

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté du Génie de la construction,
Département de génie mécanique, Energétique.



Mémoire

En vue de l'obtention du Diplôme de Master
Académique en Génie mécanique, spécialité
énergétique

Thème :

*Etude et réalisation d'un séchoir
électrique automatique en vue de son
utilisation dans un laboratoire de
recherche agro-alimentaire*

Proposé par :

Mr H. Salhi

dirigé par :

Mr N. Lamrous

Réalisé par :

Saddaoui Massinissa

Promotion « 2015/2016 »



Remerciements

Je commence par remercier Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage, la volonté, et surtout la patience pour pouvoir réaliser ce modeste travail.

Je tiens à exprimer mes remerciements et ma profonde considération à :

❖ *Mon promoteur: Mr N. Lamrous d'avoir accepté de diriger ce modeste travail, pour sa disponibilité et ses conseils précieux permettant la réalisation de ce travail.*

❖ *Mr H. Salhi, pour le financement de ce travail et pour le temps précieux qu'il a consacré à m'orienter.*

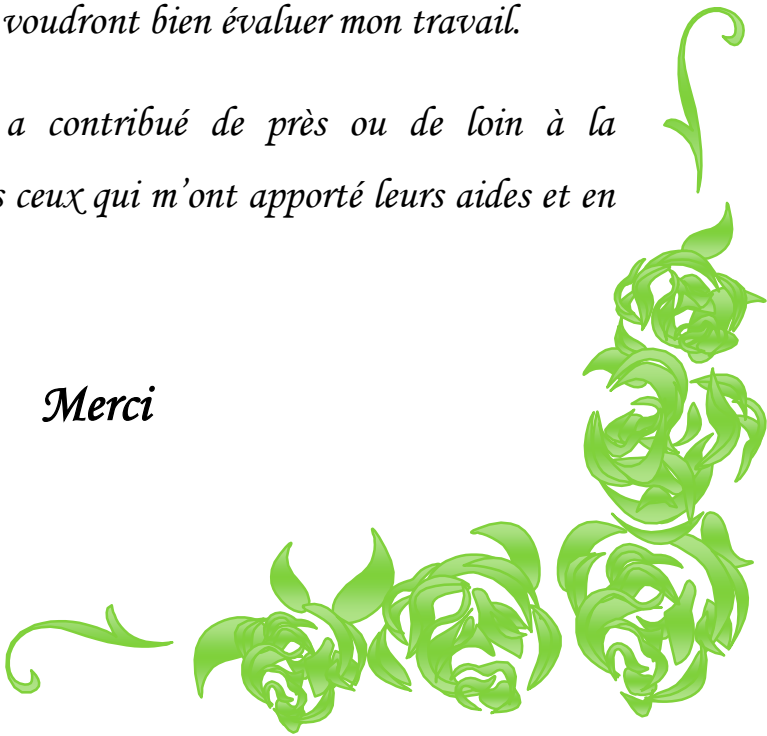
❖ *Mr Mamau d'avoir mis à notre disposition le matériel expérimental dont nous avons besoin.*

❖ *Mon frère Rafik pour son soutien et pour le temps qu'il a consacré à la réalisation du système automatique.*

❖ *Les membres du jury qui voudront bien évaluer mon travail.*

❖ *A toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail, à tous ceux qui m'ont apporté leurs aides et en particulier Ahmed Zeboudj.*

Merci



Dédicaces :

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents.

Mes frères et mes sœurs : Rachida (Son mari Mohand

Et son fils Hend), Lamia, Yassina,

Rafik et Taefarinas

*Et à Tous mes ami (e)s : Mouloud Andjouh, Faredj
Mehdi, Ahmed Zeboudj, Moukran Machene, Krim
Redouene, Amen Meradi, Hocem Ouakour,
Amoukrane Makhlouf, Rafik Nait, Mina Mennour,
Ouiza Ghaleb, ...*

Sommaire

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Partie 1 : Etude théorique

Chapitre I : Généralités sur le séchage et les séchoirs

I.1. Introduction	3
I.2. Comment préciser le choix du matériel	3
I.3. Spécification des contraintes et impact sur le choix d'une technologie	4
I.4. Les différents modes de séchage	5
I.5. Les différents types de séchoirs	6
I.6. Généralités sur la conception	7
I.6.1. L'analyse fonctionnelle	7
I.6.1.1 Recensement des fonctions	7
I.6.2.1 Arborescence produits	9
I.6.2.2 Arborescence topologique	10
I.6.2.3. Représentation de la configuration finale	10
I.6.2. Principe de fonctionnement	11
I.6.3. Les paramètres de contrôle du processus de séchage	12
I.6.4 Mesure de la consommation d'énergie électrique	14
I.6.5 Evaluation de la consommation énergétique massique totale (CEM)	14
I.7. Séchage du produit agro-alimentaire par entraînement	14
I.7.1 Définition et caractéristiques de séchage thermique	14
I.7.2 Principe de conservation de la matière sèche	16
I.7.3 Activité de l'eau dans le produit.....	17
I.7.4 Isothermes de sorption	17
I.7.4.1 Equilibre air-produit	17
I.7.4.2 Courbe des Isothermes de sorption	17
I.7.4.3 Détermination expérimentale des isothermes de sorption	18
I.7.4.4 Modèles de description des isothermes de sorption.....	19
I.7.5. Stabilité des produits biologiques	19
I.8. Cinétique du séchage et modélisation.....	20
I.8.1 Les courbes de séchage	20
I.8.2 Les différentes phases de séchage	22
I.8.3 La vitesse de séchage	23
I.8.4 Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage	24
I.8.4.1 Influence de la température de l'air.....	24

I.8.4.2 Influence de la vitesse de l'air	24
I.8.4.3 Influence de l'humidité de l'air	24
I.8.5 Développement de la modélisation mathématique des transferts lors du séchage	24
I.9. Conclusion	25

Chapitre II : Modélisation du séchoir

Introduction

II.1. Hypothèses simplificatrices	26
II .2. Les Transferts thermiques et massiques	26
II .2.1 La convection	26
II .2.1.1 Les nombres adimensionnels	26
II .2.1.2. Effet du vent	27
II .2.1.3 Ecoulement parallèle à une plaque plane	28
II .2.1.4 Ecoulement forcé dans les conduites	28
II .2.1.5 Ecoulement forcé dans les conduites rugueuses	29
II.2.2 La conduction	29
II .2.3 Evaporation	30
II .2.4 Transfert de masse	30
II .2.4.1 Evaporation de l'eau en surface libre	30
II.2.4.2 Migration de l'humidité à l'intérieur du produit	31
II.2.4.3 Coefficient d'échange massique interne	31
II.3. Bilans thermique et massiques des éléments du système	32
II.3.1 Bilans thermique des éléments du système	32
II.3.1.1 Pour l'air de séchage	33
II.3.1.2 Pour le produit	33
II.3.1.3 Analogie électrique	34
II.3.1.4 Détermination des paramètres intervenant dans le bilan thermique au niveau du séchoir	34
II.3.2 Transfert massique des éléments du système	36
II.3.2.1 vitesse de séchage. Modèle de combes	36
II.3.2.2 Description	37
II.4. Etablissement du système d'équation et méthode de résolution	38
II.4.1 discrétisation des équations au niveau du séchoir	38
II.4.2 Méthode de résolution	39
II. 5. Modélisation globale simplifiée du séchoir	41
II.5.1. Les propriétés de l'air à la sortie : W_2 , T_2	41
II. 5.a. phase à vitesse constante.....	42
II. 5.b. phase de ralentissement	42

Conclusion.....	43
-----------------	----

Partie 02 : étude pratique

Chapitre 3 : Conception et réalisation du séchoir

III.1. Introduction	44
III.2. La conception et le dimensionnement du séchoir	44
III.2.1. Les éléments constitutifs du séchoir.....	44
III.2.2. Paramètres réglables du séchoir	47
III.2.2.1. Température de l'air de séchage	47
III.2.2.2. Vitesse de l'air de séchage	47
III.2.3. Paramètres mesurables du séchoir	47
III.2.3.1. L'humidité et la température de l'air asséchant	47
III.2.3.2. Perte de masse du produit	47
III.2.3.3. Consommation énergétique au cours du séchage.....	47
III.2.4. Commande et acquisition des données	47
III.3. Procédure de réalisation des éléments du séchoir	48
III.3.1. Montage du coffret	48
III.3.2. Le ventilateur	48
III.3.3. La résistance chauffante	49
III.3.4. Réalisations des circuits électriques	49
III.3.5. La commande et la régulation (la boîte de commande)	49
III.3.6. Processeur principal de technologie ATMEL, capteurs de température, d'humidité SHT75 et de pression MPX4250.....	51
III.3.7. Le circuit de puissance	51
III.3.8. Capteurs de température et d'humidité	51
III.3.9. Remarques	52
III.3.10. Capteur de pression	52
III.3.10.1. Le montage complet	53
III.4. Conclusion	54

Chapitre 4 : Expérimentation et interprétations des résultats

IV.1. Introduction	55
IV.2. Fiches produits (la tomate)	55
IV.3. Détermination de la cinétique de séchage de la tomate en étuve 'Memmert'	
IV.3.1. Etuvage.....	56
IV.3.2. Méthodologies d'obtention des courbes de séchage	56
IV.3.3. Evolution de l'humidité absolue du produit au cours du séchage	56
IV.3.4. La teneur en eau d'équilibre de la tomate	57

IV.3.5 Vitesse de séchage	57
IV.4. Description et caractérisation du dispositif expérimental	57
IV.4.1. Le dispositif expérimental	57
IV.4.2. Première mise en route	58
IV.4.3. Procédure expérimentale	58
IV.4.4. Remarques.....	59
IV.4.5. Relevé des valeurs	59
IV.4.6. Arrêt de l'installation	59
IV.4.7. Exploitation des résultats	59
IV.5. Devis quantitatif du séchoir	60
IV.6. Interprétation des résultats	61
IV.6.1. Traitement des données expérimentales	61
IV.6.2. Traitement des données théoriques	61
IV.7. Conclusion	66
Conclusion générale	67

Annexes A₁

1. Caractéristiques et quelques généralités sur les propriétés de l'air de séchage	69
1.2. Le pouvoir évaporatoire de l'air.....	69
1.2.1. Humidité absolue (humidité spécifique)	69
1.2.2. Humidité relative (degré hygrométrique)	70
1.3. Températures caractéristiques de l'air humide	70
1.3.1. Température du bulbe sec	70
1.3.2. La température humide T_h	70
1.3.3. La température de rosée T_r	70
1.4. Taux de saturation	71
1.5. Influence de la température et de la pression	71
1.6. Volume spécifique de l'air humide	71
1.7. Masse volumique de l'air (ρ)	72
1.8. Chaleur spécifique de l'air humide	72
1.9. Fraction massique de la vapeur d'eau	72
1.10. Pression de vapeur saturante	72
1.11. Chaleur latente de l'air	73
1.12. Enthalpie de l'air humide	73
1.13. La température de l'air	74
1.14. Le mélange d'air humide	74
2. Caractéristiques de produit humides	74

2.1. La teneur en eau du produit humide	74
2.1.1. La teneur en eau à base sèche.....	75
2.1.2. La teneur en eau à base humide	75
2.2. Hygroscopicité	75
3. Les appareils de contrôle du processus de séchage	76
3.1. La mesure de l'humidité de l'air humide	76
3.2. La mesure de la température sèche	76
4. Où et comment mesurer une température?	77
5. Détermination des débits d'air par exploration du champs de vitesses de l'air dans une conduite	78
Annexe A.2.....	80
Bibliographie	

Nomenclature

Symbole Désignation Unités

$a :$	Diffusivité thermique.	m^2/s
$a_w :$	activité de l'eau dans le produit.	
$C_{pa} :$	chaleur massique de l'air.	$J. kg^{-1}.k^{-1}$
$C_{pb} :$	chaleur massique de la base.	$J. kg^{-1}.k^{-1}$
$C_{pe} :$	chaleur massique de l'eau.	$J. kg^{-1}.k^{-1}$
$C_{pf} :$	chaleur massique de produit.	$J. kg^{-1}.k^{-1}$
$C_{pp} :$	chaleur massique de la paroi latérale.	$J. kg^{-1}.k^{-1}$
$L_v :$	chaleur latente de vaporisation de l'eau	$J. kg^{-1}$
$C_i :$	concentration moyenne de la vapeur d'eau dans le produit.	kg/m^3
$C_s :$	concentration de saturation de l'air.	kg/m^3
$C_v :$	concentration de la vapeur d'eau dans l'air.	kg/m^3
$D_c :$	coefficient de diffusion de la vapeur d'eau.	m^2/s
$D_{ma} :$	débit massique de l'air.	kg/s
$h_{cbd} :$	coefficient d'échange conductif à travers la base.	$w/m^2.k$
$h_{cab} :$	coefficient d'échange convectif air-base.	$w/m^2.k$
$h_{caf} :$	coefficient d'échange convectif air-produit.	$w/m^2.k$
$h_{cap} :$	coefficient d'échange convectif air-paroi.	$w/m^2.k$
$h_{cpd} :$	coefficient d'échange conductif de la paroi.	$w/m^2.k$
$h_{cbd} :$	coefficient d'échange conductif de la base.	$w/m^2.k$
$h_{mi} :$	coefficient d'échange massique interne de transfert de masse.	m/s
$h_{me} :$	coefficient d'échange massique externe de transfert de masse.	m/s
$\dot{m} :$	masse d'eau évaporée par unité de temps et de surface	$kg/s.m^2$
$p_{ev} :$	puissance échangée par évaporation.	w
$Q_a :$	puissance perdue par l'air.	w
$Q_v :$	débit d'air massique.	kg/s

S_f :	surface offerte par le produit à l'air.	m^2
S_b :	surface d'échange air-base.	m^2
e_p :	épaisseur de la paroi.	m.
e_p :	épaisseur de la base.	m.
D_h :	diamètre hydraulique.	m
D_f :	diamètre Moyen du produit	m.
P_p :	périmètre mouillé de la paroi	m
S_p :	surface d'échange air-paroi interne.	m^2
T_a :	température de l'air dans l'enceinte de séchage.	k
T_{a1} :	température d'entrée de l'air dans le séchoir.	k
T_a :	température de l'ambiance du séchoir.	k
T_p :	température de la paroi.	k
T_b :	température de la base.	k
T_{am} :	température extérieure.	k
T_f :	température du produit.	k
v_a :	vitesse de l'air.	m/s
w :	humidité absolue de l'air.	kg eau /kg as
h_r :	humidité relative de l'air.	%
h_{req} :	humidité relative d'équilibre de l'air.	%
X :	teneur en eau à base sèche	kg eau /kg ms
x :	teneur en eau à base humide	kg eau /kg mh
x_0 :	teneur en eau initial de produit a base sèche	kg eau /kg ms
p_v :	pression partielle de vapeur d'eau dans l'air.	Pa
p_{vs} :	pression de vapeur saturante dans l'air.	Pa
p_{vp} :	pression de vapeur d'eau a la surface du produit.	Pa
m_f, m_1, m_h	masse de produit humide	kg
M_e :	masse d'eau contenue dans le produit.	kg

m_s :	masse de matière sèche.	kg
m_{as} :	masse d'air sec.	kg
Δx :	pas d'espace.	M
Δt :	temps de séjour de l'air dans l'enceinte de séchage.	s
δt :	pas du temps.	s
λ :	Conductibilité thermique.	w/m.k
μ :	viscosité dynamique de l'air.	Pa.s
ν :	viscosité cinématique de l'air.	Kg/ms
ρ :	masse volumique.	kg/m ³

Nombres adimensionnels

Gz :	nombre de Gratz	$= Re_e.Pr.D_h/L$
Le :	nombre de Lewis.....	$= a/D_c$
Nu :	nombre de Nusselts.....	$= h_c.L/\lambda$
Pr :	nombre de Prandtl.....	$= \nu/a = \mu.C_p/\lambda$
Re :	nombre de Reynolds.....	$= \rho.v.L/\mu$
Sc:	nombre de Schmidt.....	$= L_e.Pr = \nu/D_c$
Sh:	nombre de Sherwood.....	$= h_e.L/D_c$
St :	nombre de Stanton (Margoulies).....	$= hc/\rho.v.c_p$
		$= Nu/Re.Pr$

Les indices

a : air

am : l'air ambiant

f : le produit

p : la paroi

b : la base

La liste des figures

Figure I.1 : Arborescence produit du séchoir	9
Figure I.2 : l'arborescence topologique	10
Figure I.3: Configuration finale du séchoir ; vue de face.	11
Figure I.4 : Configuration finale du séchoir ; vue de droite.....	11
Figure I.5: Les principes du séchage à l'air chaud.....	15
Figure I.6: Modélisation du séchage à deux composants, eau et matière sèche. Teneur en eau w (kg d'eau/kg de produit, base humide)	16
Figure I.8: schéma représentatif du contacte air- produit	17
Figure I.9: La relation entre activité d'eau et la teneur en eau d'un produit.	18
Figure I.10: Isothermes de désorption déterminées à quatre températures différentes	19
Figure I.11 : Risques de détérioration des aliments en fonction de l'activité de l'eau.	20
Figure I.12: Variation de la teneur en eau du produit en fonction du temps	21
Figure I.13 : Vitesse de séchage en fonction du la teneur en eau	21
Figure I.14 : Vitesse de séchage en fonction de temps.	21
Figure I.15 : Schématisation des transferts pendant la phase a vitesse constante	22
Figure I.16 : Schématisation des transferts pendant la phase de ralentissement	23
Figure II.1: Transfert de vapeur sur une surface d'eau	32
Figure II.2: Coupe et définition des coefficients des transferts thermiques et massiques dans une tranche de produit.	34
Figure II.3 : Schéma électrique relatif au transfert de chaleur dans une tranche de séchoir.....	37
Figure II.4 : Modèle de Combes	38
Figure II.5 : la configuration du système coupé en tranches spatiales.....	40
Figure II.6 : organigramme de la méthode résolution.....	44
Figure III.1: La visualisation en 3D du séchoir obtenue avec solide Works.....	46

Figure III.2 : Proportions à donner à un divergent pour ventilateur.....	48
Figure III.3 : image du coffret	49
Figure III.4 : Cadres chauffants.....	49
Figure III.5 : courbe de la variation de la température en fonction du temps	50
Figure III.6 : image de la boîte de commande.....	50
Figure III.7: capteur de température et d'humidité.....	51
Figure III.8 : Graphe de précision en température absolue de SHT75	52
Figure III.9 : Graphe de précision en humidité absolue de SHT75.....	52
Figure III.10 : capteur de pression MPX4250.	53
Figure III.11: Schéma du securit électrique du séchoir	53
Figure IV. 1: dispositif expérimentale de séchage.....	58
Figure IV. 2: Tranches de Tomates (sur les claies du séchage) au début et à la fin de l'opération	63
Figure IV. 3: Evolution de la teneur moyenne en eau en fonction du temps de séchage (a $T=50^{\circ}\text{C}$).....	64
Figure IV. 4: Evolution de la teneur moyenne en eau en fonction du temps de séchage (a $T = 60^{\circ}\text{C}$).....	64
Figure IV. 5: Evolution de la teneur moyenne en eau en fonction du temps de séchage (a $T = 70^{\circ}\text{C}$)	65
Figure IV. 6: Evolution des temps de séchage finaux en fonction de la température de séchage	65
Figure IV. 7: évolution du temps de séchage en fonction de la masse de produit	66
Figure A.1: Représentation d'un échauffement a prression constante sur le diagramme de l'air humide.....	71
Figure A.2: Description d'un corps humide	75
Figure A.3: schéma explicatife de fonctionnement de psychomètre a deux thermomètres.....	76

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Contraintes liées au procédé global de production	04
Tableau I.2 : Contraintes liées au produit et à la sécurité de l'installation	05
Tableau I.3 : Classification des séchoirs selon la texture du produit.....	06
Tableau I.4: Raisons du choix du séchoir électrique	12
Tableau II.1: Coefficient d'échange et pertes thermiques dus au vent	28
Tableau IV.1: Paramètres de séchage	55
Tableau IV.2: déroulement de l'expérience n° 1 sur l'étuve Memmert	56
Tableau IV.3: déroulement de l'expérience n° 2 sur l'étuve Memmert	56
Tableau IV.4 : Quantité, désignation, caractéristiques et prix.....	60
Tableau A.1.1: Caractéristiques des appareils de mesure de vitesse d'air	79
Tableau A.2.1 : Exemple d'utilisation à grande échelle du séchoir à ventilation forcée en zone tropicale	82
Tableau A.2.2 : Limites des énergies solaire et électrique.....	83

Introduction générale

Introduction générale

Indéniablement le séchage intéresse de plus en plus les industries de matériaux (briques de terre sèche, céramiques, bois,...) ou textiles (lavage, teinture,...) ou encore les industries agro-alimentaires, et pharmaceutiques dont la conservation des produits est moins compliquée à réaliser par séchage et de loin plus économique que la conservation par le froid.

Le problème de la conservation des denrées agricoles pose très souvent dans le secteur de l'agroalimentaire où les pertes peuvent parfois dépasser 50% de la production [6]). En effet, placées dans des conditions d'ambiance, celles-ci entrent dans une phase de putréfaction irréversible, d'autant plus rapide que l'environnement est malsain. La conservation consiste alors à trouver des moyens de ralentir autant que possible ces transformations internes. Deux méthodes sont généralement employées.

- **Le froid intense:** il consiste à placer les denrées dans une ambiance saine, d'hygrométrie convenable et à basse température. Ici c'est la basse température qui ralentit la putréfaction.
- **Le séchage :** il consiste à soustraire du produit une partie de son eau, qui est un grand catalyseur des réactions de pourrissement.

La grande différence entre ces deux procédés de conservation se trouve dans l'aspect final du produit. Par réfrigération, on a un produit plus proche de son aspect initial que par séchage. Par contre, elle exige une mobilisation de la machine frigorifique et d'énergie durant toute la période de conservation, ce qui n'est pas le cas pour le séchage, où cette mobilisation est faite ponctuellement et une fois pour toute.

Il apparaît donc là tout l'intérêt économique du séchage. Le challenge étant alors de pouvoir offrir au consommateur un produit séché ayant gardé la majorité, sinon toutes ses propriétés nutritionnelles et organoleptiques. C'est dans ce sens que les techniques de séchage sont prometteuses.

Le dispositif conçu est un séchoir à convection et à recyclage d'air chaud utilisant de l'énergie électrique. Il est simple d'utilisation, facilement déplaçable, peu coûteux et doté d'un système de gestion automatique. C'est une ébauche de séchoir réalisée pour effectuer les premiers tests de séchage en laboratoire et qui va nous permettre d'envisager les modifications nécessaires à son amélioration, et faciliter les futurs travaux sur cette installation.

Pour mener ce travail qui s'inscrit dans le développement des technologies de séchage, nous l'avons structuré en deux parties (théorique et pratique) et quatre chapitres :

Le chapitre I qui s'intitule «généralités sur le séchage et les séchoirs» comprend l'état des connaissances concernant le séchage des produits agro-alimentaires et l'utilisation des approches théoriques simplifiées dans une étude bibliographique rappelant les lois physiques internes et externes des produits humides comme l'activité de l'eau et la cinétique du séchage et présentant les différentes lois fondamentales régissant le séchage.

Introduction générale

Le chapitre II intitulé «Modélisation du séchoir» est consacré aux équations des bilans thermiques et massiques de l'air asséchant et du produit à sécher et dont la résolution permet de simuler le fonctionnement du séchoir. Les résultats obtenus par ce modèle construit sur la base d'un certain nombre d'hypothèses simplificatrices sont comparés aux résultats expérimentaux.

Dans le Chapitre III intitulé «Conception et réalisation du séchoir », nous décrivons le séchoir à travers quelques photographies du montage et en donnant les détails de sa conception et réalisation ainsi que ses dimensions.

Le Chapitre IV nommé : «Résultats expérimentaux et interprétations» comprend :

- Des expériences faites sur une étuve pour la mesure de la teneur en eau initiale et la détermination de la cinétique de séchage du produit.
- Des expériences faites sur le séchoir pour tester son bon fonctionnement et en visant les objectifs suivants:
 - Régler les différents paramètres du séchoir.
 - valider le modèle numérique présenté.
 - étudier les possibilités d'économie d'énergie.
- l'interprétation et la discussion des différents résultats expérimentaux.

Nous terminons ce travail par une conclusion qui englobe l'interprétation générale de l'étude suivie par des recommandations et des perspectives.

Chapitre I:

Généralités sur le séchage et les séchoirs

I.1. Introduction :

Le séchoir en question est un dispositif conçu pour effectuer des opérations de séchage dans un laboratoire agroalimentaire où l'objectif principal est l'analyse et la valorisation des produits tels que la tomate, objet d'étude en particulier. La valorisation de ce produit nécessite le passage par une phase de séchage, précédée elle-même par des opérations tests effectuées pour déterminer certaines caractéristiques du produit.

La réalisation des séchoirs nécessite d'avoir une connaissance approfondie des phénomènes intervenant lors du séchage. Le présent travail traite essentiellement du séchage convectif par arrivée d'air chaud sur le produit à sécher, car c'est la technique la plus simple et la plus efficace.

I.2. Comment préciser le choix du matériel :

Cette question permet de sélectionner quelques séchoirs adaptés aux besoins. Le choix définitif peut se faire sur plusieurs critères [1]:

- Les systèmes de séchage déjà utilisés dans le laboratoire :

La connaissance du matériel déjà utilisé est une source d'information particulièrement intéressante pour choisir notre système. On peut ainsi apprécier les performances, les difficultés rencontrées pour la conduite du séchage, et les problèmes de maintenance...

- Le dimensionnement du séchoir

Le dimensionnement, c'est en premier lieu le calcul des éléments du séchoir: taille et capacité de la chambre de séchage, débit d'air, de façon à obtenir un matériel adapté aux besoins de séchage sur la saison.

Cette étape permet d'éviter de graves erreurs: par exemple s'équiper avec un matériel beaucoup trop grand ou beaucoup trop petit par rapport aux besoins.

- déjà expérimentés et utilisés sur le terrain.
- la définition des besoins et des contraintes.

Bien que central, le choix d'un procédé de séchage ne se limite pas à celui d'un seul sécheur. Une installation de séchage comprend un certain nombre de dispositifs annexes mais essentiels qui visent :

- à prétraiter le produit humide (mise en forme, déshydratation mécanique) ;
- à le post-traiter (refroidissement, granulation) ;
- à conditionner l'air de séchage (filtration, ventilation, déshumidification, chauffage) ;
- à traiter les émissions gazeuses (dépoussiérage et lavage) ;
- enfin à revaloriser l'énergie disponible.

L'ensemble de ces équipements périphériques sont importants pour le bon fonctionnement du procédé et l'atteinte des objectifs de production.

I.3. Spécification des contraintes et impact sur le choix d'une technologie :

De nombreux types de séchoirs peuvent être adaptés au séchage d'un même produit. Le choix d'une technologie ne repose pas exclusivement sur les cinétiques de séchage et sur les propriétés thermodynamique à l'équilibre du matériau mais doit inclure des contraintes spécifiques à une situation donnée. Ces contraintes sont liées[1]:

- au produit à traiter (stockage, alimentation, structure, aptitude à l'écoulement, collage...);
- à la sécurité de l'installation (nature du solvant, toxicité, inflammabilité...);
- au procédé de production (débit, teneur en eau initiale, teneur en eau finale souhaitée, utilités disponibles...);
- aux propriétés d'usage que l'on cherche à conférer au produit sec, notamment en termes de granulométrie et de masse volumique apparente;
- des critères d'ordre technique: le séchoir doit satisfaire aux exigences requises pour un séchage adapté au produit traité, aux quantités à traiter, et au terrain (en particulier le degré hygrométrique de l'air...);
- des critères d'ordre économique: le séchoir doit satisfaire, et mieux que d'autres séchoirs envisageables sur le plan technique, les exigences économiques de l'activité (rentabilité financière en premier lieu, et souvent la qualité du produit et la régularité de la production).

En effet, outre la réduction de la teneur en eau du produit, le séchage peut permettre de texturer, structurer, stabiliser, hygiéniser, torréfier... le produit.

Une liste non exhaustive de contraintes susceptibles d'être prises en compte pour le choix d'une technologie est proposée dans les tableaux (1) et (2). [1]

Mode de fonctionnement du séchoir	continu, discontinu
Utilités disponibles avec leurs caractéristiques	électricité, vapeur d'eau surchauffée, gaz de combustion, eau chaude...
Temps de séjour	court (< 10 mn), moyen (10-40 mn), long (> 1 h)
Dispersion du temps de séjour	contrôlée, incontrôlée
Règles sanitaires	traçabilité, hygiène
Contraintes de site	implantation, encombrement, sécurité
Contraintes diverses	récupération du solvant évaporé, refroidissement, stockage, capacité nominale, projet d'extension...

Tableau I.1 : Contraintes liées au procédé global de production.

Nature du solvant	eau, autres solvants organiques
Propriétés du solvant	toxicité, écotoxicité, inflammabilité, corrosivité
Propriétés du solide	Thermo sensibilité, écotoxicité, friabilité, abrasivité, solubilité
Propriétés du produit humide	humidité initiale, isotherme de désorption, chaleur isostérique de sorption
Structure du produit humide	liquide, pâteux, solides divisés, structure continue plane
Propriétés du produit final	humidité résiduelle, granulométrie, masse volumique, forme...
État du matériau dans le sécheur	statique, en mouvement, agité, vibré, dispersé, fluidisé, transporté
Température de séchage	inférieure au point triple, inférieure au point d'ébullition, supérieure au point d'ébullition
Pression dans l'enceinte de séchage	atmosphérique, sous vide, sous pression
Mode d'apport de chaleur	conduction, convection, rayonnement (UV-visible, IR, MO, RF) ou combinaison de ces modes
Écoulement relatif fluide caloporteur/produit	Cocourant, contre-courant, courants croisés, mixte

Tableau I.2 : Contraintes liées au produit et à la sécurité de l'installation [1].

I.4. Les différents modes de séchage :

Le séchage peut être effectué sous différents modes:

- Séchage par conduction: le produit est mis en contact avec des surfaces chaudes.
- Séchage convectif: on envoie sur le produit à sécher un courant gazeux chaud qui fournit la chaleur nécessaire à l'évaporation du liquide et entraîne la vapeur formée.
- Séchage par infrarouge: un rayonnement infrarouge est appliqué sur le produit. Exemples: le séchage industriel des vernis et des peintures, du bois, des papiers, des pellicules photographiques,...
- Séchage par micro-ondes : Exemples : séchage d'encre, séchage de peintures, séchage d'adhésifs, séchage sous vide de produits pharmaceutiques, ...

- Séchage solaire : l'énergie solaire est utilisée pour sécher le produit. Il nécessite un ensoleillement suffisant.
- Séchage par atomisation : un liquide ou une suspension est dispersée sous forme de fines gouttelettes dans un courant d'air chaud. Exemples : fabrication du lait en poudre, d'engrais.
- Le séchage par condensation : où l'air circulant sur les produits sera déshumidifié sur une batterie froide, puis réchauffée sur une batterie chaude.

I.5. Les différents types de séchoirs :

Le séchage du produit solide peut être sous pression atmosphérique (air chaud ou vapeur d'eau surchauffée), sous vide simple ou poussé, ou par sublimation (lyophilisation). Les méthodes adoptées continuent d'être principalement dominées par le séchage industriel par air chaud.

Il existe une grande variété de séchoirs et selon le point de vue adopté, différentes façons de les classer. On peut par exemple retenir comme critères la texture du produit (tableau-3) qui détermine son mode de manutention et la manière dont on assure son contact avec l'air asséchant sur la surface chauffant [2]. Ce classement peut être se faire également selon le mode de fonctionnement et selon le mode de transfert de chaleur.

Produits	Séchoirs
Pompables (liquide, pâtes, fluides, etc.)	• A dispersion • A billes • A cylindre chauffants
Pâteux	• A cylindres chauffants • A bandes...
Pulvérulents susceptibles d'être émiettés (morceaux de légumes, pulpes, céréales, luzerne, amidon etc.)	• A tapis • A cylindre rotatifs • A descente par gravité • A lit fluidisé • A transfert pneumatique
En morceaux de l'ordre du cm (fruits, légumes, saucissons, fromage, etc.)	• Discontinue • A claies • A chariots

Tableau I.3 : Classification des séchoirs selon la texture de produit [2].

I.6. Généralités sur la conception :

Dans un projet comme le nôtre, aucune spécification normative sur la conduite du projet n'a été faite. Il est alors conseillé de faire une synthèse de la multitude de principes existants, en fonctions des ressources disponibles, des délais et de la complexité dudit projet.

Ainsi, la démarche consistée en les étapes suivantes :

I.6.1. L'analyse fonctionnelle :

Cette étude aura pour but de ressortir et bien délimiter les fonctions à remplir par le séchoir.

I.6.1.1 Recensement des fonctions :

Nous allons classer les fonctions en 4 catégories :

- Fonctions principales : ce sont elles qui justifient la raison d'être du produit ;
- Fonctions de service : elles sont liées à l'usage du produit. Ce sont ces fonctions qui sont directement visibles à l'utilisateur, et la qualité du produit en dépend donc ;
- Fonctions techniques : elles sont internes au produit, et elles dépendent du choix des solutions technologiques devant satisfaire les fonctions de service ;
- Fonctions contraintes : elles imposent des limites aux fonctions principales. Elles traduisent surtout les contraintes d'acceptation du produit en termes de normes, de résistance à l'environnement, d'esthétique, ...

Cette classification des fonctions peut être rendue plus fine, mais compte tenu de la relative faible complexité de la machine à concevoir, nous nous sommes arrêtés à ces 4 classes.

➤ **Les fonctions principales :**

Ici, nous n'avons qu'une seule fonction principale :

Fp: Sécher les produits agroalimentaires les plus courants (fruits et légumes) par convection forcée à l'air chaud.

➤ **Les fonctions de services :**

Nous les définissons par rapport aux critères d'acceptabilité du produit par l'organisme.

Fs1 : Avoir un encombrement semblable à celui des appareils ménagers habituels ;

Fs2: Etre de manipulation aisée ;

Les procédures de mise en marche, arrêt, réglage de la température de séchage et suivi du séchage doivent être simples.

Fs3 : Consommer peu d'énergie ;

- Fs4** : Sécher une large gamme de produits ;
- Fs5** : Etre fiable et facilement maintenable ;
- Fs6** : Etre peu coûteux en acquisition ;
- Fs7** : Valoriser les matériaux locaux ;
- Fs8** : Avoir une grande contenance ;
- Fs9** : Sécher rapidement.

➤ **Les fonctions techniques :**

Elles sont définies par rapport aux exigences techniques d'un séchage domestique optimal.

- Ft1** : Avoir une batterie de chauffage;
- Ft2** : Etre à ventilation forcée ;
- Ft3** : Avoir un circuit de recyclage d'air ;
- Ft4** : Etre de conception à deux blocs ;
- Ft5** : Permettre le contrôle et la visualisation de la température et l'humidité de séchage ;
- Ft6** : Avoir de faibles gradients de température ;
- Ft7** : Etre isolé par rapport aux transferts de masse d'air ;
- Ft8** : Etre connectable à un réseau électrique domestique.
- Ft9** : doté d'une balance pour mesurer le poids du produit
- Ft10** : lui raccorder un diffuseur à l'entrée pour diminuer les pertes de charges.

➤ **Les fonctions contraintes :**

Nous les définissons par rapport aux normes en vigueur dans le domaine de l'électroménager alimentaire.

Fc1 : Ne pas polluer les produits.

Fc2 : Avoir un niveau sonore acceptable.

➤ **Caractérisation des fonctions :**

Cette étape a pour but d'énoncer les critères d'appréciation de certaines fonctions précédemment définies.

➤ **Caractérisation des fonctions de services**

Ces caractérisations sont établies afin d'obtenir des performances nettement supérieures :

Fs1 : Les dimensions du séchoir doivent être semblables à celles d'un réfrigérateur petit modèle (50 l).

- Longueur : 100cm
- Largeur : 50cm
- Hauteur : 60cm

Fs2 : Les procédures de mise en marche, arrêt, réglage de la température de séchage et suivi du séchage doivent être simples.

Fs3 : La puissance du séchoir doit être au plus de 2 KW ;

Fs4 : La plage des températures de séchage doit être de $[+30^{\circ}\text{C} ; +70^{\circ}\text{C}]$;

Fs7 : Utiliser autant que possible du contre-plaqué pour les parois, et tout autre matériau local (plaques d'aluminium, plastique, ...).

➤ **Caractérisation des fonctions techniques :**

Ft2 : La vitesse de circulation de l'air doit être comprise entre $[0.5 \text{ m/s} ; 2 \text{ m/s}]$;

Ft6 : Avoir une baisse de température moindre en passant par les claies de séchage et généralement un espacement de 10cm entre claies est acceptable

Ft7 : L'étanchéité et l'isolation thermique seront faites de façon à respecter la contrainte de gradient thermique maximal de la fonction Ft6 ;

Ft8 : Les caractéristiques du réseau d'alimentation sont 220V-50Hz ;

Ft9 : La balance doit être électronique et connectée aux claies pour ne pas perturber l'opération de séchage et avoir des mesures instantanées du poids.

I.6.2. L'analyse topologique :

En se basant sur l'analyse fonctionnelle, cette étape se fait en deux étapes :

I.6.2.1 Arborescence produits :

Il faut ressortir les systèmes techniques devant réaliser les fonctions des produits, ainsi que leur interconnexion.

Maintenant que nous connaissons les fonctions à remplir et leur caractérisation, nous pouvons penser aux différents systèmes indispensables pour réaliser ces fonctions. Cette démarche conduit à l'arborescence produits suivante :

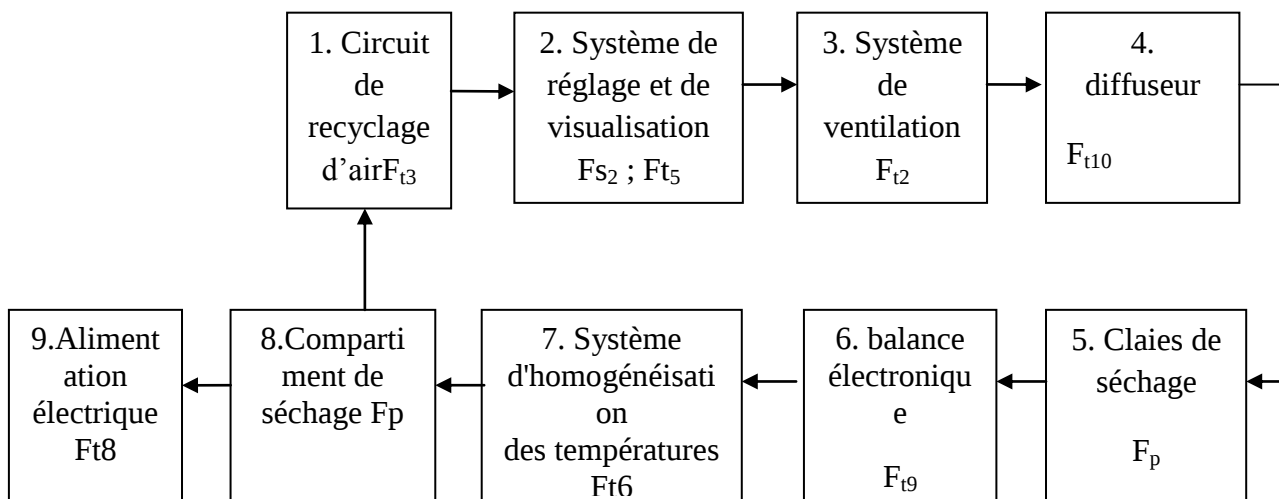


Figure I.1: Arborescence produits du séchoir

I.6.2.2 Arborescence topologique :

Elle précise la disposition spatiale des systèmes. Dans cette démarche nous sommes guidés par l'expression et la caractérisation des fonctions de services, techniques et contraintes de l'analyse fonctionnelle, mais aussi par les remarques suivantes :

- L'air doit se réchauffer lors de son passage par le cadre chauffant avant son passage dans le compartiment de séchage.
- La sortie du séchoir rejette une chaleur considérable, qu'on pourrait récupérer en plaçant cette tuyère dans le circuit de recyclage d'air.

Nous avons obtenu l'arborescence topologique de la figure suivante :

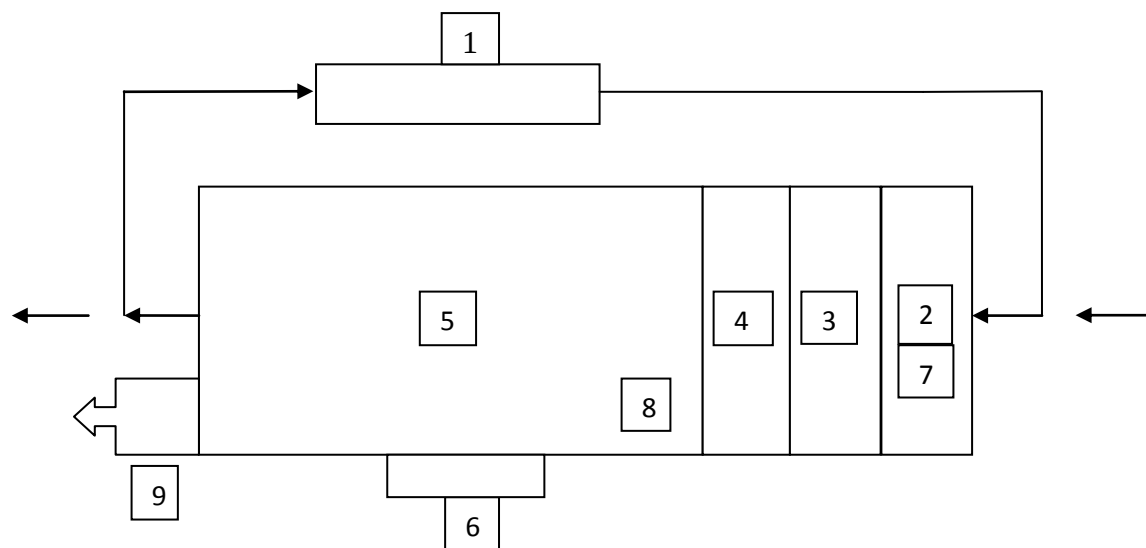


Figure I.2 : l'arborescence topologique

← : Sens de circulation d'air

I.6.2.3. Représentation de la configuration finale :

L'arborescence topologique renseigne sur la disposition spatiale des systèmes. Il reste à en déduire une configuration initiale, image schématique du futur séchoir.

Nous avons établi des configurations primitives que nous avons ensuite fait évoluer après plusieurs séances de concertation.

La configuration finale du séchoir retenue et les principaux éléments qui le composent sont représentés sur la figure suivante. On distingue le panier, le système de recyclage, le système de propulsion d'air (ventilateur, moteur, variateur de vitesse), la résistance électrique, un capteur d'humidité relative et de température, un système de mesure de vitesse d'air et la balance.

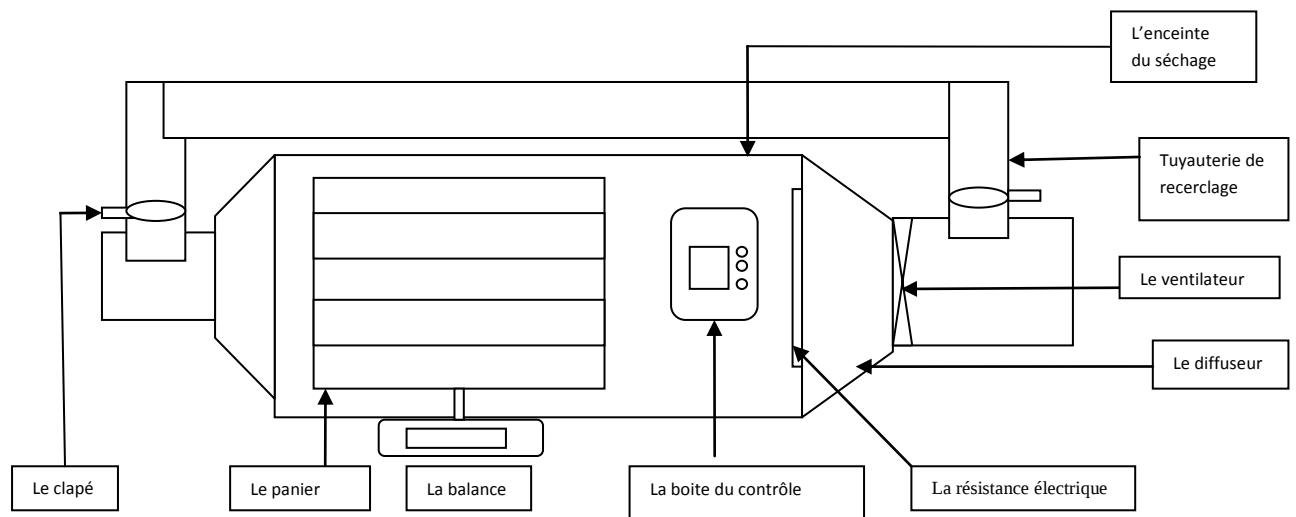


Figure I.3: Configuration finale du séchoir ; vue de face.

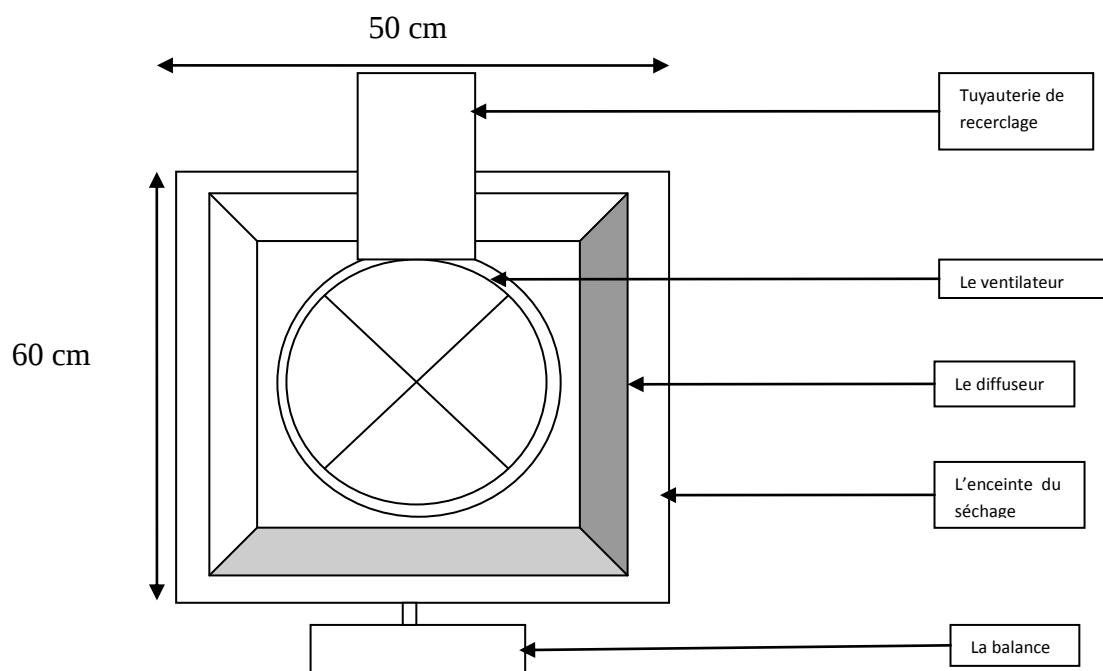


Figure I.4 : Configuration finale du séchoir ; vue de droite

I.6.2. Principe de fonctionnement :

Ce type de séchoir est défini par la puissance thermique, la durée de fonctionnement et le mode de chauffage. Le séchage à convection forcée est composé entre autres de la chambre de séchage, du ventilateur et de la résistance. Le ventilateur aspire l'air extérieur pour l'envoyer directement sur une batterie de résistance chauffante. L'air ainsi échauffé est envoyé à l'intérieur de la chambre de séchage où s'effectuent des échanges thermiques et

massique, puis rejeté à la sortie par la tuyère. Une partie de l'air réglée par la vanne (clapet) est recyclée. Le tableau suivant explique les raisons du choix d'un séchoir électrique.

Paramètre	Avantage	Application
Produit commercial	Gain de temps et contraintes des normes	Urbanisation poussée en Afrique, Exportation
Quantité du produit	Grande quantité de produit à sécher	Augmentation des surfaces cultivées Augmentation de la population
Coïncidence de la période de récolte avec la saison des pluies	Conduite du séchage en toute saison	Stockage et transport facile à moindre coût
Climat équatorial humide	Chauffage de l'air	Forte humidité de l'air
Présentation du séchoir	Esthétique	Utilisation aisée par les femmes en particulier
Durée de vie du séchoir	longue	Conservation du séchoir à l'abri des intempéries
Qualité du produit	Obtention de l'humidité la plus constante possible	Respect des normes
Recyclage de l'air	Economie d'énergie	
Durée de séchage	Gain de temps	
Surveillance	On peut faire autre chose durant le séchage	Protection contre les insectes et les rongeurs

Tableau I.4: Raisons du choix du séchoir électrique [3]

I.6.3. Les paramètres de contrôle du processus de séchage:

Pendant le séchage, il est nécessaire de contrôler:

- la température de l'air de séchage:

il faut la comparer à la température maximale admissible pour le produit, indiquée sur les « fiches produit » [4]. Ce paramètre ne devra pas excéder cette limite en phase III du séchage;

- la température du produit (pour éviter qu'elle soit supérieure à la température maximale du produit, à toutes les étapes du séchage) [4].

- les températures sèche et humide de l'air à la sortie du séchoir :

Avant, pendant et après le séchage, pour déterminer l'humidité de l'air (HR) [4]. Si celle-ci est nettement inférieure à l'humidité de l'air maximale, il faut envisager une diminution du débit D_s , de façon à laisser à l'air le temps de se charger d'avantage d'eau dans le séchoir (lors des phases à vitesse constante et de ralentissement (I et II)) u.

-le débit d'air D_s

- la vitesse et la direction du vent sur le site :

qui ont une influence sur le fonctionnement, sur le débit d'air dans le séchoir, sur la température du séchoir lui-même [4].

➤ Avant et après séchage:

- le taux d'humidité initial et final du produit**- le poids initial et final :**

Pour contrôler le rapport de séchage (R_s) (chacune de ces mesures permet d'obtenir l'autre).et sert essentiellement à déterminer expérimentalement la courbe des isothermes de désorption et les courbes caractéristiques du séchage, en calculant à chaque fois la teneur en eau du produit et les deux rapports très utiles: le rapport de poids et le rapport de séchage:

Les mesures des rapports des poids sont faites pour préciser:

- Le degré de séchage, qui peut être considéré comme satisfaisant lorsque le rapport poids initial/poids mesuré correspond au rapport poids initial/poids final conseillé sur les « fiches produit »;
- Le rythme de production, donc le rythme requis de l'approvisionnement en matière première et les capacités à satisfaire la demande du client dans les temps requis;
- La quantité de matière première dont on a besoin pour produire une certaine quantité de produit sec.

Des mesures régulières du rapport du séchage et du débit produit permettent par ailleurs de contrôler l'efficacité du séchoir. On peut en effet reporter sur un même graphe l'évolution constatée de l'inverse du rapport de poids R_s pendant le séchage et l'évolution considérée comme satisfaisante de ce rapport $1/R_s$ pour le produit considéré. Si les points de mesure sont au-dessus de la courbe de rythme de séchage conseillé, cela signifie que le séchage est trop lent. S'ils sont au-dessous, c'est l'inverse. Son utilité est que le rapport de séchage est important pour le scientifique qui peut ainsi mieux identifier la phase de séchage qui ne se produit pas de façon conforme aux exigences du séchage du produit considéré, et proposer ainsi des solutions. Il est aussi utile pour l'utilisateur qui peut contrôler l'avancement du séchage, et la bonne tenue dans le temps des caractéristiques du séchoir [4].

Il faut cependant éviter que les opérations de mesure perturbent le fonctionnement du séchoir. Une mesure matin, midi et soir est suffisante.

- Le taux de séchage :

La valeur finale de la teneur en eau du produit est importante, car elle caractérise le degré de séchage (très sec, sec, humidité intermédiaire) [4]. Arrêter le séchage au moment voulu permet d'éviter le sur séchage qui dégrade le produit (durcissement) ainsi que le gaspillage d'énergie et de temps.

Il n'existe pas de système de mesure en continu de cette teneur en eau. En unité artisanale, une méthode expérimentale consiste à préparer et isoler quelques échantillons (3 minimum) calibrés (masses de produit connues). Disposés correctement dans le séchoir, ils serviront en fin de séchage de lots «témoin ». On pourra calculer la teneur en eau du produit à chaque pesée de ces échantillons (au moment des permutations par exemple) [4].

En effet, connaissant la teneur en eau et le poids initiaux de l'échantillon, on en déduit la teneur finale. (Voir le chapitre IV, paragraphe IV.3.4).

Lorsque les lots sont homogènes, les pesées sont précisées et le carnet de relevé est mis à jour, on obtient un résultat satisfaisant.

I.6.4 Mesure de la consommation d'énergie électrique :

Elle est déterminée en fin de séchage, c'est-à-dire lorsque la teneur en eau finale au sein du produit atteint la teneur finale souhaitée. La valeur en Kilowattheure (Kwh) consommée relevée sur un compteur d'énergie électrique séparé permet la lecture de cette énergie et permet d'évaluer l'énergie totale consommée (E_{tot}) au cours de séchage par la relation :[9]

$$E_{tot} = n_{kwh} 3600 \quad \text{en KJ} \quad (I.1)$$

n_{kwh} : nombre de kWh consommé.

Le facteur « 3600 » représente le nombre de secondes par heure.

I.6.5 Evaluation de la consommation énergétique massique totale (CEM) :

$$CEM = \frac{E_{tot}}{M_e} \quad \text{en kJ/kg d'eau évaporée} \quad (I.2)$$

M_e : masse d'eau perdue au cours du séchage en kg.

I.7. Séchage du produit agro-alimentaire par entraînement :

Diverses techniques existent pour séparer l'eau d'un produit, qui ne supposent pas forcément sa vaporisation – pressage, égouttage, essorage centrifuge, etc. – et qu'on appellera d'une façon générale « déshydratation ». Le séchage qui demeure la technique la plus répandue et la plus utilisée est donc une technique particulière de déshydratation, le terme de séchage étant réservé au cas de la séparation par vaporisation du solvant. [Vasseur, 2008].

Notre étude présente en premier lieu un aspect bibliographique lorsque la compréhension des phénomènes mis en jeu repose sur une bonne connaissance des équilibres entre l'air et le produit et sur la maîtrise des cinétiques de séchage et le type de système choisi.

I.7.1 Définition et caractéristiques du séchage thermique:

Le séchage est une opération de séparation thermique consistant à retirer tout ou une partie d'un liquide imprégnant un corps dit « humide » par vaporisation de ce solvant. Le produit final est un solide, qualifié de « sec » même s'il contient une humidité résiduelle. [1]

Par séchage thermique, il faut 2.5 MJ dans le meilleur des cas pour évaporer un kilogramme d'eau (chaleur latente de vaporisation) [5].

Son avantage est qu'elle est rapide et garde relativement intacte la structure interne des corps.

Les phénomènes liés au séchage d'un corps humide sont :

- Le transfert de chaleur du gaz vers le corps humide sous l'effet d'un gradient de température.
- Le transfert de matière (d'eau) s'effectue du corps vers le gaz sous l'effet d'un gradient de pression partielle. [6][7]

Le séchage est utilisé pour différentes raisons ; on peut citer :

- Augmenter la durée de conservation des produits
- Stabiliser les produits agricoles et industriels.
- Produire des ingrédients ou des additifs pour une seconde transformation, également appelés produits alimentaires intermédiaires (PAI).(des légumes pour les potages, des oignons pour la charcuterie, des fruits pour la pâtisserie, des épaississants, arômes, colorants) [8]
- Réduction du poids et du volume ce qui facilite l'expédition.

D'autres problèmes liés au séchage classique peuvent être résolus avec la définition d'un nouveau procédé comme la détente instantanée Contrôlée (DIC) [16] à savoir :

- Réduire les risques d'altération de la forme comme le croutage.
- Améliorer les propriétés texturales en remédiant aux problèmes de dégradation de la structure,
- Eliminer les risques de contamination microbiologique, bactérienne et/ou par des insectes,
- Diminuer considérablement les pertes des qualités nutritionnelles ;
- Réduire les besoins énergétiques,
- Améliorer le rendement énergétique
- Intensifier considérablement la cinétique de l'opération.

Dans ce type de séchage, la convection est le seul mode de transfert prépondérant, néanmoins d'autres modes viennent se greffer à celui-ci et fournit une petite partie de la chaleur latente de vaporisation.[9]

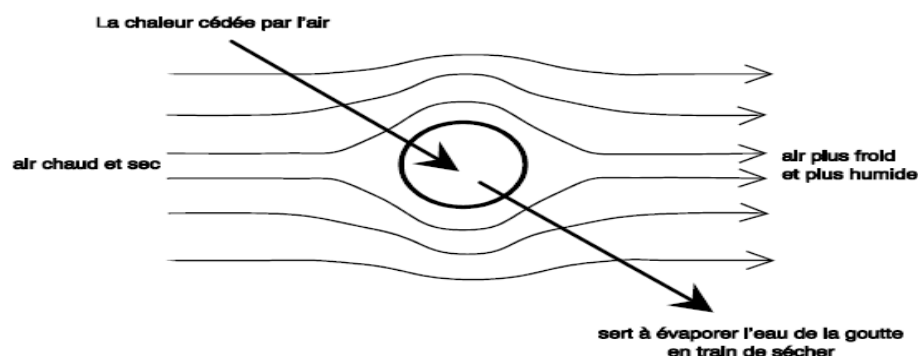


Figure I.5: Les principes du séchage à l'air chaud

I.7.2 Principe de conservation de la matière sèche

Au cours du séchage représenté sur la figure 1, on suppose que seule l'eau quitte le produit, et que le débit de la matière se conserve entre l'entrée et sortie en régime permanent (sans accumulation). Ce qui s'écrit pour un séchoir continu (indice 1 à l'entrée, indice 2 à la sortie) selon l'équation (I-3) exprimée en terme de débits de produit humide (m_{p1} , m_{p2}). On en tire le débit évaporatoire du séchoir m_e (kg/s) selon l'équation (I-4) [1].

$$m_{p1} (1 - w_1) = m_{p2} (1 - w_2) \quad (I.3)$$

$$m_e = m_{p1} - m_{p2} = m_{p1} \frac{w_1 - w_2}{1 - w_2} \quad (I.4)$$

La teneur en eau est ici définie comme $W = (\text{kg d'eau/kg de produit humide})$, dite « base humide », soit $0 < W < 1$.

D'une façon générale, le produit final P_2 n'est pas complètement sec, et contient encore une fraction du solvant. Cette teneur en eau résiduelle est un compromis nécessaire, dans la mesure où l'extraction des derniers pour-cent d'eau coûterait très cher en temps de séjour dans le séchoir, et qu'ils sont sans inconvénient majeur pour l'usage ultérieur.

En régime permanent, les débits massiques sont constants, indépendants du temps. En séchage discontinu ou « batch », les débits (kg/s) sont remplacés par les masses présentes $m(t)$ (kg), qu'évoluent dans le temps, partant de m_{p1} initiale, à m_{p2} finale, au fur et à mesure que la teneur en eau diminue.

La matière sèche est réputée non volatile contrairement au solvant (eau), même si en réalité d'autres molécules volatiles que l'eau peuvent aussi s'échapper sous forme de vapeur (perte d'arômes, dégagement d'odeurs,...), ce qu'on négligera ici en termes de masse et d'énergie. Le solvant, en général de l'eau qui se vaporise et quitte le produit sous forme de vapeur, est traitée soit pour des raisons d'environnement, soit pour récupérer de l'énergie par exemple.

I.7.3 Activité de l'eau dans le produit

L'activité de l'eau de dans le corps humide « a_w » est le rapport de la pression de vapeur à la surface de ce corps P_{vp} à la pression de vapeur saturante prise à la température de surface du corps P_{vs} , toutes les deux étant prises dans la même unité.

$$a_w = \frac{P_{vp}}{P_{vs}} \quad (I.5)$$

À l'équilibre hygroscopique entre le produit à sécher et l'air asséchant (absence des échanges entre eux) la pression P_{vp} et la pression partielle de vapeur contenue dans l'air P_v s'égalisent.

Alors l'activité de l'eau et l'humidité relative de l'air ϕ s'équilibrent ($a_w = \phi$) et le séchage s'arrête. Ainsi pour que le processus de séchage opère il faut que $a_w > \phi$; autrement

dit il faut que la pression de vapeur à la surface du produit soit supérieure à la pression de vapeur dans l'air asséchant ($P_{vp} > P_v$).

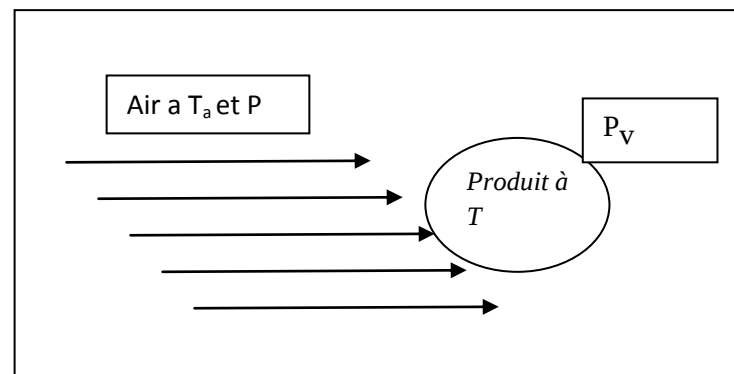


Figure I.8: schéma représentatif du contact air- produit

I.7.4 Isothermes de sorption :

I.7.4.1 Equilibre air-produit [10]

En pratique l'humidité d'équilibre est déterminée par les isothermes de sorption du produit. Ces courbes (isothermes de sorption) sont déterminées expérimentalement ; ainsi à l'équilibre hygroscopique, l'activité de l'eau dans le produit est identique à l'humidité relative de l'air.

La mesure de a_w corrélée à la teneur en eau des produits permet la détermination d'isothermes de sorption, courbes les plus utilisées dans les industries de séchage.

I.7.4.2 Courbe des Isothermes de sorption

Les isothermes de sorption permettant de déterminer la répartition et l'intensité de liaison de l'eau, sa disponibilité fonctionnelle dans les substances ainsi que la teneur en eau finale à atteindre à la sortie du séchoir [11].

La courbe représentant la teneur en eau d'un produit en fonction de la valeur de l'activité de l'eau a_w ou de l'humidité relative de l'air en équilibre H_r (figure suivante) est appelée :

- Isotherme d'adsorption, si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit sec.
- Isotherme de désorption si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit saturé en eau [12].

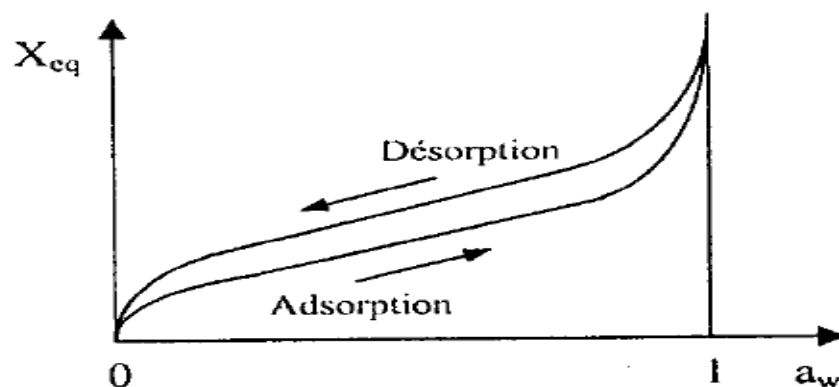


Figure I.9:Relation entre activité de l'eau et teneur en eau d'un produit. [13]

La figure (I.9) montre que les deux courbes sont en général différentes car le séchage d'un produit entraîne des modifications de structure et de porosité. Il y a donc un phénomène d'hystérésis.

I.7.4.3 Détermination expérimentale des isothermes de sorption :

La détermination des isothermes d'adsorption-désorption peut être effectuée avec la méthode gravimétrique statique. Cette méthode assure la régularisation de l'humidité par contact avec des solutions salines aqueuses au-dessus desquelles la pression de vapeur d'eau, à température donnée, est parfaitement connue. Ces solutions permettent d'obtenir des humidités relatives variant de 0,05 à 0,9 [14].

Nous avons relevé dans la littérature appropriée les courbes ci-dessous qui représentent les isothermes de désorption de la tomate déterminées expérimentalement par la méthode gravimétrique statique. Les tomates utilisées ont une teneur en eau initiale variant de 15,99 à 16,24 kg d'eau/kg de matière sèche [15].

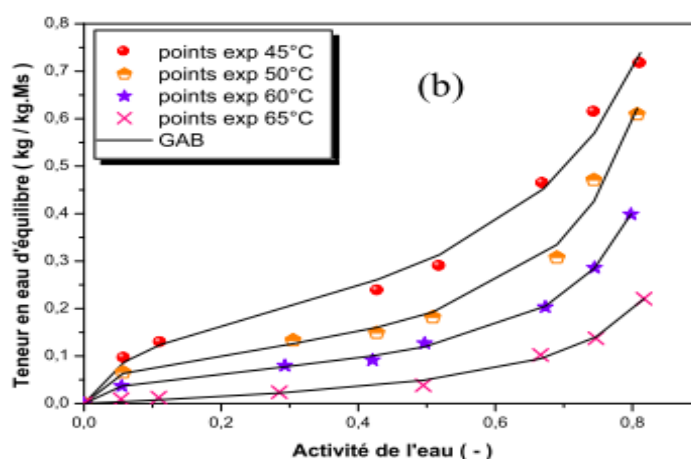


Figure I.10: Isothermes de désorption de la tomate déterminées à quatre températures différentes [16]

I.7.4.4 Modèles de description des isothermes de sorption

Plusieurs modèles mathématiques, relations empiriques reposant sur des bases plus ou moins physiques, permettent de reproduire les courbes des isothermes de sorption à partir de calculs théoriques simplifiés et de recalages expérimentaux.

La détermination des courbes de désorption constitue une étape préliminaire pour étudier la cinétique de séchage en couche mince d'un produit.

Le but est de déterminer les modèles le plus adéquats pour la description des isothermes de sorption de la tomate.

I.7.5. Stabilité des produits biologiques

Les microbiologistes et les physiologistes ont déterminé que pour une activité de l'eau inférieure à certaines valeurs, le développement des microorganismes et l'activité enzymatique étaient arrêtés.

D'une façon très schématique, on peut dire que le point de conservation optimal des produits biologiques, sans additif, ni réfrigération se situe généralement entre: [17]

$$a_w = 0.25 \text{ et } a_w = 0.35$$

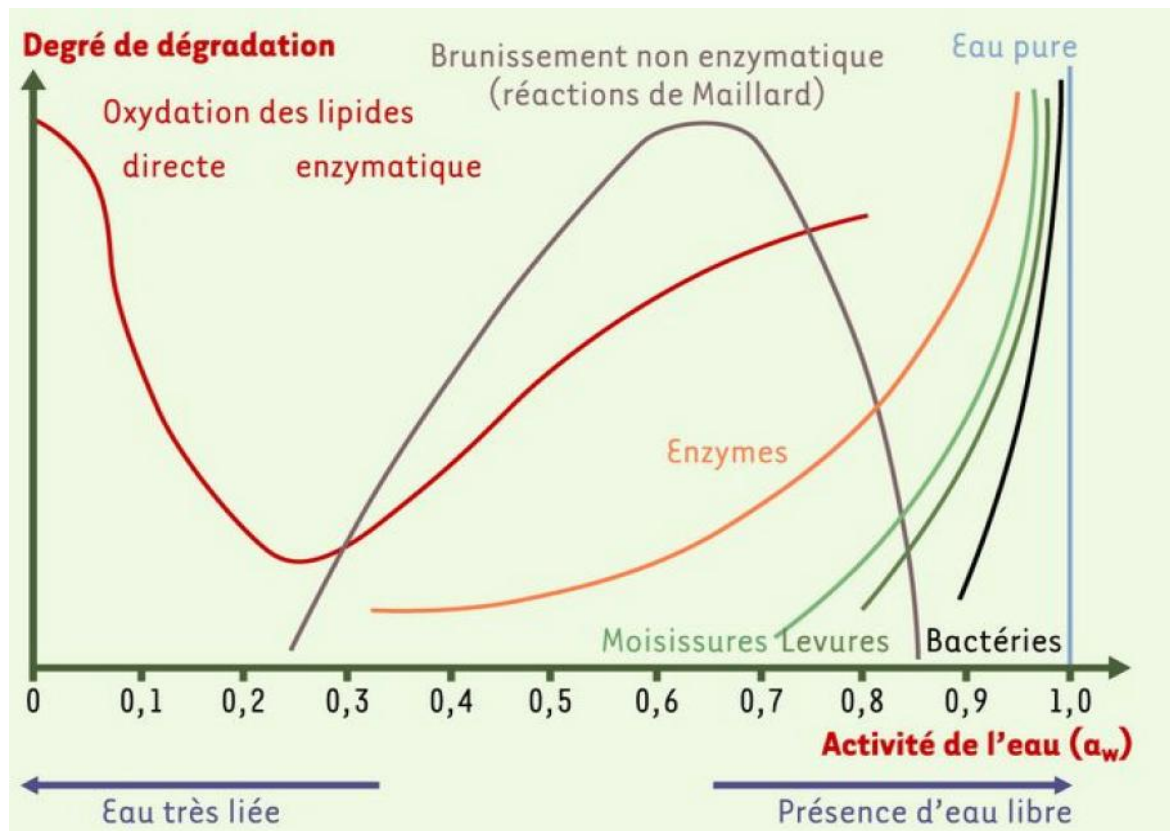


Figure I.11 : Risques de détérioration des aliments en fonction de l'activité de l'eau. [17]

D'une manière générale, les biologistes s'accordent à dire qu'une activité de l'eau inférieure à 0.6 est suffisante pour maintenir la stabilité des produits agroalimentaires séchés.

I.8. Cinétique de séchage et modélisation:

I.8.1 Les courbes de séchage

On étudie la cinétique de séchage des différents produits par des courbes représentant l'évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps. Ces courbes sont généralement obtenues pour différentes conditions expérimentales (température, hygrométrie, vitesse de l'air asséchant). Elles caractérisent le comportement global du produit à sécher au cours du temps.

Si dans une opération de séchage on procède à la mesure de la masse du produit à intervalles réguliers, on obtiendra ce qu'on appelle la courbe de vitesse de séchage. Le séchage peut être suivi graphiquement de différentes façons (figure suivante).

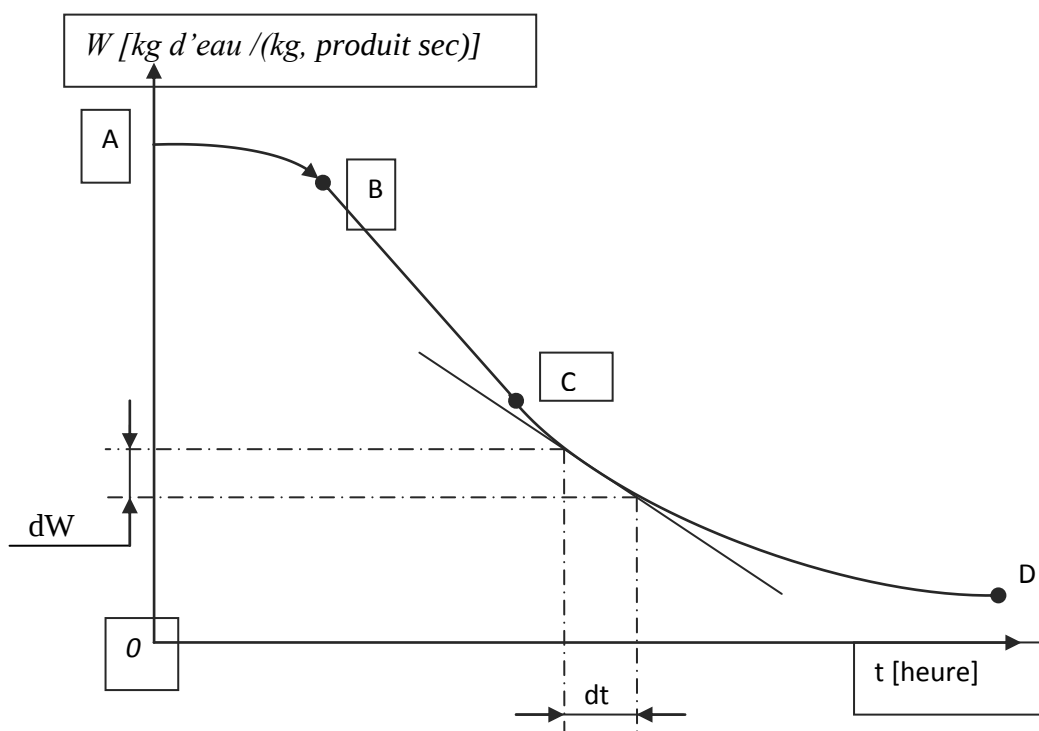


Figure I.12: Variation de la teneur en eau du produit en fonction du temps : Courbe de séchage.

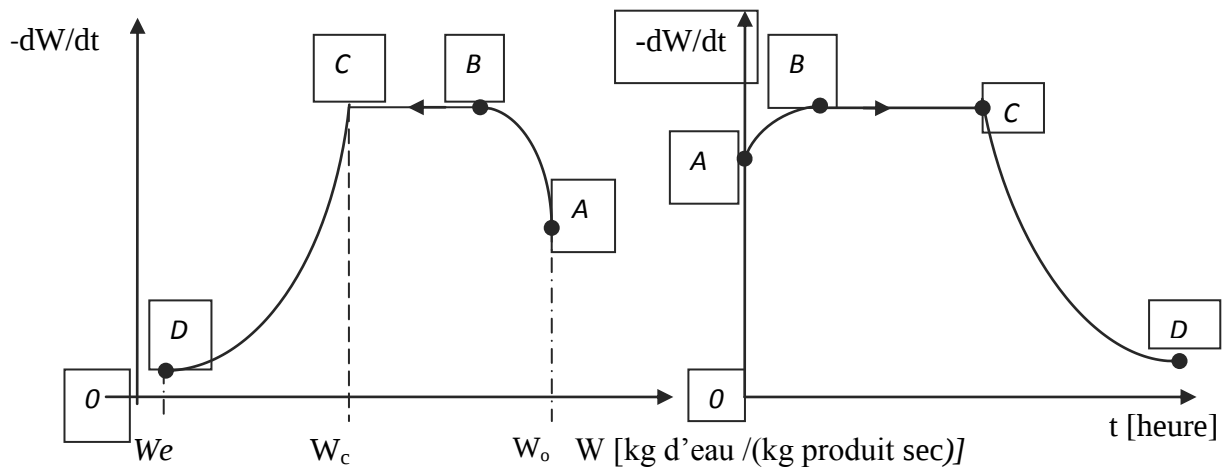


Figure I.13: Vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau

Figure I.14: Vitesse de séchage en fonction du temps

Figure: Courbes de séchage caractéristiques, pour un séchage par gaz dont les caractéristiques sont maintenues constantes [Bossart, 2006].

- Le premier graphique montre l'évolution en fonction du temps du taux d'humidité du solide (humidité absolue).
- Le deuxième graphique représente la vitesse de séchage (la quantité d'eau enlevée par kilogramme de matière sèche et par unité de temps) en fonction du taux d'humidité du solide.
- Le dernier graphique montre l'évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps.

I.8.2 Les différentes phases de séchage :

Les évolutions de la teneur en eau et de la vitesse de séchage d'un solide humide exposé à un flux d'air aux caractéristiques constantes (vitesse, température et humidité) présente 03 phases qui sont :

Phase 0 : phase transitoire, de mise en régime thermique (AB) :

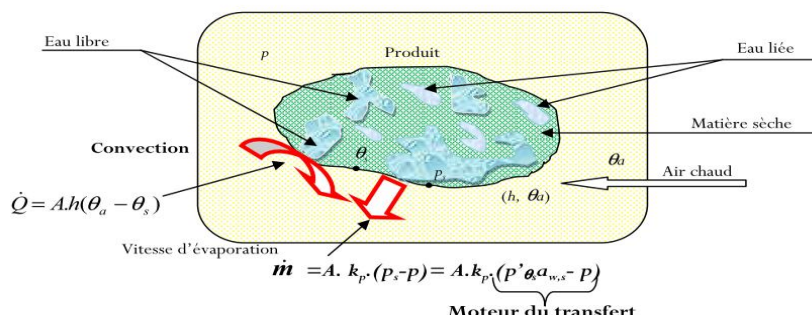
Dans cette phase, la température du produit tend vers la température humide de l'air de séchage (la température humide est obtenue par l'utilisation du diagramme d'air humide).

Cette période est courte et correspond à l'évaporation de surface. Le point B est atteint lorsque l'équilibre entre le produit et l'air asséchant est atteint en surface.

Phase 1 : phase de séchage à vitesse constante (BC) :

Durant cette phase, la surface du produit est saturée, à cause soit de la présence en quantité importante d'eau à la surface du produit, soit d'une diffusion rapide d'eau de l'intérieure du produit vers sa surface (Chaurreau et al, 1991)

L'eau libre est éliminée à flux –masse constant par évaporation à la surface ou l'écart entre la pression de vapeur saturante à la surface et celle de vapeur de l'air ambiant est constant et ça est due à un apport de chaleur [18].(Figure suivante).

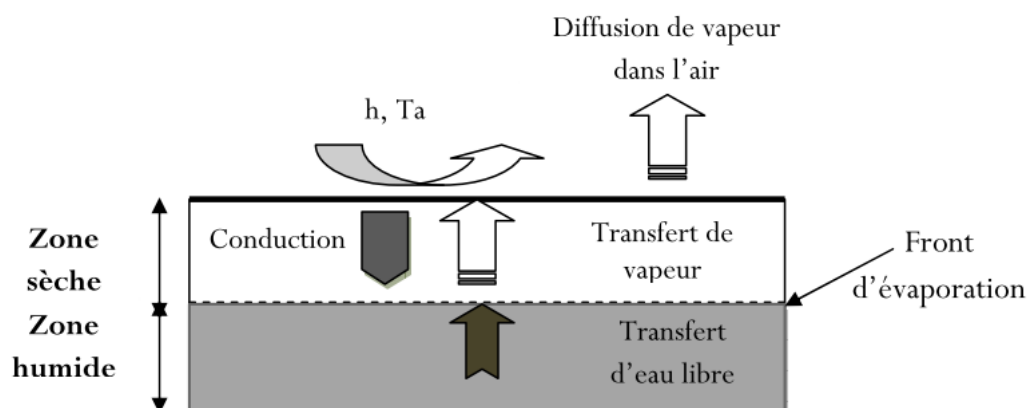


FigureI.15 : Schématisation des transferts pendant la phase à vitesse constante. [18]

L'évaporation s'effectue à la température de bulbe humide; L'activité de l'eau (a_w) à la surface du produit est alors égale à 1 et le séchage est dit isenthalpique. Pour cette période, le flux de chaleur entrant est égal aux flux nécessaire à l'évaporation de l'eau sortant du produit. [5]. Le front de séchage recule au cœur du produit et la vitesse de séchage s'annule au point D ou la teneur en eau d'équilibre M_e est atteinte par le produit tout entier [19].

Phase 2 : phase de séchage à vitesse décroissante (CE) :

Elle succède à la phase à vitesse constante. Elle débute du point critique atteint à la fin de la phase (I). Durant cette phase, la surface du produit à sécher n'est plus saturée en eau. Il se crée un front d'évaporation se dirigeant progressivement vers l'intérieur du produit. L'énergie apportée par la source de chaleur (l'air chauffé) ne sert plus uniquement à l'évaporation de l'eau du produit, mais aussi à augmenter sa température. Le potentiel d'échange (la vitesse de séchage) décroît et la température du produit augmente.(Voir figure suivante).



FigureI.16 : Schématisation des transferts pendant la phase de ralentissement. [18]

L'allure de séchage dans cette phase dépende de la disparition de l'eau libre en surface de produit ; l'épaisseur du produit ; la diffusivité de l'eau dans le produit ; la résistance mécanique des parois cellulaires et le croutage [20].

Pour les matériaux hygroscopiques, il existe une phase supplémentaire où tout le produit se trouve dans le Domain hygroscopique. Il reste juste de l'eau liée qui provoque une nouvelle diminution de la vitesse de séchage jusqu'à atteindre la teneur en eau finale équilibrée fournie par l'isotherme de sorption.

I.8.3 La vitesse de séchage:

La vitesse de séchage est la masse d'eau évaporée par unité de temps et de surface d'évaporation du matériau. Elle est fonction de très nombreux paramètres dont les plus importants sont :

- La nature de la porosité, la forme et l'humidité du produit.
- La température, l'humidité et la vitesse du gaz sécheur.

On peut déterminer la vitesse de séchage de deux façons différentes :

- Soit on utilise les vitesses de séchage expérimentales d'une fine couche de produit en recherchant une corrélation qui donne directement l'évolution de la teneur en eau en fonction du temps et des caractéristiques de l'air asséchant
- Soit on se donne un modèle logique de transfert d'humidité entre le produit et l'air, les résultats expérimentaux servant à recalculer le modèle.

I.8.4 Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage

I.8.4.1 Influence de la température de l'air

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

I.8.4.2 Influence de la vitesse de l'air

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

I.8.4.3 Influence de l'humidité de l'air

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

I.8.5 Développement de la modélisation mathématique des transferts lors du séchage

La modélisation des transferts couplés de chaleur et de masse dans les milieux poreux a été largement discutée dans la littérature. Les principaux sont :

- Les premiers travaux, datent de 1921 avec les publications de W. K. Lewis en 1921, traitant aussi bien les échanges thermiques et massiques lors de l'évaporation que de la signification du mécanisme de transfert de l'eau à l'intérieur du produit.
- Puis T. K. Sherwood a décrit l'ensemble des phénomènes observés lors du séchage d'un produit.
- En 1935, un spécialiste du textile, E. A. Fisher, propose trois relations pour décrire les phases successives du séchage de la laine.
- Par la suite, on assiste à la naissance des deux grandes écoles qui ont permis d'apporter une meilleure compréhension des différents phénomènes mis en jeu dans le séchage des produits. La première école est née en 1962 sous le nom de Krishner, qui adopte la description des processus de séchage en trois phases détaillées précédemment. Il a aussi déterminé les isothermes de sorption (propriétés d'équilibres) et la conductivité thermique équivalente pour plusieurs produits.
- En 1966, A.V. Luikov s'intéresse aux transferts au sein du produit en se basant sur une description fine et les équations des transferts couplés de chaleur et de masse dans un milieu poreux. D'importants travaux de recherche de ces deux grandes écoles sur le transport d'eau et le transfert de chaleur sont regroupés dans deux ouvrages et constituent aujourd'hui encore, la base des connaissances sur le séchage.
- Par la suite, d'autres travaux ont vu le jour pour permettre de lever la complexité de la modélisation des transferts couplés de chaleur et de masse ayant lieu pendant le séchage des produits tels que les polymères, le bois, les sols et les produits agro-alimentaires (M. Daguenet, 1985, S. Whitaker, J. M. Hernandez,...

Par ailleurs, ces modèles compliqués exigent une solution numérique des équations différentielles non linéaires qui n'est pas possible sans des calculateurs de grandes capacités.

D'autres modèles plus simples à mettre en œuvre grâce à des hypothèses simplificatrices ont été utilisés par d'autres auteurs. Ces modèles ne permettent pas malheureusement d'éclaircir les phénomènes de transfert à l'intérieur des produits à sécher. Néanmoins, certains travaux utilisant ces modèles simplifiés ont abouti à des résultats satisfaisants et acceptables.

I.9. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons relaté les connaissances de base nécessaires à la compréhension des phénomènes qui interviennent généralement lors des opérations de séchage en rappelant les lois physiques internes et externes des produits humides comme l'activité de l'eau et la cinétique du séchage et en présentant les différentes lois fondamentales régissant le séchage. Par ailleurs, nous sommes arrivés à définir la configuration initiale de notre futur séchoir et à en donner une représentation schématique. Les études théoriques et pratiques concernant ce séchoir en particulier seront traitées dans les chapitres qui suivent.

Chapitre II:

Modélisation du séchoir

Le but du modèle est de déterminer l'évolution de la teneur en eau du produit à sécher en fonction du temps en tenant compte des principaux paramètres aérothermiques (température, hygrométrie et débit massique de l'air asséchant). Le modèle est basé sur les bilans d'énergie dans l'air asséchant et dans le produit soumis à un écoulement forcé d'air chaud parallèle à la surface horizontale des claies grillagées. La température et l'hygrométrie de l'air à l'entrée du séchoir peuvent éventuellement varier au cours du séchage.

II.1. Hypothèses simplificatrices :

Vu la complexité du problème, nous avons utilisé quelques hypothèses simplificatrices. Plusieurs travaux portant sur le séchage des produits coupés en rondelles ont montré que ces hypothèses sont réalistes et les simplifications n'ont pratiquement pas d'influence sur les résultats. Les hypothèses simplificatrices suivantes sont utilisées :

- L'écoulement de l'air est supposé unidirectionnel et uniforme.
- La variation de la teneur en eau base sèche des produits est spatiotemporelle ;
- La vitesse de l'air est constante dans tout le compartiment de séchage ;
- L'ambiance de séchage est non rayonnante ;
- Les morceaux du produit à sécher représente un plan fortement rugueux (c'est une réalité pratique plus qu'une hypothèse) ;
- Le produit est considéré comme indéformable et suffisamment humide ;
- les échanges thermiques relatifs aux claies sont négligés, l'air humide est considéré comme un mélange de gaz parfaits (air sec et vapeur d'eau) ;
- les pertes de charge, le rétrécissement du produit, les effets de bords sont négligés.

II .2. Les transferts thermiques et massiques :

Le séchage met en jeu les deux modes de transfert fondamentaux : les transferts thermiques et les transferts de masse. Ces transferts sont caractérisés par des coefficients qu'il s'agit de déterminer dans ce chapitre [21]. Les transferts thermiques considérés se font essentiellement par convection, conduction et par les échanges liés aux transferts de masse.

II .2.1 La convection :

II .2.1.1 Les nombres adimensionnels :

Les échanges convectifs sont caractérisés par des groupements adimensionnels, parmi lesquels on cite :[21]

- Le groupement adimensionnel de **Reynolds** :

$$Re = \rho v D / \mu = v d / \nu \quad (II.1)$$

v : vitesse du fluide (m/s), d : dimension caractéristique du problème (m), ρ : masse volumique du fluide (kg/m^3), ν : viscosité cinématique du fluide (m^2/s), μ : viscosité dynamique du fluide (kg/m.s)

- Le groupement adimensionnel de **Prandtl** :

$$\text{Pr} = \mu c_p / \lambda \quad (\text{II.2})$$

Où c_p est la chaleur massique du fluide (J/kg.K) et λ sa conductibilité thermique (W/m.K)

- Le groupement adimensionnel de **Nusselt** :

$$\text{Nu} = h_c d / \lambda \quad (\text{II.3})$$

Où h_c est le coefficient d'échange par convection ($\text{W/m}^2.\text{K}$).

- Le groupement adimensionnel de **Graetz** :

$$\text{Gz} = \text{Re Pr } d / L \quad (\text{II.4})$$

- valable pour les écoulements dans les conduits où L est la longueur du conduit (m)

- Le groupement adimensionnel de **Stanton** :

$$\text{St} = \text{Nu} / \text{Re Pr} \quad (\text{II.5})$$

II .2.1.2.Effets du vent :

La majorité des auteurs utilisent la relation de HOTTEL et WOERTZ, pour le coefficient de transfert par convection-conduction extérieure [19] :

$$h_v = 5.67 + 3.86 V_v \quad (\text{W/m}^2 \text{K}^{-1}) \quad (\text{II.6})$$

Cette forme d'expression indique que même avec un vent de vitesse V_v nulle l'échange subsiste. Plusieurs études utilisent la formulation de Mc. Adams et Woertz.H:

En utilisant cette expression à une différence de température entre la paroi et l'ambiance de 20°C , on a obtenu des valeurs qui indiquent que les pertes peuvent être importantes; ce qui suggère qu'il faut protéger dans une certaine mesure les parois extérieures des effets du vent [21].

V_v [m/s]	h_v [W/m ² K]	$h_v \cdot \Delta T$ [W/m ²]
0	5,67	113,4
1	9,53	190,6
2	1,39	267,8
3	17,25	345
4	21,11	422,2

Tableau II.1 : Coefficient d'échange dû au vent et les pertes qui en découlent.

II .2.1.3 Ecoulement parallèle à une plaque plane

C'est le cas de l'échange entre les parois internes du séchoir et l'air asséchant d'une part et entre ce dernier et le produit d'autre part.

J.F. Sacadura [22]rapporte les corrélations suivantes :

$$\text{Régime laminaire : (Re < 100000) : } Nu = 0.66.Pr^{0.33}.Re^{0.5} \quad (II.7)$$

$$\text{Régime turbulent : (Re} \geq 100000) : Nu = 0.036.Pr^{0.33}.Re^{0.8} \quad (II.8)$$

Dans ce cas le nombre de Reynolds est calculé en prenant comme dimension caractéristique la longueur de la plaque.

II .2.1.4 Ecoulement forcé dans les conduites :

$$\text{Diamètre hydraulique : } DH = 4.S_p/P \quad (II.9)$$

S_p : Aire de la section droite du conduit (m).

P : périmètre mouillé de la section droite du conduit (m).

Nous allons utiliser les corrélations relatives à un conduit de section circulaire citées par M. Dagenet [2] :

- Ecoulement laminaire : (Re < 2100)

$$Gz < 100 : Nu = 3.66 + \frac{0.085.Gz}{1 + 0.047.Gz^{0.66}} \left[\frac{\alpha_a}{\alpha_p} \right]^{0.14} \quad (II.10)$$

$$Gz > 100 : Nu = 1.86.Gz^{0.3} \left[\frac{\alpha_a}{\alpha_p} \right]^{0.14} + 0.87 (1 + 0.015 Gz^{0.33}) \quad (II.11)$$

- Ecoulement de transition : 2100 < Re < 10000

Haussen propose :

$$Nu = 0.116. (Re^{0.8} - 125) . Pr^{0.33} . [1 + (Dh / L)^{0.66}] . \left[\frac{\mu_a}{\mu_p} \right]^{0.14} \quad (II.12)$$

- Ecoulement turbulent ($Re \geq 10000$).

Sieder et Tate propose :

$$Nu = 0.023 . Re^{0.8} . Pr^{0.33} . \left[\frac{\mu_a}{\mu_p} \right]^{0.14} \text{ pour } \frac{L}{Dh} > L. \quad (II.13)$$

Dans le cas contraire on tient compte des effets de bords de la façon suivante :

$$Nu = Nu_0 \left(1 + \frac{Dh}{L} \right) \quad (II.14)$$

Nu_0 : nombre de Nusselt pour $\frac{L}{Dh} > 60$

μ_a : viscosité dynamique à la température du fluide.

μ_p : viscosité dynamique à la température de la paroi.

II .2.1.5 Ecoulement forcé dans les conduites rugueuses :

Une manière d'augmenter les transferts thermiques consiste à traiter mécaniquement les surfaces lisses pour les rendre rugueuses ; ces rugosités perturbent localement la couche laminaire favorisant alors l'échange thermique. Le coefficient d'échange dépend dans ces conditions de la nature et de la taille de la rugosité [19].

Pour une surface à rainures triangulaires et un nombre de Reynolds compris entre 4500 et 145000, KOLAR préconise la formule suivante :

$$Nu = 0.05 (f . p_r / 2)^{0.5} . Re \quad (II.15)$$

Où f : représente le coefficient de frottement de la surface rugueuse.

$$f = \frac{1}{4 \left(2 \log \frac{D}{2e} + 1.74 \right)^2} \quad (II.16)$$

Notons qu'il est possible d'appliquer ces relations à des conduits de section quelconque, à condition de prendre le diamètre hydraulique comme longueur caractéristique.

II.2.2 La conduction :

Les transferts de chaleur par conduction se font à travers les différentes parois du séchoir (base, parois latérales et plafond) ; ils sont calculés à partir de la loi de fourrier suivante :

$$Q = - \lambda . grad \quad (II.17)$$

II .2.3 Evaporation :

Une partie de puissance par unité de surface est transmise au produit par convection sert à évaporer l'eau qu'il contient. Elle se calcule pour une surface d'échange unitaire comme :

$$q_m = \dot{m} L_v \quad (w) \quad (II.18)$$

$\dot{m}$: masse d'eau évaporée par unité de temps et de surface ($\text{kg/m}^2\text{s}$)

L_v : chaleur latente de vaporisation de l'eau (J/kg).

II .2.4 Transfert de masse :

Le transfert de masse se fait simultanément par évaporation à la surface du produit et par migration de l'humidité de l'intérieur de celui-ci vers sa surface.

II .2.4.1 Evaporation de l'eau en surface libre :

C'est généralement le cas en début de séchage. Considérons une surface d'eau (A) à la température T_e , au voisinage de laquelle circule un écoulement d'air, dont la concentration de vapeur est C_{v0} , la pression de vapeur P_{v0} et la température est T_0 (voir figure II-1) :

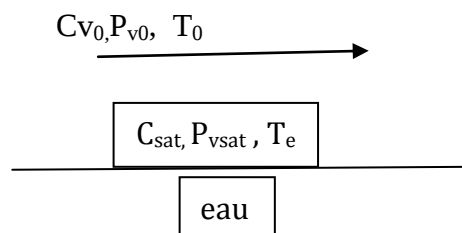


Figure II.1: Transfert de vapeur sur une surface d'eau

Au contact de la surface de l'eau, la concentration en vapeur C_e correspond à l'état de saturation à la température T_e . Il y a un transfert de chaleur sensible Q_s , dû à l'écart de température entre l'air et l'eau, et un transfert de masse $\dot{m}$, dû au gradient de concentration de vapeur dans l'air. Ce transfert de masse s'accompagne d'un transfert de chaleur latente Q_l .

$$\text{➤ } Q_s = hc A(T_0 - T_e) \quad (w) \quad (II.19)$$

hc : coefficient de transfert thermique par convection déterminé à partir du nombre de Nusselt.

Q_s : puissance sensible échangée.

$$\text{➤ } Q_l = \dot{m} A L_v (T_e) \quad (w) \quad (II.20)$$

$$\text{Où } \dot{m} = h_e \cdot C_e - C_0 \quad (\text{kg/m}^2\text{s}) \quad (II.21)$$

C_e et C_0 : concentration massique en vapeur d'eau (kg/m^3)

h_e est le coefficient de transfert de masse (m/s), $Sc = \nu/D_c$ est le nombre adimensionnel de Schmidt et $Sh_e = h_e d/D_c$ est celui de Sherwood.

d : dimension caractéristique de problème (m).

F.Kneul [19] rapporte la relation de Schirmer donnant D_c , le coefficient de diffusion moléculaire de la vapeur dans l'air (m^2/s), utilisable entre (20 °C et 200 °C) :

$$D_c = 2,229 \cdot 10^{-5} \frac{1}{P} \left(\frac{T}{273} \right)^{1.81} (m^2/s) \quad (II.22)$$

Où T est en Kelvin et P en Bar

On remarque que le nombre de Sherwood est l'équivalent du nombre de Nusselt pour les transferts de masse. Plusieurs corrélations permettant de la calculer ont été établies pour différentes configurations. Cependant on peut accepter l'hypothèse de Lewis valable dans le cas de l'air. La fonction de Lewis caractérise le rapport des transferts de chaleur et de masse.

$$F(Le) = hc / h_e \rho C_p \quad (II.23)$$

Les propriétés physiques ρ et C_p sont celles de l'air humide. Dans le cas où les pressions de vapeur $P_{sat}(T_e)$ et P_{v0} sont négligeables devant la pression totale p , l'expérience montre que, quelque soit le régime d'écoulement $F(Le)$ prend une valeur voisine de 1. L'hypothèse de Lewis consiste à poser dans ces conditions: $F(Le) = 1$; d'où:

$$h_e = hc / \rho C_p \quad (II.24)$$

II.2.4.2 Migration de l'humidité à l'intérieur du produit :

La migration de l'humidité à l'intérieur des produits humides (biologique) est un phénomène très complexe. La recherche d'une formulation mathématique permettant d'expliquer le phénomène reste encore timide. Le coefficient interne d'échange de masse dépend de la nature du produit et de ses propriétés physico-chimiques.

II.2.4.3 Coefficient d'échange massique interne :

Dans le cas de la tomate, les travaux expérimentaux de A. Belghit et al peuvent servir de base à l'établissement d'une corrélation donnant le coefficient d'échange massique interne en fonction de la teneur en eau du produit.

Dans les travaux effectués par ces auteurs sur le séchage convectif de la tomate, les vitesses de séchage sont mesurées expérimentalement pour différentes conditions de l'air asséchant, la température variant de 45 à 65 °C et l'humidité relative de 16 à 32% ; la teneur en eau base sèche de la tomate évolue de 16 Kg d'eau par Kg de matière sèche jusqu'à 1kg d'eau par Kg de matière sèche. La vitesse de l'air asséchant est précisée, ce qui permet d'évaluer la valeur du coefficient d'échange massique externe et permettre l'extraction de celle du coefficient interne à partir de la vitesse de séchage.

II.3. Bilans thermique et massique des différents éléments du système :

II.3.1 Bilans thermique des différents éléments du système :

Il y a échange de chaleur:

1. par convection forcée entre l'air et les parois internes du séchoir et entre l'air et le produit.
2. par conduction à travers les différentes parois constituant le séchoir.
3. latente entre l'air et le produit lié à l'évaporation de l'eau contenue dans le produit.

Le schéma de la figure suivante explicite clairement tous ces échanges.

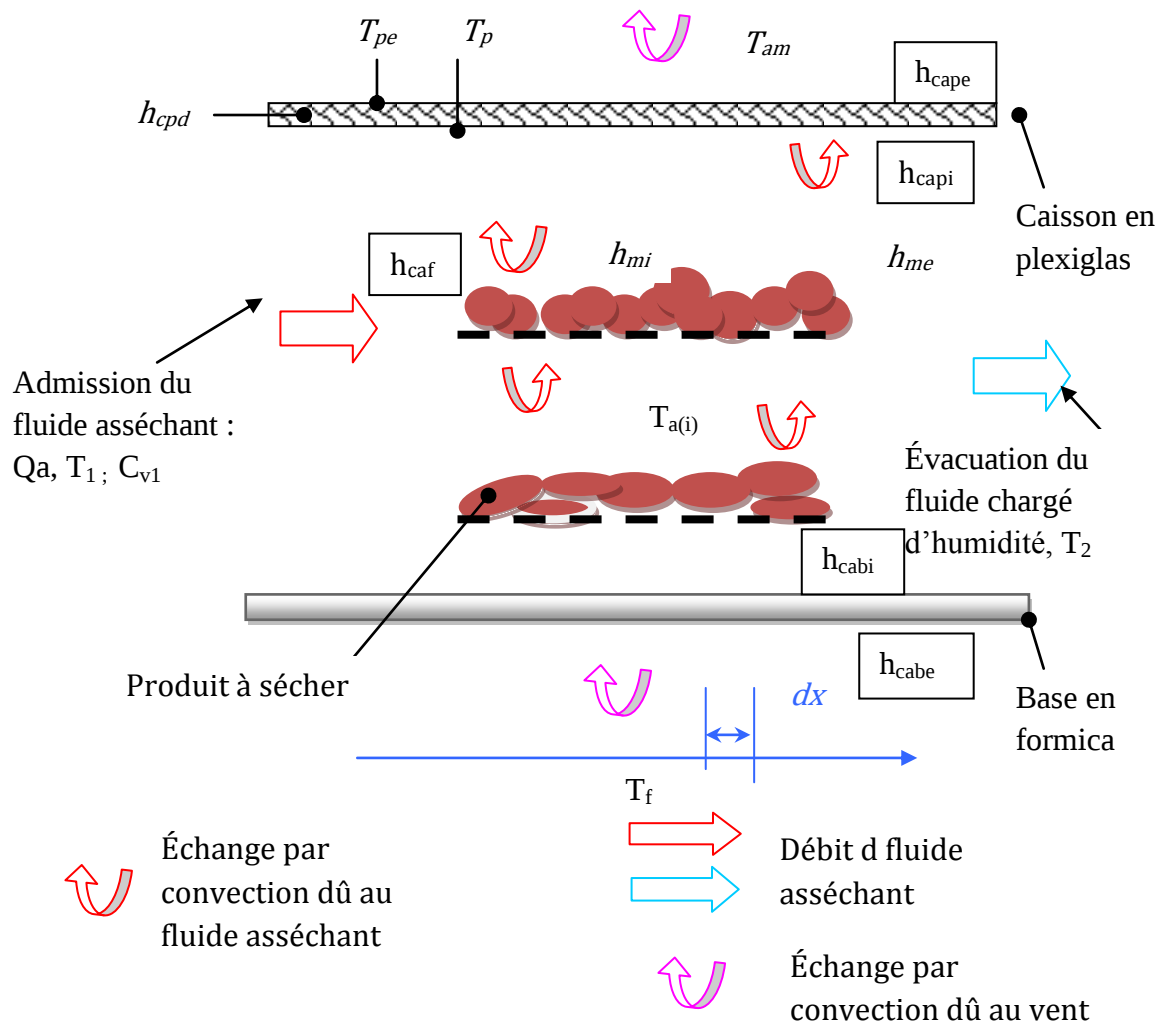


Figure II.2: Coupe et définition des coefficients de transferts thermiques et massiques dans une tranche de produit.

Dans la section (tranche) d'indice "j", l'application de la loi d'Ohm, au réseau électrique conduit aux équations suivantes :

II.3.1.1 Pour l'air de séchage :

$$Q_a = m_a \cdot C_p \Delta z \frac{dT_a}{dz} = h_{caf} S_f (T_a - T_f) + h_{cap} S_p (T_a - T_p) + h_{cab} S_b (T_a - T_b) \quad (II.26)$$

Q_a : est la puissance perdue par l'air lors de la traversée du séchoir.

La puissance cédée par l'air à la traversée du séchoir :

$$Q_a = D_{ma} \cdot C_{pa} \cdot (T_{ae} - T_{as}) \quad (w) \quad (II.27)$$

T_{ae} et T_{as} sont les températures de l'air respectivement à l'entrée et à la sortie du séchoir.

$D_{ma} = \rho_a Q_{va}$ est le débit massique de l'air dans le séchoir et C_{pa} est sa chaleur massique.

h_{caf} est le coefficient d'échange de chaleur air – produit, h_{cap} le coefficient d'échange de chaleur air-parois et h_{cab} est le coefficient d'échange de chaleur air-surface de base.

S_f, S_p, S_b sont les surfaces d'échange entre l'air et respectivement le produit, la paroi et la base.

L'équation (II.26) devient :

$$\frac{T_a - T_f}{R_{caf}} + \frac{T_a - T_{am}}{R_{eq}} = \rho_a C_{pa} Q_{va} \cdot (T_{ae} - T_{as}) \quad (II.28)$$

Où la résistance équivalente R_{eq} s'exprime à partir de la relation:

$$1/R_{eq} = 1/R_{cap} + 1/R_{cab} = \frac{1}{\frac{1}{h_{cvi} S_p} + \frac{e}{\lambda_p S_p} + \frac{1}{h_{cve} S_p}} + \frac{1}{\frac{1}{h_{cvi} S_b} + \frac{e}{\lambda_b S_b} + \frac{1}{h_{cve} S_b}} \quad (II.29)$$

II.3.1.2 Pour le produit :

$$m_f \cdot C_{pf} \cdot \frac{dT_f}{dt} = h_{caf} \cdot S_f (T_a - T_f) - p_{ev} \quad (II.30)$$

p_{ev} : est la puissance perdue par le produit lors de l'évaporation de l'eau.

$$P_{ev} = \dot{m} \cdot S_f \cdot L_v \cdot s \quad (w)$$

Ou :

$\dot{m}$: masse d'eau évaporée par unité de temps et de surface.

L_v : chaleur latente de vaporisation de l'eau.

S_f : surface de produit exposée au courant d'air.

II.3.1.3 Analogie électrique :

L'analogie électrique permet, grâce aux lois des mailles et des nœuds, de poser clairement le problème (figure suivante).

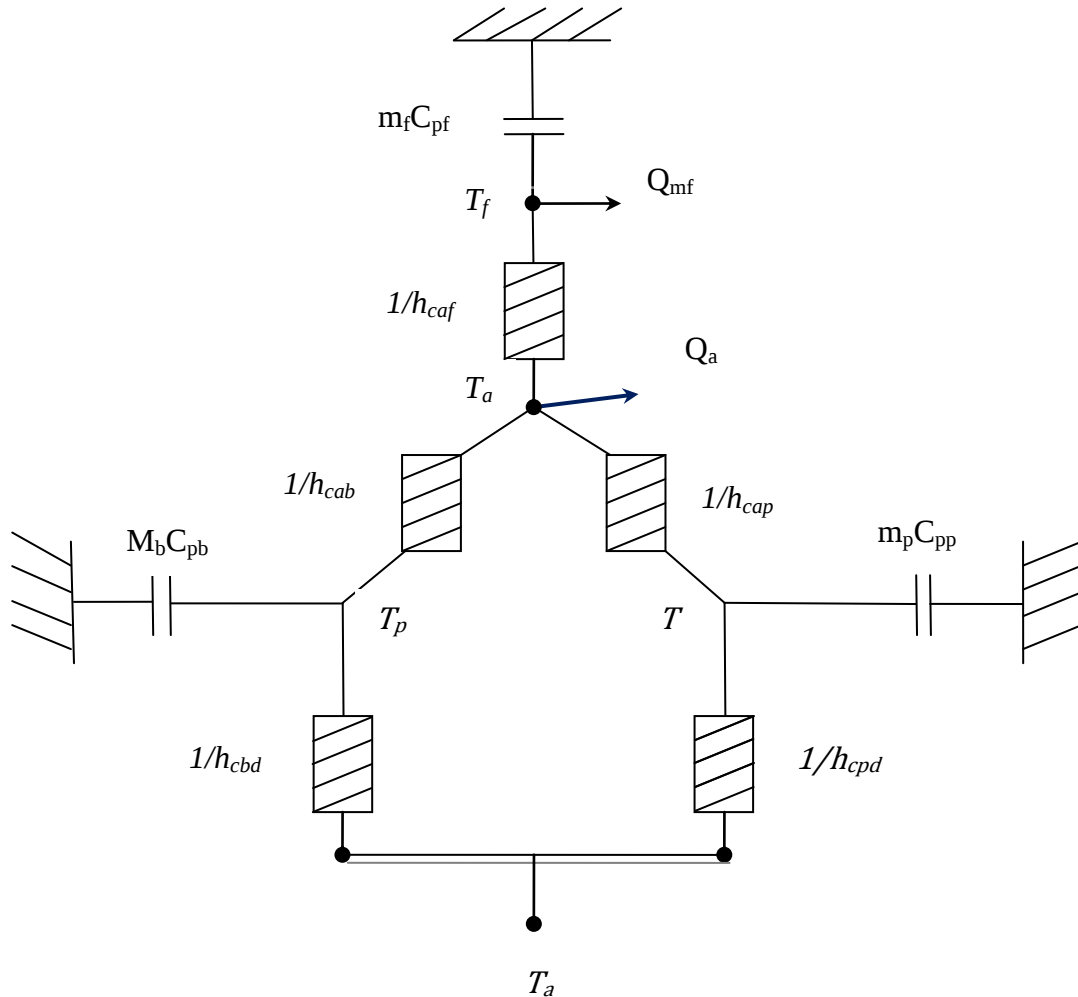


Figure II.3: Schéma électrique relatif au transfert de chaleur dans une tranche de séchoir

II.3.1.4 Détermination des paramètres intervenant dans le bilan thermique au niveau du séchoir :

a. Par convection:

- Entre l'air ambiant et la face externe de la paroi de l'armoire de séchage (voir le paragraphe : (2.1.2))

$$h_{cve} = 5.67 + 3.86 v_v \quad (\text{II.31})$$

- Entre la face interne de la paroi de l'armoire de séchage et l'air asséchant : D'après la référence [19] ;

$$h_{cvi} = \frac{Nu \cdot \lambda_a}{D_{hp}} \quad (II.32)$$

D_h , le diamètre hydraulique est calculé comme suit:

$$D_h = \frac{4 S_p}{P_m} \approx 0.7 \quad (II.33)$$

S_p est la section d'échange tel que :

$$S_p = h \cdot l \text{ et}$$

P est le périmètre mouillé tel que : $P_m = 2 (l + h)$

$$Re = \frac{\rho V_a D_f}{\mu_a} = \frac{V_a D_h}{\nu} \quad (II.34)$$

Où V_a est la vitesse de l'air

On trouve : $Re \approx 10^5$ donc le régime est turbulent.

Nu : le nombre de Nusselt calculé à l'aide de la relation citée par J. F. SACCADURA [22](voir paragraphe 2.1.4).

➤ Entre le produit et l'air asséchant [19] :

$$h_{caf} = \frac{Nu \cdot \lambda_a}{D_f} \quad (II.35)$$

D_f : diamètre moyen du produit (m). On prendra $D_f = 5 \text{ cm}$.

Nu est calculé par la relation de KOLAR (Voir 2.1.5)) :

$$Nu = 0.05 (f \cdot p_r / 2)^{0.5} Re \quad (II.36)$$

b. Par conduction:

➤ A travers la paroi de base :

$$h_{cbd} = \frac{\lambda_b}{e_b} \quad (II.37)$$

λ_b : Conductivité thermique du matériau de la base (w / m. k)

e_b : épaisseur de la base.

h_{cbd} : coefficient d'échange conductif à travers la base (w/m² °c).

➤ A travers les parois latérales et le plafond :

$$h_{cpd} = \frac{\lambda_p}{e_p} \quad (II.38)$$

h_{cpd} : coefficient d'échange conductif à travers les parois.

e_p : épaisseur de la paroi (m).

λ_p : conductivité thermique de la paroi (w/m k) .

c. Puissance échangée par changement de phase:

C'est une puissance perdue par le produit. Elle est égale au produit de la chaleur latente de vaporisation par la masse d'eau évaporée par unité de temps :

$$P_{ev} = L_v \cdot \dot{m} S_f \quad (II.39)$$

L_v chaleur de vaporisation de l'eau exprimée en J. kg⁻¹, est donnée par la relation suivante :

$$L_v = 4186.8 (597 - 0.56 T_f) \quad (II.40)$$

T_f : température de vaporisation prise égale à la température du produit

$$\dot{m} S_f = m_s \left(-\frac{dx}{dt} \right) \quad (II.41)$$

Où m_s est la matière sèche contenue dans le produit (kg) et $\left(-\frac{dx}{dt} \right)$ est la vitesse de séchage exprimée en (kg d'eau / s et kg de matière sèche.)

La détermination de la cinétique de séchage se fait par calcul direct de la dérivée de la teneur en eau à partir des points expérimentaux.

II.3.2 Transfert massique des différents éléments du système :

II.3.2.1 Vitesse de séchage. Modèle de combes :

Le séchage des produits agro-alimentaires se fait en deux phases [19].

a. Séchage à vitesse constante :

Correspondant à l'évaporation en surface, cette phase est en fait relativement courte et peut dans certains cas ne durer que quelques minutes.

b. Séchage à vitesse décroissante :

Cette phase correspond au déplacement de l'humidité de l'intérieur du produit vers sa surface, du a plusieurs phénomènes :

- cycle évaporation-condensation au sein du produit .
- diffusion interne de l'eau en phase vapeur ou liquide.
- capillarité.
- forces dues à la déformation.
- Etc...

Nous avons opté pour le modèle simplifié de Combes ou modèle de transfert global [].

II.3.2.2 Description :

On considère un volume de contrôle contenant une partie de la surface de contact air-produit humide (figure suivante) :

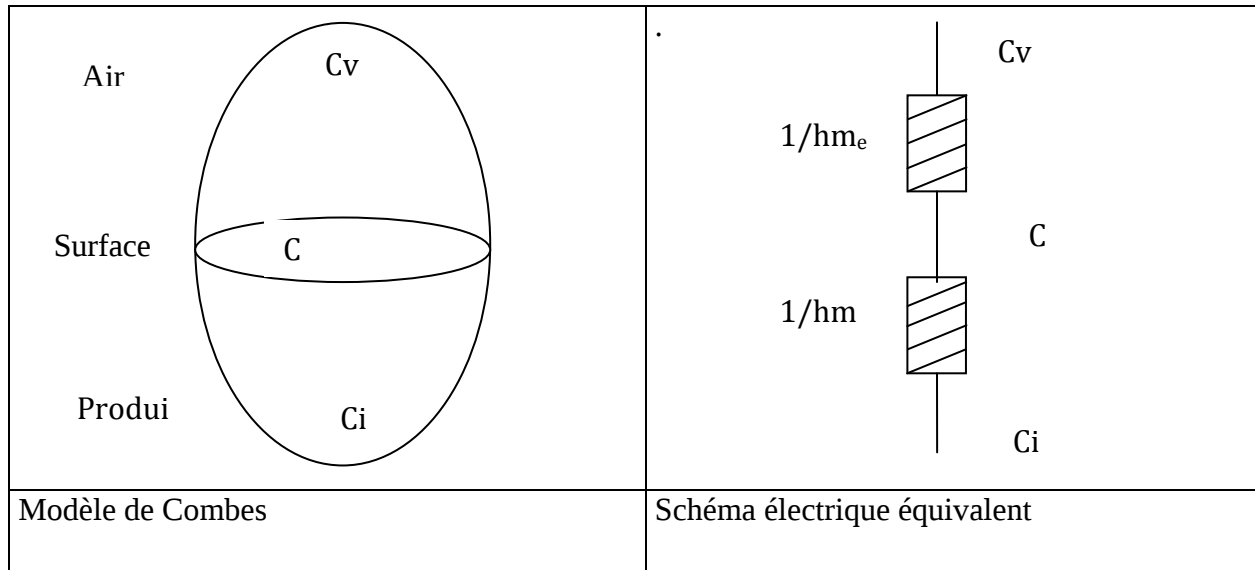


Figure II.4: Modèle de Combes

Nous avons affaire à :

- un transfert interne de vapeur.

$$\dot{m} = h_{mi} \cdot (C_i - C_s) \quad (\text{II.42})$$

- un transfert externe de vapeur.

$$\dot{m} = h_{me} \cdot (C_s - C_v) \quad (\text{II.43})$$

C_v : concentration de vapeur dans l'air (kg/m^3).

h_e et h_i : coefficients globaux moyens de transfert de masse externe et interne (m/s).

C_s : concentration de vapeur saturante à la température du produit, approchée par la formule de Bertrand valable pour : $5^\circ\text{C} < T_f < 65^\circ\text{C}$

$$C_s = a \cdot T_f^4 + b \cdot T_f^3 + c \cdot T_f^2 + d \cdot T_f + e \quad (\text{II.44})$$

Avec : $a = 91 \cdot 10^{-10}$; $b = -4182 \cdot 10^{-10}$; $c = 272583 \cdot 10^{-10}$; $d = 507325 \cdot 10^{-10}$; $e = 45466845 \cdot 10^{-10}$

$$C_i = C_s \cdot h_{re} \quad (II.45)$$

Ou :

C_i est la concentration massique moyenne de vapeur au sein du produit.

h_{re} est l'humidité relative d'équilibre à déduire des isothermes de sorption-désorption.

A partir des formules (II.42) et (II.43) on détermine la vitesse de séchage $\dot{m}$:

$$\dot{m} = \frac{h_e \cdot h_i}{h_e + h_i} \cdot (C_i - C_v) \quad (\text{kg/s.m}^2) \quad (II.46)$$

II.4. Etablissement du système d'équations et méthode de résolution :

L'étude des différents transferts se fera en régime turbulent. Les équations aux dérivées partielles sont transformées par discrétisation en un système d'équations algébriques, par pas de temps δt et d'espace Δx dans le sens de l'écoulement du fluide.

II.4.1 Discrétisation des équations au niveau du séchoir :

L'air chauffé est soufflé à travers des claies contenant le produit agroalimentaire disposé en couches minces. Une méthode simple pour modéliser un tel séchoir qui est composé de (06) calais séparées de 10cm de distances consiste à le découper dans le sens de l'écoulement de l'air en 20 tranches de $(5 \times 60\text{cm}^2)$, représentées sur la figure (II.5).

Ainsi, les paramètres de l'air asséchant varient suivant le mode pas à pas, d'une tranche à l'autre. Pour chaque tranche, on écrit les bilans thermiques et massiques dans les différents milieux en présence d'air et du produit en notant que dans chacune des tranches, les échanges se font avec l'air pris dans les conditions de sortie de la tranche précédente.

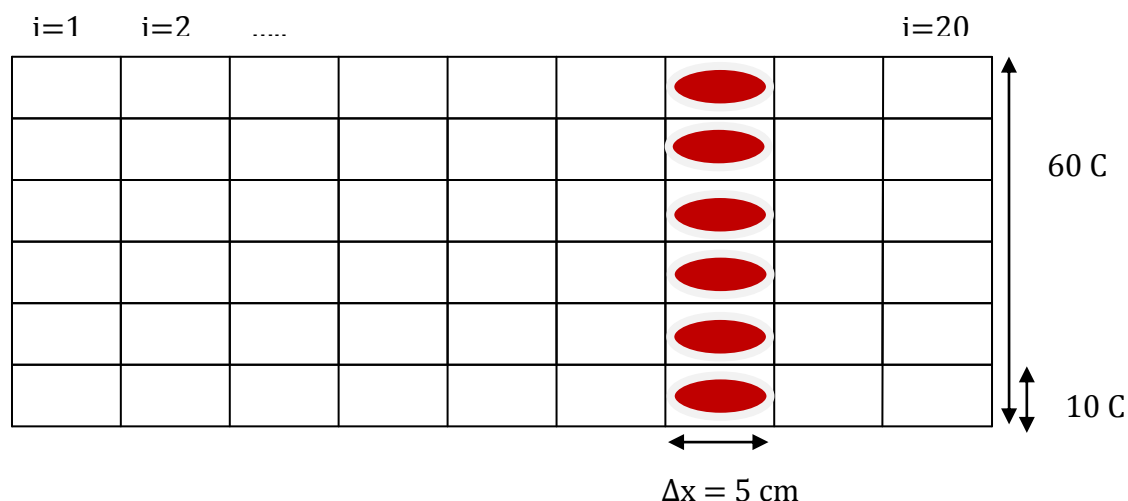


Figure II.5: Configuration du système découpé en tranches spatiales

Nous avons écrit 2 équations pour traduire les bilans thermiques et une pour le bilan massique:

$$\frac{T_a - T_f}{R_{caf}} + \frac{T_a - T_{am}}{R_{eq}} = \rho_a C_{p_a} Q v_a \cdot (T_{a_e} - T_{a_s}) \quad (\text{II.47})$$

$$m_f \cdot C_{pf} \cdot \frac{dT_f}{dt} = \frac{(T_a - T_f)}{R_{caf}} - \dot{m} S_f L_v \quad (\text{II.48})$$

$$W(i+1) = \frac{m_v}{m_{as}} = \frac{m_v(i-1) + \dot{m}(i) S_f \Delta t}{m_{as}} \quad (\text{II.49})$$

La discrétisation par différences finies conduit au système d'équations algébriques suivant, qu'il faut résoudre à chaque instant (j) et pour toutes les tranches spatiales i du séchoir:

$$\frac{T_a(i+1, j) - T_f(i, t)}{R_{caf}} + \frac{T_a(i+1, j) - T_{am}}{R_{eq}} = \rho_a C_{p_a} Q v_a \cdot (T_a(i, j) - T_a(i+1, j)) \quad (\text{II.50})$$

$$m_f \cdot C_{pf} \cdot \frac{T_f(i, j) - T_f(i, j-1)}{\delta t} = \frac{T_a(i-1, j) - T_f(i, j)}{R_{caf}} - P_{ev} \quad (\text{II.51})$$

$$P_{ev} = \frac{h_e \cdot h_i}{h_e + h_i} S_f \cdot (c_s (T_f(i, j-1)) \cdot h_{re} (T_f(i, j-1)) - c_v (i-1, j)) \cdot L_v (T_f(i, j-1)) \quad (\text{II.52})$$

$$W(i+1, j) = \frac{m_v}{m_{as}} = \frac{m_v(i-1) + \dot{m}(i, j) \Delta t}{m_{as}} \quad (\text{II.53})$$

Où :

Ou S_f : est la section d'échange offerte par le produit à l'air

Dans notre cas : $S_f = [2 \frac{\pi D_f^2}{4} + \pi D_f] n$ ou' n est le numéro du tranche de produit.

$\Delta t = \frac{\Delta x}{V_a}$ est le temps de passage de l'air dans chaque tranche.

II.4.2 Méthodologie de résolution :

- A l'instant initial, tous les éléments du séchoir et le produit à sécher sont à la température ambiante.
- Pour la première tranche du séchoir (i = 1), la température de l'air est prise égale à celle de l'air à la sortie de la résistance chauffante. Ensuite, pour chaque tranche et pour chaque pas de temps, la résolution successive des équations II-52, II-51 puis II-50 et II-53 permet de calculer les températures des différents éléments du séchoir, la température du produit à sécher ainsi que celle de l'air.
- La cinétique utilisée (modèle de combes) permet de calculer la teneur en eau du produit et l'énergie d'évaporation. En ce qui concerne le calcul des coefficients de transfert, il est effectué pour chaque pas de temps et pour chaque tranche.
- Les données de base sont :
 - La température de l'air ($T_a(i, t)$)
 - L'humidité absolue de l'air ($w_a(i, t)$)
 - La température de produit ($T_p(i, t)$)
 - La teneur en eau du produit ($x(i, t)$)

➤ Les conditions initiales sont :

$$-T_a(1, 0) = T_{ae}$$

$$-w_a(1, 0) = w_{ae}$$

$$-T_f(i, 0) = T_{f0} = T_{am}$$

$$-x(i, 0) = x_0$$

Les calculs sont arrêtés lorsque l'humidité des produits atteint le niveau de siccité désiré ; le principe de la démarche est schématisé par la figure suivante :

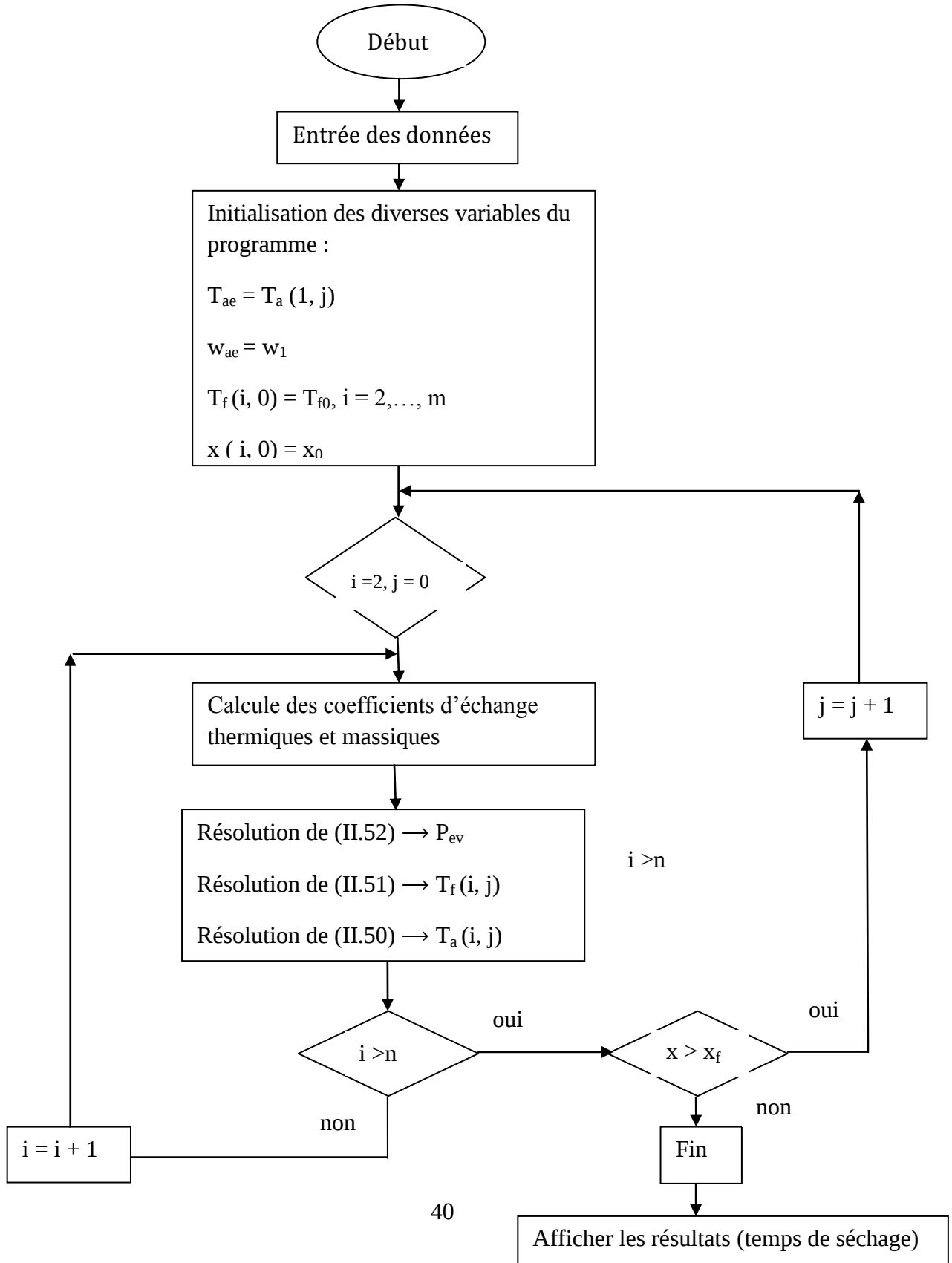


Figure II.6: organigramme du méthode de résolution.**II. 5. Modélisation globale simplifiée du séchoir :**

Dans ce modèle simplifié, nous allons considérer que la température et la teneur en eau du produit ne varient pas considérablement en fonction de l'espace, le séchage se fait de manière homogène pour tous les morceaux de tomate de l'enceinte de séchage. Cela est amplement justifié par le fait que la longueur du séchoir est suffisamment faible au regard de la vitesse de l'air. Ce qui permet d'émettre l'hypothèse suivante : les variations de ces paramètres sont uniquement temporelles.

Soient $x(t)$ et $x(t+\Delta t)$ les teneurs en eau du produit à l'instant t et à l'instant $t+\Delta t$. Prenons pour alimenter ce séchoir, de l'air ambiant à température T_0 , humidité absolue w_0 , humidité relative ϕ_0 , d'enthalpie h_0 . Il est réchauffé avant son admission dans l'enceinte de séchage jusqu'à la température T_1 . Soit alors w_1 , ϕ_1 , h_1 respectivement ses humidités absolue, relative et son enthalpie massique. Mis en contact avec le produit, Il se charge d'humidité et se refroidit jusqu'à la température T_2 . Soient w_2 , ϕ_2 , h_2 respectivement ses humidités absolue, relative et son enthalpie massique à la sortie du séchoir.

Dans ce modèle, les caractéristiques de l'air dans l'enceinte de séchage seront prises égales à leurs valeurs moyennes entre l'entrée et la sortie ($W = \frac{W_1 + W_2}{2}$) et ($T_a = \frac{T_1 + T_2}{2}$).

Connaissant T_0 , T_1 , ϕ_0 , $x(t)$, l'objectif après avoir estimé la vitesse de séchage est de calculer à tout instant $x(t+\Delta t)$ et les propriétés de l'air à la sortie : W_2 et T_2 . Lorsque la teneur en eau souhaitée dans le produit est atteinte, on déduit à ce moment-là le temps de séchage.

II.5.1. Les propriétés de l'air à la sortie : W_2 , T_2

Connaissant T_0 , T_1 , $x(t)$, Il vient :

- Pour la masse initiale de matière sèche :

$$m_s = (1 - x_1) m_1 \quad (\text{II.54})$$

- Pour la teneur en eau initiale du produit en base sèche:

$$X_1 = \left(\frac{x_1}{1 - x_1} \right) \quad (\text{II.55})$$

Puis on calcule à chaque pas de temps δt :

- La température de sortie de l'air $T_2(t)$ à partir de l'équation II-47
- La vitesse de séchage par unité de surface de produit $\dot{m}$ à partir de l'équation II-46
- L'humidité absolue de l'air en sortie W_2 à partir de l'équation :

$$W_2 = \frac{m_v}{m_{as}} = \frac{m_v(e) + \dot{m}(t) S_f \Delta t}{m_{as}} \quad (\text{II.56})$$

Où Δt est le temps de traversée du séchoir par l'air.

- La teneur en eau à l'instant $t + \delta t$ en base sèche $X(t + \delta t)$ à partir de la relation :

$$X(t + \delta t) = \frac{M_e(t) - \dot{m}(t) S_f \delta t}{m_s} \quad (\text{II.57})$$

- La teneur en eau en base humide à l'instant $t + \delta t$ comme :

$$x(t + \Delta t) = \left(\frac{X(t + \delta t)}{1 + X(t + \delta t)} \right) \quad (\text{II.58})$$

Remarque sur la détermination de la vitesse de séchage : deux phases seront considérées :

a. phase à vitesse constante :

Dans cette phase qui dure en fait très peu de temps dans le cas de la tomate, la surface extérieure du produit est saturée en eau ($h_{\text{req}} = 100\%$) et $h_e \ll h_i$.

- Le débit d'eau évaporée par unité de surface de produit, qui permet de passer de la teneur en eau initiale x_1 à la teneur critique x_{cr} marquant la fin de cette phase ($x_1 \rightarrow x_{\text{cr}}$) est constant et peut être calculé par la relation:

$$m_1 = \frac{h_e \cdot h_i}{h_e + h_i} (c_{\text{sat}} - c_{\text{va}}) \quad (\text{II.59})$$

- La vitesse de séchage est :

$$\frac{dX_1}{dt} = - \frac{\frac{h_e \cdot h_i}{h_e + h_i} (c_{\text{sat}} - c_{\text{va}})}{m_s} S_f \quad (\text{II.60})$$

- Le temps de séchage (Δt_1) que dure cette phase se calcule comme :

$$\Delta t_1 = \frac{M_{e1}}{S_f \dot{m}_1} \quad (\text{II.61})$$

Où $M_{e1} = m_s (X_1 - X_{\text{cr}})$

b. phase de ralentissement : $h_e \gg h_i$:

Le débit d'eau évaporée n'est plus constant et dépend fortement de la teneur en eau du produit. Dans cette phase le calcul de la vitesse se fera à chaque pas de temps et pour évaluer le temps de séchage nécessaire pour passer de la teneur en eau initiale de cette

phase X_{cr} à la teneur finale X_2 ($x_{cr} \rightarrow x_2$), il faut procéder par tranche notée i caractérisée par la teneur X_i et calculer le temps pour qu'elle diminue d'une valeur à choisir ΔX . Plus cet intervalle est faible, plus grande sera la précision des calculs.

Les vitesses de séchage seront calculées avec la relation

$$m_2 = \frac{h_e \cdot h_i}{h_e + h_i} (h_{req} \cdot C_{sat} - C_{va}) \quad (II.62)$$

$$\text{et} \quad \frac{dX_2}{dt} = \frac{h_e \cdot h_i}{h_e + h_i} \frac{(h_{req} \cdot C_{sat} - C_{va})}{m_f} S_f \quad (II.63)$$

Le temps que dure le séchage dans cette phase est alors :

$$t_2 = \sum_{i=1}^n \frac{M_{e2(i)}}{S_f m_2(i)} \quad (II.64)$$

Le temps de séchage global est la somme des deux intervalles de temps t_1 et t_2 .

Conclusion :

Pour l'étude du séchage de produits agroalimentaires, nous avons commencé par une étude bibliographique. Le modèle de transfert de combes est adopté comme modèle descriptif des phénomènes intervenant au cours du séchage. Les coefficients d'échanges thermique et massique sont dépendants des conditions extérieures en particulier la température et l'humidité de l'air asséchant ainsi que de la nature du produit à sécher, le coefficient le plus important étant la détermination du coefficient de migration interne de l'eau.

La simulation du séchage de la tomate peut s'appuyer sur les équations que nous avons écrites à condition de cerner la valeur des nombreux coefficients qui interviennent comme les différents coefficients d'échange et la teneur en eau d'équilibre de la tomate. Toutefois la simulation de l'opération de séchage portant sur un certain nombre de paramètres permettra :

- De Comprendre le comportement de la cinétique de séchage lorsque la température ou la vitesse de l'air asséchant varie,
- D'étudier le comportement du produit lors du séchage.
- De contrôler le temps de séchage.

Chapitre III:

Etude et réalisation du séchoir

III.1. Introduction :

Pour réaliser un système de séchage de dimensions données 100x50x60 cm en tenant compte des contraintes techniques liées aux moyens matériels disponibles, nous avons opté pour un séchoir électrique à convection forcée avec recyclage d'air. La configuration finale étant retenue et visualisée sur des plans à 3 dimensions (figure suivante), il restait à effectuer les choix technologiques des systèmes constituant le séchoir. Nous étions guidés en cela par :

- Les spécifications de l'analyse fonctionnelle ;
- Les contraintes liées à la disponibilité : Il faut toujours vérifier que les matériaux et le matériel choisis soient disponibles sur le marché local, et leur montage possible au niveau de nos ateliers ;
- Les contraintes d'esthétique ;
- La visualisation en 3D

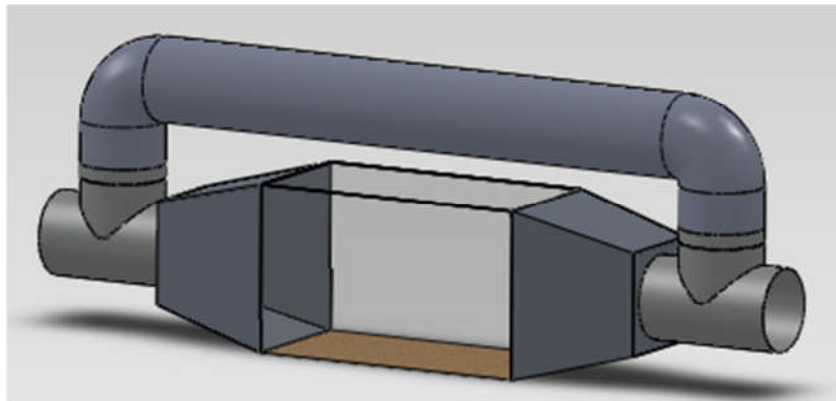


Figure III.1: La visualisation du séchoir par solide Works en 3D

III.2. Conception et dimensionnement du séchoir :

III.2.1. Les éléments constitutifs du séchoir:

Le dispositif réalisé est un séchoir conçu pour servir au laboratoire Agro-alimentaire de l'Université Houari Boumediene de Bab Ezzouar à Alger. Il comporte les parties essentielles suivantes :

- **La chambre de séchage (le caisson):**
C'est le compartiment dans lequel s'effectuent les échanges entre l'air et le produit à sécher; il a 0.80 m de hauteur, 1 m de longueur et 0,50 m de largeur. Ses parois extérieures sont en plastique (PMMA transparent) de 3 mm d'épaisseur, encadrées par des tiges en l'aluminium.

➤ **Le compartiment de chauffage :**

Il est constitué d'une résistance chauffante (puissance 1700 W) permettant de porter la température de l'air asséchant au niveau désiré avant son admission dans le caisson de séchage.

➤ **Le système de soufflage d'air :**

C'est un ventilateur (75 W- 3200tr/mn), placé à l'entrée du diffuseur et lié à un variateur de vitesse électronique pour permettre des variations de la vitesse de l'air asséchant entre 0 et 2m/s.

➤ **Les sondes :**

Le séchoir est régulé en température et en humidité à l'aide d'une sonde électronique hybride sht75. Les précisions sur les mesures sont respectivement de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ pour la température et $\pm 0.5\%$ pour l'humidité relative de l'air. Il suffit de placer ces sondes aux endroits suivants :

- A l'entrée et à la sortie de la chambre de séchage.
- Au niveau des claies portant le produit à sécher.

Une deuxième sonde LPx5100 permet de mesurer la pression de l'air dans la chambre même. Ces considérations sur la pression de l'air asséchant ne sont de fait pas traitées dans l'étude théorique que nous avons menée : nous avons considéré le cas du séchage à pression atmosphérique et les pertes de charges -assez faibles par rapport à la longueur du caisson- ne sont pas évaluées dans nos calculs.

➤ **Le diffuseur d'air :**

Il a la forme d'une trémie divergente d'angle $\alpha=10^{\circ}$ et de longueur $L=0.45\text{m}$. Il permet de véhiculer l'air dans la chambre de séchage avec le minimum possible de pertes de charges. A l'amont du ventilateur, un grillage qui ne devrait pas être de maillage trop fin, est impérativement installé pour éviter l'introduction de corps étrangers dans le séchoir.

Ces proportions sont choisies selon les critères suivants :

- Le diamètre du ventilateur étant D, la longueur L du divergent doit être au moins égale à 1,5 D et l'angle des parois du divergent doit être compris entre 7 et 15°.
- Un diffuseur (ou divergent) est bien choisi s'il permet d'éviter les frictions entre l'air de sortie du ventilateur et l'air avoisinant en créant une séparation physique entre eux.
- Le divergent a pour rôle d'homogénéisation du flux d'air turbulent en sortie de ventilateur.
- l'installation d'un diffuseur autorise dans certains cas l'utilisation de ventilateurs de plus faible puissance

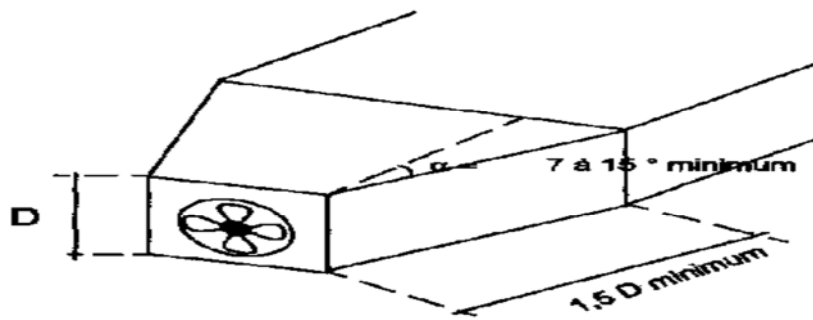


Figure III.2:Schéma du divergent[24].

- **Le compartiment de recyclage :** Il permet le recyclage partiel ou total de l'air non saturé.
- **Un panier de 5 claies :**
En matière plastique thermodurcissable résistant à la chaleur, les claies sont grillagées pour accueillir l'échantillon à sécher. Le panier contenant les claies est posé sur une balance électrique avec un système de vis-écrou pour suivre l'évolution instantanée de sa masse. L'espacement entre les claies est de 10cm, suffisant pour permettre une bonne circulation de l'air.
- **La boîte de commande :**
Il renferme deux cartes électroniques et un processeur qui effectue les calculs nécessaires au bon fonctionnement du système à partir de données collectées par les capteurs ; la boîte convertit et transfère toutes les données à un logiciel de traitement installé sur ordinateur. Le boîtier est relié d'une part à un afficheur LCD et d'autre part à la carte de puissance alimentant les résistances de chauffage et le ventilateur.
- **La balance électrique:**
Elle sert à mesurer la masse des échantillons. La charge maximale est de 1000 g et sa précision en lecture sur les mesures est de $\pm 0,0001g$. Elle est équipée d'un port USB pour permettre l'enregistrement en temps réel des variations instantanées de la masse du panier à claies sur PC.
- **La tuyère:**
Elle assure la collecte de l'air usé, chargé d'humidité et l'expulsion d'une partie de cet air vers l'extérieur, l'autre partie étant recyclée.
- **Energie d'appoint :**
Pour améliorer le rendement énergétique et éventuellement le rendement économique de cette installation de séchage électrique, nous avons prévu son raccordement à un système de production de chaleur par capteur solaire à air.

L'emplacement réservé à la conduite d'air chaud provenant des capteurs est situé en amont du diffuseur.

III.2.2.Paramètres réglables du séchoir :

III.2.2.1.Température de l'air de séchage:

La température de l'air issu du système de ventilation est réglée par action sur la résistance chauffante, reliée à une alimentation électrique et à des relais interrupteurs. Le processeur principal permet de réguler la température de l'air jusqu' à un maximum de 150°C.

III.2.2.2.Vitesse de l'air de séchage :

Le variateur de vitesse commande la vitesse de rotation du ventilateur de 0 à 3500tr/mn et la vitesse de l'air de séchage qui se situe entre 0 et 2 m/s.

III.2.3.Paramètres mesurables du séchoir

III.2.3.1.L'humidité et la température de l'air de asséchant :

Il s'agit de l'humidité et la température de l'air chaud, entraîné dans un mouvement de convection forcée. Elles sont mesurées à l'aide d'un capteur électronique relié à un câble relativement long déplaçable à l'intérieur de la chambre de séchage.

III.2.3.2.Perte de masse du produit :

Elle est suivie par l'intermédiaire d'une balance électronique munie d'une interface USB permettant la connexion de la balance à un périphérique ou à un PC pour l'acquisition des données via l'ordinateur.

III.2.3.3.Consommation énergétique en cours de séchage :

Le séchage de produits alimentaire qui est un processus de transfert simultané de chaleur et de masse est toujours une opération consommatrice d'énergie au niveau industriel. Dans le cas de cette étude, une évaluation de la consommation énergétique et massique totale (CEM) peut être réalisée en se basant sur la mesure de l'énergie électrique consommée.

III.2.4.Commande et acquisition des données :

La commande du séchoir est assurée à partir d'une boîte de commande, dotée d'un afficheur et de trois boutons d'affichage des consignes sur les variables d'entrées. Les paramètres du séchoir mesurés par les différentes sondes sont affichés sur un écran LCD durant toute la durée de l'opération de séchage puis envoyés vers un micro-ordinateur pour leur traitement par un logiciel informatique. Les variations instantanées de ces paramètres sont alors traduites sous forme de graphes, à visualiser en temps réel sur l'écran de l'ordinateur ou à enregistrer sur un fichier XML ou texte, en vue d'un traitement ultérieur, sur Excel par exemple pour le tracé des graphes. Son rôle est de se connecter via une interface

USB et faire la lecture des données envoyées par le processeur. Celui-ci dispose également d'options diverses

- La boîte de commande est connectée à l'ordinateur par un port USB 2.0.
- Le PC doit être muni d'un port USB secondaire utilisé pour l'acquisition des valeurs instantanées de la masse des produits traités.

III.3. Procédure de réalisation des éléments du séchoir :

III.3.1.Montage du coffret :

Le coffret, fabriqué avec des plaques de plastique PMMA transparent de 3mm d'épaisseur, est supporté par des cadres en aluminium rainuré; les joints sont renforcés par des bandes en caoutchouc en vue d'assurer une étanchéité maximale. La portière du caisson coulissante est maintenue par le joint d'ouverture à la périphérie. Les dimensions des ouvertures prévues pour le ventilateur et la résistance électrique sont portées sur la figure suivante.



Figure III.3: Photographie du coffret

La réalisation du coffret a été confiée à un atelier du centre-ville de Tizi-Ouzou spécialisé en menuiserie aluminium.

III.3.2.Le ventilateur

Il est fixé par boulonnage sur le plan orthogonal à l'axe de l'ouverture réservée à l'entrée d'air, sur un support de fixation convenable.



Figure :Image du ventilateur fixé par boulonnage sur le séchoir

III.3.3.La résistance chauffante :

Elle est de type filament en tungstène et mica, lui conférant une résistance aux températures de plus de 1600 °C. Elle est alimentée directement en courant alternatif de secteur à travers un relais électrique de puissance et un circuit de protection par disjoncteur; sa puissance peut atteindre 2KW sous 230V.

Les résistances sont montées sur un cadre de dimensions 400 x 300 mm en céramique.

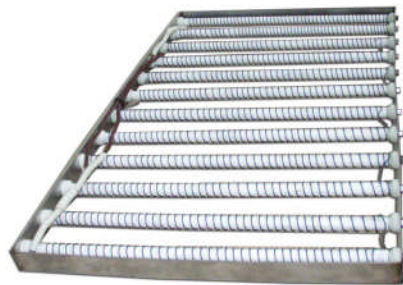


Figure III.4:Cadres chauffants.

III.3.4.Réalisation des circuits électriques :

III.3.5.Commande et régulation (boîte de commande) :

La régulation est automatique, grâce au microcontrôleur qui selon les données des capteurs, exécute des fonctions appelées PID (proportionnel, intégrale et différentielle) lui permettant, suivant les données des consignes arrêtées par l'utilisateur, de :

- choisir le type de régulation pour être :
 - Manuelle : On fixe le temps nécessaire au séchage complet du produit et on attend l'arrêt planifié.

- Automatique : Le processeur rompt le fonctionnement du système dès que les conditions sur le poids final du produit ou sur l'humidité de l'air à la sortie sont satisfaites.
- maintenir les conditions de température à l'intérieur d'une marge dite de régulation, c'est-à-dire oscillant entre deux valeurs voisines comme le montre la figure suivante :

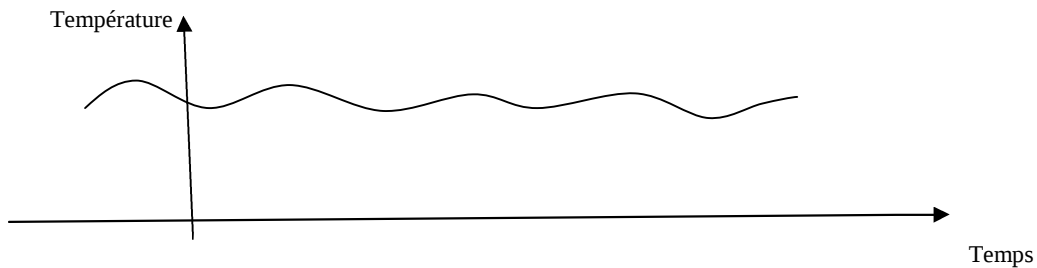


Figure III.5: courbe de stabilisation de la température de séchage



Figure (III.6) : Image de la boîte de commande.

Un étage de puissance constitué de triacs « interrupteurs » et relais a pour fonction de mettre sous tension les résistances et le ventilateur ; cet étage est contrôlé par la carte du processeur principal.

Le ventilateur n'absorbe que 75W ; tandis que les résistances de chauffage fonctionnent à une puissance atteignant 1700W. Le circuit de puissance est réglé pour supporter ces puissances et rester suffisamment froid ; ce qui permet de loger l'ensemble dans le boîtier de contrôle. Il sera alimenté par des câbles de 2.5mm et le circuit de commande en 1.5mm.

III.3.6 Processeur principal et capteurs de température et d'humidité :

Le processeur principal est de technologie (ATMEL), les capteurs de température et d'humidité sont référencés SHT75, et ceux de pression MPX425. Cet ensemble est alimenté sous une tension de 5V. Le schéma de ces éléments du circuit est réalisé sur Isis de PROTEUS, un logiciel de simulation et de développement de circuits électriques.

Vers les sorties de commande, des fiches sont disposées liées, notamment à l'étage de puissance, à l'afficheur, et aux touches d'acquisition des consignes (keypad).

III.3.7. Le circuit de puissance :

Le circuit de puissance comprend deux parties distinctes. La première partie commande en tout ou rien la résistance de chauffage dont l'élément principal est un relais de tension de commande de 12V, et de sortie en 250V. La plage de régulation des températures est définie par les deux instants : marche et arrêt de ce relais.

La deuxième partie correspond au circuit de contrôle du ventilateur, composé d'interrupteurs électroniques à courant alternatif appelé TRIAC qui s'adaptent automatiquement aux signaux de commande issus du processeur en variant en conséquence la vitesse du moteur.

III.3.8. Capteurs de température et d'humidité :

Ce sont des SHT75 de dernière génération de capteurs numériques et dont les caractéristiques principales sont :

- Faible taille.
- Gamme de température [-20 °C, +150 °C]
- Captation et envois séparés des signaux de température et d'humidité sur les bus de sortie des données.
- Précision de 0.1°C en température et de 0.5% pour l'humidité.
- Mesure l'humidité relative.
- Il permet une stabilité à long terme.
- Totalemment calibré en usine.

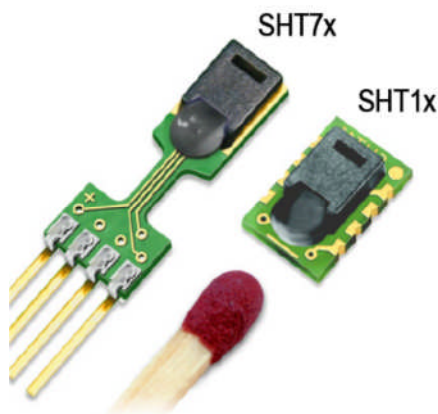
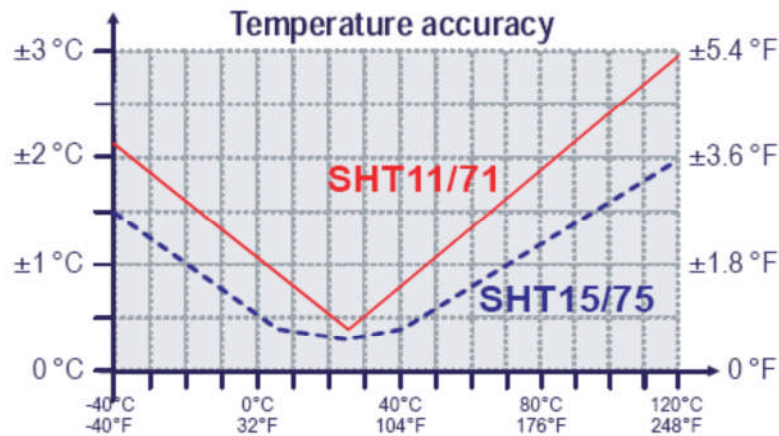
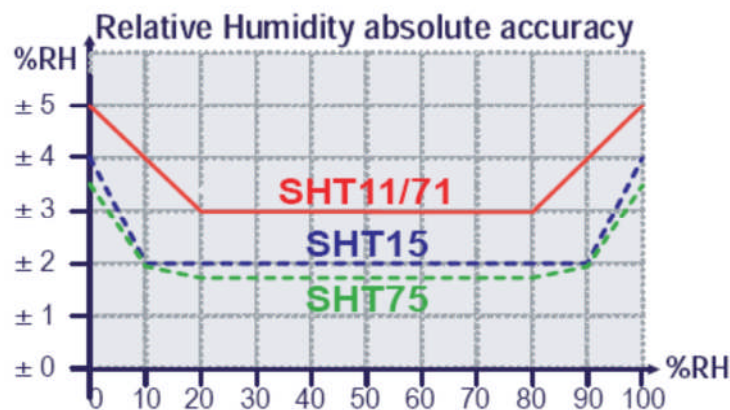


Figure III.7:capteurs de température et d'humidité.**Figure III.8:**Graphe de précision en température absolue de SHT75**Figure III.9:**Graphe de précision en humidité absolue de SHT75.**III.3.9.Remarque :**

Selon les graphes de température et d'humidité relatifs à la précision des capteurs SHT75 utilisés dans notre installation, nous pouvons affirmer qu'ils sont bien adaptés à notre application. En effet, dans l'intervalle de température de fonctionnement du séchoir, 10 à 75 °C selon le produit à sécher, la précision en humidité se stabilise à $\pm 2\%$ tandis que la précision affectant les températures est inférieure à 1 °C.

III.3.10.Capteur de pression :

C'est un MXP4250, un capteur de pression absolue de type analogique. Sa plage de capture est de « 0-220Kpa » ; il est :

- Complètement intégré et compact.
- Marge de température « -40 °C à +125 °C ».
- Marge d'erreur de 1.5% sur [0°C ,85°C].
- Sortie analogique [0-5V], proportionnelle à la pression.

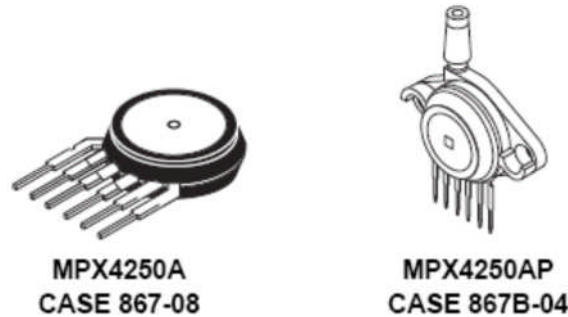


Figure III.10: capteur de pression MPX4250.

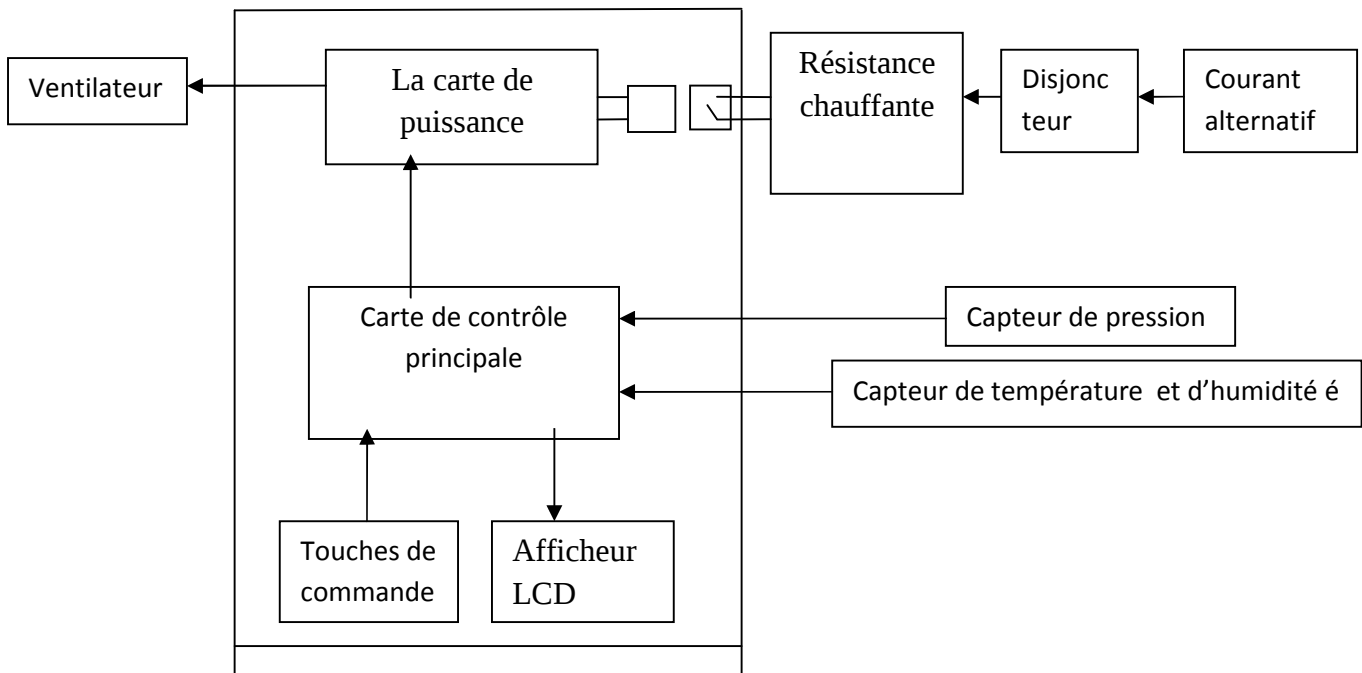


Figure III.11: Schéma du sécurit électrique du séchoir

III.3.1.1.Montage :

Après avoir réuni l'ensemble des éléments constitutifs du séchoir, nous avons procédé comme suit :

- Placé les composants électroniques - transformateur, afficheur, disjoncteur, carte de puissance et processeur principal- dans le boîtier.
- Raccordé les câbles des sondes, du ventilateur, du cadre chauffant et de l'alimentation au boîtier.
- Placé le boîtier sur le séchoir.

- Placé le cadre chauffant.
- Placé le ventilateur dans l'ouverture prévue, à proximité du cadre chauffant.

III.4. Conclusion :

La réalisation de ce prototype de séchoir ne peut être que bénéfique pour l'avancement des travaux de recherches dans le domaine du séchage convectif en général des produits agroalimentaires et en particulier dans le cas de la tomate. Cela permettra aussi la comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux de la simulation du séchoir à partir de modèles mathématiques du processus.

Chapitre IV:

**Expérimentations, et interprétation des
résultats**

IV.1. Introduction :

Dans le but de vérifier la sensibilité du séchoir aux paramètres de fonctionnement et d'étudier expérimentalement les possibilités d'économie d'énergie, en tenant compte des contraintes exigeantes du séchage, nous avons procédé à un premier test en utilisant le caisson de séchage en banc d'essai pour mesurer l'influence de la température et de la vitesse de l'air sur la cinétique de séchage. Nous avons commencé par la détermination de la teneur en eau initiale de la variété locale de la tomate. Les tests sont menés en étuve 'Mammert' au laboratoire de génie civil de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou sur un échantillon de 1157.3 g de tomate commerciale de type rond.

Les tomates sont choisies dans un calibre moyen compris entre 47 à 50 mm de diamètre et pèsent environ 100 g chacune. La fiche de produit présentée dans le tableau suivant fournit les informations de base concernant les traitements les plus couramment appliqués au produit.

IV.2. Fiches produits (la tomate) :

Le séchage se fait différemment selon la nature des produits. Il existe, de ce point de vue, plusieurs grandes familles, classées en fonction des caractéristiques internes des produits considérés (forme, capillarité, homogénéité, teneur en sucre, en sels minéraux et maturité) [24].

Non du produit : Tomate

Séchage : délicat

Ingrédients : eau

Source des informations : CIEPAC, ENDA, ABAC-GERES.

➤ Les étapes de préparation conseillées :

1. Lavage
2. Découpage de 1 cm d'épaisseur en rondelles Ou lamelles.
3. Mettre directement dans le séchoir

➤ Paramètres de séchage :

Teneur en eau initiale	95 %
Teneur en eau finale recommandée	10 %
Température maximale	65°C
Rapport de séchage	1/10
Critère de fin de séchage	Consistance du cuir
conservation	12 mois maximum

Tableau IV. 1: Paramètres de séchage

➤ **Observations :**

1. Les tomates ne supportent pas un temps de séchage trop long (3 jours). Au-delà, elles brunissent. Des moisissures peuvent également être source d'altérations.
2. La tomate une fois séchée peut être réduite en poudre.
3. À partir du produit séché à 40 %, il est possible de conserver facilement la tomate sous forme de concentré salé à 10 %.

IV.3. La détermination de la cinétique de séchage de la tomate à l'aide d'une étuve 'Mamert'**IV.3.1 Etuvage :** L'expérience est menée comme suit :

- Lavage et découpage de la tomate puis pesée des produits à leur taux d'humidité initiale soit 1119.6 g pour l'échantillon testé.
- Introduction de la tomate dans l'étuve après réglage de la température à environ 60°C
- Pesage de l'échantillon toutes les 15 minutes jusqu'à la fin de l'opération de séchage après obtention d'un produit aux caractéristiques de séchage souhaitées.

Date des opérations (jour et heure)	Poids du produit(g)	Température (°C)
Début de séchage 22/03/2015 à 11h:23 mn	1119.3	57.7
Fin de séchage 23/03/2015 à 11 h30mn	91.8	Stabilisée à 60

Tableau IV.2: Expérience n°1 effectuée sur l'étuve Memmert

Date des opérations (jour et heure)	Poids du produit(g)	Température (°c)
Début de séchage 23/03/2015 à 12h:36mn	7146	67.7
Fin de séchage 24/03/2015 à 17h30mn	427.9	Stabilisée à 70

Tableau IV.3: Expérience n°2 effectuée sur l'étuve Memmert**IV.3.2 Méthodologies d'obtention des courbes de séchage :**

L'intérêt de cette courbe est important, il faut connaître les valeurs de la teneur en eau initiale et d'équilibre et suivre l'évolution du poids des échantillons pour établir la cinétique de séchage en fonction des conditions d'humidité et de température de l'air asséchant.

Cette courbe caractéristique de séchage permet le calcul du flux massique d'eau perdue et donc la vitesse de séchage en fonction du temps ou en fonction de la teneur en eau du produit.

IV.3.3 Evolution de l'humidité du produit au cours du séchage :

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

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

$X(t)$ 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 :

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

IV.3.4 La teneur en eau d'équilibre de la tomate :

La teneur en eau d'équilibre représente l'humidité du produit lorsque l'activité de l'eau contenue dans le produit devient égale à l'humidité relative de l'air environnant dans lequel il est placé. Dans cette situation, les processus de transferts d'eau et de chaleur sont à l'arrêt puisque les pressions de vapeur et les températures à la surface du produit et au sein de l'air ambiant s'égalisent parfaitement.

Les isothermes de sorption-désorption sont des courbes qui permettent de déterminer la valeur de la teneur en eau d'équilibre pour toute valeur de l'humidité relative de l'air ambiant et une valeur donnée de sa température.

IV.3.5 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 δt sera calculée comme suit :

$$\frac{dx}{dt} = \frac{X(t+\delta t) - X(t)}{\delta t} (\text{kg eau /kg } m_s \cdot \text{h}) \quad (\text{IV.3})$$

IV.4. Description et caractérisation du dispositif expérimental

IV.4.1. Dispositif expérimental :

C'est un séchoir par convection forcée d'air chaud, composé de :

- o Une enceinte de dimensions 100x50x60 cm³ en Alu-plastique avec porte coulissante à 2 volets.

- o Un ventilateur 220 volts.
- o Un jeu de trois (03) résistances montées sur un cadre.
- o Un jeu de sondes de température et d'humidité.
- o Un coffret de commande électronique muni d'un programme informatique de gestion de paramètres.

L'expérimentateur peut fixer les paramètres de température et vitesse de l'air convectif selon la nature du produit et les conditions exigées par l'expérimentation. Quant aux données expérimentales, elles sont recueillies, via une interface, par un micro-ordinateur.

Quant aux claies, elles sont disposées sur un système de supports modifiables à volonté en fonction de la quantité de tomates à sécher.

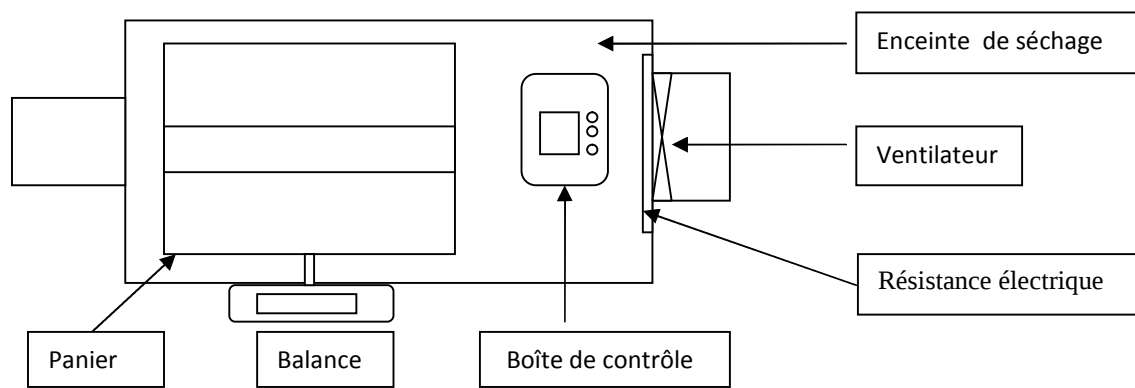


Figure IV. 2:dispositif expérimental de séchage

IV.4.2.Mise en route :

Le système étant automatique et piloté par un processeur, sa mise en marche est relativement simple. Il suffit d'actionner le disjoncteur principal d'alimentation électrique. L'afficheur monté sur le boîtier de commande est aussitôt allumé. Le menu se déroule et nous invite à rentrer les consignes de température et d'humidité sur la première option. Sur la deuxième, nous pouvons faire un choix sur le mode de contrôle et régulation à savoir manuelle ou bien automatique (voir partie réalisation). La troisième quant à elle permet d'évaluer les mesures de température, d'humidité et de pression du milieu de chauffage à l'extérieur ; les capteurs étant déplaçables.

Il suffit alors de poser les échantillons, d'effectuer les réglages nécessaires à l'aide des trois touches ; et le système démarre l'opération de séchage avec les options choisies.

IV.4.3.Procédure expérimentale :

- Vérifier que l'ordinateur est en route pour l'acquisition de données et afficher ;
- Une fois que le produit est posé sur le panier et placé à l'intérieur du banc d'essai, son poids initial s'affiche sur la balance. Il est fondamental pour l'homogénéité du séchage de ne pas tasser le produit sur les claies ;
- On alimente l'appareil en courant électrique en mettant l'interrupteur à l'état actif.

- On règle la température par la boîte de commande en fixant une température pour l'air asséchant (50 °C par exemple) et mettre en marche le chauffage de l'air.
- Régler la vitesse de ventilateur pour obtenir un débit d'air constant dans le séchoir: il est important de contrôler cette valeur pendant le séchage pour la réajuster si besoin.
- On enregistre la température et l'humidité de l'air de séchage soufflé.
- On pèse la masse du produit à sécher toutes les heures afin de suivre la cinétique de séchage et ceci jusqu'à ce que la masse devienne constante. Pour cela on utilise une balance à affichage numérique de sensibilité 1/10.

IV.4.4.Remarques:

1. Ces paramètres peuvent être enregistrées et affichées automatiquement sur ordinateur
2. Les températures à contrôler et à mesurer sont :

- T_{sec} : température de l'air à l'entrée de l'installation avant chauffage.
- T_{chaud} : température de l'air à l'entrée du sécheur après chauffage
- T_{sorties} : température de l'air à la sortie du sécheur
- Humidité: humidité relative de l'air à la sortie du sécheur

IV.4.5.Relevé des valeurs :

- La température de l'air avant chauffage ne doit que peut varier.
- Une fois la consigne de chauffage de l'air atteinte, la température de l'air après chauffage ne doit pratiquement pas varier.
- Noter toutes les 10 minutes puis toutes les 5 minutes quand l'humidité relative décroît, la température ainsi que l'humidité relative de l'air en sortie

IV.4.6.Arrêt de l'installation :

Le séchage est terminé quand la variation de l'humidité relative de l'air en sortie tend vers 0. Néanmoins ces variations de l'humidité à elles seules ne suffisent pas à déterminer la fin du séchage. Ainsi l'intervention du poids du produit séché nous permet d'affiner la procédure du contrôle du séchage et si nécessaire de relever la température de consigne pour atteindre le niveau désiré pour la teneur. Ces deux critères ensemble seront les consignes d'entrée dont le processeur tiendra compte.

IV.4.7.Exploitation des résultats :

Le compte rendu comprendra les éléments suivants :

- On détermine les teneurs en eau initiale et finale de la tomate.
- A partir du diagramme de l'air humide, on déterminera la température, l'humidité absolue et l'enthalpie de l'air à l'entrée du séchoir, à la sorti de la résistance et à la sortie du séchoir jusqu'à la stabilité de la masse du produit.
- On tracera à partir du système d'acquisition de données et d'EXCEL l'évolution en fonction du temps de T_{sortie} et de l'humidité de sortie.
- À partir de la méthode expliquée en annexe, on détermine la masse d'eau gagnée par l'air

pendant les intervalles de temps choisis.

- On tracer une série de courbes à différentes températures de l'air représentant l'évolution de la teneur en eau de la tomate en fonction du temps.
- On comparera la valeur finale avec celle qui est obtenue dans le chapitre précédent.
- On tracera la cinétique de séchage (évolution de la vitesse de disparition de l'eau du produit).

IV.6. Interprétation des résultats :

IV.6.1. Traitement des données expérimentales :

a. Courbe de perte de poids :

Les données expérimentales sont données sous forme d'un graphique tel que représenté sur les figures suivantes. De plus, nous avons approché les points expérimentaux avec une courbe de tendance de type logarithmique :

$$X(t) = A + \log(Bt) \quad \text{où } B > 0 \quad (\text{IV.4})$$

Avec : t est temps de séchage en heures.

Le coefficient de détermination R^2 est proche de 1. Par conséquent, on peut conclure que la loi d'évolution du séchage de la tomate en fonction du temps est non linéaire.

Les courbes de teneur en eau tendent vers une horizontale à la fin du séchage. C'est-à-dire que la résistance au transfert de masse augmente avec la diminution de l'humidité du produit. Il y aura un apport de chaleur pour le produit sans évolution notable de sa teneur en eau.

On note qu'après une montée rapide de la vitesse de séchage liée à la montée en température, il s'ensuit une phase où la vitesse décroît presque linéairement, suivi d'une phase qui débute dès que le produit atteint une valeur en teneur en humidité voisine de 40 % où on rentre dans le domaine hygroscopique. L'humidité résiduelle est sous forme liée et la vitesse de séchage diminue fortement. Ces courbes montrent bien le comportement hygroscopique de la tomate.

a. Temps de séchage :

Dans la première expérience le temps de séchage a été estimé à $t_1 = 23$ heures et 40 minutes. Ce qui représente un temps de séjour acceptable du point de vue de la conservation du produit. Ce temps passe cependant à $t_2 = 29$ heures et 6 minutes dans la seconde expérience où la quantité de produit est pratiquement 7 fois plus importante. L'optimisation de la charge du séchoir peut se faire sur la base du critère de la masse d'eau évaporée par unité de temps en moyenne sur la durée de séchage et sur le critère de la consommation d'énergie par kg de produit séché.

b. L'influence de la température :

La dernière courbe (figure suivante) qui donne $t = f(T)$ donne aperçu bien significatif de l'influence de la température sur le temps du séchage. En effet, plus la température de l'air entrant dans le caisson est élevée, plus le temps de séchage est court.

On remarque que le temps de séchage est de 1500 min pour la température de 50°C alors qu'il ne faut que 500 min soit trois fois moins de temps pour arriver à la même teneur en eau lorsque la température est de 70°C.

c. Influence de la charge sur le temps de séchage :

Plus la quantité de produit à sécher est importante et plus le temps de séchage est long. L'évolution est, dans le domaine des charges étudiées, proportionnelle à la masse de produit mise à l'intérieur de l'étuve (figure IV.8). C'est en partie dû à l'augmentation de la concentration de vapeur dans l'air de séchage; son accroissement avec la charge affecte la quantité d'eau évaporée. Cela montre que pour assurer un séchage homogène en un minimum de temps et une dépense énergétique optimum, le choix de la température et de la vitesse doivent être fait de manière judicieuse avant d'entamer ce processus, en tenant compte de l'humidité de l'air asséchant qui est le plus souvent une contrainte du milieu ambiant. C'est une stratégie à mettre en place à partir par exemple d'un outil de simulation des opérations de séchage ou encore par le biais d'expériences répétitives et de courbes de séchage empiriques.

d. La détermination de la teneur en eau initiale et interprétation des mesures du poids :

- On détermine la masse de matière sèche directement par pesée.

$m_f = 91.8$ g est la masse trouvée après séchage d'un échantillon de masse $m_1 = 1119.3$ g

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

$$M_e = m_1 - m_f = 1119.3 - 91.8 = 1028.64 \text{ g} \quad (\text{IV.5})$$

Ce qui permet de déterminer la teneur en eau initiale en base sèche et humide comme suit :

$$X_1 = \frac{M_e}{m_s} = 11.35 \quad \left(\frac{\text{kg d'eau}}{\text{kg de ms}} \right) \quad (\text{IV.6})$$

$$x_1 = \frac{M_e}{m_h} = 0.918, \quad \left(\frac{\text{kg d'eau}}{\text{kg de produit}} \right) \quad (\text{IV.7})$$

- En finale :

En connaissant la masse de la matière sèche qui se calcule par la relation (II.54) :

$$m_s = (1 - x_1) m_1 = 90.66 \text{ g}$$

$$X_2 = \frac{m_f - m_s}{m_s} = \frac{91.8 - 90.66}{91.8} = 0.0126 \text{ (g d'eau / g de produit sec)} \quad (\text{IV.9})$$

$$x_2 = \frac{m_f - m_s}{m_f} = \frac{91.8 - 90.66}{90.66} = 0.0128 = 1.2\%. (IV.10)$$

- 2. L'enregistrement de la masse humide $m_h(t)$ du produit à sécher en fonction du temps, permet de déterminer les teneurs en eau base sèche en utilisant la relation (IV.1)

Remarque :

Nous avons abouté à un produit séché destiné à le faire analyser dans un laboratoire. Nous avons constaté les remarques suivantes :

- A chaque expérience il faut prendre en considération la variété du produit séché ; car chaque variété a sa propre teneur en eau initiale.
- A chaque expérience; il faut prendre en considération la perte d'eau et du poids causée par la découpe du produit.
- Pour trouver la teneur en eau exacte du produit, il faut le peser plusieurs fois jusqu'à ce que sa masse ne varie pas pour assurer son séchage total. En effet, dans notre ça le produit n'a pas atteint sa teneur en eau finale qui doit être proche de 95 % (base humide) [24]. C'est cette valeur que l'on admettra comme teneur initiale en moyenne pour les tomates.
- Les résultats ont montré que la tomate de variété choisie contient 91.8 % d'eau (91.8 g d'eau /100g de tomate) et 8.19 % de matière sèche (8.19g /100g de tomate). Ces valeurs sont comparables à celles trouvées dans la littérature, qui sont respectivement de 95 et 5%.



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

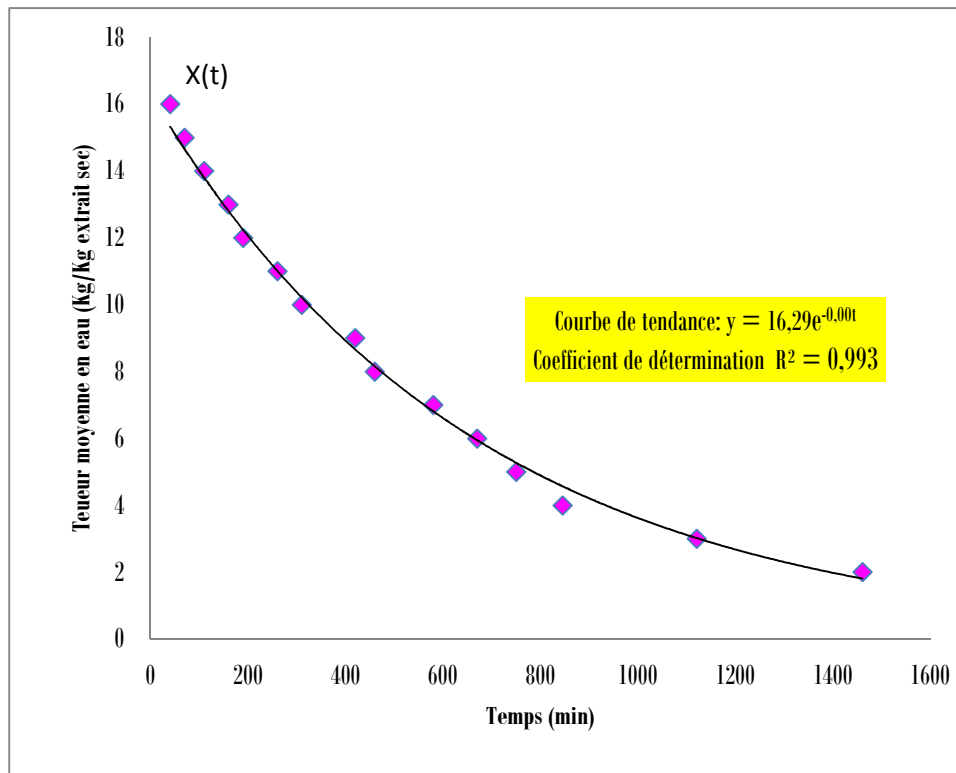


Figure IV. 4: Evolution de la teneur moyenne en eau en fonction du temps ($T = 50^{\circ}\text{C}$)

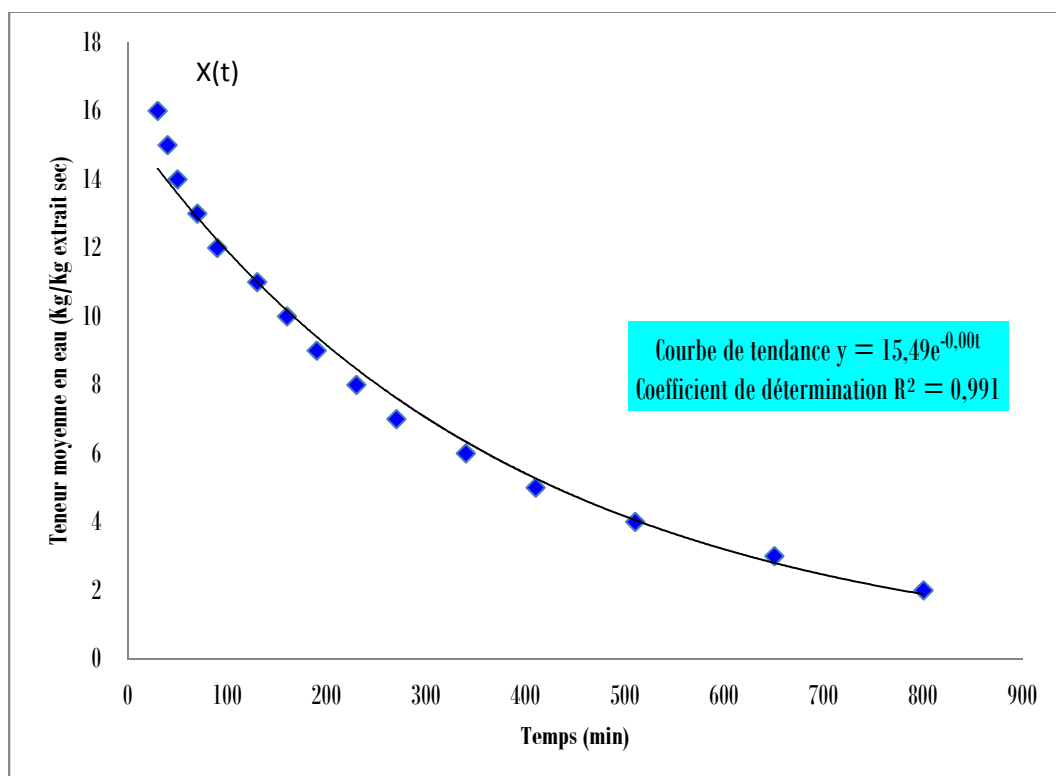


Figure IV. 5: Evolution de la teneur moyenne en eau en fonction du temps ($T = 60^{\circ}\text{C}$)

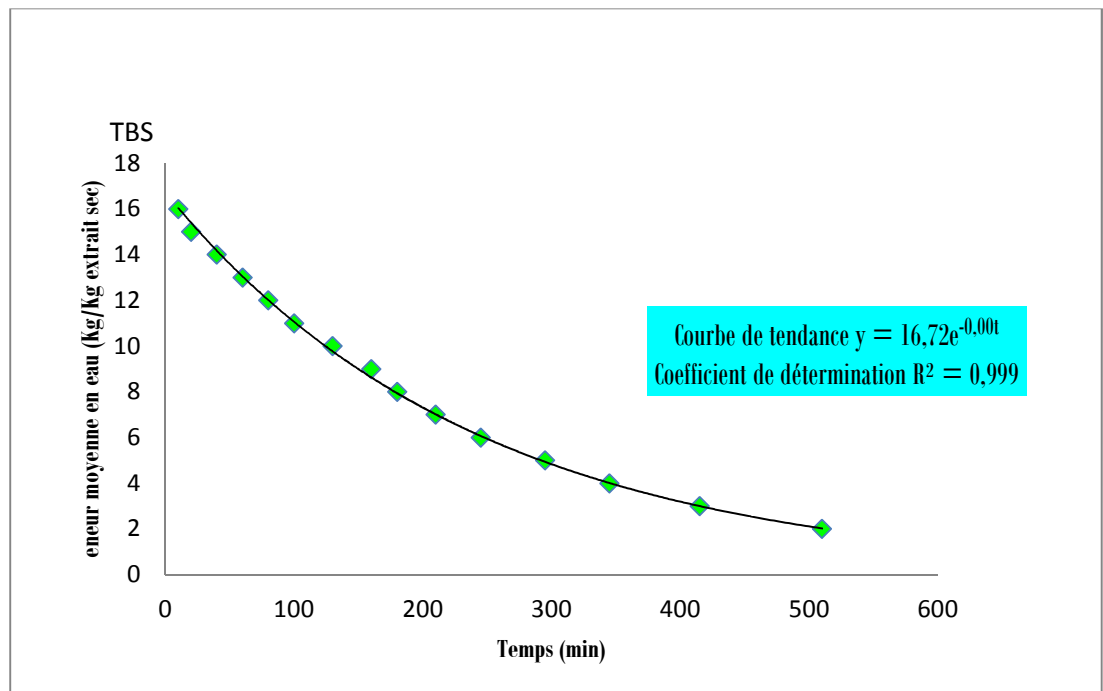


Figure IV. 6: Evolution de la teneur moyenne en eau en fonction du temps de séchage (a T = 70°C)

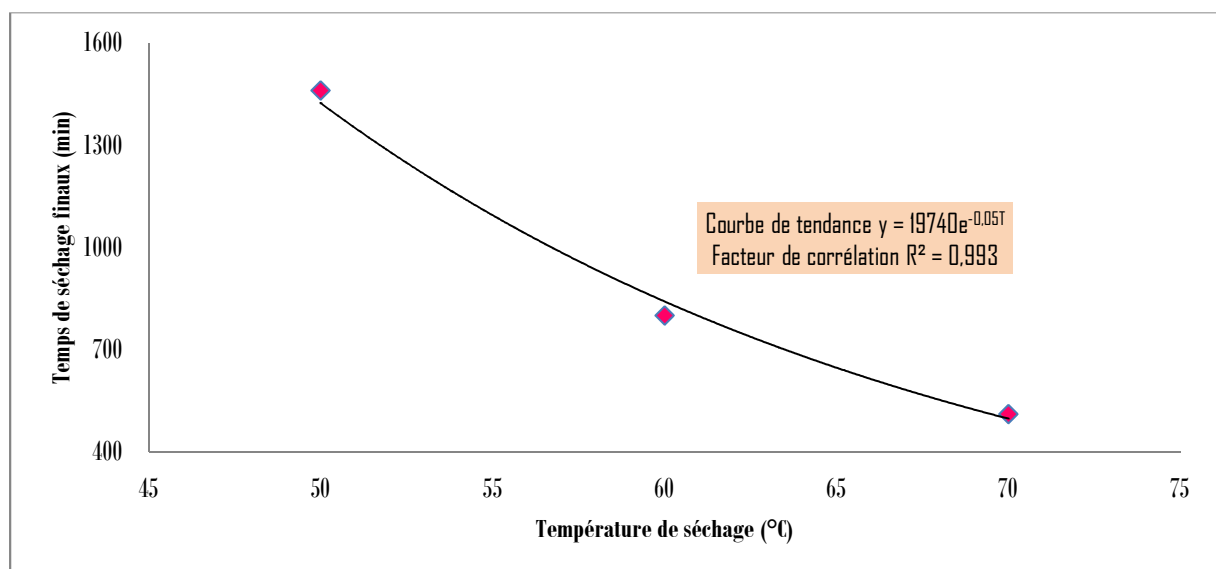


Figure IV. 7: Evolution des temps de séchage en fonction de la température de séchage

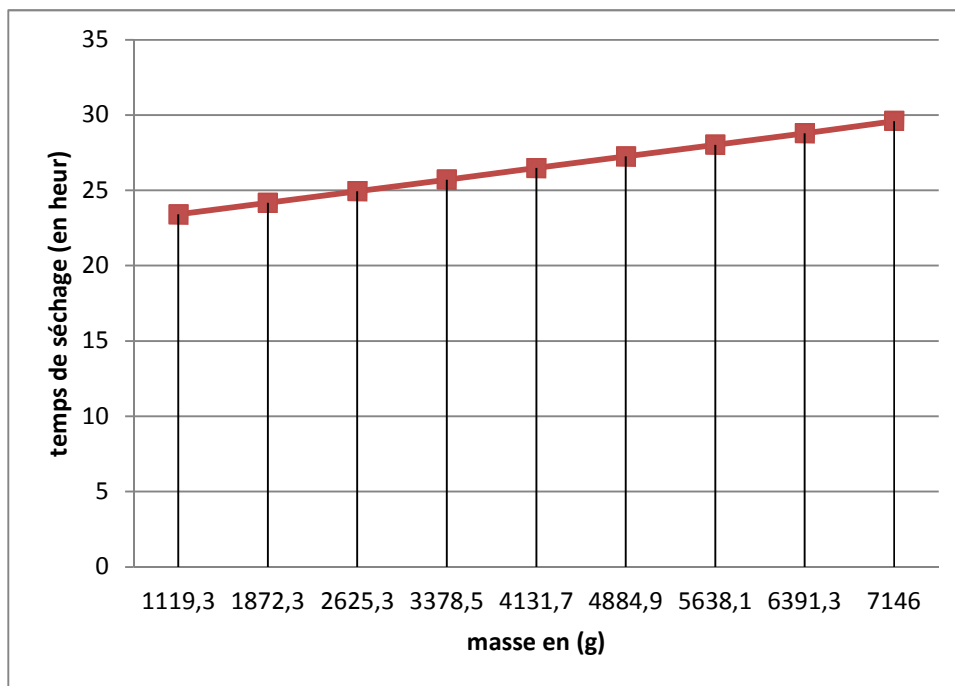


Figure IV. 8: Evolution du temps de séchage en fonction de la masse de produit.

IV.7. Conclusion :

Ce chapitre montre la procédure expérimentale à suivre pour arriver à des résultats satisfaisants. L'étude des conditions externes du séchage sur le produit à sécher est limitée à l'effet de la température et de la vitesse de l'air. Le séchage se traduit par la diminution de l'humidité contenue à l'intérieur du produit, comme le montrent les courbes obtenues.

L'augmentation du débit d'air et de la température permet d'accroître les échanges thermiques et massiques et par conséquent d'élever la température du produit à sécher et surtout les quantités d'eau évaporées.

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette réalisation se veut comme un premier pas fait dans le sens d'une meilleure compréhension des phénomènes de séchage. Nous avons choisi notre matériel selon les fonctionnalités souhaitées, le coût du matériel, les contraintes techniques et la complexité de mise en place. La réalisation de ce séchoir nous a également donné l'opportunité de travailler sur plusieurs domaines à la fois notamment la programmation, l'électronique, la gestion de l'énergie et la mécanique.

Nous avons commencé par une étude théorique du principe de séchage puis nous avons opté sur la manière de réaliser un appareil qui doit permettre de réaliser le séchage d'un produit agricole en l'occurrence la tomate avec la sensibilité et la fiabilité qu'une telle opération exige tout en lui affectant un mode de fonctionnement autonome par rapport au temps assez important que prend en général le séchage des produits humides. Ce sont toutes ces contraintes qui ont concouru à une telle conception comprenant un système de soufflage et de chauffage électrique d'air pour obtenir une vitesse de séchage raisonnable pour accélérer le traitement de la tomate et éviter sa dégradation, et un boîtier de commande pour automatiser complètement l'opération de séchage. Le résultat obtenu est largement satisfaisant et les nombreux tests de fonctionnement réalisés ont tous été concluants ; le séchage a été mené automatiquement jusqu'au bout en produisant de la tomate sèche de très bonne tenue. C'était l'objectif principal assigné à notre mémoire ; ce qui ne nous a pas empêché de continuer nos investigations sur le phénomène de séchage, et d'étudier entre autre l'influence des paramètres comme la température de séchage ou encore celle de la charge du séchoir sur le temps de séchage.

Cela a demandé d'équiper le séchoir en moyens de mesure et de contrôle de la température et de la vitesse de l'air. Des expériences réalisées en premier lieu sur une étuve nous ont permis d'obtenir les courbes caractéristiques de séchage indispensables avant même la conception de notre installation. L'étape suivante a consisté :

- A déterminer les conditions optimales de son fonctionnement
- A avoir une idée sur le comportement de notre produit.
- A comprendre comment les paramètres tel que la température et le poids du produit influencent le temps de séchage.

Bien évidemment ces expériences n'expliquent pas totalement les phénomènes liés au processus de séchage; en effet, il faut mener de nouvelles expériences sur le dispositif expérimental réalisé et procéder à la simulation du comportement séchoir à partir de la modélisation proposée dans ce mémoire. Par ailleurs, des mesures complémentaires peuvent être effectuées sur notre installation comme par exemple la mesure de la consommation d'énergie électrique nécessaire pour l'évaluation de la consommation énergétique massique totale (CEM) et des améliorations peuvent être portées en conséquence.

Enfin, on rappellera que le séchoir en question est pour le moment dépourvu d'éléments indispensables comme un système de recyclage, un diffuseur d'air, ou encore un

Conclusion générale

régulateur d'humidité pour suivre un programme de séchage rigoureux, enfin de dispositifs qui contribueront sûrement à améliorer son efficacité globale.

Nous avons essayé avec beaucoup de bonne volonté de réaliser tous ces dispositifs et même pensé à faire des choses sans pouvoir les réaliser dans le temps imparti à cette étude ; mais nous les estimons possibles à faire à l'avenir comme:

- La réalisation et l'assemblage du système de recyclage d'air.
- Le contrôle total du séchoir par l'ordinateur, qui pour l'instant joue un rôle passif en ne faisant que la réception et le traitement des données que le boîtier lui adresse.
- L'ajustement et mise au point du séchoir avec une optimisation technico-économique.

Annexes

Annexes (A.1)

Nous avons rassemblé ici les principales définitions et relations générales relatives à l'air et au produit humide et dont la connaissance est indispensable pour traiter un problème de séchage

1. Caractéristiques et quelques généralités sur les propriétés de l'air de séchage :

L'air sec peut être considéré comme un mélange de gaz dont la composition est couramment approchée à l'aide des 3 concentrations volumiques suivantes : O₂: 0,21%, N₂: 0,78%, autres gaz (Dioxyde de carbone, gaz rares, vapeur d'eau..): 1%

L'air humide est constitué d'un mélange d'air sec et de vapeur d'eau et se comporte sensiblement comme un gaz parfait. [19]

Si p est la pression totale de l'air humide, à partir de la loi de Dalton :

$$P = p_a + p_v \quad (A.1)$$

P_a : pression partielle de l'air sec

P_v : pression partielle de la vapeur d'eau

1.2. Le pouvoir évaporatoire de l'air :

On définit le « pouvoir évaporatoire » de l'air comme sa capacité à absorber de l'eau placée à son contact. Il est mesuré en grammes d'eau par mètre cube d'air qu'il peut absorber pour atteindre la saturation en eau. [26]

Deux paramètres sont introduits pour quantifier les proportions entre l'air sec et la vapeur d'eau contenue dans l'air:

1.2.1. Humidité absolue (humidité spécifique):

L'humidité absolue H_a est définie comme étant la masse de vapeur d'eau contenue dans l'air par kg d'air sec. Elle s'exprime en grammes d'eau par kg d'air sec (kgv /kgas). Par exemple si $x = 10$ g/kg d'air sec, dans 1,01 kg d'air on a 1 kg d'air sec et 10 g de vapeur d'eau; [26]

$$w = \frac{m_v}{m_{as}} [\text{kg}_v \cdot \text{kg}^{-1}_{as}] = 0.622 \frac{P_{vs}}{p - P_{vs}} \quad (A.2)$$

Où :

m_v et m_{as} sont les masses de vapeur d'eau et d'air sec contenues dans un même volume v d'air humide.

P_{vs} : est la pression de vapeur saturante.

1.2.2. Humidité relative (degré hygrométrique) :

Elle s'exprime en pourcentage. Cette valeur précise le niveau d'humidité absolue de l'air par rapport au niveau d'humidité absolue maximal qu'il pourrait avoir, compte tenu de la température de l'air et de la pression. Elle permet donc de connaître le niveau de saturation de l'air en eau.[26]

Pour évaluer le pouvoir évaporatoire d'une quantité d'air donné, il faut en connaître son degré hygrométrique (ϕ). On utilise alors la notion de température humide (T_h)

La vapeur d'eau se présente dans l'air sous forme de vapeur, si ($P_v < P_s(T)$). On définit alors l'humidité relative H_r de l'air comme le rapport entre la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air et la pression de saturation P_s de cette vapeur d'eau à la température T .

$$\phi(\%) = \frac{P_{va}}{P_{vs}} \times 100 \quad (A.3)$$

1.3. Températures caractéristiques de l'air humide :

La chaleur à transférer au milieu à sécher est apportée par un gaz vecteur chaud qui assure aussi le transport des vapeurs hors de l'enceinte de séchage. On distingue classiquement 3 températures remarquables [27].

1.3.1. Température du bulbe sec:

La température du bulbe sec T ou plus exactement température « sèche », est celle qui est indiquée par un thermomètre dont l'élément sensible, le bulbe, est parfaitement sec. Elle est mesurée avec un thermomètre usuel.

1.3.2. La température humide T_h :

C'est la température d'équilibre d'une masse d'eau s'évaporant dans l'air dans le cas où la chaleur nécessaire à l'évaporation n'est prélevée que sur l'air.

La différence ($T - T_h$) est représentative de l'humidité relative H_r de l'air car :

- Elle est nulle si l'air est saturé en vapeur d'eau soit, si $H_r = 100\%$, pas d'évaporation possible.
- Elle augmente avec la différence ($P_s(T) - P_v$) qui est le terme moteur du transfert de masse donc elle diminue quand H_r augmente.

1.3.3. La température de rosée T_r :

Il s'agit de la température pour laquelle l'air devient saturé pour la pression de vapeur d'eau P_v considérée. Or P_v intervient dans l'expression de l'humidité spécifique, si bien que la température de rosée représente encore la température de saturation à humidité spécifique constante.

1.4. Taux de saturation

C'est le rapport entre l'humidité absolue de l'air humide et l'humidité absolue de l'air saturé à la même température.[19]

$$\phi = \frac{x}{x_s} \quad (A.4)$$

1.5. Influence de la température et de la pression

Si l'on fait varier, à température constante, la pression totale P , les pressions partielles p_a et p_v dans les deux constituants varient dans la même proportion que p , mais alors que la pression p_a peut atteindre toutes les valeurs possibles, p_v ne peut dépasser la pression de valeur saturante. (Voir le diagramme de l'air humide dans) [19].

Un échauffement à pression constante diminue l'humidité relative de l'air et au contraire pour le refroidissement.

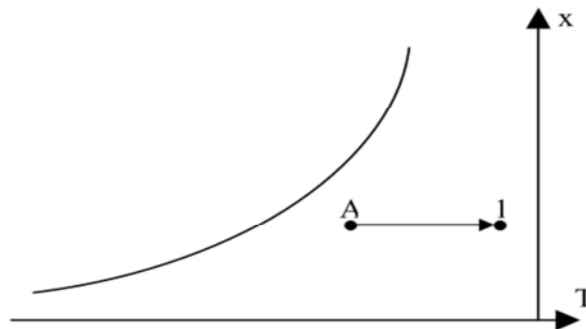


Figure A.1: Représentation d'un échauffement à pression constante sur le diagramme de l'air humide

Cependant, les masses respectives d'air et de vapeur ne peuvent pas être modifiées par ces variations de température et de la pression tant qu'il n'y a pas condensation. L'humidité absolue reste donc constante tant que la vapeur demeure dans la zone sèche.

1.6. Volume spécifique de l'air humide :

Le volume spécifique, noté v ou v_s , représente le volume occupé (à la pression atmosphérique) par l'air humide dont la masse d'air sec est égale à 1 (kg). [26]

On peut utiliser la formule suivante :

$$v_s = \frac{1+w}{\rho} \quad (A.5)$$

Avec:

w : humidité absolue de l'air humide (kg d'eau/kg d'air sec)

ρ : masse volumique de l'air humide (kg d'air humide/m³ d'air humide)

En général $w \ll 1$ donc

$$v_s = \frac{1}{\rho} \quad (A.6)$$

1.7. La masse volumique de l'air vaut (ρ) :

La masse volumique de l'air vaut

$$\rho = m_a + m_v = \frac{1}{r_a T} (p_a + 0.622 p_v) \quad (A.7)$$

Tel que :

m_a : la masse d'air sec

m_v : la masse de vapeur d'eau

On peut utiliser la formule suivante :

$$\rho = \frac{1}{r_a T} (p - 0.378 p_v) \quad (A.8)$$

On peut également utiliser les tables données dans (A.2) [19]

1.8. Chaleur spécifique de l'air humide

$$c_p = c_{pa} (1 - c_v) + c_{pv} c_v \quad (A.9)$$

Avec :

c_{pa} : Chaleur massique de l'air sec $c_{pa} = 1006 \text{ J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$

c_{pv} : chaleur massique de la vapeur d'eau $c_{pv} = 1840 \text{ J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$

1.9. Fraction massique de la vapeur d'eau :

La Fraction massique de la vapeur d'eau est donnée par la relation :

$$C_v = \frac{m_v}{m_v + m_{as}} \quad (\%) \quad (A.10)$$

Ou encore :

$$C_v = \frac{x}{1+x} = \frac{0.622 \cdot p_v}{p - 0.378 \cdot p_v} \quad (A.11)$$

1.10. Pression de vapeur saturante

$p_s(T)$ est la pression de saturation (d'équilibre liquide-vapeur) de la vapeur d'eau à la température T . On peut utiliser la formule de Dupré valable entre -50°C et $+200^\circ\text{C}$ pour calculer $p_s(T)$ [14] [26].

$$p_s(T) = \exp \left[46,784 - \frac{6435}{T + 273,15} - 3,868 \ln (T + 273,15) \right] \quad (A.12)$$

T : Température en °C

$p_s(T)$: Pression de saturation en mmHg.

On peut également utiliser la formule de J.Bertrand [3] :

$$P_s(T) = 10(17.443 - 2795/T - 3.868 \cdot 10^T) \quad (A.13)$$

1.11. La chaleur latente de l'air

L'air, lorsqu'il est plus chaud que l'eau, apporte l'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau libre (en surface) et la vapeur d'eau ainsi formée se mélange à l'air. L'énergie fournie à l'eau par l'air est ainsi récupérée par celui-ci sous forme d'énergie contenue dans la vapeur d'eau (appelée chaleur latente).

1.12. Enthalpie de l'air humide :

L'enthalpie est le terme utilisé en thermodynamique pour exprimer la chaleur totale (ou énergie calorifique) d'un système isolé. Exprimée en kilocalories (kcal) ou millithermies (mth) par kg d'air sec, elle représente la chaleur totale de 1 kg d'air sec + x kg de vapeur d'eau contenus dans cet air, et est donnée par la relation suivante [31].

$$h = 0,24T + w (0,46 T + 597) \quad (A.14)$$

Dans laquelle:

h = enthalpie en kcal/kg d'air sec (ou mth/kg)

w = poids (en kg) de vapeur d'eau contenue dans 1 kg d'air sec

T = température du mélange en ° C.

L'enthalpie est la somme de la chaleur emmagasinée par le mélange à la température T

- par 1 kg d'air sec: 0,24 T

- par w kg de vapeur d'eau

- sous forme sensible: w 0,46 T

- sous forme latente: w 597

Les coefficients représentent:

0,24 = chaleur spécifique de l'air (en kcal/kg/°C) (quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1° C la température de 1 kg d'air à pression constante).

0,46 = chaleur spécifique de la vapeur d'eau (en kcal/kg/°C) (quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1° C la température de 1 kg de vapeur d'eau à pression constante).

597 = chaleur latente de vaporisation de l'eau à 0° C (en kcal/kg d'eau).

1.13. La température de l'air :

On peut utiliser la formule précédente de H :

$$T = \frac{H - 597 x}{0.24 + 0.46 x} \quad (A.15)$$

Si non, la température du mélange est mesurée à partir d'un thermocouple.

1.14. Le mélange d'air humide :

Soit un mélange d'une masse m_1 d'air humide à la température T_1 , d'humidité absolue x_1 et d'une masse m_2 d'air humide à la température T_2 , d'humidité absolue x_2 [3].

a. L'humidité absolue de mélange

L'humidité absolue de mélange est donnée par :

$$W = \frac{m_1 x_1 (1 + x_1) + m_2 x_2 (1 + x_1)}{m_1 (1 + x_2) + m_2 (1 + x_1)} \quad (A.16)$$

b. L'Entalpie du mélange

L'enthalpie totale du mélange est la somme des h enthalpies totales apportées par chaque air.

$$h_m = h_1 + h_2 = \frac{m_{a1} h_1 + m_{a2} h_2}{m_{am}} \quad (A.17)$$

Avec :

$$h_1 = 0.24 T_1 + (597 + 0.46 T_1) x_1$$

$$h_2 = 0.24 T_2 + (597 + 0.46 T_2) x_2$$

2. Caractéristiques des produits humides [28] :

2.1. La teneur en eau du produit humide

Tout produit qu'il soit organique ou minérale contient de l'eau, on peut donc distinguer dans tout produit de masse m_h une masse m_e d'eau tel que la masse restante $m_s = m_h - m_e$ est la masse anhydre ou masse sèche [14].

Avant le séchage, un corps humide peut se présenter schématiquement comme sur la figure (A.2).

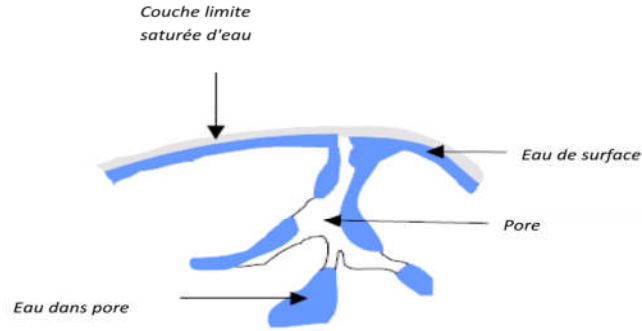


Figure A.2:Description d'un corps humide [25]

2.1.1. La teneur en eau à base sèche [26] :

L'humidité absolue d'un solide appelée aussi teneur en eau à base sèche, ou plus simplement humidité, s'exprime par la masse de liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse sèche.

$$X = \frac{M_e}{m_s} = \frac{m_h - m_s}{m_s} \quad (\text{en kg d'eau. kg}^{-1}) \quad (\text{A.18})$$

2.1.2. La teneur en eau à base humide :

L'humidité de produit peut aussi être définie par la teneur en eau base humide. Appelée aussi titre en eau, elle s'exprime par la masse du liquide contenue dans le produit par rapport à sa masse humide.

$$x = \frac{M_e}{m_h} = \frac{m_h - m_s}{m_h} (\text{en kg d'eau. kg}^{-1}) \quad (\text{A.19})$$

Les deux grandeurs sont liées par la relation :

$$x = \frac{X}{1 + X} \quad (\text{A.20})$$

2.2. Hygroscopicité

On dit qu'un comportement d'un corps est hygroscopique si, pour une humidité relative H_r et une température T de l'air de séchage, il existe une teneur en eau limite du produit correspondant à l'état d'équilibre [29].

Le tracé des isothermes d'adsorption permet de rendre compte de ce comportement. On trace expérimentalement à une température donnée la courbe d'équilibre de l'humidité relative de l'air au contact du solide humide en fonction de l'humidité de ce solide.

3. Les appareils de contrôle du processus de séchage

3.1. La mesure de l'humidité de l'air humide

a. Par le psychromètre à deux thermomètres (Psychromètre ou thermomètre à bulbe humide) :

C'est le procédé de mesure d'humidité de l'air le plus représentatif. La mesure de sa température sèche ou réelle T et de sa température humide T_h permet le calcul de l'humidité absolue, et par suite des autres caractéristiques de l'air. Le psychromètre se compose de deux thermomètres dont l'un a son réservoir maintenu sec et l'autre humide. [19]

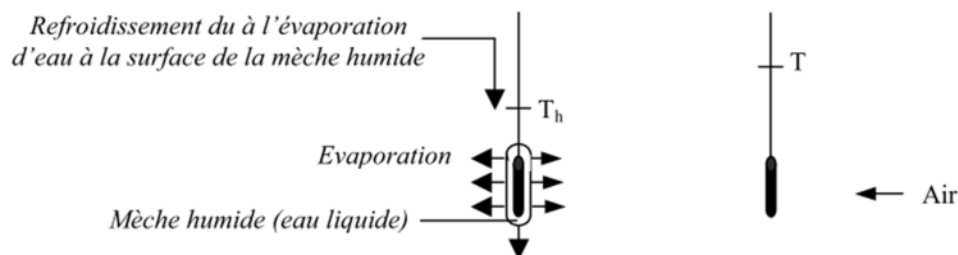


Figure A.3:schéma explicatif de fonctionnement de psychromètre a deux thermomètres [26]

b. Par l'Hygromètre à cheveux:

Principe de mesure :

Cet appareil de mesure simple permet de mesurer l'humidité relative HR de l'air. Son principe repose sur le fait que la variation de longueur d'un cheveu dépend de l'humidité de l'air .La précision de la mesure est de $\pm 3\%$ [26].

c. Hygromètre capacitif :

Principe de la mesure :

Ces hygromètres utilisent la variation de capacité d'un condensateur avec l'humidité relative de l'air dans lequel il se trouve. De la mesure de la capacité (sonde = condensateur) on déduit la valeur de l'humidité relative de l'air.

3.2.La mesure de la température sèche :

La mesure de la température est nécessaire pour suivre l'évolution des paramètres de fonctionnement, déterminer les propriétés thermiques de l'air et calculer des quantités d'énergie.

L'instrument le plus simple est le thermomètre à alcool ou à mercure (alcool jusqu'à 50°C , mercure jusqu'à 300°C). Le temps de réponse de ces appareils est assez: long. Ces thermomètres usuels sont peu précis mais peu coûteux.

a. Les thermomètres à bilame

Ils sont constitués de deux rubans métalliques à coefficients de dilatation différents, soudés entre eux. Une variation de température induit une déformation transmise à un cadran d'affichage. Une sonde est placée à l'endroit requis. Le cadran peut se trouver jusqu'à 40 cm de l'endroit de la mesure. Ces appareils sont robustes mais assez coûteux.

b. Les thermomètres à résistance électrique

Les thermomètres à résistance utilisent les propriétés des fils en métal (nickel ou platine pour des températures jusqu'à 500°C) dont la résistance électrique, mesurée, dépend de la température. Ces appareils ont un temps de réponse assez court et sont précis.

c. Les thermomètres à thermistance

Selon le même principe que les précédents, ils utilisent le germanium ou le silicium. Ils sont très précis et réagissent presque instantanément. Ils permettent un affichage digital. Ils sont très coûteux et leur degré de précision ne se justifie guère pour des opérations de séchage.

d. Les thermomètres à thermocouple

Lorsqu'on porte la soudure de deux fils de métaux différents (par exemple: cuivre et constantan) à une température T_1 tout en maintenant les deux autres extrémités à température constante T_2 , il apparaît une différence de potentiel électrique entre les extrémités, proportionnelle à la différence ($T_1 - T_2$). L'affichage est digital ou analogique ; Ces appareils sont assez précis.

4. Où et comment mesurer une température?

Il est toujours relativement simple de mesurer une température. Mais il n'est pas toujours évident de mesurer la bonne, pour plusieurs raisons précisées ci-dessous:

- il faut éviter l'exposition du thermomètre au rayonnement en l'entourant d'une surface réfléchissante (papier aluminium, etc.) et en laissant un espace entre l'enveloppe et l'instrument pour permettre une circulation de l'air.
- il faut attendre que la mesure du thermomètre soit stabilisée lorsque celui-ci ne présente pas une réponse immédiate;
- il faut toujours s'assurer que le thermomètre est bien sec pour mesurer la température de l'air. Faute de cela, une évaporation de l'eau de surface du thermomètre se produira au contact de l'air. Le thermomètre ne mesurera plus la température de l'air, mais un peu moins puisque l'évaporation de cette eau entraîne un refroidissement: la température sera plus proche de celle de l'air humide;
- enfin, compte tenu de l'hétérogénéité dans l'air et dans les produits, la température peut varier sensiblement d'un lieu à l'autre (par exemple, entre le bord et le milieu

d'une section du séchoir pour l'air, ou entre le centre et les extrémités d'une claie pour l'air et pour le produit).

Les quelques conseils qui suivent visent à préciser la façon de mesurer la température.

Au-dessus d'une claie ou à la sortie d'une cheminée :

- Plus le plan de mesure est grand, plus les hétérogénéités de température seront fortes. Il faut alors quadriller ce plan et mesurer la température à l'intérieur de chaque case.
- On détermine une température moyenne réellement représentative en effectuant la somme des températures de chaque case et en la divisant par le nombre de cases.
- On peut, pour des mesures ultérieures, mais dans des conditions identiques de répartition du produit sur les claies ou de débit d'air, mesurer la température dans deux, trois ou quatre cases représentatives de la moyenne seulement. On gardera à l'esprit que les cases situées près des bords ne sont pas représentatives de la moyenne, du fait de l'hétérogénéité de la circulation de l'air et de l'isolation.

5. Détermination des débits d'air par exploration des champs de vitesse d'air dans une conduite : [30]

Dans une conduite fermée où s'écoule de l'air, le débit est déterminé à partir de la relation :

$$Q = A \cdot V_m \quad (A.21)$$

Q : débit d'air (m^3/s) ;

A : section où s'effectuent les mesures (m^2)

V_m : vitesse moyenne de l'air dans cette section (m/s)

La vitesse moyenne est mesurée à partir des vitesses locales mesurées en un certain nombre de points de la section de conduite. Le nombre et la position des points de mesure définis dans la norme NF X10-112 varient en fonction de la forme de la conduite et de ses dimensions.

La vitesse moyenne est fournie par la relation :

$$V = \frac{\sum_{i=1}^p V_i}{n} \quad (A.22)$$

Les vitesses d'air sont soit déterminées en utilisant un tube de Pitot double, soit mesurées directement à l'aide d'un anémomètre.

Les principales familles d'appareils les plus fréquemment utilisés pour la mesure des vitesses d'air et pour déterminer les débits sont les suivantes :

- tube de Pitot double ;
- anémomètres thermiques ;

➤ anémomètres mécaniques.

Les vitesses d'air peuvent être obtenues de façon d'autant plus satisfaisante que les conditions énumérées ci-dessous sont respectées :

- Longueur en amont du point de mesure sans singularité supérieure à 20 D (D : diamètre de la conduite au niveau de la section de mesure) ;
- Longueur en aval du point de mesure sans singularité supérieure à 5 D ;
- Bord des trous du piquage de mesure dans la conduite net et sans bavure ;
- Écoulement peu fluctuant et sans giration ;
- Diamètre du tube de Pitot ou de la sonde de l'anémomètre inférieur à D/50 ;
- Antenne du tube de Pitot parallèle à l'axe de conduite.

Pour la mesure de la vitesse à l'aide du tube de Pitot, il est souhaitable que la vitesse moyenne soit supérieure à 4 m/s. En dessous, la valeur de la pression dynamique (Pd) devient trop faible et l'erreur sur la mesure trop importante.

Les principales caractéristiques des appareils de mesure de la vitesse de l'air sont résumées dans le tableau 5.

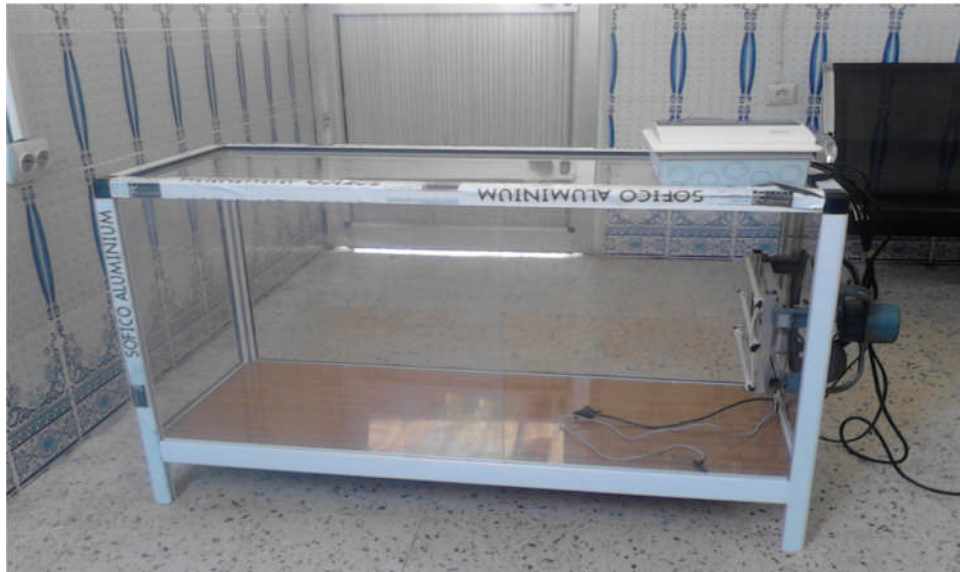
Famille	Appareils	Principe	Gamme de mesure	Précision (valeurs fournisseurs)	Dimensions trous en gaine (mm)	Température d'utilisation	Utilisation en air pollué	Etalonnage	Robustesse	Utilisation générale Observations
Tube de Pitot	Tube de Pitot avec manomètre intégré		> 4 m/s		3 à 10	Étendue	Oui	Aucun	Bonne	Utilisation normalisée NF X10-112. Pas utilisable en basse vitesse
Anémomètre thermique	Fil Chaud	Refroidissement d'un fil chauffé électriquement	0,05 à 50 m/s	2 à 5 % pleine échelle	≈ 10	0 à 80 °C	Non	Fréquent	Moyenne	Utilisation standard Certains sont compensés en température, certains permettent de réaliser des mesures de température, de pression statique
	Thermocouple		0,05 à 30 m/s	3 % pleine échelle	≈ 10	< 60 °C	Non	Fréquent	Moyenne	
Anémomètre mécanique	Vélocimètre	Déflexion de palettes	0,2 à 40 m/s	2 à 3 % pleine échelle	Dimensions spéciales	Étroite	Oui	Fréquent	Bonne	Utilisation standard
	Micro moulinet Ø de 10 à 30	Rotor muni d'ailettes mis en rotation	0,3 à 50 m/s	1,5 à 2 % pleine échelle	Pas utilisables en gaine	< 60 °C	Non	Moyen	Moyenne	
	Moulinet Ø de 100 à 500		0,3 à 50 m/s	1,5 à 5 % pleine échelle		< 60 °C				

Tableau A.1.1 : Caractéristiques des appareils de mesure de la vitesse de l'air(d'après INRS - Brochure ED 695 "Principes généraux de ventilation")

Annexe A.2

- Photographies du séchoir sous différentes vues :





- Photographie de l'étuve Memmert :



- Photographie de la balance :



- **Devis quantitatif du séchoir :**

Le total des dépenses est approximatif et avoisine les 30080 DA. Il est constitué des seuls coûts des éléments constitutifs du séchoir. Nous avons listé dans le tableau ci-dessous les éléments indispensables au montage du séchoir. Toutefois les prix indiqués peuvent varier en fonction des fournisseurs et de la qualité du matériel.

Objet (désignation)	Quantité	Caractéristiques	Prix unitaire
Coffret avec cadre en aluminium, murs et portes coulissantes en plastique transparent ; bases en plastique	1	Réalisé en atelier	13000DA
Ventilateur à courant alternatif.	1	40A/230V	1800 DA
Cadre du porte- résistances.	1	En céramique	500 DA
Résistances chauffantes.	3		300 DA
Eléments de la carte électronique principale.		A base d'ATMEGA328, cadencé à une fréquence de 16Mhz.	6000 Da
Eléments de la carte de puissance.			3000 DA
SHT75	1	Capteur de température et d'humidité	2300DA
Mpx4250	1	Capteur de pression	1500DA
Boite en plastique	1		30 DA
Disjoncteur	1		700 DA
Transformateur	1		500 DA
Afficheur	1		450 DA

Tableau IV.4: Quantité, Désignation, Caractéristiques et prix

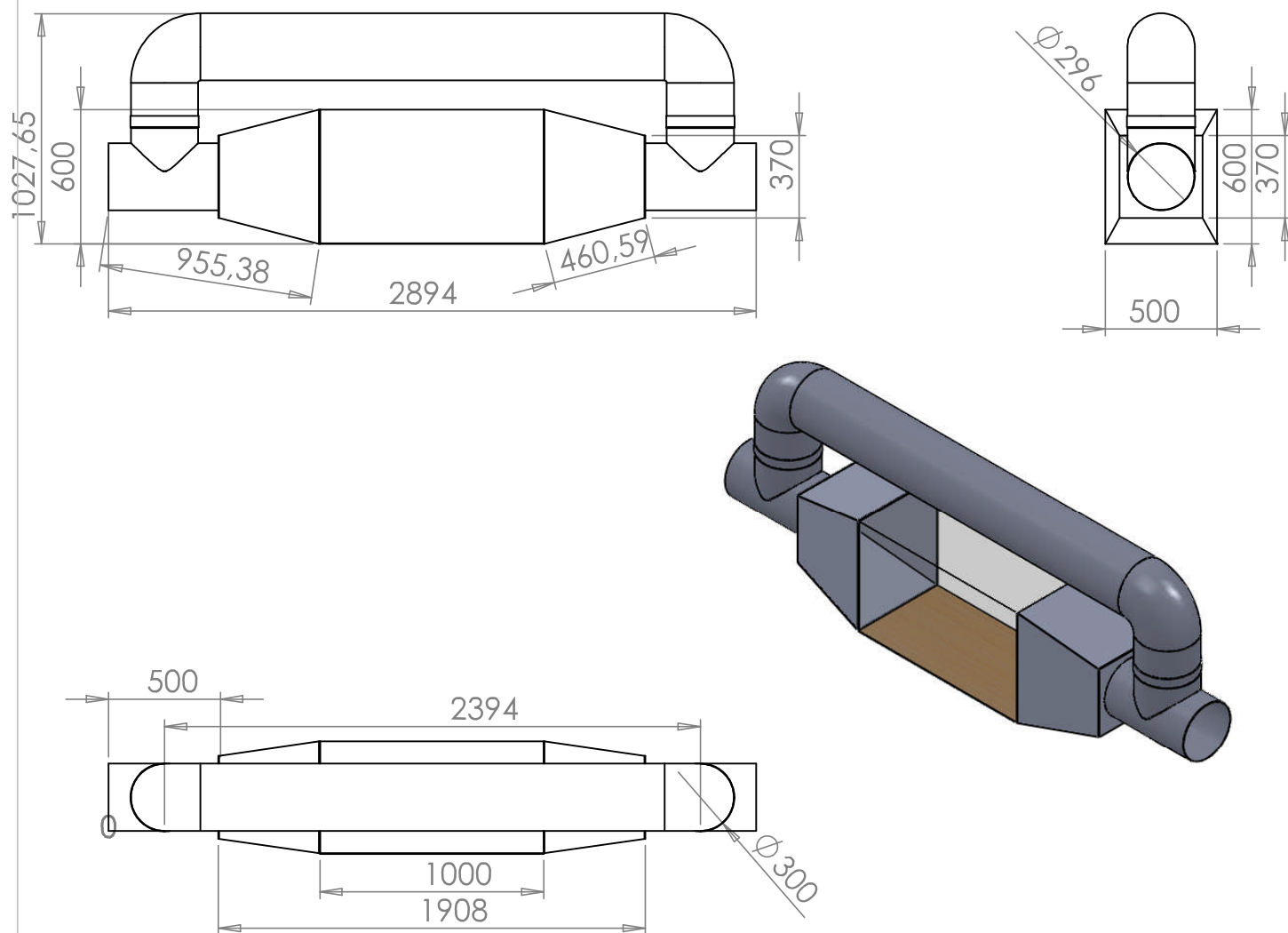
Annexes A.2

Caractéristique	Réf. (1)	Réf. (13)	Réf. (14)	Réf.(14)	Réf. (12)
Température de séchage (°C)	45	50-70	40	70	45-65
Durée de séchage (heures)	36	18	24	24	48
Surface de séchage (m ²)	4,05 (5 claies)		2	4	0,81(par claie (15 claies)
Capacité de séchage de produit humide (kg)	50	320	40-50	30-40	120
Produit séché	Igname	Mangue	poisson salé SE-005	foufou SE-010	Fruits et légumes
Dénomination du séchoir					
Humidité initiale du produit (%)				66	
Humidité finale du produit (%)	8,8			8	13-15
Puissance disponible (W)			500	1000	500
Consommation max par jour (kWh)			12	24	
Dépenses énergétiques par cycle deséchage (F CFA par cycle)			720	1440	

Tableau A.2.1 : Exemple d'utilisation à grande échelle de séchoir à ventilation forcée en zone tropicale [3].

Energie	limites
solaire	- Difficulté de contrôler les paramètres de séchage, - Durée de séchage plus longue - Forte dépendance vis-à-vis des conditions climatiques (caprices du ciel) - Problèmes de stockage de l'énergie solaire pour la nuit - Faible qualité nutritionnelle et microbiologique du produit séché - Séchage non uniforme - Destruction de certaines vitamines
électrique	- Coûts d'investissement et de fonctionnement élevés - Besoin en formation de la main-d'œuvre pour la maintenance - Coût du transport du produit humide jusqu'au séchoir

Tableau A.2.2 : Les limites des énergies solaires et électriques



ECHELLE : 1 : 30	SECHOIR ELECTRIQUE AVEC RECYCLAGE D'AIR		
	FGC-GM-ENERGETIQUE-UMMTO		
A 4	SADDAOUI	MASSINISSA	MASTER

Bibliographie

Bibliographie

- [1] : Technique de l'ingénieur, opérations unitaires, évaporation et séchage Réf. Internet : 4231600
- [2] : M. Daguene, "Les séchoirs solaires : théorie et pratique ", Publication de l'UNESCO, Paris, France (1985).
- [3] : C. Kapseu, J.R. Puiggali, M. Roques et J.P.Nadeau, Parque des ventilateurs et des résistances dans les techniques de séchage adaptées à l'environnement tropical, 1998-98
- [4] : GRET, Sécher des Produits Alimentaires. Techniques, Procédés, Équipements, 1995.
- [5] : J. P. Nadeau, J. R. Puiggali, Séchage : des processus physiques aux procédés industriels, Technique et Documentation, Lavoisier, Paris, France, (1995).
- [6] : B. Touati, Modélisation numérique des transferts couplés de chaleur et de masse lors du séchage des feuilles de menthe, Mémoire de Magistère, Centre Universitaire de Bechar, Algérie (2001).
- [7] : H. Ridene, S. Azzouz, D. Ghorbel, L. Ayed, M. B. Slama, A. Belghith, Séchage des tomates par l'air chaud : cinétique et qualité, 1er séminaire maghrébin sur les sciences et technologies de séchage, Tunisie, 2006.
- [8] Bonazzi, C and J J , Bimbenet, , Technique de l'ingénieur, Séchage des produits alimentaires, traité Agroalimentaire, F3 000. 2003
- [9] : CHARREAU, Roland CAVAILLÉ, Techniques de l'Ingénieur Séchage, Théorie et calculs, traité Génie des procédé, , J 2 480
- [10] : K. J. Park, & al, Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispata* L), Journal of Food Engineering, vol. 51 pp. 193-199, 2002
- [11] : S. Lahsasni & al, , Moisture adsorption-desorption isotherms of prickly pear cladode (different temperatures, Energy Conversion & management, vol. 44 pp. 923-936, 2003
- [12] : Yves Jannot, Isothermes de sorption : Modèles et détermination, LEPT- ENSAM, (1-5), 2003.
- [13] : A. Besson et W. Bauer, Sciences alimentaires 1, les Traitements thermiques, Université de Lausanne, 1-52, 2001
- [14] : Yves JANNOT, sorption, Septembre 2005.
- [15] : Amira Belghith, Sofien Azzouz et Afif El Cafsi. Modélisation mathématique des cinétiques de séchage en couches minces des tomates, 2013
- [16] : Nsren Albitar, Etude comparative des procédés de séchage coupés à la texturation par détente instantanée Contrôlée (DIC), en termes de cinétique et de qualité nutritionnelle. Applications à la valorisation des déchets agro-industriels, 2001

Bibliographie

- [17] : ASHRAE, Fundamental hand book, 1997
- [18] : D. Le Charpentier, Optimisation d'un procédé de séchage, Problématiques liées au transfert de masse et de chaleur lors de l'utilisation de technologies rayonnantes micro-onde et infrarouge, Thèse de l'Université de Nantes, 2000.
- [19] : Nacer Lamrous , Etude théorique d'un séchoir électro solaire, Application au séchoir de la coopération du CADY de corneilla de conflent (66) Paris, 1985.
- [20] : B. Touati, "Modélisation numérique des transferts couplés de chaleur et de masse lors du séchage des feuilles de menthe", Thèse de Magistère, Centre Universitaire, Bechar, Algérie, 2001.
- [21] : F. Kreith : transmission de chaleur et thermodynamique. Edition MASSON et CIE. - 1967.
- [22] J.F. SACADURA, Initiation aux transferts thermiques, Technique et documentation CAST. INSA de Lyon, 1978
- [23] : M. Kouhila, A. Belghit, M. Dagenet, Détermination expérimentale et théorique des courbes de sorption et la cinétique de séchage de la menthe verte, Entropie, n° 233, (20-31), 2001
- [24] : Sécher des Produits Alimentaires. Techniques, Procédés, Équipements. GRET, 1995)
- [25] : A. Charreau, R. Cavalle, Séchage : Théorie et calculs, Technique de l'ingénieur, J 2480 ,1-23, 1991.
- [26] : GRET, Sécher des Produits Alimentaires. Techniques, Procédés, Équipements, 1995
- [27] : Jean Castaing-Lavignottes, Air humide : propriétés thermodynamiques, opérations unitaires et technologie associées à son emploi, Université de Pau et des Pays de l'Adour, France, (2003).
- [28] : M. Kouhila, & al, Approche expérimentale des courbes de sorption de la menthe en vue d'un séchage par énergie solaire, 1999.
- [29] : A. Belghith, & al, , Experimental study of drying kinetics of sage in a drying tunnel working in forced convection, 1999.
- [30] : Diagnostic énergétique des installations de ventilation industrielle, direction de l'industrie, 2003.
- [31] <http://www.fao.org>