

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A. MIRA - Bejaia

Faculté de Technologie

Département de Génie des Procédés



MEMOIRE DE FIN DE CYCLE

En vue de l'obtention du diplôme Master Génie des Procédés, Spécialité : Génie

Alimentaire

MASTER

Thème

Séchage des Produits Alimentaires : notions de bases, Cinétiques de Séchage et Modélisation

Présenté par :

RAMDANI Djohra Et HADDOUCHE Lydia

Soutenu le :

Devant le jury composé de :

Mme CHIBANI Nasira	Docteur	Présidente
Mme BEY Zakia	Docteur	Examinatrice
Mme BOULKBACHE-MAKHLOUF Lila	Professeur	Promotrice
Mlle MOUHOUBI Khokha	Docteur	Co-promotrice

Année universitaire : 2019 / 2020

REMERCIEMENTS

Nous remercions en premier lieu Allah le tout puissant pour toute la volonté et le courage qu'il nous a donné pour achever ce travail.

Je tiens à remercier chaleureusement et très particulièrement ma promotrice Mme BOULKBACHE-MAKHLOUF Lila pour ses aides, conseils et orientations.

Nous tenons à exprimer notre très grande gratitude à Mlle MOUHOUBI Khokha pour sa participation à l'évaluation de ce travail, son aide illimité, sa disponibilité, précieux conseils et diverses orientations, sa gentillesse et encouragement tout au long de la réalisation de ce travail.

Nos vifs remerciements les plus sincères s'adressent aux membres du jury pour avoir accepté de juger ce travail.

Enfin, merci pour toutes nos familles et nos amis qui par leurs prières et leurs encouragements, on a pu surmonter tous les obstacles

Merci



Dédicaces

*A ceux qui m'ont tout donné sans rien en retour
A ceux qui m'ont encouragé et soutenu dans les moments les
Plus difficiles
Et ceux à qui je dois tant
A mes chers parents pour leur amour, soutien et patience.
Je les remercie d'autant que je ne remercie personne
J'espère qu'un jour mon bon Dieu me donne l'occasion de les
Honorer et rendre ce qu'ils méritent.
A mes sœurs Layla, Yasmina
A mon chère frère Massinissa
A toute ma famille mes grands parents paternel et maternel
oncles, tantes, cousins et cousines
A mes voisines Tata Jida, ma meilleure amie Zahra que je les
considère comme une deuxième famille
A ceux qui m'ont soutenu de loin et de près
A ma binôme Lydia et sa famille.
A toute la promotion ; génie alimentaires.*



Djohra

Dédicaces

*A la mémoire de mon père, parti trop tôt, qui a toujours
su trouver les mots pour me motiver*

*J'espère que, du monde qui est sien maintenant, il
apprécie cet humble geste comme preuve de
reconnaissance de la part d'une fille qui a toujours prié
pour le salut de son âme. Puisse Dieu, le tout puissant,
l'avoir en sa sainte miséricorde*

*A mon cher époux, pour son soutien de tous les
jours.*



Lydia

Sommaire

Liste des abréviations	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction.....	1

Chapitre 1 : Séchage

I. Séchage.....	3
I.1. Historique.....	3
I.2. Définition	3
I.3. Domaines d'application de séchage dans l'industrie agro-alimentaire.....	3
I.4. But de séchage	4
I.6. Mécanisme de séchage.....	5
I.6.1. Transfert de chaleur.....	6
I.6.2. Transfert de masse.....	7
I.7. Théories descriptives du phénomène de séchage.....	7
I.8. Phénomènes qui se produisant au cours du séchage	9
I.9. Avantages et inconvénients du séchage	10
I.9.1. Avantages	10
I.9.2. Inconvénients du séchage.....	10
II. Méthodes de séchage	10
II.1. Méthodes thermiques.....	11
II.1.1. Séchage solaire.....	11
II.1.2. Séchage à air chaud.....	15
II.2. Méthode non thermique (Lyophilisation).....	18

Chapitre 2 : Cinétiques de séchage et modélisation

I. Cinétiques de séchage	21
I.1. Cinétique de séchage des produits agro-alimentaires	21
I.2. Pré traitements des produits avant séchage.....	21
I.3. Analyse critique des modèles de cinétique et périodes du séchage	21
I.3.1. Périodes de séchage.....	22

I.3.2. Analyse cinétique	23
I.4. Facteurs qui affectent la cinétique de séchage	24
I.4.1. Influence de la température de l'air	24
I.4.2. Influence de l'humidité de l'air	26
I.4.3. Influence de la vitesse d'air	27
II. Modélisation	31
II.1. Définition.....	31
II.2. Principe	31
II.3. Principaux domaines d'applications	31
II.4. Intérêt de la modélisation.....	31
II.5. Procédé de séchage en couche mince	32
II.6. Modélisation des cinétiques de séchage	32
II.7. Classification des modèles.....	33
II.8. Modèles de séchage en couches minces	34
II.9. Statistiques de qualité d'ajustement des modèles.....	36
II.10. Estimation de la diffusivité effective de l'humidité pendant le séchage	37
II.11. Estimation de l'énergie d'activation.....	38
Conclusion	40
Références	
Annexes	
Résumé	

Liste des abréviations

- A² : Surface (mm²)
- ATB : Souffleur aérothermique
- C_{dr} : Période de taux de séchage constant
- C_s : Concentration en saccharose
- CTD : Séchoir à plateaux d'armoire
- D : Diffusivité effective de l'humidité (m/s)
- Defy : Diffusivité effective avec retrait (m²/s)
- DMO : Four à micro-ondes domestique
- Dr : Vitesse de séchage (kg/kg min)
- d, n, a, b, c, α : Constante du modèle
- E_a : Activation énergie
- EA : Zone exposée (m²)
- EF : Efficacité de la modélisation
- FBD : Sécheur à lit fluidisé
- FIR : Rayonnement infrarouge lointain
- h* : échantillon demi-épaisseur (m)
- h : Epaisseur (mm)
- HCD : Sécheur à convection à air chaud
- I : Intensité solaire (kW/m²)
- ID : Sécheur à tunnel solaire
- IFSD : Sécheur solaire forcé indirect
- IR : Séchage par rayonnement infrarouge
- ISD : Sécheur solaire indirect
- k, g, h, k₁, k₂, k₀ : Constante de séchage (s⁻¹)
- L : Longueur (mm)
- LHCD : Sécheur à convection à air chaud de laboratoire
- LTCD : Sécheur par convection thermique de laboratoire
- M : Teneur en humidité à tout moment t (g d'eau / g de solide sec)
- M₀ : Teneur en humidité initiale (g d'eau/ g de solide sec)
- M_e : Teneur en humidité d'équilibre (g d'eau / g de solide sec)
- MBE : Erreur de biais moyenne
- MD : Sécheur à micro-ondes

Liste des abréviations

MR : Taux d'humidité
MR_c : Teneur critique en humidité
MPE : Erreur moyenne en pourcentage (%)
NaCl : Chlorure de sodium
OD : Séchoir à four
OMD : Déshydratation osmotique
OSD : Séchoir micro-ondes
P : Intensité de puissance (W/m²)
Pd : Densité de puissance (w)
PPCD, PSD : Séchoir par convection de l'usine pilote
r : Rayon du cylindre
r ou R : Coefficient de corrélation
R² ou r² : Coefficient de détermination
RH : Humidité relative (%)
RMSE : Erreur carrée moyenne racine
RRMS : Erreur quadratique moyenne (%)
SDA : Appareil de séchage monocouche
Sr : Rayonnement solaire (w/m²)
SSE : Erreur quadratique de la somme
STD : Séchage au soleil ouvert
t : Temps (s)
T : Température (°C)
T_a : Température ambiante (°C)
TCD : Sécheur à convection tunnel
Ti : Température d'entrée
TTD, TD : Séchoir à tunnel et plateau
Twb : Température d'équilibre (°C)
V : Vitesse de l'air (m/s)
V_a : Vitesse de l'air ambiant (m/s)
V_e : Volume à l'équilibre (m³)
V_o : Volume initial de l'échantillon
V_s : Volume de l'échantillon
W : Largeur (mm)
X : Direction de la dimension du matériau (m)

Liste des abréviations

χ^2 : Réduite Chi-Square

X, y : Coordonnées cartésiennes

z : Sens de l'épaisseur

Liste des figures

Figure 1. Représentation théorique du processus de séchage thermique d'un matériau alimentaire solide	5
Figure 2. Une pilote de séchage solaire	11
Figure 3. Séchage naturel au soleil Sur plateau surélevé	12
Figure 4. Séchage solaire direct sur plateau Incliné et surélevé	13
Figure 5. Séchage au soleil indirect	14
Figure 6. Exemple d'une étuve universelle ventilée XU	15
Figure 7. Structure basic d'un four microonde	17
Figure 8. Lyophilisatur pilote LPCCPLS15 et lyophilisateur de production	19
Figure 9. Allure de séchage en fonction de temps	22
Figure 10. Cinétique de séchage de haricots verts	25
Figure 11. Effet de l'humidité relative de l'air sur les courbes de séchage des feuilles de céleri à 40°C	27
Figure 12. Influence de la vitesse d'air (0,5;0,75 et 1,0 m/S) sur la vitesse de séchage d'ail ..	28
Figure 13. Effet de la vitesse de l'air sur la teneur en eau pour le bancoulier	28
Figure 14. Vitesse de séchage de banane en fonction de teneur en eau	29
Figure 15. Cinétique de séchage de cubes de carotte (d=2cm, T=50°C)	30
Figure 16. Effet de la vitesse de l'air sur la cinétique de séchage de figue à la température de l'air de 85°C	30

Liste des tableaux

Tableau 1: Modèles à couches minces pour le séchage des fruits et légumes 35

Tableau 2: Diverses mesures statiques utilisés pour évaluer la qualité de l'ajustement des modèles 36

Tableaux en Annexe

Tableau 3: Etudes menées sur la modélisation du séchage en couches minces des fruits et légumes au cours des 10 dernières années 40

Introduction

Introduction

L'alimentation est aujourd'hui perçue comme un des facteurs de santé publique et les fruits et légumes sont particulièrement recommandés. Les arguments sous-tendent les bénéfices des fruits et légumes pour la santé : une contribution importante en micronutriments nécessaires au bon fonctionnement de l'organisme, un effet protecteur contre les grandes pathologies chroniques (**Djerroud, 2010**).

La grande majorité des aliments consommés par l'homme sont d'origine biologique, dérivés soit à partir de matières végétales ou animales. Si ces aliments nourrissent l'être humain, ils peuvent aussi servir de substrats appropriés pour un certain nombre de micro-organismes impliqués dans la détérioration d'aliments. Avant de connaître l'existence de micro-organismes, les gens utilisaient des méthodes telles que le salage, fumage, chauffage, congélation ou mise en conserve pour prévenir ou inhiber la détérioration. Parmi ces méthodes, une méthode efficace et largement appliquée est de réduire la quantité d'eau de l'aliment (**Li, 2004**).

Le séchage a été l'un des processus les plus communément utilisés pour améliorer la stabilité des aliments, par la diminution de l'activité de l'eau du produit, la réduction de l'activité microbiologique et la minimisation des changements physiques et chimiques intervenant pendant le stockage (**Mayor and Sereno, 2004**).

Le produit séché réalisé minimisera le transport, le stockage, le coût de l'emballage et le temps. Bien qu'il existe de nombreuses façons dont le séchage peut être réalisées, mais le choix de la méthode dépend du matériau et le niveau sanitaire requis (**Kabiru, Joshua et Raji, 2013**).

L'étude cinétique de séchage aidera à identifier les méthodes de séchage appropriées et de contrôler les processus de séchage. Il est également important pour l'ingénierie et l'optimisation des processus. Il est parfois coûteux de mener une expérience à grande échelle pour déterminer les conditions appropriées pour le séchage. Ainsi, la cinétique de séchage est utilisée pour exprimer le processus d'élimination de l'humidité et sa relation avec les variables de processus et par conséquent, une bonne compréhension de la vitesse de séchage est important de développer un modèle de séchage (**Inyang, 2018**).

La modélisation cinétique des paramètres du processus est très utile dans les processus alimentaires. Les processus impliqués sont principalement (bio) réactions chimiques et physiques. Ces changements se déroulent à un certain taux et certaines cinétiques. La modélisation cinétique permet donc de décrire ces changements et leurs taux quantitativement. Dans la modélisation cinétique, nous avons un outil puissant qui peut aider à démêler les mécanismes de réaction de base. La compréhension des mécanismes de base est indispensable pour la modélisation de la qualité et le contrôle de la qualité (**Boekel, MAJSV et Tijskens, LMM (2001)**).

Le présent travail, consiste à apporter les principales notions sur le processus de séchage ainsi que sur les cinétiques de séchage et la modélisation dans le but de contribuer à la compréhension du séchage des fruits et légumes. Pour cette fin, on a structuré ce mémoire en deux principaux chapitres théoriques dont ;

- Le premier est consacré à évoquer les principales notions sur le séchage (sa définition, son objectif et son principe,....) ainsi que sur les différentes techniques de séchage.
- Le deuxième chapitre est consacré à l'apport des notions de base sur les cinétiques de séchage ainsi que la modélisation de ces dernières.

Chapitre 1

Séchage

I. Séchage

I.1. Historique

La conservation des denrées alimentaires par séchage est pratiquée depuis les débuts de l'histoire de la civilisation humaine. L'histoire du séchage des aliments est longue et remonte à 20 000 ans avant Jésus-Christ. Les preuves montrent que le Moyen-Orient et les cultures orientales ont activement séché les aliments dès 12 000 ans avant Jésus-Christ sous le soleil brûlant. Pendant l'âge mésolithique (environ 10 000 av. J.C.), les poissons étaient capturés et séchés par des Soliveaux, dans le sud de la France. Dans l'Égypte ancienne (vers 2800 av. J.C.), les fruits et les noix (p.ex. pommes, raisins, Abricots, figes et amandes) étaient séchés au soleil. Au moyen-âge (de 630 à 1630 J.C), le lait en poudre séché au soleil était produit par l'armée mongole, tandis que les feuilles de cacao et les fruits étaient séchés au soleil au Mexique et au Pérou (**Sabarez, 2016**).

A la fin des années 1700, les français ont mis au point avec succès une unité de déshydrations pour déshydrater les fruits et les légumes, les séchait à l'air chaud (40° C), les pressait, puis les fermait dans du papier aluminium. Cependant, ce n'est qu'au début de XXe siècle que le séchage mécanique a finalement commencé à remplacer le séchage naturel au soleil. C'est surtout à la fin de la seconde Guerre mondiale que le séchage mécanique a pris son essor (**Sabarez, 2016**).

I.2. Définition

Le séchage est l'un des moyens couramment utilisé pour la préservation des aliments en général et des fruits et légumes en particuliers (**Li, Raghvan et al., 2011**). Qui consiste à éliminer totalement ou partiellement un liquide imprégnant un matériau par apport d'énergie thermique. Il consiste en sujets d'évaporation de l'eau et de composés volatils, réduisant la croissance des micro-organismes et des réactions chimiques non désirées telles que le brunissement enzymatique afin d'augmenter la durée de vie du produit. Il aide à obtenir un produit sec et homogène à l'extrémité du séchage. (**Verdier et al., 2016**), ce qui permet de réduire considérablement la masse et le volume des produits et facilite leur transport, stockage et manutention (**Djerroud, 2010**).

I.3. Domaines d'application de séchage dans l'industrie agro-alimentaire

Une grande partie des aliments que nous consommons ont subi une opération de séchage.

Le séchage peut être une étape nécessaire à la production du produit ou un rôle dans la conservation de l'aliment. On peut citer par exemple :

- Les pâtes alimentaires ;
- La charcuterie : saucisson, jambon... ;
- Les fromages : séchage dans une ambiance contrôlée ;
- Les légumes (pois,...) et fruits secs (pruneaux, raisins, abricots...) ;
- Certains biscuits apéritifs sont produits par séchage à l'aire chaud à partir d'une pâte de maïs ;
- Le sel (gisement minier) est concassé, dissout, épuré avant d'être essoré et enfin séché jusqu'à devenir du sel raffiné ;
- La conservation de beaucoup de types de grains ou de végétaux est assurée par le séchage : café, cacao, riz et autres céréales, feuilles de thé, épices... ;
- Certains produits : lait, lactosérum... ;
- Des coproduits de l'industrie alimentaire souvent destinés à l'alimentation du bétail, ou l'industrie chimique (additifs...) : pulpe de betterave (sucrierie), tourteaux d'oléagineux (huilerie), drèches (brasserie, jus de pomme)... (**Benseddik, 2011**).

I.4. But de séchage

L'utilisation du séchage dans les industries agroalimentaire a de multiples buts :

- ✚ Prolonger la durée de conservation des produits (viandes, poissons, fruits, graines, pâtes, épices, thé, champignons) (**Alibas 2007; Zhao, An et al. 2014**) ;
- ✚ Produire des ingrédients ou des additifs pour une seconde transformation, également appelés produits alimentaires intermédiaires, par exemple des légumes pour le potage, des oignons pour la charcuterie, des fruits pour la pâtisserie, des épaississants, arômes et colorants (**Bonazzi and Bimbenet, 2013**) ;
- ✚ Inhiber de l'activité des microorganismes, des enzymes ou des ferments de la matière (**Bozin, Mimica-Dukic et al., 2008**);
- ✚ Diminuer la masse et le volume des aliments pour réduire leurs encombrements et faciliter leurs emballages et transports (**Lewicki, 1998**) ;
- ✚ Réduire les coûts de conditionnement, de stockage, de manipulation et de transport, prolonger la disponibilité en dehors des saisons et fournit un éventail de produits pour les consommateurs (**Moses et al., 2014**) ;
- ✚ Inhiber d'une part les enzymes responsables de la dégradation des polyphénols telles que, les polyphénoloxydases et d'autre part il empêche la prolifération bactérienne. (**Sacilik, 2007; Guiné, Henriques et al., 2012**) ;

- ✚ Transformation d'un aliment à une forme plus commode pour stocker, emballer, transporter et employer, par exemple transformation des liquides tels que l'extrait de lait ou de café, à une poudre sèche qui peut être reconstituée à la forme originale par l'addition de l'eau (produits instantanés) (Zeki, 2009) ;
- ✚ Donnant à un produit alimentaire souhaitable tel qu'une saveur, et texture différents etc., c.-à-d. créant un nouvel aliment (par exemple transformation des raisins aux raisins secs) (Zeki, 2009).

I.5. Principe de séchage

Le séchage est une opération consistant à retirer une partie du solvant (le plus souvent l'eau), d'un corps par vaporisation de ce solvant, le produit final dit « sec » étant obtenu sous une forme solide de taille variable, une opération de séparation thermique, dans le sens qu'il faut fournir l'énergie de vaporisation du solvant, pour qu'il quitte le produit sous forme de vapeur (Vasseur, 2009).

I.6. Mécanisme de séchage

Une représentation des phénomènes de transport se produisant pendant le séchage thermique d'un matériau alimentaire solide est illustrée à la (figure 1). Dans le séchage convectif à l'aire de matériaux alimentaires, deux mécanismes de transport distincts se produisent simultanément, impliquant le transfert de chaleur de l'aire de séchage vers le matériau alimentaire et le transport d'eau (sous forme liquide ou vapeur) de l'intérieur du produit solide vers sa surface et finalement vers l'air par évaporation (Sablani And Rahman, 2007).

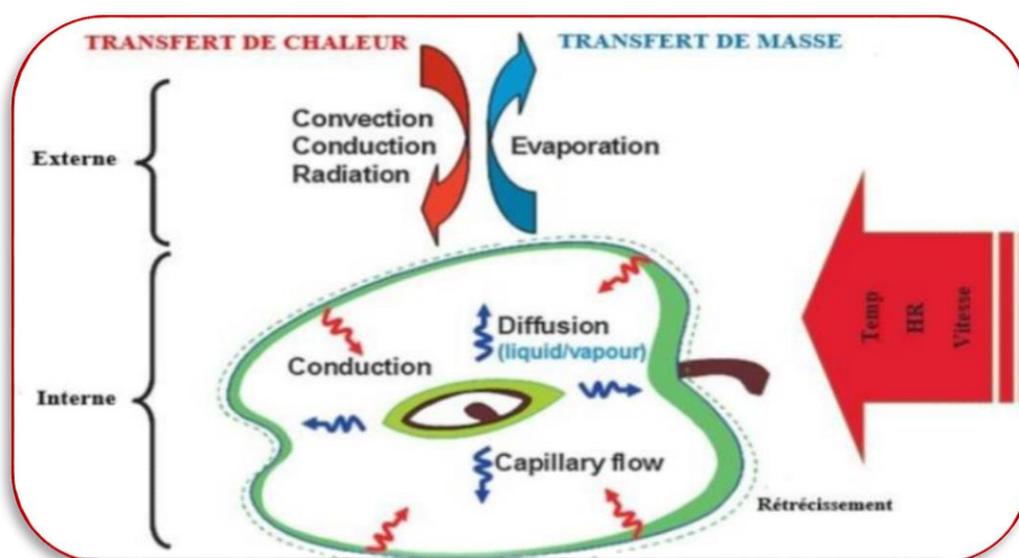


Figure 1. Représentation théorique du processus de séchage thermique d'un matériau alimentaire solide (Sabarez, 2018)

I.6.1. Transfert de chaleur

Le mécanisme de transfert de chaleur utilise généralement un mode de transfert d'énergie par conduction, convection ou rayonnement à partir d'une source de chaleur (gaz chaud ou surface métallique chauffée) vers le matériau alimentaire (**Sabarez, 2018**).

Durant le séchage, la chaleur est transférée au produit selon trois mécanismes :

✚ **Par conduction** : L'énergie thermique nécessaire au séchage est apportée non pas par un gaz en mouvement autour du produit à sécher, mais par contact direct entre le produit et une paroi chauffée. Les vapeurs libérées par le séchage sont aspirées (séchage par ébullition) ou entraînées par un gaz de balayage dont le débit est toujours faible en comparaison de celui nécessaire à un séchage convectif (**Charreau and Cavaille, 1991**).

Le flux thermique dans ce mode de transfert est donné par la relation:

$$\frac{Q}{A} = \lambda \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

Avec:

Q: débit massique de l'air (kg/s) ;

λ : Conductivité thermique de la pellicule de produit (W/m.K) ;

$\frac{dT}{dt}$: Gradient de température entre la paroi chaude et le produit ;

A : surface d'échange (m²).

✚ **Par convection** : En séchage, il s'agit probablement du mode de transfert d'énergie le plus courant. Il consiste à mettre en contact un gaz (air) s'écoulant en régime généralement turbulent autour du corps à sécher qui peut se présenter sous forme de particules, de gouttelettes, de films ou de plaques (**Charreau and Cavaille, 1991**).

Ce type de transfert obéit à l'équation suivante :

$$Q = \alpha A (T_a - T_s) \quad (2)$$

Avec :

Q: La quantité de chaleur transférée par unité de temps (W) ;

A : surface d'échange (m²) ;

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

α : coefficient d'échange par convection (W / m²· K).

✚ **Par rayonnement** : Dans ce mode de séchage, l'énergie nécessaire à l'évaporation est transmise par rayonnement. Ce procédé de séchage est très efficace pour l'élimination de

l'eau, surtout lorsque le produit à sécher n'est pas thermosensible. Les sources chaudes émettrices peuvent être des émetteurs au gaz combustible, des émetteurs électriques, ou le soleil. La quantité de chaleur Q (en watts) transmise au produit à sécher par unité de temps est définie par la loi de Stephan Boltzmann : (**Charreau and Cavaille, 1991**).

$$Q = A_1 C \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \varphi \quad (3)$$

$$C = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \quad (4)$$

Avec :

T_1 : température de la source émettrice(K) ;

T_2 : température du produit(K) ;

A_1 : surface du corps recevant le rayonnement (m²) ;

A_2 : (m²) surface de l'émetteur d'infrarouge (m²) ;

φ : facteur complexe tenant compte de la position relative de l'émetteur et du produit (lorsque l'émetteur entoure le produit, on a $\varphi = 1$) ;

ε_1 : émissivité du produit à traiter ;

ε_2 : émissivité de l'émetteur ;

I.6.2. Transfert de masse

Le transfert de masse joue un rôle très important dans les opérations unitaires de base, telles que le séchage. Dans ces opérations physiques, la résistance au transfert de masse constitue le facteur limitant, quoique le transfert de chaleur et le flux du fluide soient impliqués dans le conditionnement et la conservation où le transfert d'humidité, vapeurs, gaz et composés aromatique, influent sur la qualité de l'aliment (**Saravacos, 1995**).

Les difficultés d'application des théories de transfert de masse, dans les processus de transformation des aliments, résultent des structures physiques complexes et de la composition chimique des denrées alimentaires qui varient pour une même denrée et change pendant la transformation (**Saravacos, 1995**). Il est à noter que la migration de l'eau (liquide ou vapeur) peut également s'effectuer par « filtration » à travers le produit poreux sous l'action d'une différence de pression entre l'intérieur et la surface (**Bimbenet, 1984**).

I.7. Théories descriptives du phénomène de séchage

Plusieurs théories ont été proposées pour expliquer le phénomène de séchage, qui permet d'étudier le transfert de masse et de chaleur dans un produit. Ces approches théoriques peuvent être classifiées comme suit :

- **Théorie de la diffusion du liquide (Modèle de Sherwood) (1929)**

Cette théorie suppose que le mouvement de l'eau vers la surface du solide est gouverné par la loi de Fick, qui traduit le phénomène de migration de la vapeur d'eau du milieu de forte concentration d'eau vers le milieu de faible concentration d'eau (A. Bondil, J. Hrabovsky). Autrement dit, du sein de la matière à sécher vers sa surface, Puis à la surface on assiste à l'évaporation due à un apport énergétique extérieur.

Cette théorie donne satisfaction pour le séchage des aliments et des grains, ce qui n'est pas le cas pour les autres produits. Elle est critiquée pour sa faible représentation des phénomènes physiques, en la simple différence de concentration et de négliger par exemple le gradient de température dans le solide, ou de mettre le coefficient de diffusion constant, ce qui n'est pas valable pour tous les produits (Charreau and Cavaille, 1991), (Bimbenet, 1984).

- **Théorie capillaire (1937) (Charreau and Cavaille, 1991), (Daoued, 2004)**

Cette théorie repose sur le fait que le mouvement de l'eau dans les pores résulte d'un potentiel de succion, dont le mécanisme a notamment été étudié par Jurin. Lorsqu'on place un capillaire dans une cuve remplie d'eau, on observe une élévation du liquide dans le tube par rapport au niveau de la cuve. Cette théorie est appliquée à des produits poreux ou à des produits granulaires. Ceaglske et Hougén démontrent que pour le séchage d'un solide granulaire, l'écoulement de l'eau est entièrement dû aux forces capillaires, et totalement indépendantes de la concentration (Bennamoun, 2001).

- **Théorie whitaker (1977)**

Whitaker propose une nouvelle façon d'écrire les équations de transfert de chaleur et de la masse dans les milieux poreux. Il applique un système d'équations de conservation de chaleur et de masse, pour les trois phases contenues dans le milieu (solides, liquides et gaz) et les lois de la thermodynamique. Ensuite il applique pour chacune de phase la prise de moyenne avec certaines simplifications, en prenant un volume élémentaire représentatif à l'échelle des pores ; ces paramètres permettent de considérer le milieu poreux comme un milieu continu équivalent. Il aboutit à un système d'équations permettant de calculer les différents paramètres décrivant le séchage. Cette étude peut être considérée comme le point de départ de nouvelles et modernes théories, puisqu'elle donne une très bonne concordance avec les résultats expérimentaux (Whitaker, 1980).

- **Théorie de Luikov (1934)**

Luikov découvre le phénomène de la diffusion thermique de l'humidité. Il propose que le gradient de température soit l'un des facteurs causant le transfert de l'humidité. Il s'est basé

sur l'utilisation des équations fondamentales de la thermodynamique, et le processus de l'irréversibilité pour vérifier que le transfert de la vapeur et du liquide est divisé en deux parties : un gradient de concentration et un gradient de température (**Bennamoun, 2001**).

- **Théorie de Krischer-Berger et Pei (1938)**

Krischer, suppose que pendant le séchage, l'humidité dans l'état liquide est due aux forces capillaires, et dans l'état vapeur au gradient de concentration de la vapeur.

Berger et Pei proposent que le transfert du liquide soit dû aux forces capillarité et au gradient de concentration, et la diffusion de vapeur est due au gradient de pression de la vapeur (**Bennamoun, 2001**).

- **Théorie de Philip et De Vries (1957)**

Philip et De Vries, proposent que le mouvement de l'eau soit dû à la capillarité et à la diffusion de la vapeur. Cette théorie est basée sur le développement d'un système d'équations décrivant l'humidité et le transfert de chaleur dans les matériaux poreux (**Mihoubi, 2004**).

I.8. Phénomènes qui se produisant au cours du séchage

Les interactions entre l'eau et les autres constituants dépendent de la mobilité de l'eau et des solutés, entraînant des réactions, des transformations physiques, des phénomènes mécaniques lors du séchage, du stockage et la consommation.

- **Réaction biochimique**

Il s'agit des réactions de Maillard, de l'oxydation de vitamines et de matières grasses, de la dénaturation des protéines, de réactions enzymatiques,... etc (**Bonazzi and Bimbenet, 2003**).

- **Phénomènes mécaniques**

L'opération du séchage doit être menée de telle façon que la qualité du produit soit préservé à la fin de l'opération. La majorité des produits agroalimentaires sont modifiés par le séchage causé des phénomènes mécaniques qui se produise au cours de cette opération et parmi ces phénomènes on trouve (**Bonazzi, Dumoulin and Bimbenet, 2008**).

- ✓ Les phénomènes de migration de solutés vers la surface;
- ✓ Migration de matière Grasse;
- ✓ Le croustissage, les fissures;
- ✓ Les déformations.

• Transfert physique

Il s'agit de la diminution de l'activité de l'eau, transition vitreuse, fusion de la matière grasse, l'évaporation de constituants volatils, migration ou rétention de constituants volatils (**Bonazzi and Bimbenet, 2008**).

I.9. Avantages et inconvénients du séchage**I.9.1. Avantages**

Les principaux avantages du procédé de séchage sont (**Fournier, 2003**):

- ✓ La simplicité de la méthode avec généralement un bon rendement ;
- ✓ L'universalité du procédé, accessible à tous, y compris pour les particuliers ;
- ✓ Une durée de conservation des aliments déshydratés qui peut être de plusieurs mois ;
- ✓ La désactivation des enzymes responsables de la dégradation des aliments ;
- ✓ L'inhibition de la croissance des micro-organismes grâce à la réduction de l'activité d'eau ;
- ✓ Sa capacité à être utilisée à des fins commerciales permettant de limiter les pertes de récoltes ;
- ✓ La diminution des coûts financiers et environnementaux liés au transport des marchandises en raison de la réduction massique.

I.9.2. Inconvénients du séchage

Ounissi (2009) résumant les inconvénients du séchage :

- ✓ Perte de vitamine A (3% pour les légumes) après 6 mois de conservation ;
- ✓ Altération de la vitamine B1 (10 à 20 %) ;
- ✓ Perte de la vitamine C (35%) ;
- ✓ Insolubilisations des protéines entraînant le goût de cuit ;
- ✓ Migration des constituants solubles ;
- ✓ Formation d'une couche gommeuse imperméable suite à un séchage rapide ;
- ✓ Concentration de la coloration ;
- ✓ Réaction de Maillard (brunissement) suite à une surchauffe ;
- ✓ Coût énergétique élevé (**Brennan, 2006**).

II. Méthodes de séchage

Le séchage est une opération de transfert couplé de chaleur et de masse pour laquelle il est nécessaire de fournir de l'énergie. Plusieurs types de séchoirs et de méthodes de séchage, ont été adaptés à différentes situations.

II.1. Méthodes thermiques

Le séchage thermique est un processus dont la chaleur est principalement employée pour enlever l'eau des aliments. Les mécanismes du transfert d'humidité dépendent principalement des types d'aliment et du processus de séchage (**Rahman, 2007**). Il a été identifié comme une opération d'unité importante, car il consomme d'énergie et il a un effet décisif sur la qualité de la plupart des produits (**Mujumdar, 2007**).

II.1.1. Séchage solaire

Il y a plusieurs types de séchoirs solaires (Figure 2) développés pour servir les divers buts de sécher des produits agro-alimentaires selon le besoin local et la disponibilité. On peut classer les séchoirs suivant la façon, dont ils utilisent le rayonnement solaire, en séchoirs naturels, séchoirs directs et séchoirs indirects (**Yves, 2007**).



Figure 2. Une pilote de séchage solaire (**Aware and Thorat, 2012**)

a. Séchage naturel

Le séchage au soleil s'est largement développé dans les zones arides ou semi-arides qui présentent des conditions climatiques optimales : une saison sèche avec un fort ensoleillement, une faible pluviométrie, une hygrométrie peu élevée (**Dudez, 1996**).

- **Principe**

Le séchage s'effectue à même le sol, sur des nattes, sur des rochers plats, ou bien sur les toits des maisons (**Dudez, 1996**). Ces séchoirs (Figure 3) sont très bon marché, mais nécessitent une intervention humaine régulière, protection ou ramassage du produit en cas de pluie, malaxage fréquent, pour éviter la surchauffe de la couche supérieure et homogénéiser le produit pour permettre à la couche inférieure de sécher. Ce type de séchoir est souvent traditionnel dans les

communautés paysannes, pour répondre aux problèmes de la conservation temporaire du produit, en attendant la vente ou la consommation (Yves, 2007).

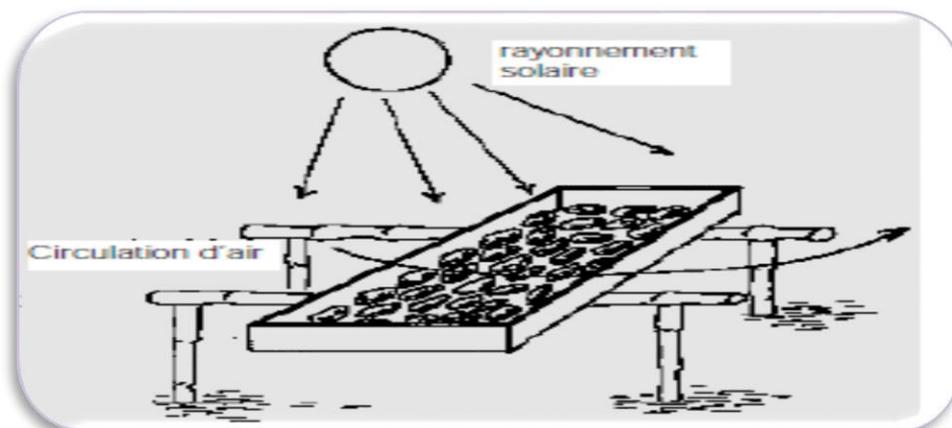


Figure 3. Séchage naturel au soleil Sur plateau surélevé (Dudez, 1996)

- **Avantages**

- Séchage plus rapide par rapport aux techniques traditionnelles ;
- Meilleure protection contre la poussière, les insectes, les animaux mais les produits restent à l'air libre, exposés aux mouches ;
- Matériel constructible par le producteur lui-même ;
- Très faible coût du matériel (Dudez, 1996).

- **Inconvénients**

- Pertes du produit mal séché ou gâchés lors de remuage ;
- Destruction de vitamines A et C, par l'exposition directe au soleil, dégradation par les intempéries et les nuisibles (insectes, rats, poussières) (Yves, 2007) ;
- Aucun contrôle du processus. La rapidité du séchage est fonction des conditions climatiques ;
- Séchage rarement inférieur à un jour. La nuit le produit peut reprendre de l'humidité de l'air et s'exposer au développement des moisissures ;
- Besoin conséquent en main-d'œuvre pour retourner le produit et manipuler les plateaux (Dudez, 1996).

b. Séchage direct au soleil

Le séchage au soleil direct est une technique de conservation plus ancienne des produits agricoles. Elle est largement pratiquée dans les régions tropicales et subtropicales (Janjai and Bala, 2012) Par définition, les rayons du soleil frappent directement les séchoirs. Ce sont des

appareils simples et rustiques d'un châssis vitré, sous lequel les produits à sécher sont des clayettes (**Boussalia, 2010**).

- **Principe**

Le séchoir solaire direct (Figure 4) se compose d'une seule pièce qui fait office à la fois de chambre de séchage et de collecteur solaire. Le fond de la chambre de séchage est peint en noir pour augmenter la capacité d'absorption de la chaleur. Une feuille de plastique en polyéthylène transparent sert généralement de toit mais on peut également utiliser d'autres matériaux plus chers comme le verre ou les plastiques spéciaux. La durée de séchage des fruits et légumes avec le séchoir solaire direct varie de quelques heures à 4 jours suivant les conditions climatiques (**Dudez, 1996**).

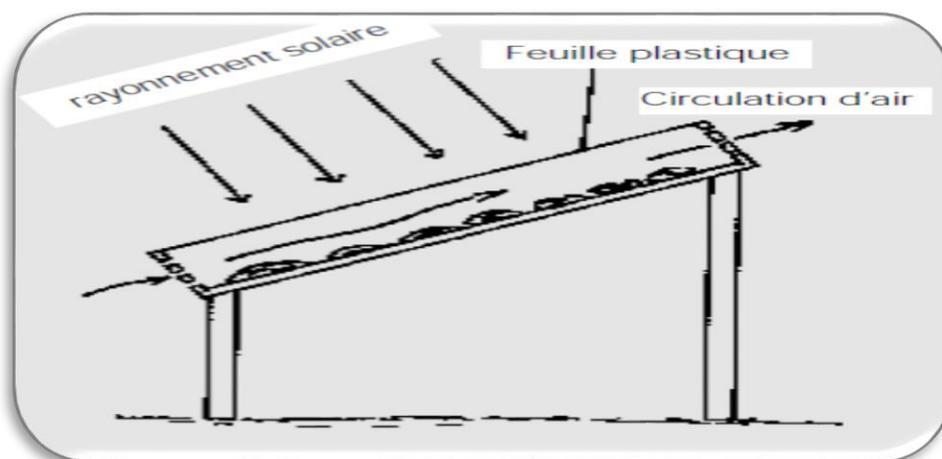


Figure 4. Séchage solaire direct sur plateau Incliné et surélevé (Dudez, 1996)

- **Avantages**

- Les produits sont mieux protégés de l'attaque des mouches et autres insectes ; (**Yves, 2007**) ;
- Pas besoin de main-d'œuvre qualifiée (**Sodani et al., 2008**);
- Grandes possibilités de conception : séchoir coffre, tente, cabane, coquillage ;

- **Inconvénients**

- Dégradation de la qualité par exposition directe au soleil : destruction de la vitamine A et C, flétrissement, décoloration (**Madhlope et al., 2001**) ;
- Faible productivité : 5 à 10 kg de produits frais/m² ;
- Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement (**Dudez, 1996**) ;
- Faible circulation de l'air qui limite la vitesse du séchage et augmente les risques de moisissures (**Boughali, 2010**).

c. Séchage indirect au soleil

Les produits à sécher ne sont pas exposés directement au rayonnement solaire. Ils sont disposés sur des claies à l'intérieur d'une enceinte ou d'un local en rapport avec l'importance des quantités à sécher clayettes (**Boussalia, 2010**).

- **Principe**

Le séchoir solaire indirect (Figure 5) se compose de deux parties : un collecteur qui convertit le rayonnement solaire en chaleur, une chambre de séchage qui contient le produit.

L'air pénètre dans le collecteur ; il est chauffé, sa température augmente. L'air chaud monte par convection naturelle jusqu'à la chambre de séchage. La durée de séchage est très variable selon les conditions climatiques et la ventilation du séchoir (**Dudez, 1996**).

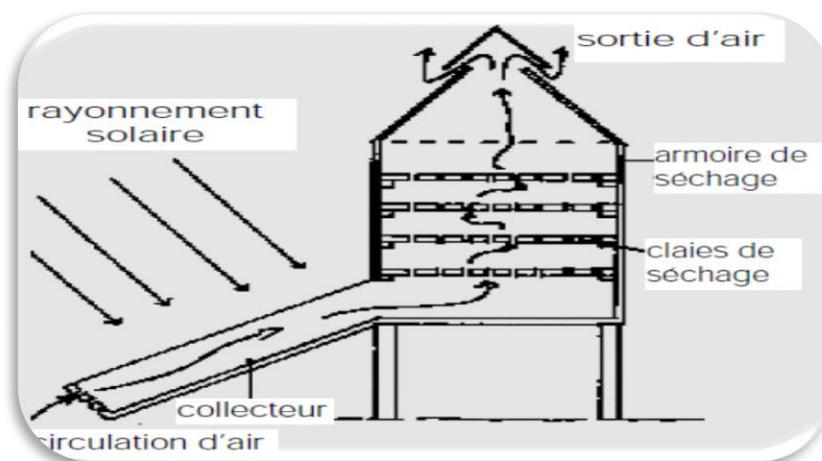


Figure 5. Séchage au soleil indirect (**Dudez, 1996**)

- **Avantages**

- Le produit n'est pas exposé directement au soleil, Il conserve mieux sa couleur et sa valeur nutritionnelle (notamment les vitamines A et C) ;
- Les produits séchés avec ce matériel doivent donc être vendus à un prix élevé pour couvrir ces frais ;
- Chaleur moins destructrice que le chauffage direct (**Dudez, 1996**).

- **Inconvénients**

- Rapidité du séchage très variable suivant les conditions climatiques et la conception du séchoir;
- Coût important (**Belachi et al., 2009**);
- Fragilité des matières en polyéthylène qu'il faut changer régulièrement ;
- Conception et construction nécessitant une personne qualifiée ;
- Formation nécessaire du personnel (**Dudez, 1996**).

II.1.2. Séchage à air chaud

Actuellement, la plupart des fruits et des légumes sont déshydratés par la technique du séchage à l'air chaud, qui est souvent la plus simple et la plus économique. Le séchage alimentaire par air chaud est une méthode conventionnelle, qui utilise l'air chaud comme moyen pour éliminer l'humidité de produit solide. Lors de séchage par air chaud la température de l'eau liquide présente dans le produit devient plus élevée, ce qui provoque l'apparition d'un gradient de pression entre l'intérieur et la surface de produit, ce qui conduit l'humidité vers les surfaces d'échange (Tham *et al.*, 2014).

a. Séchage par étuve

Le séchage à l'étuve (Figure 6) est la façon la plus simple pour sécher les aliments, parce qu'il n'a pas besoin d'équipement spécial. C'est un moyen de déshydratation plus rapide que le séchage au soleil, mais il ne peut être utilisé que sur une petite échelle. Un four de cuisine ordinaire peut être utilisé. Il faut préciser la consigne de température de l'étuve, le temps de séjour et la taille de l'échantillon testé. Même si cette taille n'est pas en générale critique, le temps de séjour dans l'étuve doit être adapté au rapport surface/volume. La meilleure durée est « jusqu'à poids Constant » pour atteindre la masse sèche. La perte de poids est calculée par la différence de pesée avant et après séchage. L'air présent dans l'étuve peut être augmenté par la vapeur émise par les échantillons séchés en fonction du renouvellement de l'atmosphère interne de l'étuve c'est pour cela les étuves ventilées sont les meilleures et les plus utilisées (Jean *et al.*, 2009).



Figure 6. Exemple d'une étuve universelle ventilée XU

- **Principe**

Le principe du séchage par convection à l'air chaud est basé sur le transfert de chaleur conventionnel de l'air chaud aux matériaux à sécher. L'air chaud est forcé à travers les matériaux et stimule le processus de diffusion de l'humidité qui entraîne le séchage. Cette méthode a été largement utilisée dans l'industrie (**Kumar, Tiwari et al., 2015**).

- **Avantages**

Ce type de séchage présente plusieurs avantages (**Ayad et bouharoun, 2015**) :

- Il est simple et relativement facile à utiliser ;
- La température du séchage peut être contrôlée ;
- La teneur en eau du produit sec est inférieure à 10% et son contrôle est facile ;
- La rapidité et la facilité sont aussi des caractéristiques non négligeables.

- **Inconvénients**

- Cette méthode de séchage présente un rendement énergétique intrinsèquement faible avec un impact prononcé sur la dégradation thermique des propriétés fonctionnelles et nutritionnelles causée par un temps de séchage long et inadéquat, ou une exposition du produit à des températures excessives (**Sabarez, 2016**).
- L'opération pourrait facilement aboutir à un retrait considérable du produit (principalement au début de l'opération) et à une perte notable de la qualité nutritionnelle (en fin de l'opération en raison du temps de séchage généralement important) (**Ratti, 2009**).

b. Séchage par four microonde

Le séchage par four micro-onde est une technique de déshydratation rapide qui peut être appliqué à des aliments spécifiques. Les préoccupations croissantes sur les coûts, la qualité des produits et de la production ont incité les chercheurs à étudier et l'industrie à adopter la technologie de séchage par micro-onde (**Haghi and Amanifard, 2008**). Le terme micro-onde se réfère à un rayonnement électromagnétique dans la gamme de fréquences de 300MHz à 300GHz avec une longueur d'onde de 1m à 1mm (**Feng et al., 2012**).

Le four à micro-ondes (Figure 7) se compose généralement des éléments de base suivants (**Mathavi et al., 2013**).

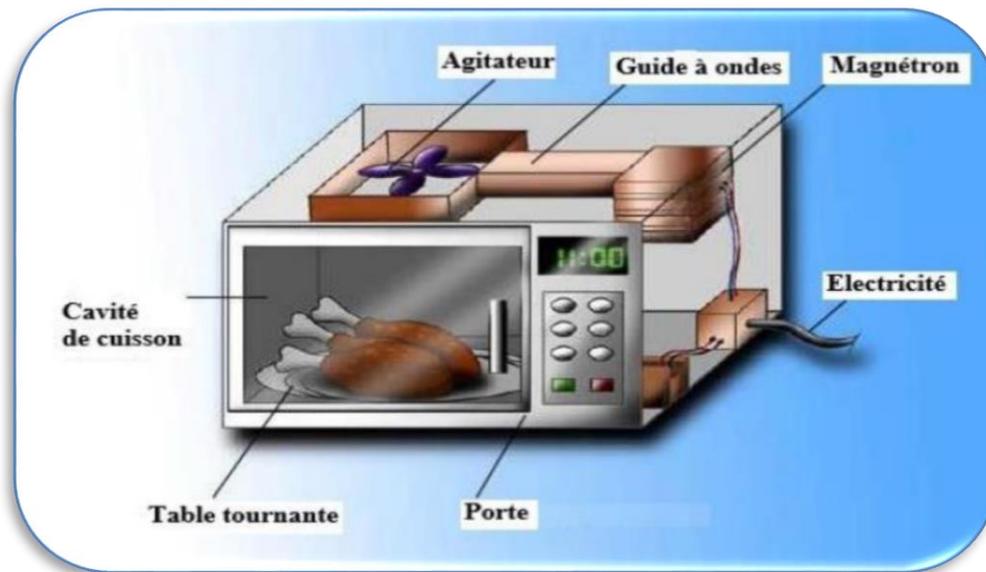


Figure 7. Structure basic d'un four microonde (Mathavi ey al., 2013)

- **Alimentation et contrôle** : il contrôle la puissance à fournir au magnétron ainsi que le temps de cuisson.
- **Magnétron** : c'est un tube à vide dans lequel l'énergie électrique est convertie en un champ électromagnétique oscillant. Une fréquence de 2450 MHz a été réservée pour les fours à micro-ondes à usage domestique.
- **Guide d'ondes** : c'est un tube métallique rectangulaire qui dirige les micro-ondes générées par le magnétron vers la cavité de cuisson. Il aide à prévenir l'exposition directe du magnétron à tout aliment éclaboussant qui pourrait interférer avec le fonctionnement du magnétron.
- **Agitateur** : il est couramment utilisé pour distribuer les micro-ondes à partir du guide d'ondes et permettre un chauffage plus uniforme des aliments.
- **Plateau tournant** : il fait tourner les produits alimentaires à travers les points chauds et froids fixes à l'intérieur de la cavité de cuisson et permet aux produits alimentaires d'être exposés de manière uniforme aux micro-ondes.
- **Cavité de cuisson** : c'est un espace à l'intérieur duquel les aliments sont chauffés lorsqu'ils sont exposés aux micro-ondes.
- **Porte et étrangleur** : il permet l'accès des aliments à la cavité de cuisson. La porte et le starter sont spécialement conçus pour empêcher les fuites de micro-ondes à travers l'espace entre la porte et la cavité de cuisson.

- **Principe**

Pendant le séchage par micro-ondes, la chaleur est générée par transformation directe l'énergie électromagnétique en énergie moléculaire cinétique, la chaleur est ainsi générée à l'intérieur de matériau (**Changrue, 2006**). L'énergie des micro-ondes est capable de polariser des substances. Les électrons de la substance polarisée étaient en mouvement en raison de la conversion de l'énergie électromagnétique incorporée dans la substance en énergie cinétique. Les électrons se bousculent au cours de ce mouvement d'électrons et leur énergie est convertie en énergie thermique à la suite de frictions ainsi, l'humidité a été éliminée du produit lors du séchage aux micro-ondes (**Arikan, Ayhan et al., 2011**).

- **Avantages**

Les avantages de séchage par microonde sont rassemblés dans l'article de (**Changrue, 2006**).

- Chauffage rapide et volumétrique ;
- Taux de séchage plus élevé ;
- Temps de séchage court ;
- Améliorer la qualité du produit ;
- Réduction de la consommation d'énergie ;
- Coûts d'exploitation réduits.

- **Inconvénients**

- Le cout élevé par unité d'énergie par rapport à l'énergie conventionnelle et le cout initial élevé de l'équipement limite l'utilisation des micro-ondes pour le séchage (**Mujumdar, 2006**).

II.2. Méthode non thermique(Lyophilisation)

La lyophilisation est un procédé de déshydratation à température suffisamment basse qui offre des produits déshydratés de haute qualité et permet une meilleure consommation des constituants de base des produits (**Mahacine et al., 2007**). Cette technique permet de conserver à la fois le volume et l'aspect du produit traité (**Coulibaly et al., 2011**).

- **Principe**

Cette technique consiste à ôter l'eau d'un produit liquide, pâteux ou solide, à l'aide de l'action combinée du froid et du vide (**Coulibaly et al., 2011**). La perte en eau est principalement obtenue en sublimant la glace sous pression réduite ; il y a alors passage direct de l'état solide à l'état gazeux. Un cycle de lyophilisation se divise en trois étapes : la congélation, ou les

produits sont réfrigérés à des températures comprise entre $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$. La congélation peut-être réalisée en dehors du lyophilisateur (c'est le cas nombreuses applications industrielles), la dessiccation primaire qui est réalisée sous vide. C'est l'étape pendant laquelle une partie de l'eau congelée se sublime (pas d'eau en phase liquide) et la dessiccation secondaire, qui permet d'extraire par désorption les molécules d'eau, durant cette phase, les produits peuvent être chauffés jusqu'à des températures positives. À la fin du cycle, le produit ne contient plus que 1% à 5% d'eau, ce qui est extrêmement faible. Si l'activité de l'eau est inférieure à 0,4 et supérieure à 0,2, elle assure souvent une bonne préservation de la matière. C'est un procédé de conservation permettant de préserver des denrées alimentaires périssables et des substances biologiques et chimiques dites fragiles (Nguyen, 2015). Exemple d'un Lyophilisateur pilote LPCCPLS15 et lyophilisateur de production voir (Figure 8) (Cryotec, 2015).



Figure 8. Lyophilisateur pilote LPCCPLS15 et lyophilisateur de production (Cryotec, 2015)

- **Avantages**
 - Dégradation thermique minimale ;
 - Réhydratation rapide ;
 - Stabilité dimensionnelle ;
 - Poids réduit par unité de volume ;
 - Bon aspect en général, rétention des qualités nutritives (Mebarki and Zoiani, 2017).
- **Inconvénients**
 - fragilité, voluminosité ;
 - facilité d'oxydation ;
 - prix de revient élevé (Mebarki and Zoiani, 2017).

Chapitre 2

Cinétiques de séchage

et modélisation

I. Cinétiques de séchage

I.1. Cinétique de séchage des produits agro-alimentaires

Étant données les très grandes variabilités et diversité des produits alimentaires et biologiques, le meilleur moyen de caractériser le comportement au séchage d'un produit consiste à mesurer expérimentalement sa cinétique de séchage (**Bonazzi and Bimbenet, 2003**).

I.2. Pré traitements des produits avant séchage

- ✓ **Découpage** : Le découpage facilite le séchage de certains produits (ex : bananes découpées en rondelles), ce qui réduit le temps nécessaire à la diffusion de l'eau et augmente la surface totale d'évaporation. Cette opération est indispensable pour tous les produits épais, sinon le séchage se fait trop lentement (**Geres, 1997**).
- ✓ **Blanchiment** : C'est un bref pré cuisson à l'eau ou à la vapeur. Nous utilisons le blanchiment pour la stabilité physico-chimique ultérieure des produits végétaux (**Cheftel and Cheftel, 1976**).

Le blanchiment permet :

- D'attendrir le produit, de réduire les réactions d'oxydation et d'éviter le brunissement;
- La destruction des enzymes responsables des altérations, en particulier de l'amélioration de la cinétique de séchage par l'augmentation des durées de blanchiment et la réduction du temps de séchage de 10 à 20 % (**Senhadji et al., 1991**).
- L'inactivation des enzymes alternant les tissus superficiels par l'action de la vapeur. (**Allaf et al., 1991**).

I.3. Analyse critique des modèles de cinétique et périodes du séchage

Les mécanismes de séchage comportent le chauffage et la vaporisation de l'eau à la surface d'échange, et le transport de la vapeur vers le milieu environnant. Le séchage est aussi un transfert de chaleur par conduction couplé à un transfert d'eau sous des forces capillaires et de la diffusion interne à la fois du liquide et de la vapeur dans le produit (**Changrue, 2006**).

Quelle que soit la nature du produit et l'opération de séchage adoptée, l'étude expérimentale de la cinétique consiste à placer le produit dans un courant d'air parfaitement maîtrisé en termes de température, humidité et vitesse et à noter le changement de sa masse au cours du temps par des pesées à intervalles de temps réguliers. D'autres techniques sont envisageables (analyse de l'humidité résiduelle dans le produit ou l'humidité de l'air sortant notamment) (**Kemp et al., 2001**).

D'après **Rizvi (2005)**, dans les aliments, où le mouvement du liquide est contrôlé par la capillarité et les forces de gravité, l'existence d'une phase constante a été constatée. Avec les

aliments structurés, le mouvement du liquide est contrôlé par diffusion, et l'eau qui est donc évaporée de la surface n'est pas immédiatement « réapprovisionnée » par le mouvement du liquide à l'intérieur de l'aliment. Ces aliments ne présentent pas de phase à vitesse constante.

La cinétique de séchage est généralement étudiée à travers les courbes exprimant :

- ✚ La teneur en humidité W_d en fonction de temps : $W_d=f(t)$.
 - ✚ La vitesse de séchage $-dw_d/dt$ en fonction de temps : $-dw_d/dt=f(t)$.
 - ✚ Et vitesse de séchage $-dw_d/dt$ en fonction de la teneur en humidité : $-dw_d/dt=f(W_d)$
- (Bonazzi and Bimbenet, 2003).

I.3.1. Périodes de séchage

Tous les travaux de séchage montrent que les courbes de la vitesse de séchage en fonction de temps se distinguent suivants la nature de produit. Mais d'une manière générale on remarque que l'allure de séchage décompose en trois période principales (Figure 9) (Mouafki, 2004).

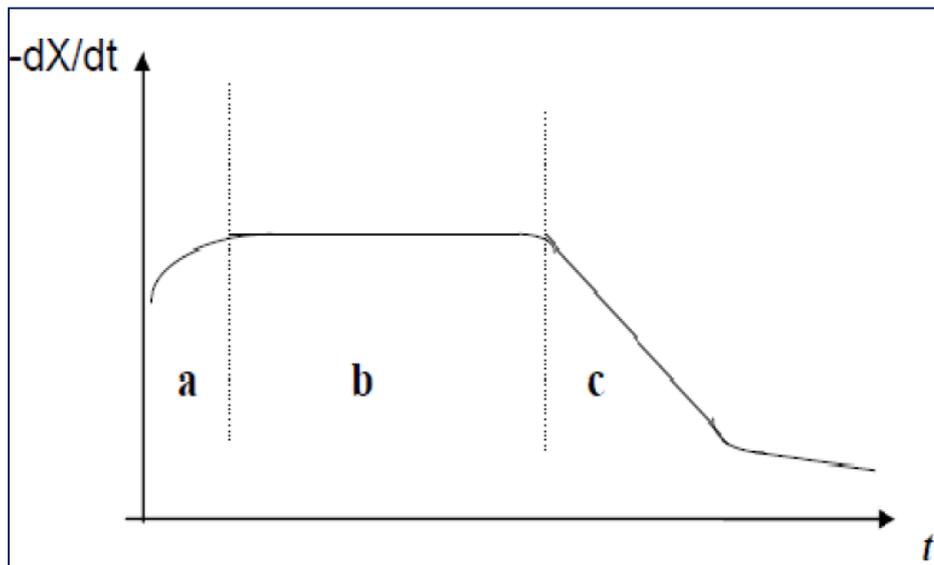


Figure 9. Allure de séchage en fonction de temps

Phase 0 : Période de mise en température :

Dans cette période, l'humidité du produit varie mais pas sensiblement et leur température varie (croît ou décroît) jusqu'à la température humide.

Phase I : Période à vitesse de séchage constante :

Dans cette période, la vitesse de séchage reste à peu près constante pour la plupart des produits. L'humidité se déplace vers la surface à l'état liquide principalement sous l'effet de la température de bulbe humide; l'activité de l'eau à la surface du produit est alors égale à 1 et le séchage est dit isenthalpique.

Pour cette période, le flux de chaleur entrant est égal aux flux nécessaire à l'évaporation de l'eau sortant du produit (**Mouafki, 2004**).

Phase II: Période à vitesse de séchage décroissante :

C'est la période à vitesse de séchage décroissante. Le ralentissement de l'allure de séchage est expliqué par les phénomènes suivants :

- ✚ **Disparition de l'eau libre en surface du produit** : Ce phénomène correspond au début du ralentissement de l'allure de séchage. En admettant que la migration de l'eau libre et de l'eau liée contenues dans le produit s'effectuent consécutivement sous forme liquide et vapeur, il faut envisager l'existence d'un front de vaporisation qui s'enfonce progressivement à l'intérieur du produit.
- ✚ **L'épaisseur du produit** : Si cette épaisseur est de plus en plus croissante, cela signifie que la vapeur d'eau doit traverser un parcours plus long expliquant ainsi et en grande partie le ralentissement de l'allure de séchage.
- ✚ **La diffusivité de l'eau dans le produit** : Elle varie avec la teneur du produit en eau. Plus ce dernier est sec, moins il devient perméable à l'eau.
- ✚ **La résistance mécanique de parois cellulaires intactes** : Les parois cellulaires intactes empêchent la vapeur d'eau de passer en grande quantité à l'extérieur du produit.
- ✚ **Le croutage** : Certains composés solubles notamment les sucres et les sels accompagnent l'eau évaporée pendant la période à allure constante (phase I) et sont déposés à la surface. Ce phénomène appelé croutage est à l'origine de fortes concentrations en surface de ces composés solubles qui bouchent les pores du produit. L'accumulation et l'assèchement de ces solutés rendent imperméables la surface du produit (**Touati, 2001**).

I.3.2. Analyse cinétique

Dans le cas de nombreux produits alimentaires et biologiques, la période de séchage à vitesse constante n'existe généralement pas. La présence presque systématique d'un grand phénomène de retrait, mais également d'une diffusion interne le plus souvent intervenant comme processus limitant dès que le séchage lié à la simple surface a lieu. Notons donc, enfin, que la période de séchage à vitesse décroissante est souvent divisée en plusieurs sous-périodes, qui correspondent à des changements dans les processus gérant l'opération de séchage.

Baker (1997) constate que de nombreux aliments et produits agricoles n'affichent pas une phase à vitesse constante, même si le taux de transfert interne de chaleur et de masse détermine la vitesse à laquelle l'eau est disponible à la surface d'évaporation exposée.

L'analyse et la modélisation de la cinétique de séchage à travers l'étude des courbes de séchage que nous avons généralement eu à étudier ont en premier lieu nécessité de s'assurer que :

- Les transferts externes ne soient nullement les processus limitant ; il a fallu ainsi s'assurer que la vitesse de l'air de séchage était assez grande, que son humidité assez faible et que la température assez élevée pour que ces transferts soient à cinétique nettement supérieure à celle des processus internes,

- La température de l'air ne soit assez élevée au risque d'induire une grande dégradation thermique de la surface d'échange, et surtout d'aboutir à une diminution drastique de l'activité de l'eau à la surface,

- La diffusivité thermique (par conduction effective) au sein de la matière soit nettement plus grande que la diffusivité de l'eau liquide au sein du milieu poreux que représente la plante (**Albitar, 2010**).

I.4. Facteurs qui affectent la cinétique de séchage

Le séchage de produits alimentaires tels que les fruits et légumes est fortement influencé par les facteurs suivants : temps de séchage, température de séchage, humidité relative de l'air, débit d'air, taille de la surface (épaisseur de matériau), volume et pression locale ou partielle (**Chayjan, 2012**).

Pendant le processus de séchage, la vitesse de l'air et l'humidité relative sont les facteurs les moins importantes qui affectent la cinétique de séchage des fruits et légumes, tandis que la température et l'épaisseur sont les facteurs qui affectent le plus la cinétique de séchage en couche mince des fruits et légumes (**Gacula and Singh, 1984**).

I.4.1. Influence de la température de l'air

La température de l'air asséchant influe considérablement sur la vitesse de séchage, Cette Influence est due à l'apport de chaleur au produit qui croît avec la température de l'air, Elle est aussi due à la température du produit qui est d'autant plus importante que la température de l'air élevée. Par conséquent, les conductivités de l'eau dans le produit deviennent importantes. (**Touati, 2001**)

L'effet de la température de l'air de séchage a été étudié par de nombreux chercheurs, par exemple pour le champignon (Kulshreshtha et al, 2009), le haricot vert (Doymaz, 2005) (Figure 10), différents légumes (Krokida et al, 2003), Ces auteurs ont constaté que le temps de séchage diminuait avec l'augmentation de la température de séchage (Nguyen, 2015).

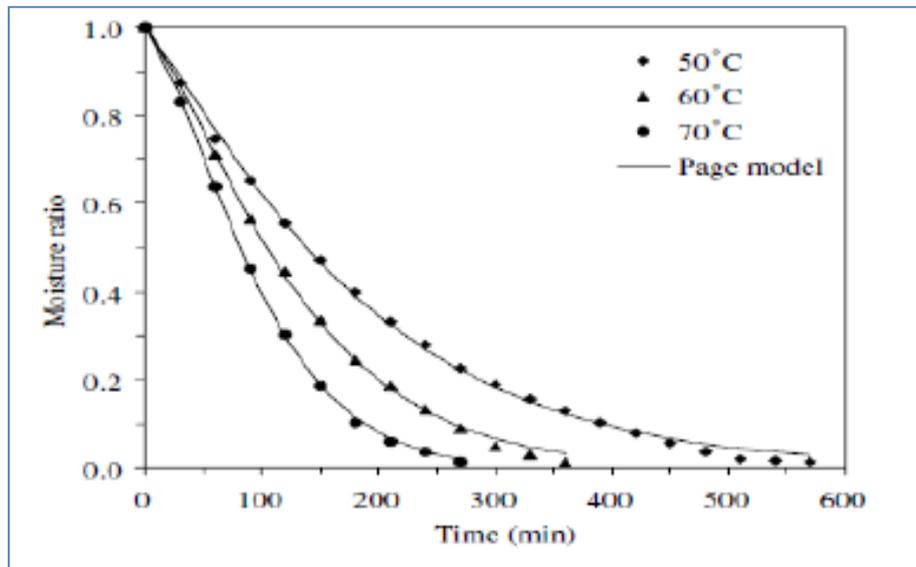


Figure 10. Cinétique de séchage de haricots verts (Doymaz, 2005)

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

❖ **Température sèche :**

La température sèche ou la température de bulbe sec T est celle qui est indiquée par un thermomètre dont l'élément sensible, le bulbe est parfaitement sec, le thermomètre étant placé dans l'air.

❖ **Température humide T_h :**

C'est la température d'équilibre d'une masse d'eau s'évaporant dans l'air. De façon pratique c'est la température indiquée par un thermomètre dont le bulbe est entouré d'un coton hydrophile humidifié, ce thermomètre est placé dans un flux d'air relativement rapide.

❖ **Température de rosée T_r :**

C'est la température à laquelle la vapeur d'eau contenue dans l'air humide, la pression de saturation de la vapeur est constante si la température ne varie pas.

❖ **Température de saturation adiabatique T_{sa} :**

La température de saturation adiabatique correspond à la température atteinte par le gaz vecteur sortant, saturé en vapeur du liquide, d'une enceinte adiabatique contenant le liquide à la température T (**Degla and Sioued, 2015**).

I.4.2. Influence de l'humidité de l'air

L'humidité relative d'un solide, ou bien teneur en eau à base humide se définit comme la masse d'eau contenue dans le produit par rapport la masse humide de ce produit (**Degla and Sioued, 2015**).

$$X_r = \frac{M_h - M_s}{M_h} \quad (5)$$

Avec :

X_r : Teneur en eau à base humide kg eau / kg mh.

M_h : Masse humide du produit Kg .

M_s : Masse de produit sec Kg.

La quantité d'humidité dans l'air est bien connue pour affecter la cinétique de la perte d'humidité pendant le séchage à l'air des aliments. Dans un sens thermodynamique, la diminution de la quantité d'humidité dans l'air de séchage augmente le potentiel de l'air de séchage à capter et à éliminer l'humidité du produit. (**Sabarez, 2018**)

L'humidité relative, joue un rôle important sur le comportement des cinétiques de séchage de certains produits, il semble que cette influence est plus importante au début de séchage et diminue lorsque la température de l'air augmente. (**Touati, 2001**), Une diminution de l'humidité relative entraîne une diminution du temps de séchage et une accélération du processus de séchage (**Nguyen, 2015**). La Figure 11 Montre un exemple de ce comportement.

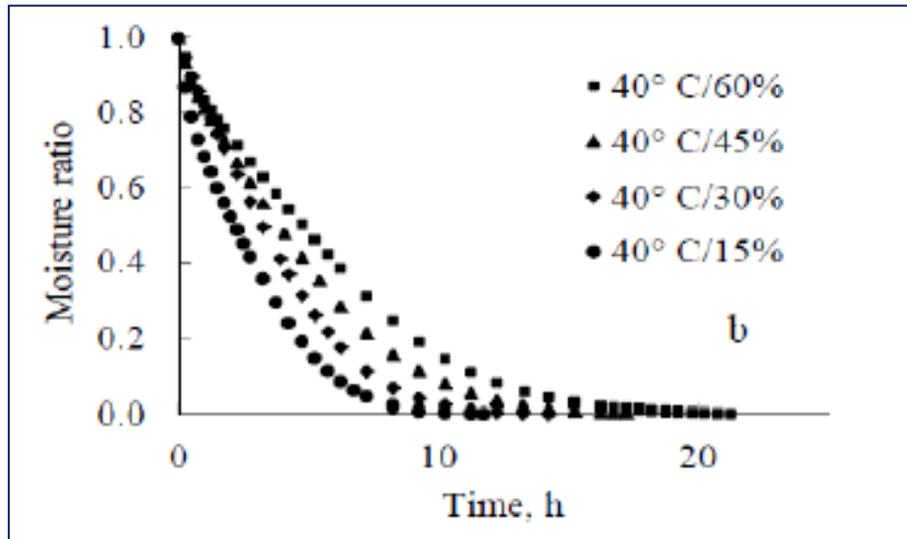


Figure 11. Effet de l'humidité relative de l'air sur les courbes de séchage des feuilles de céleri à 40°C (Roman and Hansel, 2011)

I.4.3. Influence de la vitesse d'air

I.4.3.1. Définition

On appelle la vitesse de séchage, la masse d'eau évaporée par unité de temps et par unité de surface d'évaporation du matériau. L'expression de la vitesse de séchage s'écrit alors :

$$v = \frac{-dM_v}{Sdt} = \frac{M_S - dX}{S - dt} \quad (6)$$

$$M_v = M_S - dX \quad (7)$$

$$dX = X_e - X_s \quad (8)$$

Avec :

V : La vitesse de séchage.

M_v : La masse d'eau évaporée.

M_s : La masse de produit sec.

dX : La variation de la teneur en eau de produit à sécher.

S : La surface de séchage.

X_e : Teneur en eau de produit à l'entrée.

X_s : Teneur en eau de produit à la sortie.

La vitesse de séchage est fonction de très nombreux paramètres dont les plus importants sont :

- La nature, la porosité, la forme et l'humidité du produit.
- La température, l'humidité et la vitesse de l'air sécheur (Mouafki *et al.*, 2004).

La vitesse d'air agit positivement sur la cinétique de séchage surtout au début de l'opération. Cependant, pour des produits dont la cinétique de séchage est contrôlée par la migration interne de l'eau, l'influence de la vitesse d'air devient très faible (Nguyen, 2015). Les résultats de ces auteurs peuvent être classés en trois groupes selon la description qu'ils font de l'influence de la vitesse de l'air sur la cinétique de séchage: Le premier groupe indique que l'influence de la vitesse d'air sur la cinétique de séchage est très faible.

Les Figure 12 et Figure 13 mettent en évidence que la vitesse d'air n'a pas d'effet perceptible sur les courbes de séchage (Madamba *et al.*, 1996), (Tarigan *et al.*, 2007).

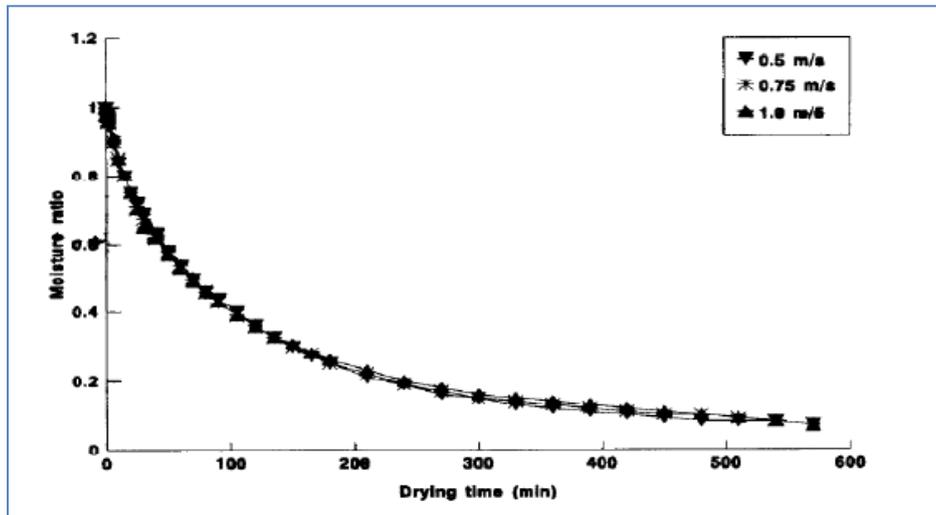


Figure 12. Influence de la vitesse d'air (0,5; 0,75 et 1,0 m/s) sur la vitesse de séchage d'ail (Madamba *et al.*, 1996)

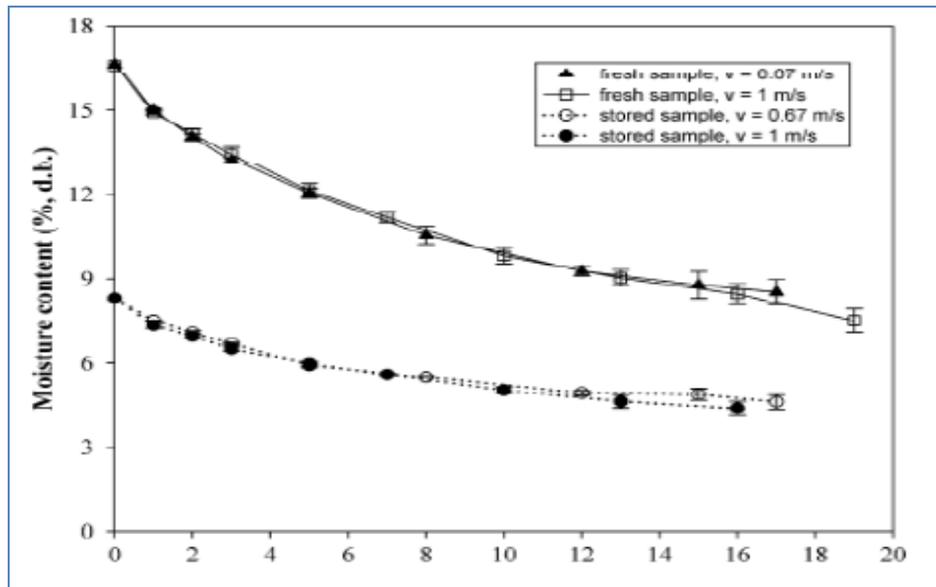


Figure 13. Effet de la vitesse de l'air sur la teneur en eau pour le bancoulier (Tarigan *et al.*, 2007)

- Le deuxième groupe constate que la vitesse d'air influence sur la vitesse de séchage : quand on augmente la vitesse, le temps de séchage est diminué et la vitesse de séchage est augmentée.

La Figure 14 montre la variation expérimentale de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau et du temps de séchage, respectivement, à la température de l'air de 60 °C avec des vitesses de l'air variable. À partir de cette figure, il est évident que la vitesse de l'air a un grand effet sur la vitesse de séchage. La vitesse de séchage est passée de 0,0286 à 0,0321 (g/g sec-min) lors de l'augmentation de la vitesse de l'air de 0,3 à 0,7 m/s à 60 °C (Karim and Hawlader, 2005).

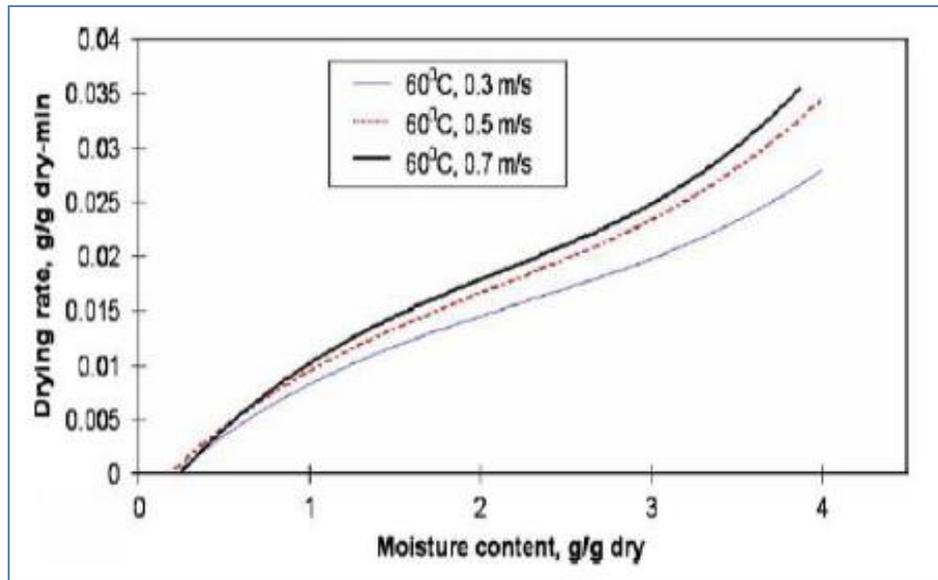


Figure 14. Vitesse de séchage de banane en fonction de teneur en eau (Karim and Hawlader, 2005)

La Figure 15 montre l'effet de la vitesse de l'air sur la vitesse de séchage pour la carotte. Le temps de séchage était de 28 h avec une vitesse de l'air de 0,5 m/s, tandis qu'il était de 21 h pour une vitesse de 1 m/s. Ces résultats mettent en évidence que le temps de séchage a été réduit de 25% pour la vitesse de l'air la plus élevée. En conséquence, la vitesse de séchage augmente avec le débit d'air. (Doymaz, 2004a).

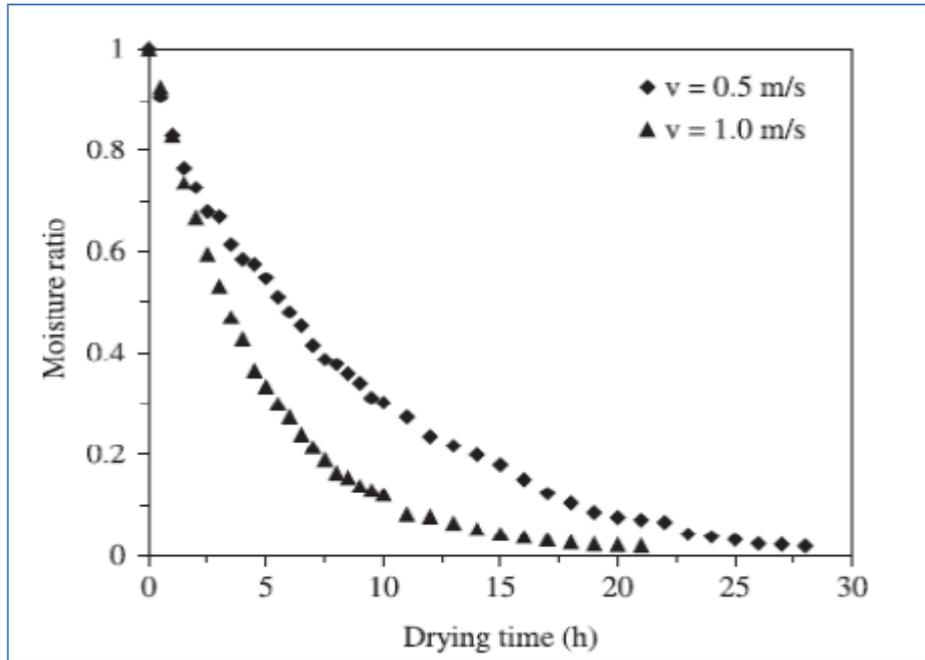


Figure 15. Cinétique de séchage de cubes de carotte ($d=2\text{cm}$, $T=50^\circ\text{C}$) (Doymaz, 2004a)

- Le troisième groupe constate également que la vitesse d'air influence sur la vitesse de séchage. Cependant, la vitesse d'air atteint une valeur limite (en fonction du produit à sécher) au-delà de laquelle il n'y a plus d'influence sur le temps de séchage

La Figure 16 Représente les courbes de séchage avec différentes vitesses de l'air et à la température de l'air de 85°C . Sur cette figure, l'effet de la vitesse de l'air sur la vitesse de séchage est évident (Babalís and Belessiotis, 2004).

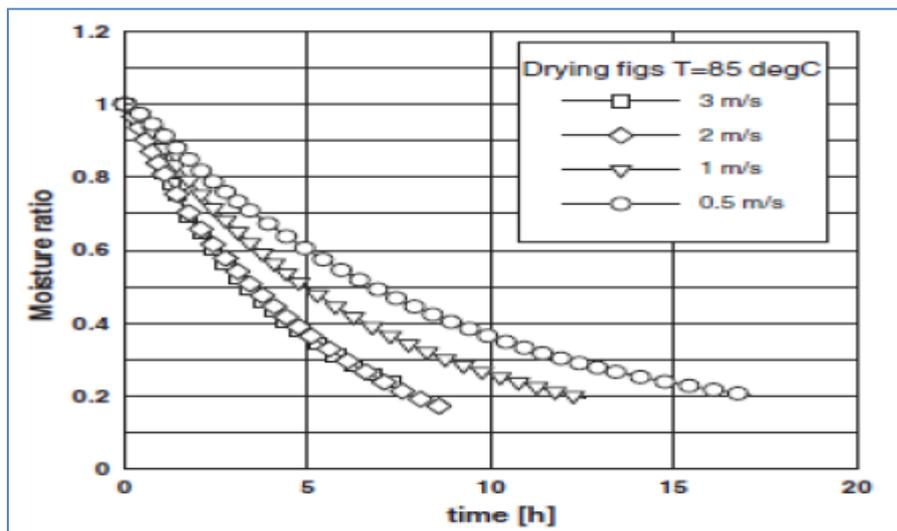


Figure 16. Effet de la vitesse de l'air sur la cinétique de séchage de figue à la température de l'air de 85°C (Babalís and Belessiotis, 2004)

II. Modélisation

II.1. Définition

C'est une représentation ou interprétation abstraite d'une réalité ou d'un phénomène physique, qui est accessible à l'analyse et aux calculs.

Les modèles sont sous forme d'équations à une seule ou à plusieurs variables (**Allaire, 2005**).

II.2.Principe

- Objectif principal de la modélisation = maîtrise la complexité
- Modélise = abstraire la réalité pour mieux comprendre le système à réaliser/ réalisé (**Conan, 2015**).

II.3. Principaux domaines d'applications

- Chimie
- Physique
- Science de la vie. En agronomie : il existe des applications de la modélisation mathématique pour l'étude des systèmes de culture, des systèmes d'élevage. Certains travaux de modélisation sont à la base de la création d'outils opérationnels d'aide à la décision pour le conseil agricole (**Matheron, 1978**).

II.4.Intérêt de la modélisation

La modélisation des procédés de séchage a des intérêts multiples :

- Aux ingénieurs de choisir la méthode la plus appropriée de séchage du produit donné ainsi que de choisir les conditions de fonctionnement appropriées (**Khazaei et Daneshmandi, 2007**),
- L'expérimentation à grande échelle pour différents produits et configurations de systèmes est parfois coûteuse et impossible. Ainsi, la prédiction des cultures spécifiques dans diverses conditions est très utile dans la conception et l'optimisation des séchoirs (**Khazaei et Daneshmandi, 2007**),
- L'utilisation d'un modèle de simulation est un outil précieux pour la prédiction des performances des systèmes de séchage (**Khazaei et Daneshmandi, 2007**),
- La modélisation mathématique est une étape importante concernant la mise à l'échelle, la conception et le contrôle du processus (**Sledz, Wiktor, Rybak, Nowacka, et Witrowa-Rajcher, 2016**),

- Une équation mathématique correctement choisie fournit des connaissances sur la cinétique du processus en fonction de ses paramètres (**Sledz, Wiktor, Rybak, Nowacka, et Witrowa-Rajchert, 2016**),
- La modélisation mathématique du processus de séchage donne des informations utiles sur la relation entre la vitesse et la température de l'air de séchage et le taux d'évaporation de l'eau à travers le tissu végétal (**Amanlou, Tavakoli Hashjin, Ghobadian, et Najafi, 2015**),
- Les modèles de séchage sont utilisés pour estimer la teneur en humidité de récolte à tout moment pendant le processus de séchage (**Amanlou, Tavakoli, Hashjin, Ghobadian, et Najafi, 2015**).

II.5. Procédé de séchage en couche mince

Une couche mince se réfère à une couche d'épaisseur de produit suffisamment petit pour que l'on puisse considérer que les caractéristiques de l'air partout dans la couche sont identiques uniforme sans variance. Procédé de séchage en couche mince se réfère également au séchage des particules individuelles ou des grains de matériau qui sont entièrement exposé à l'air de séchage. Le procédé est souvent divisé en deux périodes de séchage qui sont de la période de vitesse de séchage constante et la période de vitesse de séchage tombant. Pendant la période de séchage à vitesse constante, le matériau contient autant d'eau que les surfaces liquides existent et sécher d'une manière comparable à un corps ouvert en façade de l'eau. L'eau et son environnement, et non solide déterminera la vitesse de séchage. Sable mouillé, le sol, le pigment et les graines lavées sont des exemples de matériaux secs initialement à une vitesse constante. Le rayonnement, la conduction ou convection fournit l'énergie nécessaire pour le séchage (**Inyang, 2018**).

II.6. Modélisation des cinétiques de séchage

Le séchage est un processus thermique complexe dans lequel la chaleur instable et le transfert d'humidité se produisent simultanément. Pour raison d'ingénierie, il est important de mieux comprendre ce processus complexe et c'est pourquoi la modélisation mathématique joue un rôle essentiel (**Diaz, Giannuzzi et al.2009 ; Ruiz-Lopez, Castillo-Zmudio et al., 2010**).

II.7. Classification des modèles

Les processus de séchage sont généralement modélisés à l'aide de 2 modèles principaux, le modèle à éléments répartis et le modèle à éléments localisés (**Erbay et Icier, 2010**). Celles-ci sont maintenant décrites individuellement.

- **Modèle d'élément distribué** : ce modèle ou système est basé sur l'interaction entre le temps et une ou plusieurs variables spatiales pour toutes ses variables dépendantes. Le modèle à éléments répartis prend en compte le transfert simultané de masse et de chaleur pour les processus de séchage. Il est important de noter que l'effet de pression est négligeable par rapport à l'effet de température et d'humidité rapporté par (**Brooker et al., 1974**).
- **Modèle d'élément regroupé** : ce modèle ou système considère l'effet du temps seul sur les variables dépendantes. Le modèle d'élément groupé ne prend pas en compte le changement de température d'un produit et suppose une distribution uniforme de la température de l'air de séchage à l'intérieur du produit. Le modèle inclut des hypothèses des équations de **Luikov**, c'est-à-dire que la variable de pression est négligeable et la température est constante (**Luikov, 1975**). Le modèle est présenté dans l'équation(9) et (10) ci-dessous :

$$\frac{\delta M}{\delta t} = \Delta^2 K^1 \quad (9)$$

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \Delta^2 K^{12} \quad (10)$$

Où K est la diffusivité effective (D) et K_{12} est connue comme la diffusivité thermique (α).

Pour les valeurs constantes de (α) et (D), Eq.9 et 10 peuvent en outre être présentés comme

$$\frac{\delta M}{\delta t} = D \left[\frac{\delta^2 M}{\delta x^2} + \frac{b^1}{x} \frac{\delta M}{\delta x} \right] \quad (11)$$

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \alpha \left[\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{b^1}{x} \frac{\delta T}{\delta x} \right] \quad (12)$$

De l'avis d'Ekechukwu (1999), les hypothèses pour le paramètre $b_1 = 0$ (géométries de plaque), $b_1 = 1$ (cylindrique forme) et $b_1 = 2$ (formes sphériques). Cependant, ces hypothèses entraînent une erreur pour la lecture de la température au début du processus de séchage (**Erbay et Icier, 2010**).

- **Modèles théoriques** : les modèles théoriques tiennent compte à la fois de la résistance externe et interne au transfert d'humidité. Ils impliquent la géométrie du matériau, sa diffusivité massique et la conductivité du matériau (**Cihan et Ece, 2001**). Ainsi, les résistances peuvent être estimées à partir de l'équation 11 et 12 car ces équations décrivent le transfert de masse (**Erbay et Icier, 2010**). Par la suite, la solution de la deuxième loi de diffusion de Fick est largement appliquée comme modèle théorique dans le séchage en couche mince de produits alimentaires (**Kukuk et al., 2014**).
- **Modèles semi-théoriques** : les modèles semi-théoriques sont dérivés de modèle théorique (deuxième loi de diffusion de Fick) ou de sa variation simplifiée (loi de Newton du refroidissement). Les modèles semi-théoriques de Lewis, Page et Modified Page sont dérivés de la loi de Newton du refroidissement. Le (i) modèle exponentiel et forme simplifiée, (ii) le modèle exponentiel à 2 termes et la forme modifiée, et (iii) le modèle exponentiel à 3 termes et la forme simplifiée sont tous dérivés de la deuxième loi de diffusion de Fick (**Erbay et Icier, 2010**).

Les modèles semi-théoriques mis à disposition dans la littérature au cours des 10 dernières années sont discutés ci-dessous. Ces modèles ont été largement utilisés pour exprimer la cinétique de séchage en couche mince des fruits et légumes, comme le montre le tableau 3 (Annexe).

II.8. Modèles de séchage en couches minces

Certains modèles sélectionnés de séchage en couches minces de fruits et légumes sont présentés dans le tableau 1. Ces modèles sont souvent utilisés pour décrire le séchage des fruits et légumes et peuvent être classés en 3 groupes en fonction de leurs avantages et inconvénients comparatifs et aussi leur dérivation. Ce sont des modèles théoriques, semi-théoriques et empiriques. Les catégories de modèles à couches minces les plus largement appliquées sont les modèles semi-théoriques et empiriques (**Ozdemir et Devres, 2000 ; Panchariya et al., 2002 ; Akpinar, 2006 ; Doymaz, 2007 ; Raquel et al., 2011**). Ces catégories de modèles prennent en compte la résistance externe au processus de transport d'humidité entre le matériau et l'air atmosphérique, fournissent une plus grande étendue de résultats précis, donnent une meilleure prédiction des comportements et font moins d'hypothèses en raison de leur recours à des données expérimentales. Ainsi, ces modèles se sont révélés être les plus utiles pour les ingénieurs et les concepteurs de séchoirs (**Brooker et al., 1992**). Cependant, ils ne sont valables que dans les conditions de séchage appliquées. D'autre part, les modèles théoriques font trop d'hypothèses conduisant à un nombre

considérable d'erreurs (Henderson, 1974 ; Bruce, 1985), limitant ainsi leur utilisation dans la conception des séchoirs. Les modèles semi-théoriques sont généralement obtenus à partir de solutions de la deuxième loi de Fick et de variations de ses formes simplifiées. Les modèles demi-théoriques et certains modèles empiriques fournissent une compréhension des processus de transport et démontrent une meilleure adéquation avec les données expérimentales (Janjai *et al.*, 2011). Les modèles empiriques et semi-théoriques ont des caractéristiques similaires. Les principaux défis rencontrés par les modèles empiriques sont qu'ils dépendent largement des données expérimentales et fournissent des informations limitées sur le transfert de chaleur et de masse pendant le processus de séchage (Erbay et Icier, 2010). En raison des caractéristiques des modèles semi-théoriques et empiriques et de la propriété à haute teneur en humidité de nombreux fruits et légumes, ces modèles sont largement appliqués pour estimer la cinétique de séchage. Par conséquent, les pages qui suivent essaieront de discuter en détail les différentes sources de littérature appliquées au séchage en couche mince des fruits et légumes.

Tableau 1: Modèles à couches minces pour le séchage des fruits et légumes (Onwude, 2018)

Nom du modèle	Equation	Référence
1. Newton	$MR = \exp(-kt)$	El-Beltagy and others (2007)
2. Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Akoy (2014) ; Tzempelikos and others (2014)
3. Page (II)	$MR = \exp[-(kt)^n]$	Vega and others (2007)
4. Page (III)	$MR = k \exp(-t/d^2)^n$	Kumar and others (2006)
5. Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt^n)$	Meisami-asl and others (2010) ; Hashim and others (2014)
6. Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	Zenoozian and others (2008)
7. Midlli and others	$MR = a \exp(-kt) + bt$	Davishi and Hazbavi (2012) ; Ayadi and others (2014)
8. Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	Rayaguru and Routray (2012) ; Kaur and Singh(2014)
9. Two-terme	$MR = a \exp(-k_1 t) + b \exp(-k_2 t)$	Sacilik (2007)
10. Two-term exponential	$MR = a \exp(k_0 t) + (1-a) \exp(-k_1 at)$	Dash and others (2013)
11. Hii and others	$MR = a \exp(k_1 t^n) + b \exp(-k_2 t^n)$	Kumar and others (2012b)
12. Demir and others	$MR = a \exp(-kt)^{n+b}$	Demir and others (2007)

13. Verma and others	$MR = a \exp(-kt) + (1-a)\exp(-gt)$	Akpinar (2006)
14. Approximation of diffusion	$MR = a \exp(-kt) + (1-a)\exp(-kbt)$	Yaldýz and Ertekýn (2007)
15. Midilli and others	$MR = a \exp(-kt) + b$	Gan and Poh (2014)
16. Aghbashlo and others	$MR = \exp(k_1 t/1+k_2 t)$	Aghbashlo and others (2009)
17. Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	Omolola and others (2014)
18. Diamante and others	$\ln(-\ln MR) = a + b(\ln t) + c(\ln t)^2$	Diamante and others(2010)
19. Weibull	$MR = \alpha - b \exp(-k_0 t^n)$	Tzempelikos and others (2015)
20. Thompson	$t = a \ln(MR) + b [\ln(MR)]^2$	Pardeshi (2009)
21. Silva and others	$MR = \exp(-at - b\sqrt{t})$	Pereira and others (2014)
22. Peleg	$MR = 1 - t/(a + bt)$	Da Silva and others(2015)

II.9.Statistiques de qualité d’ajustement des modèles

Les modèles de séchage en couche mince ont été évalués et comparés à l’aide de mesures statistiques. Par conséquent, la qualité des modèles ajustés à été évaluée (Saeed, 2008). Certaines de ces mesures sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 2: Diverses mesures statiques utilisés pour évaluer la qualité de l’ajustement des modèles (Inyang, Oboh et Etuk, 2018)

Mesures statistiques	Formule
Erreur quadratique moyenne	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N}}$
Erreur de biais moyen	$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})$
Chi au carré (chi au carré réduit)	$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N-z}$
Module d’écart relative moyen	$P (\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^n \left \frac{MR_{Qi} - MR_{ei}}{MR_{ei}} \right $
Coefficient de détermination	$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}$
Erreur de carré de somme	$SSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2$
Modélisation de l’efficacité	$EF = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{i,exp} - MR_{i,exp\ mean})^2 - \sum_{i=1}^N (MR_{i,pre} - MR_{i,exp})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{i,exp} - MR_{i,exp\ mean})^2}$
Coefficient de corrélation	$r = \frac{N \sum_{i=1}^N MR_{pre,i} MR_{exp,i} - \sum_{i=1}^N MR_{pre,i} \sum_{i=1}^N MR_{exp,i}}{\sqrt{(N \sum_{i=1}^N MR_{pre,i}^2 - (\sum_{i=1}^N MR_{pre,i})^2) (N \sum_{i=1}^N MR_{exp,i}^2 - (\sum_{i=1}^N MR_{exp,i})^2)}}$
Écart relatif moyen	$E (\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left \frac{\text{valeur expérimentale} - \text{valeur prédite}}{\text{valeur expérimentale}} \right $
Somme résiduelle des carrés	$RSS = \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2$

II.10. Estimation de la diffusivité effective de l'humidité pendant le séchage

La diffusivité effective de l'humidité, qui est fonction de la température et de la teneur en humidité d'un matériau, est une propriété de transport importante dans la modélisation du processus de séchage des fruits et légumes. L'équation de la deuxième loi de diffusion de Fick représente une équation de transfert de masse et de chaleur pour le séchage des fruits et légumes comme le montre l'équation suivante (Onwude, 2018) :

$$\frac{\delta M}{\delta t} = D \nabla^2 M \quad (13)$$

Crank (1979) a fourni des solutions pour la diffusion Eq. 13 pour diverses géométries pendant la période de baisse du taux (Yang *et al.*, 2001 ; Guiné *et al.*, 2011) avec l'application de plusieurs conditions aux limites. En supposant une géométrie cylindrique, Eq. 13 peut être exprimé par :

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(Dr \frac{\partial M}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(Dr \frac{\partial M}{\partial z} \right) \right\} \quad (14)$$

Où r est le rayon d'un cylindre, z est la direction de l'épaisseur de l'échantillon et D est la diffusivité effective de l'humidité (m^2/s).

Comme indiqué par plusieurs auteurs (Ekechukwu, 1999 ; Ozdemir et Devres, 2000 ; Erbay et Icer, 2010), les conditions aux limites des modèles de séchage en couche mince sont :

- i. Les tailles des produits sont homogènes et isotropes.
- ii. Les caractéristiques du produit sont constantes et l'effet de retrait est négligeable.
- iii. Les variations de pression pendant le processus de séchage sont négligeables.
- iv. L'évaporation se produit uniquement à la surface du produit.
- v. Le transfert de masse est symétrique avec une répartition uniforme de l'humidité pendant le processus.
- vi. L'humidité de surface du produit subit une stabilisation d'humidité.
- vii. Pendant le processus de séchage, la distribution de température est égale à la température de l'aire de séchage ambiant lorsque l'état d'équilibre a été atteint.
- viii. Le transfert de chaleur se produit par conduction à l'intérieur du produit et par convection à l'extérieur du produit.
- ix. Il y a une distribution d'humidité initiale uniforme.

- x. La diffusivité de l'humidité apparent est constante avec la teneur en humidité pendant le séchage.

II.11. Estimation de l'énergie d'activation

La relation entre la diffusivité effective et la température est supposée être une fonction d'Arrhenius (Akpinar 2006 ; Sacilik 2007 ; Vega *et al.*, 2008) du :

$$D = D_o \exp\left(-\frac{E_a}{R(T+273.15)}\right) \quad (15)$$

Où D_o est le facteur pré-exponentiel de l'équation d'Arrhenius en m/s, E est l'énergie d'activation en kJ/mol, R est la constante de gaz universelle ($R= 8,31451$ j/mol/k), et T est la température de l'aire exprimée en °C.

Un graphique de $\ln(D)$ en fonction de $1/(T+273,15)$ produira une ligne droite avec une pente égale à $(-E_a/R)$, donc E_a (10^3) peut être facilement estimée.

Cependant, pour le séchage par micro-onde, (Dadali *et al.*, 2007) ont développé une autre forme pour estimer l'énergie d'activation. Ils ont déterminé que D est une fonction de la masse du matériau et du niveau de puissance micro-onde d'une équation de type Arrhenius :

$$D = D_o \exp\left(-\frac{E_a m}{Pm}\right) \quad (16)$$

Où E_a est l'énergie d'activation (W/g), m est la masse du produit (g) et Pm est la puissance de sortie des micro-ondes (W).

Cette équation a été appliquée dans le calcul de l'énergie d'activation lors du séchage des épinards, palmiers dattiers, poivrons, gingembre.

Conclusion

Conclusion

Parmi toutes les méthodes de conservation des aliments, le séchage reste une opération très avantageuse en raison de la durée de conservation longue, de la facilité de stockage à température ambiante et de la réduction de masse (transport).

L'opération de séchage peut aider à réduire la teneur en humidité des matériaux alimentaires pour éviter la croissance microbienne et la détérioration, pour l'allongement de la durée de conservation, afin de réduire les emballages et l'amélioration du stockage pour faciliter le transport.

Le Séchage en couche mince de matériaux est nécessaire pour comprendre le mécanisme de transport fondamental et une condition préalable pour simuler avec succès ou intensifier l'ensemble du processus d'optimisation ou le contrôle des conditions de fonctionnement.

Les chercheurs ont montré que miser uniquement sur la pratiques de séchage expérimentales sans considérations mathématiques pour la cinétique de séchage, peut affecter de manière significative l'efficacité des séchoirs, augmenter le coût de production, et réduire la qualité du produit séché.

De nombreuses recherches théoriques et expérimentales ont été menées dans le passé concernant l'amélioration des performances du séchage. Beaucoup de modèles proposés dans la littérature comportent des paramètres empiriques. Un modèle efficace est nécessaire pour la conception des processus, l'optimisation, l'intégration de l'énergie et de contrôle ; par conséquent, l'utilisation de modèles mathématiques pour trouver la cinétique de séchage des produits agricoles est très important.

A partir de l'analyse bibliographique que nous avons réalisée, nous pouvons confirmer que :

- Modéliser la cinétique de séchage et déterminer le temps de séchage des fruits et légumes sont 2 domaines très importants de séchage.

- La plupart des pertes de production dans l'industrie se produisent pendant le séchage ; afin de minimiser ces pertes, il est nécessaire d'optimiser les conditions de séchage, la conception de la machine et la qualité du produit.

Conclusion

-Il est nécessaire d'identifier et d'évaluer les mécanismes de séchage, les théories, les applications et la comparaison des modèles de séchage en couche mince de fruits et légumes disponibles dans la littérature.

Ce travail mérite d'autres approches et études pratiques afin de comprendre ce procédé et comparer entre les techniques de séchage pour savoir le meilleur en termes de temps et de qualité, et comprendre l'influence de ces techniques sur la qualité physique des fruits et légumes.

-A-

- Akpınar, E.K. (2006a). determination of suitable thin-layer drying curve model for some vegetables and fruits. *J Food Engr* 73, pp. 75-84.
- Albitar, N. (2010). Etude comparative des procédés de séchage couplés à la texturation par Détente Instantanée Contrôlée DIC, en termes de cinétique et de qualité nutritionnelle, Applications à la valorisation des déchets agro-industriels. Thèse de doctorat, France: Université de La Rochelle.
- Allair. (2005). Analyse numérique et optimisation. Front Cover Grégoire Allaire. Editions Ecole Polytechnique, 2005-Mathematical optimization-456pages.
- Allaf, K et al. (1991). Essai de séchage des produits agroalimentaire. *Science des aliments*.
- Alibas, I. (2007). Microwave, air and combined microwave–air-drying parameters of pumpkin slices. *LWT - Food Science and Technology* **40**(8): 1445-1451.
- Amanlou, Y., Tavakoli Hashjin, T., Ghobadian, B., & Najafi, G. (2015). Mathematical Modeling of Thin-Layer Solar Drying for Yarrow, Coriander and Hollyhock. *International Journal of Food Engineering*, 0(0).
- Arikan, M. F., Z. Ayhan, et al. (2011). Drying Characteristics and Quality Parameters of Microwave-Dried Grated Carrots. *Food and Bioprocess Technology* **5**(8): 3217-3229.
- Ayad, A et bouharoun, N. (2015). Etude comparative du séchage par microonde et à L'étuve de la cosse de petit pois. Université de Bejaia. Faculté des Sciences et de la Nature et de la Vie. Département des Sciences Alimentaires. pp 48.

-B-

- Babalis, S.J., Belessiotis, V.G. (2004). Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. *Journal of Food Engineering*, 65(3), 449-458.
- Belachi, W. (2009). Application du séchage solaire pour la conservation des produits agroalimentaires, Mémoire de Magister, Université de Ouargla.
- Bennamoun, L. (2001). Simulation numérique d'un séchoir solaire adaptation au climat local. Magister. Université de Mentouri Constantine.
- Benseddik, A. (2011). Modélisation et simulation du séchage de la figue par des séchoirs solaires indirects fonctionnant en convection forcée, Thèse de Magistère, Centre Universitaire Abou-Bekrbekaid-Tlemcen.

Références Bibliographiques

- Bimbenet, J.J. (1998). Bases conceptuelles du génie des procédés agroalimentaires. Techniques de l'ingénieur.
- Bimbenet, J.J. (1984). Les échanges dans l'industrie agricole et alimentaire. Cahiers du génie Industriel Alimentaire (G.I.A). Sepaic, Paris 2ème édition pp34, Cité par H. Madjoudj.
- Boekel, MAJSV et Tjiskens, LMM. (2001). Modélisation Kinetics. Chapitre trois, Université de Wageningen, Wageningen.
- Bonazzi, C. and Bimbenet, J.J. (2003). Séchage des produits alimentaires Principes. Techniques de l'ingénieur. Agroalimentaire, 2(F3000): F3000. 3001-F3000. 3014.
- Bonnazi, C. and Bimbenet, J.J. (2008). Séchage des produits alimentaires : Appareils et applications. Technique de l'ingénieur. Agroalimentaire, 2(F3002).
- Bonnazi, C., Dumoulim, E. and Bimbenet, J.J. (2008) Le séchage des produits alimentaires. Industrie Alimentaire Agricole, 125 (03-04) : 12-22.
- Bondil, A and Hrabovsky, J. Isolation thermique, tome, édition Eyrolles Cité par N. Chalal.
- Boughali, S. (2010). Etude et optimisation du séchage solaire des produits agroalimentaires dans les zones arides et désertiques. Thèse de Doctorat: Université Hadj-Lakhder. Batna.
- Boussalia, A. (2010). Contribution à l'étude de séchage solaire de produits agricoles locaux, thèse magister, Université Mentouri-Constantine.
- Bozin, B., N. Mimica-Dukic, et al. (2008). Phenolics as antioxidants in garlic (*Allium sativum* L., Alliaceae). Food Chemistry 111(4): 925-929.
- Brennan J. G., (2006). Food processing handbook. Ed by: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co- KGaA, Weinheim, Germany, 602p.
- Brooker et al. (1974). Drying cereal grains. Westport, Conn., U.S.A.: AVI Publishing Co.

-C-

- Chayjan, R.A. (2012). Modeling Some Drying Characteristics of High Moisture Potato Slices in Fixed, Semi Fluidized and Fluidized Bed Conditions. Journal of Agricultural Science and Technology, 14, 1229-1241.
- Changrue, V. (2006). Hybrid (osmotic, microwave-vacuum) drying of strawberries and carrots, McGill University Montreal.

Références Bibliographiques

- Charreau A., Cavaille R. (1991). séchage théorie et pratique, technique de l'ingénieur, génie des procédés, pp.2480-23.
- Cheftel, J.C., Cheftel, H. (1976). Introduction à la Biochimie et à la Technologie des Aliments. Vol. I et Vol. II, Ed. Lavoisier.
- Cihan A, Ece MC. (2001). Liquid diffusion model for intermittent drying of rough rice. *J Food Engr* 49, pp.327-31.
- Coulibaly, I., Dubois-Dauphin, R., Danthine, S., Majad, L., Mejoub, T., Destain, J., Béra, F., Jean-Paul Wathelet, J.P & Thonart, P. (2011). Techniques de séchage des starters lactiques et mécanismes affectant la viabilité cellulaire suite à la lyophilisation, *BASE [En ligne]*, numéro 2, Volume 15, 287-299.
- Conan, D and Taconet, C. (2015). Bac, Télécom Sud Paris, CSC 4002.
- Crank J. (1979). *The mathematics of diffusion*. Revised edition. Oxford, Great Britain : Clarendon Press.
- Cryotec. (2015). Concepteur et fabricant de lyophilisateurs et d'enceintes climatiques. . <http://www.cryotec.fr/nosproduis/lyophilisateur/>.

-D-

- Dadali, G., Demihan, E., Ózbek, B. (2007). Color change kinetics of spinach undergoing microwave drying. *Drying Technology* 25(10), pp. 1713-23.
- Degla, A et Sioued, R. (2015), Séchage Solaire des Dattes Deglet-Nour : Simulation Numérique, Master académique, université KASDI MARBAH OUARGLA, Algérie.
- Diaz, E. L., Giannuzzi, L., et al. (2009). Appel pectic gel produced by dehydration. *Food and Bioprocess Technology* 2(2), pp.194-207.
- Djerroud, D. (2010). Modélisation markovienne du séchage continu par contact avec agitation. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Toulouse. 166p.
- Doymaz, İ. (2004). Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering*, **61**(3).
- Doymaz I. (2007). The kinetics of forced convective air-drying pumpkin slices. *J Food Energr* 79, pp.243-8.
- Dudez, P. (1996). Le séchage solaire à petite échelle des fruits et légumes : expériences et procédés. Editions du Gret, France, 157p.

-E-

- Ekechukwu, O.V. (1999). Review of solar-energy drying systems I : an overview of drying principles and theory. *Ener Conver Manage* 40(6), pp. 593-613.

Références Bibliographiques

- Erbay, Z., Icier, F. (2010). A review of thin-layer drying of foods : theory, modeling, and experimental results. *Crit Rev Food Sci Nutr* 50(5), pp.441-64.

-F-

- Feng, H., Yin, Y., Tnag, J. (2012). Microwave drying of food and agricultural Materials : Basics and heat and mass transfer modeling. *Food engineering Reviews*4, 89-106.
- Fournier, V. (2003). Conservation des aliments. Université Laval, Canada; 16 p.
Fruit, L. 2012.Fruit Logistica.<http://www.fruitlogistica.de/en/>.

-G-

- Gacula, M.C., and Singh, J. (1984) *Statistical Methods in Food and Consumer Research*. Applied Science, London, 505p.
- Georges, M. (1978). Estimer et choisir : essai sur la pratique des probabilités, Fontainebleau, école nationale supérieure des mines de paris. « les cahiers du centre de morphologie mathématique de Fontainebleau » (n°7), 175p.
- Geres. (1997). Comment sécher vos produits avec le séchoir solaire. Guide pratique.
- Guiné, R.P.F., Pinho, S., Barroca, M.J. (2011). Study of the convective drying of pumpkin (*Cucurbita maxima*). *Food Bioprod Process* 89(4), pp. 422-8.
- Guiné, R.P.F., F. Henriques, et al. (2012). Mass transfer coefficients for the drying of pumpkin (*Cucurbita moschata*) and dried product quality. *Food and Bioprocess Technology* 5(1): 176-183.
- Gupta, S.V et Patil, N. (2014) convectif séchage de Osmo-déshydraté Spota. Tranche. *International Journal of Agricultural and Food Science*, 55, pp. 219-226.

-H-

- Haghi, A.K., Amanifard, N. (2008). Analysis on heat and mass transfer during microwave drying of food products. *Brazilian journal of chemical Engineering* 25, 491-505.
- Henderson, S.M. (1974). Progress in developing the thin-layer drying equation. *Transact ASAE* 17, pp.1167-72.

-I-

- Inyang, U.E., Oboh, I.O et Etul, B.R. (2018). Les modèles cinétiques pour les techniques de séchage des aliments Ma-tériaux. *Les progrès en génie chimique et de la science*, 8, pp. 27-48.

Références Bibliographiques

- Inyang, U., Oboh, I. et Etuk, B. (2017). Le séchage et les différentes techniques. *International Journal of Nutrition et sécurité alimentaire*, 8, pp.1-25.

-J-

- Jean, T., V., Panddey, R, Vyas, A., Shukla, S. (2009). Microwave assisted extraction for phytoconstituents-an overview *Asian journal of Research in chemistry*, 2 (1) 19-25.
- Janjai, S., Bala, B.K. (2012). Solar Drying Technologie. *Food Engineering. Reviews*4, 16-54
- Jannot Yves. (2007), Thermique solaire.

-K-

- Kabiru, A.A., Joshua, A.A et Raji, A.O. (2013). Effet de l'épaisseur de coupe et Température sur le séchage cinétique de Mango (*Mangifera Indica*). *IJRRAS* 15, pp. 14-50.
- Karim, M.A., Hawlader, M.N.A. (2005). Mathematical modelling and experimental investigation of tropical fruits drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **48**(23-24), 4914-4925.
- Khazaei, J., & Daneshmandi, S. (2007). Modeling of thin-layer drying kinetics of sesame seeds: mathematical and neural networks modeling. *International Agrophysics*, 21(4), 335.
- Kemp, I.C., Fyhr, B.C., Laurent, S., Roques, M., Groenewold, C., Stotsas, E., Sereno A., Bonazzi, C., Bimbenet, J.J. et Kind, M. (2001). Methods for processing experimental drying kinetics data. *Drying technology* vol. 19 n°1 p. 15 à 34 .
- Kumar, Y., S. Tiwari, et al. (2015). Drying: an excellent method for food preservation. *International Journal of Engineering Studies and Technical Approach* 1(8): 1-17.

-L-

- Lewicki, P. P. (1998). Effect of pre-drying treatment, drying and rehydration on plant tissue properties: A review. *International Journal of Food Properties* **1**(1): 1-22.
- Li, Z. (2004). Design of a microcontroller-based, power control system for microwave drying, McGill University.
- Li, Z., Raghavan, G. et al. (2011). Drying rate control in the middle stage of microwave drying. *Journal of Food Engineering* 104(2): 234-238.
- Luikov, A.V. (1975). Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies. *Intl J Heat Mass Transfer* 18, pp.1-14.

-M-

- Madamba, P.S., Driscoll, R.H., Buckle, K.A. (1996). The thin-layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering*, 29(1), 75-97.
- Madhlope, A., Jones, S.A and KalengaSaka, J.D. (2001). A solar air heater with composite absorber systems for food dehydration. *Renewable Energy*, 27 (27 - 37).
- Mahacine, A., Laglaoui, A. (2007). Apport du procédé de lyophilisation sur la qualité des fraises marocaines. Département de Génie Chimique, Faculté des Sciences & Techniques, Tanger, MAROC. U.P.B. Sci. Bull., Series D, Vol. 69, No. 2, p 60-68.
- Mathavi, V., Sujatha, G., Bhavani, R., Karthika, S., Devi, B. (2013). New trends in food processing. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*. 5(2), pp. 176-187.
- Mayor, L. and Sereno, A.M. (2004). Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering* 61(3): 373-386.
- Mebarki, A., Zouani, A. (2017). Effet de réchauffement par micro-onde sur la qualité physicochimique et microbiologique de lait cru. Master en science agronomique. Université Abdelhamid Ibn Badis-Mostaganem.
- Mihoubi, D. (2004). Déshydratations d'argile par compression et séchage. Aspects de modélisation et de simulation. Thèse de doctorat. université de Pan et des pays de l'Adour. école doctorale des sciences exactes et de leur application.
- Mouafki, A. (2004). Modélisation et Simulation du procédé de séchage solaire des feuilles de menthe, Mémoire de Magister, Université de Ouargla.
- Moses, J.A., Norton, T., Alagusundaram, K., Tiwari, B.K. (2014). Novel drying techniques for the food industry. *Food Engineering. Reviews* 6.
- Mujumdar, A.S. (2006). Some recent developments in drying technologies appropriate for post-harvest processing. *International Journal of Postharvest Technology and Innovation*. 1, pp 76–92.

-N-

- Nguyen, T. H. (2015). Étude expérimentale et modélisation du procédé de séchage des végétaux, Université de Bretagne Sud, France.

-O-

- Onwude, D.I, Hashim, N., Januis, R., Nawi, N., Abdan, K. (2015a). computer simulation of convective hot air drying kinetics of pumpkin (*Cucurbita moschata*). The

Références Bibliographiques

8th Asia-Pacific drying conference (ADC 2015) Kuala Lumpur, Malaysia, 10-12 August 2015, pp.122-9.

- Onwude, D.I. (2018). Modeling the Thin-layer Drying of Fruits and Vegetables, *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 15, pp.599-618.
- Ounissi, E. (2009). Influence de la température, la pression et le blanchiment sur les cinétiques de séchage de l'ail (*Allium Sativum* L). Thèse d'ingénieur. Université de Batna. 62p.
- Ozdemir, M., Deveres, Y.O. (2000). The thin-layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. *J Food Engr* 42, pp.225-33.

-R-

- Ratti, C. (2009). *Advances in food dehydration*. CRC Press, United States; 488 p.
- Rahman, S.M. (2007). *Handbook of food preservation*. CRS Press Taylor and Francis group.
- Rizvi, S. S. H. (2005). Thermodynamic properties of foods in dehydration. In *Engineering Properties of Foods* (ed. M. A. Rao, S. S. H. Rizvi & A. K. Datta), 239-326. Florida, United States: CRC Press.

-S-

- Sabarez, H.T. (2016). *Airborne Ultrasound for Convective Drying Intensification*. Elsevier Ltd, pp.361-384.
- Sabarez, H.T. (2018). *Thermal Drying of Foods*. Springer Science+Business Media, LLC, part of Springer nature, pp.181-205.
- Sablani, S.S. and Rahman, M.S. (2007). Fundamentals of food dehydration. In *Food drying science and technology: Microbiology, chemistry, applications*, (ed. Y.H. Hui, C. Clary, M.M. Farid, O.O. Fasina, A. Noomhorm, and J. Welti-Chenis), 1–42. Lancaster,PA: DESTech Publications.Chapter 1.
- Sacilik, K. (2007). Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less seed pumpkin (*Cucurbita pepo* L). *Journal of Food Engineering* 79(1): 23-30.
- Sanhaji, F.A., Bimbenet, J.J., Hakem, B. (1991). Quelques données sur le séchage de l'abricot – cinétique de séchage et qualité du produit séché. *Science alimentaire*. Vol 11. 499-512.
- Saravacos George D., (1995), *Mass transfer proprieties of foods*, *Engineering proprieties of foods*, INC 2ème edition, pp531.

Références Bibliographiques

- Singh, F., Katiyar, V.K. et Singh, B.P. (2014). Modélisation mathématique pour l'étude le séchage caractéristique d'Appelle et de pommes de terre. Conférence internationale sur les produits chimiques, de l'environnement et des sciences biologiques, Kuala Lumpur, 17-18 Septembre 2014, pp.172-175.
- Sledz, M., Wiktor, A., Rybak, K., Nowacka, M., & Witrowa-Rajchert, D. (2016). The impact of ultrasound and steam blanching pre-treatments on the drying kinetics, energy consumption and selected properties of parsley leaves. *Applied Acoustics*, 103, 148-15.
- Sodani, M. (2008). étude théorique d'un capteur cylindro-parabolique, mémoire d'ingénieur d'état Université de Ouargla.

-T-

- Tham, T.C., Hii, C.L., Ong, S.P., Chin, N.L., Abdullah, L.C., Law, C.L. (2014). Technical review on crumb rubber drying and the potential of advanced drying technique. *Agriculture and agricultural science procedia*2, 26-32.
- Touati, B. (2001). Modélisation numérique des transferts couplés de chaleur et de masse lors du séchage des feuilles de menthe, Thèse de Magistère Centre Universitaire, Bechar, Algérie.

-V-

- Vasseur, J. (2009). Séchage : principe et calcul d'appareils – séchage convectif par air chaud (parti 1). *Technique de l'ingénieur. Opérations unitaires : Evaporation et séchage*, base documentaire (Ref : Article, j2451).
- Vega A, Fito P, Andrés A, Lemus R. (2007). Mathematical modeling of hot-air drying kinetics of red bell pepper (var. Lamuyo). *J Food Eng* 79, pp.1460-6.
- Vega A, Uribe E, Lemus R, Miranda M. (2007). Hot-air drying characteristics of aloe vera (*Aloe barbadensis*) and influence of temperature on kinetic parameters. *LWT-Food Sci Technol* 40, pp.1698-707.
- Verdier N-A, Sadat A-W, Clément D-A, Emmanuel N-A et Georges N-A. (2016). Impact of Solar and Microwave Oven Drying on A Few Chemical Parameters of Market Value Quality of Fermented Forastero (*Theobroma Cacao L.*). *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 12(4): 402-406.

-W-

- Whitaker, S. (1980), Heat and mass transfert in granular porous media, *Advances in drying I*, Hemisphere publication, pp 23-61.

-Y-

- Yang H, Saki N, Wantanabe M. 2001. Drying model with non-isotropic shrinkage deformation undergoing simultaneous heat and mass transfer. *Drying Technol* 19, pp.1441-60.

-Z-

- Zeki, B. (2009). *Food process engineering and technology*. Ed : Elsevier Inc. Paris. 622p.
- Zhao, D., K. An, et al. (2014). Two-Stage Intermittent Microwave Coupled with Hot-Air Drying of Carrot Slices: Drying Kinetics and Physical Quality. *Food and Bioprocess Technology* 7(8): 2308-2318.

Annexe

Tableau 3: Etudes menées sur la modélisation du séchage en couches minces des fruits et légumes au cours des 10 dernières années

Matériel	Méthodes de séchage	Conditions de séchage	eq. No#	Meilleur modèle	Relation entre les constantes du modèle et la condition de processus	Référence
Pomme	TD	w=8mm ; h=8mm ; L=18mm A=w*h*L ; T=60à80°C, V=1à1.5m/s	11	Midili et autres	a=1.004084- 0.000013T- 0.001960V+ 3.944759A K=- 0.006391+0.000065T +0.009775V+ 1.576723A n=1.187734+0.002467 T-0.128878V- 202.536A b= 0.000082- 0.000002T- 0.000041V+0.041667 A	Akpinar (2006)
Tranches de pomme	LHCD	h= 3à7mm ; T=50à95°C ; V=1m/s	11	Midili et autres	-	Zarien autres (2013)
Tranche de Pomme (Golab)	OD	V=0.5m/s ; T=40à80°C,h=2à6mm	11 et 9	Midili et autres ; Henderso n Et Pabis	a=0.971449897+0.002 099298T-0.10565552h k=- 1.061883481+ T ^{0.022639541} - 0.004633918h	Meisami- asl et autres (2010)
Tranche de Pomme(Mcintosh)	LHCD	T=50à70°C ; V=0.6à1.4m/s ; h=4 à 12mm	12	Logarith mique	-	Kaleta et GÓnicki (2010)

Annexes

Abricot	LHCD	T=60à 100°C ;h=5mm,V=0.2m/s	22	Diamante et autres	-	Diamante et autres (2010)
Banane (Musa acuminat a)	LLHD	T=40à70°C	6 et 25	Page ; Silva et autres	-	Pereira et autres (2014)
Banane (Musa Spp)	LHCD	Temps intermittent=0 .5, 1.0et2.0h ; T= 70°C.V=0.55m/s ; RH=51%à60%	26	Peleg	-	Da silva et autres (2015)
Banane (Musa Sapientu m, shum)	OMD	d=1.8cm ; L=10cm ; T=25à55°C ; Cs= 30%à60% ; Nacl=0%à10%	26	Peleg	-	Mercali et autres (2010)
Banane(Mabonde)	DMO	h=5mm ;P=100à300W	21	Wang et Singh	-	Omolola et autres (2014)
Tranche de banane	ISD	h=5mm ;V=4.23m/min	21	Wang et Singh	-	Fdhel et autres (2011)
Tranche de banane	LHCD	T=50à80°C ; V=2.4m/s ; RH=4% à 25%	6 et 12	Page ; Logarith mique	-	Doymaz (2010)

Annexes

Tranche de basilic	TTD	T= 55à 65°C ; h= 0.33±0.08mm	12	Logarithmique	-	Kadam et autres (2011)
Feuilles de basilic beetroot	OSD TD et MD	- w=10mm ; h=10mm ;L=3mm ;T=55 à75°C ; P=540à1080W	7 13 et 12	Page modifiée (II) Two term	-	Akpinar (2006) Kaur et Singh (2014)
Tranche de melon amer (Momordica charantia)	LHCD	h=0.5à1.0cm ; T=50à80°C ; v=1.2m/s	6	Page	-	Chen et autres (2013)
Tranche blueberries	IR	Traitement=infusion ; h=10mm ; T=60à 90°C ; /=4000W/m ²	24	Thompson	-	Shi et autres (2008)
Carotte	LHCD	T=50à70°C ; V=1m/s ; RH=35%à 42%	20	Aghbashlo et autres	$k_1 = 54.18e^{\left(\frac{2991.2}{T_{abs}}\right)}$	Aghbashlo (2009)
Tranches de carotte	IFD	h=1.5mm ; T=50à100°C	17	Verma et autres	$k_1 = -4.27 \cdot 10^{-10}$ $e^{\left(\frac{-4766.7}{T_{abs}}\right)}$ k $= 0.001653^T$ $- 0.062201$ g $= 0.005636^T$ $- 0.184143$ a=0.37742	Botelho et autres (2011)

Annexes

Carotte (marc)	LHCD	T=60 à 75°C ; V=0.7m/s ; h=10mm	15	Hii et autres	$a=13905.60529-619.95731T+9.18210T^2 - 0.04516T^3$ $K=-0.21037+0.01238T-0.00022T^2$ $N=16.45430-0.69205T+0.01039T^2-0.00005T^3$ $C=13908.27+620.14037T-9.18481T^2+0.4517T^3$ $G=0.05894+0.00082T-0.00005T^2$	
Chili (Pickino)	OD et FBD	T=45 à 65°C ; V=2.4m ³ /min(FBD)	11	Midili et autres	-	Mihinduk ulasriy et autres (2013)
Fruit de palmier	MD	Pd=4.0 à 9.5w/g	6	Page	$k=0.8094Pd^{-1.2282}$ $n= -0.0189P^3d+0.374P^2d-2.3423 Pd +6.8142$	Darvishi et Hazbavi (2012)
Figue (Ficus carica)	TTD	T= 55 à 85°C ; V=0.5 à 3.0m/s	13	Deux termes	-	Babalys et autres (2006)
Ail (Allium sativum L)	LHCD	T= 50 à 70°C ; h=2 à 4mm	23	Weibull	$a=5.994251 \times \square^{-0.164} \exp\left(\frac{-516.322}{T_{abs}}\right)$ $b=6.02554 \times 10^{-6}$ $* \square^{1.065} \exp\left(\frac{3429.964}{T_{abs}}\right)$	Rasouli et autres (2011)
Pomme d'or	LHCD	T=60 à 80°C ; V=1 à 3m/s	11	Midili et autres	$a=1.4678-0.0067T$ $k=1.0835V^{0.1316}$ $k=1.0835V^{0.1316}$ $b=0.0030$	Menges et Ertekin (2006)

Annexes

Haricot vert	OSD	V=0.5à1.5m/s ; T=39.09à43.81°C ; RH=49.91%à65.06% ; Sr=752.10 w/m ²	6	Page	k=-0.3560-0.1407V n= 0.7832+0.0892 ln(V)	Yaldyz et Ertekyn (2007)
Haricot vert (phaseolus Vulgaris L)	LHCD	L=4±0.1cm ; T=50à70°C ; RH=8% A25%	6	Page	-	Doymaz (2005)
Pois vert	LHCD	T=55à75°C ; V=1.67m/s	24	Thompson	a=- 0.013046T ³ +2.54139T ² 162.3588T+3362.0605 b=- 0.001602T ³ +0.29470T ² 17.78930T+359.30710	Pardeshi (2009)
Poivre vert	OSD	V=0.5à1.5m/s ;T=38.56à42.5 2°C RH=42.20%à59.36% ;Sr=738 .54W/m ²	18	Approximation de diffusion	a=-1.6626+1.7015V k=0.3549-0.1489V B=0.5868-0.0172V	Yaldyz et Ertekyn (2007)
Olives vertes	LHCD	L=24à26mm ;d=19à21mm ; T=40 A70°C ;V+1.0m/s ;RH=15% ±2%	6	Demir et autres	-	Demir et autres (2007)
Aubépine	LHCD	V=0.8m/s ;T=50à70°C	11	Midili et autres	-	Unal et Sacilik (2011)

Annexes

Jacquier	TD	h=3mm ; T= 50à80°C	11	Midili et autres	$k=-1*10^{-5} T^2$ $+0.001T-0.058$ $n= 0.013T$ $b=-1*10^{-6} T^2+0.12$ $a=1.00$	Saxena et Dash (2015)
Jacquier	LHCD	h=5±1mm ; T=40à70°C ; triangle : W=5.5cm ; huit=6.5cm ; rectangle : W=3.0cm ; L=5.5cm ; racine : w=4cm ; L=4cm	19	Midili modifié et autres	-	Gan et Poh (2014)
Kiwi	LHCD	T=50à80°C ; V=0.5à2.0m/s ; h= 4 et 6mm ; RH=5%à20%	11	Midili et autres	-	Darici et Sen (2015)
Kiwi	LHCD	T=60à100°C ; h=5mm ; V=0.2 m/s	22	Diamante et autres	-	Diamante et autres (2010)
Kiwi	LHCD	h=0.006à0.4m ; T=30 à90°C	6	Page	$n= 0.796$ $K=4.756*10^{-5} T-$ $5.54*10^{-4}$	Simal (2005)
Tranches de mangue	CTD	T=40à80°C ; V=0.5à1.5m/s ; h=2à 6mm	6	Page	$k=0.0042517-$ $0.00012228T+$ $0.0000014281T^2$	Mohamma di et autres (2008)
Tranches de mangue	LHCD	T=60à80°C ; V=0.5m/s ; h=3mm	6	Page	-	Akoy (2014)

Punain Murthy et à la mangue et au gingembre)	MD	$h=1.77 \pm 0.02 \text{mm}$; $P=315 \text{à} 800 \text{W}$	11	Midili et autres	-	Manohar (2012)
Tranches de mangue	LHCD	$L=0.45 \text{m}$; $w=0.34 \text{m}$; $h=0.03 \text{m}$; $V=1.76 \text{à} 1.91 \text{m/s}$; $T=50 \text{à} 80^\circ \text{C}$	11	Midili et autres	-	Carzo et autres (2011)
Feuille de menthe	OSD	-	7	Page modifiée (II)	-	Akpinar (2006)
Tranches d'oignon	LHCD	$T=50 \text{à} 70^\circ \text{C}$; $V=0.5 \text{à} 2.0 \text{m/s}$; $h=5 \pm 0.1 \text{mm}$	6	Page	Vertical : $k=0.0099+2.7*10^{-4} T+3.3*10^{-4} V$ $n=1/24-0.0036T+0.037V$ Horizontal : $K=-0.022+5.5*10^{-4} T+2*10^{-4} V$ $n=1.23-0.0045T+0.034V$	El-mesery et Mwithiga (2012)
Tranches d'oignon	OSD	$h=12.5 \text{mm}$; $V=0.5 \text{à} 1.5 \text{m/s}$; $T=40.52 \text{ A} 44.32^\circ \text{C}$; $RH=48.91\% \text{à} 60.28\%$ $Sr=752.10 \text{W/m}^2$	13	Deux termes	$a=0.4866+0.6424 \ln(V)$ $k_0 =0.1557+0.1995 \ln(V)$ $b=0.5143-0.6424 \ln(V)$ $k_1 =0.1117-0.0992 \ln(V)$	Yaldyz et Ertekyn (2007)
Tranches d'oignon	IR+LHCD	$h=2 \text{à} 6 \text{mm}$; $T=60 \text{à} 80^\circ \text{C}$; $T=30 \text{ A} 50^\circ \text{C}$; $V=0.8 \text{à} 2.0 \text{m/s}$	8	Page modifiée (III)	$k=-0.04127+0.00055T-0.00027h+1.67704*10^{-6} T+0.00158V+3.086*10^{-5} t$	Kumar et autres (2006)

Annexes

Poivre	OSD	-	17	Verma et autres	-	Akpinar (2006)
Persil	MD	d=0.7±0.1cm ; L=6±1 cm ; P=180à 540	11	Midili et autres	k=0.0847 exp (0.0031P) n= 3*10 ⁻⁸ P ³⁻ 3*10 ⁻⁵ P ²⁺ 0.0136P-0.2157 b=8*10 ⁻⁸ P ³⁻ 0.0019P+0.0218 a=3*10 ⁻⁷ P ²⁻ 0.0003P+1.0474	Darvishi et autres (2014)
Tranches de kaki	CTD	T=50à70°C ; h=3à8mm ; V=2± 0.1m/s	11,6 et 23	Midili et autres ; Page ; Weibull	-	Doymaz (2012)
Ananas	FIR+HCD PSD	h=15mm ; I=1à5kW/m ² ; T=40à 60°C ; V=0.5à1.5m/s Blanchiment = 20s ; T=85°C ; v=0.8m/s	11 13	Midili et autres Deux termes	- -	Ponkham et autres (2012) Jazini et Hatamipour (2010)
Citrouille	LHCD	Traitement osmotique : h=2cm ; w=2cm ; L=2cm ; T=50à60°C	13 et 10	Deux termes (traité au sucre) Henderso n et Pabis modifié (prétraité)	-	Zenoozian et autres (2008)
Tranches de citrouille	OSD	h= 12.5cm ; V=0.5à1.5m/s ; RH= 45.00%à57.70% ; T=39.10à 43.63°C ; Sr=738.54W/m ²	18	Approximation de diffusion	a=0.8095 exp(-0.0794V) k=0.2082□ ^{-0.3032} b=0.6857 exp (0.4860V)	Yaldyz et Eretkyn (2007)

Annexes

Tranches de citrouille	TD	h=5mm ; d=35mm ; T=60à80°C ; V=1à1.5m/s	11	Midili et autres	a=0.966567+0.000184T+0.007014V k=0.005645-0.000095T+0.003791V n=0.572175+0.009074T-0.064652V b=0.000050-0.000001T-0.000024V	Akpinar (2006)
Tranches de citrouille (C max)	LHCD	T=30à70°C	6	Page	-	Guiné et autres (2011)
Citrouille (C max)	PPCD	T=50à70°C ; h=25mm ; d=20mm ; V=2.5m/s	11	Midili et autres	-	Schmalko et Perez (2009)
Citrouille (C pepo)	CTD	T=60à80°C ; h=10à30mm ; V= 1.5m/s	12	Logarithmique	-	Olurin et autres (2012)
Tranches de citrouille	CTD	T=50à60°C ; V=1.0m/s ; RH= 15% à 25%	12 et 7	Logarithmique Verma et autres	-	Doymaz (2007)
citrouille (C pepo L)	LHCD	T=40à60°C ; V=0.8m/s	15	Deux terme ; Logarithmique	-	Sacilik (2007)

Annexes

Citrouille (C moschata) 80°C	LHCD	h=3 à 7 mm ; V=1.16m/s ; T=50à	15	Hii et autres	a=0.761+0.0369h-0.00530T b=0.297+0.00454T-0.0405h k ₁ = 0.1528exp ^{2.6163} k ₂ =- 0.00501+0.000393T-(8.84 ^E -006T ²)+ (615 ^E -008T ³) n= -10.581+0.427T-0.00344T ²	Onwude et autres (2015)
Quercus	LHCD	T=50à70°C ; V=0.5à1m/s ; optimum : T=70°C et V=1m/s	6	Page	k=-0.7V ^{0.64} e ^($\frac{1}{T_{abs}}$) n=0.067V ^{0.64} e ^($\frac{1}{T_{abs}}$)	Tahmasebi et autres (2011)
Tranches de coing	LHCD	T=40à60°C ; RH=10% ; h=12mm ; V=2m/s	23	Weibull	α =- 0.150540+0.004924T-0.000045T ² b=- 1.231270+0.011399T-0.000120T ² k ₀ =0.264050-0.009648T+0.000320T ² n=1.504030-0.026073T+0.000320T ²	Tzempelikos et autres (2015)
Tranches de coing	LHCD	T=40à60°C ; V=1à3m/s ; RH=10%	6	Page	-	Tzempelikos et autres (2014)
Chili rouge	SDA	Prétraitement : T=40à65°C ; RH=10%à 60% ; V=0.12 à 1.02m/s	5	Newton	k=0.003484-0.000222T+3.66*10 ⁻⁶ T ² -0.007085RH+0.00572(RH) ² +0.002738V-0.001235V ²	Hossain et autres (2007)

Annexes

Safran	ID	T=60à110°C ;h=0.7mm	11	Midili et autres	-	Akhondi et autres (2011)
Menthe verte	ATB	T=40à50°C	11	Midili et autres	$a=6.40163-0.31813T + 0.00616T^2- 3.921010^{-5} T^3$ $k= - 1.49365+0.12232T- 0.00309T^2+2.4973310^{-5} T^3$ $b= - 0.11604+0.00739T- 1.55610^{-4} T^2+1.0810^{-6} T^3$ $n=25.89022- 1.79971T+0.04203T^2- 3.2032710^{-4}$	Ayadi et autres (2014)
Tranches de carambole	LHCD	T=60à80°C ; h=5mm	6	Page	-	Hii et ogugo (2014)
	TD	h=4mm ; T=50à80°C	14	Deux termes Exponentiel	-	Dash et autres (2013)
Pomme A noyau	LHCD	T=40à70°C ; h=8mm ; V=1.1± 0.2m/s	12	Logarithmique	$a=0.001T+0.945$ $k=1.49E-06T^2- 0.0001T+0.005$ $c=8E-05T^2- 0.01T+0.256$	Rayaguru et Routray (2012)
Poivron	IFSD	Prétraitement : /=600W/m ²	5	Newton	$k= 0.0042EA/M+0.0342T$	El-Beltagy et autres (2012)
Farci Aux fraises	OSD	V=0.5 à1.5m/s ; T=39.57à45.82°C ; RH=45.03%à63.40% ; Sr=752.10W/m ²	13	Deux termes	$a=0.6315-0.2957V$ $k_0 =0.0224 \exp (4.7396V)$ $b=0.3679+0.2962V$ $k_1 =0.0677-0.0117 \ln(V)$	Yaldyz et Ertekyn (2007)

Annexes

Tranches de tomate	STD ; OSD	T=22.4à35.6°C ; RH=14.5%à50.9% Sr=202.3à767/4W/m ²	18	Approximation de diffusion	a=0.1285+0.0206T+0.1299RH k=0.0373+0.000014T+0.00075RH	Sacilik et autres (2006)
--------------------	--------------	---	----	----------------------------	---	--------------------------

Résumé

Ce présent travail consiste en une étude bibliographique sur le séchage des produits alimentaires. Nous avons fixé l'objectif d'apporter les notions de bases sur le séchage, les cinétiques de séchage ainsi que la modélisation. Le procédé de séchage est une opération couplée de transfert de chaleur et de masse pour laquelle il est nécessaire de fournir de l'énergie. Le séchage a de multiples objectifs dans l'industrie agro-alimentaire, c'est pourquoi plusieurs types de séchoirs et de matrices de séchage ont été adaptés à différentes situations d'utilisation facile et pratique. Le meilleur moyen de caractériser le comportement au séchage d'un produit consiste à mesurer expérimentalement sa cinétique de séchage et les données fournies sont utiles pour la modélisation. Cette dernière permet l'optimisation des procédés de séchage et le choix approprié de la méthode de séchage. Plusieurs modèles ont été développés décrivant les cinétiques de séchage. Toutefois, la validation d'un modèle pour un produit donné, repose sur les résultats de l'analyse statistique.

Mots clés : Séchage, Produits alimentaires, Cinétiques de séchage, Modélisation.

Abstract

This present work consists of a literature review on food drying. We have set the objective to provide basic notions on drying, drying kinetics and modeling. The drying process is a coupled heat and mass transfer operation for which it is necessary to provide energy. Drying has multiple objectives in the food industry that is why several types of dryers and drying matrices have been adapted to different situations of easy and practical use. The best way to characterize the drying behavior of a product is to experimentally measure its drying kinetics and the data provided are useful for modeling. The latter allows the optimization of drying processes and the appropriate choice of drying method. Several models have been developed describing drying kinetics. However, the validation of a model for a given product is based on the results of statistical analysis.

Keywords: Drying, Food products, Drying kinetics, Modeling.