

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ÉCOLE SUPERIEURE DE TECHNOLOGIES INDUSTRIELLES  
- ANNABA -



المدرسة العليا للتكنولوجيات  
الصناعية - عنابة -

Année / 2020

DEPARTEMENT DU SECOND CYCLE

FILIÈRE

GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État

Les procédés de séchage des produits déformables

Spécialité

Énergétique et Développement Durable

Par

BEDJAOUI Marwa

Sous la direction de :

AZZOUZ Salah-Eddine

AZZOUZ Soufien

Grade

prof

Maître-de conférence.

Devant le jury

Établissement d'affiliation

ESTI Annaba

LETMM-FST

Président :

Examineurs :

## **REMERCIEMENT**

Un grand remerciement à mon encadreur, Monsieur **Salah-Eddine AZZOUZ** pour son soutien scientifique et pour ses conseils importants durant mon mémoire.

Mes remerciements s'adressent à Monsieur **Afif EL-CAFSI** Directeur du laboratoire d'Energétique et des Transferts Thermique et Massique, de m'avoir accordé de réaliser mon stage de perfectionnement.

Je tiens à remercier vivement Monsieur **Soufien AZZOUZ**, maître de conférences et chef de l'axe séchage à la Faculté des Sciences de Tunis, pour la confiance qu'il m'a accordée en acceptant la direction scientifique de mes travaux. Qu'il trouve ici l'expression de ma respectueuse considération et ma profonde admiration pour toutes ses qualités scientifiques et humaines.

J'adresse également mes remerciements à Monsieur **Abderrazek ZAARAOUI**, technicien supérieur à LETTM, et aux doctorantes **HABBOURIA Meriem** et **BERRICH Oumaima** qui m'ont aidée au sein du laboratoire.

## TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE .....	1
-----------------------------	---

### PARTIE A : APERÇU BIBLIOGRAPHIQUE

#### Chapitre I. Présentation du laboratoire d'accueil

I.1 Séchage convectif par l'air chaud .....	4
I.2 Séchage par micro-ondes.....	7

#### Chapitre II. Généralité sur le séchage .....

II.1 Séchage .....	10
II.2 Interaction eau-matériau .....	15
II.3 Séchage convectif par l'air chaud .....	18
II.4 Séchage par micro-ondes.....	20

#### Chapitre III. Procédés de séchage thermique.....

### PARTIE B : ETUDE EXPERIMENTALE

#### Chapitre IV. Séchage convectif des feuilles de myrte

INTRODUCTION .....	30
IV.1 Présentation du produit .....	30
IV.2 Protocole expérimentale .....	31
IV.2.1 Plan d'expérience .....	31
IV.2.2 Isothermes de désorption .....	32
IV.3 Résultats et discussion.....	35
IV.3.1 Cinétique de séchage .....	44
IV.3.2 La diffusivité effective .....	40
CONCLUSION.....	42

## **Chapitre V : Table de séchage du bois d'eucalyptus**

INTRODUCTION .....	43
V.1 Présentation du bois.....	43
V.2 Protocol expérimental .....	46
V.3 Traitement des résultats .....	47
CONCLUSION .....	48

## **Chapitre VI : Séchage rayonnant du bois d'eucalyptus**

INTRODUCTION .....	49
VI.1 Cinétiques de séchage par micro-ondes .....	49
VI.1.1 Mode opératoire.....	49
VI.1.2 Traitement des résultats .....	50
CONCLUSION .....	56

## **Chapitre VII : Aspect énergétique du séchage**

INTRODUCTION .....	57
I. Bilan énergétique de la soufflerie climatique .....	57
II. Les déperditions thermiques de la soufflerie climatique .....	60
III. La consommation énergétique massique de la soufflerie de séchage .....	62
IV. La consommation énergétique du four à micro-ondes.....	62
CONCLUSION .....	63

<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>64</b>
----------------------------------	-----------

## NOMENCLATURE

### Lettres Latines

Lettres	Descriptions	Unité
$S$ :	Surface	$m^2$
$t$ :	Temps	s
$T$ :	Température	$^{\circ}C$
$Deff$ :	Coefficient de diffusion	$m^2/s$
$h$ :	Coefficient de transfert de chaleur convectif	$W / m^2$
$X$ :	Humidité absolue	$kg/kg.MS$
$HR$ :	Humidité relative	%
$\dot{m}$ :	Débit massique	$kg/s$
$M_s$ :	Masse sèche	kg
$M_h$ :	Masse humide	kg
$P$ :	Pression totale	Pa
$P_a$ :	Pression partielle de l'air	Pa
$P_v$ :	Pression partielle de vapeur	Pa
$P_{sat}$ :	Pression partielle de vapeur saturante	Pa
$H$ :	Enthalpie massique	$J/kg$
$\Delta P$ :	Pertes thermique	W
$J$ :	Densité de matière	$kg/s.m^2$
$U$ :	Vitesse de l'air	$m/s$
$K_m$ :	Coefficient de transfert de matière	$m/s$
$E(M, t)$ :	Champ électrique	$V/m$

## Lettre grecques

$\varphi$ :	Flux thermique	W
$\varepsilon$ :	Emissivité	-
$\alpha$ :	Coefficient d'absorption	-
$\varepsilon'$ :	Constante diélectrique	-
$\rho$ :	Masse volumique	kg/m <sup>3</sup>
$\lambda$ :	Longueur d'onde	m
$\sigma$ :	Constante de Stefan-Boltzmann	W/m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup>
$\sigma'$ :	La conductivité du matériau	S/m
$\nu$ :	Fréquence d'onde électromagnétique	Hz

## Indices

<i>h</i> :	Humide
<i>s</i> :	Sèche
<i>i</i> :	Initiale
<i>f</i> :	Finale
<i>a</i> :	Air
<i>éq</i> :	Équilibre
<i>v</i> :	Vapeur
<i>sat</i> :	Saturation
<i>ébul</i> :	Ébullition

## Abréviation

<i>PSF</i> :	Point de saturation des fibres
<i>MS</i> :	Masse sèche

## LISTE DES FIGURES

### Partie A : Aperçu bibliographique

Figure I.1 Boucle de séchage du LETTM-FST.

Figure I.2 Four à micro-ondes BP-301 LETTM.

Figure II.1 Structure microscopique d'un produit humide.

Figure II.2 Forme générale des isothermes de sorption.

Figure II.3 Différent types d'isothermes (Classification de l'IUPAC)

Figure II.4 Evolution des principales grandeurs moyenne du séchage.

Figure III.1 Séchoir tunnel. [ADEM, 2017]

Figure III.2 Étuve de séchage. [ADEM, 2017]

Figure III.3 Séchoir à lit fluidisé. [ADEM, 2017]

Figure III.4 Séchoirs à pertes diélectriques. [ADEM, 2017]

### Partie B : Etude expérimentale

Figure IV.1 Feuilles de myrte (*Myrtus communis*).

Figure IV.2 Isothermes de désorption des feuilles de myrte.

Figure IV.3 Isothermes de désorption des feuilles de myrte. [6]

Figure IV.4 Vérification de la reproductibilité des essais. (T=55°C, HR=20%)

Figure IV.5 Effet de la température sur la cinétique de séchage.

Figure IV.6 Effet de l'humidité relative sur la cinétique de séchage.

Figure IV.7 Effet de la vitesse d'air asséchant sur la cinétique de séchage.

Figure IV.8 Les échantillons des essais après séchage.

Figure IV.9 Logarithme de la teneur en eau réduite.

Figure IV.10 Logarithme népérien de la teneur en eau réduite XR avec lissage.

Figure V.1 Coupe transversale et radiale d'un tronc du bois.

Figure V.2 Les trois directions anisotropes du bois.

Figure V.3 Anatomie du bois feuillus.

Figure V.4 Troncs du bois d'eucalyptus, Tunisie.

Figure V.5 Echantillon d'eucalyptus emballée avec cellophane.

Figure V.6 Disposition de la planche dans la veine d'essai.

Figure V.7 L'échantillon après séchage.

Figure V.8 Cinétique de séchage d'eucalyptus *Gomphocephala*.

Figure IV.1 Spectre électromagnétique.

Figure IV.2 Les échantillons d'eucalyptus *Gomphocephala*.

Figure IV.3 Echantillon de bois placé dans la cavité du four BP-301.

Figure IV.4 L'évolution de la teneur en eau pour trois puissances différentes.

Figure IV.5 L'évolution temporelle de la température interne du bois pour trois puissances.

Figure IV.6 Evolution simultanée de la température interne et la teneur en eau P= 500W.

Figure IV.7 Evolution simultanée de la teneur en eau et la température du bois P=400W

Figure IV.8 Echantillon après séchage P=500W.

Figure IV.9 Echantillons après séchage P=400W.

Figure IV.10 Echantillons après séchage P=300W.

Figure IIV.1 Présentation schématique de la boucle de séchage.

## LISTE DES TABLEAUX

### Partie A : Aperçu bibliographique

**Tableau I.1** Les caractéristiques du four à micro-ondes BP-301 LETTM-FST

**Tableau II.1** Modèle mathématique des isothermes de sorption. (Leonard, 2002)

**Tableau II.2** Modèles macroscopiques les plus utilisés

**Tableau III.1** Les principaux procédés de séchage dans les industries. [ADEM-CETIAT ,2017]

### Partie B : Etude expérimentale

**Tableau IV.1** Présentation des facteurs pour le plan d'expériences

**Tableau IV.2** Conditions de l'air de séchage relatives aux essais réalisés.

**Tableau IV.3** Activité de l'eau en fonction de la température.

**Tableau IV.4** Coefficient de diffusion effectif des feuilles de myrte.

**Tableau V.1** Table de séchage d'eucalyptus Gomphocephala.

**Tableau VI.1** Effet de la puissance sur la teneur en eau en fonction du temps.

**Tableau VI.2** Consommation énergétique du four à micro-ondes pour différentes puissances.

**Tableau IIV.1** Bilan de matière du produit séché.

**Tableau IIV.2** bilan de matière d'air de séchage.

**Tableau IIV.3** Bilan des énergies.

**Tableau IIV.4** Déperdition thermiques en fonction de nombres des résistances

## INTRODUCTION GENERALE

Dans le cadre de notre formation d'ingénieur à ESTI Annaba, nous avons étudiés plusieurs modules parmi ces derniers, le module procédés de séchage dont nous avons étudiés les principes physiques du séchage thermique et nous avons vu quelques types des séchoirs thermiques industrielles, en traitant l'aspect énergétique, les bilans thermiques, la consommation des séchoirs et leurs rendements. Ce socle acquis m'a permis de traité ce sujet de fin d'étude.

Plusieurs produits humides doivent être passés par une opération de séchage avant leurs exploitations, et ce dans le but d'assurer une bonne stabilisation, une longue durée de conservation ainsi que l'amélioration de la durabilité de certains produits tels que **les plantes aromatique et médicinales et le bois**. On se propose d'étudier dans ce mémoire le séchage thermique de ces deux derniers produits.

**Les plantes aromatiques et médicinales** sont de bons exemples de l'utilisation des propriétés pesticides des plantes comme agents de bio contrôle des bios agresseurs. Elles présentent des principes odorants pouvant être employés en parfumerie, en savonnerie et en pharmacie après transformation en eau distillée parfumée, ou en essence. Actuellement et grâce aux progrès scientifiques la thérapeutique a beaucoup évolué et a utilisé les plantes aromatiques et médicinales comme matière première pour la production des médicaments, ce qui nécessite une opération pour avoir une matière sèche.

Parmi les plantes aromatiques recommandées comme médicinale on cite le **Myrte (Myrtus Communis)**, c'est une plante saisonnière largement utilisée. Afin de conserver cette plante et la rendre disponible toute l'année, un procédé de conservation tel que **le séchage convectif** s'avère être nécessaire.

**Le bois** est l'un des anciens matériaux utilisé par l'être humain, il occupe une place très importante dans l'industrie spécifiquement dans le domaine industriel notamment la construction et l'ameublement. L'utilisation adéquate du bois nécessite un prétraitement pour améliorer son comportement et assurer une bonne stabilité avec les conditions de son utilisation car l'utilisation du bois à l'état vert présente de nombreux inconvénients tel que la pourriture, l'attaque des champignons, des insectes ainsi que le changement dimensionnel influencé par l'humidité (gonflement, retrait).

L'eucalyptus est un arbre planté dans de nombreuses régions du monde, il pousse vite et donne un bois solide. Le **bois d'eucalyptus** est utilisé en : Papeterie, poteaux électriques et meubles, bois de chauffage, ainsi que la production du charbon de bois.

La technique de séchage traditionnel adaptée consiste à exposer le bois d'eucalyptus au soleil, cette méthode est très lente et n'atteint pas sa teneur en eau désirée. Dans le but d'atteindre une teneur en eau souhaitée dans une courte période, on va utiliser le **séchage artificiel convectif et par micro-ondes** du bois.

L'objectif principale de tout le procédé de séchage consiste à réduire la quantité d'eau d'un produit humide jusqu'à une quantité finale souhaitée. Physiquement, le séchage résulte d'un transfert simultané de matière et de chaleur au sein du produit, et entre le produit et l'environnement séchant.

Le présent travail s'intéresse à une étude des procédés de séchage tout d'abord par **convection à l'air chaud**, pour la plante myrte et le bois d'eucalyptus, et par **micro-ondes**, pour le bois d'eucalyptus.

Ce travail est élaboré en deux grandes parties :

La première partie est consacrée à une recherche bibliographique répartie en trois chapitres. Le premier chapitre est dédié à la présentation du laboratoire d'accueil LETTM, des deux procédés de séchage utilisés dans notre projet et des travaux effectués au niveau du LETTM. Le deuxième chapitre concerne une généralité sur le séchage thermique pour différents principes. Dans le troisième chapitre quelques séchoirs industriels et leurs caractéristiques sont exposés.

La deuxième partie est consacrée aux résultats et discussions, elle est divisée en quatre chapitres. Le quatrième chapitre est dédié aux résultats du séchage convectif des feuilles de myrte par l'air chaud. Le cinquième chapitre concerne la détermination de la table de séchage du bois feuillu eucalyptus *Gomphocephala*. Le chapitre six est réservé à l'étude du séchage par micro-ondes du bois d'eucalyptus. Le dernier chapitre traite une étude énergétique de séchage du bois d'eucalyptus au moyen de la soufflerie climatique.

## **PARTIE A : APERÇU BIBLIOGRAPHIQUE.**

## **Chapitre 1 : Présentation du laboratoire d'accueil**

Le laboratoire d'Energétique et des Transferts Thermiques et Massiques (**LETTM**) est l'un des 9 laboratoires de la faculté de sciences de Tunis.

L'effectif du laboratoire est d'environ 37 cadres (17 Enseignants chercheurs et 20 Docteurs). Depuis sa création en 2001, l'unité a une identité forte dans le domaine de l'énergétique et de la mécanique des fluides, reconnue comme telle au niveau national et international. Le **LETTM** entretient des relations de coopération avec de nombreux laboratoires tunisiens et aussi à l'échelle français et canadien.

Le laboratoire est organisé autour de quatre axes de recherche :

- Thermodynamique, énergie et modélisation
- Séchage thermique.
- Transfert thermo-convectif
- Ecoulement et transfert et changement de phase.

Le travail expérimental de ce mémoire a été effectué à l'aide des équipements scientifiques installés dans le laboratoire d'Energétique et des Transferts Thermique et Massique (LETTM-FST). Ces équipements comportent particulièrement une soufflerie climatique installée en 1999, commandée par un automate programmable permettant de fixer les conditions de séchage (température, humidité relative et vitesse de l'air de séchage) exigées par l'opérateur. Et un four à micro-onde (BP-301) permettant le contrôle de la puissance de traitement thermique à être utilisé dans les expériences de séchage aux irradiations micro-ondes.

### **I.1 Le séchage convectif par l'air chaud :**

#### **I.1.1 Présentation de la boucle de séchage :**

L'unité de séchage utilisée est une soufflerie climatique, à grille horizontale, fonctionnant en boucle fermée, disponible au Laboratoire d'Energétique et des Transferts Thermique et Massique à la Faculté des Sciences de Tunis (Figure I.1). Elle permet de contrôler la température, l'humidité relative et la vitesse de l'air de séchage les plus employées dans les procédés de séchage convectif pour les basses et les moyennes températures.

L'écoulement de l'air est produit par un ventilateur centrifuge, passant à travers des résistances de chauffage pour maintenir l'élévation de sa température. L'humidité relative de l'air est assurée par un générateur de vapeur.

En arrivant à la veine d'essai, la température et l'humidité relative sont contrôlées automatiquement grâce à un automate programmable relié à un capteur sensible commandé par ordinateur. La vitesse de l'écoulement est contrôlée à l'aide d'un variateur de vitesse. Un condenseur mis en place juste en amont de la veine d'essai fait condenser l'eau contenue dans l'écoulement. L'air revient de nouveau au ventilateur grâce à un joint : le gain d'énergie de chauffage est l'avantage du fonctionnement en boucle fermée. Le suivi dans le temps de la perte de masse du produit, est effectué par la pesée continue de l'ensemble produit-plateau support, à l'aide d'une balance de précision « Mettler Toledo », placée en dessus à l'extérieur du séchoir et connectée à un système d'acquisition et de traitement de données, permettant l'enregistrement de l'évolution de la masse du produit pour des instants réguliers.



**Figure I.1** Boucle de séchage du LETTM-FST.

### **I.1.2 Synthèse des travaux sur le séchage par l'air chaud :**

A l'échelle du laboratoire d'énergétique et des transferts thermiques et massiques à la Faculté des Sciences de Tunis (LETTM-FST), il existe plusieurs travaux qui se sont intéressés au séchage de divers produits. Citons, sans être exhaustif :

Le travail de Hassini (2007) sur le séchage des produits agro-alimentaires (carotte et pomme de terre). Une caractérisation hydrothermique de ces trois produits a été réalisée. Une modélisation 1D et 2D de l'état hydrothermique des produits déformables de différentes géométries a été développée et validée sur la base des cinétiques de séchage convectifs réalisées expérimentalement.

Dans son travail de thèse en 2013, Toujani a suivi une démarche scientifique basée sur une étude expérimentale et théorique de séchage convectif des athérines tous entiers et des pommes sous forme de morceaux. Il a déterminé expérimentalement les cinétiques de séchage sous différentes conditions opératoires ainsi que les propriétés hydro-thermique telles que les isothermes de désorption, la masse volumique ainsi que le retrait hydrique.

Thouraya, 2013 a réalisé un travail sur le séchage convectif par l'air chaud des feuilles de Laurier Noble avec une étude sur l'influence de la température de l'air de séchage sur le rendement des huiles essentielles extraite des feuilles séchées et également sur leur composition chimiques.

Le travail de thèse de Sahbi (2014) porte sur la modélisation des transferts couplés de chaleur et de masse et du comportement mécanique au cours du séchage du bois. Cette thèse a été réalisée en collaboration entre le laboratoire LETTM-FST avec la chaire de recherche de Canada en Valorisation, Caractérisation et Transformation du bois (CRCVACAT) de l'Université du Québec. Les expériences de caractérisation expérimentale ont permis la détermination des propriétés essentielles du transport d'eau et de chaleur dans des pièces du bois de palmier et du bois de pin gris en fonction de la teneur en humidité et de la température du matériau. Des cinétiques de séchage expérimentales du bois ont été réalisées sous trois procédés thermiques différents.

Dans son travail de thèse Ben Dhib (2016) a étudié le séchage convectif et par contact sous-vide du bois résineux. La détermination des propriétés hydro thermiques du bois de pin d'Alep, des isothermes de désorption, la masse volumique et le retrait volumique. Une optimisation de la table de séchage a été vérifiée par le contrôle de la qualité finale du produit séché et par la détermination de ses propriétés mécaniques. Le coefficient de diffusion hydrique ainsi que l'énergie d'activation ont été déterminés par une méthode basée sur la modélisation analytique et numérique.

Bahar, 2017 dans sa thèse de doctorat a étudié les transferts couplés de chaleur et de masse et le comportement mécanique qui se produisent dans des pièces du bois de chêne et de pin pignon lors d'un séchage convectif. Les essais expérimentaux et numériques ont été réalisés à l'aide des équipements du laboratoire LETTM-FST de l'université de Tunis El Manar et du laboratoire de LERMaB de l'université de Lorraine.

En 2018 un travail a été présenté par Berrich sur le séchage convectif des feuilles de Myrte. Elle a déterminé les cinétiques de séchage pour différentes conditions qui ont été déterminés par un plan d'expérience dans le but d'optimiser le temps de séchage et d'évaluer l'influence de ces conditions sur le rendement des huiles essentielles.

Une étude de séchage convectif du bois d'eucalyptus maidenii a été réalisée par Ben Ayed (2019), Des expériences de caractérisation expérimentale ont permis de déterminer les propriétés physico-mécaniques de base du matériau (humidités, retraits, densité, Contrainte de rupture) avec la détermination d'une table de séchage caractérisé de ce produit

## **I.2 Le séchage par micro-ondes :**

### **I.2.1 Présentation du four à micro-ondes :**

Le dispositif expérimental utilisé est un four micro-onde (modèle BP-301) présenté à la figure (I.2), disponible au laboratoire d'Energétique et des transferts thermiques-FST.

Les principales caractéristiques techniques du four micro-onde sont les suivantes : Une fréquence de 2,45 GHz, une puissance maximale délivrée de 1 kilowatt, les dimensions de la chambre d'essai (34x33x20 cm<sup>2</sup>). La perte de masse au cours du séchage est contrôlée à l'aide d'une balance de précision à l'extérieur du four. La température du bois est mesurée à l'aide d'une sonde d'humidité spécifique montée sur un multimètre



Figure I.2 Four à micro-ondes BP-301 LETTM.

- Four à micro-ondes BP-301
- Balance électronique
- Fibres optiques
- Etuve
- Ordinateur muni d'un logiciel synchronie

Les principales caractéristiques techniques du four micro-onde sont les suivantes :

Electrique		Micro-ondes		Physique	Environnementale	
Tension d'entrée	Fréquence	Fréquence	Puissance de sortie	Dimension de cavité	Température de fonctionnement	Humidité relative%
12 volts	60 Hz	2,45 GHz	1kW	34x33x20 <i>cm</i> <sup>3</sup>	1,66°C à 29,44°C	10 à 90

Tableau I.1 Les caractéristiques du four à micro-ondes BP-301.

### I.2.2 Synthèse des travaux sur le séchage par micro-ondes :

Il existe une vaste littérature sur la technologie de séchage du bois par l'air chaud, par contact sous-vide et par micro-ondes. On s'intéresse particulièrement dans cette partie de l'étude bibliographique au séchage du bois par des micro-ondes. La technologie du traitement

thermique aux micro-ondes a été utilisée depuis le début des années 60 dans l'industrie forestière. Le spectre de la fréquence des micro-ondes est approximativement entre 0,3 GHz et 30 GHz avec des longueurs d'ondes correspondantes d'un centimètre et d'un mètre, respectivement.

En 2013, Hassini et al. ont étudié les transferts couplés de chaleur et de masse lors du séchage combiné par convection et micro-ondes du sable aggloméré.

L'effet des paramètres physiques de séchage (température de séchage, humidité relative et vitesse de l'air de séchage, puissance micro-ondes, température de contact) sur les cinétiques de séchage a été examiné par Sahbi (2014). Les résultats montrent que le séchage par micro-ondes est relativement très rapide par rapport aux autres modes de séchage classique (convection d'air chaud, contact sous-vide, ...). L'observation du profil de température montre que la puissance micro-onde est concentrée au centre des pièces du bois traité.

En 2018, Ouerghi a fait une étude expérimentale sur le séchage du sable humide aggloméré et a optimisé les conditions opératoires afin de réduire aussi bien le temps de séchage (ou l'énergie consommée) que le risque d'endommagement. Cette étude est divisée en deux parties. La première partie est consacrée à la mesure des coefficients d'absorption microondes sur le produit saturé et totalement sec. Ces coefficients ont été utilisés pour rapprocher le terme source microondes du matériau étudié par une corrélation linéaire de la teneur en eau. Dans la seconde partie des mesures de la perte de masse du matériau a été réalisée, ainsi qu'une analyse des résultats pour différentes puissances microondes.

Avec une fréquence de 2,45 GHz, Sakseli (2019) a étudié l'impact du traitement thermique continu au four à micro-ondes PB-301 selon différentes puissances (300, 800, 1000 kW) et son effet sur le temps de séchage et sur la qualité du bois d'eucalyptus séché.

## **Chapitre II : GENERALITE SUR LE TRANSFERT THERMIQUE**

### **II.1 Séchage**

#### **II.1.1 Définition**

Le séchage est parmi les plus anciennes techniques de conservation des produits, c'est le traitement qui consiste à retirer tout ou une partie d'un liquide imprégnant un corps humide par vaporisation de ce solvant. Le produit final est un solide qualifié de « sec » même s'il contient une humidité résiduelle.

L'opération de séchage est très utile dans le secteur industriel. Il s'agit d'une opération très importante dans la transformation des produits. Le séchage permet de diminuer leurs teneurs en eau, relativement à toutes les opérations unitaires mises en jeux telles que la cuisson, le stockage à température ambiante, la congélation, le broyage, etc... Cette opération de séchage fait intervenir des transferts couplés de chaleur et de matière entre l'air et le produit selon le mode d'apport de l'énergie permettant l'élimination de l'eau du produit. Pour ces raisons, il est nécessaire de la maîtriser afin de l'optimiser.

#### **II.1.2 Différents modes de séchage**

Les opérations de séparation liquide-solide peuvent être classées en trois types :

- **Le séchage mécanique** : L'élimination de l'eau se fait par des forces purement mécaniques, ce qui exige la connaissance des forces qui retiennent l'eau dans le produit. Ce type de séchage ne peut éliminer qu'une partie limitée de l'eau du produit humide.
- **Le séchage chimique** : C'est un procédé au cours duquel on utilise des produits déshydratants (chlorure de calcium CaCl, anhydride sulfurique SO<sub>4</sub>, etc...) qui absorbent et retiennent l'eau.
- **Le séchage thermique** : Il se divise en deux phases, la transformation du liquide en vapeur et l'évacuation de la vapeur. L'évaporation de l'eau demande l'apport d'une certaine quantité d'énergie. Or le produit ne peut pas fournir au liquide cette énergie, car l'enthalpie de changement de phase de l'eau est grande devant l'énergie emmagasinée par le matériau sous forme de chaleur sensible. Il doit donc y avoir une chaleur externe au produit.

Concernant le séchage thermique, l'apport de chaleur peut être assuré par :

- **Conduction** : L'énergie thermique nécessaire au séchage est apportée par un gaz en mouvement autour du produit à sécher mais par contact direct entre le produit et une paroi chauffée, ce mode de transfert est régi par la loi de Fourier (II.1) :

$$\Phi = -k.S. \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (\text{II.1})$$

- **Rayonnement** : L'apport d'énergie s'effectue par des ondes électromagnétiques générées soit par des dispositifs électroniques (micro-ondes), soit par élévation de la température d'un émetteur infrarouge, ce mode de transfert est régi par la loi de Stefan-Boltzmann (II.2) :

$$\Phi = \sigma. \epsilon. S. [T_p^4 - T_\infty^4] \quad (\text{II.2})$$

- **Convection** : C'est le mode de séchage le plus fréquent dans l'industrie, il consiste à mettre en contact un gaz (air) s'écoulant en régime turbulent autour du corps à sécher, ce mode de transfert est régi par la loi de Newton (II.3) :

$$\Phi = h.S. [T_s - T_\infty] \quad (\text{II.3})$$

Suivant le niveau de la température, deux mécanismes peuvent être mis en œuvre pour extraire l'eau d'un produit par évaporation, il s'agit de l'ébullition ou de l'entraînement.

- **Séchage par ébullition** : Dans le cas du séchage par ébullition, on est amené à fournir l'énergie nécessaire pour vaporiser le liquide que l'on veut éliminer à sa température d'ébullition soit par conduction en mettant le solide humide en contact avec une paroi chauffée, soit par rayonnement en employant les techniques à énergies radiantes (UV, IR, HF, MO) lorsque le produit le permet.
- **Séchage par entraînement** : Le séchage se fait généralement avec de l'air. Dans ce cas, on est amené à fournir l'énergie nécessaire pour vaporiser le liquide que l'on veut éliminer par convection, le solide humide étant mis en contact avec un gaz (en général de l'air chaud) qui sert à entraîner le liquide vaporisé.

### **II.1.3 Cinétique de séchage**

Le principe général du séchage consiste à fournir de l'énergie à un mélange solide-liquide afin d'en extraire le solvant qu'il contient. L'apport d'énergie va servir à augmenter la température du produit et à évaporer l'eau. Ce dernier migre de l'intérieur vers la surface où elle va être évacuée par convection naturelle ou forcée vers le milieu environnant.

Les cinétiques de séchage permettent d'optimiser le procédé de séchage en fonction des critères de qualité, de temps et de coût.

#### **II.1.3.1 Transfert de chaleur et de matière**

A la surface du matériau à sécher se produit un transfert de chaleur dû au gradient de température et un transfert de masse dû au gradient de pression.

Flux de chaleur :  $\Phi = h \cdot S \cdot [T_s - T_\infty]$

Flux de matière :  $J = K_m \cdot S \cdot [p_s - p]$  (IV.3)

#### **II.1.3.2 Courbe de séchage**

La cinétique de séchage thermique peut être modélisée graphiquement de trois manières [21]:

- En portant la teneur en eau du solide à sécher X en fonction du temps durant l'opération de séchage
- En portant la dérivée temporelle de la teneur en eau en valeur absolue, notée  $dX/dt$ , en fonction du temps pendant l'opération de séchage. Cette représentation est couramment utilisée.
- En portant la dérivée temporelle de la teneur en eau en valeur absolue, notée  $dX/dt$ , en fonction de la teneur en eau. Cette représentation est la moins utilisée.

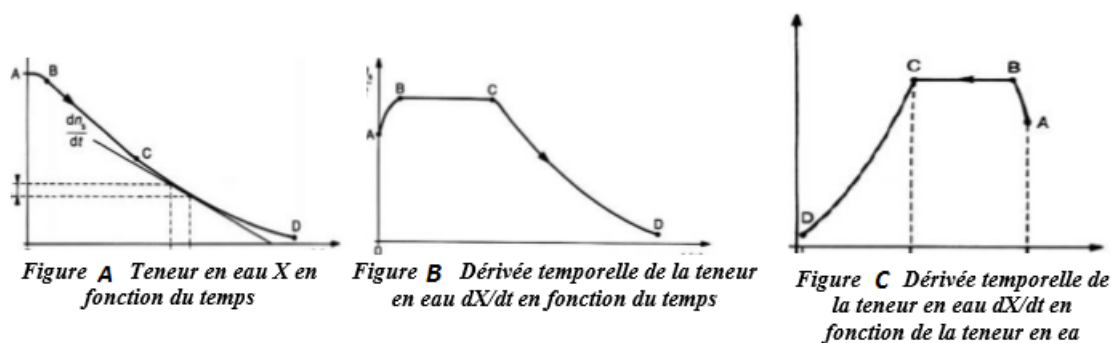


Figure II.2 Evolution des principales grandeurs moyenne du séchage. [21]

Au cours du séchage d'un matériau poreux se succèdent trois phases de séchage :

**1ère phase** : Cette phase est caractérisée par une courte durée et une faible décroissance de la teneur en eau du solide.

**2ème phase** : Durant cette phase, la température du solide est constante et égale à la température humide et la pellicule d'air entourant le solide est saturée en vapeur d'eau. Il s'agit d'une phase à vitesse de séchage constante. La vitesse de séchage correspond à la vitesse de transfert de chaleur qui a lieu de l'air de séchage vers le solide à sécher.

**3ème phase** : Durant cette phase, l'air constituant une pellicule entourant le solide n'est plus saturé en vapeur d'eau. Les molécules d'eau ont un chemin plus long à parcourir avant d'arriver à la surface du solide, ce qui ralentit la cinétique de séchage.

### II.1.3.3 modèles macroscopique

Plusieurs chercheurs ont proposé des modèles mathématiques pour décrire le phénomène de changement de la teneur en eau, du transfert de chaleur et de la masse dans le séchage. Les équations peuvent être des modèles théoriques, semi-théoriques et empiriques. Les modèles théoriques les plus utilisés sont dérivés de la diffusion. De même, Les modèles semi-théoriques sont généralement issus de la deuxième loi de Fick et des modifications de ses formes simplifiées. Ils sont plus simples et ont besoin de moins d'hypothèses en raison du recours à quelques résultats expérimentaux. Les modèles empiriques ont des caractéristiques similaires aux modèles semi théoriques. Parmi ceux-ci, les modèles les plus utilisés sont listés ci-dessous :

Nom	Modèle	référence
Lewis	$XR = \exp(-k.t)$	Sacilik and Elicin (2006)
Henderson and Pabis	$XR = a. \exp(-k.t)$	Henderson and Pabis (1992)
Logarithmique	$XR = a. \exp(-k.t) + c$	Chandra and Singh (1994)
Midilli	$XR = a. \exp(-k.t^n) + b.t$	Midilli et al. (2002)
À deux paramètres	$XR = a. \exp(-k1.t) + b. \exp(-k2.t)$	Henderson (1974)
exponentiel modifié à deux paramètres	$XR = a. \exp(-k.t) + (1 - a). \exp(-k.b.t)$	Verma et al. (1985)
Singh and Wang	$XR = 1 + a.t + b.t^2$	Mirzaee et al. (2010)

**Tableau II.1** Modèles macroscopiques les plus utilisés. [4]

#### II.1.3.4 Diffusivité massique

Le processus de séchage d'un produit est contrôlé par un transfert interne de l'humidité de l'intérieur vers l'extérieur et une évaporation à la surface. La diffusion de l'humidité au sein du produit est modélisée par la seconde loi de Fick (IV.4) :

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \quad (IV.4)$$

Dans un souci d'obtenir une solution analytique de l'équation (IV.4), les hypothèses suivantes doivent être considérées : teneur en eau initiale uniforme, produit indéformable,  $D_{eff}$  est un coefficient de diffusion constant, résistance aux transferts externe négligeable, processus isotherme. L'équation admet pour solution proposée par Crank (1975) dans le cas d'une géométrie plane, la série suivante (IV.5) :

$$XR = \frac{X - X_{éq}}{X_{cr} - X_{éq}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 * \pi^2 * D_{eff}}{e^2} (t - t_{cr})\right) \quad (IV.5)$$

Pour les longues périodes de séchage, la somme des termes d'ordre supérieur à 1 est souvent négligée. L'équation (IV. 5) devient (IV.6) :

$$XR = \frac{X - X_{\text{éq}}}{X_{\text{cr}} - X_{\text{éq}}} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 * D_{\text{eff}}}{e^2} (t - t_{\text{cr}})\right) \quad (\text{IV.6})$$

La diffusivité effective est déterminée en représentant les données expérimentales de séchage en termes de  $\ln(XR)$  en fonction du temps de séchage (IV.7) :

$$\ln(XR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \frac{\pi^2 * D_{\text{eff}}}{e^2} (t - t_{\text{cr}}) \quad (\text{IV.7})$$

## II.2 Interaction eau-matériau

Un produit humide se compose principalement de trois phases : une phase solide, une phase liquide et une phase gazeuse.

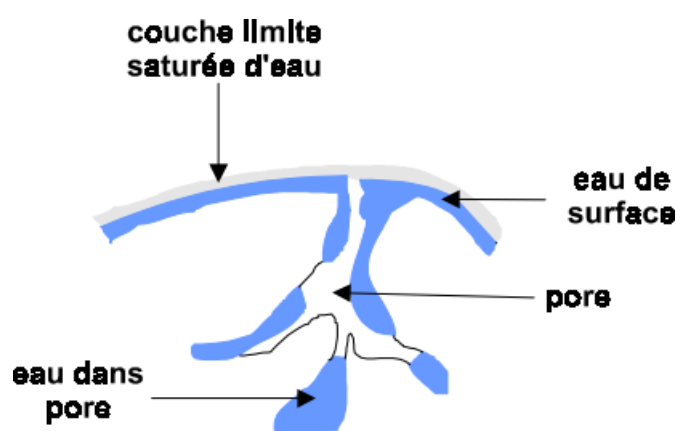


Figure II.3 : Structure microscopique d'un produit humide. [34]

### Phénomène d'hygroscopie :

Une substance hygroscopique est une substance qui a tendance à retenir l'humidité de l'air, par absorption ou par adsorption.

#### II.2.1 Teneur en eau

**Définition :** La teneur en eau d'un matériau est le rapport de la masse d'eau contenue dans ce matériau à la masse du même matériau sec. On peut aussi définir la teneur en eau comme la masse d'eau  $X$  contenu par unité de masse du matériau sec.

Teneur en eau à base sèche (kg d'eau/kg de masse sèche)

$$X_s = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (\text{II.1})$$

Teneur en eau à base humide (kg d'eau/kg de masse humide)

$$Xh = \frac{Mh - Ms}{Mh} \quad (II.2)$$

Avec  $Mh$  : masse du produit humide (g ou kg).

$Ms$  : masse du produit sec (g ou kg).

### II.2.2 Activité de l'eau

L'activité de l'eau dans un produit est le rapport entre la pression de vapeur d'eau, à la surface de produit  $P_v$  et la pression de vapeur d'eau pure (saturante)  $P_{v_{sat}}(T)$  à la température  $T$  du produit. Elle est exprimée par la formule suivante :

$$aw = \frac{P_v}{P_{v_{sat}}(T)} \quad (II.3)$$

Elle présente aussi l'humidité relative d'un air [Détailée dans la partie II.3] en équilibre avec le produit c'est-à-dire lorsqu'il n'existe plus de transfert de chaleur ( $T=T_a$ ) et absence de transfert de masse ( $P_{va}=P_v$ ).

$$HRa(\%) = aw * 100 = \frac{P_v}{P_{v_{sat}}(T)} * 100 \quad (II.4)$$

**L'humidité d'équilibre** d'un matériau hygroscopique joue un rôle important. C'est l'humidité relative qui doit être dans une atmosphère environnante pour empêcher tout échange d'eau entre le matériau et l'air humide. Pour assurer une bonne conservation et un bon stockage du produit, le milieu ambiant ne doit pas dépasser les valeurs limites établies par la mesure de l'activité.

### II.2.3 Equilibre hygroscopique :

#### A. Isothermes de désorption- adsorption :

Les isothermes de sorption décrivent la relation entre la teneur en eau d'équilibre  $X_{eq}$  d'un produit et l'humidité de l'air en équilibre à une température ( $T$ ) bien définie. La détermination des isothermes de sorption a une grande importance dans tout procédé de séchage. Leurs connaissances donnent des informations précieuses sur l'équilibre hygroscopique d'un

produit c'est-à-dire la teneur en eau finale d'un produit exposé à des conditions de séchage bien définies [21].

On peut distinguer selon les conditions expérimentales les isothermes de désorption et les isothermes d'adsorption. L'isotherme d'adsorption si on part d'un produit sec et en le plaçant dans des ambiances de plus en plus humides. L'isotherme de désorption si on part d'un produit humide et en le plaçant dans des ambiances de plus en plus sèches. La forme générale d'isotherme de sorption est sigmoïdale. Elle met en évidence trois zones d'humidité de nature différente.

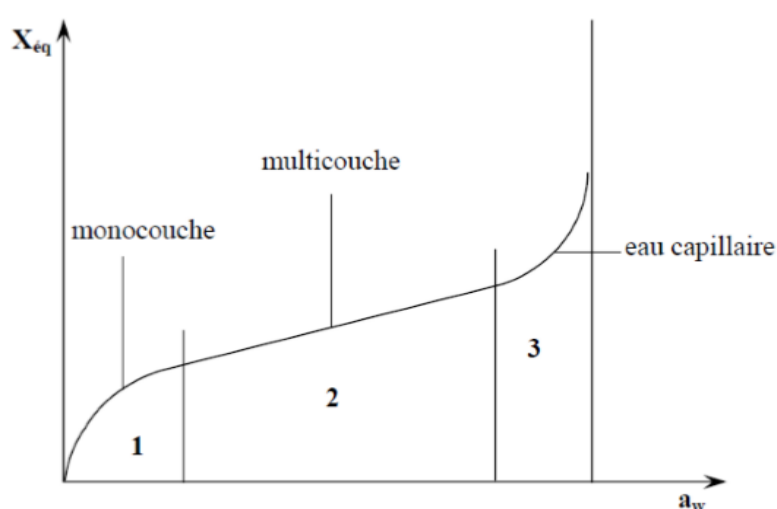


Figure II.4 forme générale des isothermes de sorption. [6]

**La première zone (zone 1) :** C'est la zone de fixation d'une monocouche moléculaire d'eau à la surface du produit, l'énergie de liaison des molécules est très importante et l'eau est très fortement liée au produit. Le passage à la zone suivante s'effectue lorsque toute la surface est saturée.

**La deuxième zone (zone 2) :** Elle correspond à la formation des couches successives (multicouche) sur la monocouche de base. L'énergie de liaison des molécules d'eau s'affaiblie. Dans ce cas on parle d'eau fortement liée au produit.

**La troisième zone (zone 3) :** Elle correspond à une condensation capillaire (l'existence d'eau libre). L'énergie de liaison des molécules est très faible et l'eau est faiblement liée au produit

La détermination expérimentale des courbes de sorption, le développement et l'utilisation des modèles mathématiques peuvent faciliter l'amélioration de la qualité de traitement des

résultats. Des nombreuses équations ont été suggérées dans la littérature pour représenter le rapport entre la teneur en eau d'équilibre et l'humidité relative, tableau (II.2)

Auteurs	Equation du modèle	Domaine de validité
<b>Langmuir (1918)</b>	$X_{\text{éq}} = \frac{a \cdot b \cdot aw}{1 + a \cdot b \cdot aw}$	Faible aw
<b>BET (1938)</b>	$X_{\text{éq}} = \frac{Xm \cdot C \cdot aw}{(1 - aw)(1 + (C - 1)aw)}$	aw < 0,5
<b>Henderson (1952)</b>	$X_{\text{éq}} = \left(-\frac{\ln(1 - aw)}{a}\right)^{\frac{1}{b}}$	0,5 < aw < 0,8
<b>GAB (1946)</b>	$X_{\text{éq}} = \frac{Xm \cdot C \cdot K \cdot aw}{(1 - K \cdot aw)(1 - K \cdot aw + K \cdot C \cdot aw)}$	0,1 < aw < 0,9
<b>Smith (1947)</b>	$X_{\text{éq}} = a - b \cdot \ln(1 - aw)$	0,5 < aw < 0,95

Tableau II.2 Modèle mathématique des isothermes de sorption. (Leonard, 2002)

#### II.2.4 Phénomène de retrait

Lors d'une opération de séchage thermique, certains matériaux se comportent comme des matériaux rigides alors que d'autres se contractent et subissent un retrait. Pour la première catégorie, toute l'eau évacuée est remplacée par de l'air et le matériau final est poreux (bois, aérogel, argiles à faible teneur en eau, ...). Pour la seconde catégorie, les éléments constituant l'édifice solide se resserrent sous l'influence de forces internes. Cette contraction est appelée **retrait** qui est défini comme le rapport entre le volume  $V$  et le volume initial  $V_0$ .

$$Rv = \frac{V}{V_0} \quad (II.5)$$

### II.3 SECHAGE CONVECTIF PAR L'AIR CHAUD

#### II.3.1 Caractéristiques de l'air de séchage

L'air n'est jamais parfaitement sec, il contient toujours une quantité d'humidité sous forme de vapeur d'eau, de gouttelettes d'eau ou de cristaux de glace. Les mélanges d'air et de vapeur d'eau constituant l'air humide sont considérés généralement comme deux gaz parfaits (air sec+ vapeur d'eau)

##### II.3.1.1 L'humidité relative :

$$HR = \frac{Pv}{Pv_{\text{sat}}(T)} \quad (II.6)$$

Où  $P_v$  est la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air, et  $P_{v_{sat}}(T)$  est la pression de saturation de la vapeur d'eau.

Il se produit un équilibre vapeur-liquide et les premières gouttes d'eau condensée vont apparaître on parle maintenant sur la température de rosé  $T_R$

$$P_v = P_{v_{sat}}(T_R)$$

### **II.3.2.2 L'humidité absolue :**

L'humidité absolue  $x$  est une grandeur caractéristique de l'air humide définie comme étant la masse de vapeur d'eau contenue dans l'air par kg d'air sec.

$$x = \frac{\text{Masse de vapeur d'eau}(kg)}{\text{Masse d'air sec}(kg)} \quad (II.7)$$

### **II.3.2.3 L'humidité à saturation :**

L'humidité à saturation  $x_{sat}$  représente la masse maximale de vapeur d'eau que pourrait contenir l'air à des conditions données de température et pression rapportée à la masse d'air sec.

$$x_{sat} = \frac{\text{Masse maximale de vapeur d'eau}(kg)}{\text{Masse d'air sec}(kg)} \quad (II.8)$$

### **II.3.2.4 Capacité calorifique massique moyenne d'un air humide :**

La capacité calorifique moyenne  $C_p$  d'un air humide ( $kJ/K.kg$ ) est définie comme étant la moyenne pondérée (par les fractions massique) des chaleurs massiques de ses constituants rapportée à un kg d'air sec, soit pour un kg d'air sec :

$$C_p = C_p(\text{air sec}) + x C_p(\text{vapeur d'eau}) \quad (II.9)$$

### **II.3.2.5 Enthalpie massique spécifique d'un air humide :**

C'est la chaleur totale contenue dans une masse de  $(1+x)$  kg d'air humide, l'origine des enthalpies correspondant à de l'air sec et à de l'eau liquide à  $0^\circ C$ .

$$H(T) = C_p(\text{air sec}) T + x C_p(\text{vapeur d'eau}) T + x L_v(\text{eau à } 0^\circ C) \quad (II.10)$$

### **II.3.2.6 La masse volumique :**

On définit la masse volumique de l'air humide par :  $\rho = \frac{x+1}{V}$  (II.11)

## II.4 SECHAGE PAR MICRO-ONDES

### II.4.1 Généralité

Les particularités du séchage micro-ondes sont liées au caractère volumique et sélectif de l'apport micro-onde. Par rapport à un séchage purement convectif, les flux de masses diffusif et thermo-diffusif sont dans le même sens. Ceci entraîne d'une part, une accélération du transfert de masse au sein du produit, et d'autre part, une distribution plus uniforme de teneur en eau et ainsi des contraintes de déformations plus faibles que dans le cas convectif. Il faut noter aussi que pour ce type de séchage, l'apport volumique permet à la température de produit d'être supérieure à la température d'ébullition, et ce plus rapidement qu'en séchage convectif. Par voie de conséquence, ces températures entraînent des surpressions au sein du milieu poreux lors du séchage par vaporisation. Dans le cas des milieux initialement saturés, ces gradients de pressions drainent l'eau liquide à la surface libre du milieu. Ce phénomène est appelé "pumping effect".

### Principe physique

Micro-ondes sont des ondes constituées d'un champ magnétique  $H (M, t)$ , et d'un champ électrique  $E (M, t)$  qui oscillent en même temps. De nombreuses sources artificielles émettent de l'énergie sous la forme d'ondes électromagnétiques.

Une onde électromagnétique est caractérisée par sa longueur d'onde  $\lambda (m)$  et par sa fréquence  $\nu (Hz)$  [26].

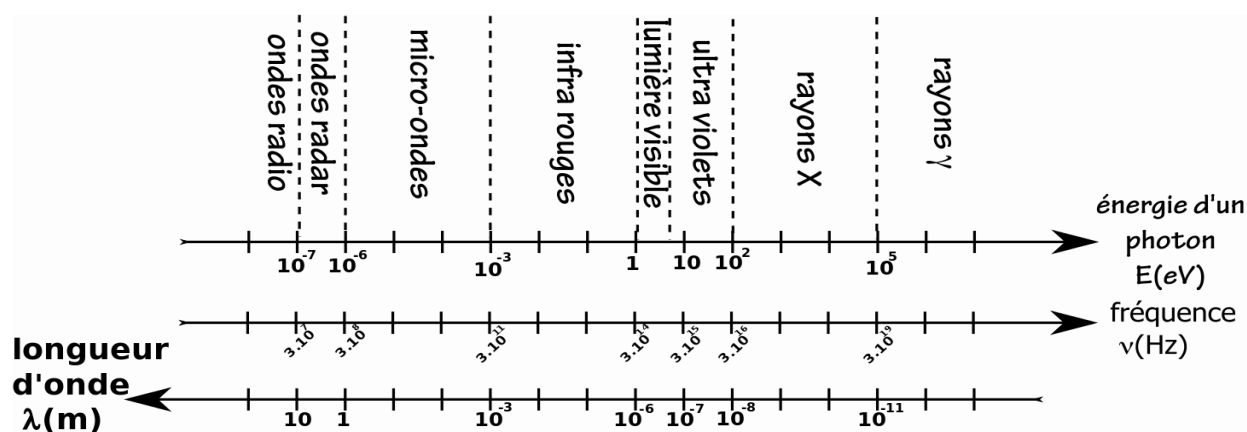


Figure II.5 Spectre électromagnétique. [26]

## **II.4.2 Action des micro-ondes sur le produit**

### **II.4.2.1 Paramètres importants du produit**

Pour caractériser l'effet des micro-ondes sur un produit, il faut prendre en considération les deux éléments suivants : ses propriétés diélectriques, ses propriétés thermiques.

#### **A. Propriétés diélectriques.**

Les propriétés diélectriques tels que la constante diélectrique ( $\epsilon'$ ) et le coefficient d'absorption ( $\alpha$ ) jouent un rôle important dans le chauffage micro-ondes [25]. La chaleur est générée dans le produit par absorption des micro-ondes et les propriétés diélectriques dépendent des facteurs suivants [24] :

- La fréquence des micro-ondes, ainsi les hautes fréquences sont plus pénétrantes que les micro-ondes.
- La composition du produit.
- Sa température.
- L'état physique de l'eau contenue dans le produit.
- La densité du produit.

#### **B. Propriétés thermiques**

L'aptitude d'un produit à chauffer aux micro-ondes dépend aussi de ses propriétés thermiques qu'elles peuvent avoir un effet décisif dans certains cas. Par exemple, la température de l'huile, à chaleur spécifique réduite, augmente plus rapidement que celle de l'eau traitée sous les mêmes conditions de traitements micro-ondes [29]. La composition de l'aliment, si elle évolue au cours du chauffage, peut entraîner une modification de ses propriétés thermiques telles que, la chaleur spécifique, la conductivité thermique de même que sa densité.

### **II.4.2.2 Puissance absorbée**

Dans les milieux complexes tels que les aliments la génération de chaleur suite à l'absorption des micro-ondes est liée à la présence de molécules polaires (eau, alcool...). Toutefois une petite partie de l'énergie dissipée est liée à l'oscillation d'ions. Dans ces conditions la

puissance absorbée par l'aliment s'exprime par la relation (II.12) où le terme  $\frac{1}{2}\sigma E_{int}^2$  correspond à la puissance par unité de volume dissipée par effet joule et le terme  $\frac{1}{2}\omega E_{int}^2$  la puissance volumique dissipée par relaxation diélectrique [32].

$$\Phi_{abs} = \frac{1}{2}\sigma' E_{int}^2 + \frac{1}{2}\omega E_{int}^2 \quad (II.12)$$

Avec :

$E_{int}$  : Champ électrique à l'intérieur du produit chauffé ( $V.cm^{-1}$ ). (C'est la résultante entre le champ appliqué sur le produit et le champ de dépolarisation correspondant à une réaction du produit à la sollicitation électrique).

$\Phi_{abs}$  : La puissance volumique absorbée par le produit (bois)

Si on néglige la puissance dissipée par effet joule et nous considérons par exemple une substance de masse humide  $M_h$  soumise à un rayonnement micro-ondes. Désignons par  $P_i$  la puissance incidente (constante durant un traitement donné) délivrée par les micro-ondes,  $P_{abs}$  la puissance absorbée par le produit. Quand on expose une petite quantité de produit, on se trouve dans le cas où  $P_{abs} < P_i$  la puissance absorbée est limitante, les micro-ondes distribuent plus d'énergie que le produit n'est capable d'en absorber. Si au contraire, on expose une quantité suffisante de produit, on se trouve dans le cas où c'est la puissance des micro-ondes qui est limitante, avec  $P_{abs} = P_i$  l'aliment serait alors capable d'absorber une puissance supérieure à celle que fournissent les micro-ondes.

La quasi-totalité de l'énergie fournie étant absorbée, on peut écrire :

$$Q = P_{abs} * t = M_h * C_p * (T - T_0) \quad (II.13)$$

Où:

$$T = T_0 + \left( \frac{P_i}{M_h * C_p} \right) * t \quad (II.14)$$

La vitesse de chauffage est alors :

$$\frac{dT}{dt} = \left( \frac{P_i}{M_h * C_p} \right) \quad (II.15)$$

### II.4.2.3 Profondeur de pénétration

La conversion en chaleur de l'énergie portée par l'onde électromagnétique implique que celle-ci va s'atténuer en traversant la matière. On peut définir une profondeur de pénétration par la distance parcourue par l'onde lorsqu'elle a perdu 63 % de son énergie [16].

Cette distance  $D$  est égale à [13] :

$$D = \frac{\lambda_0 \sqrt{2}}{2\pi} \left[ \varepsilon' \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\alpha}{\varepsilon'} \right)^2} \right) - 1 \right]^{-0,5} \quad (\text{II.16})$$

Avec  $\lambda_0$  : longueur d'onde dans l'air.

La profondeur de pénétration diminue lorsque le facteur de perte augmente, ce qui se conçoit aisément : une couche superficielle de matière qui absorbe intensément les micro-ondes intercepte le rayonnement et joue un rôle d'écran vis-à-vis des couches intérieures. Pour cette raison, la profondeur de pénétration des micro-ondes est d'autant plus faible que le produit est humide. C'est ainsi que, selon [24], la profondeur de pénétration relative à une pomme de terre moyennement humide est de 3 cm et pour une pomme de terre très humide, de 1,7 cm [33]

## Chapitre III. LES SECHOIRS INDUSTRIELS

### INTRODUCTION

Le choix d'un procédé de séchage s'avère souvent une tâche difficile étant donné la multitude de fournisseurs et de technologies proposées par ces derniers. De plus, vous trouverez probablement plus d'un type d'appareil permettant de sécher un produit donné.

Le tableau suivant croisé technologies/produits permet un repérage aisé des technologies utilisées ou applicables selon le produit à sécher [1].

Pour chaque type de produit, une grille d'analyse permet de sélectionner les différentes technologies de séchage envisageables à partir :

- Des caractéristiques du produit à l'état initial et final (teneur en eau, taille...).
- des caractéristiques produit/procédé (fragilité et thermo sensibilité du produit, délai de séchage, volume à sécher...).

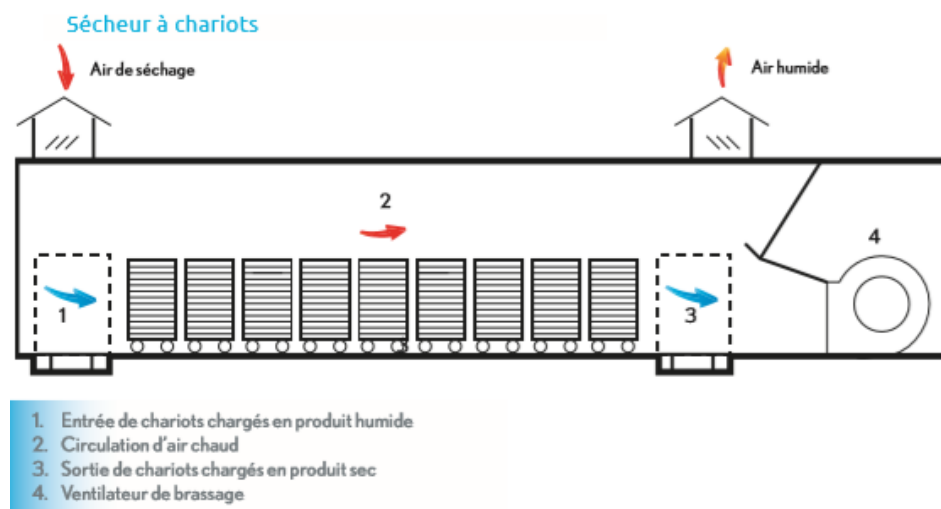
TYPES DE PRODUITS TECHNOLOGIES DE SÉCHAGE	Produits liquides (solutions aqueuses, lait, jus...)	Produits pâteux (boues d'épuration, peinture concentrée, gâteaux humides...)	Produits pulvérulents et granulaires (lactose, poudres pharmaceutiques, pigments, sable, sucre...)	Produits fibreux (laine, coton, sciure de bois...)	Produits plans (panneaux d'isolants, bois...)	Produits en bande (papier, films plastiques, textile en bande...)	Solides mis en forme ou en morceaux (objets moulés ou 3D, céramiques...)
<b>Lit fluidisé</b> Mode continu ou discontinu - temps séjour : min	Granulation ou atomisation préalable	Pour produit mis en forme					
<b>Lyophilisation</b> Mode discontinu - temps séjour : h							
<b>Sécheur à palettes, à vis, à disque</b> Mode continu ou discontinu - temps séjour : h ou min							
<b>Sécheur silo</b> Mode discontinu - temps séjour : h			Pour produit granulaire uniquement				
<b>Tambour rotatif</b> Mode continu - temps séjour : min		Pour produit à écoulement libre (sous peine d'agglomération)					
<b>Sécheur tunnel</b> Mode continu ou discontinu - temps séjour : h			Pour produit granulaire uniquement				
<b>Sécheur par pertes diélectriques</b> Mode continu ou discontinu - temps séjour : min ou h		Avec couplage air chaud et MO/HF	Avec couplage air chaud et MO/HF	Avec couplage air chaud et MO/HF	Avec couplage air chaud et MO/HF		

■ TECHNOLOGIE APPLICABLE  
■ TECHNOLOGIE APPLICABLE SOUS CONDITION

**Tableau III.1** Les principaux procédés de séchage dans les industries. [ADEM-CETIAT ,2017]

Quelques fiches techniques des séchoirs [1]:

## Séchoir tunnel



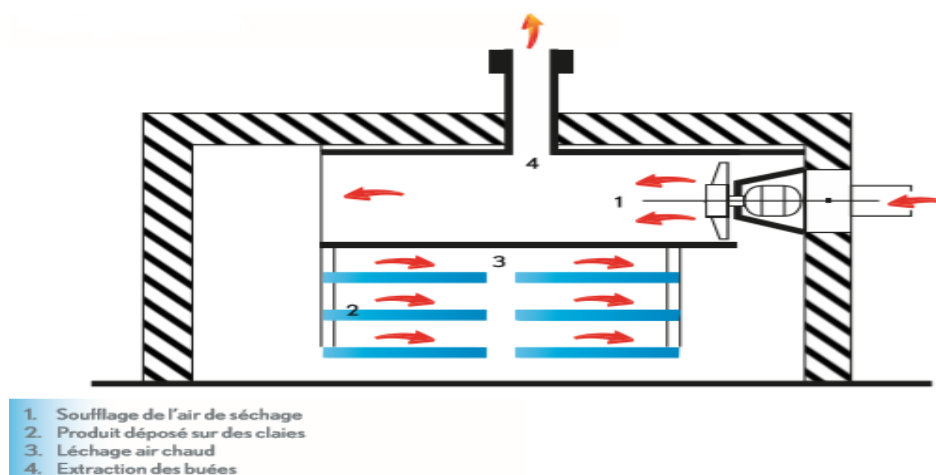
**Figure III.1** Séchoir tunnel. [ADEM, 2017]

Un séchoir tunnel est constitué d'une enceinte fixe, le séchage s'effectue généralement est par un fluide (air chaud) dont pénètre dans l'enceinte à travers des orifices, et le produit a séché se déplace longitudinalement sur un tapis/chariot d'une extrémité vers l'autre.

### Caractéristique du procédé

Mode de déplacement	Température de fonctionnement	Temps de séjour	Capacité de traitement horaire	Efficacité énergétique
Défilement continu sur un support.	30 à 250 °C en général	Varie de quelques secondes, à quelques minutes ou heures.	1 à 50 kg d'eau/h/m.	Récupération de chaleur par PAC.

## Séchoir par étuve



**Figure III.2** Étuve de séchage. [ADEM, 2017]

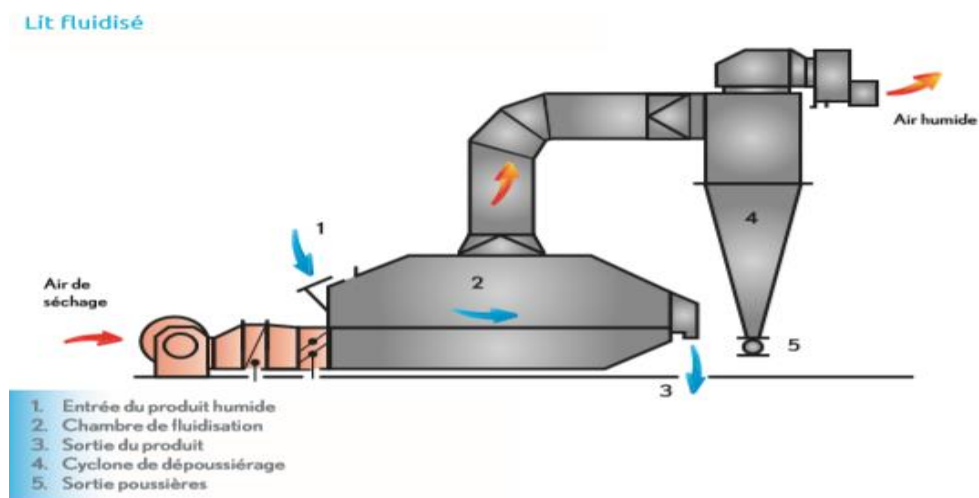
Ce procédé est divisé en deux étapes :

- Le produit est placé dans une enceinte close où l'apport énergétique, nécessaire au séchage, se fait par circulation d'air chaud. Cette enceinte peut comporter une série de claies superposées sur lesquelles le solide est réparti en couches minces.
- L'air chargé d'humidité est aspiré en dehors de la chambre de séchage, au travers des condenseurs qui l'assèchent, puis il est renvoyé par un système de ventilation forcé.

### Caractéristique du procédé

Température de fonctionnement	Temps de séjour	Mode de fonctionnement	Efficacité énergétique	Capacité de traitement horaire
120-150°C	Très variable, la moyenne 35 jours	Discontinu	Circuit fermé récupérer la chaleur latente (PAC)	450 à 500kg d'eau évaporée/m <sup>2</sup> /h

## Séchoir à lit fluidisé



**Figure III.3** Séchoir à lit fluidisé. [ADEM, 2017]

Un sécheur à lit fluidisé comprend 3 étapes distinctes :

1. Traitement de l'air extérieur, qui va servir au séchage du produit : est filtré puis chauffé.
2. Fluidisation : L'air soufflé au travers d'une plaque de diffusion, permet la fluidisation du lit de particules (c'est-à-dire la mise en mouvement du lit)
3. Séparation du produit sec et de l'air de séchage : Le produit et l'air de séchage sont séparés dans le cyclone de dépoussiérage.

### Caractéristique du procédé

Vitesse du fluide	Température de fonctionnement	Temps de séjour	Débit du produit	Capacité de traitement horaire
0,2 à 3 m/s pour un diamètre variant de 100 à 5000 $\mu\text{m}$	50 à 200 °C en général (400 °C max)	2 à 60 min	5 à 50 t/h en général (100 t/h maxi)	30 kg d'eau/h/m <sup>2</sup> à 200 kg d'eau/h/m <sup>2</sup>

### Séchoir par pertes diélectrique (micro-ondes et hautes fréquences)

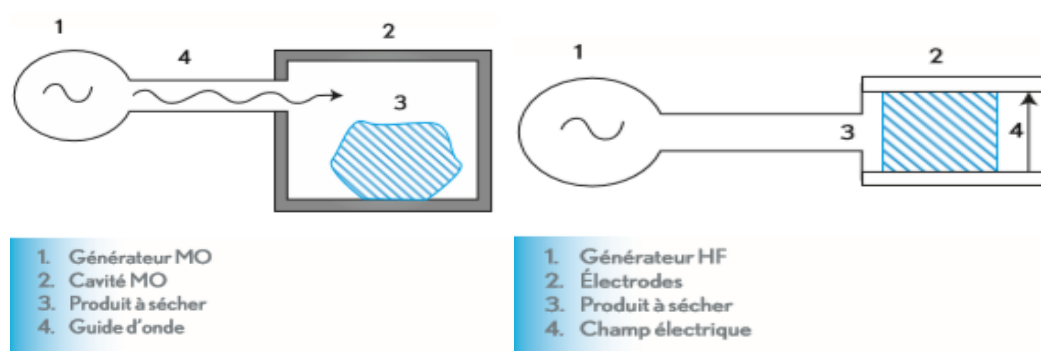


Figure III.4 Séchoirs à pertes diélectriques. [ADEM, 2017]

- Micro-ondes : La propagation de l'onde se fait de manière aléatoire dans une cavité dans laquelle est placé le produit. Les molécules polaires du produit forment un dipôle électrique qui tend à chaque alternance du champ électrique à s'aligner avec ce champ.
- Pour les Hautes Fréquences (HF) : La propagation de l'onde se fait entre 2 électrodes contenant le produit. Le champ électrique alternatif HF provoque un déplacement des porteurs de charges (ions) du produit, donc un courant électrique par conduction ionique et le matériau s'échauffe par effet Joule.

#### Caractéristiques du procédé

Temps de séchage	Température de fonctionnement	Capacité de traitement	Efficacité énergétique	Sécurité d'installation
Quelque seconde	Dépend de la puissance MO ou HF incidente.	Très variable selon le produit à traiter	Rendement très bon 60% à 70%	Nécessité d'un blindage efficace de l'équipement pour limiter les fuites électromagnétiques.

## CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a présenté quelque type des séchoirs les plus utilisés dans le secteur industriel ainsi que de leurs principales caractéristiques.

## **Partie B : Etude expérimentale**

## **Chapitre IV : SECHAGE CONVectif DES FEUILLES DE MYRTE**

### **INTRODUCTION**

Les plantes aromatiques et médicinales sont des plantes utilisées pour ses propriétés thérapeutiques et comme épices, aromes ou condiments. Cela signifie qu'au moins une de ses parties (feuilles, tige, racine etc...) peut être employée dans le but de se soigner ou d'aromatiser.

Dans ce chapitre, nous allons commencer par une brève description du Myrte (*Myrtus Communis*), et nous allons parler sur le plan d'expérience et planifier nos essais de séchage. Ensuite la détermination des méthodes et matériels utilisés tel que les courbes des isothermes ont été déterminées par la méthode gravimétrique statique, les cinétiques de séchage ont été soigneusement établis par une soufflerie.

### **IV.1 PRESENTATION DU PRODUIT**

Le myrte est une plante de la famille des myrtacées originaire de la région méditerranéenne, de l'Afrique du Nord, Europe du Sud et du Moyen-Orient. Le nom Myrte vient du latin *Myrtus communis*, traduction du nom grec dont le radical signifie « parfum ».

C'est un arbre de 1 à 2m de haut, leur plantation s'effectue au printemps et en automne.

Cet arbre est à tige droite et ces feuilles sont persistantes, vert foncé, brillant sur le dessus, coriace, aromatique et de peau lisse Figure (IV.1)



**Figure IV.1** Feuilles de myrte (*Myrtus communis*).

## IV.2 PROTOCOLE EXPERIMENTALE

Les travaux ont débuté par la réalisation d'une boucle de séchage convectif des plantes de myrte à l'aide de la soufflerie climatique. En suivant les démarches bibliographiques portées sur le séchage des plantes aromatique [9] nous avons pris en considération 3 facteurs influençant sur le séchage, à savoir la température, l'humidité relative et la vitesse de l'air. Ces trois facteurs sont liés au fluide de séchage.

Pour ce plan d'expérience, le temps exact de séchage est déterminé au moyen du logiciel statgraphics, par l'introduction des trois facteurs.

L'expérimentation se représente généralement en 2 étapes :

1er étape : la réalisation des essais

2ème étape : l'exploitation des résultats expérimentaux

	Facteurs		Réponse	
	Température de séchage	Humidité relative de l'air de séchage	Vitesse de séchage	Temps de séchage
Notation	A	B	C	Y
Unité	°C	%	m/s	min
Niveau +1	60	30	2	/
Niveau-1	50	20	1	/

**Tableau IV.1** Présentation des facteurs pour le plan d'expérience.

Nos essais sont réalisés pour : une gamme de température 50°C à 60°C, humidité 20% à 30%, et une vitesse d'air de 1m/s à 2m/s.

### IV.2.1 Plan d'expérience :

La notion de plan d'expérience est ancienne mais l'utilisation systématique de protocoles d'expérience définis à l'avance dans l'industrie est une chose récente. Cette méthode se

propose de faire varier plusieurs facteurs expérimentaux à la fois selon les règles d'organisation précises et rigoureuses pour une manipulation donnée.

Le plan d'expérience choisi dans notre étude est le plan factoriel complet à deux niveaux

Le plan factoriel complet à 2 niveaux :

C'est le plan le plus simple, dont on prend deux valeurs significatives (deux niveaux) qui correspondent aux limites du domaine d'étude pour chaque facteur, en appliquant la formule (IV.1) pour avoir le nombre maximal des essais :

$$N = 2^K \quad (IV.1)$$

Où N : nombre maximal d'essais

K : nombre des facteurs

Les plans d'expériences factoriels utilisent un modèle mathématique qui relie la réponse aux différents facteurs étudiés, il s'agit d'un modèle polynomial. La réponse étudiée est notée Y et le modèle mathématique associé aux plans factoriels complets se présente comme suit :

$$Y = A_0 + \sum_i^n A_i X_i + \sum_{ij}^n A_{ij} X_i X_j + \sum_{ij}^n A_{ij} X_i X_j + \sum_{ij...k}^n A_{ij...k} X_i X_j \dots X_k \quad (IV.2)$$

Où  $A_0, \dots, A_k$  sont les coefficients du polynôme.

Numéro d'essai	Température °C	Humidité relative	Vitesse de l'air m/s
1	50	20	1
2	60	20	1
3	50	30	1
4	60	30	1
5	50	20	2
6	60	20	2
7	50	30	2
8	60	30	2

**Tableau IV.2** Conditions de l'air de séchage relatives aux essais réalisés.

Un plan d'expériences permet donc de réduire le nombre d'essais à ce qui est strictement nécessaire pour prendre une décision, ce qui peut faire un gain en temps.

### IV.2.2 Isothermes de désorption :

Les isothermes de désorption de *Myrtus Communis* ont été déterminées, à deux températures, en utilisant la méthode gravimétrique statique où la régularisation de l'humidité est assurée par contact avec des solutions salines aqueuses au-dessus desquelles la pression de vapeur d'eau, à température donnée, est parfaitement connue. Diverses solutions salines saturées ont été préparées (Tableau IV.3). La gamme obtenue permet d'obtenir les teneurs en eau sur l'ensemble de la gamme d'hygrométrie. Les solutions de sels saturés utilisées sont : KOH, LiCl, MgCl<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, NaBr, NaNO<sub>3</sub>, NaCl, KCl et BaCl<sub>2</sub>. Les solutions salines sont préparées dans des bocaux hermétiques et sont maintenues isothermes dans une étuve réglée en température.

Sels	a <sub>w</sub> (50°C)	a <sub>w</sub> (60°C)
KOH	0,057	0,055
LiCl	0,111	0,11
MgCl <sub>2</sub>	0,305	0,292
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,427	0,421
NaBr	0,512	0,491
NaNO <sub>3</sub>	0,588	0,565
NaCl	0,718	0,703
KCl	0,777	0,751
BaCl <sub>2</sub>	0,882	0,872

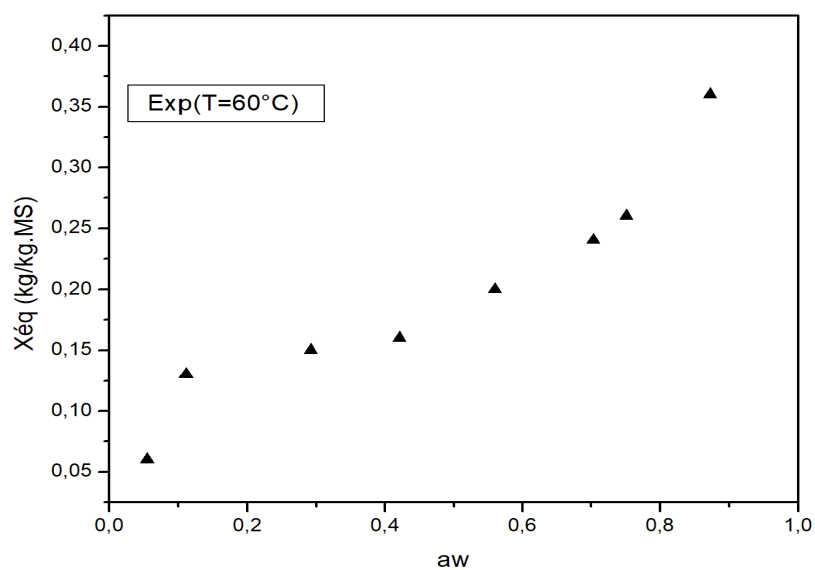
**Tableau IV.3** Activité de l'eau en fonction de la température.

La teneur en eau en équilibre à base sèche est alors déterminée par cette relation :

$$X_S = \frac{Mh - Ms}{Ms} \quad (IV.3)$$

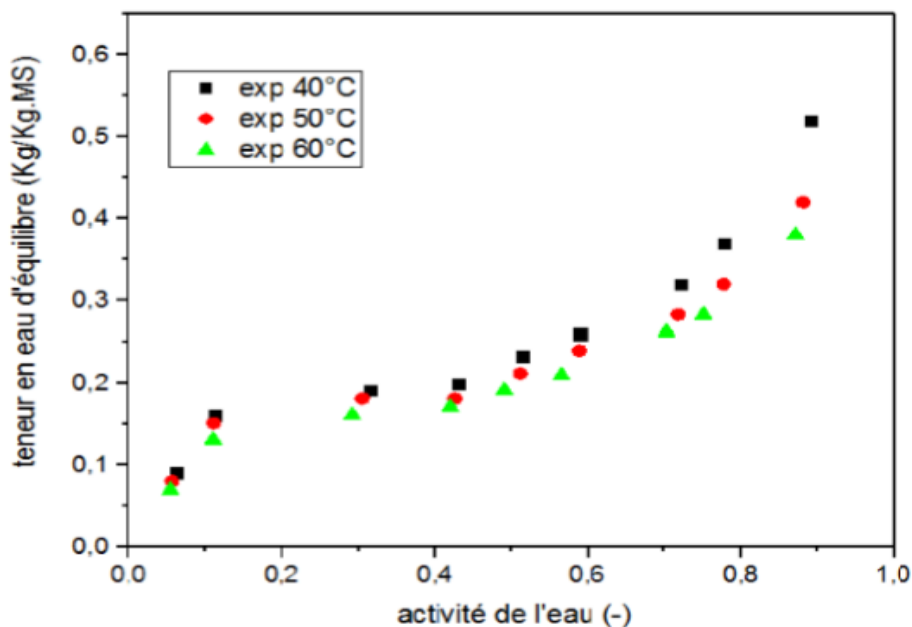
Avec  $Mh$  : Masse du produit humide.  $Ms$  : Masse du produit sec.

Pour note projet les expériences réalisées concernent seulement la température 60°C. Les résultats sont présentés dans la figure suivante :



**Figure IV.2** Isothermes de désorption des feuilles de myrte.

Les courbes expérimentales des isothermes de désorption des feuilles de myrte sont présentées dans la figure IV.3.



**Figure IV.3** Isothermes de désorption des feuilles de myrte. [9]

D'après ces courbes, pour la même activité d'eau, la teneur en eau à l'équilibre devient faible avec l'augmentation de la température. De plus, l'augmentation de la température favorise dans tous les cas la désorption de l'eau ce qui est conforme avec la littérature.

### IV.3 TRAITEMENT DES RESULTATS

Avant de démarrer l'expérience de séchage, On prend 20g du produit frais du réfrigérateur à 5°C, et on pose les feuilles sur une grille perforée (dimension : 17cm x18 cm) sous forme d'une couche mince. Une fois les conditions climatiques de l'air de séchage sont ajustées, on met l'ensemble produit-grille dans la veine de séchage de la soufflerie. Lors de l'opération de séchage, l'acquisition de la masse est réalisée toutes les 5 secondes.

#### IV.3.1 Reproductibilité des essais

La vérification de la reproductibilité des expériences de séchage par des essais préliminaires a été faite sous des conditions de séchage identiques dans un intervalle de temps de deux jours. L'écart maximal entre les deux courbes (figure IV.4) est raisonnable d'un ordre de 2,5 à 3%, ce qui témoigne de la bonne précision et de la reproductibilité des résultats.

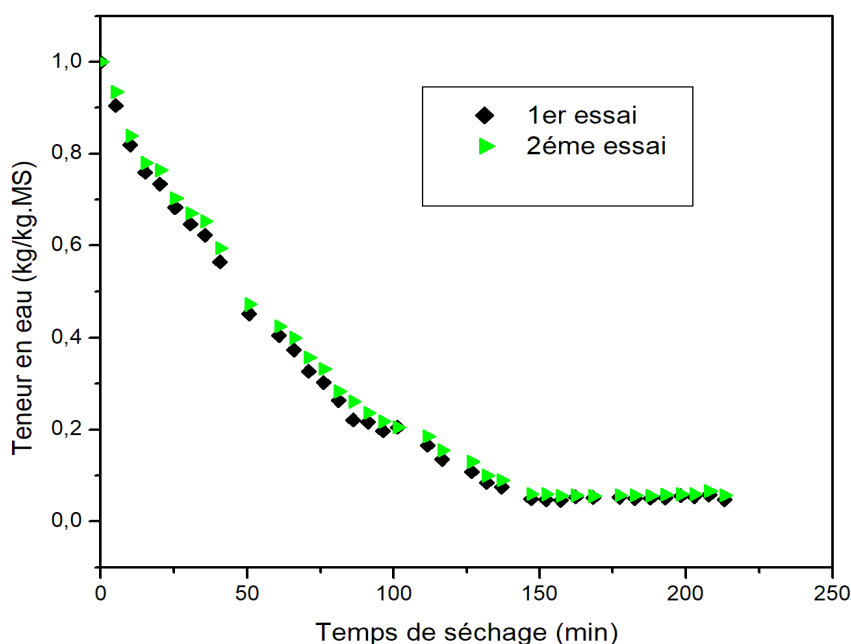


Figure IV.4 Vérification de la reproductibilité des essais. (T=55°C, HR=20%)

#### IV.3.2 Cinétique de séchage.

Les courbes de cinétiques de séchage présentent la variation de la teneur en eau moyenne en fonction du temps, sous différentes conditions climatiques.

A. Influence de température

D'après la figure (IV.5), le temps de séchage diminue avec l'augmentation de la température de l'air de séchage. La courbe montre aussi l'absence de la phase de mise en régime et de la phase de séchage à vitesse constante, seule la phase de séchage à vitesse décroissante est présente. Ce résultat est expliqué par l'absence d'eau libre dans tels produits (teneur eau base humide initiale est 50% environ).

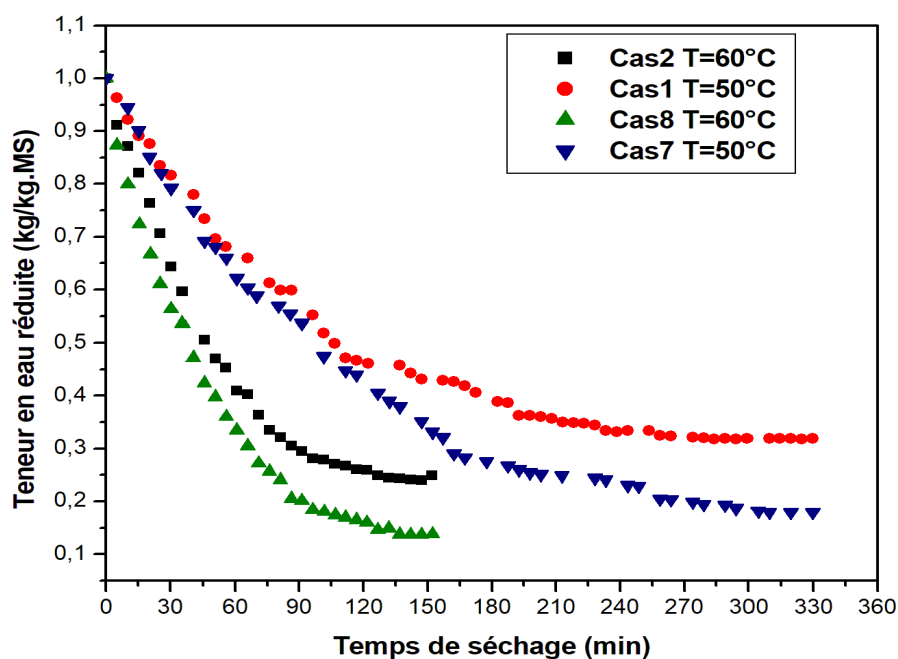


Figure IV.5 Effet de la température sur la cinétique de séchage.

B. Influence de l'humidité relative :

La figure IV.6 montre que le temps de séchage le plus court correspond à l'humidité relative de l'air de séchage la plus faible. Toutefois, l'effet de l'humidité relative sur la cinétique de séchage est moins sensible par rapport à l'effet de la température.

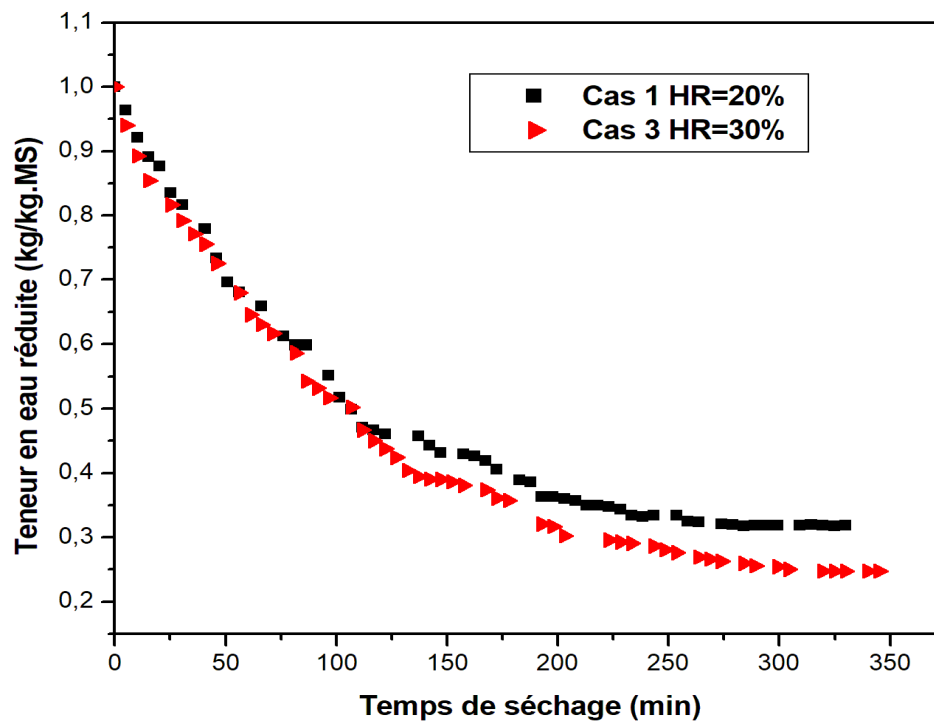


Figure IV.6 Effet de l'humidité relative sur la cinétique de séchage.

C. Influence de la vitesse de l'air :

D'après la figure (IV.7), nous constatons que la vitesse d'air, dans le domaine choisi, n'a pas d'effet significatif sur le temps de séchage, elle a un effet seulement sur la teneur en eau réduite. Ce résultat est similaire à ceux trouvés dans les travaux précédents sur les plantes aromatiques [9] et [34].

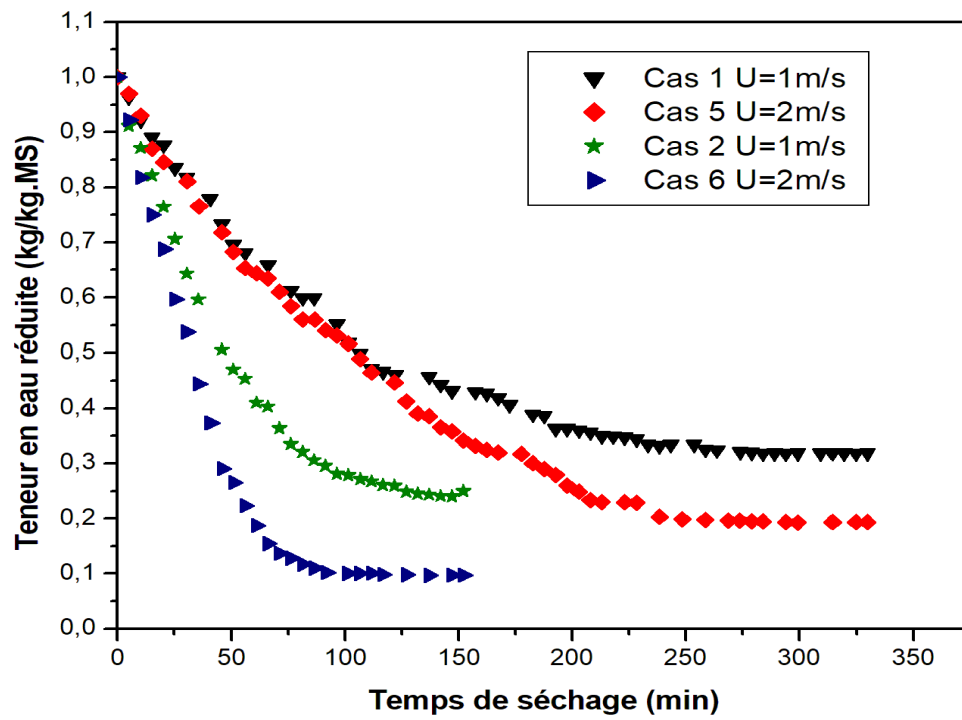


Figure IV.7 Effet de la vitesse d'air asséchant sur la cinétique de séchage.

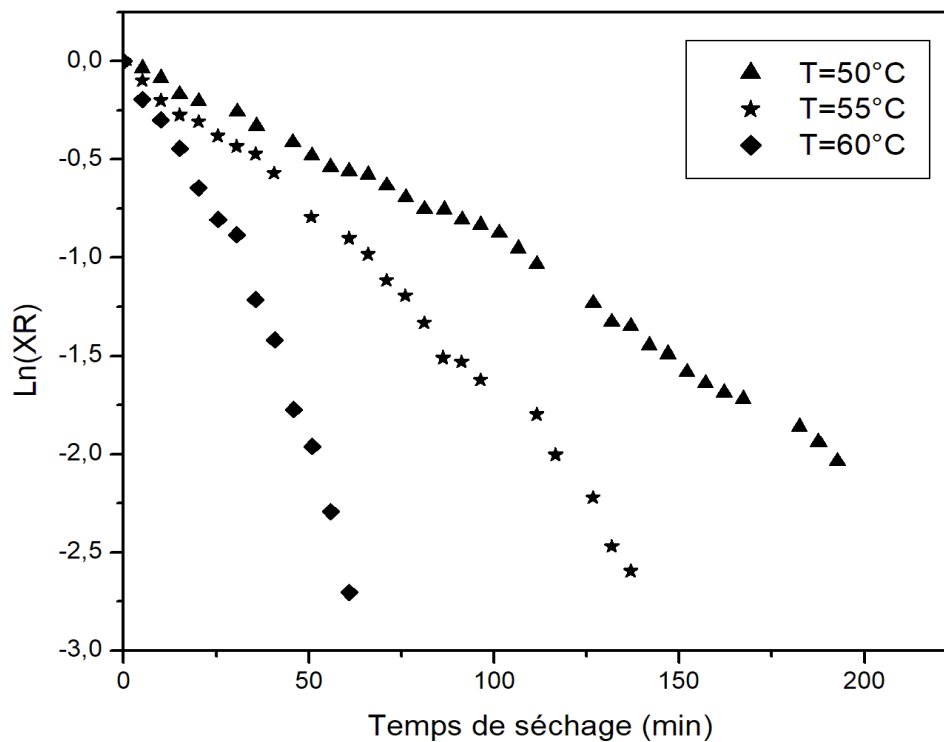


Figure IV.8 Les échantillons des essais après séchage.

#### IV.4 LA DIFFUSIVITE EFFECTIVE

La diffusion de l'humidité au sein du produit est modélisée par la seconde loi de Fick équation (IV.4) du chapitre précédent.

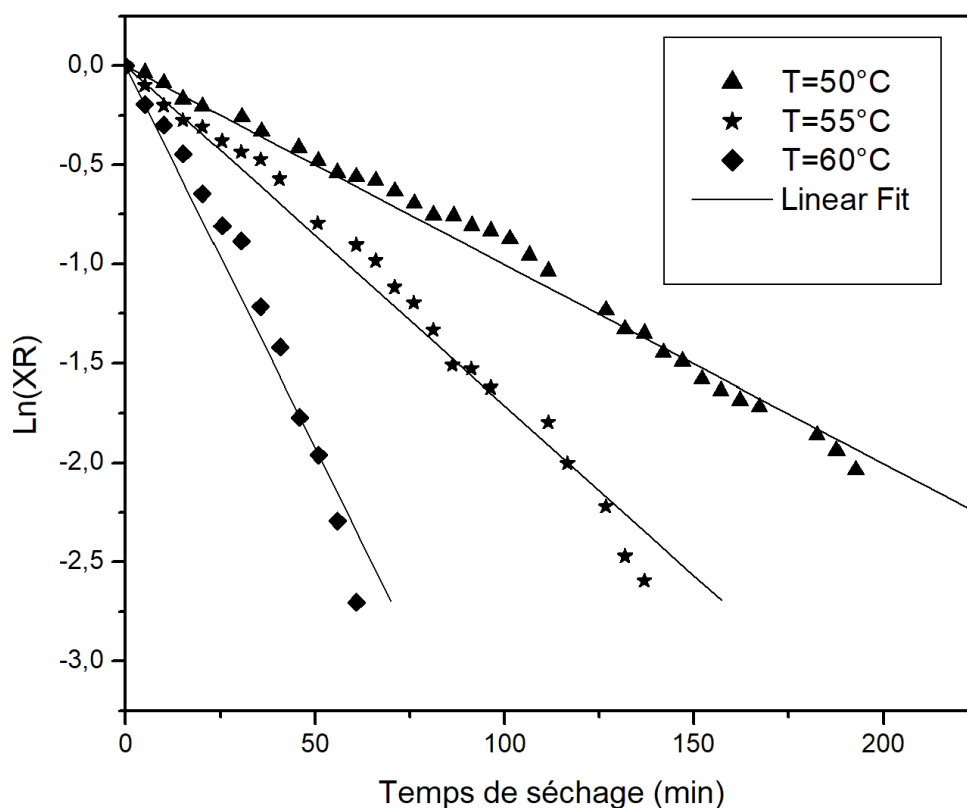
Courbe  $\ln(XR)=f(t)$



**Figure IV.9** Logarithme de la teneur en eau réduite.

Après avoir dessiné les courbes de cinétique de séchage logarithme de la teneur en eau réduite adimensionnelle, il suffit juste de déterminer la pente du modèle mathématique analytique (figure IV.9) pour calculer le coefficient de diffusion  $Deff$

$$La\ pente = -\frac{\pi^2 * Deff}{e^2} \quad (VI.5)$$



**Figure IV.10** Logarithme népérien de la teneur en eau réduite XR avec lissage.

Le coefficient de diffusion de feuilles sèches des fleurs de myrte aux températures 50, 55, et 60 varient dans la gamme de  $9,8601 \cdot 10^{-10}$  à  $3,8577 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  pour une humidité constante (HR=20%). Les valeurs de *Deff* augmentent avec la température (Tableau IV.4).

Température °C	T=50°C	T=55°C	T=60°C
Coefficient de diffusion $\text{m}^2/\text{s}$	$9,8601 \cdot 10^{-10}$	$1,734152 \cdot 10^{-9}$	$3,8577 \cdot 10^{-9}$

**Tableau IV.4** Coefficient de diffusion effectif des feuilles de myrte.

Le coefficient de diffusion a été déterminé, pour trois valeurs de température et à une humidité et vitesse d'air constantes.

Les valeurs obtenues sont comparables à quelques résultats de la littérature:

Séchage des haricots verts de  $2.641$  à  $5.711 \cdot 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$  dans la gamme de température ambiante comprise entre  $50$  et  $70$  °C [14], Séchage de menthe [2] de  $2,15 \cdot 10^{-8}$  à  $1,71 \cdot 10^{-7}$  dans la gamme de température ambiante comprise entre  $30$  et  $50$  °C, et le travail de séchage des lauriers nobles [34] de  $1,217$  à  $5,274 \cdot 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$  dans la gamme de température ambiante comprise entre  $45$  et  $70$  °C.

## **CONCLUSION**

Les expériences de séchage en régime continu sont effectuées à différentes températures ( $50$ , et  $60^\circ\text{C}$ ), à différentes humidités ( $20$ ,  $30\%$ ) et à différentes vitesses de l'air chaud ( $1$  et  $2$  m/s). D'après les résultats obtenus, on peut noter que le principal facteur qui influe les cinétiques de séchage des feuilles de myrte est la température de l'air asséchant.

Nous avons remarqué l'influence de l'humidité sur la cinétique de séchage convectif en régime continu. En effet, plus l'humidité est élevée, plus le temps de séchage est grand.

La vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau réduite et du temps montre également que lorsque la température est élevée, le temps de séchage diminue considérablement. Le coefficient de diffusion augmente au fur et à mesure que la température de l'air augmente.

## Chapitre V : SECHAGE CONVECTIF DU BOIS D'EUCALYPTUS

### INTRODUCTION

Le séchage convectif par l'air chaud est le procédé le plus employé dans l'industrie. Ils utilisent des séchoirs à convection forcée dont les conditions opératoires (température, d'humidité relative et vitesse de l'air) sont contrôlées. Le transfert de chaleur de l'air de séchage au produit à sécher s'effectue par phénomène de convection. Cependant, au cours de séchage du bois plusieurs phénomènes physiques interviennent tels que le transfert hydrothermique et les changements dimensionnel (retrait) qui sont dus à la migration de l'eau. Face à cette situation, il est nécessaire d'optimiser les conditions de séchage pour tenir compte de la spécificité et la complexité du matériau bois.

Cette partie de l'étude est consacrée à évaluer expérimentalement la cinétique de séchage du bois feuillus correspond à l'eucalyptus gomphocephala, en déterminant sa table caractéristique de séchage.

### V.1 PRESENTATION DU BOIS

Le bois est un matériau naturel résultant du métabolisme de l'arbre. C'est un matériau hétérogène composé de différents éléments (lignine, cellulose et hémicellulose). Pour un tronc d'arbre on observe essentiellement trois zones différentes.

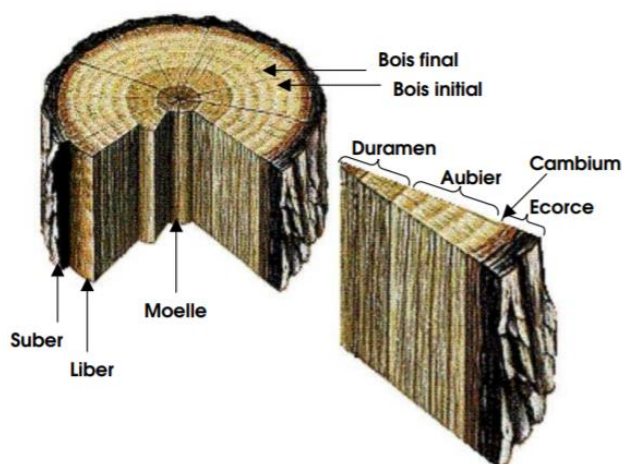
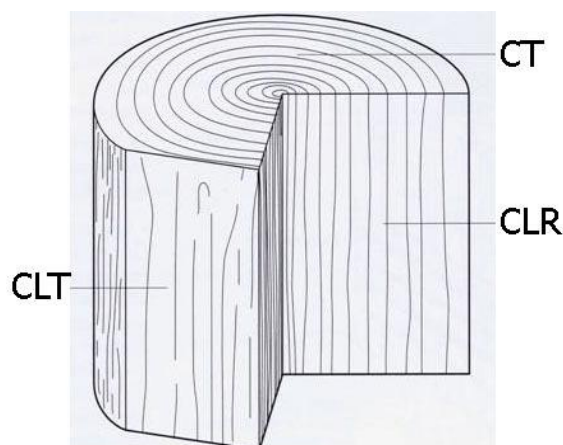


Figure V.1 Coupe transversale et radiale d'un tronc du bois [6].

Le bois est un matériau anisotrope, il ne présente pas les mêmes propriétés physiques et mécaniques dans les différentes directions. Sur un tronc d'arbre on trouve trois directions principales : la direction longitudinale (CLT) parallèle à l'axe de la tige, la direction radiale (CLR) perpendiculaire aux cernes annuels et la direction tangentielle (CT) tangente aux cernes annuels. Les trois directions principales radiale, tangentielle et longitudinale définissent trois plans ligneux (Figure V.2)



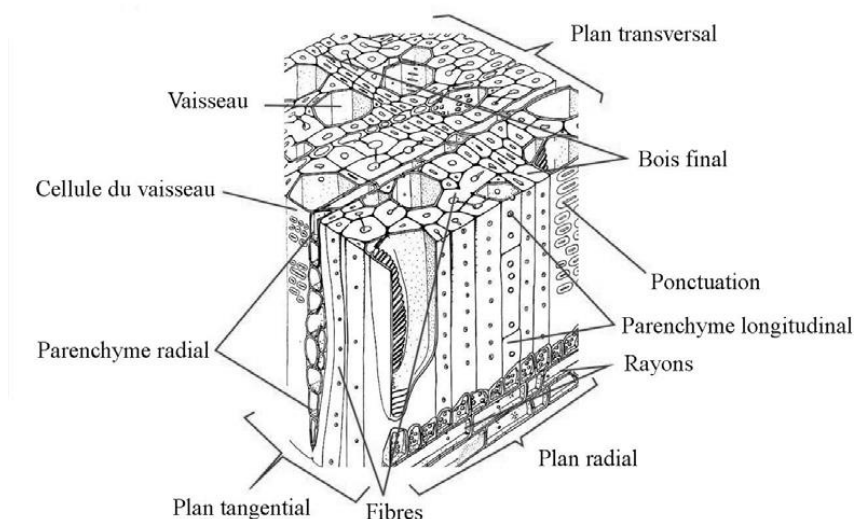
**Figure V.2** Les trois directions anisotropes du bois [5].

## **II.1 Anatomie du bois**

On peut classer les arbres en deux grandes catégories :

- Les gymnospermes (les résineux) : Ils sont caractérisés par une organisation simple et uniforme, constitués de deux types de cellules, les trachéides disposées longitudinalement. Elles jouent le rôle de soutien et de conduction de la sève, les parenchymes assurent la répartition et l'emmagasinement des substances nutritives.

- Les angiospermes (les feuillus) : Ils sont caractérisés par une structure complexe composée de plusieurs cellules (vaisseaux, trachéides, fibres et cellules du parenchyme). Les eucalyptus sont classés parmi les bois feuillus



**Figure V.3** Anatomie du bois feuillu. (Placet, 2006)

Les eucalyptus possèdent toute une gamme de mécanismes d'adaptation et ont une croissance rapide, ce qui leur permet d'être présents dans de nombreux environnements. On utilise aussi, moins fréquemment, le mot gommier pour parler des eucalyptus.



**Figure V.4** Troncs du bois d'eucalyptus, Tunisie.

Les caractéristiques de L'eucalyptus gomphocephala (D.CNAD, 1828) :

- L'eucalyptus gomphocephala sont des arbres de croissance rapide et d'une hauteur généralement de 10 à 40 mètres (Figure V.4).

- Ils assèchent les sols dans lesquels ils sont plantés et empêchent la croissance des plantes voisines. De plus, leurs feuillages ne doivent pas être utilisés pour le paillage ou le compost car ils sont toxiques aux autres plantes.
- Son séchage est difficile avec une tendance à se fendre et à subir de fortes déformations. Bois moyennement durable à durable mais peu sensible aux attaques d'insectes (sauf termites).
- Sa Masse volumique moyenne est  $1000 \text{ kg/m}^3$

## **V.2 PROTOCOL EXPERIMENTAL**

L'utilisation d'une conduite de séchage permet d'améliorer la qualité du bois à sécher en évitant les chocs thermiques et les défauts qui peuvent apparaître. Cette conduite consiste à placer le bois dans des ambiances de plus en plus sèches le long de l'opération de séchage. Elle est composée de cinq phases : Montée en température, Réchauffage, Séchage, Equilibrage et refroidissement.

### **V.2.1 Mode opératoire**

L'échantillon destiné à cette opération de séchage est une planche du bois d'eucalyptus à l'état vert de dimensions ( $30 \times 5 \times 2 \text{ cm}^2$ ) sciée dans le sens des fibres (direction longitudinale) (Figure V.5). La planche est emballée avec du papier cellophane et conservée dans un réfrigérateur de  $05^\circ\text{C}$  jusqu'à la date de l'expérimentation.

Avant l'expérience, Cette planche est placée sur la grille à l'intérieure de la veine d'essai du séchoir. Cette dernière est maintenue par un support. Et le tout est déposé sur une balance de précision placée à l'extérieur du séchoir.



**Figure V.5** Echantillon d'eucalyptus emballée avec cellophane.



**Figure V.6** Disposition de la planche dans la veine d'essai.

### V.2.2 Table de séchage convectif du bois d'eucalyptus

La table de séchage est optimisée à partir des tables existant dans la littérature. Elle donne pour chaque essence, la température et l'humidité relative en fonction de la teneur en eau d'équilibre du bois. Elle diffère d'une espèce à une autre.

Les conditions de séchage sont douces au début de séchage et elles se durcissent au fur et à mesure que les éprouvettes deviennent de plus en plus sèches et la teneur en eau devienne plus homogène dans toute la masse des pièces.

X (%)	Phase	Ts (°C)	HR (%)	Xéq (%)
Vert	Montée en température	40	-----	-----
Vert	Réchauffage	40	70	16,1
Vert	Séchage	48	65	*
35		55	60	*
32		60	55	10
20		60	50	8,3
25		63	45	*
20		68	40	*
15		70	35	7-6,8
12		70	30	5,5
--	Équilibrage	65	55	*
--	Refroidissement	--	--	--

**Tableau V.2** Table de séchage d'eucalyptus Gomphocephala.

Les conditions de séchage sont réalisées à des températures variant de 40 °C à 70°C et des humidités relatives allant de 70 à 55%. Le temps nécessaire au séchage d'une planche d'Eucalyptus « Gomphocephala », pour passer de l'état vert à une teneur en eau d'équilibre, est égal à 6593 minutes (109 heures et 53 minutes) (Figure V.8).

La planche étudiée ne présente aucune déformation, ni de formation de fentes pendant et après le séchage (Figure V.7). En fonction de la table de séchage que nous avons sélectionnée, l'Eucalyptus « Gomphocephala » semble être un matériau ayant une nervosité et un comportement au séchage similaire à l'Eucalyptus maidenii [7].



Figure V.7 L'échantillon après séchage

### V.3 Traitement des résultats

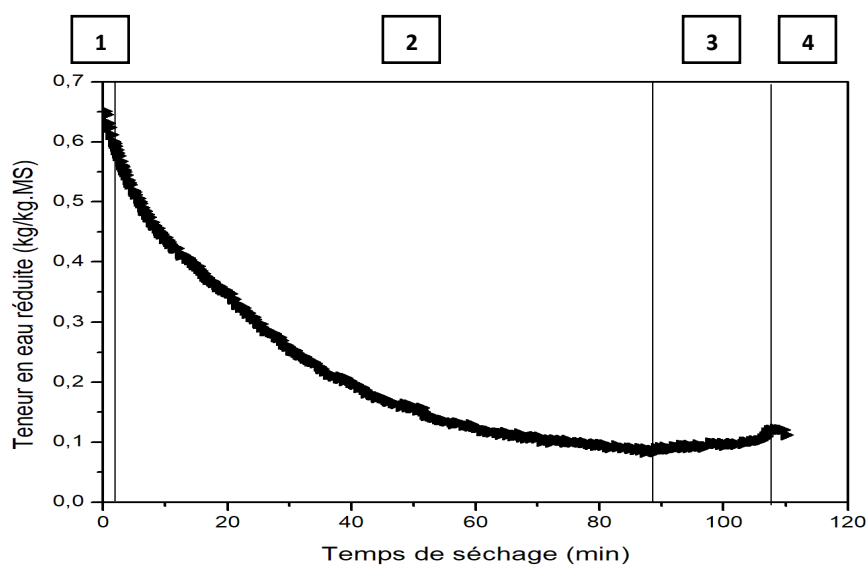


Figure V.8 Cinétique de séchage d'eucalyptus Gomphocephala.

La conduite du cycle de séchage est composée de quatre phases successives [20] :

**Phase de préchauffage (1) :** C'est la phase de montée en température pour atteindre la température du début de séchage proprement parlé. Pendant cette période, il est nécessaire de maintenir une humidité relative de l'air élevée pour éviter l'apparition des fentes dû en partie à l'évaporation de l'eau contenue dans le bois. La durée de cette phase doit être

suffisante pour réchauffer toute la masse du bois avant d'entrer dans la phase de séchage.

Cette première étape a duré environ 2 heures

**Phase de séchage (2) :** L'objectif de cette seconde phase est d'éliminer l'humidité contenue dans le matériau bois, en élevant la température et en diminuant l'humidité relative de l'air de séchage. Les conditions doivent être douces en début de séchage (48°C et 70%). Ensuite elles se durcissent au fur et à mesure que le bois devient sec et que l'humidité devient plus homogène (70°C et 35%), ce qui justifie le choix des conditions opératoires adéquates (température et humidité relative de l'air). Cette phase a duré en moyenne 5294 minutes ( $\approx$  87 heures). Ce temps est très proche au temps nécessaire pour le séchage d'eucalyptus maidenii [7].

**Phase d'équilibrage (3) :** Pendant cette phase, les gradients d'humidité ont diminué afin d'homogénéiser la répartition de l'humidité dans toute la masse du bois. Pour cela, nous avons conservé la température de la fin de séchage (65°C), et augmenté l'humidité relative de l'air (55%). Dans notre cas, cette opération a duré environ 7 heures.

**Phase de refroidissement (4) :** Durant cette période, la température des pièces du bois a progressivement baissé afin d'éviter tout choc thermique lors de la sortie des pièces de bois de la cellule de séchage vers l'air ambiant. Nous avons arrêté le chauffage jusqu'à ce que la différence entre la température de séchoir et celle de l'air ambiant s'équilibre aux alentours de 25°C.

## CONCLUSION

Cette partie d'étude concerne le séchage continu convectif du bois d'eucalyptus. En première étape on a optimisé une table de séchage d'eucalyptus Gomphocephala à partir de plusieurs tables. La table de séchage obtenue permet de qualifier la bonne qualité du bois finale, en un temps optimale. En deuxième étape on a déterminé la courbe de cinétique (teneur en eau réduite en fonction du temps).

## **Chapitre VI : Séchage par micro-ondes du bois d'eucalyptus**

### **INTRODUCTION**

Cette partie du projet s'intéresse tout d'abord à la détermination expérimentale des évolutions de la température selon différentes puissances et les cinétiques de séchage par micro-onde du bois d'eucalyptus. De plus l'évaluation qualitative de l'impact de ce traitement thermique sur le bois d'eucalyptus Gomphocephala.

La dégradation, en agitation thermique, d'une partie de l'énergie transportée par l'onde électromagnétique est la cause principale de chauffage du matériau diélectrique. Les radiations micro-ondes se transforment, lors du séchage, en énergie cinétique qui provoque une vibration intense des molécules d'eau causant ainsi une élévation rapide de la température d'où un phénomène d'évaporation qui se produit. Ce séchage volumique, qui diffère de celui par convection, est accompagné par un dégagement de chaleur.

### **VI.1 CINÉTIQUES DE SÉCHAGE PAR MICRO-ONDES**

Cette partie d'étude s'intéresse à la détermination expérimentale des cinétiques de séchage par micro-onde du bois d'eucalyptus. La technique de séchage du bois par micro-ondes est basée sur le principe de l'agitation des molécules d'eau qui génère de la chaleur au sein du produit. Cette technique dépend de plusieurs facteurs notamment la fréquence, la puissance délivrée par le four micro-onde, les dimensions des échantillons du bois, la température et l'humidité initiale du bois.

#### **VI.1 Mode opératoire**

On utilise dans cette étude des échantillons du bois d'eucalyptus Gomphocephala, les échantillons destinés aux cinétiques de séchage par micro-ondes sont des planches en forme de plaque parallélépipédique de dimensions (30x5x2  $cm^3$ ). Les échantillons sont sciés dans le sens des fibres (sens longitudinal du tronc).

Ces échantillons sont enveloppés avec un papier cellophane et placés dans un réfrigérateur jusqu'à la date des expériences pour conserver leurs propriétés hydriques.



**Figure VI.1** Les échantillons d'eucalyptus Gomphocephala.

## **VI.2 Traitement des résultats**

Après avoir pesé la masse initiale de la planche du bois, on creuse deux trous, un au centre de l'échantillon et l'autre à la surface ensuite on place la planche dans la cavité du four à micro-ondes et on fait relier les deux fibres optiques l'un au trou du centre et l'autre au trou de surface figure (VI.2), les bouts de ces deux fibres sont reliés à une chaîne d'acquisition et le reste du circuit connecté à l'interface d'un ordinateur dont l'affichage des valeurs de températures à l'aide d'un automate programmable.

La perte de masse au cours du séchage est contrôlée à l'aide d'une balance de précision à l'extérieur du four.



**Figure VI.2** Echantillon de bois placé dans la cavité du four BP-301.

### A. Effet de la puissance des micro-ondes sur la teneur en eau réduite du bois

On a réalisé des expériences pour trois puissances différentes 300, 400, et 500 W.

La figure (VI.3) montre l'effet de la puissance délivrée par le four micro-onde sur l'évolution de la teneur en eau moyenne du bois d'eucalyptus « Gomphocephala ».

L'analyse des résultats montre que l'augmentation de la puissance micro-onde diminue considérablement le temps de séchage. En effet, plus le champ électromagnétique délivré est important, plus l'excitation des molécules polaires est importante. L'agitation moléculaire qui en résulte génère des chocs intermoléculaires accompagnés d'un échauffement du bois plus important où l'évaporation d'une quantité d'eau est plus importante [23].

Donc il s'agit d'une relation inversement proportionnelle entre l'intensité de la puissance micro-ondes et la teneur en eau du bois. D'après les résultats des courbes figure (VI.3), on tire que l'augmentation de la puissance micro-onde diminue considérablement le temps de séchage.

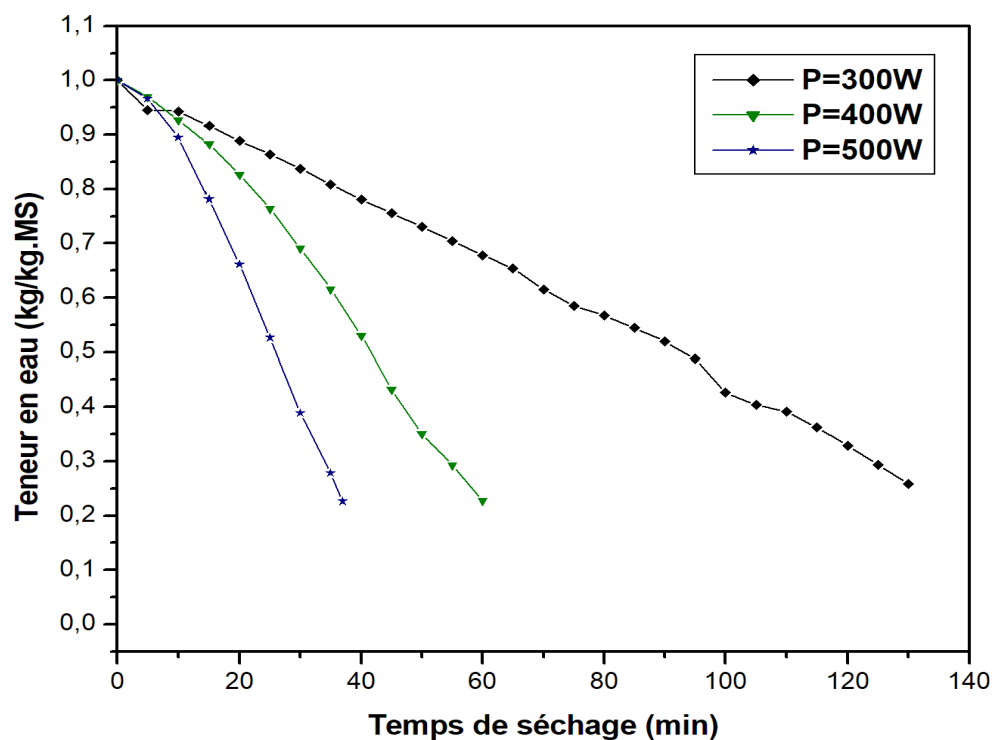


Figure IV.3 L'évolution de la teneur en eau pour trois puissances différentes.

On résume les résultats trouvés dans le tableau suivant :

Puissance (W)	Temps de séchage (min)	Teneur en eau moyenne initial %	Teneur en eau moyenne finale %
P=300W	130	51,54	13,31
P=400W	60	54,36	12,39
P=500W	37	51,54	11,67

Tableau IV.1 Effet de la puissance sur la teneur en eau en fonction du temps.

### B. Effet de la puissance des micro-ondes sur la température interne du bois

La figure suivante montre l'effet de la puissance délivrée par le four micro-onde sur l'évolution de la température interne du bois d'eucalyptus.

Comme le séchage est volumique, la température interne du bois d'eucalyptus est proportionnelle à la puissance incidente appliquée.

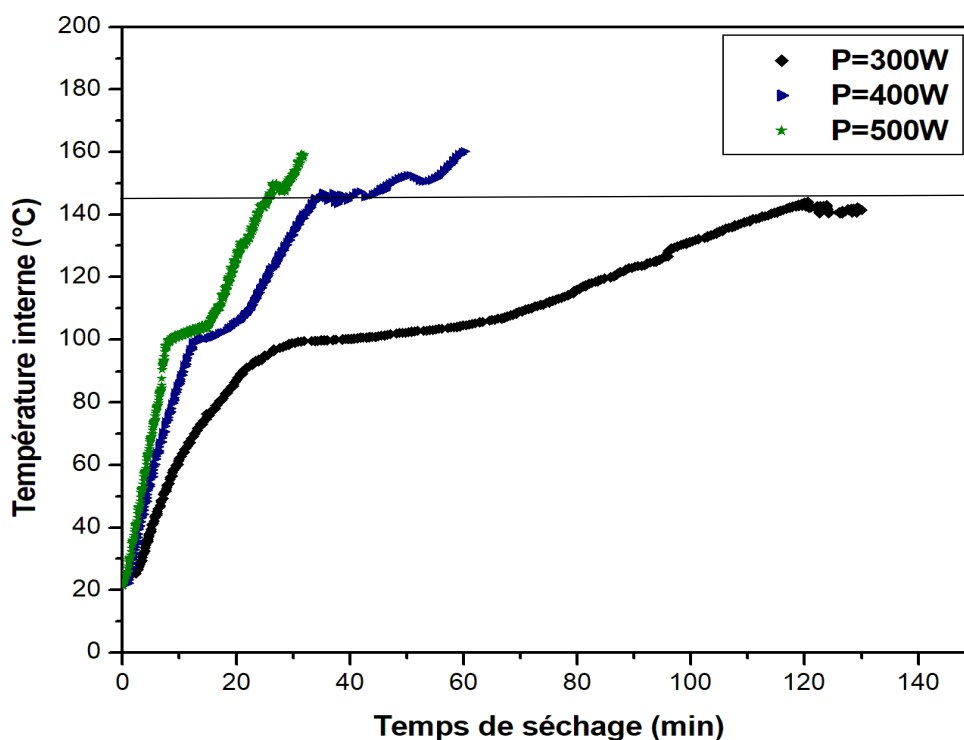


Figure IV.4 L'évolution temporelle de la température interne du bois pour trois puissances.

En comparaison avec le travail de Sakseli [30], pour le même produit (d'eucalyptus Gomphocephala), on trouve pour les puissances 500W et 300W un comportement pareil

pour les courbes de l'évolution temporelle de température. L'évolution des courbes de température au cours du séchage par micro-ondes met en évidence trois phases distinctes :

- La première phase (la mise en température du produit), caractérisée par un accroissement brusque et rapide de la température du bois ceci est expliquée par la conversion de l'énergie des micro-ondes en chaleur de la faible diminution de la teneur en eau

- La deuxième période est l'évaporation, au cours de laquelle la majeure quantité d'eau s'évapore et la température demeure constante (d'après les courbes cette période est pour  $T=100^{\circ}\text{C}$ ).

- La troisième phase (chauffage): au cours de laquelle la perte d'eau ralentit et la température du produit augmente, dans cette phase et selon nos expériences sur le bois d'eucalyptus on observe que pour les hautes puissances (Plus de 400 W) la température ne cesse d'augmenter et dépasse même  $200^{\circ}\text{C}$ .

Un comportement similaire a été observé dans plusieurs recherches ([26] séchage du bois des palmiers par micro-ondes, [30] séchage par micro-ondes du bois d'eucalyptus)

### **C. Effet de la puissance sur l'évolution simultanée de la température et de la teneur en eau**

L'analyse des résultats montre que la diminution de la teneur en eau est accompagnée par une élévation de la température dans toute la masse du bois. Un gradient de température se produit entre la surface et le centre de l'échantillon durant l'opération de séchage. Ce gradient de température devient de plus en plus important au fur et à mesure que le séchage avance.

A la fin de l'opération de séchage, ce gradient atteint une valeur de  $20^{\circ}\text{C}$ . Ce comportement est rencontré dans toutes les cinétiques de séchage réalisées.

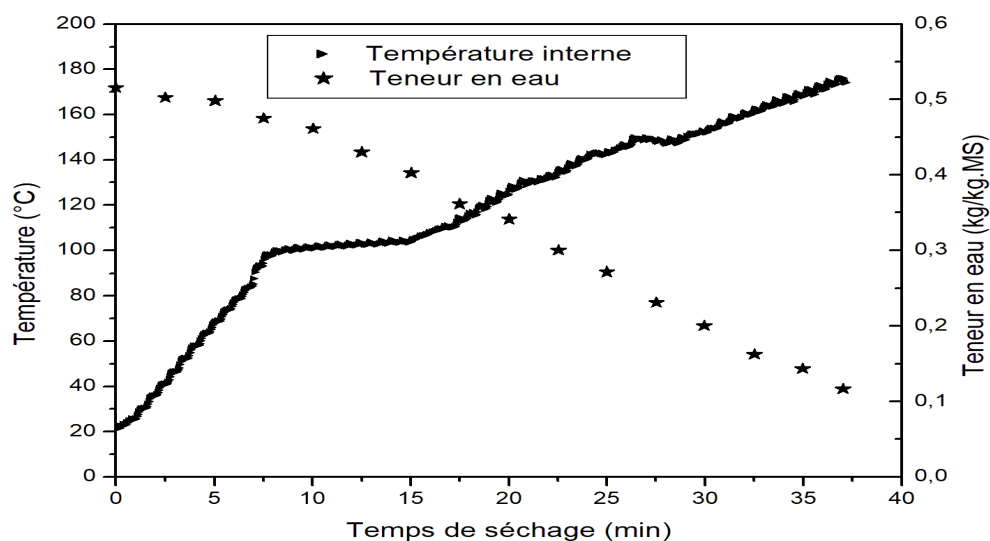


Figure IV.5 Evolution simultanée de la température interne et la teneur en eau  
P= 500W.

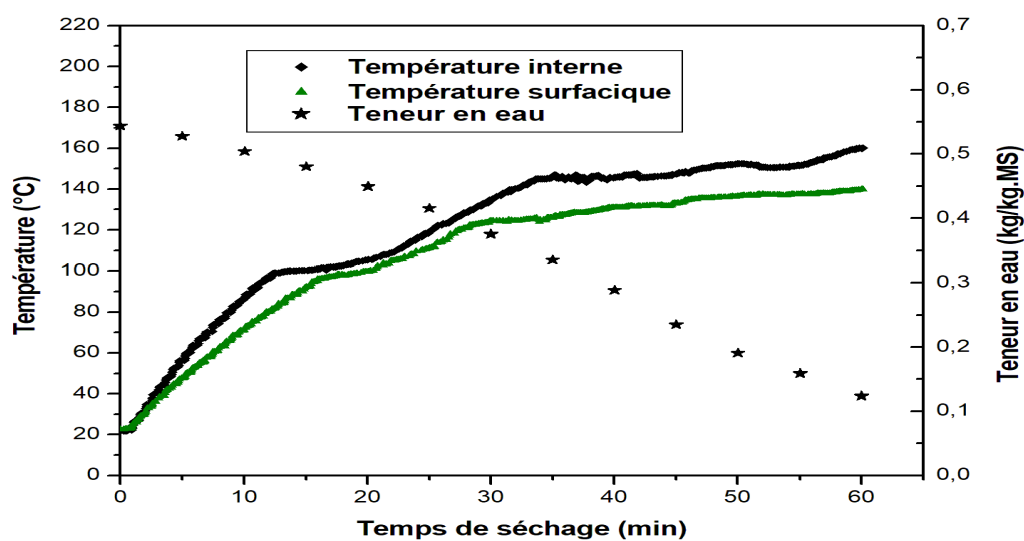
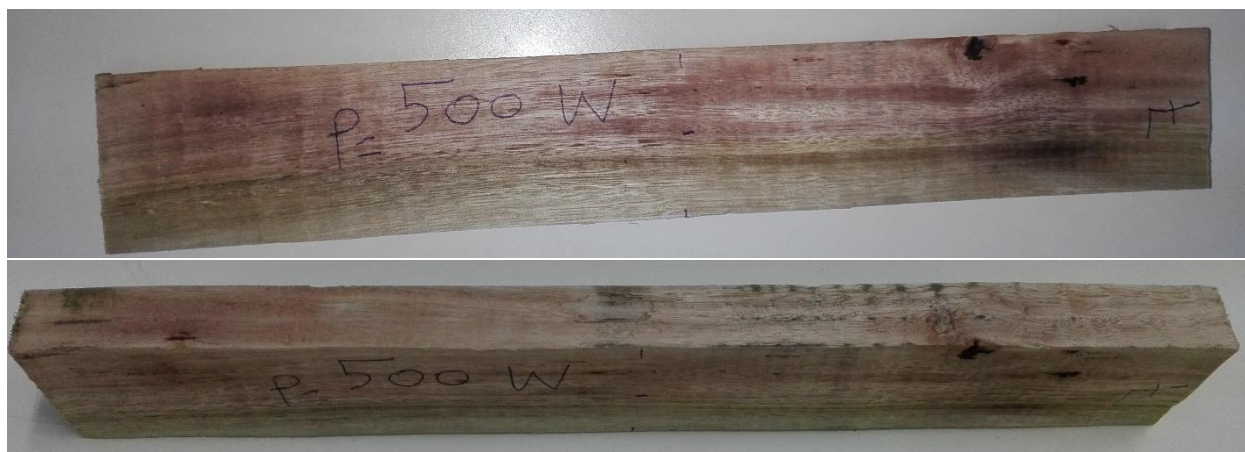


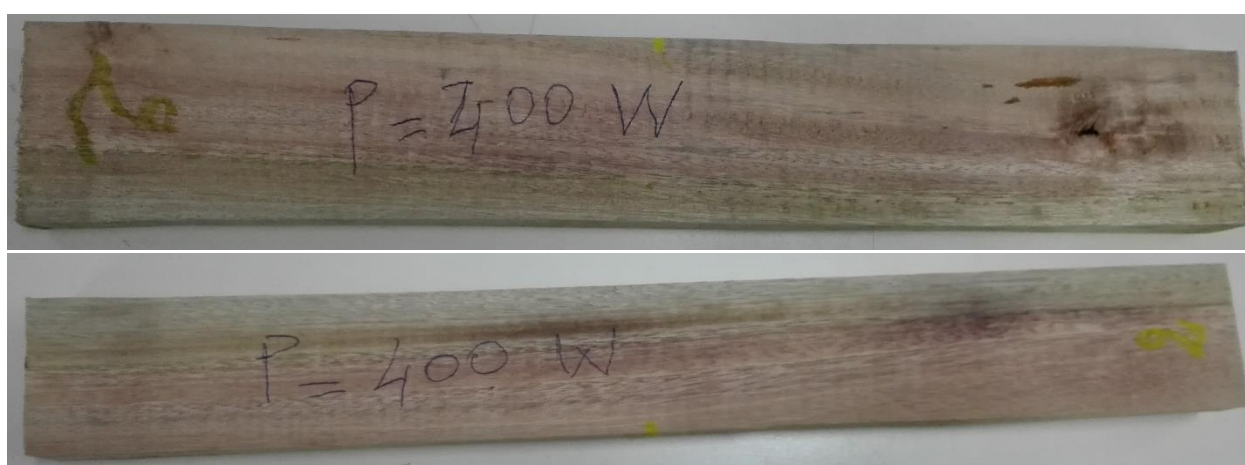
Figure IV.6 Evolution simultanée de la teneur en eau et la température du bois  
P=400W.

#### D. Effet de la puissance de séchage sur la qualité du bois séché

L'obtention d'un produit finale de qualité dans un temps optimal est le principal intérêt des industriels, en effet lors d'une opération de séchage le produit peut subir un endommagement qui apparait sous forme de fissures, fentes, retrait volumique ou du noircissement.



**Figure IV.7** Echantillon après séchage P=500W.



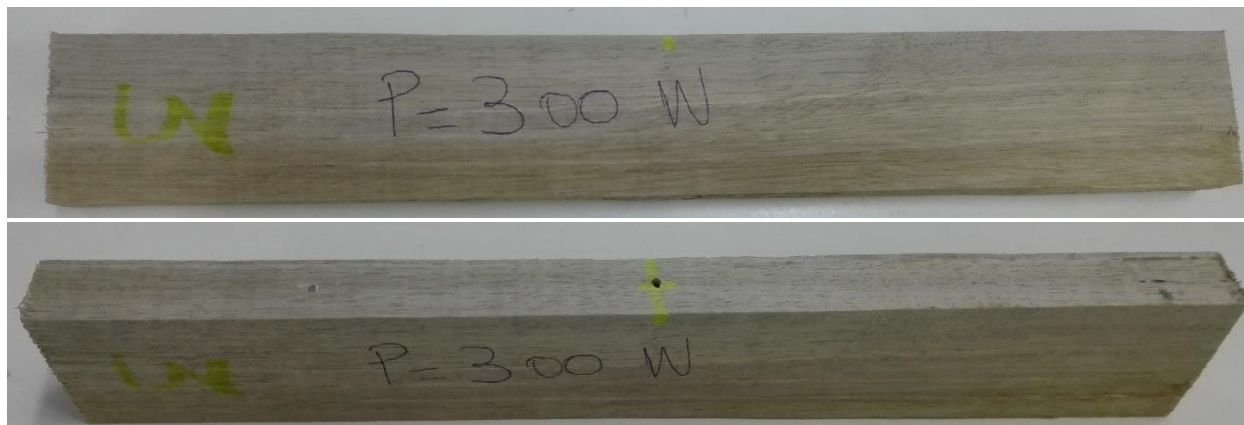
**Figure IV.8** Echantillons après séchage P=400W.

Pour une haute puissance 500W, on remarque un noircissement et des fissures au niveau de l'échantillon, ces modifications superficielles et internes sont expliquées par le fait du séchage rapide causé par une haute puissance, ce qui provoque l'augmentation rapide de la température interne du bois avec un transfert d'humidité plus rapide.

Plusieurs chercheurs, [23] et [31] expliquent :

Les dommages structuraux, au cours d'un séchage rapide au-dessus du point d'ébullition, sont dus la pression de vapeur d'eau dans le bois qui provoque une surpression interne importante qui refoule l'humidité vers l'extérieur. Les valeurs importantes de la pression de la phase gazeuse interne causent l'endommagement mécanique et structural du bois séché, ce qui brise les laisons intercellulaires et fait apparaître des fentes et des fissurations à la surface de l'échantillon. Le noircissement est dû à la carbonisation de la matière ligneuse du bois.

C'est le même phénomène observé pour  $P=400W$  sauf que les dommages et le noircissement sont moins importants.



**Figure IV.9** Echantillons après séchage  $P=300W$ .

Pour une puissance incidente de  $300W$ , l'échantillon du bois ne présente pas des défauts remarquables (ni noircissement, ni fissures).

## **CONCLUSION**

Dans cette partie du travail, nous avons étudié le procédé de séchage par micro-ondes du bois d'eucalyptus Gomphocephala.

On s'est intéressé à l'évolution temporelle de la température des planches du bois pour trois puissances différentes, où nous avons pu vérifier le phénomène de génération de la chaleur interne lors de l'irradiation des micro-ondes.

Pour l'évolution des courbes des cinétiques de séchage, nous avons vérifié que l'augmentation de la température interne du bois provoque une évaporation de l'eau d'où une diminution de la teneur en eau moyenne du bois, On conclut que l'augmentation de la puissance incidente réduit d'une façon considérable le temps de séchage.

## Chapitre VII : ASPECT ENERGETIQUE

### INTRODUCTION

L'extraction du solvant d'un matériau est énergétiquement coûteuse. La consommation énergétique de l'opération de séchage est estimée à 65 TWh dans l'industrie française, soit 21 % de la consommation industrielle (CEREN, 2000-2017).

Actuellement, les préoccupations des industriels, des chercheurs et des spécialistes du domaine de séchage tendent à réduire la consommation énergétique du procédé.

L'optimisation de la consommation d'énergie doit être vue comme un levier pour agir et piloter efficacement le fonctionnement d'un séchoir. Elle présente l'avantage de pouvoir réduire la facture énergétique du séchoir mais également de mieux connaître son fonctionnement. C'est en effet par une meilleure connaissance de ses équipements qu'un industriel pourra identifier et engager les améliorations possibles sur son procédé [1].

Dans cette partie d'étude on s'intéresse à évaluer à partir de bilan énergétique et de matière les performances du séchage du **Bois Eucalyptus** par une soufflerie climatique. Les hypothèses du problème sont ceux utilisés dans le cinquième chapitre.

### VII.1 BILAN ENERGETIQUE DE LA SOUFFLERIE CLIMATIQUE

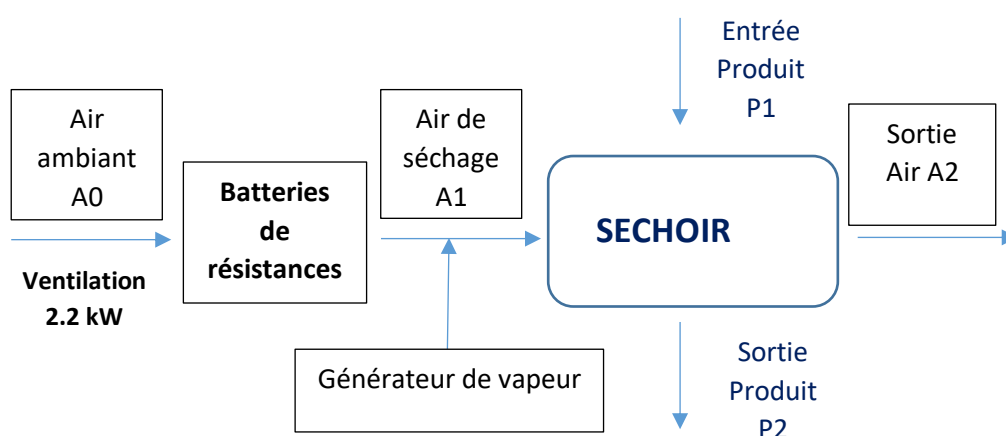


Figure IV.1 Présentation schématique de la boucle de séchage.

$x_s$ : Humidité absolue d'air à la fin du séchage  $\left(\frac{kg}{kg \text{ d'airsec}}\right)$

$x_e$ : Humidité absolue d'air au début du séchage  $\left(\frac{kg}{kg \text{ d'airsec}}\right)$

$\dot{m}_h$ : Débit d'air humide du ventilateur

$\dot{m}_{air \text{ sec}}$ : Débit d'air sec  $\left(\frac{kg}{s}\right)$  ou  $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

$X_e$ : Teneur en eau du solide au début de séchage  $\left(\frac{kg}{kg \text{ Masse sèche}}\right)$

$X_s$ : Teneur en eau du solide à la fin de séchage  $\left(\frac{kg}{kg \text{ Masse sèche}}\right)$

$\dot{m}_{s,s}$ : Débit de solide sec  $\left(\frac{kg}{s}\right)$  ou  $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

$\dot{m}_e$ : Débit de solide au début de séchage  $\left(\frac{kg}{s}\right)$  ou  $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

$\dot{m}_s$ : Débit de solide à la fin de séchage  $\left(\frac{kg}{s}\right)$  ou  $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

#### A. Bilan de matière

##### ➤ Produit Bois Eucalyptus « Gomphocephala »

	Solide à séché	Solide sec	Quantité d'eau séchée
Débit à l'Entrée	$\dot{m}_e$	$\frac{\dot{m}_e}{1 + X_e}$	$X_s * \frac{\dot{m}_e}{1 + X_e}$
Débit à la Sortie	$\dot{m}_s$	$\frac{\dot{m}_s}{1 + X_s}$	$X_s * \frac{\dot{m}_s}{1 + X_s}$

**Tableau II.1** Bilan de matière du produit à séché.

Avec :

La Conservation du débit du solide sec

$$\dot{m}_{s,s} = \frac{\dot{m}_s}{1 + X_s} = \frac{\dot{m}_e}{1 + X_e} \quad (\text{VII.1})$$

Les valeurs caractéristiques du bois, d'après l'étude de la conduite de séchage convectif du bois d'eucalyptus, sont :

$$X_s = 0,12 \text{ kg/kg.MS} \quad X_e = 0,65 \text{ kg/kg.MS}$$

➤ **Air de séchage :**

	Air sec	Vapeur d'eau
Débit à l'entrée (g)	$\dot{m}_{air\ sec}$	$\dot{m}_{air\ sec}(entrée).xe$
Débit à la sortie (g)	$\dot{m}_{air\ sec}$	$\dot{m}_{air\ sec}(entrée).xs$

**Tableau II.2** bilan de matière d'air de séchage.

La conservation de la masse d'air sec

$$\dot{m}_{air\ sec} = \dot{m}_{air\ sec}(entrée) = \dot{m}_{air\ sec}(sortie) \quad (VII.2)$$

La masse d'eau enlevée :

$$\dot{m}_{eau} = \dot{m}_{air\ sec}(xs - xe) = \dot{m}_{s,s}(Xe - Xs) \quad (VII.3)$$

De (VII.3) on a :

$$\dot{m}_{s,s} = \frac{\dot{m}_{air\ sec}(xs - xe)}{Xe - Xs} \quad (VII.4)$$

**B. Bilan thermique :**

	Chaleur du solide à séché	Chaleur de l'air de séchage	Apport d'Energie (Chauffage+ génération de vapeur)	Déperdition thermique
Entrée	$\dot{m}_{s,s} * H_{s,e}$	$\dot{m}_{air\ sec} * H_e$	$Q_{tot}$	/
Sortie	$\dot{m}_{s,s} * H_{s,s}$	$\dot{m}_{air\ sec} * H_s$	/	$\Delta P$

**Tableau II.3** Bilan des énergies.

$Q_c$  : la chaleur consommée pour chauffer l'air (batterie des résistances) = n\*1,5 [kW]

$Q_v$  : l'énergie consommée par le générateur de vapeur=12 [kW/h]

$$Q_{tot} = Q_v + Q_c$$

$\Delta P$  : Les déperditions thermiques dues à l'opération de séchage [kW]

$H_e H_s$  : sont respectivement l'enthalpie massique de l'air au début et à la fin de séchage [kJ/kg]

$$H_{s,e} = [C_{ps,sec}T1 + XeC_{peau}T1]$$

$$H_{s,s} = [C_{ps,sec}T2 + XsC_{peau}T2]$$

$$H_e = [C_{pa}T_e + xe(C_{pv}T_e + Lv)]$$

$$H_s = [C_{pa}T_s + xs(C_{pv}T_s + Lv)]$$

$$C_{ps,sec}(T1=5^\circ C) = 0,1032 + 0,003867 * T1 = 1,178706 \text{ [kJ/kg. K]}$$

$$C_{ps, sec} (T_2=70^\circ C) = 0,1032 + 0,003867 * T_2 = 1,43016 \text{ [kJ/kg. K]}$$

$$C_{pv} = 1,92 \text{ [kJ/kg. K]}$$

$$C_{pa} = 1,01 \text{ [kJ/kg. K]}$$

$$C_{peau} = 4,19 \text{ [kJ/kg. K]}$$

$$L_v(T=0^\circ C) = 2494 \text{ [kJ/kg]}$$

D'après le Principe de conservation d'Energie :

$$\sum \text{entré} = \sum \text{sortie} \quad (\text{VII.5})$$

$$\dot{m}_{s,s} * H_{s,s} + \dot{m}_{air sec} * H_e + Q_{tot} = \dot{m}_{s,s} * H_{s,s} + \dot{m}_{air sec} * H_s + \Delta P \quad (\text{VII.6})$$

## VII.2 LES DEPERDITIONS THERMIQUES AU COURS DU PROCEDE DE SECHAGE DU BOIS EUCALYPTUS GOMPHOCEPHALA

On cherche à calculer les déperditions thermiques au cours d'un procédé de séchage convectif par l'air chaud de bois d'eucalyptus pendant 110 heures.

D'après le diagramme enthalpique de Mollier -Ramzine, le séchage est supposé **isenthalpique** :

	T sèche °C	x kg/kg d'air sec	h kJ/kg
A0	20	0,0118	50,07
A1	70	(x1 = x0) 0,0118	101,75
A2	30	0,0280	101,75

$$\Delta P = \dot{m}_{s,s} * H_{s,s} + \dot{m}_{air sec} * H_e + Q_{tot} - \dot{m}_{s,s} * H_{s,s} - \dot{m}_{air sec} * H_s \quad (\text{VII.7})$$

$$\Delta P = \dot{m}_{s,s} * (H_{s,s} - H_{s,e}) + \dot{m}_{air sec} * (H_e - H_s) + n * 1,5 + 12 * 110 \quad (\text{VII.8})$$

Débit d'air sec

$$\dot{m}_{air sec} = \frac{\dot{m}_h}{1+x_e} \quad (\text{VII.9})$$

$$\dot{m}_{air sec} = \frac{0,7}{1+0,0118} = 0,69 \left(\frac{m^3}{s}\right) = 0,825 \left(\frac{kg}{s}\right)$$

$$\dot{m}_h (\text{à l'entrée}) = 0,7 \left(\frac{m^3}{s}\right) \quad \rho_{air sec} = 1,204 \frac{kg}{m^3}$$

Débit de solide sec

$$\dot{m}_{s,s} = \frac{\dot{m}_{air\ sec} * (x_e - x_s)}{x_e - x_s} \tag{VII.10}$$

$$\dot{m}_{s,s} = \frac{0,825(0,028 - 0,011)}{0,65 - 0,12}$$

$$\dot{m}_{s,s} = 0,264 \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right)$$

En remplaçant les résultats trouvés dans l'équation (VII.8) :

$$\Delta P = 0,0264 * (19,51 - 136,1472) + 0,825(50,07 - 101,75) + n * 1,5 + 12 * 110$$

La batterie de chauffage, qui permet de chauffer l'air dans la veine d'essai, est constituée de 12 résistances électriques à ailettes de puissance totale maximale de 18kW, chaque batterie est d'une puissance de 1,5 kW. Dans le tableau III.1 on présente les déperditions thermiques par groupe de batterie.

Puissance de chauffage kW	Déperditions thermique ΔP kW
1batterie=1,5kw	1275,785
2batterie=2*1,5kw	1277,285
3batterie=3*1,5kw	1278,785
4batterie=4*1,5kw	1280,285
5batterie=5*1,5kw	1281,785
6batterie=6*1,5kw	1283,285
7batterie=7*1,5kw	1284,785
8batterie=8*1,5kw	1286,285
9batterie=9*1,5kw	1287,785
10batterie=10*1,5kw	1289,285
11batterie=11*1,5kw	1290,785
12batterie=12*1,5kw	1292,285

**Tableau III.1** Déperdition thermiques en fonction du nombre de résistance.

### VII.3 CONSOMMATION ENERGETIQUE MASSIQUE DE LA SOUFFLERIE DE SECHAGE CEM [28].

$$CEM = \frac{\text{Energie réelle consommée}}{\text{Chaleur d'eau évaporée}} \quad (\text{VII.11})$$

$$CEM = \frac{ma(Hs - He)}{ma(x2 - x1)} = \frac{(Hs - He)}{(xs - xe)} = \frac{101,75 - 50,07}{(0,028 - 0,011)}$$

$$CEM = 3040 \text{ kJ par kg d'eau évaporée}$$

Rapport de la consommation énergétique du séchoir [28]:

$$RCE = \frac{CEM}{\Delta H_{vap}} = \frac{3040}{2425} = 1,25$$

### VII.4 LA CONSOMMATION ENERGETIQUE MASSIQUE DU FOUR A MICRO-ONDES

La performance énergétique, définie par *Du.Wang* en 2005, a été quantifiée en termes d'énergie nécessaire pour chauffer et évaporer une unité de masse d'eau (kJ/kg), dont voici l'expression :

$$CEM = \frac{t * P * (1 + Xi)}{mh * (Xi - Xf)} \quad \left( \frac{J}{kg} \right) \quad (\text{VII.12})$$

Avec :

*P* : Puissance incidente des microondes (W)

*t* : Temps de séchage (s)

*mh* : Masse humide du produit (kg)

*Xi, Xf*: Respectivement teneur en eau initial et teneur en eau finale du produit séché.

On calcul la consommation énergétique par kilogramme pour les trois puissances étudiées

Essai	Temps(s)	<i>mh</i> (g)	<i>Xi</i> %	<i>Xf</i> %	<i>CEM</i> ( $\frac{MJ}{kg}$ )
P= 300W	7800	268,416	51,54	13,31	34,57456
P=400W	3600	273,423	54,36	12,39	19,36971
P=500W	2220	268,422	51,54	11,67	15,71758

**Tableau IV.1** Consommation énergétique du four à micro-ondes pour différentes puissances.

## **CONCLUSION**

Dans cette partie on s'est intéressé à l'étude énergétique du séchoir convectif. Nous avons pu, à partir d'un bilan énergétique, évaluer les déperditions thermiques au cours de l'opération de séchage. Cela a été réalisé dans la soufflerie climatique du laboratoire LETTM. L'énergie consommée, pour réduire la teneur en eau d'eucalyptus de 65% à 12%, durant une opération de séchage est de 3040 kJ/kg d'eau.

L'énergie consommée par le four à micro-ondes durant le procédé de séchage se diffère d'une puissance à une autre. Pour une teneur en eau finale, la consommation énergétique, pour une puissance de 500W, est relativement faible égale à 15,71758 (MJ/kg de produit humide) et elle est relativement élevée égale à 34,57456 (MJ/kg de produit humide) pour une puissance de 300W.

## CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce mémoire s'insère dans le cadre d'une collaboration entre l'école supérieure des technologies industrielles d'ANNABA et le Laboratoire d'Énergétique et des Transferts Thermiques et Massiques de la Faculté des Science de Tunis.

Le plan expérimental, des cinétiques de séchage ont été réalisées pour deux procédés thermiques différents :

- Convectif par l'air chaud
- Rayonnant par des micro-ondes.

La cinétique de séchage convectif des feuilles aromatiques (de myrte) a été étudiée pour différentes conditions de séchage. L'augmentation de la température et de la vitesse de l'air de séchage diminue le temps de séchage. La diffusion effective des feuilles de myrte augmente avec la température. Les valeurs du coefficient de diffusion obtenues pour les températures 50°C, 55°C et 60°C varient de  $9,8601 \cdot 10^{-10}$  à  $3,8577 \cdot 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$  indiquant la dépendance de la loi d'Arrhenius.

L'étude de séchage convectif du bois, a été consacrée à optimiser la conduite de séchage d'eucalyptus. L'influence des paramètres de l'air de séchage tels que la température, la vitesse, et l'humidité relative sur le temps de séchage et la teneur en eau réduite ont été soigneusement étudiées. La table de séchage adoptée pour notre bois donne un bon résultat qualitatif de l'échantillon final.

Le processus de séchage rayonnant est réalisé dans le but de sécher des échantillons du bois d'eucalyptus dans un four à micro-ondes industriel en suivant les courbes des cinétiques pour différentes puissances et l'influence de la puissance incidente des micro-ondes sur l'évolution instantanée de la température et sur la qualité finale de l'échantillon du bois étudié.

En se référant aux travaux de la littérature, la formule développée par l'agence de la transition écologique ADEME [1] nous a permis de calculer la consommation d'énergie du four 301-BP durant l'opération de séchage.

L'étude du bilan d'énergie suivant le procédé de séchage convectif (soufflerie climatique) a permis de quantifier les déperditions thermique durant une boucle de séchage et d'évaluer la consommation d'énergie nécessaire à sécher un kilogramme de vapeur d'eau.

## ANNEXES

## Annexe 1

Tables de séchage (d'après Daniel ALEON, CTBA 2001, Séchage du bois Guide  
Pratique, page 86-89)

Tables de séchage à utiliser en fonction des essences :

Nom commercial	Nom botanique n°table		Nom commercial	Nom botanique n°Table	
Feuillus			Feuillus tropicaux		
Aulne	Alnus spp	5	Acajou	Khaya spp	9
Bouleau	Betula spp	9	Aniégré	Aningeria robusta	2
Charme	Carpinus betulus	3	Avodiré	Turraeanthus africanus	7
Châtaigner	Castanea Sativa	3	Azobé	Lophira alata	1
Chêne	Quercus spp	1	Bahia	Mitragyna cilata	11
Erable	Acer spp	3	Bété	Mansonia altissima	9
Frêne	Fraxinus excelsior	3	Bilinga	Sarcocephalus diderrichi	7
Hêtre	Fagus sylvatica	7	Bossé	Guarea spp	7
Merisier	Prunus Aviom	3	Dabéma	Piptadenia africana	1
Noyer	Juglans regia	2	Dibétou	Lovoa Klaincana	7
Orme	Ulmus campestris	6	Doussié	Azafia spp	7
Peuplier	Populus spp	4	Eucalyptus	Eucalyptus vercolor	7
Platane	Platanus acerifolia	7	Framiré	Terminalia ivorensis	1
Tilleul	Tilia spp	8	Homba	Pycnanthus angolensis	7
Résineux			Iroko	Chlorophora excelsa	7
Douglas	Pseudotsuga douglasii	10	Kapur	Dryobalanops lanceolata	7
Epicéa	Picea excelsa	11	Kosipo	Entandrophragma candollei	1
Mélèze	Larix europaea	12	Lauan	Shorea spp	7
Pin laricio	Pinus laricio	10	Limba	Terminalia superba	9
Pin maritime	Pinus pinaster	11	Makoré	Tieghemella africana	9
Pin sylvestre	Pinus sylvestris	10	Méranti	Shorea spp	7
Sapin	Abies spp	11	Moabi	Baillonella toxisperma	7
			Movingui	Distemonanthus	7
			Niangon	benthamianus	7
			Okoumé	Tarrietia utilis	7
			Ramin	Aucoumea claineana	1
			Samba	Gonystylus spp	10
			Sapelli	Triplochiton scleroxylon	1
			Sipo	Entandrophragma	7
			Teck	cylindricum	9
			Tiama	Entandrophragma utile	1
			Wengé	Tectona grandis	7
				Entandrophragma	
				angolense	
				Milletia stuhlmanii	

Table n°1					
Humidité du bois H	Températures		Humidité relative de l'air HR	Equilibre hygroscopique du bois EH	Gradient De Séchage G
	Sèche	Humide			
Vert	30	27.5	82	17	
35	30	27	80	16	
30	40	36.5	60	15	2
28	45	41	77	14	2
25	50	44	70	11.5	2.2
22	55	48	67	11	2.2
20	60	50	57	8.5	2.4
18	60	47.5	50	7.5	2.4
15	65	49	42	6	2.5

Table n°2					
Humidité du bois H	Températures		Humidité relative de l'air HR	Equilibre hygroscopique du bois EH	Gradient De Séchage G
	Sèche	Humide			
Vert	50	47	85	17	
35	50	46	80	15	2.2
30	55	50.5	77	13.5	2.3
28	55	49	72	12	2.5
25	60	52	65	10	2.7
20	65	53.5	55	7.5	3
15	70	50	35	5	

Table n°3					
Humidité du bois H	Températures		Humidité relative de l'air HR	Equilibre hygroscopique du bois EH	Gradient De Séchage G
	Sèche	Humide			
Vert	50	47	85	17	
35	50	45	75	13	2.6
30	50	44	70	11.5	2.6
25	60	52	65	9.5	2.7
20	60	47.5	50	7.5	2.7
15	65	47	37	5.5	

Table n°4					
Humidité du bois H	Températures		Humidité relative de l'air HR	Equilibre hygroscopique du bois EH	Gradient De Séchage G
	Sèche	Humide			
Vert	80	77.5	90	16	
35	80	76.5	85	14	2.5
30	80	75	80	12	2.5
25	80	73	75	10	2.9
20	80	68	58	7	3
15	80	60	40	5	

Table n°5					
Humidité du bois H	Températures		Humidité relative de l'air HR	Equilibre hygroscopique du bois EH	Gradient De Séchage G
	Sèche	Humide			
Vert	60	57	85	15.5	
35	60	56	80	13.5	2.6
30	65	59	75	11.5	2.6
25	65	57	65	9.5	2.9
20	70	57	52	7	3
15	70	50	35	5	

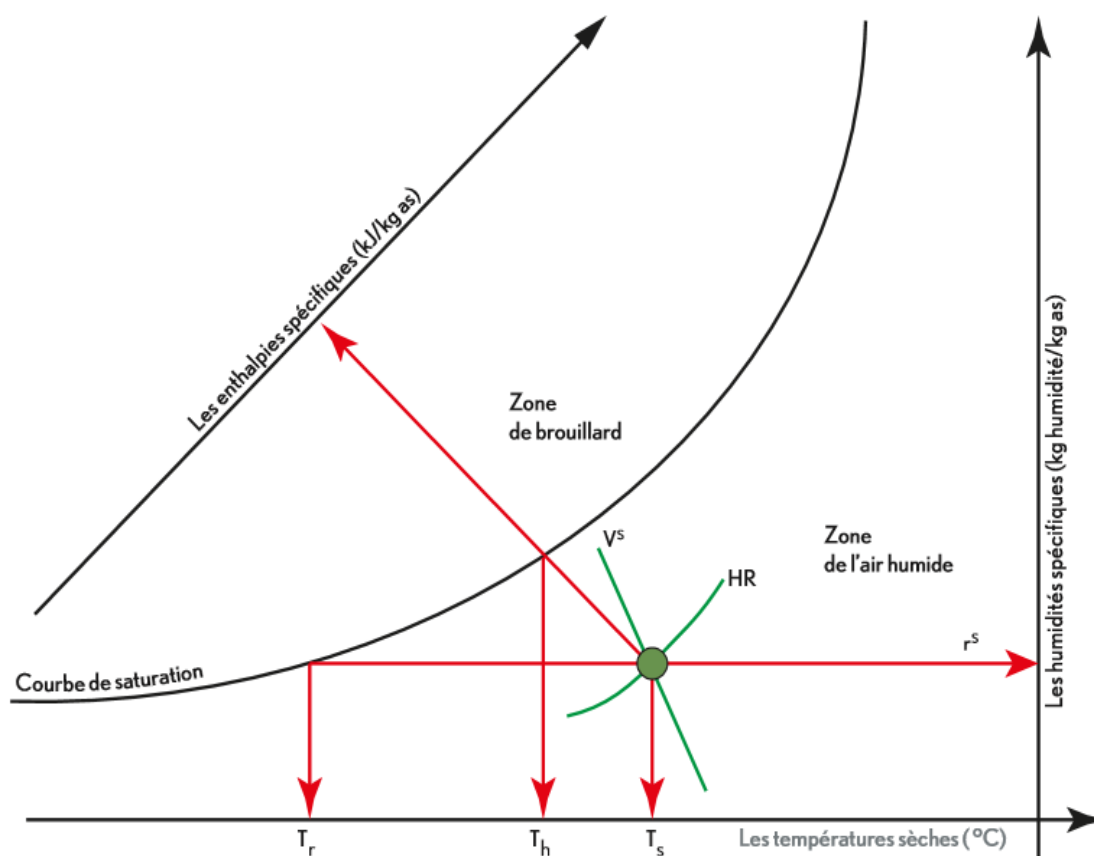
Table n°6					
Humidité du bois H	Températures		Humidité relative de l'air HR	Equilibre hygroscopique du bois EH	Gradient De Séchage G
	Sèche	Humide			
Vert	40	37.5	85	18	
35	40	36	75	14	
32	40	34	65	11	
30	45	37	60	11	2.7
25	55	45.5	58	9	2.8
20	60	47	48	7	2.9
15	70	50	35	5	3

Table n°7					
Humidité du bois H	Températures		Humidité relative de l'air HR	Equilibre hygroscopique du bois EH	Gradient De Séchage G
	Sèche	Humide			
Vert	50	47	85	17	
35	50	46	80	15	
32	55	50	75	13	2.7
30	60	53	70	11	2.8
25	65	55.5	62	9	2.9
20	70	57	52	7	3
15	70	50	35	5	

Table n°8					
Humidité du bois H	Températures		Humidité relative de l'air HR	Equilibre hygroscopique du bois EH	Gradient De Séchage G
	Sèche	Humide			
Vert	60	57	85	16	
35	60	56	80	14	
32	60	53	70	11	3
30	65	57	67	10	3.1
28	65	55.5	62	9	3.1
25	70	60	60	8	2.9
20	70	57	52	7	3
15	70	50	35	5	

Annexe 2

Le diagramme de Mollier permet la représentation des grandeurs décrivant l'air humide. Le diagramme de l'air humide est utilisé pour les calculs relatifs aux humidités de l'air, pour les déterminations de points de rosées et de températures humides ainsi que pour les calculs énergétiques relatifs au séchage.



Représentation simplifiée du diagramme de l'air humide.

Th : Température humide      Tr : Température de rosé    Ts : Température sèche  
 HR : humidité relative      Vs : Volume spécifique     $r^s$  : Teneur en eau

## REFERENCES

- [1] ADEME, (2017). Les procédés de séchage dans l'industrie – CETIAT.
- [2] Aghfir A. et al. Détermination du coefficient de diffusion et de l'énergie d'activation de la menthe lors d'un séchage conductif en régime continu. *Revue des Energies Renouvelables*, pages 385-394, 2008.
- [3] S. AZZOUZ, Etudes des phénomènes de transferts de chaleur et de masse dans les milieux poreux au cours du séchage. Application aux produits agro-alimentaire, thèse de doctorat, 1999.
- [4] S. AZZOUZ, Les phénomènes de transferts au cours d'un procédé de séchage convectif par l'air chaud de produits naturels, Habilitation Universitaire en physique, 2017.
- [5] Rim BAHAR, Caractérisation expérimentale et modélisation du comportement hydro-thermique et mécanique au cours du séchage du bois, thèse de doctorat, 2017.
- [6] Rim BAHAR, une caractérisation physique et une étude des cinétiques de séchage convectif de trois variétés du bois résineux, master, 2012.
- [7] S. Ben Ayed, Etude des propriétés physico-mécaniques et de la durabilité naturelle du bois d'Eucalyptus maidenii dans l'arboretum de Souiniet, Mémoire de mastère de recherche, 2018.
- [8] Ben dhib, Identification du coefficient de diffusion à partir des cinétiques du séchage par l'air chaud du bois de palmier. Mastère de physique, 2010, Faculté des sciences de Tunis.
- [9] BERRICH. O, Etude de l'effet des conditions de séchage sur le rendement des huiles essentielles de Myrte, master, 2018.
- [10] Bimbenet J.J., Duquenoy A. et Trystram G. Génie des procédés alimentaires. Des bases aux applications. Dunod, Paris, 2002, pages 553.
- [11] Bimbenet. J.J., Daudin. J. D. and Wolff. E. Air drying kinetics of biological particles, proceeding of the fourth International Drying Symposium, 198 Kyoto.
- [12] Brunton N.P., Lyng J.G. et Zhang L. The use of dielectric properties and other physical analyses for assesing protein denaturation in beef biceps femoris muscle during cooking from 5 to 85°C. *Meat Science*, 236-244, 2006.
- [13] Decareau R.V. *Microwaves in the food processing industry*. Florida: Academic Press, Inc, 1985.
- [14] Doymaz. I., Thin layer drying of bay laurel leaves (*Laurus Nobilis*, L.) *Journal of Food Processing and Preservation*, 2012.
- [15] FAO, Les eucalyptus dans les reboisements, Rome, Italie, 1982.
- [16] Goldblith S.A. et Wang D.I.C. Effect of microwaves on *Escherichia coli* and *Bacillus subtilis*. *Applied Microbiol*, pages 1371-1375, 1967.
- [17] I. Hermassi. Caractérisation thermo-physique et étude du comportement rhéologique d'un produit fortement déformable et mécanique au cours du séchage du bois, thèse de doctorat, 2017, Université de Tunis El-Manar.
- [18] Jannot. Y., (2008). Isothermes de sorption : modèles et détermination, cours.
- [19] P. Jodin, Le Bois : matériau d'ingénierie. Association pour la recherche sur le bois en Lorraine, page 433,1994.
- [20] P. Joly and F. More-Chevalier. *Théorie, Pratique et Economie du séchage des bois*, Edition H. Vial, Dourdan, France, page 205, 1980.
- [21] K. KERBOUA, (2019) Cours, Séchage thermique.
- [22] Knuston K., Marth E. et Wagner M. Microwave heating of food. *Lebensm. Wiss.u Technol.*, pages 101-110, 1987.

- [23] Lin Yang et al., Preparation of dry honey by microwave-vacuum. Science direct, pages 582-590, 2008.
- [24] Mudgett, R.E. Microwave properties and heating characteristics of foods. Food Technology, pages 84-93, 1986.
- [25] Nelson, S.O. Electrical properties of agricultural products. A critical review. Transaction of the ASAE. Pages 384-400, 1973.
- [26] S. Ouertani. Modélisation des transferts couplés de chaleur et de masse et du comportement mécanique au cours du séchage du bois. Thèse de Doctorat, 2014
- [27] S. Ouertani, S. Azzouz, L. Hassini, A. Belghith, Palm wood drying and optimization of the processing parameters, Wood Material Science and Engineering, pages 75-90, 2011.
- [28] H. ROMDHANA. Amélioration de l'efficacité énergétique du procédé de séchage : de la conception optimisée à la conduite performante de l'existant, AgroParisTech, 2017.
- [29] Ryyanen S. et Ohlson T. Microwave heating uniformity of ready meals as affected by placement, composition and geometry. J. Food Science, pages 620-624, 1996.
- [30] M. Sakseli, Etude du séchage par micro-ondes du bois d'eucalyptus, master 2019, Université de Tunis El-Manar.
- [31] P. Salagnac, P. Glouannec, D. Lecharpentier. Numerical modeling of heat and mass transfer in porous medium during combined hot air-infrared and microwave drying. International journal of heat and mass transfer, pages 4479-4489, 2004.
- [32] Schiffmann R.F. Microwave and dielectric drying, Handbook of industrial drying, Mujumdar A.S., Marcel Decker Inc., pages 345-369, 1995.
- [33] Singh R.P. et Heldman D.R. Heat transfer in food processing. In: Introduction to Food Engineering. Third edition. Academic Press, pages 306-314, 1993.
- [34] Thouraya, (2013). le séchage convectif des feuilles de Laurier Noble, master.
- [35] M. Toujani, Etude du comportement mécanique des produits déformables lors du séchage convectif. Thèses de doctorat, 2013, Université de Tunis El-Manar.
- [36] Wilson RA, Astorga R, Gomez C, Gonzalez-Rio F (1995). Papermaking with DNA. 'Intelligent Fibre'. In the proceedings of the CRCTHF-IUFRO Conference; Eucalypt plantations: improving fiber yield and quality, Hobart, Australia, pages 5-9, 1995.