

Faculty of Sciences and Technology
Department of Mechanical Engineering

كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم المهندسة الميكانيكية

N° d'ordre : M...../GM/2023

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Thème

Etude expérimental d'un séchoir à convection

Présenté par :

- ❖ MESSALI AMIRA
- ❖ SIFOU AMINA

Soutenu le 25 / 06 / 2023 devant le jury composé de :

Président	Pr. HOUAT SAMIR	Université de Mostaganem UMAB
Examineur	Dr. MDJAHAD BENDIDA	Université de Mostaganem UMAB
Encadreur	Pr. RETIEL NOUREDDINE	Université de Mostaganem UMAB

Année Universitaire : 2022 / 2023

REMERCIEMENT

Avant tous, nous remercions dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Ce travail a été réalisé sous la direction du Professeur Retiel Noureddine, dont nous exprimons nos sincères remerciements, pour assurer l'orientation et l'encadrement de notre mémoire

Nous remercions également le professeur Houat Samir et le Dr Mdjahad Bendida, qui nous ont soutenus dans notre projet et nous ont fait l'honneur de participer au jury.

Nous remercions tous ceux qui nous ont soutenus et aidés dans ce travail.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous les enseignants du Département de génie mécanique qui, par leurs compétences, nous ont soutenus dans la poursuite de nos études.

Enfin, nous remercions l'administration universitaire Abdel Hamid Ibn Badis, qui nous a fourni des outils de qualité facilitant notre spécialisation.



DÉDICACES

A mes chers parents :

A qui je dois ce que je suis, A ma mère

A mon père qui est mon modèle.

Que Dieu leur donne longue vie et une bonne santé.

A mes sœurs : Ferouz et Zineb

A mes frères : Yacine et Abd ELghani

A ma meilleure amie Malek Daman

À tous mes amis d'enfance et du parcours scolaire et universitaire.

A tous mes enseignants de l'école primaire jusqu'à l'université

A ceux qui ont cru en moi

Je dédie ce modeste ouvrage



AMIRA

DÉDICACES

A mes chers parents :

A qui je dois ce que je suis, A ma mère

A mon père qui est mon modèle.

Que Dieu leur donne longue vie et une bonne santé.

A ma sœur : Amira Arwa

A mes frères : Assem et Hachem et Yacine

A mon cher mari qui m'a soutenu

À tous mes amis d'enfance et du parcours scolaire et universitaire.

A tous mes enseignants de l'école primaire jusqu'à l'université

A ceux qui ont cru en moi

Je dédie ce modeste ouvrage



AMINA

ملخص

في هذه الرسالة ، كنا مهتمين بتصميم وتصنيع منضدة اختبار لتجفيف المنتجات الغذائية ، وهو مجفف حراري يستخدم لإزالة الرطوبة من المواد الصلبة. اختبرنا النموذج الأولي المصنوع من خلال إجراء دراسة تجريبية تهدف إلى فهم تشغيل المجفف الحراري ودراسة حركية التجفيف للمنتج المراد تجفيفه. لهذا الغرض أجريت تجارب لقياس المتغيرات المختلفة لدرجة الحرارة والرطوبة ودوران الهواء لتجفيف عينات الطماطم. تم الحصول على حركيات التجفيف كدالة لانخفاض الكتلة بمرور الوقت. يتم الحصول على المنتج المجفف في وقت أقصر عندما تكون درجة حرارة التجفيف أعلى مدعومة بالمنتج المراد تجفيفه. تتيح النتائج التي تم الحصول عليها تحسين عملية التجفيف واقتراح توصيات لتحسين مجفف الحمل الحراري.

الكلمات المفتاحية: مجفف الحمل الحراري ، المنتجات الغذائية ، حركيات التجفيف ، الرطوبة ، فقدان الكتلة ، عملية التجفيف.

Abstract

In this memoir, we were interested in the design and manufacture of a test bench for the drying of food products, which is a convection dryer used to remove moisture from solid materials. We tested the manufactured prototype by carrying out an experimental study aimed at understanding the operation of the thermal dryer and studying the drying kinetics of the product to be dried. For this, experiments were carried out to measure the different variables of temperature, humidity and air circulation for the drying of the tomato samples. The drying kinetics were obtained as a function of the decrease in mass over time. The dried product is obtained in a shorter time when the drying temperature is higher supported by the product to be dried. The results obtained make it possible to optimize the drying process and suggest recommendations for optimizing the convection dryer.

Keywords: convection dryer, food products, drying kinetics, humidity, mass loss, drying process

Résumé

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés à la conception et à la fabrication d'un banc d'essai pour le séchage des produits alimentaires, qui sont un séchoir à convection utilisé pour éliminer l'humidité des matériaux solides. Nous avons tester le prototype fabriqué en réalisant une étude expérimentale visant à comprendre le fonctionnement du sécheur thermique et à étudier la cinétique de séchage du produit à sécher. Pour cela, des expérimentations ont été menées pour mesurer les différentes variables de température, d'humidité et de circulation d'air pour le séchage des échantillons de tomates. La cinétique de séchage a été obtenue en fonction de la diminution de masse au cours du temps. Le produit séché est obtenu en un temps plus court à lorsque la température de séchage est plus importante supporté par le produit à sécher. Les résultats obtenus permettent d'optimiser le processus de séchage et suggèrent des recommandations pour optimiser le séchoir à convection.

Mots clés : séchoir à convection, produits alimentaire, cinétique de séchage, humidité, perte de masse, procédé de séchage.

Sommaire

Remerciements	i
Dédicace	ii
Dédicace	iii
ملخص	iv
Abstract	iv
Résumé	v
Sommaire	vi
Liste des figures	xi
Liste des tableaux	xiv
Nomenclature	xvi
Introduction générale	1
Partie 1 : Etude théorique	
Chapitre I : Généralités sur le séchage	
I.1. Historique	3
I.2. Définition du séchage	3
I.2.1. Le séchage naturel	4
I.2.2. Séchage industriel	5
I.3. But de séchage	6
I.4. Terminologie du séchage	6
I.4.1. Humidité	6
I.4. 2. Taux d'humidité	6
I.4.3. États de siccité	6
I.4.4. Taux d'humidité à l'équilibre	7
I.4.5. Isotherme d'adsorption	7
I.4.6. Corps hygroscopique	7
I.5. Description technique de sècheurs thermiques	7
I.5.1. Séchoirs continus	8
I.5.1.1. Atomisation	8
I.5.1.2. Cylindre chauffant	10

I.5.1.3 Tambour rotatif	11
I.5.1.3.1.Séchoir tambour convectif (à léchage et brassage)	12
I.5.1.3.2 Séchoir tambour conducteur	12
I.5.1.4 Sécheur tunnel	13
I.5.1.5 Sécheur silo	14
I.5.2.Séchoirs statiques	14
I.5.2.1.Lit fluidisé	15
I.5.2.2 lyophilisation	15
I.5.2.3.Etuve de séchage	16
I.5.2.4.Sécheur à palette/vis	17
I.6.Avantages de la conservation des aliments par séchage	18
I.7.Les conditions nécessaires pour obtenir la valeur nutritionnelle la plus élevée du produit séché	19
I.8.Conclusion	19

Chapitre II : Mécanismes intervenant au cours du séchage

II.1.Introduction	20
II.2. Transferts de chaleur	20
II.2.1. Séchage par convection	21
II.2.2. Séchage par conduction	22
II.2.3. Séchage par rayonnement	23
II.3. Différentes étapes du séchage d'un produit humide	24
II.3.1.Obtention des courbes de séchage et interprétation	24
II.3.2.Phase à vitesse de séchage constante	26
II.3.3. Phase à vitesse de séchage décroissante	27
II .4.Représentation des différentes étapes au moyen de diagrammes de l'air humide	27
II .4.1.Principes	27

II .4.2.Activité de l'eau dans un produit	29
II .4.3.Isothermes de sorption	30
II .5.Analyse des courbes de séchage. Modélisation	30
II .5.1.Variation du taux d'humidité réduit en fonction du temps	30
II .5.2.Courbe caractéristique de séchage	32
II.6.Conclusion	33

Partie 02 : étude pratique

Chapitre III: Conception et réalisation du séchoir

III.1. Introduction	34
III.2. La conception et le dimensionnement du séchoir	34
III.2.1. Les éléments constitutifs du séchoir	34
III.2.2.Paramètres réglables du séchoir	35
III.2.2.1.Température de l'air de séchage	35
III.2.2.2. Le débit de l'air de séchage	35
III.2.3. Paramètres mesurables du séchoir	36
III.2.3.1. L'humidité et la température de l'air de asséchant	36
III.2.3.2. Perte de masse du produit	36
III.2.3.3. Consommation énergétique au cours du séchage	36
III.3. Procédure de réalisation des éléments du séchoir	37
III.3.1. Montage du coffret	37
III.3.1.1.fabrication de l'enceinte de séchage	37
III.3.1.2. Réalisation du circuit aéraulique	39
III.3.1.3.Isolation thermique	40
III.3.2. Le ventilateur axial	41
III.3.3.La résistance chauffante	41
III.3.4.Mise en place des circuits électriques	42

III.3.5. La commande et la régulation (la boîte de commande)	42
III.3.5.1. Régulation du débit et de la température	42
III.3.6 Capteurs de température et d'humidité	43
III.3.6.1. Capteurs de température	43
III.3.6.2. Capteurs d'humidité	43
III.3.7. Le circuit de puissance	44
III.3.8. Le montage complet	45
III.4. Conclusion	45
Chapitre IV : Expérimentation et interprétations des résultats	
IV.1. Introduction	46
IV.2. Hypothèses simplificatrices	46
IV.3. Fiches produits (la tomate)	47
IV.4. Description et caractérisation du dispositif expérimental	47
IV.4.1. Le dispositif expérimental	47
IV.4.2. Première mise en route	48
IV.4.3. Procédure expérimentale	49
IV.4.4. Enregistrement des valeurs	50
IV.4.5. Arrêt de l'installation	50
IV.4.6. Exploitation des résultats	50
IV.5. Détermination de la cinétique de séchage de la tomate	51
IV.5.1 Opération de séchage	51
IV.5.2 Méthodologies d'obtention des courbes de séchage	52
IV.5.3. La détermination de la teneur en eau initiale et interprétation des mesures de la masse	52
IV.5.4. Evolution de l'humidité absolue du produit au cours du séchage	54
IV.5.5. La teneur en eau d'équilibre de la tomate	54

IV.5.6. Vitesse de séchage	55
IV.6. Interprétation des résultats	55
IV.6.1. Traitement des données expérimentales	55
IV.6.1.1. Courbe de perte de la masse	55
IV.6.1.2. Temps de séchage	56
IV.6.1.3. Influence de la température	57
IV.7. Calcul de la consommation thermique du séchoir	57
IV.7.1. Consommation thermique Q_t	57
IV.7.2 Consommation thermique massique Q_m	57
IV.7.3.Evaluation des pertes de charges du circuit aéraulique	59
IV.8. Conclusion	60
Conclusion général	61
Annexe	63
Bibliographie	

Liste des figures

Figure I.1. Séchage naturel des cultures agricoles	4
Figure I.2. Image d'un séchoir industriel	6
Figure I.3. Séchoir électrique industriel	6
Figure I.4 . Tour d'atomisation	9
Figure I.5. schéma simplifié d'un séchoir à pulvérisation	9
Figure I.6: Cylindre chauffant	10
Figure I.7. Schéma simplifié d'un cylindre chauffant	11
Figure I.8. Tambour rotatif	11
Figure I.9. sécheur à convection à tambour rotatif	12
Figure I.10. Séchoir à double tambour à pression atmosphérique	13
Figure I.11. Sécheur tunnel	13
Figure I.12. Séchoir silo	14
Figure I.13. Lit fluidisé	15
Figure I.14. lyophilisation (sécheurs à chariots	16
Figure I.15. Sécheur étuve à claie	17
Figure I.16. sécheur à palettes	18
Figure II.1. Les trois modes de transfert de chaleur	20
Figure II.2. Mécanisme de la convection	22
Figure II.3. Mécanisme de conduction	22
Figure II.4. Courbe de séchage $n_s = f(t)$	25
Figure II.5. Courbe de séchage $(dn_s/dt) = g(t)$	25
Figure II.6. Courbe de séchage	25
Figure II.7. Représentation schématique d'un solide humide	25
Figure II. 8. Représentation de l'activité de l'eau	29
Figure II .9 isothermes d'adsorption et de désorption	30
Figure II .10. Variation du taux d'humidité réduit en fonction du temps t ou du nombre De Fourier Fo	31
Figure II.11. Répertoire des différentes courbes caractéristiques ($Y = g(X)$)	33

Liste des figures

Figure III.1. schéma de principe de séchoir	34
Figure III.2. Thermo-Anémomètre à hélice	36
Figure III.3. Coffret du séchoir	37
Figure III.4. Les étapes de fabrication de l'enceinte de séchage	37
Figure III.5. Illustration de tôle de coupe	38
Figure III.6. Découpe et fabrication des étages dans lesquels sont placés les matériaux à sécher	38
Figure III.7. L'enceinte de séchage finale	38
Figure III.8. Tubes en acier galvanisé de 125 mm	39
Figure III.9. Ventilateur (20 W)	39
Figure III.10. Les étapes de fabrication du diffuseur d'air	39
Figure III.11. Circuit aéraulique	40
Figure III.12. Installation de la laine de verre sur le séchoir	40
Figure III.13. Ventilateur axial fixé par boulonnage sur le séchoir	41
Figure III.14. Résistance électrique chauffante à ailette et son emplacement dans le circuit aéraulique	41
Figure III.15. Mise en place du câblage électrique	42
Figure III.16. La boite de commande	42
Figure III.17. Capteurs de température (digital panel light)	43
Figure III.18. Thermo-hygromètre digital	44
Figure III.19. Installation du circuit de puissance	44
Figure III.20. Prototype final du séchoir à convection	45
Figure IV. 1. dispositif expérimental de séchage	48
Figure IV. 2. coupage des tomates	53
Figure IV. 3. Tranches de Tomates (sur les claies du séchage) au début et à la fin de L'opération du séchage	54
Figure IV.4 . Evolution de la teneur en eau en fonction du temps	56
Figure IV.5 . Evolution des temps de séchage en fonction de la température de séchage	56

Liste des tableaux

Tableau I.1. Principaux procédés de séchage thermique rencontrés	8
Tableau I. 2. Type de produit(Atomisation)	10
Tableau I.3. Type de produit (Cylindre chauffant)	11
Tableau I.4. Type de produit (Tambour rotatif)	13
Tableau I.5. Type de produit (Sécheur tunnel)	14
Tableau I.6. Type de produit (Lit fluidisé)	15
Tableau I.7. Type de produit (lyophilisation)	16
Tableau I.8. Type de produit (étuve de séchage)	17
Tableau I.9. Type de produit (Sécheur à palette / vis)	18
Tableau II.1 . Taux d'humidité réduits et nombres de Fourier correspondants (pour une sphère)	32
Tableau IV.1. Paramètres de séchage	47
Tableau IV.2. déroulement de l'Expérience n°1 effectuée sur le séchoir quand T=40C	51
Tableau IV.3. déroulement de l'Expérience n°2effectuée sur le séchoir quand T=50C	52
Tableau IV.4. déroulement de l'Expérience n°3 effectuée sur le séchoir quand T=60C°	52
Tableau IV.5. Consommation thermique quand T=40C°	58
Tableau IV.6. Consommation thermique quand T=50C°	58
Tableau IV.7. Consommation thermique quand T=60C°	58
Tableau IV.8. Expérience n°1 effectuée sur le séchoir quand T=40C°	63
Tableau IV.9. Expérience n°2effectuée sur le séchoir quand T=50C°	64
Tableau IV.10. Expérience n°3 effectuée sur le séchoir quand T=60C°	65
Tableau IV.11. Teneur en eau en fonction de temps dans les trois températures	66

Liste des tableaux

Tableau IV.12. Constantes thermodynamiques de la vapeur d'eau saturante de degré en degré (pour calculs psychrométriques)	69
Tableau IV.13. les mesures de enthalpie et l'humidité absolue quant $T=40^{\circ}\text{c}$	71
Tableau IV.14. Les mesures de enthalpie et l'humidité absolue quant $T=50^{\circ}\text{c}$	72
Tableau IV.15. Les mesures de enthalpie et l'humidité absolue quant $T=60^{\circ}\text{c}$	73

Nomenclature

Symbole Désignation Unités

a :	Diffusivité thermique	m^2/s
a_w :	activité de l'eau dans le produit	
A_1 :	surface du corps recevant le rayonnement	m^2
A_2 :	surface de l'émetteur d'infrarouge	m^2
A :	surface d'échange	m^2
C_{pa} et C_{pe} :	les capacités thermiques massiques de l'air et de l'eau	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
C :	constante ajustée expérimentalement	
C_{pa} :	Chaleur massique de l'air sec	$J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ K^{-1}$
C_{pv} :	Chaleur massique de la vapeur d'eau	$J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ K^{-1}$
D_{eff} :	diffusivité effective de l'humidité dans la matière	$m^2 \cdot s^{-1}$
D :	diamètre de la canalisation	m
d_p :	diamètre des particules	m
$H_1 ; H_2 ; H_3$:	Les enthalpies	Kj/kg
f	Facteur de perte de charge répartie	
K_G :	coefficient global de transfert de matière	s / m
L	longueur du conduit	m
L_0 :	Chaleur latente de vaporisation de l'eau à 0°C	$kj \cdot kg^{-1}$
M :	masse du produit à sécher	kg
M_s :	masse de matière sèche	kg
$M_{i,f}$:	masse initiale ou finale des tomates après séchage	Kg
\dot{m}_{as} :	le débit massique du ventilateur	Kg/s
M_e :	La puissance élaboratrices	Kg/s
m_{ah} :	Le débit	Kg/s
m_h, m_1 :	Masse humide de produit	kg

Nomenclature

$m_f, m_s :$	Masse sèche de produit	kg
$p_s :$	pression de vapeur d'eau	pa
$P_w :$	pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air,	Pa
$\Delta p :$	Perte de pression	pas
$P_{ele} :$	Puissance de ventilateur	W
$p_t :$	pression atmosphérique	Pa
$Q :$	quantité de chaleur transférée par unité de temps	W
$Q_t :$	Consommation thermique	kw
$Q_m :$	Consommation thermique massique	Kj/kg
$Q :$	le débit de l'air	m ³ /s
$S :$	la surface	m ²
$T_{sec} :$	température d'air sec	k°
$T_{chaud} :$	température de séchage	k°
$T_{sortie} :$	température d'air humide	k°
$T_a - T_s :$	écart entre la température du gaz de séchage (air) et la température superficielle du produit à sécher,	K
$T_1 :$	température de la source émettrice	K
$T_2 :$	température du produit	K
$t :$	temps de séchage	s
$X :$	teneur en eau à un instant t (produits)	Kg _e /Kg _{ms}
$x_1, x_2 :$	Humidité absolue	Kg _e /Kg _{ms}

Nomenclature

$V :$	Vitesse de fluide	m/s
$\tau :$	Le rendement de ventilateur.	%
$\alpha :$	coefficient d'échange par convection	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$\lambda :$	conductivité thermique de l'air	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\rho :$	Masse volumique du fluide	Kg/m^3
$\Sigma K :$	Les coefficients de singularité	
$\delta t :$	Pas de Temps	s
$\phi :$	facteur complexe	
$\varepsilon_1 :$	émissivité du produit à traiter	
$\varepsilon_2 :$	émissivité de l'émetteur	

Nombres adimensionnel

$Pr :$	nombre de Prandtl.....	$= \nu/a = \mu \cdot Cp/\lambda$
$Re :$	nombre de Reynolds.....	$= \rho \cdot v \cdot L/\mu$
$\sigma :$	constante de Stefan-Boltzmann	$\sigma = 5,673 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$

Introduction générale

Introduction générale

Le séchage est un processus essentiel dans de nombreuses industries, notamment l'agriculture, l'alimentation, la pharmacie et la Chimie. Il s'agit d'un processus de transfert de masse qui consiste à éliminer l'humidité d'un matériau. Le séchage peut être effectué de différentes manières, mais le séchage par convection est l'une des méthodes les plus courantes utilisées dans l'industrie. Le séchage par convection implique la circulation d'air chaud à travers le matériau à sécher pour éliminer l'humidité. L'objectif de notre étude est de concevoir un séchoir à convection expérimental pour caractériser le processus de séchage déterminer les paramètres optimaux pour un séchage efficace et le moins énergivore possible.

Dans cette étude expérimentale, nous avons conçu et fabriqué un séchoir à convection à air chaud utilisant de l'énergie électrique. Il est simple d'utilisation, facilement déplaçable, peu coûteux. C'est un banc d'essai réalisé pour effectuer des travaux pratiques sur le séchage des produits agricoles. Ce banc d'essai permet de faire des expériences sur différents produits tel que les fruits, légumes ou herbes aromatiques pour déterminer la cinétique de séchage de chaque produit et il permettra aux étudiants de maîtriser et comprendre la technique de séchage.

Afin de réaliser cette étude qui contribue à l'avancement des technologies de séchage, nous avons organisé le travail en deux sections (théorique et pratique) et divisé en quatre chapitres:

Le premier chapitre présente une revue générale sur le séchage thermique, dans lequel on rappelle du but du séchage, de ses formes, des types de séchoirs, et des avantages de la conservation des aliments.

Le deuxième chapitre décrit les mécanismes intervenant au cours du séchage consacré de transfert de chaleur et les différents étapes du séchage d'un produit humide et analyser des courbes caractéristiques.

Dans le troisième chapitre, intitulé « Conception et construction du séchoir », nous présentons les différentes étapes illustrant la fabrication et le montage du séchoir, fournissant des informations détaillées sur sa conception, sa construction et ses dimensions.

Le quatrième chapitre est intitulé "Expérimentation et interprétations des résultats" et se compose des éléments suivants :

- Les expériences réalisées sur le banc d'essai pour mesurer la teneur en eau initiale et déterminer la cinétique de séchage du produit.

Introduction générale

- Les tests effectués sur le séchoir pour évaluer la puissance thermique consommée pendant les différentes opérations de séchage.

Les objectifs suivants ont été poursuivis :

- Ajuster les différents paramètres du sécheur.
- Interpréter et discuter les différents résultats expérimentaux

Nous concluons cette étude en fournissant une synthèse générale de nos résultats, suivie de recommandations et de perspectives pour l'avenir.

Chapitre I:

Généralités sur le séchage

I.1. Historique

Le séchage est un processus ancien et universel qui a été utilisé pendant des milliers d'années pour conserver les aliments, les fibres et d'autres produits. Les premiers séchoirs étaient très simples et consistaient souvent en des paniers tressés ou des cordes sur lesquelles les produits étaient suspendus pour sécher à l'air libre.

Au fil des ans, de nouvelles techniques de séchage ont été développées pour répondre aux besoins croissants de l'industrie et des consommateurs. Au début du 19ème siècle, les séchoirs à tambour ont été introduits, utilisant une technique de séchage rotatif pour sécher les fibres et les grains. Les séchoirs à lit fluidisé ont été inventés dans les années 1940 pour sécher les matériaux granulaires, suivis des séchoirs à infrarouges dans les années 1950 pour sécher les revêtements et les peintures.[1]

Dans les années 1960, les séchoirs à micro-ondes ont été développés pour sécher les produits alimentaires et pharmaceutiques, tandis que les séchoirs à vide ont été utilisés pour sécher les matériaux thermosensibles. Les séchoirs à convection ont été introduits dans les années 1970 et sont devenus un outil de séchage polyvalent pour une grande variété de matériaux.

Au cours des dernières décennies, des avancées ont été réalisées dans la conception des séchoirs pour améliorer l'efficacité énergétique, la qualité du produit et la durabilité. Les technologies modernes telles que la modélisation informatique, les capteurs et les systèmes de contrôle avancés ont été intégrées aux séchoirs pour améliorer la précision et la performance.[2]

En somme, le séchage a une longue histoire d'innovation et de développement, avec de nouvelles techniques et technologies qui ont été introduites pour répondre aux besoins changeants de l'industrie et des consommateurs. Aujourd'hui, les séchoirs modernes sont des outils de séchage sophistiqués qui offrent des performances améliorées et une polyvalence pour une grande variété de matériaux et d'applications.

I.2. Définition du séchage

Le séchage est une opération unitaire qui a pour but d'éliminer par vaporisation l'eau qui imprègne un produit (liquide ou solide) afin de le transformer en produit solide sec dont l'humidité résiduelle est très faible.[3]

Le séchage est le processus d'élimination de l'humidité ou d'autres solvants d'un matériau solide ou semi-solide. Le séchage peut être réalisé de différentes manières, notamment par évaporation, par sublimation ou par lyophilisation.[4]

Le séchage est un processus important dans de nombreuses industries, notamment l'industrie alimentaire, la pharmacie, l'industrie chimique, l'industrie du papier, l'industrie textile et l'industrie des matériaux de construction. Le séchage est utilisé pour prolonger la durée de conservation des produits alimentaires, pour stabiliser les produits chimiques, pour éliminer l'humidité des matériaux de construction et pour préparer les matériaux pour la transformation ultérieure.[5]

Le séchage peut être réalisé de différentes manières, y compris par exposition à l'air chaud, par chauffage direct, par conduction, par convection, par infrarouge, par micro-ondes et par vide. Le choix de la méthode de séchage dépend du matériau à sécher, des propriétés du matériau et des exigences de qualité du produit final.[6]

En somme, le séchage est le processus d'élimination de l'humidité ou d'autres solvants d'un matériau solide ou semi-solide, réalisé de différentes manières pour répondre aux besoins spécifiques de chaque application. Il existe deux types de séchage :

I.2.1. Le séchage naturel

Le séchage naturel est l'une des plus anciennes méthodes de conservation des aliments pratiquée par l'homme. Le séchage naturel signifie le séchage au soleil lorsque l'excès d'eau est éliminé par la lumière du soleil, le processus est appelé séchage naturel. Il se fait de trois manières :

Par cultures sur pied , Par stock coupé et En grains battus[6]

Le séchage est utilisé dans les pays à températures élevées et à air sec, comme le montre la figure I.1 [4] Cependant, ce procédé présente de nombreux inconvénients: [7] [6]

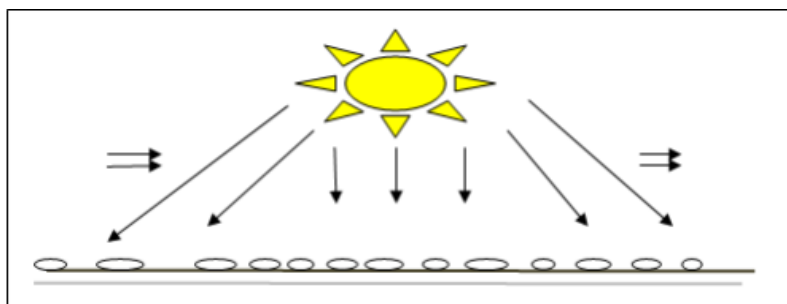


Figure I.1: Séchage naturel des cultures agricoles [7]:

- C'est une méthode non contrôlée.
- Lorsque le soleil n'est pas disponible, ce n'est pas possible.
- Cette méthode nécessite un grand nombre de main-d'œuvre non qualifiée.
- Le processus prend beaucoup de temps.
- Cette méthode nécessite une grande surface.
- Il y a possibilité de perte de récoltes par des oiseaux, des poules ou d'autres animaux.
- Normalement, le grain ne séchait pas uniformément.

I.2.2.Séchage industriel

Dans ce type de séchoir, l'air chaud est en contact avec la matière humide pour faciliter le transfert de chaleur. La récolte est placée sur un sol perforé pour laisser passer l'air chaud [9]. Ces séchoirs donnent également des produits de meilleure qualité, et sont donc la méthode la plus courante, car ils offrent une plus grande flexibilité par rapport au séchage traditionnel et aux autres séchoirs. Malgré la disponibilité de nombreux séchoirs industriels sur le marché, ils partagent tous une source de chaleur et un système de circulation d'air [10].

Les séchoirs industriels présentent plusieurs avantages par rapport aux séchoirs naturels (solaires), notamment [9]:

- Les conditions d'hygiène et sanitaires sont disponibles.
- Il prend moins de temps que le séchage naturel au soleil.
- La nourriture séchée obtenue est de meilleure qualité que la nourriture séchée naturellement.
- Préserver le produit des facteurs de contamination.
- Bon contrôle du processus de séchage.
- La possibilité de poursuivre le processus de séchage la nuit, ainsi que les jours qui connaissent des fluctuations météorologiques.



Figure I.2:Image d'un séchoir industriel [8]



Figure I.3:Séchoir électrique industriel [7]

I.3. But de séchage

Le but de séchage est de retirer l'eau ou l'humidité d'un matériau pour le rendre plus stable, plus léger, plus facile à manipuler ou à stocker [15]

I.4. Terminologie du séchage

I.4.1. Humidité

Ce terme désigne le liquide contenu dans le corps solide, liquide ou pâteux, et devant être éliminé au cours du séchage. [12]

I.4.2. Taux d'humidité

C'est la masse de liquide contenue par unité de masse de matière à sécher. Bien qu'il soit fait très souvent référence à la matière humide, il est préférable d'exprimer le taux d'humidité par rapport à la matière anhydre. [12]

I.4.3. États de siccité

Un corps anhydre est un corps dont le taux d'humidité est nul. Un corps sec ou séché correspond plus généralement au produit tel qu'il est obtenu à la sortie du sécheur. Dans ce dernier cas, le taux d'humidité n'est pas forcément nul. [12]

I.4.4. Taux d'humidité à l'équilibre

Un corps humide, placé dans une enceinte de volume important où l'humidité relative et la température sont constantes, voit son taux d'humidité se stabiliser à une valeur dite d'équilibre qui dépend de la nature de l'humidité et de celle du produit qui en est imprégné, mais aussi de la pression partielle et de la température. [12]

I.4.5. Isotherme d'adsorption

C'est la courbe représentant la variation du taux d'humidité à l'équilibre en fonction de l'humidité relative égale au rapport entre la pression partielle du solvant et sa pression de vapeur saturante à la température considérée. Les courbes obtenues en réhydratant le produit sont en général différentes de celles obtenues en le dés- hydratant. Il se produit un phénomène d'hystérésis. En matière de séchage ne sont à considérer que les isothermes obtenues en plaçant le produit dans des atmosphères dont l'humidité relative est de plus en plus faible. [12]

I.4.6. Corps hygroscopique

Un produit est dit hygroscopique lorsque la pression de vapeur de l'humidité qu'il contient est inférieure à celle de cette humidité considérée pure et à la même température que celle du produit. Cet abaissement de pression est dû au fait que l'humidité est soit adsorbée à la surface du solide, soit en solution dans celui-ci. [12]

I.5. Description technique de sècheurs thermiques

La grande variété de produits à sécher, avec leurs formes et états initiaux différents, a conduit à la mise en place d'un grand nombre de procédés industriels utilisant divers dispositifs et types d'énergie. Cette complexité rend la simplification de ce sujet difficile à réaliser.

Les fiches techniques présentées ci-après exposent, pour une gamme étendue de technologies de séchoir, outre la description du procédé et de ses caractéristiques, les différents systèmes ou dispositifs permettant d'atteindre une plus grande efficacité énergétique dans leur utilisation, ainsi que les modes de transfert de chaleur courants ou en développement amenant des gains en énergie conséquents.

Il existe différentes façons de catégoriser les types de séchoirs industriels, et dans cette présentation, nous avons choisi de les diviser en deux grandes catégories : les séchoirs statiques ou à feu discontinus, et les séchoirs à feu continu.[13]

Technique	Produit liquide	Produit pâteux	Produit pulvérulent et granulaire	Produit fibreux	Produit plan	Produit en bande	Produit en forme et en morceaux
Atomisation							
Sécheur tunnel							
Etuve de séchage							
Tambour rotatif							
Sécheur flash							
Lit fluidisé							
Sécheur à bandes							
Sécheur silo							
Cylindre chauffant							
Sécheur à palette/vis							
Lyophilisation							

Tableau I.1: Principaux procédés de séchage thermique rencontrés [13]

I.5.1.Séchoirs continus

Un séchoir continu est un équipement industriel qui permet de sécher en continu des produits en les faisant passer à travers un flux d'air chaud. Les produits sont alimentés à une extrémité du séchoir et en ressortent séchés à l'autre extrémité.

I.5.1.1. Atomisation

L'atomisation est le processus de transformation d'un liquide en fines gouttelettes ou particules solides à travers une force mécanique ou une source d'énergie. [13]

Le processus de séchage

Le liquide à sécher est pulvérisé dans la chambre du séchoir à l'aide d'une buse de pulvérisation, qui vaporise le liquide en fines gouttelettes. L'air chaud est ensuite soufflé dans la chambre du séchoir, où il entre en contact avec les gouttelettes de liquide, provoquant l'évaporation rapide de l'eau.

Le matériau à sécher est alors collecté dans un collecteur de particules, où les particules sèches sont séparées de l'air et récupérées pour être utilisées ou vendues.

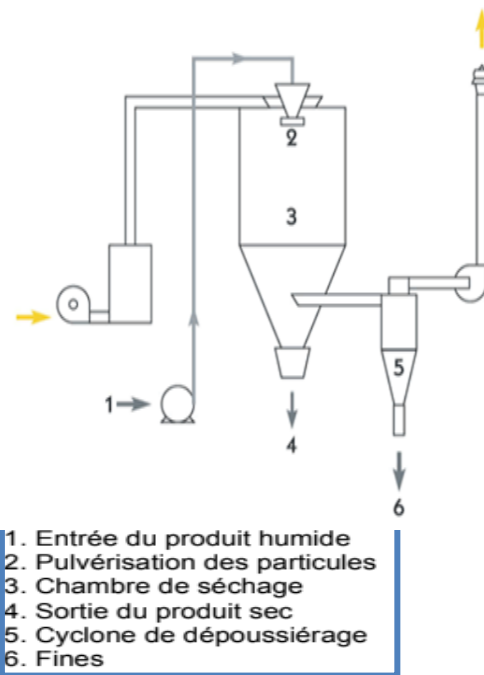


Figure I.4: Tour d'atomisation [13]

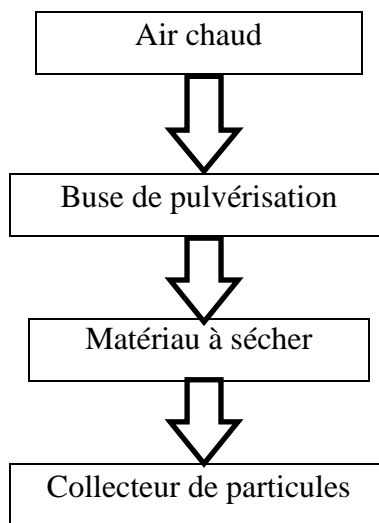


Figure I.5: Schéma simplifié d'un séchoir à pulvérisation

Etat initial	Produit liquide (doit être pompable)
Etat final	Produit pulvérulent (poudres de qualité uniforme)

Tableau I.2: Type de produit(Atomisation)

I.5.1.2.Cylindre chauffant

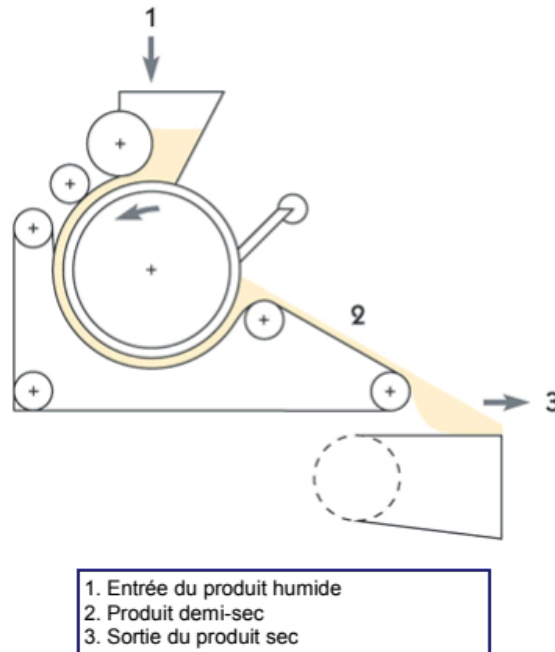


Figure I.6: Cylindre chauffant [13]

Un cylindre chauffant est un équipement industriel utilisé pour chauffer des matériaux en les faisant passer à travers un cylindre chauffé. Ce type d'équipement est couramment utilisé dans les procédés de séchage et de cuisson industriels.

Le processus de séchage

Le cylindre chauffant permet de transmettre la chaleur par conduction à la couche de produit humide en contact avec sa face externe.

Le schéma d'alimentation dépend des caractéristiques du produit à sécher, telles que la texture, la concentration, la viscosité, le caractère mouillant et la sensibilité à la température.

Différents modes d'alimentation sont utilisés selon le type de produit, tels que l'alimentation par trempage, pulvérisation ou rouleau encreur pour les fluides, et l'alimentation par plusieurs rouleaux encolleurs en cascade ou en parallèle pour les produits visqueux et pâteux.

Pendant le processus de séchage, le cylindre tourne horizontalement et le film de produit humide sèche en contact avec sa face externe.

Le produit sec est ensuite raclé par un couteau et acheminé vers le conditionnement

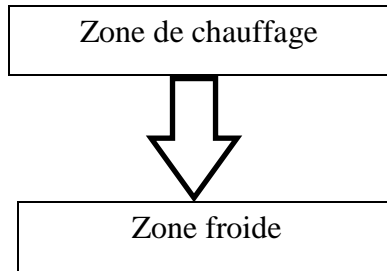


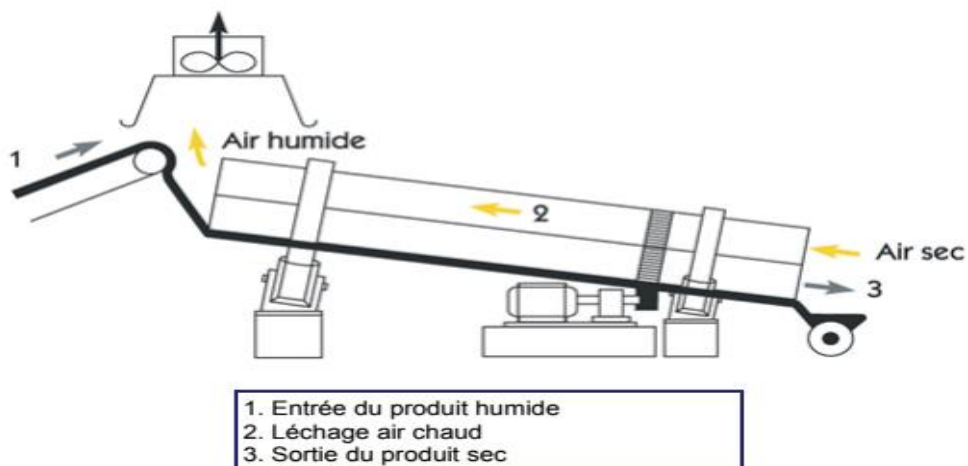
Figure I.7: Schéma simplifié d'un cylindre chauffant

Etat initial	Produit liquide, pâteux ou en bande
Etat final	Produit pulvérulent (flocons) ou en bande

Tableau I.3: Type de produit (Cylindre chauffant) [13]

I.5.1.3 Tambour rotatif

Un tambour rotatif est un équipement utilisé pour le séchage industriel des produits. Il s'agit d'un cylindre horizontal en rotation autour de son axe, dont la surface interne est chauffée pour permettre l'évaporation de l'humidité des produits qui y sont introduits.



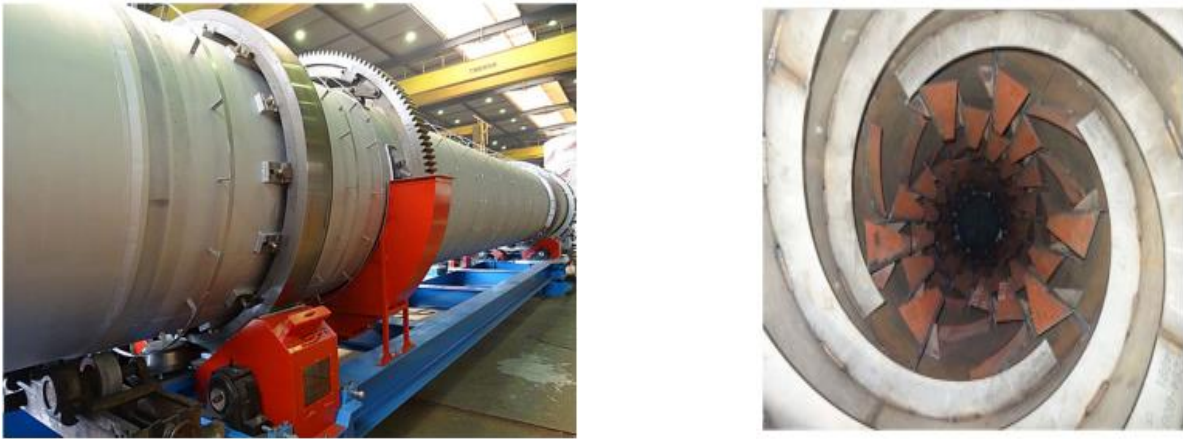


Figure I.8:Tambour rotatif [13]

Ces séchoirs sont constitués d'un tambour (cylindre), généralement de grande longueur, tournant lentement autour d'un axe légèrement incliné par rapport à l'horizontale. Le produit humide est introduit en partie supérieure par un tapis ou une vis d'Archimède. Le produit avance par gravité, les grains roulant les uns sur les autres

I.5.1.3.1.Séchoir tambour convectif (à léchage et brassage)

Dans certains cas, la paroi intérieure du cylindre est garnie d'aubes permettant de remonter le produit et de le laisser tomber en pluie au cours de la rotation. Ce système accroît considérablement la surface d'échange entre le produit et l'air et donc contribue à diminuer le temps de séchage.

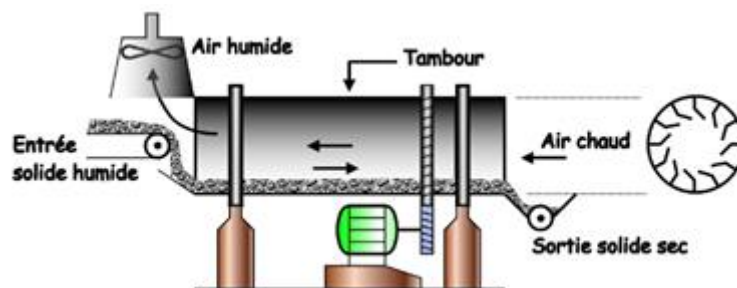


Figure I.9: séchoir à convection à tambour rotatif [16]

I.5.1.3.2 Séchoir tambour conductif

La paroi du cylindre est chauffée extérieurement par des gaz de combustion. La face interne du cylindre assure par conduction la transmission de la chaleur au produit humide. Un écoulement d'air est nécessaire pour l'extraction de la vapeur d'eau.

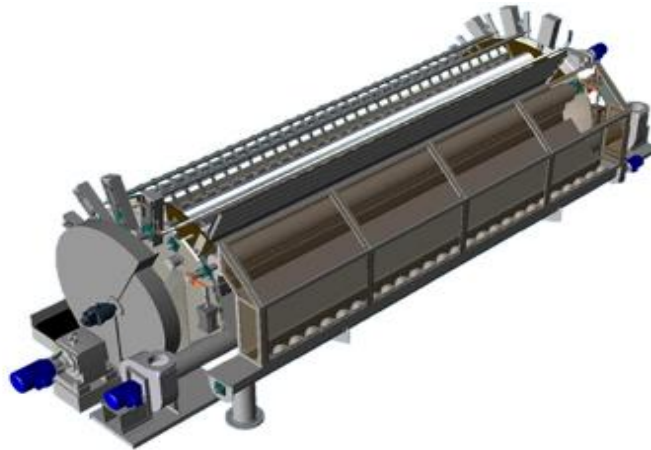


Figure I.10: Séchoir à double tambour à pression atmosphérique [17]

Produit fibreux
Produit pulvérulent, granulaire
Produit pâteux extrudable, émiettable ou granulaire

Tableau I.4: Type de produit (Tambour rotatif)

I.5.1.4 Sécheur tunnel

Un sécheur tunnel est un équipement utilisé pour éliminer l'humidité des produits en mouvement dans une enceinte fixe, en faisant circuler de l'air chaud sur le produit. Le produit est transporté longitudinalement à travers le tunnel sur un tapis et l'humidité est éliminée par évaporation grâce à l'apport de chaleur [23].

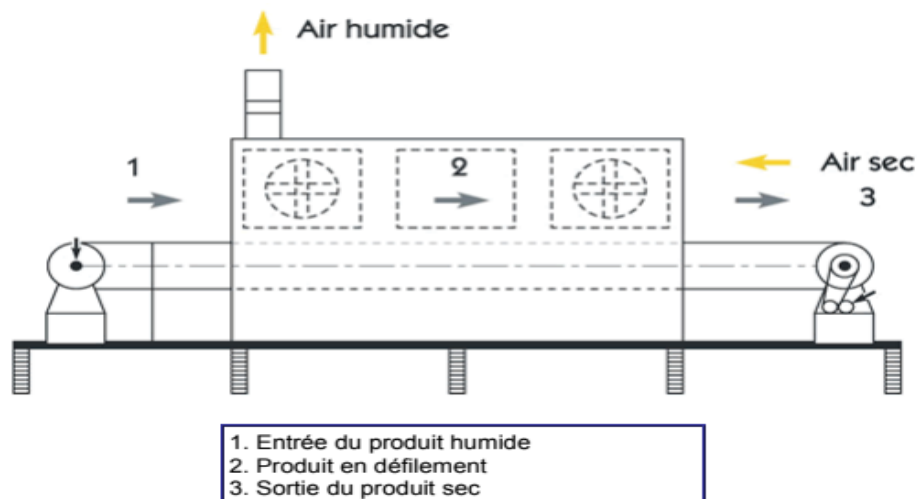


Figure I.11: Sécheur tunnel[23]

Produit pâteux
Produit pulvérulent, granulaire, fibreux
Produit plan, en forme, en morceaux

Tableau I.5 : Type de produit (Sécheur tunnel) [13]

Un sécheur tunnel est constitué d'une enceinte fixe dans laquelle le produit à traiter se déplace longitudinalement d'une extrémité à l'autre de l'enceinte.

I.5.1.5 Sécheur silo

Un sécheur silo est un type de séchoir industriel qui utilise un grand silo pour sécher les produits en vrac. Le silo est rempli avec le produit humide à sécher, qui est ensuite soumis à un flux d'air chaud qui traverse le produit et évacue l'humidité. Le séchoir silo est particulièrement adapté pour sécher des produits granulaires ou en poudre, tels que des céréales, des grains, des aliments pour animaux, etc. Le séchage peut être effectué par convection, conductivité ou radiation, selon le type de séchoir silo utilisé.

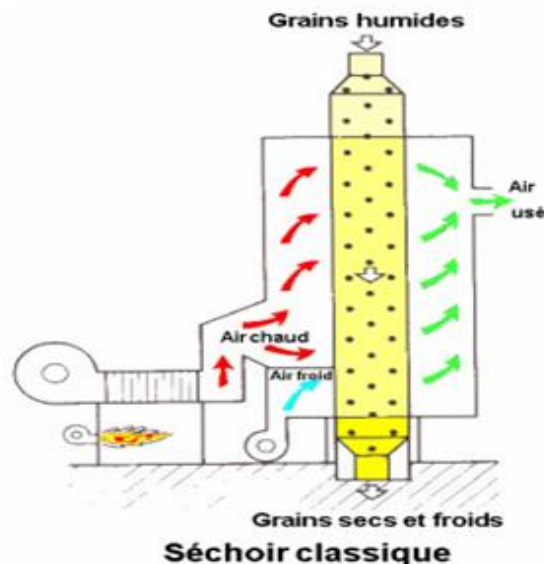


Figure I.12: Séchoir silo [18]

I.5.2. Séchoirs statiques

Un séchoir statique est un équipement de séchage qui fonctionne en exposant le produit à un courant d'air chaud stationnaire ou en le laissant simplement à l'air libre, sans mouvement mécanique. Le séchage se produit par évaporation de l'humidité à la surface du produit et sa

diffusion dans l'air ambiant. Les séchoirs statiques sont souvent utilisés pour sécher des produits fragiles qui pourraient se dégrader ou se briser s'ils étaient soumis à un traitement mécanique intense. [10]

I.5.2.1.Lit fluidisé

Les séchoirs à lit fluidisé sont des séchoirs dans lesquels l'air est soufflé à travers un lit de matériau. Ce type de séchoir est souvent utilisé pour sécher des matériaux granulaires et en poudre.

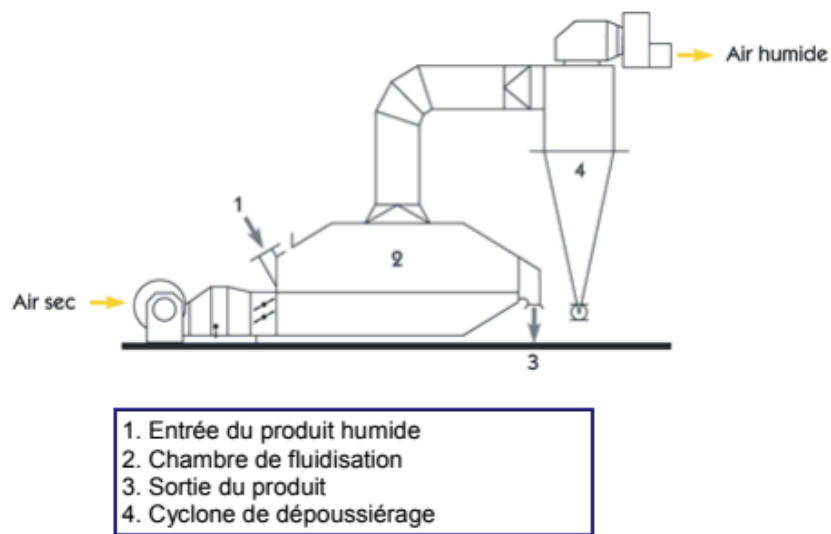


Figure I.13: Lit fluidisé[13]

Produit liquide (sur granules déjà formées)
Produit pâteux (sous réserve du type d'alimentation)
Produit pulvérulent, granulaire, fibreux

Tableau I.6: Type de produit (Lit fluidisé)

I.5.2.2 lyophilisation

C'est un procédé de conservation permettant de préserver des denrées alimentaires périssables et des substances biologiques et chimiques dites fragiles. La lyophilisation concerne un produit qui est préalablement congelé, de telle sorte que l'eau puisse passer directement de l'état solide (glace) vers la phase vapeur sans l'étape de fusion, ce changement d'état étant appelé « sublimation ». La période de sublimation est suivie d'une période de séchage par désorption d'une fraction d'eau liée, à une température de plus en plus élevée. En atmosphère de vapeur d'eau pure et sous vide, ce procédé obéit à des principes comparables à

l'ébullition, mais ce séchage peut aussi se faire en présence d'un certain taux de gaz incondensables dans l'atmosphère autour du produit, tel que la pression de vapeur dans le gaz externe soit seulement une pression partielle [19]

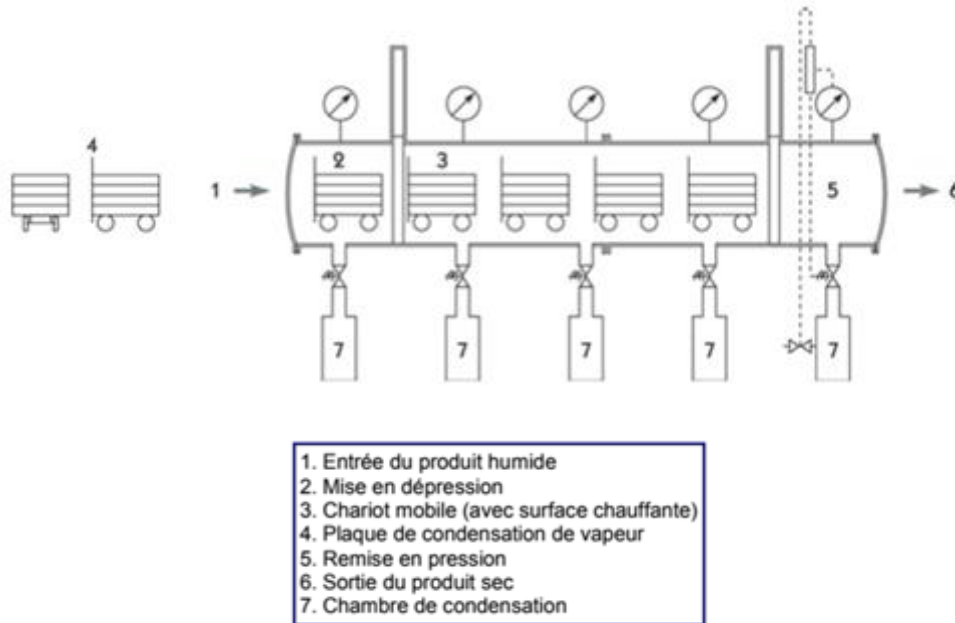


Figure I.14: Lyophilisation (sécheurs à chariots) [10]

Produit liquide (en couche de 1,5 – 3 cm)
Produit pâteux (sous réserve du type d'alimentation)
Produit pulvérulent, granulaire, fibreux
Produit plan, en forme, en morceaux , dimensions de produit généralement de 1 mm à 1 cm

Tableau I.7: Type de produit (lyophilisation)

I.5.2.3. Etuve de séchage

Une étuve de séchage est un équipement de laboratoire ou industriel utilisé pour sécher des échantillons, des matériaux ou des produits. Elle est généralement constituée d'une enceinte isolée thermiquement avec une source de chaleur contrôlée et un système de circulation d'air pour permettre un séchage rapide et uniforme. Les étuves de séchage peuvent être utilisées dans une variété d'applications telles que la recherche, la production pharmaceutique, l'analyse de l'eau, l'agriculture et l'industrie alimentaire

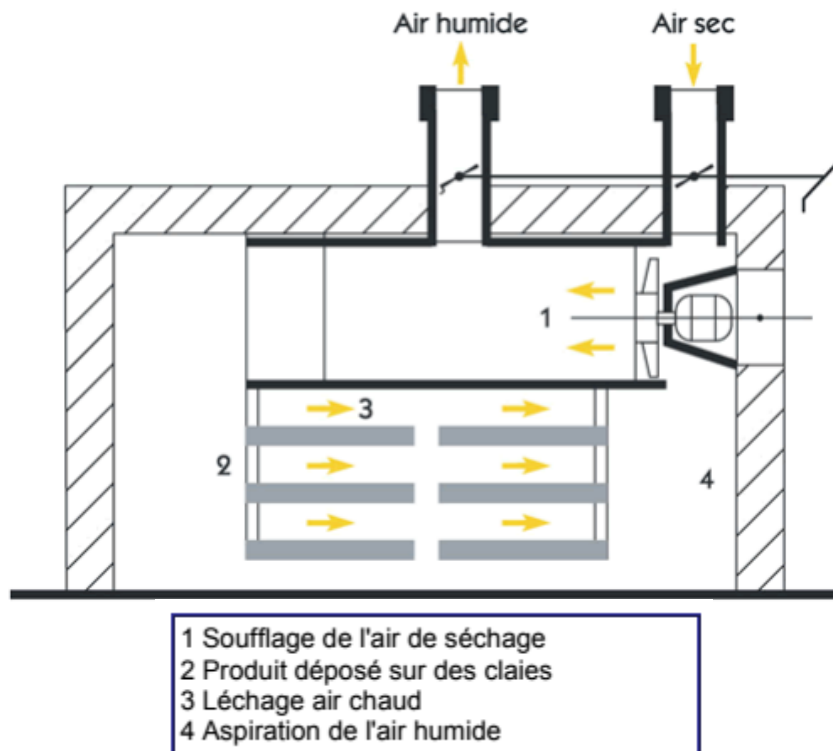


Figure I.16 : Sécheur étuve à claie[13]

Produit liquide
Produit pâteux
Produit pulvérulent, granulaire, fibreux
Produit plan, en forme, en morceaux,

Tableau I.8: Type de produit (étuve de séchage)

I.5.2.4.Sécheur à palette/vis

Un sécheur à palette/vis est un type de séchoir rotatif qui utilise des palettes ou des vis pour agiter et déplacer le produit à sécher le long d'un tambour cylindrique chauffé. Le mouvement des palettes ou des vis assure une agitation constante du produit pour une évaporation uniforme de l'humidité, tandis que le tambour rotatif permet une exposition prolongée du produit à la chaleur. Ce type de séchoir est couramment utilisé dans l'industrie alimentaire pour sécher les produits en vrac tels que les céréales, les noix et les fruits séchés.

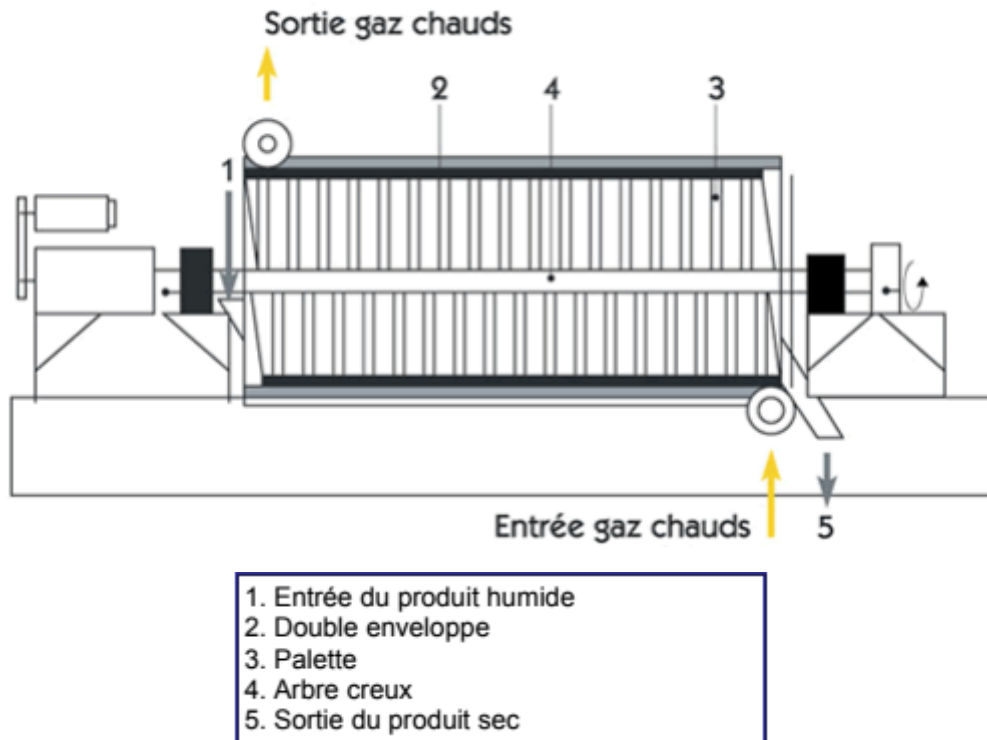


Figure I.17: sécheur à palettes[13]

	Produit pâteux
Etat initial	Produit pulvérulent, granulaire (traitement de substances hautement visqueuses, collantes et incrustantes et possibilité de sécher des produits nocifs ou inflammables).
Etat final	Produit pulvérulent, granulaire de qualité uniforme

Tableau I.9: Type de produit (Sécheur à palette / vis)

I.6. Avantages de la conservation des aliments par séchage

Le séchage des aliments est une méthode de conservation qui présente plusieurs avantages, notamment:[14]

- Durée de conservation prolongée.
- Conservation de la qualité nutritionnelle.
- Réduction de poids et d'espace de stockage.
- Préservation de la saveur.
- Pas besoin de réfrigération.
- Disponibilité toute l'année.

- Réduction du gaspillage alimentaire.
- Économie d'argent.
- Amélioration de la sécurité alimentaire.
- Réduction des besoins énergétiques.[7]

I.7. Les conditions nécessaires pour obtenir la valeur nutritionnelle la plus élevée du produit séché

Afin d'assurer la valeur nutritionnelle la plus élevée du produit séché, les éléments suivants doivent être atteints:

- Éviter le blanchiment excessif.
- Effectuer le processus de séchage dans les plus brefs délais sans augmenter la température à 65°C au début du séchage ou à 60°C pendant le reste de la période de séchage.
- Éviter de surcharger le séchoir.
- Placer les morceaux d'aliments sur des plateaux de séchage bien espacés et ne se chevauchant pas.
- Maintenir une bonne circulation d'air dans le séchoir, afin d'évacuer l'humidité des aliments pendant le processus de séchage.
- Effectuer le processus de séchage lorsque l'humidité relative de l'air est faible dans la mesure du possible.
- Vérifier les aliments pour vous assurer qu'ils sont suffisamment secs
- Conditionnement des fruits secs.
- Stocker les matériaux séchés dans des conteneurs qui ne permettent pas à l'humidité ou à l'oxygène de pénétrer.
- Conserver les aliments séchés dans un endroit frais, sombre et sec.
- Conserver les aliments séchés en quantités faciles à consommer en une seule fois [11]

I.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé le processus de séchage en définissant le séchage, les terminologies du séchage, les types de séchoirs, et le principe d'action de chacun d'entre eux. Enfin, nous avons abordé l'importance de la conservation des aliments et les conditions nécessaires pour obtenir la plus haute valeur nutritionnelle du produit séché.

Chapitre II

Mécanismes intervenant au cours du séchage

II.1.Introduction

L'une des méthodes les plus importantes pour conserver les aliments le plus longtemps possible est le processus de séchage, qui permet de réduire l'activité de l'eau et l'humidité des matériaux à sécher. C'est pourquoi ce chapitre présente comment cela se produit et les phénomènes qui caractérisent le processus de séchage dans le séchoir, tel que le transfert de chaleur entre le produit et l'air de séchage, et explique également les conditions à respecter.

II.2.Transferts de chaleur

Les transferts de chaleur sont un concept fondamental en thermodynamique qui décrit la façon dont l'énergie thermique se déplace entre les objets à des températures différentes. Les processus de transfert de chaleur comprennent la conduction, la convection et le rayonnement.

La vaporisation du solvant contenu dans un produit à sécher peut être effectuée par abaissement de la pression dans l'enceinte contenant le produit. Cependant, dans la plupart des cas, la vaporisation est effectuée en utilisant une source d'énergie extérieure au produit

Les transferts de chaleur peuvent avoir des effets importants sur l'environnement et le changement climatique. Par exemple, l'effet de serre est causé en partie par le rayonnement thermique qui est piégé dans l'atmosphère terrestre par les gaz à effet de serre tels que le dioxyde de carbone. [12]

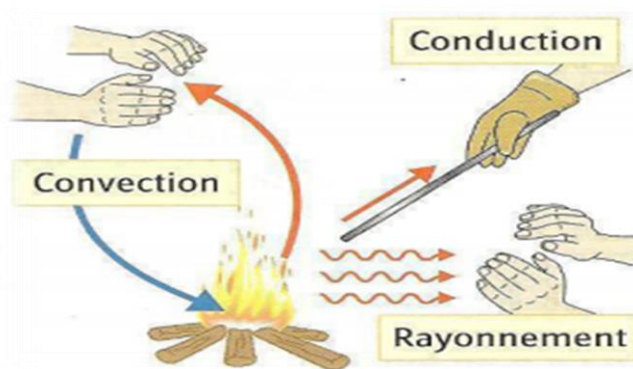


Figure II.1: Les trois modes de transfert de chaleur [26]

II.2.1. Séchage par convection

En séchage industriel, il s'agit probablement du mode de transfert d'énergie le plus courant. Il consiste à mettre en contact un gaz, le plus souvent de l'air, s'écoulant en régime généralement turbulent autour du corps à sécher qui peut se présenter sous forme de particules, de gouttelettes, de films ou de plaques. [12]

Ce type de transfert obéit à l'équation suivante :

$$Q = \alpha A(T_a - T_s) \quad (\text{II. 1})$$

Avec Q (W): quantité de chaleur transférée par unité de temps,

A (m²): surface d'échange,

T_a-T_s (K): écart entre la température du gaz de séchage (air) et la température superficielle du produit à sécher,

α (W m⁻² K⁻¹): coefficient d'échange par convection.

L'application au séchage de cette formule appelle les quelques remarques ci-après:

-La surface d'échange offerte par le produit à sécher n'est pas toujours très bien définie. Dans le cas de solides granulaires dont la granulométrie n'est pas homogène, on définit un diamètre moyen des particules.

D'après l'équation (II.1), la quantité d'énergie transférée au produit à sécher est d'autant plus importante que la surface de transfert est importante. Donc la diminution de la taille des particules constituant le produit sera un facteur d'amélioration du séchage. De plus, elle facilitera la diffusion de l'humidité vers la surface des particules.

-L'écart (T_a-T_s) n'est pas constant le long du sécheur. En effet, la température du produit augmente généralement au cours du séchage, alors que celle des gaz de séchage diminue.

D'une manière générale, le temps de séchage est réduit lorsque la différence de température entre le gaz et le produit est augmentée. Toutefois, la thermo-sensibilité du produit (caractérisée par la température maximale qu'il peut supporter) limite la valeur de l'écart, notamment en fin de séchage.

Le coefficient d'échange α peut être estimé grâce à des relations faisant intervenir des nombres adimensionnels tenant compte des propriétés du gaz de séchage ainsi que de celles

du produit à sécher. Dans le cas de particules dont le diamètre est inférieur à 10 mm, le coefficient d'échange par convection α peut être calculé à partir du nombre de Nusselt :

$$Nu = \frac{\alpha d_p}{\lambda_a} \quad (\text{II. 2})$$

Avec: λ_a conductivité thermique de l'air,

Grâce à la relation

$$Nu = C Re^m Pr^n \quad (\text{II. 3})$$

Où Re: est le nombre de Reynolds.

Pr: est le nombre de Prandtl, égal à 0,7 dans le cas de l'air.

C: est une constante ajustée expérimentalement.

m: est proche de 0,8 et n de 0,5.

Re étant proportionnel à la vitesse de l'air à travers le sécheur, l'augmentation de celle-ci a pour effet d'accroître Nu donc le coefficient α ; cette vitesse est toutefois limitée par le risque d'un entraînement exagéré du produit hors du sécheur.

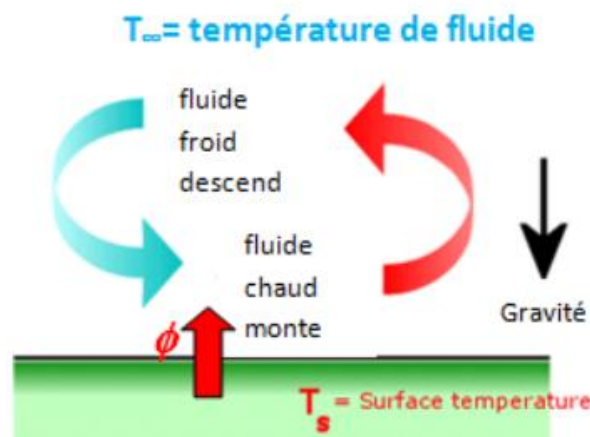


Figure II.2. Mécanisme de la convection [26]

II.2.2. Séchage par conduction

L'énergie thermique nécessaire au séchage est apportée non pas par un gaz en mouvement autour du produit à sécher, mais par contact direct entre le produit et une paroi chauffée. Les vapeurs libérées par le séchage sont soit aspirées (séchage par ébullition), soit entraînées par un gaz de balayage dont le débit est toujours faible en comparaison de celui nécessaire à un séchage convectif [12].

Plus le gradient de température entre la paroi et le produit sera faible et plus la surface d'échange devra être importante [20].

La densité du flux de chaleur (en W/m^2) est donnée par la relation :

$$\frac{Q}{A} = -\lambda \frac{dT_s}{dl} \quad (\text{II. 4})$$

Avec λ ($W.m^{-1}.K^{-1}$) conductivité thermique de la pellicule du produit ou du gaz à travers laquelle s'effectue le transfert.

$\frac{dT_s}{dl}$: Gradient de température entre la paroi chaude et le produit.

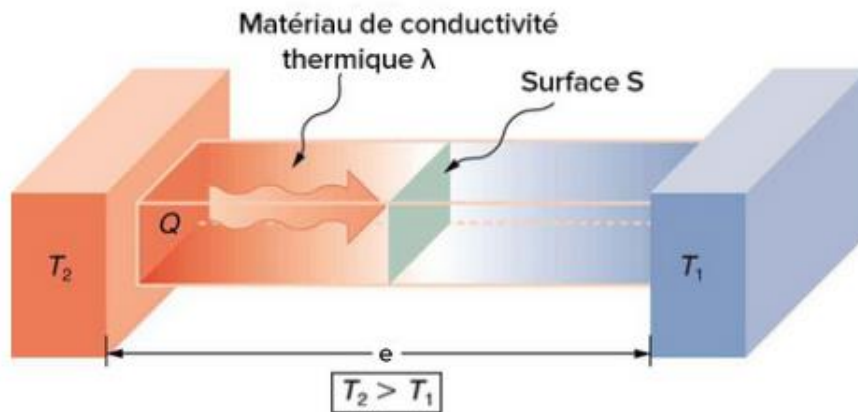


Figure II.3: Mécanisme de conduction

La conduction de la chaleur s'effectue à travers n'importe quel matériau. Cet exemple de la figure II.3 illustre le transfert thermique à travers une barre rectangulaire.

II.2.3. Séchage par rayonnement

Dans ce mode de séchage, l'énergie requise pour l'évaporation est transférée par rayonnement. Ce procédé de séchage est très efficace pour éliminer l'eau, en particulier lorsque le produit à sécher n'est pas sensible à la chaleur. Les sources chaudes émettrices peuvent être des émetteurs utilisant du gaz combustible, des émetteurs électriques ou même le soleil [12].

La quantité de chaleur Q (en watts) transmise au produit à sécher par unité de temps est définie par la loi de Stephan Boltzmann :

$$Q = A_1 C \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \varphi \quad (\text{II. 5})$$

$$C = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \delta \quad (\text{II. 6})$$

Avec T_1 (K)	température de la source émettrice.
T_2 (K)	température du produit.
A_1 (m ²)	surface du corps recevant le rayonnement.
A_2 (m ²)	surface de l'émetteur d'infrarouge.
ϵ_1	émissivité du produit à traiter.
ϵ_2	émissivité de l'émetteur.
ϕ	facteur complexe tenant compte de la position relative de l'émetteur et du produit (lorsque l'émetteur entoure le produit, on a $\phi = 1$),
σ	constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma=5,673 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$).

II.3. Différentes étapes du séchage d'un produit humide

Dans les paragraphes qui vont suivre, nous nous concentrerons uniquement sur l'eau, qui est l'un des liquides les plus couramment évaporés. Néanmoins, les mécanismes qui seront décrits s'appliquent également aux autres solvants (par exemple, le séchage des peintures).

II.3.1. Obtention des courbes de séchage et interprétation

La courbe de séchage par entraînement d'un produit granulaire peut être obtenue en disposant celui-ci en couche mince (1 à 3 cm) sur une claie perforée. On fait traverser celle-ci par un courant d'air chaud dont le taux d'humidité et la température sont contrôlés et maintenus constants. Le taux d'humidité du produit est mesuré à intervalles de temps réguliers ou éventuellement en continu. [12]

En portant le taux d'humidité du produit n_s (rapporté à la matière anhydre) en fonction du temps t , on obtient une courbe de séchage dont la forme la plus complète (c'est-à-dire lorsque toutes les phases de séchage existent) est donnée sur (la figure II.4). On constate que la courbe de séchage ainsi définie présente différentes parties qu'il est possible de mieux mettre en évidence en utilisant un autre mode de représentation. En portant les différentes valeurs de la pente de la courbe $n_s=f(t)$; donc la vitesse de séchage dn_s/dt ; en fonction du temps, on peut obtenir une nouvelle courbe dont l'allure est donnée sur (la figure II.5). [12]

Krischer a proposé un autre mode de représentation : la vitesse de séchage dn_s/dt en fonction du taux d'humidité n_s conduit à la courbe représentée sur (la figure II.6).[12]

Ces 3 types de représentation mettent en évidence l'existence de plusieurs phases pendant le déroulement du séchage. Toutes ne sont pas systématiquement observables. Dans le cas où elles sont identifiables, on distingue: [12]

- la phase transitoire de mise en température du produit à sécher (AB) ;
- la phase à vitesse de séchage constante (BC) ;
- la phase à vitesse de séchage décroissante (CD).

C est le point critique du séchage.

On peut imaginer la plupart des corps à sécher comme étant constitués par une matrice continue, éventuellement interrompue localement, dans le cas d'un solide, par des pores pouvant déboucher à la surface de celui-ci. L'humidité peut se localiser aussi bien à la surface externe du produit que dans les pores ou au sein même de la matière (figure II.8).

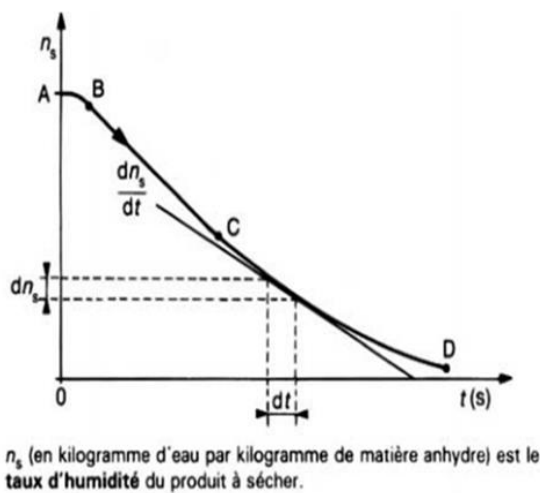


Figure II.4: Courbe de séchage $n_s=f(t)$ [12]

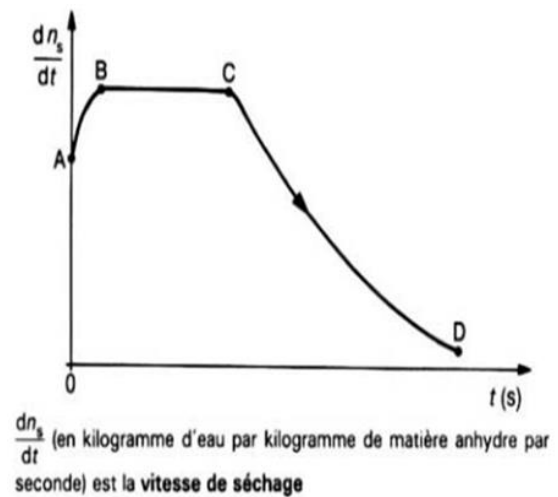


Figure II.5: Courbe de séchage $(dn_s/dt) g(t)$ [12]

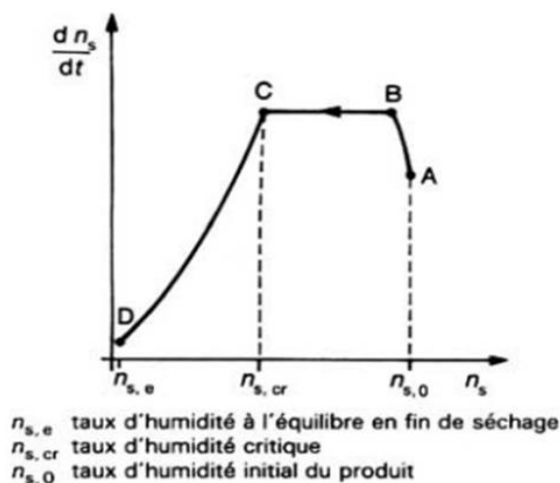


Figure II.6: Courbe de séchage.[12]

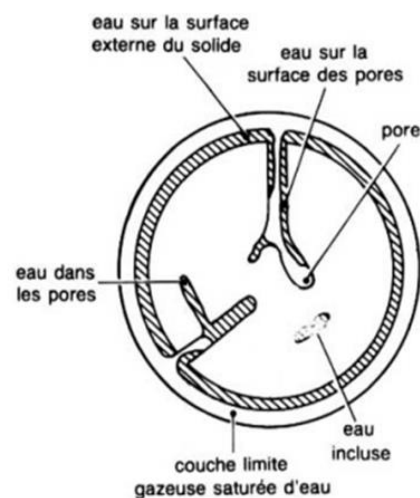


Figure II.7: Représentation schématique d'un solide humide.[12]

II.3.2.Phase à vitesse de séchage constante

Pendant toute la durée de cette phase, qui se poursuit jusqu'au point critique, la surface du produit est gorgée d'eau. Une fine couche de gaz se forme où la pression de vapeur d'eau est pratiquement équivalente à celle de l'eau pure dans les mêmes conditions de température et de pression. Cette situation résulte soit d'une présence significative d'eau à la surface du produit, soit d'une diffusion rapide de l'eau depuis l'intérieur du produit vers sa surface externe. Cette phase est similaire à l'évaporation d'un liquide. La température du solide reste constante et est appelée la température humide du fluide de séchage. La nature du solide n'intervient pas au cours de cette période, par contre la forme du solide peut influencer sur la vitesse de séchage (en kg d'eau/s) qui, pendant cette phase, est égale à [12] :

$$\frac{D_w}{dt} = M \frac{dn_s}{dt} = K_G A (P_s - P_w) \quad (\text{II. 7})$$

Avec

- M (kg): masse du produit à sécher,
- A (m²): surface à travers laquelle s'opère le transfert d'humidité,
- P_s (Pa): pression de vapeur d'eau à la température T à la surface du solide pendant la phase à vitesse constante, cette pression est égale à la pression de vapeur saturante à la température du solide ou température humide,
- P_w (Pa): pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air,
- K_G (s/m): coefficient global de transfert de matière.

Il n'est pas toujours possible d'identifier clairement la phase de séchage à vitesse constante, même pour des produits ayant une teneur en humidité initialement élevée (tels que les produits végétaux et carnés). Cela s'explique par le fait que les parois cellulaires entravent la migration rapide de l'humidité vers la surface des produits.

De plus, les équations mentionnées précédemment sont basées sur une surface d'échange constante, ce qui n'est pas toujours le cas. De nombreux produits ont tendance à se rétracter pendant le processus de séchage, notamment les gels, les produits biologiques et le papier.

II.3.3. Phase à vitesse de séchage décroissante

Cette phase succède à la phase à vitesse constante quand cette dernière existe. Le taux d'humidité à partir duquel la vitesse de séchage se met à décroître est le taux d'humidité critique $n_{s,cr}$ qui n'est pas toujours identifiable et, quand il peut être observé, dépend des conditions de séchage.

On admet que, pendant cette période du séchage, le transfert de l'eau au sein du produit n'est plus assez rapide pour saturer la pellicule de gaz entourant celui-ci. Il se crée dans les produits poreux un front de vaporisation se dirigeant progressivement vers l'intérieur de la matière à sécher. La vapeur d'eau ayant un chemin de plus en plus important à parcourir, sa pression à la surface du produit diminue. La différence entre cette pression et la pression de vapeur d'eau dans le milieu ambiant, c'est-à-dire le potentiel d'échange, va donc décroître avec, comme conséquence, la diminution de la vitesse de séchage.

Dans les produits non poreux, la diffusion de l'eau au sein du produit est aussi à l'origine de la diminution de la vitesse de séchage. De même, la diminution de la diffusivité de l'eau au fur et à mesure que le produit sèche, ainsi que le croûtage éventuel du produit, peuvent aussi expliquer la diminution de la vitesse de séchage. Parallèlement, durant cette phase, les conditions régnant à l'extérieur du produit perdent leur influence[12].

Croûtage: formation d'une pellicule sèche autour du produit ou des particules qui le constituent, cette pellicule s'opposant au transfert d'humidité vers le milieu extérieur.

Deux mécanismes principaux ont été avancés pour expliquer le mouvement de l'eau à l'intérieur des corps à sécher :

- la diffusion;
- la migration capillaire;

II.4.Représentation des différentes étapes au moyen de diagrammes de l'air humide

II.4.1.Principes

Au cours du séchage, l'air subit des modifications d'état portant sur sa température et son taux d'humidité. Les diagrammes de l'air humide permettent de suivre l'évolution de ces paramètres sans avoir recours à des calculs fastidieux. Bien que les définitions qui suivent soient applicables à tous les couples « gaz-humidité », il ne sera fait mention ci-après que du

mélange air-eau. Les diagrammes de l'air humide permettent de déterminer les caractéristiques suivantes: [12]

- **Température sèche:** C'est la température mesurée par une sonde sans protection, directement exposée à l'air environnant.
- **Température humide:** La température humide est mesurée à l'aide d'une sonde enveloppée d'un matériau humidifié en permanence avec de l'eau pure et exposée à un courant d'air. Cette température est généralement plus basse que la température sèche en raison de l'évaporation de l'eau qui se produit sur la sonde et qui absorbe la chaleur de l'environnement. La température sèche et la température humide sont identiques lorsque l'air est saturé en vapeur d'eau.
- **Température de rosée:** C'est la température à laquelle se condense l'humidité contenue dans l'air [12].
- **L'humidité relative:** est le pourcentage de la pression de vapeur d'eau à une température donnée par rapport à la pression de vapeur saturante de l'eau à la même température.
- **L'enthalpie:** est une mesure de l'énergie contenue dans l'air humide. Elle est exprimée en joules par kilogramme d'air sec. En réalité, elle représente une variation d'énergie par rapport à un état de référence, où l'enthalpie est généralement considérée comme nulle à 0°C. L'enthalpie spécifique de l'air humide (en J/kg) à la température T_a (en K) est la somme des variations de la chaleur sensible de l'air et de l'eau entre T_a et 0 °C (soit 273 K), ainsi que de la chaleur latente de vaporisation de l'eau à 0°C.

$$i = C_{pa}(T_a - 273) + n_a[\lambda_e + C_{pe}(T_a - 273)] \quad (\text{II. 8})$$

C_{pa} et C_{pe} étant les capacités thermiques massiques de l'air et de l'eau (en J/kg.K)

Pour les températures habituellement utilisées en séchage, la relation (5) devient :

$$i = 1013(T_a - 273) + n_a[2\,496 \times 10^3 + 1922(T_a - 273)] \quad (\text{II. 9})$$

- **La température de saturation adiabatique:** est utilisée dans les processus de séchage, où l'échange de chaleur avec l'environnement est négligé. Les caractéristiques de l'air, telles que la température et le taux d'humidité, se déplacent le long d'une droite appelée droite de saturation adiabatique. Pour les mélanges eau-air, la température de saturation adiabatique est une bonne approximation de la température humide. Cependant, pour d'autres systèmes, comme les mélanges air-solvants organiques, la droite de saturation adiabatique diffère de la droite représentant les températures

humides. Le diagramme de Mollier est un outil couramment utilisé, présentant l'enthalpie de l'air en ordonnée et le taux d'humidité en abscisse. Il permet de représenter l'évolution de l'air et du produit pendant le séchage. L'utilisation du diagramme dépend de la négligence des phénomènes de diffusion d'humidité à l'intérieur du produit et de la disponibilité de l'isotherme d'adsorption du produit.

II.4.2. Activité de l'eau dans un produit

L'activité de l'eau est définie comme le rapport entre la pression de vapeur à la surface du corps humide (P_{vp}) et la pression de vapeur saturante à la même température de surface (P_{vs}), toutes deux exprimées dans la même unité [22].

$$a_w = \frac{p_{vp}}{p_{vs}} \quad (\text{II. 10})$$

Lorsqu'il y a un équilibre hygroscopique entre le produit à sécher et l'air asséchant (c'est-à-dire qu'il n'y a pas d'échange d'humidité entre eux), la pression de vapeur à la surface du corps (P_{vp}) et la pression partielle de vapeur contenue dans l'air (P_v) s'égalisent. Dans cette situation, l'activité de l'eau et l'humidité relative de l'air (ϕ) se stabilisent et le processus de séchage s'arrête[21].

Ainsi, pour que le séchage puisse avoir lieu, il est nécessaire que la pression de vapeur à la surface du produit soit supérieure à la pression de vapeur dans l'air asséchant ($P_{vp} > P_v$). Cela crée une différence de pression qui favorise l'évaporation de l'humidité du produit et son séchage.

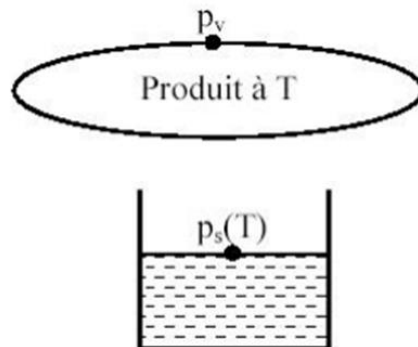


Figure II.8: Représentation de l'activité de l'eau [24]

II.4.3. Isothermes de sorption

L'activité de l'eau (a_w) dans un produit dépend principalement de sa teneur en eau et de sa température. La courbe représentant, pour une température T donnée, la teneur en eau (X) d'un produit en fonction de la valeur de l'activité de l'eau (a_w) ou de l'humidité relative (HR) de l'air en équilibre est appelée [23] :

- ✓ isotherme d'adsorption si elle a été déterminée expérimentalement à partir d'un produit sec;
- ✓ isotherme de désorption si elle a été déterminée expérimentalement à partir d'un produit saturé en eau ;

Le phénomène d'hystérésis (Figure II.9) est généralement observé pour les isothermes de sorption des produits agroalimentaires.

Les deux courbes sont en général différentes car le séchage d'un produit (passage de $a_w=1$ à $a_w < 0,6$) entraîne des modifications de structure irréversibles

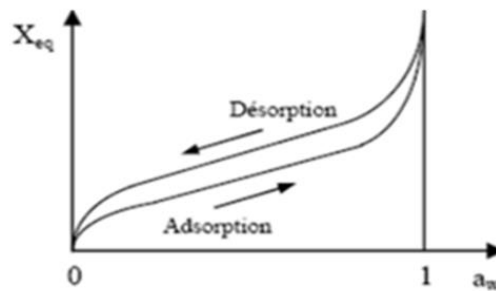


Figure II.9: Isothermes d'adsorption et de désorption [25]

II.5. Analyse des courbes de séchage. Modélisation

L'analyse des courbes de séchage et la modélisation permettent d'obtenir des informations précieuses sur les processus de séchage, d'améliorer l'efficacité des procédés de séchage et de mieux comprendre les interactions entre l'humidité, le matériau et les conditions de séchage.

II .5.1. Variation du taux d'humidité réduit en fonction du temps

Le taux d'humidité réduit est défini comme le rapport entre la quantité d'eau pouvant être évaporée à un instant donné pendant la période de séchage à vitesse décroissante et la quantité maximale d'eau pouvant être éliminée pendant cette même phase. En d'autres termes, le taux d'humidité réduit est égal à :

$$\frac{n_s - n_{s,e}}{n_{s,cr} - n_{s,e}} \quad (\text{II. 11})$$

En traçant le logarithme du taux d'humidité réduit en fonction du temps (figure II.10), il est possible d'observer une relation linéaire où les points expérimentaux suivent une droite de pente K [12].

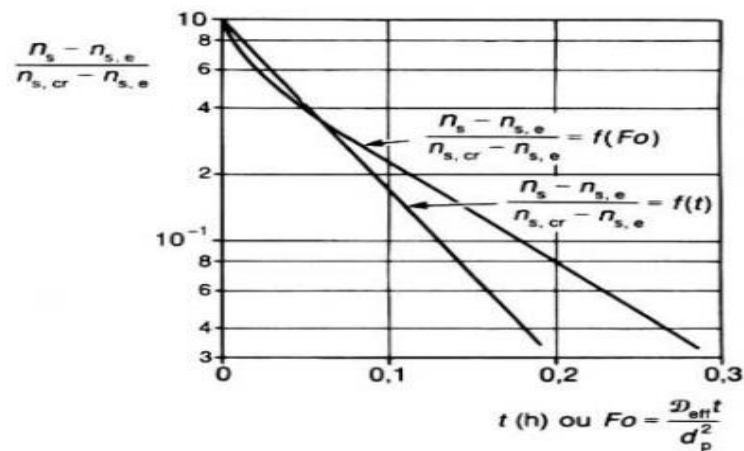


Figure II.10: Variation du taux d'humidité réduit en fonction du temps t ou du nombre de Fourier Fo [12].

- **Identification du mécanisme de transfert d'eau:** La pente de la droite obtenue dans le graphique peut permettre de déterminer le mécanisme de transfert d'eau à l'intérieur du matériau. Si la pente correspond au coefficient K défini dans l'équation, cela indique un mécanisme de transfert capillaire. Sinon, si la pente est différente, cela suggère un mécanisme de transfert par diffusion. À partir de cette pente, la diffusivité effective peut être calculée, en tenant compte de la forme du matériau (sphère ou plaque).

- **Utilisation d'une autre méthode pour les temps de séchage courts :** Lorsque le temps de séchage est relativement court, l'équation ne peut pas être réduite à son premier terme. Dans de tels cas, une autre méthode doit être utilisée pour calculer la diffusivité. En supposant que le temps de séchage varie avec le carré du rayon ou de la demi-épaisseur du matériau, une méthode d'identification peut être utilisée pour déterminer la diffusivité.

- **Solution normalisée en fonction du nombre adimensionnel de Fourier :** Pour résoudre l'équation qui décrit la variation du taux d'humidité réduit en fonction du temps, de la diffusivité et de la dimension du produit, une solution normalisée en utilisant le nombre adimensionnel de Fourier a été proposée.

$$Fo = D_{eff} t / d_p^2 \quad (II.12)$$

avec

D_{eff} (m²/s): est la diffusivité effective de l'humidité dans la matière;

d_p (m): diamètre des particules;

t (s): temps de séchage.

Ce nombre de Fourier permet de prendre en compte plusieurs paramètres (diffusivité, dimension du produit, temps) dans l'étude des phénomènes transitoires.

Le Tableau II.1 fournit les solutions correspondantes pour différents nombres de Fourier.

$\frac{n_s - n_{s,e}}{n_{s,cr} - n_{s,e}}$	Fo	$\frac{n_s - n_{s,e}}{n_{s,cr} - n_{s,e}}$	Fo
1	0	0,3994	0,0486
0,8537	0,00203	0,3045	0,0729
0,7967	0,00405	0,2513	0,0911
0,7543	0,00608	0,2042	0,1113
0,7195	0,00810	0,1505	0,1419
0,6632	0,0125	0,1006	0,1823
0,5789	0,0203	0,0552	0,2430
0,5010	0,0304	0,0111	0,4050

Tableau II.1: Taux d'humidité réduits et nombres de Fourier correspondants (pour une sphère)[12]

II .5.2.Courbe caractéristique de séchage

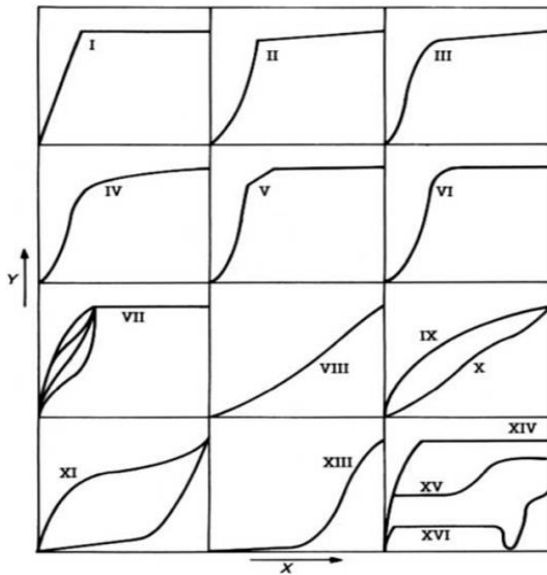
La complexité des phénomènes intervenant au cours du séchage et la difficulté de déterminer certains paramètres, tels que la diffusivité, ont conduit certains spécialistes à adopter une approche empirique.

L'idée est de déterminer une loi générale applicable à un large éventail de conditions opérationnelles à partir de quelques expériences simples de séchage. Ainsi, des chercheurs tels que Van Meel, Krischer et Schlunder ont proposé une méthode de représentation des résultats expérimentaux permettant de tracer une courbe unique appelée courbe caractéristique de séchage pour un produit donné (figure II.11).

Cette courbe permet de regrouper les résultats obtenus dans des conditions différentes de vitesse d'air, de température et de taux d'humidité de l'air. À condition que le taux d'humidité critique du produit soit constant et qu'il y ait une phase de séchage à vitesse constante, cette méthode est relativement simple à mettre en œuvre.

En effectuant plusieurs expériences de séchage dans des conditions opérationnelles variées, on peut exprimer les résultats dans un système de coordonnées où la vitesse de séchage

réduite (rapport entre la vitesse de séchage à un instant donné et la vitesse de séchage pendant la phase à vitesse constante) est représentée sur l'axe des ordonnées et le temps sur l'axe des abscisses[12].



- I. argile et cuir
 - II. tuiles
 - III. lits de billes imprégnées de liquides organiques
 - IV. polystyrène
 - V. filet de poisson
 - VI. tamis moléculaires
 - VII. particules de silicate de sodium (conditions externes variables)
 - VIII. bois
 - IX. papier et laine
 - X. pomme de terre et tapioca
 - XI. pain de seigle et levure
 - XII. beurre, margarine
 - XIII. grains de blé
 - XIV. castine (*) saturée avec de l'eau
 - XV. et XVI. castine (*) saturée avec différentes solutions de sel
- (* castine: fondant calcaire utilisé dans les hauts fourneaux)

Figure II.11: Répertoire des différentes courbes caractéristiques ($Y=g(X)$)[12].

Ces courbes (Figure II.11) peuvent être classées en quatre principales catégories :[12]

- les produits hygroscopiques (courbes I à VIII) ;
- les produits colloïdaux (courbes IX à XII) ;
- les céréales (courbe XIII) ;
- les matériaux saturés de solutions salines présentant des problèmes de croûtage (courbes XIV à XVI).

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fourni les connaissances de base nécessaires pour comprendre les phénomènes généralement impliqués dans les opérations de séchage. Nous avons rappelé les lois physiques internes et externes des produits humides, telles que l'activité de l'eau et la cinétique du séchage, et présenté les différentes lois fondamentales régissant le processus de séchage.

Chapitre III

Conception et réalisation du séchoir

III.1.Introduction

Dans notre projet dont l'objectif est de concevoir et fabriquer un séchoir à convection expérimental, nous nous sommes concentrés sur un séchoir thermique à convection forcée de petite taille. Avec des dimensions de 200x30x30 cm. Notre objectif est de concevoir et fabriquer un banc d'essai qui permet de représenter et d'étudier de manière concrète le séchage par convection de matières solides. Nous essayerons de réaliser un séchoir compact et efficace pour accélérer le procédé de séchage avec une consommation d'énergie faible.

Notre séchoir utilise le principe de la convection forcée, ce qui signifie que nous utilisons un système de ventilation pour faire circuler l'air chaud à travers le séchoir (figure III.1.). Cela permet une répartition uniforme de la chaleur et de l'humidité, ce qui accélère le séchage des produits, La configuration finale étant retenue et visualisée comme le montre dans la figure III.19.

Les étapes suivantes détailleront notre approche méthodologique, nos choix de matériaux et les considérations techniques pour la réalisation de ce séchoir performant.

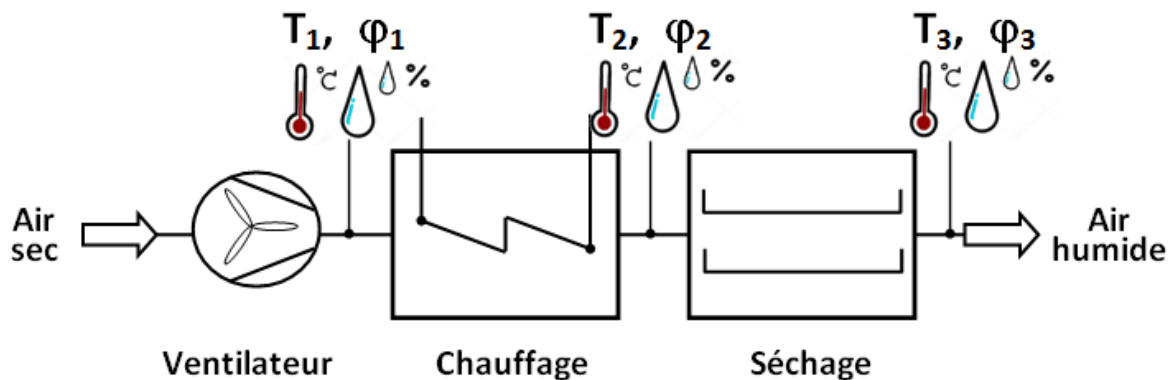


Figure III.1.schéma de principe de séchoir

III.2. La conception et le dimensionnement du séchoir

III.2.1. Les éléments constitutifs du séchoir

Le banc expérimental fabriqué est un séchoir conçu pour être utilisé dans le Laboratoire d'énergétique de la faculté des sciences et de la technologie à l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem. Il est essentiellement composé des éléments suivants:

- **Une enceinte de séchage**

Il s'agit de la zone où se déroule l'échange de chaleur et d'humidité entre l'air et le produit à sécher. Les dimensions de cet espace sont de 20 cm de hauteur, 60 cm de longueur et 25 cm de largeur. Les parois extérieures de cette zone sont fabriquées de tôle en acier galvanisé isolé avec de la laine de verre renforcées avec des cornières.

- **Un compartiment de chauffage**

A travers le circuit aéraulique composé de deux conduites en acier galvanisé de diamètre 125 mm, nous avons placé une résistance électrique chauffante d'une puissance de 750 W. Son rôle est de chauffer l'air aspiré à partir de l'air ambiant à la température souhaitée à l'aide d'un régulateur avant qu'il ne soit introduit dans l'enceinte de séchage.

- **Un système d'écoulement d'air**

Il est composé de deux ventilateurs d'une puissance de 20 W chacun, disposé en série, situé à l'entrée du circuit aéraulique. Il est associé à un variateur de vitesse électronique qui permet de réguler la vitesse de l'air soufflé, offrant ainsi la possibilité de faire varier la vitesse de l'air selon les besoins.

- **Un circuit aéraulique**

Il remplit trois fonctions essentielles: il aspire l'air ambiant qui est chauffé à la température de séchage, il transmet ensuite cette chaleur latente de vaporisation à l'eau imprégné dans le produit à sécher et enfin il permet l'évacuation de cet air chargé d'humidité vers l'extérieur. Cela contribue à maintenir un environnement de séchage efficace en éliminant l'air humidifié du processus.

- **Une balance électrique:**

Nous avons utilisé une balance digitale de cuisine de précision acceptable de ± 1 gramme. Elle nous servira à mesurer la masse des échantillons du produit à sécher.

III.2.2.Paramètres réglables du séchoir

III.2.2.1.Température de l'air de séchage

La température de l'air de séchage peut être contrôlée par un dispositif de résistance électrique, qui est connecté à un système de contrôle de la température à l'aide d'un régulateur de tension. Une surveillance et un contrôle précis de la température de l'air de séchage sont essentiels pour obtenir les meilleurs résultats en termes de qualité, d'efficacité et de sécurité dans le processus de séchage. Le processeur principal permet de réguler la température de l'air jusqu'à un maximum de 70°C.

III.2.2.2. Le débit de l'air de séchage.

Pour évaluer la puissance évaporatrice et la puissance thermique de l'opération de séchage, il est nécessaire de connaître le débit massique de l'air sec dans le circuit aéraulique. Le débit massique de l'air sec fait référence à la vitesse à laquelle l'air circule dans le circuit

aéraulique du séchoir. Cette vitesse joue un rôle crucial dans l'élimination de l'humidité du produit car elle permet l'augmentation du coefficient de transfert thermique. Cette vitesse est mesurée par un anémomètre à hélice indiqué sur la figure ci-dessous (figure III.2.)



Figure III.2. Thermo-Anémomètre à hélice

III.2.3. Les paramètres mesurables du séchoir

III.2.3.1. L'humidité relative et la température de l'air de séchage.

L'humidité relative et la température de l'air chaud circulant dans le circuit aéraulique peuvent être mesurées à l'aide d'un hygro-thermomètre digital, dans trois positions différentes branché le long du circuit aéraulique.

III.2.3.2. Perte de masse du produit

Il indique combien de masse d'eau le produit a perdu pendant le processus de séchage. Lorsque le produit est exposé à des conditions de séchage, l'humidité à l'intérieur s'évapore progressivement, ce qui entraîne une diminution de sa masse. Elle est mesurée avant et après le processus de séchage avec une balance électronique.

III.2.3.3. Consommation énergétique au cours du séchage

Il fait référence à la quantité d'énergie nécessaire pour réaliser le processus de séchage des produits alimentaires. Ce processus, qui implique le transfert simultané de chaleur et de masse, est généralement gourmand en énergie, surtout à l'échelle industrielle.

III.3. Procédure de réalisation des éléments du séchoir

III.3.1. Montage du coffret

Le coffret est constitué de plaques en PVC blanc rigide renforcé avec des cornières en aluminium. La fabrication du coffret a été réalisée par sous-traitance à travers à un atelier de menuiserie aluminium.



Figure III.3 : Coffret du séchoir

III.3.1.1.fabrication de l'enceinte de séchage

Nous avons fabriqué l'enceinte de séchage à partir de tôle en acier galvanisé, et nous avons également fabriqué 2 claies à grilles sur lesquelles les matériaux à sécher sont placés en couches minces. ils sont illustrées dans les images suivantes ci-dessous

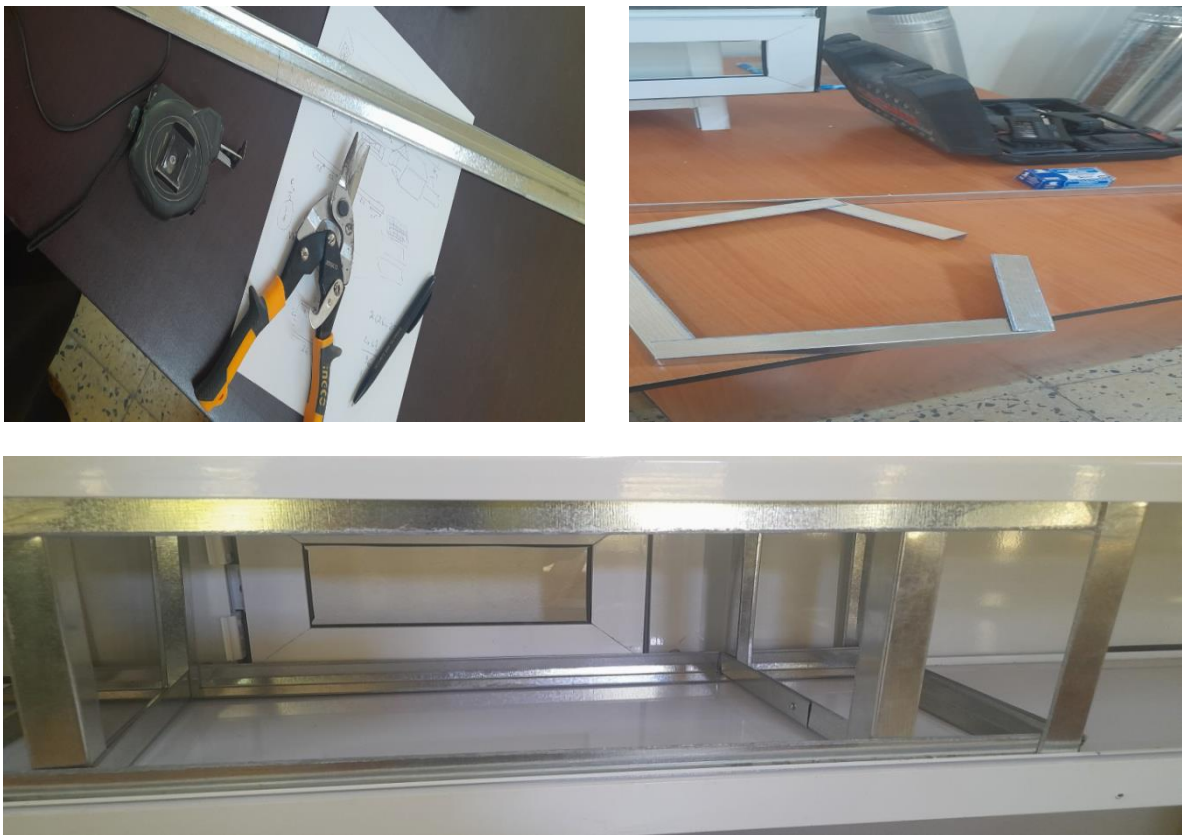


Figure III.4. Les étapes de fabrication de l'enceinte de séchage



Figure III.5. Illustration de tôle de coupe



Figure III.6. Découpe et fabrication des étages dans lesquels sont placés les matériaux à sécher.



Figure III.7. L'enceinte de séchage finale

III.3.1.2. Réalisation du circuit aéraulique

Le circuit aéraulique de circulation d'air de séchage, composé de deux tubes en acier galvanisé de 125 mm (figure III.8), permet de transporter la chaleur nécessaire au chauffage du produit à sécher pour lui fournir la chaleur latente nécessaire à la vaporisation de l'eau qui se trouve dans le produit humide et évacuer l'humidité contenu dans l'air après l'opération de séchage. La circulation de l'air est assurée par deux ventilateurs axiaux d'une puissance de 20 W chacun (figure III.9).

Nous avons coupé deux tubes métalliques et également coupé les tôles et les avons installés comme indiqué dans les figures ci-dessous.



Figure III.8. Tubes en acier galvanisé de 125 mm



Figure III.9. Ventilateur (20 W).



Figure III.10: Les étapes de fabrication du diffuseur d'air



Figure III.11.Circuit aéraulique

III.3.1.3. Isolation thermique :

Nous avons utilisé de la laine de verre pour isoler le circuit aéraulique et l'enceinte de séchage. La laine de verre est un matériau qui a une conductivité thermique très faible de $0,038 \text{ W/m.k}$, ce qui lui permet d'être un bon isolant thermique largement utilisé dans l'industrie. Elle est fabriquée à partir de fibres de verre fines et entrelacées qui forment une structure enchevêtrée.

Il convient de noter que lors de la manipulation de la laine de verre, il est recommandé de prendre des précautions, car les fibres peuvent être irritantes pour la peau, les yeux et les voies respiratoires. Il est donc important de porter des équipements de protection appropriés, tels que des gants, des lunettes de protection et un masque facial lors de l'installation de la laine de verre (Figure III.12).



Figure III.12 .Installation de la laine de verre sur le séchoir

III.3.2. Le ventilateur axial

Il est fixé à l'aide des boulons à un support approprié, qui est situé au niveau de l'axe horizontal central du circuit aéraulique à l'entrée d'air.



Figure III.13 Ventilateur axial fixé par boulonnage sur le séchoir

III.3.3. La résistance chauffante

Ce sont des résistances blindées inox sur lesquelles sont montées des ailettes permettant le chauffage d'air en convection naturelle ou forcée.

Très robustes et très simples à installer, elles existent en de nombreux modèles standards, mais toute fabrication sur mesure reste possible.

- Grande gamme de longueur et puissance.
- Possibilité de fabrication sur mesure Modèles à ailettes rectangulaires ou spiralées [27].



Figure III.14. Résistance électrique chauffante à ailette et son emplacement dans le circuit aéraulique

III.3.4. Mise en place des circuits électriques

Le circuit électrique est alimenté par courant alternatif (220 V) pour alimenter tous les appareils électriques équipant le séchoir: le ventilateur, la résistance électrique à ailettes qui produit une puissance thermique de 750 W ainsi que les régulateurs de débit et de température.

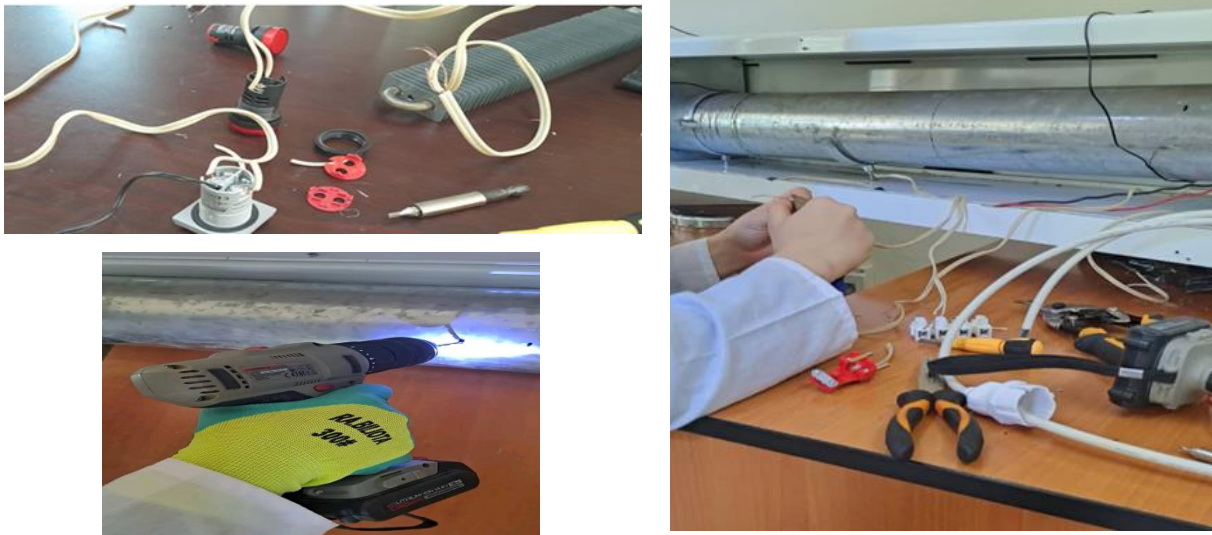


Figure III.15. Mise en place du câblage électrique

III.3.5. La commande et la régulation (la boîte de commande)

III.3.5.1. Régulation du débit et de la température

Pour effectuer des opérations de séchage thermique par convection, il faut effectuer un bilan énergétique de l'opération de séchage, en utilisant le diagramme de l'air humide en mesurant les différents paramètres à travers le circuit aéraulique (température, humidité relative) du séchoir pour différentes vitesses de l'air et différents température de séchage. Pour varier ces deux derniers paramètres nous avons utilisé deux régulateurs de tension pour varier le débit de l'air et la température de séchage.



Régulateur de débit

Régulateur de température

Figure III.16: la boîte de commande

Les deux ventilateurs placés en série absorbent 41W; tandis que les résistances de chauffage fonctionnent à une puissance atteignant 750W. Le circuit de puissance est conçu pour gérer ces niveaux de puissance tout en maintenant une température supportée par le produit à sécher, ce qui permet d'intégrer l'ensemble dans le boîtier de contrôle.

III.3.6 Capteurs de température et d'humidité

III.3.6.1. Capteurs de température

Le terme "digital panel light" se réfère généralement à un dispositif d'éclairage équipé d'un panneau de contrôle numérique. Il s'agit d'une source lumineuse qui intègre des fonctionnalités de contrôle avancées, les caractéristiques principales sont :

- Faible taille.
- Gamme de température [-20 °C-199 °C]

Ils offrent une plus grande flexibilité et facilité d'utilisation par rapport aux éclairages traditionnels, permettant aux utilisateurs de personnaliser et d'ajuster facilement l'éclairage en fonction de leurs besoins spécifiques.



Figure III.17. Capteurs de température (digital panel light)

III.3.6.2. Capteurs d'humidité

Un thermo-hygromètre est un instrument de mesure utilisé pour mesurer la température et l'humidité relative de l'air. Réunie dans un seul appareil, un thermomètre et un hygromètre comme indiqué sur la figure.

- Mesure l'humidité relative 5 à 95%HR
- Température ambiante -20 à +70°C ;
- Température de point de rosée -20°C à +70°C_{td}



Figure III.18. Thermo-hygromètre digital

III.3.7. Le circuit de puissance

Le circuit de puissance fait référence à la partie d'un système électrique qui est responsable de la gestion et de la distribution de l'énergie électrique. Il est principalement composé de composants tels qu'un disjoncteur bipolaire, l'interrupteur et le conducteur électrique.



Voyant d'alimentation
électrique

Disjoncteur

Interrupteur



Figure III.19: Installation du circuit de puissance

Le circuit de puissance est responsable de la gestion de l'énergie électrique dans un système, en fournissant la puissance nécessaire et en assurant la protection contre les conditions potentiellement dangereuses.

III.3.8. L'assemblage final du séchoir à convection

Après avoir collecté tous les éléments constituant le séchoir, nous avons procédé comme suit:

- Emplacement des composants électroniques : disjoncteur, Régulateur de tension de température et de débit d'air, les capteurs de température, l'interrupteur de résistance et les ventilateurs.
- Fixation des deux ventilateurs axiaux en série à l'entrée du circuit aéraulique.
- Fixation de la résistance électrique de chauffage à l'intérieur du conduit d'air du circuit aéraulique de près de l'enceinte de séchage.



Figure III.20. Prototype final du séchoir à convection

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes étapes de la fabrication du séchoir thermique à convection et préparé le banc expérimental pour des essais de fonctionnement.

La réalisation du prototype de ce séchoir peut être utilisée pour faire des travaux de détermination de cinétique de séchage pour des matériaux minces ou granuleux tel que des produits agroalimentaires. Dans notre étude nous avons effectué des essais sur la tomate en tranches minces.

Chapitre IV

Expérimentation et interprétations des résultats

IV.1. Introduction

Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé une chambre de séchage du banc d'essai décrit dans le chapitre précédent pour tester la sensibilité du séchoir pour différents paramètres de fonctionnement tout en respectant les contraintes spécifiques du processus de séchage. Notre premier test a porté sur l'influence de la température et de la vitesse de l'air sur la cinétique de séchage.

Pour commencer, nous avons mesuré la teneur en eau initiale d'une variété locale de tomate. Nous avons utilisé des échantillons de (442/402/398) grammes de tomates de saison de type rond, sélectionnées dans un calibre moyen de 46 à 60 mm de diamètre et pesant environ (125-200) grammes chacune. Le séchage des tomates a été réalisé dans le séchoir que nous avons décrit dans le chapitre 3.

La fiche de produit présentée dans le tableau IV.1 donne des informations de base sur les traitements couramment appliqués au produit.

IV.2. Hypothèses simplificatrices

Afin de simplifier le procédé de séchage qui est complexe, nous avons fait certaines hypothèses simplificatrices. Plusieurs études sur le séchage de produits coupés en rondelles ont montré que ces hypothèses sont réalistes et que les simplifications n'ont pratiquement aucune influence sur les résultats.

Les hypothèses simplificatrices suivantes ont été utilisées:

- L'écoulement de l'air est supposé être unidirectionnel et uniforme.
- La variation de la teneur en eau de base sèche des produits est considérée spatio-temporelle.
- La vitesse de l'air est uniforme dans tout le compartiment de séchage.
- Le rayonnement dans l'ambiance de séchage est négligeable.
- Les morceaux du produit à sécher sont considérés comme une surface fortement rugueuse (ceci est plus une réalité pratique qu'une hypothèse).
- Le produit est considéré comme indéformable et suffisamment humide.
- Les échanges thermiques liés aux claies sont négligés, et l'air humide est considéré comme un mélange de gaz parfaits (air sec et vapeur d'eau).
- Les pertes de charge sont impactées par l'entrée, la sortie, les claies et le produit à sécher. Leurs valeurs sont calculées à la fin de ce chapitre.

- Le temps de séchage peut être impacté en raison des pertes de chaleur lors de la pesée de la masse du produit à sécher qui est effectuée à l'extérieur de la chambre de séchage toutes les 15 minutes.

IV.3. Fiches produits (la tomate)

Le processus de séchage varie en fonction de la nature des produits. Il existe plusieurs grandes catégories, classées en fonction des caractéristiques internes des produits, telles que leur forme, leur capillarité, leur homogénéité, leur teneur en sucre, en sels minéraux et leur maturité.

Dans le cas spécifique des tomates, le séchage est délicat. L'ingrédient principal nécessaire est l'eau. Les informations proviennent de différentes sources, notamment CIEPAC, ENDA et ABAC-GERES.[22]

- Les étapes de préparation recommandées pour les tomates sont les suivantes :
 1. Les laver soigneusement.
 2. Les découper en rondelles ou en lamelles d'une épaisseur d'environ 1 cm.
 3. Les placer directement dans le séchoir.

Ces indications nous guideront dans le processus de préparation des tomates avant de les sécher.

- Paramètres de séchage :

Teneur en eau initiale	95 %
Teneur en eau finale recommandée	10%
Température maximale	65°C
conservation	12 mois maximum

Tableau IV. 1:Paramètres de séchage [22]

L'objectif de l'étude est d'analyser comment la teneur en eau du produit à sécher évolue au cours du temps, en prenant en compte les principaux paramètres thermo-physiques tels que la température, l'hygrométrie et le débit massique de l'air de séchage.

IV.4. Description et caractérisation du dispositif expérimental

IV.4.1. Le dispositif expérimental

Il s'agit du séchoir fabriqué utilisant la convection forcée d'air chaud qui est composé de:

- Un coffret en PVC, de dimensions $200 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$, et qui contient un circuit aéraulique équipé d'une chambre de séchage.

- deux ventilateurs en série 41w.
- Une résistance de 750 watts posé sur une tuile en terre cuite ou une brique réfractaire.
- Des instruments de mesures d'humidités et de températures.
- Des régulateurs de tension pour contrôler le débit d'air et la température de séchage.

En fonction du produit et des exigences expérimentales, le manipulateur peut ajuster les paramètres de température, de l'humidité et de débit de l'air de convection à partir des commandes de contrôle.

Les mesures expérimentales sont recueillies et consignées dans des tableaux (voir annexe).

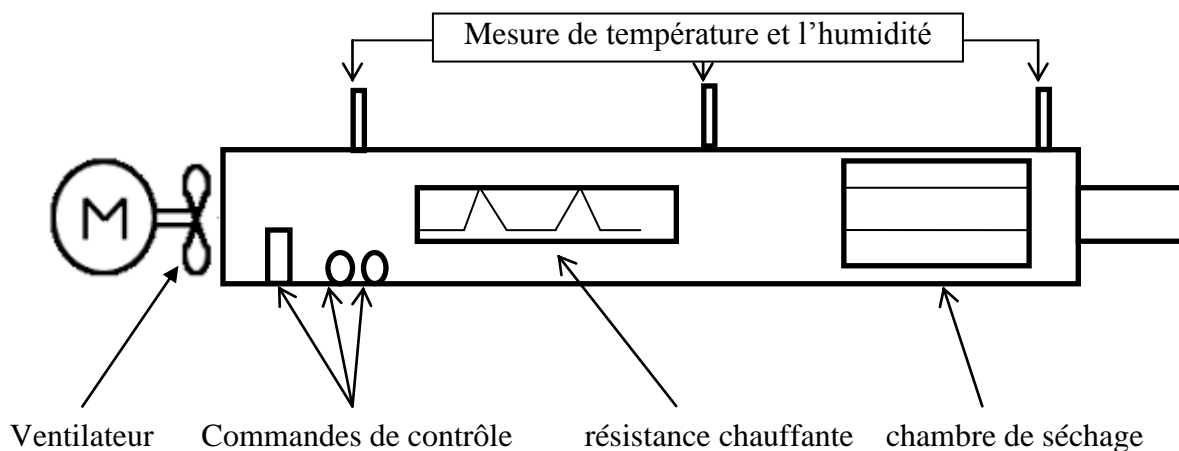


Figure IV. 1:dispositif expérimental de séchage

IV.4.2. Première mise en route

La mise en route d'un séchoir à convection implique plusieurs étapes pour le faire fonctionner correctement. Voici les étapes typiques :

- ✓ **Préparation:** s'assurer que le séchoir est correctement stable sur son support et connecté à une source d'alimentation électrique adéquate. Vérifier également que le matériau à sécher est correctement positionné à l'intérieur du séchoir.
- ✓ **Réglage des paramètres :** Selon la nature du produit à sécher et les spécifications requises, ajuster les paramètres de température et de vitesse de l'air convectif sur le séchoir
- ✓ **Allumage:** Mettre le séchoir sous tension en utilisant le disjoncteur d'alimentation. S'assurer que tous les dispositifs de sécurité sont activés et fonctionnent correctement
- ✓ **Réglage de la température et du débit de l'air:** en utilisons la régulateur de tension.

- ✓ **Surveillance** : on Surveille attentivement le processus de séchage en observant le matériau à l'intérieur du séchoir. S'assurer que tout se déroule correctement et réagir rapidement en cas de problèmes ou d'anomalies.
- ✓ **Arrêt** : Une fois que le séchage est terminé ou lorsque les conditions requises sont atteintes, éteindre le séchoir en utilisant le disjoncteur d'alimentation. Veiller à suivre les procédures d'arrêt appropriées pour garantir la sécurité et la conservation de l'équipement.

IV.4.3. Procédure expérimentale:

- ✓ S'assurer que le séchoir fonctionne correctement afin de prendre des mesures de séchage.
- ✓ Une fois que le produit est placé dans le compartiment prévu à cet effet et à l'intérieur de la chambre de séchage pour les tests, sa masse initiale est lue sur la balance. Il est important de ne pas presser le produit sur les laies. Cela est nécessaire pour assurer un séchage homogène.
- ✓ On déclenche l'électricité de l'appareil en plaçant l'interrupteur sur la position "ON".
- ✓ On Régule la température en utilisant le boîtier de commande. A l'aide d'un régulateur est fixé à la température de séchage supporté par le produit à sécher (par exemple, 40°C) et ainsi la fonction de chauffage de l'air est activée.
- ✓ On Ajuste la vitesse du ventilateur pour obtenir un débit d'air régulier dans le séchoir. Il est essentiel de vérifier cette valeur pendant le séchage et de la réajuster si nécessaire.
- ✓ On enregistre la température et l'humidité relative de l'air de séchage à trois positions différentes du circuit aéraulique.
- ✓ On Pèse la masse du produit à sécher tout les 15 min afin de suivre la cinétique de séchage jusqu'à ce que la masse du produit à sécher ne varie plus.

Les grandeurs nécessaires à l'analyse du procédé du séchage sont affichées sur la façade du séchoir.

Les températures à surveiller et à enregistrer sont les suivantes :

- T_{am} (température humide d'air ambiant) : la température de l'air à l'entrée de l'installation avant chauffage.
- T_{chaud} (température de séchage): la température de l'air humide à l'entrée du sécheur après chauffage.

- T_{sortie} (température d'air humide) : la température de l'air à la sortie du sécheur.
- Humidité : l'humidité relative de l'air humide; avant et après le chauffage et à la sortie du sécheur chargé d'humidité du produit à sécher.

IV.4.4. Enregistrement des valeurs :

- La température de l'air avant chauffage, c'est la température de l'air ambiant qui reste relativement stable, avec peu de variations et qui dépend des données climatiques
- Une fois que la température de consigne pour le chauffage de l'air est atteinte, la température de l'air après chauffage doit rester pratiquement constante, avec très peu de fluctuations.
- Enregistrer toutes les 15 minutes la température et l'humidité relative de l'air à la sortie de la chambre de séchage car elles sont influencées par l'humidité perdue par le produit à sécher. Il faut noter que ces paramètres sont quasi constants avant et après l'opération de chauffage de l'air de séchage.

IV.4.5. Arrêt de l'installation

- Lorsque la masse du produit se stabilise sans grand changement, cela peut indiquer que le séchage est terminé.
- Il faut faire attention et ajuster le temps de séchage en fonction du type de produit et des conditions de séchage spécifiques. Le temps de séchage peut varier en fonction de l'humidité de départ du produit et de la température de séchage.
- Quand on voit que la teneur en eau diminue continuellement, on en déduit la réussite du processus de séchage.

IV.4.6. Exploitation des résultats

Les éléments suivants seront inclus dans le compte rendu :

- A l'aide du logiciel Excel, On calcule la teneur en eau du produit à sécher, l'humidité absolue, et l'enthalpie de l'air à l'entrée du sécheur, à la sortie du chauffage, et à la sortie du séchoir par des mesures de température et d'humidité relative jusqu'à ce que la masse du produit à sécher ne varie plus.
- Les tableaux des mesures effectuées sont présentés en annexe ci-dessous. La masse d'eau gagnée par l'air est déterminée pendant les périodes de temps choisies.
- Nous allons comparer la vitesse de séchage sur les périodes de temps sélectionnées comme indiqué sur la courbe.

- On peut aussi utiliser le diagramme de l'air humide pour déterminer la température (voir l'annexe).
- On suit la cinétique de séchage (évolution de la vitesse de disparition de l'eau du produit).
- On calcule la puissance évaporatrice (la masse d'eau extraite au produit à sécher par unité de temps).
- On trace l'évolution de la teneur en eau du produit à sécher en fonction du temps dans les trois essais pour chaque température de séchage.
- On trace aussi l'évolution des temps de séchage en fonction de la température de séchage.

IV.5. Détermination de la cinétique de séchage de la tomate.

IV.5.1 Opération de séchage

L'expérience est réalisée selon le protocole suivant :

- Les tomates sont lavées, découpées, puis les produits sont pesés pour déterminer leur taux d'humidité initial, qui est de (398/402/442) grammes pour l'échantillon testé.
- La tomate est ensuite placée dans la chambre de séchage, et la température est réglée à environ 40°C.
- L'échantillon est pesé toutes les 15 minutes jusqu'à la fin de l'opération de séchage, lorsque le produit atteint les caractéristiques de séchage souhaitées.

Ce processus de séchage permet de suivre l'évolution de la masse de l'échantillon au fur et à mesure de son séchage jusqu'à ce qu'il atteigne les caractéristiques désirées.

Après relevé des valeurs, nous avons obtenus les résultats suivants:

Temps (min)	Masse de produits (g)	Température T_1 (C°)	Humidité relative φ_1 (%)	Température T_2 (C°)	Humidité relative φ_2 (%)	Température T_3 (C°)	Humidité relative φ_3 (%)	Vitesse(m/s)	Température T_4 (C°)
Début de séchage t=0min	402	25,1	68,1	46,8	23,8	36,7	50,1	1.5	31
Au milieu de séchage t=270min	91	25.9	61.7	40	28.7	35.8	44.5	1.5	31
Fin de séchage t=525min	36	27.5	60.5	40.1	27.1	37.4	41.6	1.5	31

Tableau IV.2: Expérience n°1 effectuée sur le séchoir avec T=40 °C

Temps (min)	Masse de produits (g)	Température T_1 (°C)	Humidité relative φ_1 (%)	Température T_2 (°C)	Humidité relative φ_2 (%)	Température T_3 (°C)	Humidité relative φ_3 (%)	Vitesse(m/s)	Température T_4 (°C)
Début de séchage t=0min	398	24.1	67	47.6	22	37.9	44.2	1.5	31
Au milieu de séchage t=195min	106	26.6	56.2	49.9	18.4	42.4	34.8	1.5	31
Fin de séchage t=390min	38	26.9	58.3	50.4	18.9	43.8	33	1.5	31

Tableau IV.3: Expérience n°2 effectuée sur le séchoir avec $T=50^\circ\text{C}$

Temps (min)	Masse de produits (g)	Température T_1 (°C)	Humidité relative φ_1 (%)	Température T_2 (°C)	Humidité relative φ_2 (%)	Température T_3 (°C)	Humidité relative φ_3 (%)	Vitesse (m/s)	Température T_4 (°C)
Début de séchage t=0min	442	25.9	55.8	59.5	14.1	42.2	39.5	1.5	31
Au milieu de séchage t=150min	114	26.8	55.6	60.7	13.2	49	29.4	1.5	31
Fin de séchage t=285min	40	26.2	45.9	59.7	10.9	50.3	23.1	1.5	31

Tableau IV.4: Expérience n°3 effectuée sur le séchoir avec $T=60^\circ\text{C}$

IV.5.2 Méthodologies d'obtention des courbes de séchage

Pour obtenir les courbes de séchage, il existe deux méthodologies. Ces courbes sont d'une grande importance car elles permettent de connaître les valeurs de la teneur en eau initiale et d'équilibre du produit à sécher, ainsi que de suivre l'évolution de la masse des échantillons. Cela permet d'établir la cinétique de séchage en fonction des conditions d'humidité et de température de l'air utilisé pour le séchage. Cette courbe caractéristique de séchage permet également de calculer la quantité d'eau perdue, ce qui permet de déterminer la vitesse de séchage en fonction du temps ou en fonction de la teneur en eau du produit.

IV.5.3. La détermination de la teneur en eau initiale et interprétation des mesures de la masse

La masse de matière sèche est établie en le pesant directement.

Nous prenons un exemple des calculs liés à la teneur en eau dans la troisième expérience à une température égale à 60°C . d'après les résultats on trouve :

$m_f = 40\text{g}$ (La masse après séchage) d'un échantillon de masse $m_1 = 442\text{g}$

En utilisant la relation (IV.1), on peut déterminer les teneurs en eau base sèche en enregistrant la masse humide $m_h(t)$ du produit à sécher en fonction du temps.

Sachant que :

$$m_h = m_1 = 442g$$

$$m_s = m_f = 40g$$

$$x_1 = \frac{m_1 - m_s}{m_s} = \frac{442 - 40}{40} = 10.05 \left(\frac{kg_e}{kg_{as}} \right) \quad (IV.10)$$

Les calculs sont présentés dans des tableaux comme indiqué dans l'annexe (Tableau IV.11).

La quantité d'eau présente initialement dans la tomate fraîche est :

$$m_e = m_1 - m_f = 442 - 40 = 402g \quad (IV.11)$$

$$x_1 = \frac{m_e}{m_f} = \frac{402}{442} = 0.909 \left(\frac{kg_e}{kg_{produit}} \right) \quad (IV.12)$$

Il est important de tenir compte de la variété du produit séché lors de chaque expérience, car chaque variété a sa propre teneur en eau initiale.

- ✓ Dans chaque expérience, il est essentiel de prendre en compte la perte d'eau et de la masse due à la découpe du produit.
- ✓ Pour obtenir la teneur en eau exacte du produit, il est nécessaire de le peser plusieurs fois jusqu'à ce que sa masse ne varie plus, afin d'assurer un séchage complet.
- ✓ En effet, dans notre cas, le produit n'a pas atteint sa teneur en eau finale qui devrait être proche de 95% (base humide) [22]. C'est cette valeur que l'on considérera comme la teneur initiale moyenne pour les tomates. Les résultats ont démontré que la variété choisie de tomate contient 91% d'eau (91 g d'eau pour 100 g de tomate).



Figure IV. 2 : coupage des tomates



Figure IV. 3:Tranches de Tomates (sur les claies du séchage) au début et à la fin de l'opération du séchage.

IV.5.4. Evolution de l'humidité absolue du produit au cours du séchage

La teneur en eau du produit à sécher exprime le rapport de la masse d'eau contenue dans le produit à la masse de la matière sèche. L'évolution de l'humidité du produit au cours du séchage s'exprimera donc par :[22]

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

$X(t)$ teneur en eau à un instant t quelconque (kg eau/kg m_s)

$M(t)$ masse du produit humide (kg)

M_s masse de matière sèche (kg)

La teneur en eau initiale ou finale s'exprime par :

$$X(i \text{ ou } f) = \frac{M(i, f) - M_s}{M_s} \quad (\text{IV. 2})$$

$M_{i,f}$ est la masse initiale ou finale des tomates après séchage (kg). Ce qui permet de trouver la masse d'eau totale enlevée aux produits durant l'opération de séchage :[22]

$$M_e = M_i - M_f = M_s(X_i - M_f)$$

IV.5.5. La teneur en eau d'équilibre de la tomate

La teneur en eau d'équilibre de la tomate fait référence à l'humidité du produit lorsque l'activité de l'eau qu'il contient devient égale à l'humidité relative de l'air environnant dans lequel il est placé. À ce stade, les processus de transfert d'eau et de chaleur se stabilisent car

les pressions de vapeur et les températures à la surface du produit et dans l'air ambiant s'équilibrent parfaitement et donc il n'y a plus de transfert de masse.

Les isothermes de sorption-désorption sont des courbes qui permettent de déterminer la valeur de la teneur en eau d'équilibre pour n'importe quelle valeur d'humidité relative de l'air ambiant et une température donnée [22].

IV.5.6. Vitesse de séchage

La vitesse de séchage désigne le taux d'évaporation de l'humidité contenue dans le produit à sécher. Sa valeur moyenne sur un intervalle de temps δ_t sera calculée comme suit [22]:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{X(t + \delta_t)}{\delta_t} (kg_{eau}/(kg_{ms} \cdot h)) \quad (IV.3)$$

IV.6. Interprétation des résultats

IV.6.1. Traitement des données expérimentales :

IV.6.1.1. Courbe de perte de la masse

Les résultats expérimentaux sont présentés graphiquement dans la figure IV.4. De plus, Les courbes de perte de la masse lors du séchage à convection des tomates représentent graphiquement la diminution de la masse des tomates au fil du temps pendant le processus de séchage. Au début du séchage, les tomates contiennent une quantité importante d'eau, ce qui implique une masse élevée et une sous-couche limite d'air saturé près du produit à sécher. Au fur et à mesure que le temps passe, le transfert de masse s'effectue entre cette sous-couche limite d'air saturée et l'air chaud de séchage de faible humidité relative, et qui entraîne une migration de l'eau de l'intérieur du produit à sécher vers l'extérieur en alimentant la sous-couche limite d'air en vapeur d'eau au niveau de la surface extérieure du produit à sécher. Ce transfert de masse d'eau du produit à sécher vers l'air de séchage provoque une diminution de la masse des tomates. Cette perte de la masse peut varier en fonction de plusieurs facteurs, notamment la température du séchage et leur teneur en eau (initiale et final).

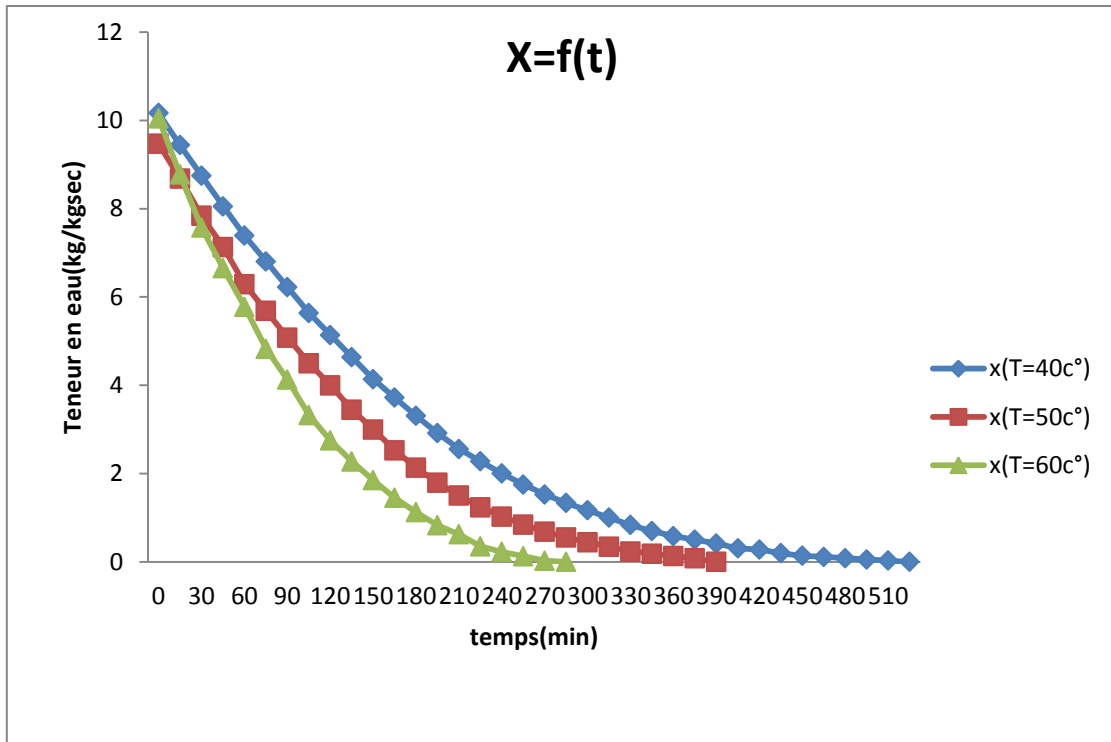


Figure IV.4 : Evolution de la teneur en eau en fonction du temps.

IV.6.1.2. Temps de séchage

Dans la première expérience, le temps de séchage a été estimé à $t_1=525$ min. Cependant, ce temps diminue à $t_2=390$ minutes dans la deuxième expérience lorsque la valeur de la chaleur augmente. Dans la troisième expérience, la durée est inférieure aux deux expériences précédentes, estimées à $t=285$ minutes, à une valeur de température égale à 60°C , où la quantité de produit est presque pratique pour une charge optimale du séchoir sur la base de la masse d'eau évaporée standard par unité de temps dans le temps de séchage moyen et la consommation d'énergie standard par kilogramme de produit séché (figure IV.5).

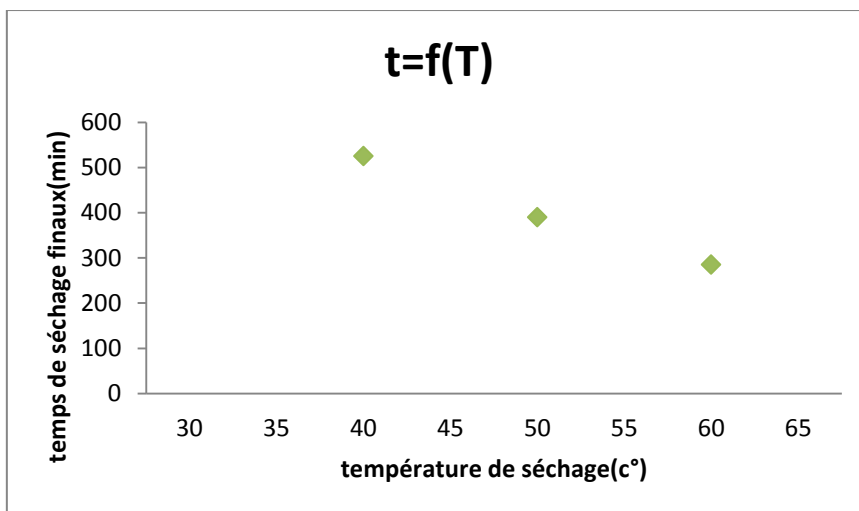


Figure IV.5 : Evolution des temps de séchage en fonction de la température de séchage.

IV.6.1.3. Influence de la température

En observant la dernière courbe (figure IV.5), qui représente la relation entre le temps (t) et la température (T), on peut clairement voir l'impact significatif de la température sur la durée du séchage. En effet, plus la température de l'air entrant dans la chambre de séchage est élevée, plus le temps de séchage est réduit.

On peut remarquer que le temps de séchage est de 525 minutes lorsque la température est faible et égale à 40 °C, tandis qu'il ne faut que 285 minutes (près de deux fois moins de temps), pour atteindre la même teneur en eau lorsque la température est de 60 °C.

IV.7. Calcul de la consommation thermique du séchoir

IV.7.1. Consommation thermique Q_t

Il est la Quantité de chaleur fournie au séchoir par unité de temps.

$$Q_t = \dot{m}_{as}(H_2 - H_1) \quad (IV. 4)$$

Avec \dot{m}_{as} le débit massique du ventilateur

IV.7.2 Consommation thermique massique Q_m

Quantité de chaleur fournie au séchoir Q_t rapporté à l'unité de la masse du liquide évaporé.

$$Q_m = \frac{\Delta H}{\Delta x} = \frac{H_2 - H_1}{x_3 - x_2} \quad (IV. 5)$$

Si M_e est la quantité d'eau qu'il faut extraire du corps humide, la quantité d'air nécessaire au séchage est :

$$\dot{m}_{as} = \frac{M_e}{x_3 - x_2} \quad (IV. 6)$$

La quantité de chaleur qu'il faut fournir au corps humide M pour lui extraire la quantité d'eau M_e est:

$$Q = \dot{m}_{as}(H_2 - H_1) \quad (IV. 7)$$

La puissance évaporatrices :

$$M_e = \dot{m}_{as}(x_3 - x_2) \quad (IV. 8)$$

$$\dot{m}_{as} = \frac{\dot{m}_{ah}}{1 + x_3} \quad (IV. 10)$$

Avec :

H_1, H_2 : Les enthalpies spécifiques (kJ/kg).

x_1, x_2 : Humidité absolue (kg_v/kg_{as}).

Selon les lois ci-dessus on déduit la relation suivant :

$$Q_m = \frac{Q_t}{M_e} \quad (IV. 9)$$

Nous avons effectué les calculs dans Excel comme indiqué dans les tableaux ci-dessous :

t (min)	m_{ah} (kg/s)	\dot{m}_{as} (kg/s)	Q(t)(kW)	M_e (kge/s)	Q_m (kJ/kg)
Début de séchage t=0min	15,94	15,628	421,113	0,075	5477,876
Au milieu de séchage t=270min	15,94	15,678	242,907	0,053	4493,393
Fin de séchage t=525min	15,94	15,682	165,652	0,061	2643,888

Tableau IV.5: Consommation thermique quand T=40 °C

t (min)	m_{ah} (g/s)	\dot{m}_{as} (kg/s)	Q(t)(kW)	M_e (kge/s)	Q_m (kJ/kg)
Début de séchage t=0min	15,94	15,635	452,701	0,06	16586,808
Au milieu de séchage t=195min	15,94	15,597	461,357	0,059	6290,734
Fin de séchage t=390min	15,94	15,685	982,057	0,069	14238,207

Tableau IV.5: Consommation thermique quand T=50 °C

t (min)	m_{ah} (g/s)	\dot{m}_{as} (kg/s)	Q(t)(kW)	M_e (kge/s)	Q_m (kJ/kg)
Début de séchage t=0min	15.94	15,635	777,346	0,026	28407,273
Au milieu de séchage t=150min	15.94	15,597	764,757	0,070	10540,773
Fin de séchage t=285min	15.94	15,658	1104,185	0,068	15827,955

Tableau IV.7: Consommation thermique quand T=60C°

La quantité d'énergie thermique nécessaire dans un séchoir à convection dépend de plusieurs facteurs, notamment la capacité du séchoir, la quantité de tomates à sécher, la teneur en eau des tomates, la température de séchage et la durée du processus. La conception du séchoir, l'efficacité de l'isolation, le système de circulation de l'air et l'efficacité énergétique des composants jouent également un rôle dans la consommation thermique globale.

IV.7.3. Evaluation des pertes de charges du circuit aéraulique :

Les pertes de charge dans un circuit aéraulique sont des résistances que l'air rencontre lorsqu'il circule à travers le système. Ces pertes de charge sont principalement causées par la friction de l'air contre les parois du conduit, les changements de direction, les changements de section, les filtres, les registres, les grilles de ventilation et d'autres composants présents dans le circuit aéraulique.

$$\Delta p = f \frac{L}{D} \frac{1}{2} \rho V^2 + \sum K \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (IV.13)$$

Avec :

Δp : Perte de pression [pas]

f : Coefficient de perte de charge linéaire (sans dimension).

L : longueur du conduit [m].

D : diamètre de la canalisation [m].

ρ : Masse volumique du fluide [kg/m³]

V : Vitesse du fluide ($\frac{m}{s}$).

Sachant que :

$$Q = V \times S \quad ; \quad V = \frac{Q}{S} \quad (IV.14)$$

$$\Delta p = f \frac{L}{D} \frac{1}{2} \rho \frac{Q^2}{S^2} + \sum K \frac{1}{2} \rho \frac{Q^2}{S^2} \quad (IV.15)$$

Avec :

S: la surface (m²).

Q: le débit de l'air m³/s.

$\sum K$: Les coefficients de singularité; la partie de chauffage ; la partie de séchage

$$P_{ele} = \frac{P_n}{\tau} \quad (IV.16)$$

$$P_{ele} = Q \times \Delta P \quad \Delta P = \frac{P_{ele} \times \tau}{Q} \quad (IV.17)$$

P_{ele} : Puissance de ventilateur [W].

τ : Le rendement de ventilateur.

Vu qu'il est difficile d'estimer les coefficients de singularité K de la partie de chauffage (résistance électrique ailette) et la partie de séchage (deux grilles de séchage, passage de l'air),

nous pouvons évaluer les pertes de charge à partir de la puissance des deux ventilateurs en série et de débit volumique à l'entrée du circuit aéraulique.

$$P_n = Q * \Delta P \quad \Delta P = \frac{p_n}{Q_v} = \frac{\tau \times p_{ele}}{Q_v} \quad (IV.18)$$

En estime le rendement de ventilateur à 70%

$$P_{ele} = 20 + 21 = 41w$$

$$Q_v = V \times S \quad avec: \quad S = \frac{\pi d^2}{4}$$

D'après le principe de conservation

$$\dot{m}_{ahe} = \dot{m}_{ahs} = \rho_e \times Q_{ve} = \rho_s \times V_s \times S_s \rightarrow Q_{ve} = \frac{\rho_s}{\rho_e} \times V_s \times \frac{\pi d^2}{4} \quad (IV.19)$$

$$S = \frac{\pi(0.65)^2}{4} = 0.33(m^2)$$

Nous savons que : $T_s=31^\circ C$ et $T_e=26^\circ C$

En utilisant le tableau IV.12.présenté en annexe, nous constatons que:

$$\rho_e = 24.37\left(\frac{g}{m^3}\right); \rho_s = 32.05\left(\frac{g}{m^3}\right)$$

Nous avons : $V_s=1,5$ m/s

$$Q_{ve} = \frac{32.05}{24.37} \times 1.5 \times 0.33 = 0.65\left(\frac{m^3}{s}\right) \quad (IV.20)$$

$$\Delta P = \frac{0.7 \times 41}{0.65} = 44,15 Pa \quad (IV.21)$$

IV.8. Conclusion

Ce chapitre détaille la démarche expérimentale à suivre pour obtenir des résultats qui ont été à la hauteur du banc d'essai de séchage à convection fabriqué localement et des résultats obtenus satisfaisants. L'analyse des facteurs externes du processus de séchage se limite à l'influence de la température et de la vitesse de l'air. Le séchage se manifeste par la réduction de l'humidité présente à l'intérieur du produit, comme la montre les courbes obtenues.

L'augmentation du débit d'air et de la température favorise l'intensification des échanges thermiques et de masse, ce qui entraîne une élévation de la température du produit à sécher et, surtout, une évaporation accrue de l'eau.

Conclusion générale

Conclusion générale

Notre travail nous a permis dans une première étape une meilleure compréhension des mécanismes de séchage. Pour ce faire, nous avons conçu et réalisé un banc d'essai en sélectionnant un matériel en fonction de critères tels que la fonctionnalité recherchée, le coût, les contraintes techniques et la complexité de sa mise en œuvre.

Les spécifications de ce banc d'essai, dont le design a été soigneusement réfléchi sont:

- l'étude du séchage par convection de matières solides
- le séchage sur 2 claies dans un canal de séchage traversé par un écoulement d'air
- l'ajustage de la vitesse de l'air par la vitesse de rotation d'un système de ventilation
- le chauffage de l'air avec dispositif de chauffage réglable
- la mesure combinée de la température et l'humidité avant et après la matière solide à sécher à l'aide de thermo-hygromètres digitaux.
- la mesure de vitesse de l'air à l'aide un thermo-anémomètre digital.

Les expérimentations réalisées sur notre prototype nous ont permis d'obtenir des courbes caractéristiques de séchage nécessaires réalistes et validés avec des études de la bibliographie.

Nous avons établi un bilan énergétique du processus de séchage en mesurant divers paramètres à travers le circuit aéraulique du séchoir, tels que la température, l'humidité et le débit de l'air. Cela nous a permis de calculer la consommation d'énergie nécessaire pour atteindre l'humidité finale du produit à sécher (dans notre cas la tomate) et de déterminer la cinétique de séchage du produit sélectionné. Pour la conception de notre installation, il était crucial de déterminer les conditions optimales de fonctionnement, de comprendre le comportement du produit et d'analyser l'impact de facteurs tels que la température et la qualité du produit sur le temps de séchage.

Il convient de souligner que ces expériences ne permettent pas de comprendre pleinement tous les phénomènes liés au processus de séchage. Il est donc nécessaire de réaliser de nouvelles expériences sur le dispositif expérimental que nous avons mis en place.

Enfin, il est important de noter que notre séchoir actuel peut être amélioré, en introduisant un système de recirculation pour récupérer la chaleur de l'air de séchage humide à la sortie de séchoir pour une meilleure efficacité globale du séchage. Cependant, nous

Conclusion générale

sommes convaincus qu'il est possible de mettre en œuvre à l'avenir, en installant un système d'acquisition automatique de mesures par ordinateur, de recirculation d'air et un filtre pour assurer une qualité constante et saine du produit séché.

Annexes

Annexes

Tableau IV.8: Expérience n°1 effectuée sur le séchoir quand T=40°C

$t_{(min)}$	$M_{(g)}$	$T_1 (^{\circ}C)$	$\varphi_1(\%)$	$T_2 (^{\circ}C)$	$\varphi_2 (\%)$	$T_3 (^{\circ}C)$	$\varphi_3(\%)$	$V_{(\frac{m}{s})}$	$T_4(^{\circ}C)$
0	402	25,1	68,1	46,8	23,8	36,7	50,1	1,5	31
15	376	25,4	67,4	40	31	33,5	55,3	1,5	31
30	351	25,8	66,1	41,2	29,5	33,7	54,3	1,5	31
45	326	26,1	64,7	41,5	28,9	33,8	54,5	1,5	31
60	302	26,4	64,6	40,5	30,6	34	53,2	1,5	31
75	281	26,7	63,2	40,3	30,3	34,3	51,8	1,5	31
90	260	26,1	62,4	40,6	28,7	34,4	50,5	1,5	31
105	239	26,7	63,7	40,7	30,1	34,3	52,5	1,5	31
120	221	26,4	65,4	40,3	31	34,5	52,1	1,5	31
135	203	26,6	64,1	41,7	28,9	35,4	49,6	1,5	31
150	185	26	62,2	40	29,1	35	47,6	1,5	31
165	170	26,8	64,3	41,3	29,7	35,4	49,5	1,5	31
180	155	26,9	64,9	41,4	30	35,5	49,8	1,5	31
195	141	26,8	64,2	40	31,3	35	49,8	1,5	31
210	128	26,6	64,1	41,3	29,4	35,8	48,4	1,5	31
225	118	26,3	64	40,7	29,8	35,7	47,5	1,5	31
240	108	26,4	64,4	40,1	30,5	35,5	47,5	1,5	31
255	99	26,6	63,7	40,5	30,1	35,7	47,4	1,5	31
270	91	25,9	61,7	40	28,7	35,8	44,5	1,5	31
285	84	26,5	62,2	40,7	29,2	35,9	45,6	1,5	31
300	78	26,3	61,9	40,4	29	36,2	44,5	1,5	31
315	72	26,7	63	41,3	29,1	36,7	44,9	1,5	31
330	66	26	62	40,1	28,9	36,4	43,6	1,5	31
345	61	26,6	63,3	40,4	30,1	36,4	45,1	1,5	31
360	57	26,8	63,8	41,1	29,7	36,4	45,6	1,5	31
375	54	26,7	61,1	40,4	29	36,6	43,5	1,5	31
390	51	26,7	62,3	40,2	29,9	36,3	44,5	1,5	31
405	48	26,3	60,6	40,2	28,8	36,7	42,4	1,5	31
420	46	26,9	60,7	41,4	27,9	37,3	42,3	1,5	31
435	43	26,5	60,3	40,3	28,7	36,9	42,1	1,5	31
450	41	26,8	62,4	40,7	29,5	37,4	43	1,5	31
465	40	27,3	60,1	41,7	27,9	38,1	41,4	1,5	31
480	39	27,3	60,4	42	27,6	37,9	41,6	1,5	31
495	38	27,4	60,3	40,5	27,5	37,8	41,5	1,5	31
510	37	27,4	60,2	39,9	27,6	37,5	41,3	1,5	31
525	36	27,5	60,5	40,1	27,1	37,4	41,6	1,5	31

Annexes

Tableau IV.9: Expérience n°2 effectuée sur le séchoir quand T=50°C

$t_{(min)}$	$M_{(g)}$	$T_1(^{\circ}C)$	$\varphi_1(\%)$	$T_2(^{\circ}C)$	$\varphi_2(\%)$	$T_3(^{\circ}C)$	$\varphi_3(\%)$	$V_{(\frac{m}{s})}$	$T_4(^{\circ}C)$
0	398	24,1	67	47,6	22	37,9	44,2	1,5	31
15	368	24,7	65,8	50,3	19,7	39,8	42,4	1,5	31
30	336	25	64,9	50,8	19,3	39,7	43,2	1,5	31
45	309	25,3	63,1	51,1	18,7	40,6	40,8	1,5	31
60	277	25,3	62,2	49,6	19,4	40,1	41	1,5	31
75	254	25,4	62	50,5	18,7	40,6	40,1	1,5	31
90	231	25,4	62,1	50,4	18,9	41	39,1	1,5	31
105	209	25,6	61,7	50,5	18,8	41	39	1,5	31
120	190	25,6	60,5	51,4	18	41,9	37,5	1,5	31
135	169	26	60,3	51,9	17,9	42,3	37,1	1,5	31
150	152	26,1	59,6	52,,1	17,6	42,9	36	1,5	31
165	134	26,4	58,1	52,2	17,3	43,2	35	1,5	31
180	119	26,3	57,5	49,9	18,5	42,8	34,6	1,5	31
195	106	26,6	56,2	49,9	18,4	42,4	34,8	1,5	31
210	95	26,8	55,2	49,7	18,3	42,5	34,2	1,5	31
225	85	27	54,8	50,2	18,1	42,7	34	1,5	31
240	77	27	55,2	50,6	17,9	43,2	33,4	1,5	31
255	70	26,9	55,4	50,2	18,2	43,2	33,3	1,5	31
270	64	26,5	58,8	49,7	19,3	43	34,3	1,5	31
285	59	26,9	59,5	49,9	19,7	43,2	34,7	1,5	31
300	55	26,3	57,7	49,4	18,7	42,9	33,3	1,5	31
315	51	26,9	58,4	49,9	19,3	43,1	34,2	1,5	31
330	47	26,8	58,2	50	19,2	43,1	34	1,5	31
345	45	26,8	58,6	50,3	18,9	43,8	33,2	1,5	31
360	43	26,9	59,2	50,2	19,4	43	34,4	1,5	31
375	41	27	59,2	50,5	19,2	44	33,5	1,5	31
390	38	26,9	58,3	50,4	18,9	43,8	33	1,5	31

Annexes

Tableau IV.10: Expérience n°3 effectuée sur le séchoir quand T=60°C

$t_{(min)}$	$M_{(g)}$	T_1 (°C)	φ_1 (%)	T_2 (°C)	φ_2 (%)	T_3 (°C)	φ_3 (%)	$V_{(\frac{m}{s})}$	T_4 (°C)
0	442	25,9	55,8	59,5	14,1	41,2	39,5	1,5	31
15	391	26,6	55,1	60,4	13,4	45,3	35,8	15	31
30	343	26,7	54	60,9	13	46,9	32,9	15	31
45	306	26,1	54,8	59,7	13,1	46,6	33	15	31
60	271	25,8	52,4	60	12,4	48,4	29,6	15	31
75	233	26,3	49,6	59,7	12,1	47,4	29,9	15	31
90	205	26	54	58,6	13,2	46,6	31,3	15	31
105	173	26,1	55	61,1	12,6	48,2	30,6	15	31
120	150	26,8	56,3	60,8	13,3	50	29,3	15	31
135	131	26,4	55,7	59,8	13,2	48,2	30	15	31
150	114	26,8	55,6	60,7	13,2	49	29,4	15	31
165	98	26,6	55,4	60,9	12,9	49,9	28,3	15	31
180	85	26,4	55,8	60,5	12,9	50,9	27,3	15	31
195	73	26,6	55,3	60,6	12,9	50	27,8	15	31
210	65	26	53	60	12,3	50,1	26,3	15	31
225	54	25,9	51,5	60	12	51,6	24,7	15	31
240	49	25,5	48,8	58,9	11,6	50	24,4	15	31
255	45	26,4	52	60	12,3	50,1	25,9	15	31
270	41	26,3	49,8	59,8	11,9	51	24,4	15	31
285	40	26,2	45,9	59,7	10,9	50,3	23,1	15	31

Annexes

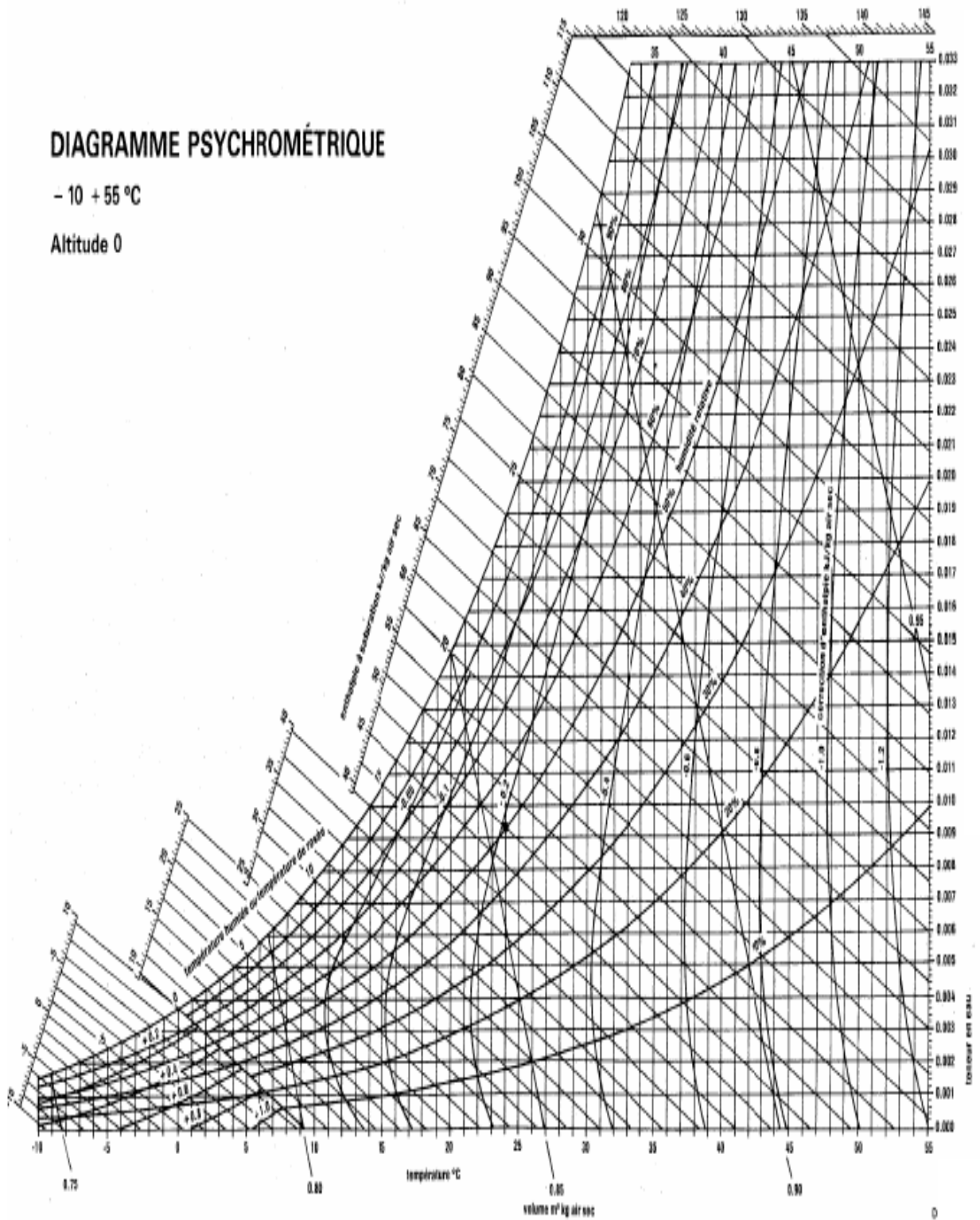
Tableau IV.11. Teneur en eau en fonction de temps dans les trois températures.

t(min)	X (kg/kg _{sec}) (T=40°C)	X (kg/kg _{sec}) (T=50°C)	X (kg/kg _{sec}) (T=60°C)
0	10,1666	9,4736	10,05
15	9,4444	8,6842	8,775
30	8,7500	7,8421	7,575
45	8,0555	7,1315	6,65
60	7,3888	6,2894	5,775
75	6,8055	5,6842	4,825
90	6,2222	5,0789	4,125
105	5,6388	4,5	3,325
120	5,1388	4	2,75
135	4,6388	3,4473	2,275
150	4,1388	3	1,85
165	3,7222	2,5263	1,45
180	3,3055	2,1315	1,125
195	2,9166	1,7894	0,825
210	2,5555	1,5	0,625
225	2,2777	1,2368	0,35
240	2	1,0263	0,225
255	1,75	0,8421	0,125
270	1,5277	0,6842	0,025
285	1,3333	0,5526	0
300	1,1666	0,4473	
315	1	0,3421	
330	0,8333	0,2368	
345	0,6944	0,1842	
360	0,5833	0,1315	
375	0,5	0,0789	
390	0,4166	0	
405	0,3055		
420	0,2777		
435	0,1944		
450	0,1388		
465	0,1111		
480	0,0833		
495	0,0555		
510	0,0277		
525	0		

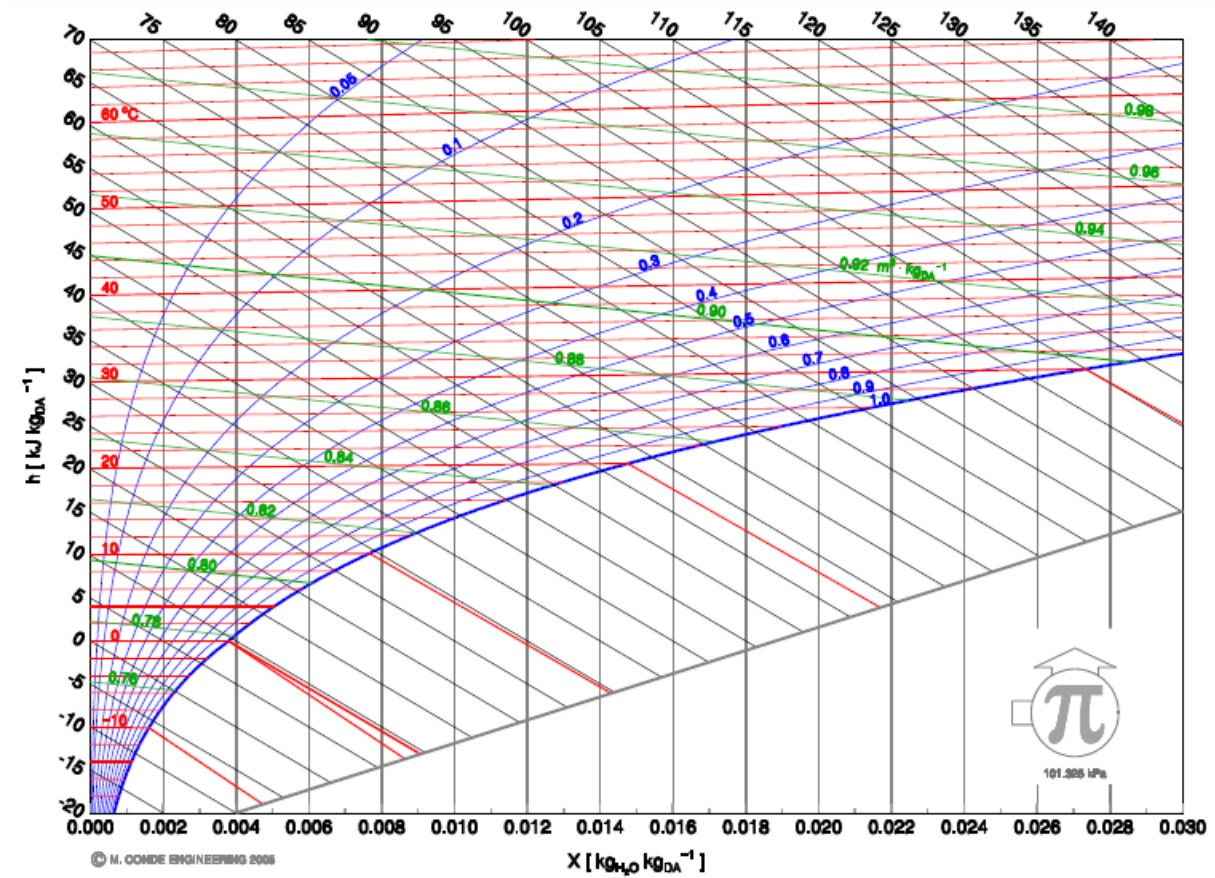
DIAGRAMME PSYCHROMÉTRIQUE

- 10 + 55 °C

Altitude 0



Annexes



On calcule l'humidité absolue et l'enthalpie de chaque température pour trouver la consommation de séchoir.

Sachant que :

Où :	C _{pa} : Chaleur massique de l'air sec	c _{pa} = 1006 J/(kg.K)
	C _{pv} : Chaleur massique de la vapeur d'eau	c _{pv} = 1840 J/(kg.K)
	L ₀ : Chaleur latente de vaporisation de l'eau à 0°C	L ₀ = 2501 kJ/kg
	P _t : pression atmosphérique	P _t = 1013 mbar

Humidité absolue: $\left(\frac{\text{kg}_e}{\text{kg}_{\text{gas}}}\right)$

$$x_a = 0.622 \frac{p_v}{p_t - p_v} = 0.622 \frac{\varphi p_s(T_a)}{p_t - \varphi p_s(T_a)} \quad (IV.22)$$

Enthalpie: $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{gas}}}\right)$

$$h_a = C_{pa}T_a + x_a(L_0 + C_{pv}T_a) \quad (IV.23)$$

on utilise le tableau IV.12. pour trouver p_s de chaque temps.
Les résultats sont répertoriés dans les tableaux ci-dessous.

Annexes

**Tableau IV.12. Constantes thermodynamiques de la vapeur d'eau saturante de degré en degré
(pour calculs psychrométriques)**

t °C	p mbars	v'' m ³ /kg	ρ'' g/m ³	L _v kcal/kg	H'' kcal/kg	t °C	p mbars	v'' m ³ /kg	ρ'' g/m ³	L _v kcal/kg	H'' kcal/kg
0	6,104	206.3	4.847	597,3	597.3	23	28.09	48.62	20.57	584.3	607.3
1	6,566	192.6	5.192	596.7	597.7	24	29.82	45.93	21.77	583.8	607.8
2	7,054	179.9	5.559	596.2	598.2	25	31.67	43.40	23.04	583.2	608.2
3	7,575	168.2	5.945	595.6	598.6	26	33.60	41.04	24.37	582.6	608.6
4	8,129	157.3	6.357	595.1	599.1	27	35.64	38.82	25.76	582.1	609.1
5	8,719	147.2	6.793	594.5	599.5	28	37.79	36.73	27.23	581.5	609.5
6	9,348	137.8	7.257	593.9	599.9	29	40.04	34.77	28.76	581.0	610.0
7	10,13	129.1	7.746	593.4	600.4	30	42.41	32.93	30.37	580.4	610.4
8	10,72	121.0	8.264	592.8	600.8	31	44.92	31.20	32.05	579.9	610.9
9	11,47	113.4	8.818	592.3	601.3	32	47.53	29.57	33.82	579.3	611.3
10	12,27	106.42	9.398	591.7	601.7	33	50.29	28.04	35.66	578.7	611.7
11	13.12	99.91	10.01	591.2	602.2	34	53.18	26.60	37.59	578.2	612.2
12	14.02	93.84	10.66	590.6	602.6	35	56.22	25.24	39.62	577.6	612.6
13	14.97	88.18	11.34	590.1	603.1	36	59.40	23.97	41.72	577.0	613.0
14	15.97	82.90	12.06	589.5	603.5	37	62.74	22.77	43.92	576.5	613.5
15	17.04	77.97	12.82	588.9	603.9	38	66.24	21.63	46.23	575.9	613.9
16	18.07	73.39	13.63	588.3	604.3	39	69.91	20.56	48.64	575.3	614.3
17	19.36	69.10	14.47	587.7	604.7	40	73.75	19.55	51.15	574.7	614.7
18	20.62	65.09	15.36	587.1	605.1	41	77.78	18.59	53.79	574.1	615.1
19	21.96	61.34	16.30	586.6	605.6	42	81.98	17.69	56.53	573.5	615.5
20	23.37	57.84	17.29	586.0	606.0	43	86.39	16.84	59.38	572.9	615.9
21	24.86	54.56	18.33	585.4	606.4	44	91.00	16.04	62.34	572.4	616.4
22	26.43	51.50	19.42	584.9	606.9	45	95.82	15.28	65.44	571.8	616.8

Annexes

**Tableau IV.12. Constantes thermodynamiques de la vapeur d'eau saturante de degré en degré
(pour calculs psychrométriques)**

t °C	p mbars	v'' m ³ /kg	ρ'' g/m ³	L _v kcal/kg	H'' kcal/kg	t °C	p mbars	v'' m ³ /kg	ρ'' g/m ³	L _v kcal/kg	H'' kcal/kg
46	100.85	14.56	68.68	571.3	617.3	74	369.6	4.299	232.6	554.9	628.9
47	106.12	13.88	72.05	570.7	617.7	75	385.5	4.133	242.0	554.3	629.3
48	111.62	13.23	75.59	570.1	618.1	76	401.9	3.975	251.6	553.7	629.7
49	117.35	12.62	79.24	569.6	618.6	77	418.9	3.824	261.5	553.1	630.1
50	123.34	12.04	83.06	569.0	619.0	78	436.5	3.679	271.8	552.5	630.5
51	129.60	11.50	86.96	568.4	619.4	79	454.7	3.540	282.5	551.9	630.9
52	136.12	10.98	91.07	567.8	619.8	80	473.6	3.408	293.4	551.3	631.3
53	142.92	10.49	95.33	567.3	620.3	81	493.1	3.282	304.7	550.7	631.7
54	150.0	10.02	99.80	566.7	620.7	82	513.3	3.161	316.4	550.1	632.1
55	157.4	9.578	104.4	566.1	621.1	83	534.2	3.045	328.4	549.5	632.5
56	165.1	9.158	109.2	565.5	621.5	84	555.7	2.934	340.8	548.9	632.9
57	173.1	8.757	114.2	565.0	622.0	85	578.0	2.828	353.6	548.3	633.3
58	181.5	8.380	119.3	564.4	622.4	86	601.1	2.727	366.7	547.7	633.7
59	190.2	8.020	124.7	563.8	622.8	87	625.1	2.629	380.4	547.1	634.1
60	199.2	7.678	130.2	563.2	623.2	88	649.5	2.536	394.3	546.4	634.4
61	208.6	7.353	136.0	562.6	623.6	89	674.9	2.447	408.7	545.8	634.8
62	218.4	7.043	142.0	562.0	624.0	90	701.1	2.361	423.5	545.2	635.2
63	228.5	6.749	148.2	561.4	624.4	91	728.1	2.279	438.8	544.6	635.6
64	239.1	6.468	154.6	560.8	624.8	92	756.1	2.200	454.5	543.9	635.9
65	250.1	6.201	161.3	560.2	625.2	93	784.9	2.124	470.8	543.3	636.3
66	261.4	5.947	168.1	559.6	625.6	94	814.6	2.052	487.3	542.7	636.8
67	273.3	5.705	175.3	559.1	626.1	95	845.2	1.982	504.5	542.1	637.2
68	285.6	5.475	182.6	558.5	626.5	96	876.9	1.915	522.2	541.5	637.6
69	298.4	5.255	190.3	557.9	626.9	97	909.5	1.851	540.2	540.9	638.0
70	311.7	5.045	198.2	557.3	627.3	98	943.0	1.789	559.0	540.3	638.4
71	325.4	4.846	206.4	556.7	627.7	99	977.8	1.730	578.0	539.6	638.7
72	339.6	4.655	214.8	556.1	628.1	100	1013.2	1.673	597.7	539.0	639.1
73	354.3	4.473	223.6	555.5	628.5						

Annexes

Tableau IV.13.les mesures de enthalpie et l'humidité absolue quant T=40°C

t (min)	X ₁ (kg _e /kg _{as})	X ₂ (kg _e /kg _{as})	X ₃ (kg _e /kg _{as})	h ₁ (kJ/kg _{as})	h ₂ (kJ/kg _{as})	h ₃ (kJ/kg _{as})
0	0,0135	0,0151	0,0199	59,716	86,135	88,081
15	0,0134	0,0143	0,0175	59,663	77,217	78,696
30	0,0139	0,0144	0,0182	61,487	78,592	80,680
45	0,0136	0,0141	0,0183	61,027	78,129	80,961
60	0,0136	0,0141	0,0178	61,282	77,244	80,016
75	0,0141	0,0140	0,0173	62,931	76,672	79,088
90	0,0131	0,0140	0,0169	59,765	76,943	78,043
105	0,0142	0,0147	0,0176	63,223	78,849	79,708
120	0,0137	0,0143	0,0174	61,721	77,526	79,561
135	0,0143	0,0148	0,0176	63,353	80,347	80,793
150	0,0131	0,0134	0,0168	59,552	74,901	78,507
165	0,0143	0,0145	0,0175	63,677	78,953	80,699
180	0,0145	0,0146	0,0176	64,131	79,443	81,084
195	0,0143	0,0145	0,0176	63,618	77,582	80,565
210	0,0143	0,0143	0,0181	63,353	78,566	82,650
225	0,0134	0,0145	0,0178	60,849	78,462	81,654
240	0,0135	0,0141	0,0178	61,172	76,709	81,447
255	0,0142	0,0139	0,0177	63,120	76,634	81,555
270	0,0129	0,0132	0,0166	59,175	74,414	78,792
285	0,0131	0,0135	0,0170	60,068	75,744	79,982
300	0,0130	0,0134	0,0166	59,697	75,191	79,206
315	0,0140	0,0142	0,0177	62,814	78,180	82,618
330	0,0130	0,0133	0,0163	59,443	74,761	78,525
345	0,0141	0,0139	0,0168	62,886	76,531	80,006
360	0,0142	0,0145	0,0170	63,385	78,7468	80,501
375	0,0136	0,0134	0,0162	61,706	75,191	78,634
390	0,0139	0,0138	0,0166	62,406	76,081	79,310
405	0,0127	0,0133	0,0167	58,985	74,742	80,005
420	0,0135	0,0136	0,0167	61,679	76,739	80,523
435	0,0134	0,0132	0,0166	61,034	74,723	79,900
450	0,0139	0,0144	0,0170	62,567	78,076	81,358
465	0,0134	0,0143	0,0173	61,742	78,988	82,826
480	0,0135	0,0142	0,0173	61,917	78,890	82,839
495	0,0134	0,0127	0,0173	61,962	73,471	82,625
510	0,0134	0,0127	0,0163	61,903	72,975	79,687
525	0,0135	0,0125	0,0164	62,181	72,574	79,896

Annexes

Tableau IV.14. Les mesures de enthalpie et l'humidité absolue quant T=50°C

t (min)	X ₁ (kg _e /kg _{as})	X ₂ (kg _e /kg _{as})	X ₃ (kg _e /kg _{as})	h ₁ (kJ/kg _{as})	h ₂ (kJ/kg _{as})	H ₃ (kJ/kg _{as})
0	0,0130	0,0146	0,0185	57,468	85,869	85,717
15	0,0129	0,0152	0,0198	57,660	90,214	91,039
30	0,0125	0,01495	0,0201	57,050	89,907	91,928
45	0,0123	0,0144	0,0201	56,885	88,983	92,655
60	0,0122	0,0150	0,0191	56,775	88,873	89,615
75	0,0123	0,0144	0,0197	56,926	88,363	91,738
90	0,0129	0,0146	0,0192	58,625	88,671	90,846
105	0,0127	0,0145	0,0192	58,222	88,569	90,715
120	0,0126	0,0139	0,0194	58,102	87,854	92,339
135	0,0125	0,0138	0,0192	58,136	88,164	92,204
150	0,0122	0,0136	0,0197	57,426	88,225	93,984
165	0,0120	0,0133	0,0191	57,397	87,243	92,841
180	0,0125	0,0143	0,0189	58,421	87,333	91,844
195	0,0123	0,0142	0,0180	58,183	87,127	89,141
210	0,0122	0,0141	0,0177	58,150	86,716	88,420
225	0,0123	0,0140	0,0185	58,579	86,821	90,868
240	0,0123	0,0138	0,0182	58,697	86,823	90,518
255	0,0131	0,0140	0,0181	60,532	87,026	90,373
270	0,0132	0,0149	0,0187	60,560	88,77	91,616
285	0,0128	0,0152	0,0189	59,954	89,8	92,405
300	0,0130	0,0144	0,0181	59,714	87,227	90,061
315	0,0130	0,0149	0,0197	60,226	88,977	94,229
330	0,0130	0,0148	0,0185	60,349	88,875	91,284
345	0,0132	0,0146	0,0191	60,695	88,568	93,425
360	0,0132	0,0150	0,0187	60,806	89,493	91,761
375	0,0130	0,0148	0,0192	60,396	89,391	94,093
390	0,0130	0,0146	0,0190	27,061	88,671	93,118

Annexes

Tableau IV.15. Les mesures de enthalpie et l'humidité absolue quant $T=60^{\circ}\text{C}$

t (min)	X_1 ($\text{kg}_e/\text{kg}_{as}$)	X_2 ($\text{kg}_e/\text{kg}_{as}$)	X_3 ($\text{kg}_e/\text{kg}_{as}$)	h_1 (kJ/kg_{as})	h_2 (kJ/kg_{as})	H_3 (kJ/kg_{as})
0	0,0117	0,0177	0,0194	57,394	106,161	91,577
15	0,0123	0,0168	0,0218	57,476	104,733	101,913
30	0,0120	0,0163	0,0222	56,225	103,904	104,626
45	0,0115	0,0164	0,0222	54,300	102,997	104,493
60	0,0110	0,0155	0,0209	52,469	100,956	103,006
75	0,0104	0,0151	0,0201	55,377	99,640	99,740
90	0,0113	0,0158	0,0210	55,615	100,190	101,424
105	0,0115	0,0165	0,0217	58,296	104,767	104,695
120	0,0125	0,0175	0,0230	56,819	106,928	109,966
135	0,0117	0,0165	0,0212	58,198	103,437	103,556
150	0,0124	0,0173	0,0219	58,494	106,471	106,120
165	0,0123	0,0169	0,0221	56,668	105,618	107,752
180	0,0117	0,0169	0,0225	58,024	105,203	109,612
195	0,0123	0,0169	0,0217	55,175	105,307	106,805
210	0,0111	0,0154	0,0205	53,741	100,620	103,759
225	0,0108	0,0150	0,0213	52,168	99,615	107,340
240	0,0102	0,0138	0,0190	53,500	95,390	99,682
255	0,0109	0,0154	0,0202	53,225	100,620	102,921
270	0,0104	0,0149	0,0200	51,002	99,073	103,312
285	0,0096	0,0136	0,0180	26,357	95,628	97,287

Annexes



Photographie de la balance :

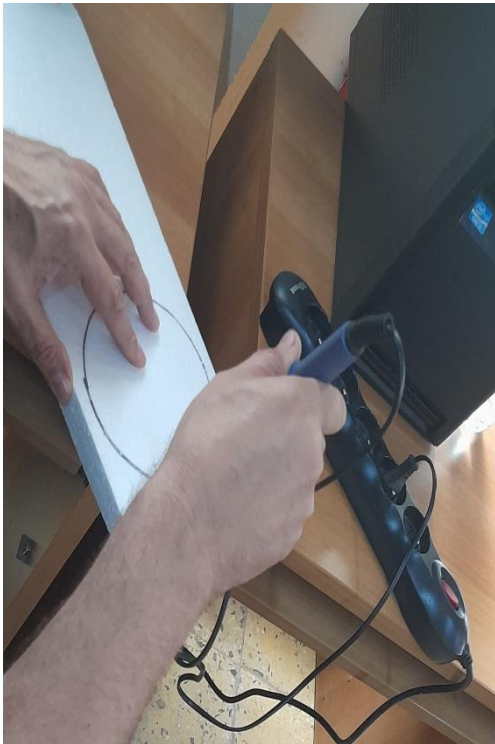


Illustration de la fermeture de la sortie d'air pour tenir compte du débit d'air

Annexes



Une illustration du poids final d'un échantillon à $T=40^{\circ}\text{C}$

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Jatau S. H et al. Effect of heat on lycopene content of hot peppers (*Capsicum annum*) Using various processing temperature.. International Journal of Science & Engineering Technology.2018.
- [2] Oussama Bousaria. Étude d'un Séchoir solaire à convection forcée pour les séchés d'orange à Biskra. master académique. Université Mohamed Khider de Biskra.2021
- [3] AMROUCHE. le séchage. génie alimentaire. 05 février 2014
- [4] CETIAT. Les procédés de séchage dans l'industrie 2017 .Publisher on Mar 27, 2017
- [5] Hamadi Ahlam et al. L'étude De Séchage Solaire d'une Plante Médicinale De La Région D'Adrar. Master en Physique énergétique. Université d'adrar.2021.
- [6] Jorge Alvar-Beltrán et al. Farmers' Perceptions of Climate Change and Agricultural Adaptation in Burkina Faso. Atmosphere 2020, 11, 827; doi:10.3390/atmos11080827.
- [7] Khadija Zoabi et al. étude de l'efficacité d'un séchoir solaire dans la région du sud-est de l'Algérie. Master académique. Université Ahmed Hama à El wadi. Faculté des sciences exactes. Département de physique. 2021.
- [8] Aati Mokhtar. Contribution à l'Amélioration d'un Séchoir Solaire pour les Cultures Agricoles. Master académique. Université de Kasdi Merbah Ouargla .2011. pp. 16-36.
- [9] Théorique et calcul. Technique de l'ingénieur génie des procédés séchage.
- [10] Mohamed Salim Ali Shteyeh et al. séchage solaire des fruits et légumes, expériences de Palestine. Centre de recherche sur la biodiversité et l'environnement Tel. Naplouse. Palestine.
- [11] Qadri chahra. une étude comparative expérimentale et numérique du transfert de chaleur dans un séchoir solaire. Master académique. Domaine des sciences des matériaux. Université Martyr Hama Lakhdar à ElWadi. 2019.
- [12] André CHARREAU et al. Théorie et calculs. Techniques de l'Ingénieur, traité Génie des procédés J 2 480.pp.1-25
- [13] ADEME/DABEE/Département Industrie et Agriculture .20/06/2006.
- [14] <https://adlat.net/showthread.php?t=389514> 24/04/2021

Bibliographie

- [15] Dadda Maroua et al. Séchage et qualité des aliments par le procédé de séchage solaire (indirecte) dans une zone aride. master académique. Université de kasdi merbah ouargla. 2020.
- [16] schéma et photo en génie chimique. Azprocede. pp8/89
- [17] Hebler Process Solutions. Séchoir à double tambour à pression atmosphérique Manufactured. GLS germany. USA.
- [18] Jean-François Cruz et al. La transformation des grains. Éditions Quæ CTA. Presses agronomiques de Gembloux. Agricultures tropicales en poche
- [19] Saf Anis et al. Etude de cas séchage de deux matrices végétales par étuve. d Master académique. Université de Bejaia. 2018.
- [20] Nadia chalal. Etude d'un séchoir solaire fonctionnant en mode direct et indirect. Master académique en génie climatique. Université mentouri constantine. 2007.
- [21] Said Bachir. Modélisation mathématique de séchage solaire indirect des dattes Deglet-Nour réhumidifiées. Master Académique. Université kasdi merbah ouargla. 2015.
- [22] Saddaoui Massinissa. Etude et réalisation d'un séchoir électrique automatique en vue de son Utilisation dans un laboratoire de recherche agro-alimentaire. Master Académique en Génie mécanique énergétique. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou Faculté du Génie de la construction. 2016
- [23] Sécher des produits alimentaires. Techniques, procédés, équipements, GRET, 1995
- [24] Akmel Djedjro. Séchage solaire des fèves de cacao. Etude expérimentale et modélisation de la cinétique de séchage. Thèse de doctorat en Sciences et Technologies des Aliments. Université d'Abobo-Adjam.
- [25] : Handdy Kalengi. Détermination des isothermes de sorption (adsorption-désorption) (cas de l'aubergine (*solanum melongena* l.)). mémoire online. Université de Kinshasa - Ingénieur Agronome. 2014.
- [26] khaldi souheyla. Formulation d'un problème de transfert de chaleur . Modes de transfert de chaleur. université telmcen. dz. 2019.
- [27] <https://www.aci-resistance.com/nos-produits/resistances-chauffantes-a-ailettes/>.