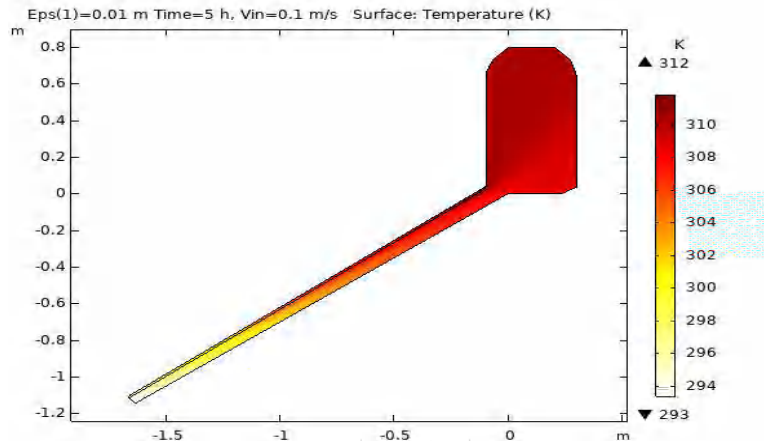


Figure 7.1 : Profil de température pour un espaceur entre l'absorbeur et la vitre de 1cm et une vitesse égale à 0.1 m/s.

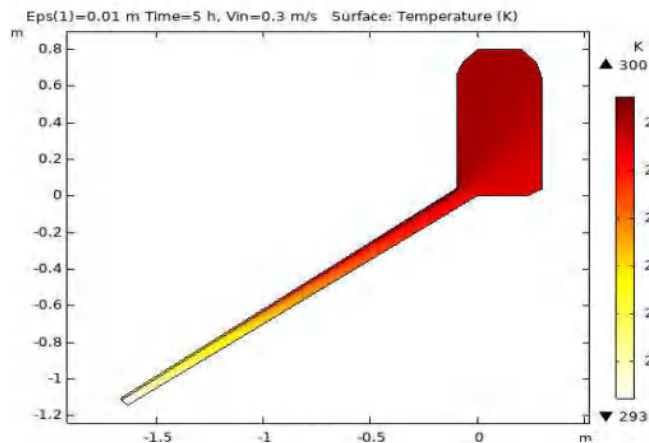


Figure 7.2 : Profil de température pour un espaceur entre l'absorbeur et la vitre de 1cm et une vitesse égale à 0.3 m/s.

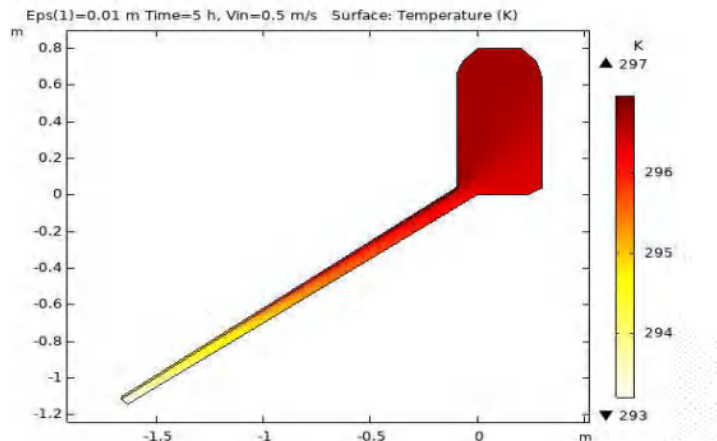


Figure 7.3 : Profil de température pour un espaceur entre l'absorbeur et la vitre de 1cm et une vitesse égale à 0.5 m/s.

Les figures (7.1-7.9) montrent que l'espace optimal entre l'absorbeur et la vitre, qui donne le maximum d'énergie solaire reçue est de 5 cm.

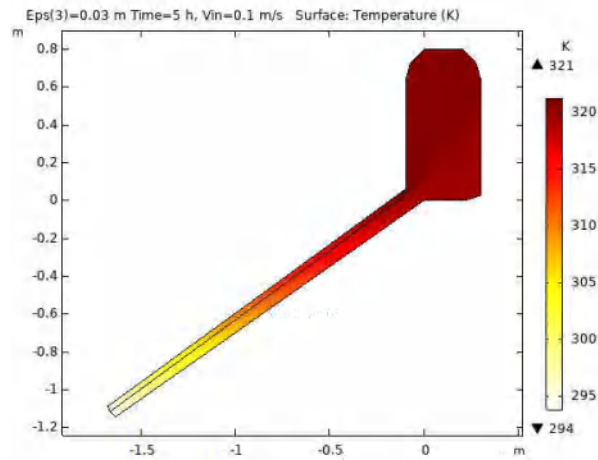


Figure 7.4 : Profil de température pour un espace entre l'absorbeur et la vitre de 3cm et une vitesse égale à 0.1 m/s.

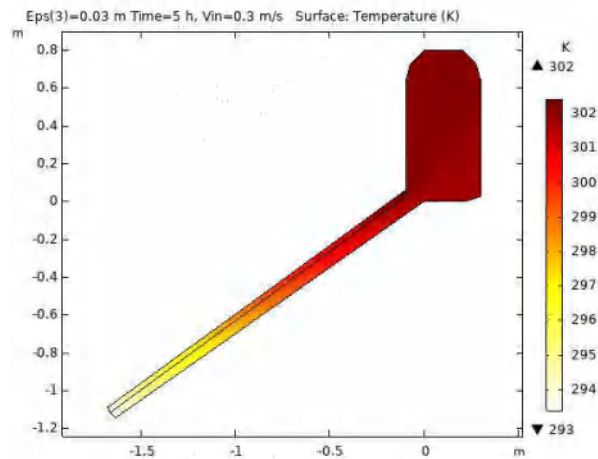


Figure 7.5 : Profil de température pour un espace entre l'absorbeur et la vitre de 3cm et une vitesse égale à 0.3 m/s.

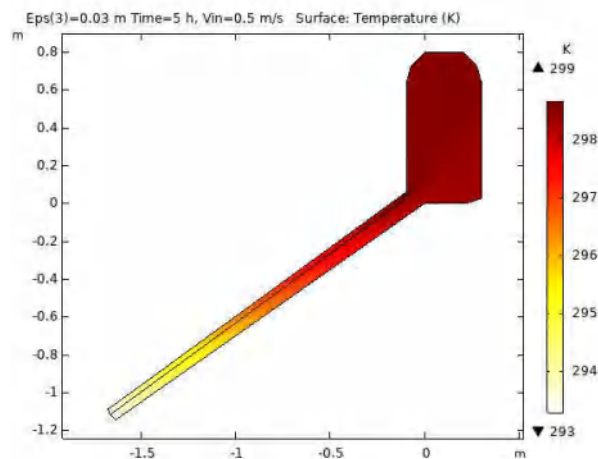


Figure 7.6 : Profil de température pour un espace entre l'absorbeur et la vitre de 3cm et une vitesse égale à 0.5 m/s.

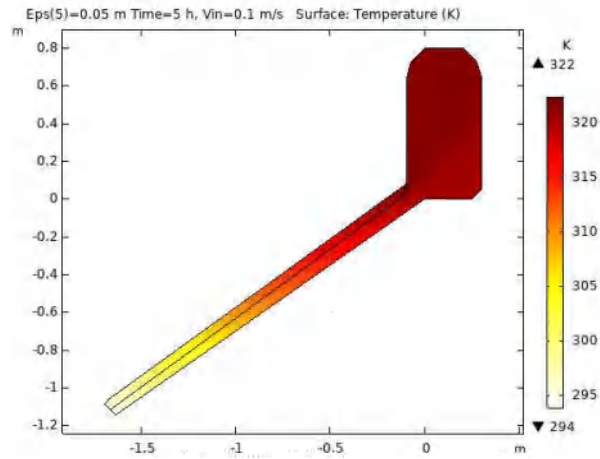


Figure 7.7 : Profil de température pour un espacement entre l'absorbeur et la vitre de 5cm et une vitesse égale à 0.1 m/s.

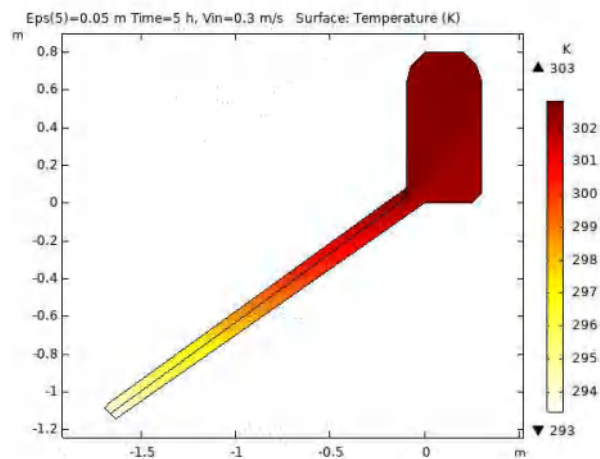


Figure 7.8 : Profil de température pour un espacement entre l'absorbeur et la vitre de 5cm et une vitesse égale à 0.3 m/s.

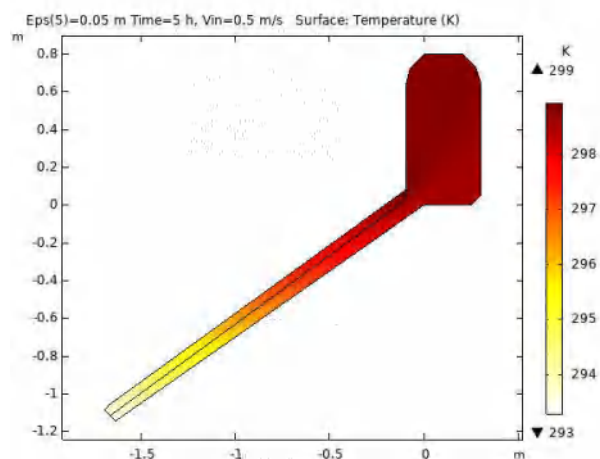


Figure 7.9 : Profil de température pour un espacement entre l'absorbeur et la vitre de 5cm et une vitesse égale à 0.5 m/s.

Les figures (7.10—7.12) montrent que l'augmentation de la température est liée principalement, avec la longueur du capteur solaire (collecteur de 3m donne une température 325 °C) sachant que la modélisation ici est faite pour un écoulement laminaire.

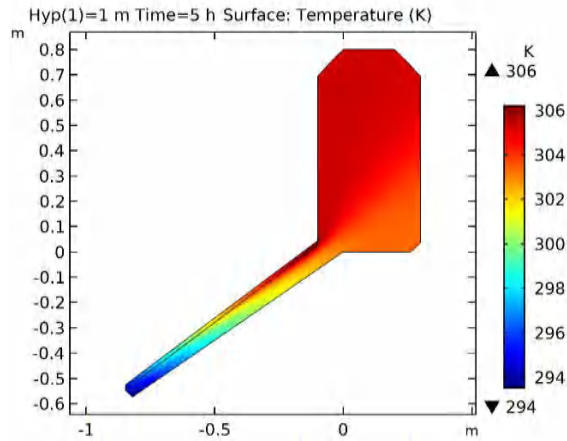


Figure 7.10 : Profil de température pour un collecteur avec une longueur de 1m.

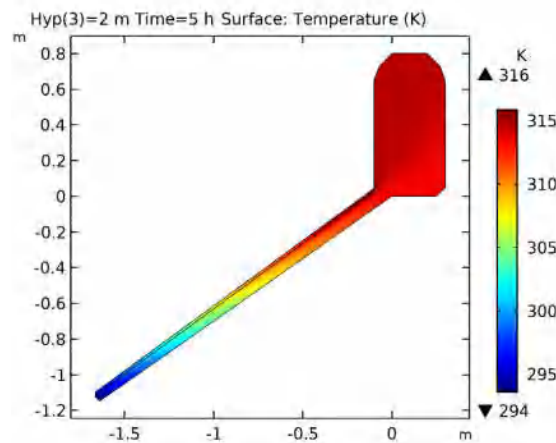


Figure 7.11 : Profil de température pour un collecteur avec une longueur de 2m.

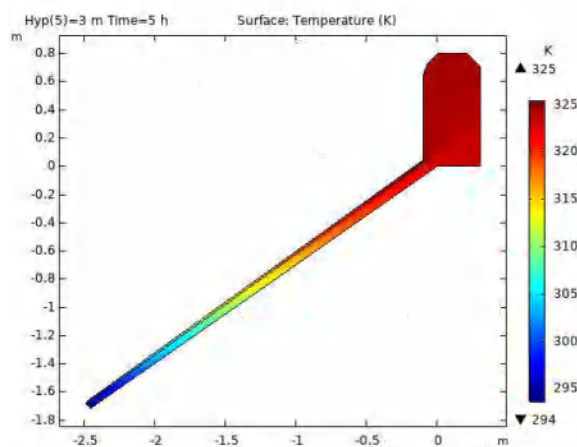


Figure 7.12 : Profil de température pour un collecteur avec une longueur de 3m.

b) Modélisation d'un séchoir dans un régime permanente avec un flux laminaire :

La couche limite à l'intérieur de collecteur est bien observée dans le cas d'écoulement laminaire (figure 7.13).

La distribution de température dans la boîte de séchage n'influe pas sur la distribution de l'air car dans ce modèle on a résolu chaque physique (mécanique des fluides & transfert de chaleur) séparément, afin de réduire le degré de complexité ainsi que le temps de calcul et les ressources utilisés.

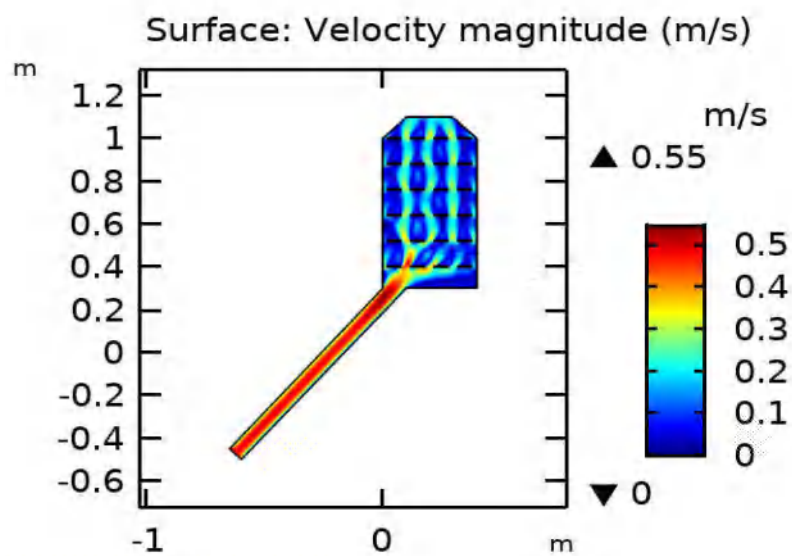


Figure 7.13 : Profil de vitesse avec une vitesse d'entrée de 0.5 m/s.

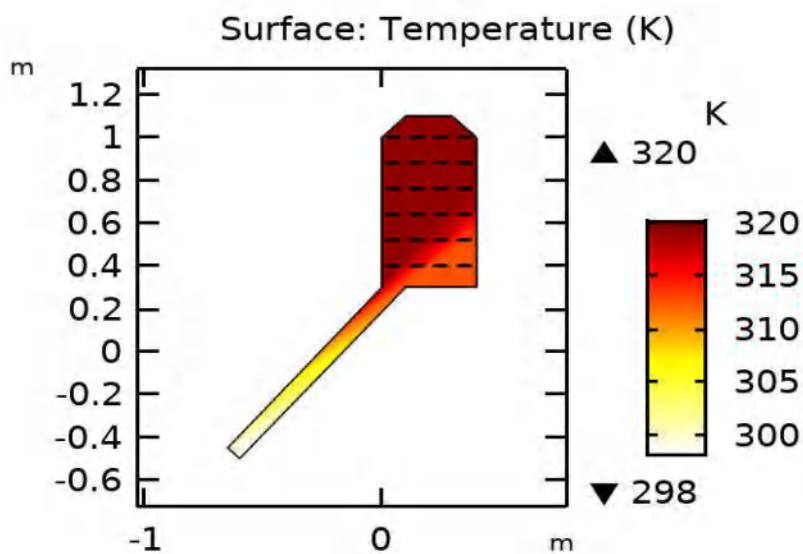


Figure 7.14 : Profil de température pour un séchoir solaire indirect reçu 700 W/m².

c) **Modélisation du phénomène de séchage de la menthe dans un séchoir ou le régime instationnaire avec un flux turbulent :**

On remarque dans la figure 7.15 que la couche limite au voisinage des parois du collecteur ne peut être distinguée dans ce cas car on considère un modèle turbulent. La température maximale est supérieure que celle obtenue dans le cas d'écoulement laminaire permanent puisque ce dernier modèle est le plus proche à la réalité.

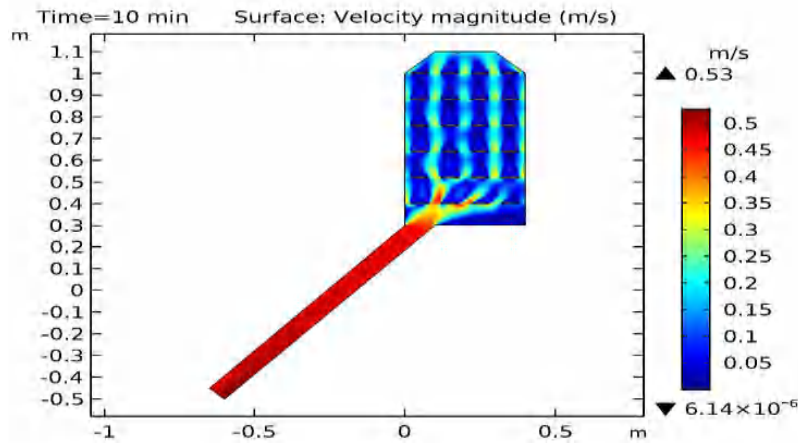


Figure 7.15 : Profil de la vitesse après 10 min.

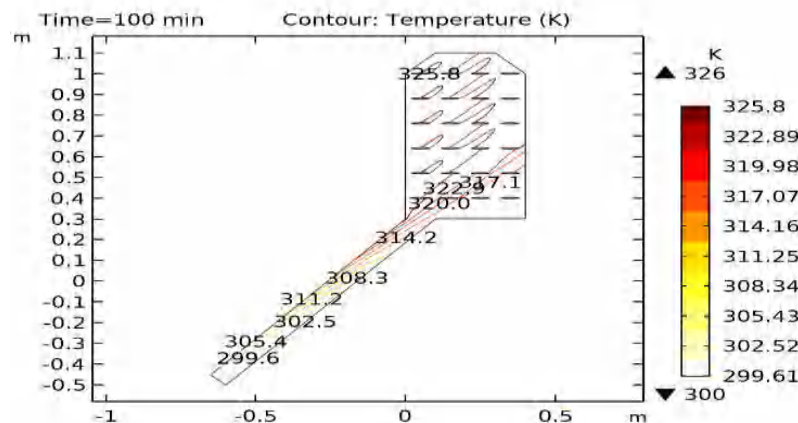


Figure 7.16 : Isothermes de la température après 100 minutes.

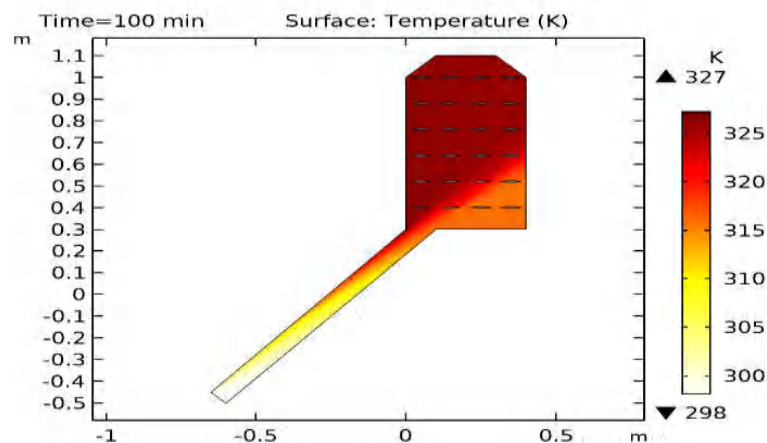


Figure 7.17 : Profil de température après 100 minutes.

Les trois figures (7.18-7.20) précédentes montrent l'échange en terme de masse (vapeur d'eau) entre la source (le produit) et le récepteur (l'air de séchage), au cours du temps. L'air entre sec et sort humide, et le temps nécessaire pour atteindre un séchage complet est environ 4h.

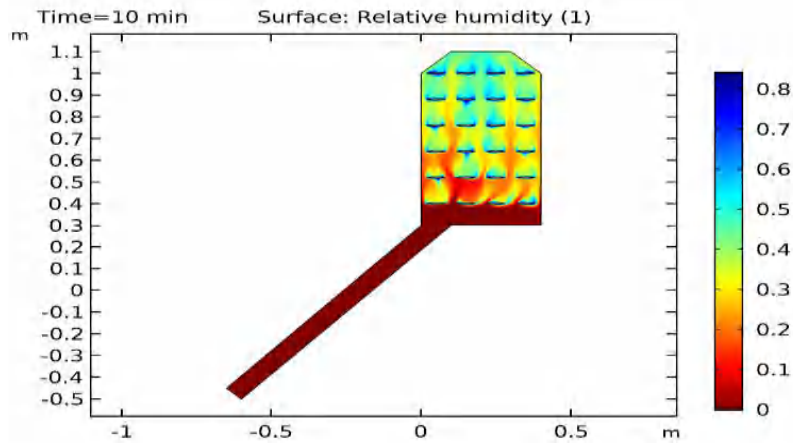


Figure 7.18 : Profil d'humidité relative après 10 minutes.

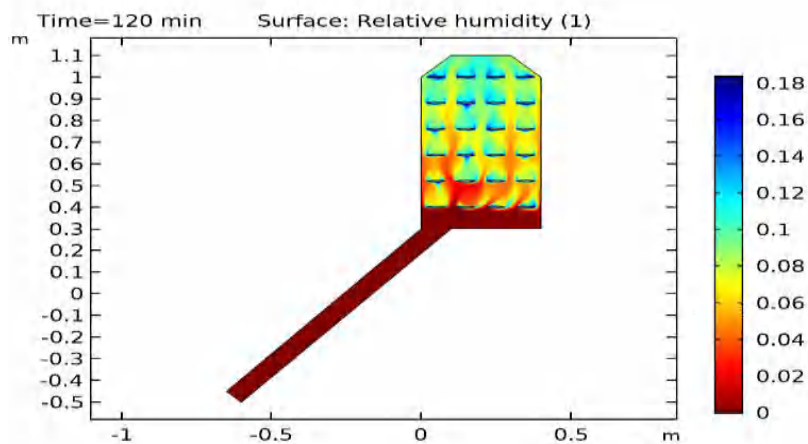


Figure 7.19 : Profil d'humidité relative après 120 minutes.

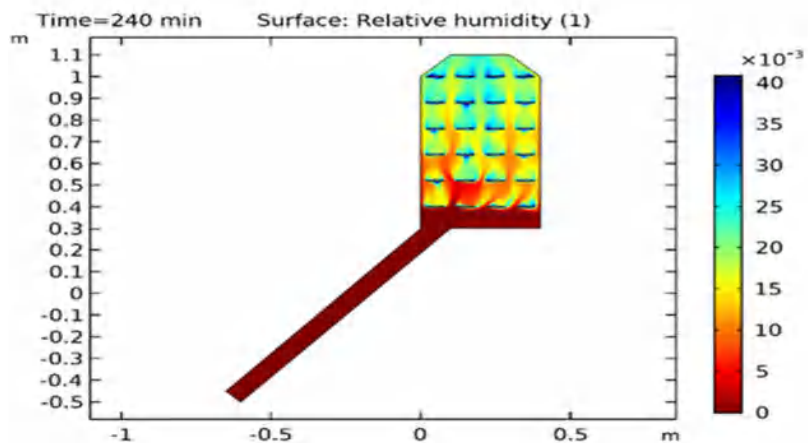


Figure 7.20 : Profil d'humidité relative après 180 minutes.

d) **Modélisation du phénomène de séchage de la plante de Myrtus Comminus dans un séchoir ou le régime instationnaire avec un flux turbulent:**

Un abaissement de la température maximale est observé dans la figure 7.21 par rapport aux figures précédentes (Figure 7.16 -7.17) ceci est due à l'augmentation dans la vitesse d'entrée d'air de 0.5 vers 0.8 m/s.

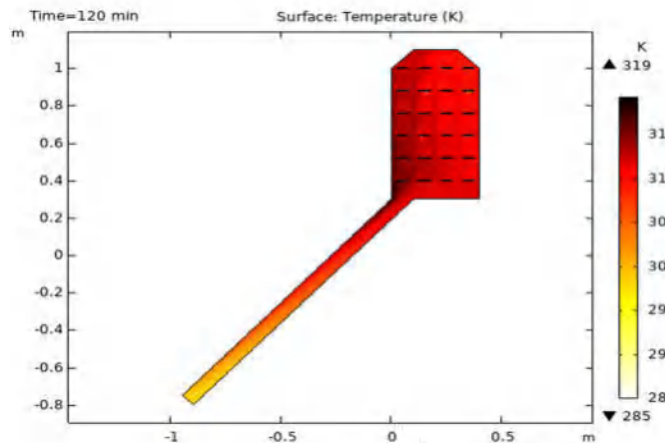


Figure 7.21 : Profil de température après 120 minutes avec une vitesse de 0.8m/s.

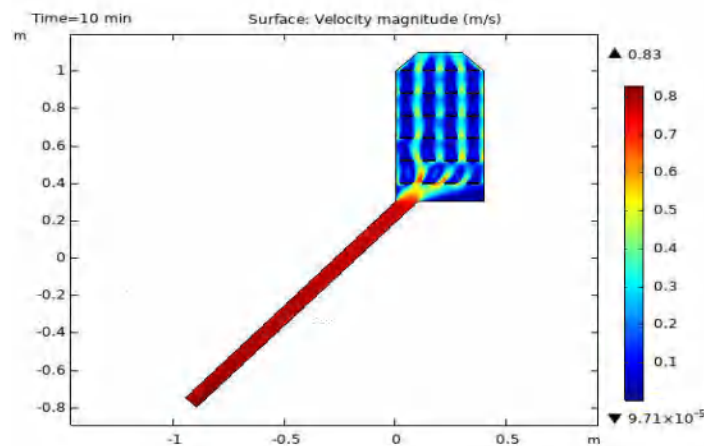


Figure 7.22 : Profil de la vitesse après 10 min avec une vitesse de 0.8 m/s.

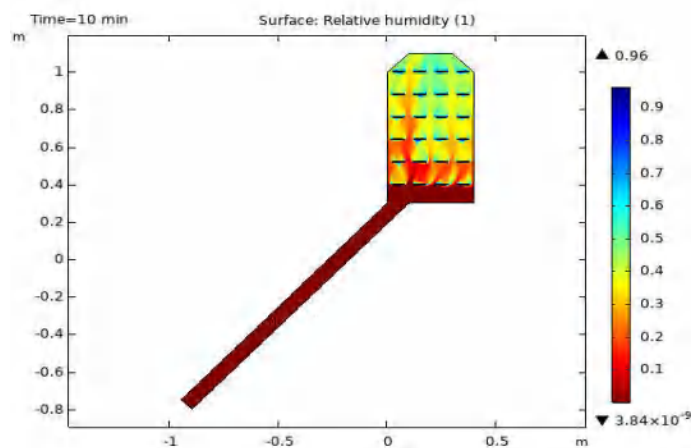


Figure 7.23 : Profil d'humidité relative après 10 minutes avec une vitesse de 0.8 m/s.

Les figures de (7.23—7.26) décrivent le transport de masse (vapeur d'eau) de la plante de myrtus communis au cours du temps. Le flux de masse est presque nul après 6 heures de séchage continue.

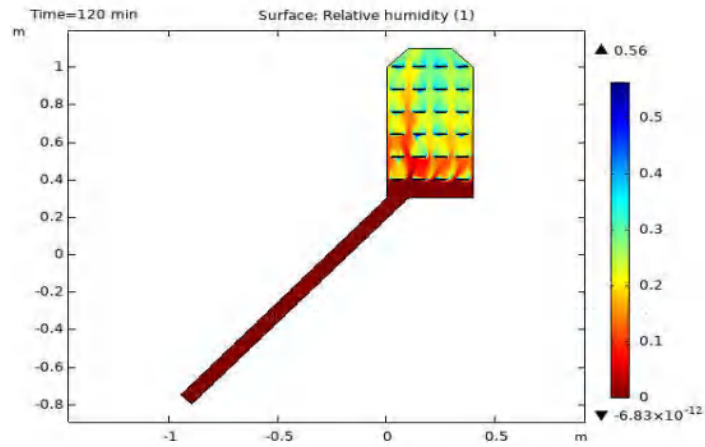


Figure 7.24 : Profil d'humidité relative après 120 minutes avec une vitesse de 0.8 m/s.

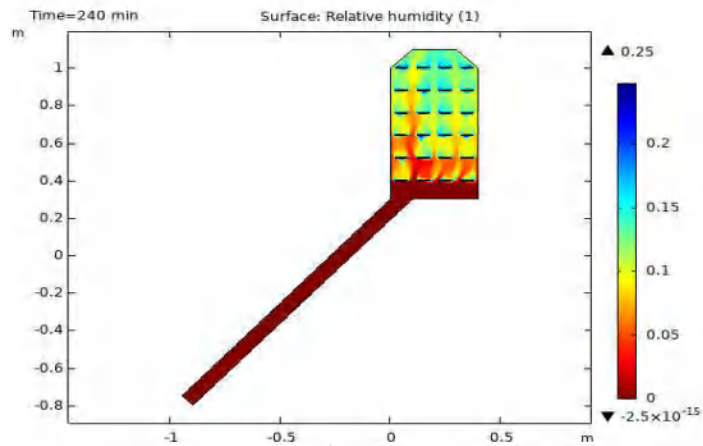


Figure 7.25 : Profil d'humidité relative après 240 minutes avec une vitesse de 0.8 m/s.

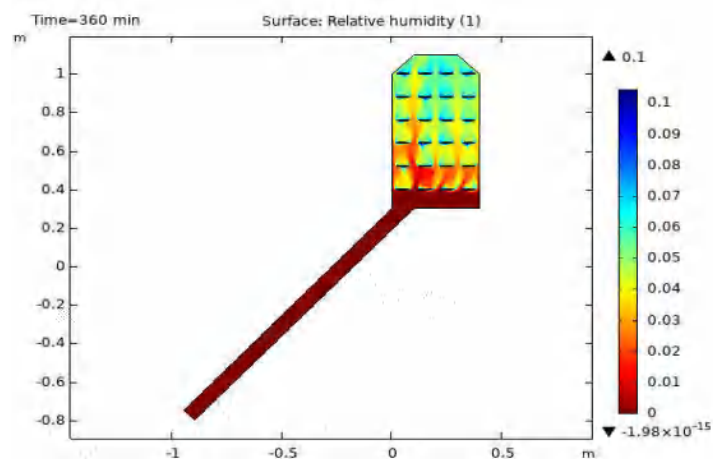


Figure 7.26 : Profil d'humidité relative après 360 minutes avec une vitesse de 0.8 m/s.

7.2. Confrontation des résultats :

Une comparaison de nos résultats avec d'autres travaux a été faite. Les figures 7.27-7.28 montrent une similarité dans la répartition de température à l'intérieur des différents compartiments de séchoir solaire, la densité dans les températures suit la direction de flux d'air.

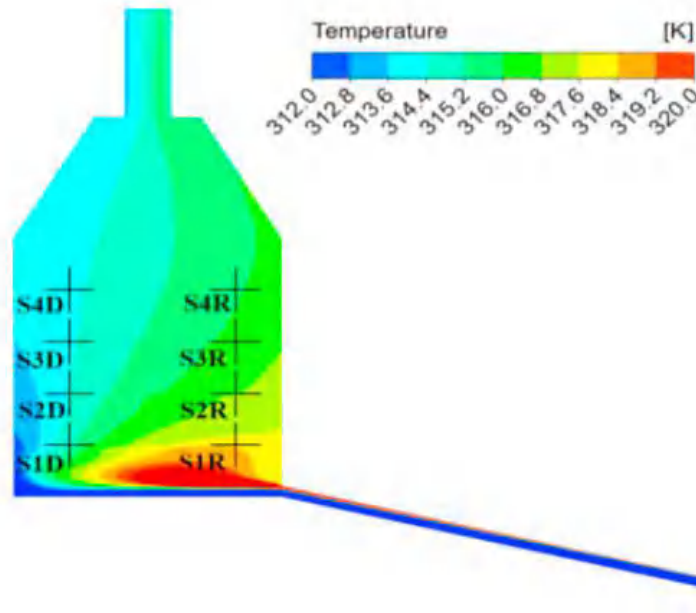


Figure 7.27 : Profile de distribution température dans un séchoir solaire performé par (Demissie et al., 2019).

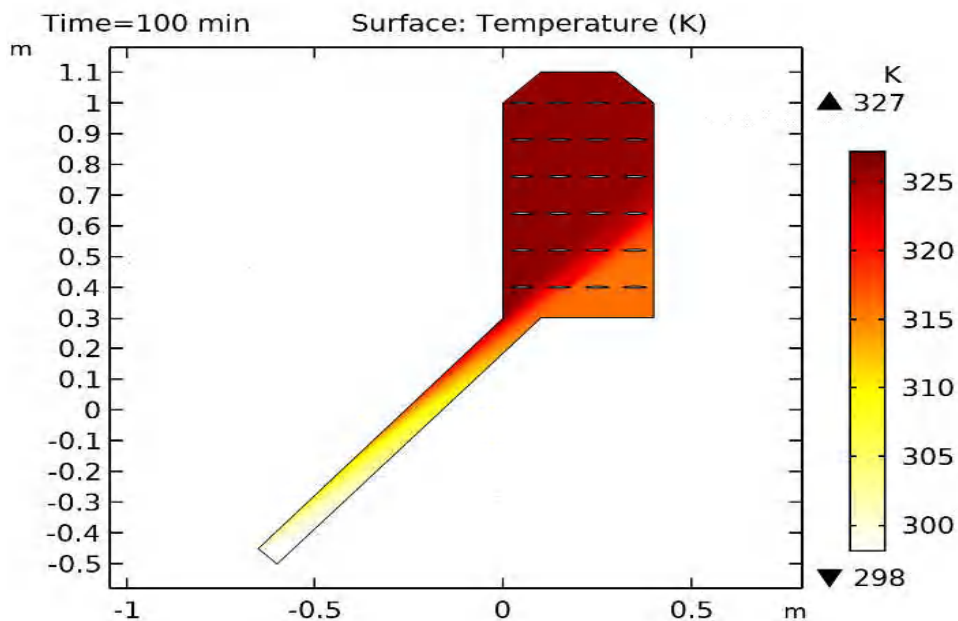


Figure 7.28 : Profile distribution température pour notre séchoir solaire.

On observe bien une ressemblance dans les profils des vitesses d'air à l'intérieur de séchoir solaire indirect. Les vitesses sont maximales dans les collecteurs et minimales dans les endroits où le passage d'air est libres. Les seules différences mineures sont dues à la différence des conditions initiales et aux limites.

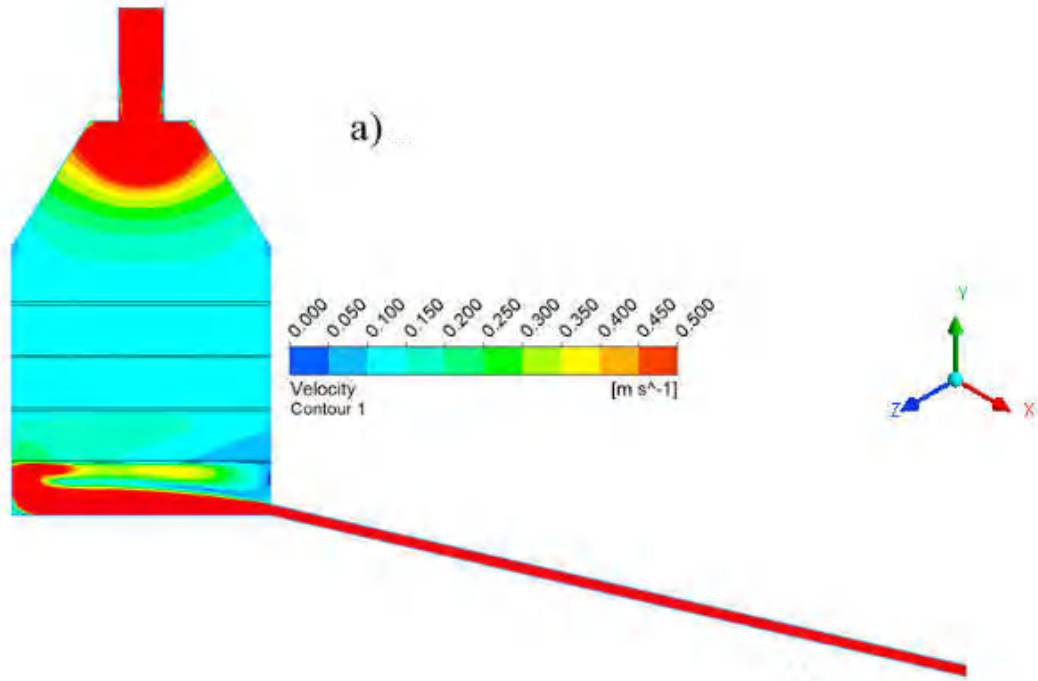


Figure 7.29 : Distribution de la vitesse d'air dans un séchoir solaire performé par (Demissie et al., 2019).

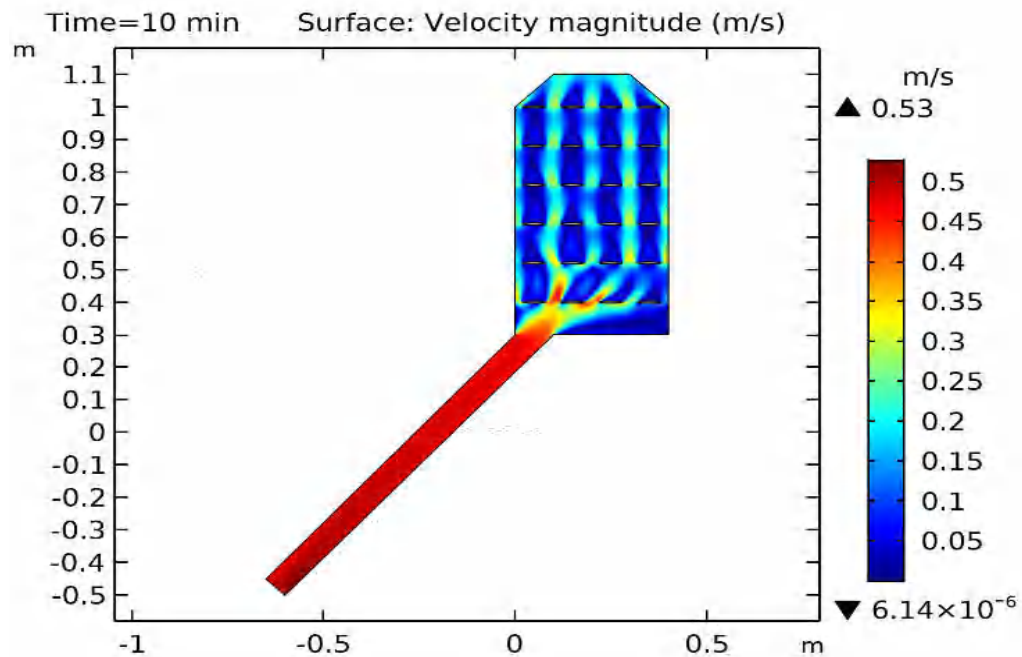


Figure 7.30 : Distribution de la vitesse d'air dans notre séchoir solaire performé.

Les courbes des isothermes de sorption obtenues ici présentent une grande similarité avec ceux obtenues par (S. Bennaceur et al., 2015), pour d'autres plantes médicinales. Les points d'adsorption et désorptions sont presque congruents (symétriques) les uns par rapport aux autres. L'effet d'hystérésis reste visible surtout pour la température 28°C.

La symétrie des points d'adsorption et de désorption est due à l'épaisseur très mince des feuilles des plantes médicinales.

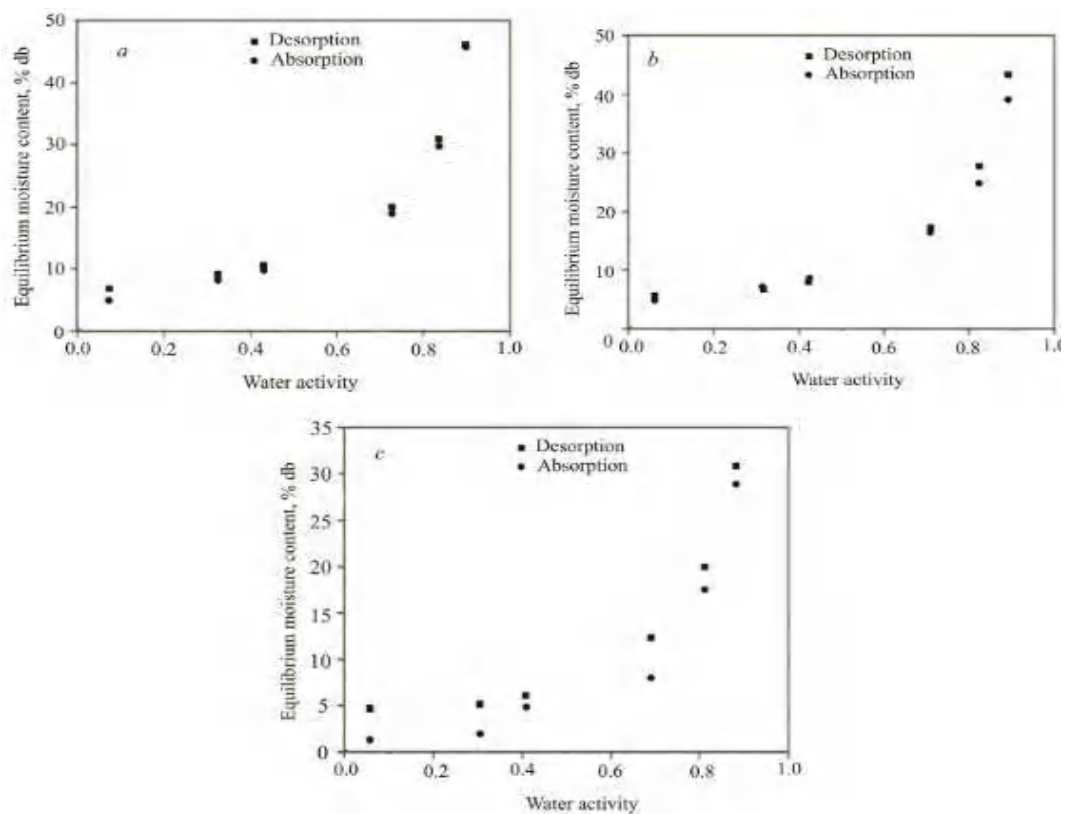


Figure 7.31 : Isothermes d'adsorption et désorption des feuilles de henné à 30 (a), 40 (b), and 50°C (c) (S. Bennaceur et al., 2015).

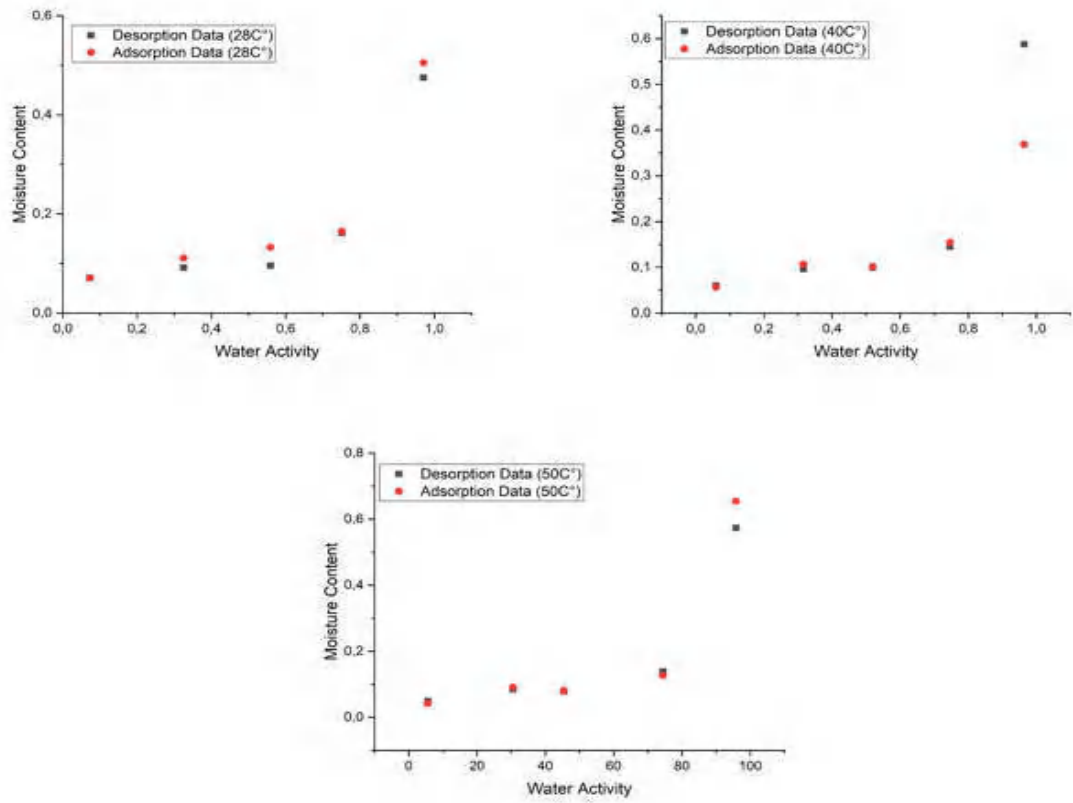


Figure 7.32 : Isothermes d'adsorption et désorption des feuilles de Myrtus à 28, 40, et 50°C.

Conclusion générale & Perspectives

Les courbes de cinétique de séchage et des isothermes de sorption de *Myrtus Comminus L* ont été obtenues expérimentalement et modélisées. Le temps nécessaire du séchage du *Myrtus Cominus* a été déterminé vers 6 heures environ.

Le modèle en couche mince de deux termes modifiés et le modèle de sorption de GAB ont été respectivement appliqués.

Des isothermes de sorption de forme sigmoïde ont été obtenues par la méthode gravimétrique statique pour les feuilles de *Myrtus Cominus* à des températures de 28, 40 et 50°C.

La modélisation CFD du comportement d'un séchoir solaire a été réalisée sous environnement COMSOL. Les résultats de l'étude expérimentale sont introduits dans le modèle mathématique établi.

Les paramètres d'ajustement ont été calculés et utilisés pour modéliser le comportement du séchoir. Les équations de bilans appliquées aux parties principales du séchoir, permettent de déduire les paramètres géométriques optimaux du capteur solaire et d'analyser les phénomènes thermo-aérauliques qui se produisent dans la chambre de séchage. La modélisation complète du processus de séchage solaire à l'aide de la simulation CFD, permet de diagnostiquer le fonctionnement et d'étudier différentes situations, afin d'obtenir les meilleurs paramètres de fonctionnement.

Les résultats du modèle numérique démontrent un accord raisonnable avec les résultats obtenus à partir des études antérieures.

Une étude paramétrique a été faite pour étudier et l'influence des différents paramètres géométriques sur le comportement énergétique du séchoir solaire indirect destiné à la déshydratation des herbes médicinales sous le climat local.

D'après l'étude paramétrique les capacités énergétiques des séchoirs solaires sont maximales à faibles vitesses et avec de grand espacement entre l'absorbeur et la

vitre. La surface du capteur solaire est évidemment, très importante, pour l'amélioration de cette capacité

L'uniformité de l'air de séchage à l'intérieur du séchoir solaire indirect a été étudiée à l'aide d'une nouvelle approche basée sur le traitement des phénomènes de transport au cours de séchage par simulation de dynamique des fluides computationnelle. La distribution de l'agent de séchage à l'intérieur de la chambre de séchage a une influence extrême sur les phénomènes survenus. Par conséquent, une distribution d'air non uniforme à l'intérieur du séchoir peut entraîner une différence significative dans la qualité du produit final, ce qui n'est pas souhaitable et, par conséquent, une augmentation de la contamination microbienne. Par conséquent, une simulation CFD peut apporter des solutions pour l'amélioration de la circulation de l'air.

Le front de séchage à l'intérieur de la chambre de séchage peut être observé et décrit l'évolution de l'état hygro-thermique du produit dans le temps. L'utilisation d'une analyse multi-physique pour simuler le processus de séchage, en faisant appel à des travaux expérimentaux peut conduire à l'évaluation du temps approximatif nécessaire à la déshydratation, déterminant ainsi l'énergie requise pour un processus de séchage complet.

Les résultats montrent un séchage non homogène du produit suivant la trajectoire d'air dans le séchoir.

Les conditions climatiques considérées dans cette étude, encouragent l'utilisation d'un tel dispositif dans cette région.

Afin de bien modéliser les phénomènes complets de séchage il faut étudier et analyser l'effet des conditions externes ainsi que ceux internes. La qualité du produit doit être surveillée et comparée à l'amont, au cours et à l'aval du séchage, en effectuant des analyses biologiques. L'apport de nouvelles technologies de régulation, de stockage d'énergie, ... contribuera sûrement à l'amélioration du procédé de séchage.

Annexes

Annexe A1 (Extrait depuis NF EN ISO 12571)

Substance	Eau de cristallisation ^a	Solubilité	
		Température d'eau	g par 100 ml d'eau distillée
Acétate de potassium KC ₂ H ₃ O ₂		20	253
		62	492
Fluorure de potassium KF	O, H ₂ O	18	92,3
	2, H ₂ O	18	349,3
Chlorure de magnésium MgCl ₂	O, H ₂ O	20	54,25
	O, H ₂ O	100	72,7
	6, H ₂ O	20	167
	6, H ₂ O	100	367
Iodure de sodium NaI	O, H ₂ O	25	184
	O, H ₂ O	100	203
	2, H ₂ O	0	317,9
	2, H ₂ O	100	1550
Carbonate de potassium K ₂ CO ₃	O, H ₂ O	20	112
	O, H ₂ O	100	156
	11h, H ₂ O	20	129,4
	11h, H ₂ O	100	268,3
	2, H ₂ O	20	146,9
	2, H ₂ O	100	331
Nitrate de magnésium Mg(NO ₃) ₂	6, H ₂ O	20	125
Bromure de sodium NaBr	0, H ₂ O	50	116
	O, H ₂ O	100	121
	2, H ₂ O	0	79,5
	2, H ₂ O	81	118,6
Chlorure de cobalt CoCl ₂	O, H ₂ O	7	45
	0, H ₂ O	96	105
	6, H ₂ O	0	76,7
	6, H ₂ O	100	190,7
Iodure de potassium KI	1h, H ₂ O	0	127,5
	1h, H ₂ O	100	208
Nitrate de sodium NaNO ₃		25	92,1
		100	180
Chlorure de strontium SrCl ₂	O, H ₂ O	20	53,8
	O, H ₂ O	100	100,8
	6, H ₂ O	0	106,2
	6, H ₂ O	40	205,8
Chlorure de sodium NaCl		0	35,7
		100	39,12

Annexe A2 (Extrait depuis NF EN ISO 12571)

Substance	Eau de cristallisation ^a	Solubilité	
		Température d'eau (°C)	g par 100 ml d'eau distillée
Chlorure d'ammonium NH ₄ Cl		0	29,7
		100	75,8
Bromure de potassium KBr		0	53,48
		100	102
Sulfate d'ammonium (NH ₄) ₂ SO ₄		0	70,6
		100	103,8
Chlorure de potassium KCl		20	34,7
		100	56,7
Nitrate de strontium Sr(NO ₃) ₂	O, H ₂ O	18	70,9
	O, H ₂ O	90	100
	4, H ₂ O	0	60,43
	4, H ₂ O	100	206,5
Nitrate de potassium KNO ₃		0	13,3
		100	247
Sulfate de potassium K ₂ SO ₄		25	12
		100	24,1
Fluorure de césium CsF	O, H ₂ O	18	367
	1 . H ₂ O	18	336,5
Bromure de lithium LiBr	O, H ₂ O	4	145
	O, H ₂ O	90	254
	2, H ₂ O	20	246
Bromure de zinc ZnBr ₂		20	447
		100	675
Hydroxyde de potassium KOH		15	107
		100	178
Hydroxyde de sodium NaOH		0	42
		100	347
Chlorure de lithium LiCl	O, H ₂ O	0	63,7
	O, H ₂ O	95	130
	1, H ₂ O	30	86,2
Bromure de calcium CaBr ₂	O, H ₂ O	20	142
	O, H ₂ O	100	312
	6, H ₂ O	0	594
	6, H ₂ O	25	1360
Iodure de lithium LiI	O, H ₂ O	20	165
	O, H ₂ O	90	433
	3, H ₂ O	0	151
	3, H ₂ O	90	201,2

^a Molécule d'eau cristalline par molécule de sel.

Annexe B1 (Extrait depuis NF EN ISO 12571)

Température °C	Humidité relative %					
	Fluorure de césium CsF	Bromure de lithium LiBr	Bromure de zinc ZnBr ₂	Hydroxyde de potassium KOH	Hydroxyde de sodium NaOH	Chlorure de lithium LiCl
0	5,52 ± 1,9	7,75 ± 0,83	8,86 ± 0,89	14,34 ± 1,70	9,57 ± 2,8	11,23 ± 0,54
5	4,89 ± 1,6	7,43 ± 0,76	8,49 ± 0,74	12,34 ± 1,40	8,91 ± 2,4	11,26 ± 0,47
10	4,33 ± 1,4	7,14 ± 0,69	8,19 ± 0,61	10,68 ± 1,10	8,51 ± 2,2	11,29 ± 0,41
15	3,83 ± 1,1	6,86 ± 0,63	7,94 ± 0,49	09,32 ± 0,90	8,24 ± 2,1	11,30 ± 0,35
20	3,57 ± 1,0	6,61 ± 0,58	7,83 ± 0,43	08,67 ± 0,78	7,98 ± 1,9	11,31 ± 0,31
23	3,39 ± 0,94	6,47 ± 0,55	7,75 ± 0,39	08,23 ± 0,72	7,58 ± 1,7	11,30 ± 0,28
25	3,24 ± 0,87	6,37 ± 0,52	7,70 ± 0,36	07,89 ± 0,66	6,92 ± 1,5	11,30 ± 0,27
27	3,01 ± 0,77	6,29 ± 0,50	7,62 ± 0,31	07,38 ± 0,56	6,26 ± 1,2	11,29 ± 0,25
30	2,69 ± 0,63	6,16 ± 0,47	7,55 ± 0,25	06,73 ± 0,44	5,60 ± 1,0	11,28 ± 0,24
35	2,44 ± 0,52	5,97 ± 0,43	7,54 ± 0,20	06,26 ± 0,35	4,94 ± 0,85	11,25 ± 0,22
40	2,24 ± 0,44	5,80 ± 0,39	7,59 ± 0,17	05,94 ± 0,29	4,27 ± 0,73	11,21 ± 0,21
45	2,11 ± 0,40	5,65 ± 0,35	7,70 ± 0,16	05,72 ± 0,27	3,61 ± 0,65	11,16 ± 0,21
50	2,04 ± 0,38	5,53 ± 0,31	7,87 ± 0,17	05,58 ± 0,28		11,10 ± 0,22
55	2,03 ± 0,40	5,42 ± 0,28	8,09 ± 0,19	05,49 ± 0,32		11,03 ± 0,23
60		5,33 ± 0,25				10,95 ± 0,26
Température °C	Humidité relative %					
	Bromure de calcium CaBr ₂	Iodure de lithium LiI	Acétate de potassium KC ₂ H ₃ O ₂	Fluorure de potassium KF	Chlorure de magnésium MgCl ₂	Iodure de sodium NaI
0	21,62 ± 0,13	21,68 ± 0,30	23,38 ± 0,53	30,85 ± 1,30	33,66 ± 0,33	42,42 ± 0,99
5	20,20 ± 0,12	20,61 ± 0,25	23,40 ± 0,32	29,42 ± 1,22	33,60 ± 0,28	41,83 ± 0,83
10	18,50 ± 0,12	19,57 ± 0,20	23,11 ± 0,25	27,27 ± 1,10	33,47 ± 0,24	40,88 ± 0,70
15	17,30 ± 0,12	18,56 ± 0,16	22,75 ± 0,30	24,59 ± 0,94	33,30 ± 0,21	39,65 ± 0,59
20	16,50 ± 0,12	17,96 ± 0,14	22,51 ± 0,32	22,68 ± 0,81	33,07 ± 0,18	38,76 ± 0,52
23		17,56 ± 0,13	22,15 ± 0,40	21,46 ± 0,70	32,90 ± 0,17	38,17 ± 0,50
25		16,76 ± 0,12	21,61 ± 0,53	20,80 ± 0,62	32,78 ± 0,16	37,55 ± 0,47
27		16,57 ± 0,10		20,60 ± 0,56	32,64 ± 0,15	36,51 ± 0,43
30		15,57 ± 0,08		20,77 ± 0,53	32,44 ± 0,14	34,73 ± 0,39
35		14,55 ± 0,06			32,05 ± 0,13	32,88 ± 0,37
40		13,49 ± 0,05			31,60 ± 0,13	31,02 ± 0,37
45		13,38 ± 0,05			31,10 ± 0,13	29,21 ± 0,40
50		11,22 ± 0,05			30,54 ± 0,14	27,50 ± 0,45
55		09,98 ± 0,06			29,93 ± 0,16	25,95 ± 0,52
60					29,26 ± 0,18	

Annexe B2 (Extrait depuis NF EN ISO 12571)

Température °C	Humidité relative %					
	Carbonate de potassium K ₂ CO ₃	Nitrate de magnésium Mg(NO ₃) ₂	Bromure de sodium NaBr	Chlorure de cobalt CoCl ₂	Iodure de potassium KI	Chlorure de strontium SrCl ₂
0	43,13 ± 0,66	60,35 ± 0,55	63,51 ± 0,72	64,92 ± 3,5	73,30 ± 0,34	77,13 ± 0,12
5	43,13 ± 0,50	58,86 ± 0,43	62,15 ± 0,60	63,68 ± 3,2	72,11 ± 0,31	75,66 ± 0,09
10	43,14 ± 0,39	57,36 ± 0,33	60,68 ± 0,51	61,83 ± 2,8	70,98 ± 0,28	74,13 ± 0,06
15	43,15 ± 0,33	55,87 ± 0,27	59,14 ± 0,44	58,63 ± 2,2	69,90 ± 0,26	72,52 ± 0,05
20	43,16 ± 0,33	54,38 ± 0,23	58,20 ± 0,42	55,48 ± 1,8	69,28 ± 0,25	71,52 ± 0,05
23	43,16 ± 0,36	53,49 ± 0,22	57,57 ± 0,40	52,56 ± 1,5	68,86 ± 0,24	70,85 ± 0,04
25	43,16 ± 0,39	52,89 ± 0,22	56,95 ± 0,39	50,01 ± 1,4	68,47 ± 0,24	70,16 ± 0,04
27	43,16 ± 0,43	52,29 ± 0,23	56,03 ± 0,38	48,02 ± 1,4	67,89 ± 0,23	69,12 ± 0,03
30	43,17 ± 0,50	51,40 ± 0,24	54,55 ± 0,38	46,74 ± 1,5	66,96 ± 0,23	
35		49,91 ± 0,29	53,17 ± 0,41		66,09 ± 0,23	
40		48,42 ± 0,37	51,95 ± 0,47		65,26 ± 0,24	
45		46,93 ± 0,47	50,93 ± 0,55		64,49 ± 0,26	
50		45,44 ± 0,60	50,15 ± 0,65		63,78 ± 0,28	
55			49,66 ± 0,78		63,11 ± 0,31	
60						
Température °C	Humidité relative %					
	Nitrate de sodium NaNO ₃	Chlorure de sodium NaCl	Chlorure d'ammonium NH ₄ Cl	Bromure de potassium KBr	Sulfate d'ammonium (NH ₄) ₂ SO ₄	Chlorure de potassium KCl
0	78,57 ± 0,52	75,51 ± 0,34	80,55 ± 0,96	85,09 ± 0,26	82,77 ± 0,90	88,61 ± 0,53
5	77,53 ± 0,45	75,65 ± 0,27	79,89 ± 0,59	83,75 ± 0,24	82,42 ± 0,68	87,67 ± 0,45
10	76,46 ± 0,39	75,67 ± 0,22	79,23 ± 0,44	82,62 ± 0,22	82,06 ± 0,51	86,77 ± 0,39
15	75,36 ± 0,35	75,61 ± 0,18	78,83 ± 0,42	81,67 ± 0,21	81,70 ± 0,38	85,92 ± 0,33
20	74,69 ± 0,33	75,47 ± 0,14	78,57 ± 0,40	81,20 ± 0,21	81,34 ± 0,31	85,11 ± 0,29
23	74,25 ± 0,32	75,36 ± 0,13	78,30 ± 0,47	80,89 ± 0,21	81,13 ± 0,29	84,65 ± 0,27
25	73,81 ± 0,32	75,29 ± 0,12	77,90 ± 0,57	80,64 ± 0,21	80,99 ± 0,28	84,34 ± 0,26
27	73,14 ± 0,31	75,21 ± 0,12		80,27 ± 0,21	80,85 ± 0,29	84,05 ± 0,26
30	72,06 ± 0,32	75,09 ± 0,11		79,78 ± 0,22	80,63 ± 0,30	83,62 ± 0,25
35	71,00 ± 0,34	74,87 ± 0,12		79,43 ± 0,24	80,27 ± 0,37	82,95 ± 0,25
40	69,99 ± 0,37	74,68 ± 0,13		79,18 ± 0,26	79,91 ± 0,49	82,32 ± 0,25
45	69,04 ± 0,42	74,52 ± 0,16		79,02 ± 0,28	79,56 ± 0,65	81,74 ± 0,28
50	68,15 ± 0,49	74,43 ± 0,19		78,95 ± 0,32	79,20 ± 0,87	81,20 ± 0,31
55	67,35 ± 0,57	74,41 ± 0,24		78,94 ± 0,35		80,70 ± 0,35
60		74,50 ± 0,30				80,25 ± 0,41

Annexe B3 (Extrait depuis NF EN ISO 12571)

Température °C	Humidité relative %					
	Nitrate de strontium	Nitrate de potassium KN03	Sulfate de potassium K2S04	Chromate de potassium K2Cr04	—	—
0	92,38 ± 0,56	96,33 ± 2,9	98,77 ± 1,10	97,88 ± 0,49	—	—
5	90,55 ± 0,38	96,27 ± 2,1	98,48 ± 0,91	97,56 ± 0,46		
10	88,72 ± 0,28	95,96 ± 1,4	98,18 ± 0,76	97,08 ± 0,41		
15	86,89 ± 0,29	95,41 ± 0,96	97,89 ± 0,63	96,42 ± 0,37		
20	85,79 ± 0,35	94,62 ± 0,66	97,59 ± 0,53	95,89 ± 0,37		
23	85,06 ± 0,38	94,00 ± 0,60	97,42 ± 0,47	95,50 ± 0,40		
25		93,58 ± 0,55	97,30 ± 0,45	95,25 ± 0,48		
27		93,07 ± 0,57	97,18 ± 0,43			
30		92,31 ± 0,60	97,00 ± 0,40			
35		90,79 ± 0,83	96,71 ± 0,38			
40		89,03 ± 1,2	96,41 ± 0,38			
45		87,03 ± 1,8	96,12 ± 0,40			
50		84,78 ± 2,5	95,82 ± 0,45			

Annexe C1 (Sahdev, 2014)

S. no.	Crop	Initial moisture content (% w.b.)	Final Moisture content (% w.b.)	Maximum allowable temperature (°C)
1	Paddy, raw	22-24	11	50
2	Paddy, parboiled	30-35	13	50
3	Maize	35	15	60
4	Wheat	20	16	45
5	Corn	24	14	50
6	Rice	24	11	30
7	Pulses	20-22	9-10	40-60
8	Oil seed	20-25	7-9	40-60
9	Green peas	80	5	65
10	Cauliflower	80	6	65
11	Carrots	70	5	75
12	Green beans	70	5	75
13	Onions	80	4	55
14	Garlic	80	4	55
15	Cabbage	80	4	55
16	Sweet potatoes	75	7	75
17	Potatoes	75	13	75
18	Chillies	80	5	65
19	Apples	80	24	70
20	Apricot	85	18	65
21	Grapes	80	15-20	70
22	Bananas	80	15	70
23	Guavas	80	7	65
24	Okra	80	20	65
25	Pineapple	80	10	65
26	Tomatoes	96	10	60
27	Brinjal	95	6	60
28	Peanuts	40-55%	8-10%	
29	Tomatoes	95	7	60
30	Fig	70	20	70
31	Coffee	65	11	
32	Spinach	80	10	
33	ginger	80	10	
34	Turmeric	80	10	
35	Prunes	85	15	55
36	Peaches	85	18	65
37	Guavas	80	7	65
38	Mulberries	80	10	65
39	Yam	80	10	65
40	Nutmeg	80	20	65
41	Sorrel	80	20	65
42	Groundnuts	40	9	

REFERENCES

- Akpınar, E. K. (2006). Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. *Journal of Food Engineering*, 73(1), 75–84. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.01.007>
- Altobelli, F., Condorí, M., Duran, G., & Martinez, C. (2014). Solar dryer efficiency considering the total drying potential. Application of this potential as a resource indicator in north-western Argentina. *Solar Energy*, 105, 742–759. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.04.029>
- Arsdel, V. (1983). *DEHYDRATION*.
- Ashrabi, A., Hasan, M., Dabnichki, P., & Ahmed, A. (2020). Design and numerical analysis of a hybrid geothermal PCM fl at plate solar collector dryer for developing countries. *Solar Energy*, 196(September 2019), 270–286. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.069>
- Bahammou, Y., Tagnamas, Z., Lamharrar, A., & Idlimam, A. (2019). Thin-layer solar drying characteristics of Moroccan horehound leaves (*Marrubium vulgare* L.) under natural and forced convection solar drying. *Solar Energy*, 188(May 2018), 958–969. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.07.003>
- Banout, J. (2017). Solar drying systems. *Green Energy and Technology*, 0(9789811038327), 39–67. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3833-4_2
- Barbosa-Cánovas, G. V, Fontana Jr, A. J., Schmidt, S. J., & Labuza, T. P. (2020). *Water activity in foods: fundamentals and applications*. John Wiley & Sons.
- Barbosa-Cánovas, G. V, & Vega-Mercado, H. (1996). *Dehydration of foods*. Springer Science & Business Media.
- Basu, S., Shivhare, U. S., & Mujumdar, A. S. (2006). Models for sorption isotherms for foods: A review. *Drying Technology*, 24(8), 917–930.
- Bechoff, A., Dufour, D., Dhuique-Mayer, C., Marouze, C., Reynes, M., & Westby, A. (2009). Effect of hot air, solar and sun drying treatments on provitamin A retention in orange-fleshed sweetpotato. *Journal of Food Engineering*, 92(2), 164–171. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.10.034>
-

-
- Belessiotis, V., & Delyannis, E. (2011). Solar drying. *Solar Energy*, 85(8), 1665–1691. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.10.001>
- Belghit, A., Kouhila, M., & Boutaleb, B. C. (2000). Experimental study of drying kinetics by forced convection of aromatic plants. *Energy Conversion and Management*, 41(12), 1303–1321. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(99\)00162-4](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(99)00162-4)
- Beloued, A. (2005). *Plantes médicinales d'Algérie*. Offices des publications universitaires.
- Benhamou, A., Idlimam, A., Kouhila, M., & Benyoucef, B. (2010). A new mathematical model for the description of the experimental data of sorption and the comparison with other models. *International Review of Physics*, 4(4), 201–205.
- Benhamza, A., Boubekri, A., Atia, A., Hadibi, T., & Arıcı, M. (2021). Drying uniformity analysis of an indirect solar dryer based on computational fluid dynamics and image processing. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47(March), 101466. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101466>
- Bennaceur, S., Draoui, B., Touati, B., Benseddik, A., Saad, A., & Bennamoun, L. (2015). Determination of the moisture-sorption isotherms and isosteric heat of henna leaves. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 88(1), 52–62. <https://doi.org/10.1007/s10891-015-1167-9>
- Bennaceur, Said, Draoui, B., Bennamoun, L., Touati, B., Saad, A., & Bourmita, Y. (2012). Experimental study and modeling of sorption isotherms of Kabar Sid EL Cheikh Capparis spinosa L. From Bechar (south west Algeria). *Energy Procedia*, 18, 359–367. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.05.047>
- Bennamoun, L., & Belhamri, A. (2003). Design and simulation of a solar dryer for agriculture products. *Journal of Food Engineering*, 59(2–3), 259–266. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(02\)00466-1](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00466-1)
- BOQUET, R., CHIRIFE, J., & IGLESIAS, H. A. (1978). Equations for fitting water sorption isotherms of foods: II. Evaluation of various two-parameter models. *International Journal of Food Science & Technology*, 13(4), 319–327. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1978.tb00809.x>
-

-
- Boulemtafes-Boukadoum, A., & Benzaoui, A. (2011). Energy and exergy analysis of solar drying process of mint. *Energy Procedia*, 6, 583–591.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.05.067>
- Bouzabata, A. (2015). *CONTRIBUTION A L'ÉTUDE D'UNE PLANTE MÉDICINALE ET AROMATIQUE MYRTUS COMMUNIS L.* Faculté de Médecine, Université Badji-Mokhtar, Annaba, Algérie.
- Burgerscentrum, J. M. (2015). *Finite element methods for the incompressible Navier-Stokes equations.*
- Campbell-platt, G. (2010). *Edited by.*
- Caurie, M. (1970). A new model equation for predicting safe storage moisture levels for optimum stability of dehydrated foods. *International Journal of Food Science & Technology*, 5(3), 301–307.
- Chen, C. Q., Diao, Y. H., Zhao, Y. H., Wang, Z. Y., Zhu, T. T., Wang, T. Y., & Liang, L. (2021). Numerical evaluation of the thermal performance of different types of double glazing flat-plate solar air collectors. *Energy*, 233, 121087.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121087>
- CHERAITIA, R., & DJEBLI, Z. (2020). *Étude comparative de la composition chimique de l'huile essentielle de Myrte (Myrtus communis L.) de différentes régions d'Algérie.* University of Jijel.
- CHIRIFE, J., & IGLESIAS, H. A. (1978). Equations for fitting water sorption isotherms of foods: Part 1 — a review. *International Journal of Food Science & Technology*, 13(3), 159–174. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1978.tb00792.x>
- Crank, J. (1979). *The mathematics of diffusion.* Oxford university press.
- Daguenet, M. (1985). *Les séchoirs solaires.*
- Datta, A., & Rakesh, V. (2010). *An introduction to modeling of transport processes: applications to biomedical systems.* Cambridge University Press.
- Defraeye, T. (2014). Advanced computational modelling for drying processes - A review. *Applied Energy*, 131(0), 323–344.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.027>
-

-
- Delgado, J. M.P.Q., & Barbosa de Lima, A. G. (2014). Transport phenomena and drying of solids and particulate materials. In *Advanced Structured Materials* (Vol. 48).
- Delgado, João M.P.Q., & da Silva, M. V. (2014). Food dehydration: Fundamentals, modelling and applications. In *Advanced Structured Materials* (Vol. 48).
https://doi.org/10.1007/978-3-319-04054-7_4
- Dellaoui, H., & Berroukche, A. (2019). Analysis of the Chemical Compositions of the Alcoholic Extract and the Essential Oil of the Leaves of the Plant *Myrtus communis* from Blida–Algeria. *Acta Scientific Nutritional Health*, 3(6), 150–155.
- Demissie, P., Hayelom, M., Kassaye, A., Hailesilassie, A., Gebrehiwot, M., & Vanierschot, M. (2019). Design, development and CFD modeling of indirect solar food dryer. *Energy Procedia*, 158(February), 1128–1134.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.278>
- Dinçer, İ., & Zamfirescu, C. (2016). *Drying phenomena: theory and applications*. John Wiley & Sons.
- Dissa, A. O., Bathiebo, D. J., Desmorieux, H., Coulibaly, O., & Kouliadiati, J. (2011). Experimental characterisation and modelling of thin layer direct solar drying of Amelie and Brooks mangoes. *Energy*, 36(5), 2517–2527.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.01.044>
- Ekechukwu, O. V., & Norton, B. (1999). 99/02111 Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology. *Fuel and Energy Abstracts*, 40(3), 216. [https://doi.org/10.1016/s0140-6701\(99\)97881-5](https://doi.org/10.1016/s0140-6701(99)97881-5)
- Erbay, Z., & Icier, F. (2010). A review of thin layer drying of foods: Theory, modeling, and experimental results. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 50(5), 441–464. <https://doi.org/10.1080/10408390802437063>
- Ertekin, C., & Firat, M. Z. (2017). A comprehensive review of thin-layer drying models used in agricultural products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(4), 701–717. <https://doi.org/10.1080/10408398.2014.910493>
- Fontana, A. J., & Campbell, C. S. (2004). Water activity. *Handbook of Food Analysis Second Edition: Physical Characterization and Nutrient Analysis*, 1,
-

39–54. <https://doi.org/10.1533/9781845696153.2.421>

- Fudholi, A., Bakhtyar, B., Saleh, H., Ruslan, M. H., Othman, M. Y., & Sopian, K. (2016). Drying of salted silver jewfish in a hybrid solar drying system and under open sun: Modeling and performance analyses. *International Journal of Green Energy*, 13(11), 1135–1144. <https://doi.org/10.1080/15435075.2016.1175347>
- Fukai, J., Kanou, M., Kodama, Y., & Miyatake, O. (2000). Thermal conductivity enhancement of energy storage media using carbon fibers. *Energy Conversion and Management*, 41(14), 1543–1556. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(99\)00166-1](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(99)00166-1)
- Geoffroy, S., & Prat, M. (2014). *A Review of Drying Theory and Modelling Approaches*. 145–173. https://doi.org/10.1007/978-3-319-04531-3_7
- Goupy, J. (2006). *Plans d'expériences*. Ed. Techniques Ingénieur.
- Hazn, S. (2021). Mediterraneans. *The Holy Surprise of Right Now, Davis 1982*, 154–155. <https://doi.org/10.2307/j.ctv1t4m291.83>
- Henderson, S. M., & Pabis, S. (1961). Grain drying theory, I. Temperature effect on drying constant. *J Agric Eng Res*, 6, 21–26.
- Hughes, T. J. R., & Mallet, M. (1986). A new finite element formulation for computational fluid dynamics: III. The generalized streamline operator for multidimensional advective-diffusive systems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 58(3), 305–328.
- IAZZOURANE, G. (2015). *Composition chimique et activité biologique d'extraits du myrte (Myrtus communis L.), de la carotte sauvage (Daucus carota L. subsp. carota) et de la menthe à feuilles rondes (Mentha rotundifolia L.)*.
- IGLESIAS, H. A., & CHIRIFE, J. (1976). Equilibrium moisture contents of air dried beef. Dependence on drying temperature. *International Journal of Food Science & Technology*, 11(6), 565–573. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1976.tb00759.x>
- Ignat, L., Pelletier, D., & Ilinca, F. (2000). A universal formulation of two-equation models for adaptive computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 189(4), 1119–1139. [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(99\)00370-9](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(99)00370-9)
-

-
- Jain, D. (2005). Modeling the system performance of multi-tray crop drying using an inclined multi-pass solar air heater with in-built thermal storage. *Journal of Food Engineering*, 71(1), 44–54.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.10.016>
- Jain, D., & Jain, R. K. (2004). Performance evaluation of an inclined multi-pass solar air heater with in-built thermal storage on deep-bed drying application. *Journal of Food Engineering*, 65(4), 497–509.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.02.013>
- Jain, D., & Tewari, P. (2015). Performance of indirect through pass natural convective solar crop dryer with phase change thermal energy storage. *Renewable Energy*, 80, 244–250. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.02.012>
- Jannot, Y. (2008). Isothermes de sorption : modèles et détermination. *Solutions*, 1–16.
- Jerves, A. X. (2020). An analysis of classical techniques for consistent stabilisation of the advection–diffusion–reaction equation finite element solution. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 34(5), 315–332.
<https://doi.org/10.1080/10618562.2020.1758315>
- Jha, A., & Tripathy, P. P. (2021). Recent Advancements in Design, Application, and Simulation Studies of Hybrid Solar Drying Technology. In *Food Engineering Reviews* (Vol. 13, Issue 2). Food Engineering Reviews.
<https://doi.org/10.1007/s12393-020-09223-2>
- Joardder, M. U. H., Akram, W., & Karim, A. (2021). *Heat and Mass Transfer Modelling During Drying: Empirical to Multiscale Approaches*. CRC Press.
- Kavak Akpınar, E., Bicer, Y., & Cetinkaya, F. (2006). Modelling of thin layer drying of parsley leaves in a convective dryer and under open sun. *Journal of Food Engineering*, 75(3), 308–315. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.04.018>
- Khaldi, S., Korti, A. I. N., & Abboudi, S. (2017a). Improving the airflow distribution within an indirect solar dryer by modifications based on computational fluid dynamics. *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, 25(3).
<https://doi.org/10.1142/S2010132517500225>
- Khaldi, S., Korti, A. N., & Abboudi, S. (2017b). Applying CFD for Studying the Dynamic and Thermal Behavior of Solar Chimney Drying System with
-

- Reversed Absorber. *International Journal of Food Engineering*, 13(11), 1–20.
<https://doi.org/10.1515/ijfe-2017-0081>
- Kouhila, M., Belghit, A., & Boutaleb, B. C. (2000). *Etude Expérimentale du Séchage Convectif de la SAUGE dans un Séchoir Solaire muni d'un Appoint Electrique*. 33–38.
- Kouhila, M., Kechaou, N., Otmani, M., Fliyou, M., & Lahsasni, S. (2002). Experimental study of sorption isotherms and drying kinetics of Moroccan Eucalyptus globulus. *Drying Technology*, 20(10), 2027–2039.
<https://doi.org/10.1081/DRT-120015582>
- Krokida, M., & Maroulis, Z. (2000). Quality changes during drying of food materials. *Drying Technology in Agriculture and Food Sciences*, 4(2), 61–68.
- Krüger, T. (2004). The Lattice Method Boltzmann Principles and Practice. In *Physics*.
- Kudra, T., & Mujumdar, A. S. (2009). *Advanced drying technologies*. CRC press.
- Kumar, M., Sansaniwal, S. K., & Khatak, P. (2016). Progress in solar dryers for drying various commodities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 346–360. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.158>
- Kuzmin, D., Mierka, O., & Turek, S. (2007). On the implementation of the turbulence model in incompressible flow solvers based on a finite element discretisation. *International Journal of Computing Science and Mathematics*, 1(2–4), 193–206. <https://doi.org/10.1504/ijcsm.2007.016531>
- Léonard, A. (2003). *Etude du séchage convectif de boues de station d'épuration- Suivi de la texture par microtomographie à rayons X*. Université de Liège, Liège, Belgique.
- Marinos-Kouris, D., & Maroulis, Z. (2006). Transport Properties in the Drying of Solids. In *Handbook of Industrial Drying, Third Edition* (Issue June).
<https://doi.org/10.1201/9781420017618.ch4>
- Matavel, C., Hoffmann, H., Rybak, C., Sieber, S., Müller, K., & Brüntrup, M. (2021). Discover Sustainability Passive solar dryers as sustainable alternatives for drying agricultural produce in sub - Saharan Africa : advances and challenges. *Discover Sustainability*, 4250. <https://doi.org/10.1007/s43621-021->

00049-4

- Mohajer, A., Nematollahi, O., Joybari, M. M., Hashemi, S. A., & Assari, M. R. (2013). Experimental investigation of a Hybrid Solar Drier and Water Heater System. *Energy Conversion and Management*, 76, 935–944.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.08.047>
- Mohana, Y., Mohanapriya, R., Anukiruthika, T., Yoha, K. S., Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2020). Solar dryers for food applications: Concepts, designs, and recent advances. *Solar Energy*, 208(February), 321–344.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.07.098>
- Mujumdar, A. S. (1995). *Handbook of industrial drying, revised and expanded* (Vol. 2). CRC press.
- Müller, J., & Heindl, A. (2006). Chapter 17: Drying of Medicinal Plants. *Medicinal and Aromatic Plant*, 237–252.
- Multiphysics, C. (2018). *COMSOL Multiphysics Reference Manual v. 5.4*. Stockholm.
- Murali, S., Amulya, P. R., Alfiya, P. V., Delfiya, D. S. A., & Samuel, M. P. (2020). Design and performance evaluation of solar - LPG hybrid dryer for drying of shrimps. *Renewable Energy*, 147, 2417–2428.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.002>
- Nasri, M. Y., & Belhamri, A. (2018). Effects of the climatic conditions and the shape on the drying kinetics, Application to solar drying of potato-case of Maghreb's region. *Journal of Cleaner Production*, 183, 1241–1251.
- Nguyen, D. Q. (2015). *Étude comparative expérimentale des opérations d'atomisation et d'autovaporisation : application à la gomme arabique et au soja* Duc Quang Nguyen To cite this version : HAL Id : tel-01174999.
- Norton, A. (2020). *The Life Cycle Assessment and Moisture Sorption Characteristics of Natural Fibre Thermal Insulation Materials A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy of Bangor Un. January 2008*.
- Özek, T., Demirci, B., & Baser, K. H. C. (2000). Chemical composition of turkish myrtle oil. *Journal of Essential Oil Research*, 12(5), 541–544.
-

<https://doi.org/10.1080/10412905.2000.9712154>

- Özkan, A. M. G., & Güray, Ç. G. (2009). A mediterranean: *Myrtus communis* L.(myrtle). *Plants and Culture: Seeds of the Cultural Heritage of Europe, Morel JP, Mercuri AM (Eds.). Edipuglia: Bari*, 159–168.
- Patil, R., & Gawande, R. (2016). A review on solar tunnel greenhouse drying system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 196–214.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.057>
- Peleg, M. (1993). Assessment of a semi-empirical four parameter general model for sigmoid moisture sorption isotherms 1. *Journal of Food Process Engineering*, 16(1), 21–37.
- Perré, P. (2011). A Review of modern computational and experimental tools relevant to the field of drying. *Drying Technology*, 29(13), 1529–1541.
<https://doi.org/10.1080/07373937.2011.580872>
- Prakash, O., & Kumar, A. (2014). Solar greenhouse drying: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 905–910.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.084>
- Prat, M. (2011). Pore network models of drying, contact angle, and film flows. *Chemical Engineering and Technology*, 34(7), 1029–1038.
<https://doi.org/10.1002/ceat.201100056>
- Ratti, C. (2008). *Advances in food dehydration*. CRC Press.
- Rocha, R. P., Melo, E. C., & Radünz, L. L. (2011). Influence of drying process on the quality of medicinal plants: A review. *Journal of Medicinal Plant Research*, 5(33), 7076–7084. <https://doi.org/10.5897/JMPRx11.001>
- Sahdev, R. K. (2014). Open Sun and Greenhouse Drying of Agricultural. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 3(3), 1053–1066.
- Sallam, Y. I., Aly, M. H., Nassar, A. F., & Mohamed, E. A. (2015). Solar drying of whole mint plant under natural and forced convection. *Journal of Advanced Research*, 6(2), 171–178. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2013.12.001>
- Schweigert, B. S., Bernard, S., & Hawthorn, J. (n.d.). *Food Science Science and and*
-

Technology Technology Food Water Sorption Parameters.

- Şevik, S. (2013). Design, experimental investigation and analysis of a solar drying system. *Energy Conversion and Management*, 68, 227–234.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.01.013>
- Shalaby, S. M., Bek, M. A., & El-Sebaï, A. A. (2014). Solar dryers with PCM as energy storage medium: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 110–116. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.073>
- Singh, P., Shrivastava, V., & Kumar, A. (2018). Recent developments in greenhouse solar drying: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(October 2017), 3250–3262. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.020>
- Singh, S., & Kumar, S. (2012). New approach for thermal testing of solar dryer: Development of generalized drying characteristic curve. *Solar Energy*, 86(7), 1981–1991. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.04.001>
- Smitabhindu, R., Janjai, S., & Chankong, V. (2008). Optimization of a solar-assisted drying system for drying bananas. *Renewable Energy*, 33(7), 1523–1531.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.09.021>
- Sreenarayanan, S. A. K. M. V. V. (2015). Performance improvement studies in a solar greenhouse drier using sensible heat storage materials. *Heat and Mass Transfer*. <https://doi.org/10.1007/s00231-015-1568-5>
- Sun, D. (2006). *Computational fluid dynamics (CFD) e an effective and efficient design and analysis tool for the food industry : A review*. 17, 600–620.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2006.05.004>
- Tahrour, F. (2016). *Modélisation et optimisation des échangeurs de chaleur à ailettes indépendantes*. UB1.
- Tripathy, P. P., & Kumar, S. (2009). Modeling of heat transfer and energy analysis of potato slices and cylinders during solar drying. *Applied Thermal Engineering*, 29(5–6), 884–891. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.04.018>
- Tsami, E. (1991). Net isosteric heat of sorption in dried fruits. *Journal of Food Engineering*, 14(4), 327–335. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(91\)90022-K](https://doi.org/10.1016/0260-8774(91)90022-K)
- Ullah, F., & Kang, M. (2017). Impact of air flow rate on drying of apples and
-

-
- performance assessment of parabolic trough solar collector. *Applied Thermal Engineering*, 127, 275–280.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.101>
- van Brakel, J., & Heertjes, P. M. (1978). *on the Period of Constant Drying Rate*. (pp. 70–75).
- Venturini, N. (2013). *CONTRIBUTION CHIMIQUE A LA DEFINITION DE LA QUALITE : EXEMPLES DES SPIRITUEUX DE MYRTE (MYRTUS COMMUNIS L .) ET DE CEDRAT (CITRUS MEDICA L .) DE CORSE* To cite this version : HAL Id : tel-00796388 DOCTEUR EN CHIMIE Mention : CHIMIE ORGANIQUE ET ANALYTIQU.
- Wahid, N. (2013). Perspectives de la valorisation de l’usage et de la culture du *Myrtus communis L.* au Maroc. *Phytothérapie*, 11(4), 237–243.
- Wilcox, D. C. (1993). Turbulence Modelling for CFD: Index. *Turbulence Modeling for CFD*, 263–266.
- Yassen, T. A., & Al-Kayiem, H. H. (2016). Solar-biomass hybrid dryer enhanced by the Co-Gen technique. *Drying Technology*, 34(3), 287–295.
<https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1051662>
- Zhong, Y., Li, S., Wei, X., Liu, Z., Guo, Q., Shi, J., & Liu, L. (2010). Heat transfer enhancement of paraffin wax using compressed expanded natural graphite for thermal energy storage. *Carbon*, 48(1), 300–304.
<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2009.09.033>
-

TRAVAUX SCIENTIFIQUES

Articles :

U.F.B. Sci. Bull., Series D, Vol. 84, Iss. 1, 2022

ISSN 1454-2158

CFD SIMULATION OF HEAT AND MASS TRANSFERS INSIDE AN INDIRECT SOLAR DRYER DESIGNED FOR MEDICINAL PLANTS (MINT LEAVES) DEHYDRATION

Raouf AMOÛIRI^{1*}, Azeddine BELHAMRI^{2*}

Medicinal plants drying has a vital place in pharmaceutical production processes where the qualities and the quantities of extracted active components and other goodies are usually influenced by the drying phenomena. And consequently the optimization of drying procedure will prevent much losses and promote the productivity of the entire chain. In this work the mint leaves drying was simulated for an indirect solar dryer located at Constantine region in the north east of Algeria.

Drying analysis of mint leaves was done based on CFD simulation, where finite element is the used numerical method, and the mathematical assumptions of thin layer drying is employed to describe the air-product behaviors during dehydration. Experimental data will serve in linking product to the air around, this data are correlation isotherms and drying kinetics and are picked up from the literature this implemented in this work for giving a more realistic image of the transport phenomena.

The air circulation inside the unit operation was examined, and as a result the heat and mass profiles are obviously influenced by the fluid motion, the duration of drying was reported and is strongly influenced by the drying and the climatic conditions.

Keywords: Indirect Solar Dryer, Medicinal Plants, Drying, Mint Leaves, Finite Element Method, CFD, Thin layer.

1. Introduction

Drying is a key process in many industrial procedures where it has a significant contribution on final product qualities, and on its cost, this latter is highly influenced by the amount of used energy, so the assessment of the exact used energy for reaching all the qualities target will help in reducing its cost, and dipping the global warming effects of conventional energy thus promote the sustainability.

To preserve the quality and prevent it from degradation. Various materials with different chemical and physical composition are subjected to drying in order to get the longest possible shelf-life especially for food products.

¹ PhD Student, Department of HVAC Engineering (Genie Climatique), Mentouri University of Constantine 01, Constantine, 25000, Algeria e-mail: raouf.amouri@unmc.edu.dz.

² Professor, Department of HVAC Engineering (Genie Climatique), Mentouri University of Constantine 01, Constantine, 25000, Algeria e-mail: belhamri@unmc.edu.dz.

* Laboratoire du Genie Climatique Constantine-LGCC, Mentouri University of Constantine 01, Algeria.



CFD investigations on the behavior of a solar dryer used for medicinal herbs dehydration under climatic conditions of Constantine, Algeria

Raouf Amouti*, Azeddine Belhamri

Department of Fluid Engineering, Abou Bakr Belkaid University of Constantine 2, Constantine 25000, Algeria

ARTICLE INFO

ARTICLE INFO
Available online at

Keywords:
Solar drying
Medicinal plants
CFD
Climatic data
CFD analysis

ABSTRACT

Drying is an essential process which requires significant energy consumption. It is applied in the conservation or transformation of medicinal plants. These biological products are much sensitive to temperature during the dehydration and they may lose their active components during the process. However, they deserve special care. This work examines the behavior of *Myrtus Communis L.* during the drying process. The main reason *Myrtus Communis L.* has been selected is that previous drying studies have never been carried out on this type of plant. Drying curves (kinetics) and sorption isotherms for the *Myrtus Communis L.* are determined experimentally, in an adapted indirect solar dryer and in a laboratory, respectively.

Then an indirect solar dryer located in Constantine, in Algeria and adapted for *Myrtus Communis L.* is analyzed using a computational fluid dynamic. Fluid mechanics, mass and energy balance equations are implemented and solved using COMSOL software, considering climatic data for Constantine, the drying kinetics and sorption isotherms. The parametric study focused on the effects of the gap distance between the glass and the absorber, the length of the collector, in addition to the air velocity inside the dryer. Drying air inside the longer collector and at low velocities accumulates more energy, and the best gap distance is 5 cm. The computational fluid dynamics analysis of the whole drying process, combined with experimental work gives a better understanding of the air distribution inside the dryer and leads to avoid the non-uniformity and enhances the design.

Copyright © 2022 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Selection and peer-review under responsibility of the scientific committee of the First Maghrebian Conference for Renewable Energies and their applications.

1. Introduction

Drying is an important technique used to preserve quality of products from damage, deterioration and prevent the reduction in their yield [1]. Different materials are subjected to drying for preservation purposes like fruits and vegetables, fish and seafood, grain, herbal and medicinal plants, wood, etc. ... in their production process such as building materials, ceramics, polymer, pulp and paper, pharmaceutical products, textile, etc. ... [2]. Each product type is characterized by a different dehydration component, which allows it to reach its best physical, chemical and microbiological characteristics. Dehydration is a complex multidisciplinary phenomenon which is the coupling of (math, scale, and physics) in addition to (bio)chemical and biological processes [3].

* Corresponding author.
E-mail address: raouf.amouti@univ-ba2.dz (R. Amouti).

0254-7533/© 2022 Elsevier Ltd. All rights reserved.
Selection and peer-review under responsibility of the scientific committee of the First Maghrebian Conference for Renewable Energies and their applications.

Aromatic and medicinal plants are commonly used in pharmaceutical industry, where the extracted components from the essential oils are utilized in the production of drugs in the drug therapy and fragrances in addition to the food industry [4]. The extraction yield of the essential oils depends on the extraction process type and mainly on the drying temperature. Because medicinal plants are sensitive to heat [5,6], and in order to get high quality product, it is crucial to determine the adequate drying temperature and its limits, moreover, by doing so the inappropriate physical and thermal variations which may lead to damage can be avoided, as some medicinal plants which are subjected to drying can become toxic under some critical drying conditions [7].

The *Myrtus Communis L.* belongs to Myrtaceae family which is one of the most essential species [4] which can be found in the north of Algeria. This plant is frequently used in the treatment of some health problems such as diarrhea and diabetes, peptic ulcers, hemorrhoids, bleeding, headaches, vertigo, primary and skin diseases [8] and so much more.

Research on the behavior of a solar dryer used for medicinal herbs dehydration under climatic conditions of Constantine, Algeria, Materials Today: Proceedings (2022) 45, 139–144

Conférences :

THE 15th INTERNATIONAL CONFERENCE ON HEAT TRANSFER, FLUID MECHANICS AND THERMODYNAMICS (HEFAT) AND EDITORIAL BOARD OF APPLIED THERMAL ENGINEERING (ATE)

Heat and Mass Transfer Analysis in an Indirect Solar Dryer Using Thin Layer Assumption and CFD Simulation

Amouiri R.* and Belhamri A.

*Author for correspondence

Department of HVAC Engineering,
Mentouri University of Constantine 01,
Constantine, 25000,
Algeria,

E-mail: raouf.amouiri@umc.edu.dz

E-mail: belhamri@umc.edu.dz

ABSTRACT

The Dehydration is defined as complex phenomena which are coupled to generate a removal (João M.P.Q. Delgado & da Silva, 2014), which is the free water, by using a heat source. This operation requires a large quantity of energy. Solar drying is one of the most promoting techniques, which can drive the transition into a green or eco-friendly energy

To treat all the phenomena which occurs in the drying process is too difficult or almost impossible. However, there is an efficient and frequently used method which is a thin layer method, where it simplifies the phenomena and it has a good agreement with the physics reality, where it has been used in the present work. And for describing the heat and mass exchange with the drying air, a CFD analysis is proposed. Results shown temperature and humidity evaluation in the air flow direction by the time

Conclusion are drawn to figure out the best condition for solar drying process taking in account the influence of all associated parameters.

Fifth International Conference on Energy, Materials, Applied Energetics and Pollution.
ICEMAEP2019, October 22-24, 2019, Constantine, Algeria.
M.KADJA, A. MEHEL, A.ZAATRI, H.CHEMANI, S.BENISSAAD and K. TALBI (Editors).

**Contribution to the Enhancement of Drying Process
(Medicinal Plants are the study Subject)**

Amouiri Raouf¹, Belhamri Azeddine²

¹Phd Student, Département de Génie Climatique Université Mentouri Constantine 1
raoufamouiri@outlook.fr

²Professor, Département de Génie Climatique Université Mentouri Constantine 1,
belhamri@umc.edu.dz

ABSTRACT

Previous works were established in drying field, but until now there is no a specific configuration, which is useful for all drying products, the aim of this study is to give a better understanding of the phenomena which occurred inside a solar dryer, indirect type was chosen and designed for drying medicinal plants in Constantine region in Algeria. A model of simulation of a coupled heat, moisture transfers and CFD, is developed and applied in this work. The results shown that the temperature inside the drying chamber decreases with the contrast of air flow direction but at the same time the relative humidity of the air inside the chamber increases following the air velocity trajectory, benchmarking study inside the chamber need to be done in order to maximize the whole efficiency of the system.

Key Words: *Solar Drying, Heat Transfer, Moisture Transfer, Finite Elements Analysis, Medicinal Plants.*