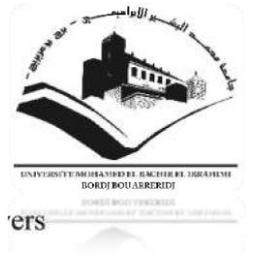




Populaire et Démocratique Algérienne République  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
بوعريريج برج الإبراهيمي البشير محمد جامعة

B.B.A. Ibrahimi El Bachir El Mohamed Université  
كلية علوم الطبيعة والحياة وعلوم الأرض والكون



Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers

قسم العلوم البيولوجية

Département des Sciences biologiques

# Mémoire

En vue de l'obtention du Diplôme de Master

**Domaine :** Sciences de la Nature et de la Vie

**Filière :** Sciences Biologiques

**Spécialité :** Qualité des Produits et Sécurité Alimentaire

## Thème

**Optimisation du séchage par microonde par modèles  
mathématiques des ombellifères**

**Présenté par :** Lakehal Randa

Taleb Hacine Ahlem

Devant le jury composé de :

<b>Présidente:</b>	M <sup>lle</sup> BELKASMI. F	MAA	(Univ BBA)
<b>Encadrant:</b>	M <sup>me</sup> HIHAT .S	MAA	(Univ BBA.)
<b>Examineur :</b>	M <sup>r</sup> GUISSOUS.M	MCB	(Univ BBA)

**Année universitaire : 2019/2020**

## **Remerciement**

*Au terme de notre travail, nous tenons à exprimer  
nos remerciements les*

*plus sincères Au bon Dieu pour la patience et la  
santé qui nous ont été utiles*

*tout au long de notre parcours.*

*Il nous est agréable de remercier notre promoteur*

***Mme HIHAT S** pour nous*

*avoir assurée l'encadrement*

*et pour son*

*aide précieuse et ces conseils avisées autant que*

*pour sa disponibilité que pour le*

*temps qu'elle nous a consacrée.*

*Nous remercions également **Mlle BELKACMI F** qui*

*a bien voulu présider le jury*

*Ainsi que **Mr GUISSOUS M** pour avoir accepté*

*d'examiner notre travail.*

*Enfin, on remercie profondément nos chers parents*

*pour leur soutien moral*

*et matériel durant nos études ainsi que toute*

*personne ayant contribué de près*

*ou*

*de loin à la réalisation de ce travail.*

**Randa et Ahlem**

## ***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 ma sœur Amina et son mari Lotfi*

*A mon frère Nacer Eddine*

*A ma nièce Nour*

*A mon fiancé Khaled*

*A toute ma famille et particulièrement ma tante*

*Salima et ses filles Marwa et Assil*

*A mes proches*

*A ceux qui m'ont soutenu de loin et de près*

*A mes amies (Rofia, Lina, Rayane et Bouthaina)*

***Randa***

## ***Dédicaces***

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes très chers parents et ma famille qui ont été toujours présents à mes côtés par leur amour, soutien et encouragements. A toi mon père, toi qui m'a toujours gâtée, à toi maman qui a tout le temps prié pour moi, et à mon beau père et ma mère qui m'ont toujours encouragé, Je vous serai éternellement reconnaissante.*

*A ma petite sœur Amina.*

*A mes frères Abderrahmane, Ibrahim, les jumeaux Alaa dine et Imed Edine.*

*Ceux que j'ai partagé les meilleurs moments de ma vie*

*À vous Mes amis Asma, Karima.*

*Toute la promotion qualité des produits et sécurité alimentaire 2019/2020.*

*A Ma binôme Randa et toute sa famille.*

***Ahlem***

## Tables des matières :

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
Résumé	
<b>Introduction</b>	<b>01</b>

### Partie théorique

#### *Chapitre I : Généralité sur la coriandre*

I.1. Etude de la famille des apiacées	03
I.2. Définition de la coriandre	03
I.3. Classification et noms vernaculaires	04
I.4. Botanique, origine et culture de la coriandre	04
I.5. Répartition géographique	05
I.6. Classification chimique de la coriandre	06
I.7. Différents antioxydants de coriandre	07
I.7.1. Antioxydant	07
I.7.2. les polyphénols	07
I.7.3. les flavonoïdes	08
I.8. Valeurs nutritionnelles	08
I.9. Les bienfaits thérapeutiques de la coriandre	08

#### *Chapitre II : Généralité sur le séchage*

II.1. Définition de séchage	11
II.2. Notion de l'activité de l'eau	11
II.3. Principe et objectif du séchage	11

II.4. Mécanismes intervenants au cours du séchage	12
II.4.1. Techniques de séchage et modes d'apport de chaleur	12
II.4.2. Transferts de matière	13
II.5. Séchage assisté par étuve	13
II.6. Séchage assisté par micro-onde	14
II.6.1. Définition de micro-onde	14
II.6.2. Appareillage de micro-onde	14
II.6.3. Mécanisme de chauffage par micro-onde	15
II.6.4. Le four à micro-onde	16
II.6.5. Le séchage par micro-onde	16
II.6.6. Les paramètres influençant le séchage par micro-onde	16
II.6.7. Les avantages et les inconvénients de séchage par micro-onde	17
II.7. Cinétique de séchage	17
II.8. Les facteurs qui augmentent la cinétique	18
II.9. Les modèles cinétiques	18

### ***Chapitre III : Etat de l'art sur l'optimisation du séchage par modèles mathématiques***

III.1. Séchage par micro-onde	21
III.2. Les modèles mathématiques	22
III.3. Optimisation de séchage par modèles mathématiques des ombellifères	23
III.3.1. Etude 1 : optimisation de séchage par modèles mathématiques des tranches de carottes	23
III.3.2. Etude 2 : optimisation de séchage par modèles mathématiques de persil	25
III.3.3. Etude 3 : optimisation de séchage par modèles mathématiques de la coriandre	26
<b>Conclusion</b>	27
Références Bibliographiques.	

## Liste des figures

<b>Figure 1</b> : chromolithographie représentant <i>coriandrum sativum L</i>	04
<b>Figure 2</b> : les différentes parties de l'espèce végétale <i>Coriandrum sativum L</i>	05
<b>Figure 3</b> : Structure chimique de l'acide chlorogénique	07
<b>Figure 4</b> : Structure de base des flavonoïdes	08
<b>Figure 5</b> : Mouvement d'un dipôle dans un champ électrique	12
<b>Figure 6</b> : schéma d'un four à micro-onde	15

### **Liste des tableaux :**

<b>Tableau I :</b> Constituants chimiques du fruit de <i>Coriandrum sativum L</i>	06
<b>Tableau II :</b> Coriandre, valeur nutritionnelle	08
<b>Tableau III :</b> Quelques modèles mathématiques utilisés pour décrire les cinétiques de séchage par rayonnements micro-ondes	18

## Liste des abréviations

**Aw** : Activité de l'eau.

**ADN** : Acide désoxyribonucléique.

**C.sativum** : *Coriandrum sativum L.*

**C. tordylium** : *coriandum tordylium.*

**IAA** : industrie agroalimentaire

**H** : Humidité.

**H<sub>2</sub>O** : Eau.

**g** : gramme.

**GHZ** : Giga hertz.

**MHZ** : Mégahertz (pour la mesure d'onde électromagnétique).

**Mg** : Milligramme.

**%** : Pourcentage.

**mm** : millimètre.

**W** : Watt.

**°C** : Degré Celsius.

**ANOVA**: Analyse de la variation à un seul critère de classification.

**mg**: Milligramme.

**MO** : Micro-onde.

**MS** : Matière sèche.

**P** : Puissance d'irradiation.

**R<sup>2</sup>**: Coefficient de détermination.

**RC** : capacité de réhydratation

### Résumé

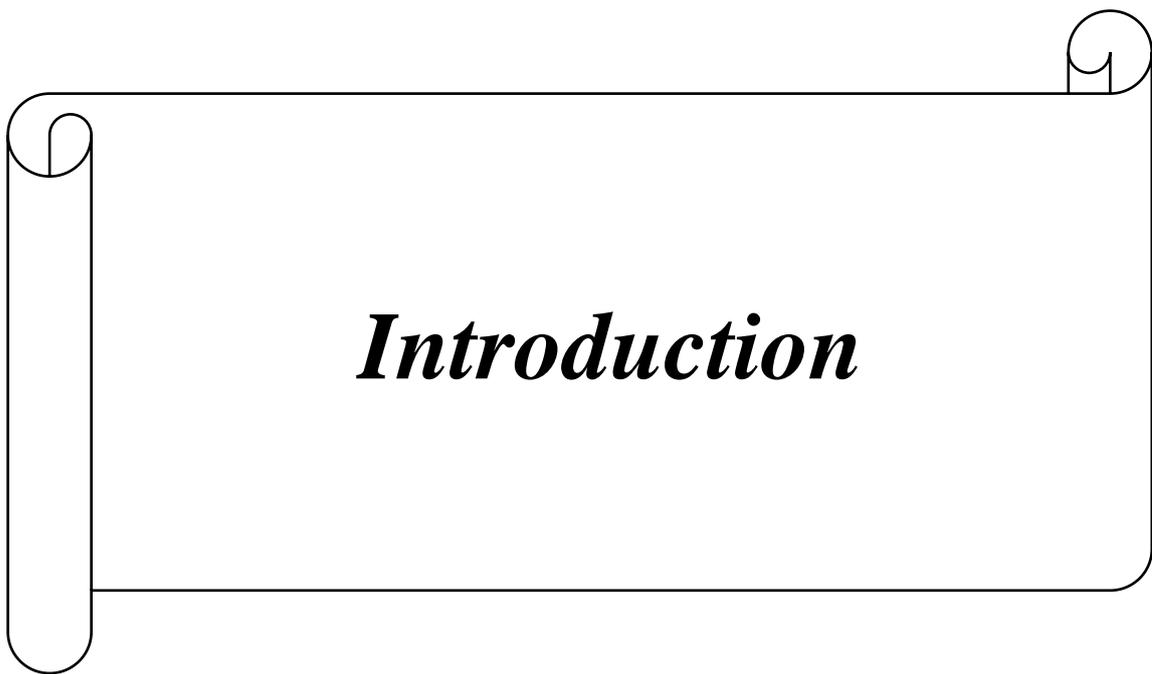
La coriandre ou *Coriandrum sativum* L. est une plante qui appartient à la famille des Apiacées. C'est une plante médicinale largement utilisée en médecine traditionnelle à des fins thérapeutiques à cause de sa richesse en composés actifs. Sa conservation pour son utilisation soit quotidienne, ou dans l'IAA et pharmaceutique nécessite des traitements thermiques. Dans cette étude, on fait une synthèse bibliographique sur le séchage par méthode innovante au micro-onde. Ce travail a pour objectif d'étudier l'optimisation de séchage par modèles mathématiques des ombellifères afin de déterminer le modèle mathématique qui décrit la variation du taux d'humidité en fonction du temps, pour évaluer les effets de la charge de matériau sur le temps de séchage, le taux de séchage, l'efficacité du séchage, la consommation d'énergie spécifique, et pour obtenir des valeurs de diffusivité à partir de la période de chute du taux de séchage. Ainsi que les Paramètres de couleur et les paramètres de réhydratation des feuilles séchées ont également été étudiées.

**Mots clés :** Coriandre (*Coriandrum sativum* L.), cinétique de séchage, micro-onde, taux d'humidité, consommation d'énergie, modèles mathématiques.

### Abstract

Coriander or *Coriandrum sativum* L. is a plant belonging to the family Apiaceae. It is a medicinal plant widely used in traditional medicine for therapeutic purposes because of its richness in active compounds. Its conservation for use either daily, or in the IAA and pharmaceutical requires heat treatments. In this study, drying is carried out by innovative microwave method. The aim of this work is to study drying optimization by mathematic models of umbelliferous trees, in order to determine the mathematical model which describes the variation of the moisture content as a function of time, to assess the effects of material loading on drying time, drying rate, drying efficiency, specific energy consumption, and to obtain diffusivity values from the drying rate drop period. As well as the color parameters and rehydration parameters of the dried leaves were also studied.

**Keywords:** Coriander (*Coriandrum sativum* L.), drying kinetics, microwave, humidity, energy consumption, mathematical models.



# ***Introduction***

Depuis l'aube de l'humanité, les plantes permettent à l'homme non seulement de se nourrir, se vêtir, se loger, se chauffer, se parfumer ... mais aussi de maintenir son équilibre, soulager ses souffrances, préserver et soigner les maladies qui nuisent à sa santé (Naouel, 2015).

Par ailleurs, les plantes aromatiques et médicinales jouent un rôle économique considérable dans le secteur des industries de l'agroalimentaire, de la parfumerie, des cosmétiques, et de la pharmacie (Brunton, 1999 ; Da cruz-cabrel et al., 2013).

La famille des Apiaceae appelées anciennement ombellifères comprend des plantes alimentaires comme la carotte, le céleri, le fenouil, ... et des plantes condimentaires comme le carvi, la coriandre, le cumin, ... C'est une famille riche en huile essentielle.

La Coriandre (*Coriandrum sativum* L.) qui appartient à la famille Apiaceae (Umbelliferae) est principalement cultivée à partir de ses graines tout au long de l'année (Mhemdi et al., 2011).

De nombreux produits agricoles, consommés en grandes quantités ne sont pas toujours disponibles toute l'année. Une grande partie de cette production agricole se prête parfaitement à une conservation par séchage pour assurer une continuité dans sa disponibilité (Lahmari et al., 2012).

Le séchage est l'une des méthodes les plus anciennes et les plus utilisées généralement pour la conservation des fruits, légumes et des produits aquatiques car il abaisse l'activité de l'eau, prolonge la durée de conservation (Huang et al., 2016), ralentissant la croissance microbienne, l'activité enzymatique, et la réaction chimique. (Monteiro et al., 2016). L'utilisation de diverses méthodes de séchage est pour une meilleure conservation de ces paramètres (Samoticha et al., 2016).

Depuis plusieurs années, un intérêt croissant s'est manifesté en faveur du séchage par micro-ondes. En effet, cette technique de conservation, économe en énergie, est susceptible de prolonger la période de disponibilité des produits alimentaires, et leur confère des propriétés sensorielles appréciées. De plus, elle constitue un outil facile à mettre en place en raison de son faible coût (Le et Jittanit 2015 ; Zhu, Liu et al., 2015).

Dans ce contexte, nous nous sommes orientés vers l'étude théorique de l'optimisation du séchage par modèles mathématiques de la coriandre. Le choix de la plante revient

sur le fait que la coriandre est une plante annuelle très utilisés en Algérie mais qui est très périssables. Depuis des décennies, la coriandre (*Coriandrum sativum* L.) est utilisée pour ses vertus culinaires et médicinales aussi bien pour ses feuilles que pour ses graines (**Momin et al., 2012 ; Ghedira et Goetz, 2015**). Elle offre des propriétés carminatives, stomachiques, antispasmodiques, bactéricides, fongicides et vermifuges, anxiolytique, anti- oxydantes...etc (**Ghedira et Goetz, 2015**).

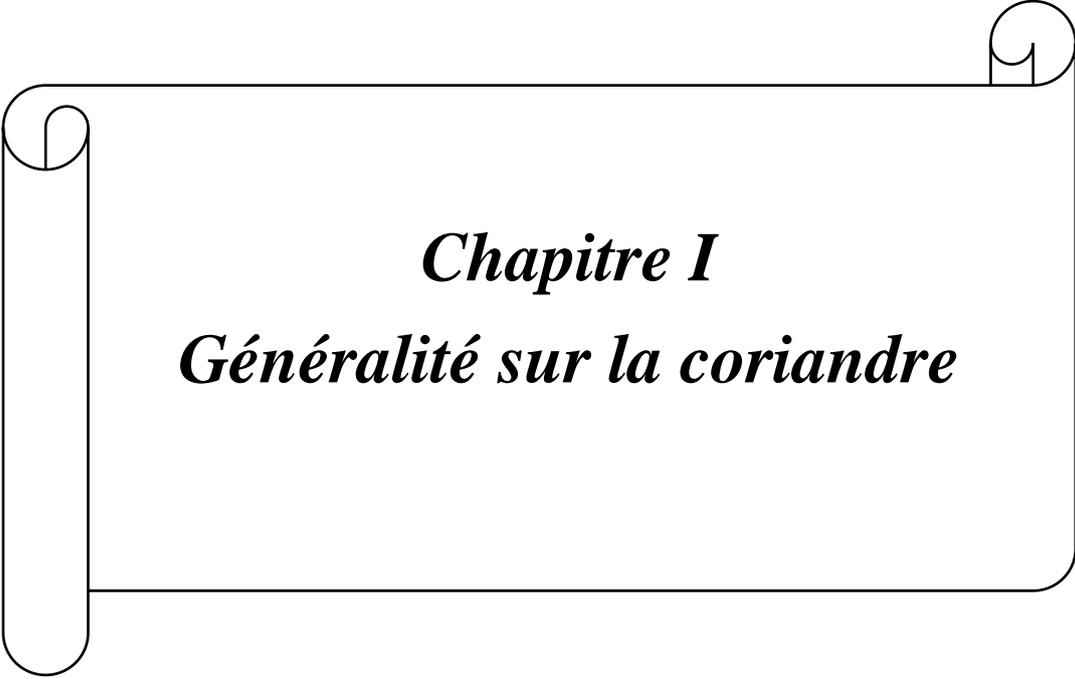
L'objectif de cette recherche était de déterminer l'influence de la puissance des micro-ondes sur la consommation d'énergie et la cinétique de séchage pendant la déshydratation par micro-ondes des coriandres adapter les données expérimentales sur l'humidité à plusieurs modèles mathématiques.

Pour cela, le présent manuscrit est structuré comme suit :

- Le premier chapitre présente une étude bibliographique et dresse un bilan des connaissances sur la matrice végétale étudiée.
- Le deuxième chapitre décrit les différentes méthodes de séchage (généralités, Cinétiques, modèles...).
- Le troisième chapitre résume les résultats des travaux antérieurs travaillant sur l'optimisation du séchage par microonde en utilisant des modèles mathématique.

L'étude s'achève par une conclusion générale qui dresse un bilan de l'importance et de l'impact du procédé de séchage utilisé sur l'humidité de la matrice, ainsi que le modèle adéquat, proposé pour la cinétique.

# *Partie théorique*



***Chapitre I***  
***Généralité sur la coriandre***

### I.1. Etude de la famille des apiacées :

Les Apiacées anciennement appelées Ombellifères, comprennent environ 3.000 espèces et réparties en 420 genres se trouve dans toutes les régions tempérées mais surtout dans l'hémisphère Nord. C'est une famille très homogène facile à reconnaître grâce à son inflorescence en ombelles composées. Paradoxalement, les espèces de cette famille sont assez difficiles à différencier les unes des autres. Les plantes de la famille des Apiacées sont essentiellement des plantes herbacées annuelles, bisannuelles, ou le plus souvent vivaces. L'appareil souterrain pérennant est très varié : racine pivotante, rhizome ou tubercule. La tige est ordinairement cannelée et creuse par résorption précoce de la moelle au cours de la croissance ; elle est dite fistuleuse. Les feuilles sont alternes, souvent très découpées. La nervation étant pennée et la découpe saquée, on parle de feuille pennatiséquée. La gaine est très développée ; chez certaines espèces, la feuille se réduit même à la gaine. La majorité des Apiacées sont des plantes aromatiques grâce à leurs sécrétions d'huile essentielle, Parmi les 420 genres de la famille d'Apiacée le genre *Coriandrum* (**Filliat et Paloma, 2012**).

### I.2. Définition de la coriandre :

La coriandre ou *Coriandrum sativum L.* fait partie de la famille des Apiacées (**Blade et al., 2016**). Elle se trouve en Europe méridionale et au Moyen-Orient. Elle est dotée de petites fleurs blanches, roses ou lavandes, de feuilles vertes et dentelées, de graines et enfin de fruits (**Ghedira et Goetz, 2015**). La coriandre, du grec Koris et Andros, et connue sous l'appellation de persil chinois ou arabe ou encore cilantro (**Blade et al., 2016**). L'avantage de la coriandre est qu'elle est comestible des feuilles à la racine. Certains l'appellent aussi punaise mâle car elle dégage une odeur comme l'insecte (**Bell, 1971**). En plus d'être une excellente épice, la coriandre est un puissant détoxifiant de métaux lourds (**Mokrane et Sihem, 2019**). Elle regorge aussi d'actifs antioxydants ainsi que la vitamine K nécessaire à la coagulation une protection contre le cancer (**Chithra et Leelamma, 2000**). Elle serait probablement liée à l'activité antioxydante de la coriandre. Il semblerait qu'elle protège contre la dégradation de l'ADN qui peut donner lieu à des cancers (**chithra et Leelamma, 2000 ; Tang et al., 2013**).

### I.3. Classification et noms vernaculaires :

La coriandre (*Coriandrum sativum* L.) est une plante herbacée annuelle de la famille des Apiacées (ombellifères). Elle comprend plus de 3000 espèces. La classification botanique de la coriandre selon **Quezel et Santa (1963)** est la suivante :

- Règne : Plantae.
- Embranchement : spermaphytes.
- Sous embranchement : Angiospermes.
- Classe : Dicotylédones.
- Ordre : Apiales.
- Famille : Apiaceae.
- Genre : *Coriandrum*.
- Espèce : *Coriandrum sativum*. L.

Divers appellations ont été attribuées à *C. sativum*. Nous citons quelques dénominations vernaculaires internationales : en arabe, Kusbar, en français, persil arabe, persil chinois et en anglais, coriander (**Mountian et all., 2001**).



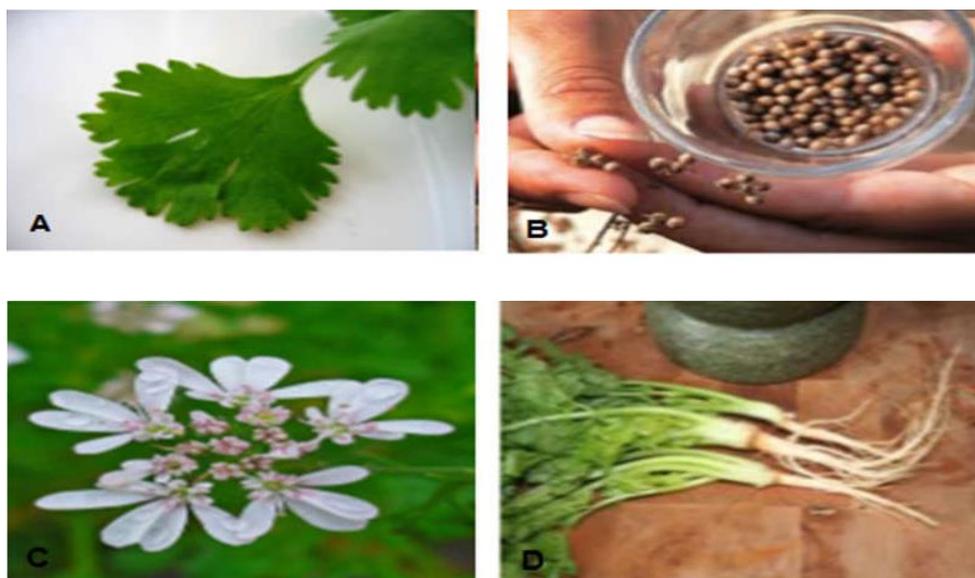
**Figure 1** : chromolithographie représentant *Coriandrum sativum* L. dans l'ouvrage du prof. Dr Otto Wilhelm Thomé Flora von Deutschland. Österreich und der Schweiz 1885, Gera Germany.

### I.4. Botanique, origine et culture de la coriandre :

La coriandre (*Coriandrum sativum* L.) appartient à la famille des Apiceae et au genre de *Coriandrum*. Il n'y a que deux genres connus de la plante : *C. sativum*. Et son relatif sauvage *C. tordylium*. La hauteur de la plante peut varier entre 20 et 140 cm, selon les conditions agro-climatiques. Les feuilles sont ovales, légèrement lobées et les sections des feuilles supérieures sont linéaires et plus divisées. Les fruits (graines et péricarpe) sont les composants les plus utilisés de la coriandre, les plus importants étant l'huile essentielle et

l'huile grasse (Shaw *et al.*, 2006). La coriandre, originaire d'Italie, est le actuellement cultivé en Europe centrale

et orientale, dans les régions méditerranéennes et en Asie (Barros *et al.*, 2012; Silva *et al.*, 2008). C'est une plante herbacée annuelle qui se cultive le mieux entre octobre et février. La floraison a lieu entre juin et juillet. À un stade précoce de croissance, la plante a besoin d'un climat frais et d'un temps chaud aux stades de maturité ultérieurs (Sahib *et al.*, 2013).



**Figure 2** : les différentes parties de l'espèce végétale *Coriandrum sativum* L. (Boutriche, 2017). A : Feuilles B: Graine C: Fleures D: Racines.

### I.5. Répartition géographique :

De façon générale la *Coriandrum sativum* L. Il est originaire du sud de l'Europe et de la région occidentale de la Méditerranée. Cette herbe largement utilisée est cultivée dans le monde entier et largement cultivé en Inde, en Russie, en Europe centrale, en Asie, Maroc (mahendre *et al.*, 2011 ; Pathak *et al.*, 2011) Hongrie, la Roumanie, la Bulgarie, la Turquie et l'Italie comme principaux pays exportateurs (Filliat *et Paloma*, 2012).

### I.6. Composition chimique de la coriandre :

La composition chimique de la coriandre est présentée sur le tableau ci-dessous (Tableau I).

**Tableau I :** Constituants chimiques du fruit de *Coriandum sativum L.* (Ghedira et Goetz, 2015).

<i>Familles de constituants chimiques</i>	<i>Constituants chimiques</i>	<i>Références</i>
<b>Huile essentielle 0,4 à 0,6%</b>	Linalol (coriandrol) 65.0–78%, Géranol 0.3–5.3%, $\alpha$ -Pinène 3–7%, $\gamma$ -Terpinène 1,5–8%, $\beta$ -Pinène 0.1–8.6%, p-Cymène 0,5–4%, Camphre 3–6%, Camphène traces–4.6%, (.)- Limonène 0.2–3.2%, acétate de Géranyl 0,5–4%, Terpinène- 4-ol tr–3.0%, $\alpha$ -Terpinéol 0.1–1,5%, Myrcène, limonène 1,5-5%, $\alpha$ et $\beta$ phellandrène, aldéhydes aliphatiques insaturés : décénal, décanal, décén-1- ol, trans-tridécène-(2)-al	<b>Wichtl et Anton, 2003 ; Brunton, 2009 ; Tisserand et al., 2014 ; Bonikowski, 2015 ; Clifford, 2000 ; Matasyoh, 2009 ; Ph. Eur. 6<sup>e</sup> éd</b>
<b>Flavonoïdes</b>	Quercétine, isoquercétine, hétérosides de la quercétine et du kaempférol, rutine, hyperoside, hespéridine	<b>Brunton, 2009 ; Melo et al., 2003 ; Cherg et al., 2008 ; Oganessian et al., 2007</b>
<b>Acides phénols</b>	Acides caféique férulique, gallique, chlorogénique, salicylique	<b>Melo et al., 2003 ; Oganessian et al., 2007</b>
<b>Huile grasse (13-21%)</b>	Triacylglycérols à acide pétrosélinique	
<b>Coumarines (traces)</b>	Esculétine, scopolétine, esculoside, umbelliférone, 4-Hydroxycoumarine	<b>Oganessian et al., 2007</b>
<b>Autres substances</b>	- Polysaccharides, - Thiamine, Riboflavine, Niacine, Vit.C, Vit.A.  - Béta-carotène, sitostérine - Calcium, phosphore.	<b>Clifford, 2000 ; Ceska, 1988</b>  <b>Brunton, 2009</b>

## I.7. Différents antioxydants de la coriandre :

### I.7.1. Antioxydant :

Un antioxydant est une molécule qui diminue ou empêche l'oxydation d'autres substances chimiques. Il existe différentes sortes d'antioxydants : des enzymes, des facteurs de transcription, des composés de bas poids moléculaire piégeant les radicaux libres. Parmi ces derniers, on distingue le glutathion, les vitamines (A, C, E), les polyphénols (Clémentine, 2013). La coriandre contient plusieurs composés antioxydants (Bajpai et al., 2005 ; Wangensteen et al., 2004), principalement des acides phénoliques (acide caféique, acide férulique, acide gallique et acide chlorogénique), mais aussi des terpénoïdes, des coumarines, des flavonoïdes (dans les fruits), et des caroténoïdes dans les feuilles (carotènes, xanthophylles : lutéine, zéaxanthine, cryptoxanthine) (Ghedira et Goetz, 2015).

### I.7.2. Les polyphénols :

Les composés phénoliques, ou polyphénols, constituent une famille de molécules organique largement présentes dans le règne végétal. Les polyphénols sont présents dans toutes les parties des végétaux supérieurs : racine, tiges, feuilles, fleurs, et fruits (Boizot et Charpentier, 2006). Ils sont caractérisés par la présence d'au moins d'un noyau benzénique auquel est directement lié au moins un groupement hydroxyle libre, ou engagé dans une autre fonction tels que : éther, ester, hétéroside... etc. (Bruneton, 1993 ; Lugasi et al., 2003).

Les principales classes de composants phénoliques sont : les acides phénoliques (acide caféique, acide hydroxycinnamique, acide chlorogénique), les flavonoïdes qui représentent plus de la moitié des polyphénols, les tanins, et les coumarines (King et Young, 1999 ; Tapiero et al., 2002).

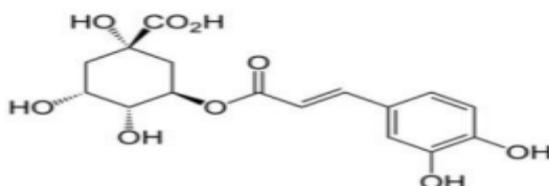


Figure 3 : Structure chimique de l'acide chlorogénique (Veberic et al., 2008).

### I.7.3. Les flavonoïdes :

Le nom flavonoïde proviendrait du terme flavus (flavus=jaune) (Karaali et al., 2004 ; Karunakaran et Kumaran, 2007). Les flavonoïdes dérivent de la voie shikimique. Le

précurseur de ces molécules est le 4-hydroxycinnamate-coenzyme A synthétisé à partir de phénylalanine (Wollgast et Anklam, 2000).

Les flavonoïdes ont tous la même structure chimique de base, ils possèdent un squelette carboné de quinze atomes de carbone constitué de deux cycles aromatiques (A) et (B) qui sont reliés entre eux par une chaîne en C3 en formant ainsi l'hétérocycle (C) (Emerenciano et al., 2007). Généralement, la structure des flavonoïdes est représentée selon le système C6-C3-C6 (Emerenciano et al., 2007).

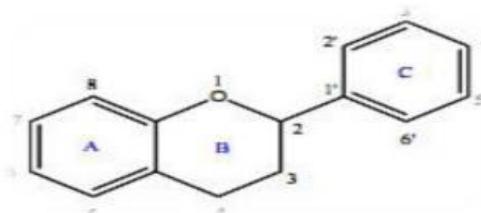


Figure 4 : Structure de base des flavonoïdes (Ghedira, 2005).

### I.8. Valeurs nutritionnelles :

La plante *Coriandrum sativum* L. possède une valeur nutritionnelle très importante et contient de nombreux nutriments et minéraux. (Tableau II).

Tableau II : Coriandre, valeur nutritionnelle (Santé Canada, 2010).

Teneur moyenne pour :	Feuille crue		Fruit	
	100 g	125ml (g)	100 g	5 ml (2g)
Eau (g)	92.21	7.97	8.86	0.16
Valeur calorique (Kcal)	23	2	298	5
Protéines (g)	2.13	0.18	12.37	0.23
Lipides (g)	0.52	0.04	17.77	0.33
Glucides (g)	3.67	0.31	54.99	1.01
Fibre alimentaires (g)	2.8	0.2	41.9	0.8

### I.9. Les bienfaits thérapeutiques de la coriandre :

Les propriétés fonctionnelles de la coriandre ne peuvent être sous-estimées. Toutes les parties de cette herbe sont utilisées comme agent aromatisant et / ou comme remèdes traditionnels pour le traitement de différents troubles dans les systèmes de médecine populaire de différentes civilisations (Sahib et al., 2013).

Elle peut désintoxiquer le corps des métaux lourds, car les substances qu'elle contient adhèrent aux substances toxiques, et permettent de les éliminer à travers l'urine et la transpiration (Momin et al., 2012).

L'aspect fonctionnel le plus important et bien caractérisé implique une activité antioxydante.

#### **I.9.1. Activité antioxydante :**

Il s'avère que la coriandre soit un puissant antioxydant, ses feuilles contiennent plus quantités d'antioxydants que les graines (Wangensteen et al., 2004). Les espèces réactives d'oxygène peuvent causer un stress oxydatif et, par conséquent, des dommages aux tissus et aux biomolécules (Barros et al., 2012). Sa teneur en antioxydants est attribuée à sa teneur élevée en pigments, en particulier en caroténoïdes. On a constaté que les caroténoïdes de son extrait présentaient un potentiel de récupération des radicaux hydroxyles plus élevé, protégeant ainsi les cellules contre les dommages oxydatifs (Divya, Peethambaran et al., 2012).

#### **I.9.2. Activité antibactérienne :**

Les éléments antioxydants de la coriandre pourraient également jouer un rôle dans l'activité antibactérienne contre *Bacillus subtilis* et *Escherichia coli* observé in vitro (Wong et kits, 2006). d'autres composés aliphatiques extraits des feuilles ont également montré des propriétés bactéricides contre *Salmonella choleraesuis*, en partie parce qu'ils s'agissent comme des tensioactifs non ioniques (kubo et al., 2004) .l'huile essentielle de coriandre est active sur *Streptococcus pyogenes*, *Staphylococcus aureus*, et le *S.aureus* méthicillinerésistant, avec une bonne tolérance cutanée. (Casetti et al., 2012 ; Ghedira et Goetz, 2015).

#### **I.9.3. Activité antidiabétique :**

Les graines de coriandre contiendraient des composés capables de stimuler la sécrétion d'insuline et d'augmenter l'entrée du glucose dans les cellules. Des études cliniques contrôlées sont toutefois nécessaire afin de vérifier si un tel effet se produit aussi chez l'humain (Momin et al., 2012 ; Ghedira et Goetz, 2015).

#### **I.9.4. Effet abaissement du cholestérol :**

Un des mécanismes d'action serait la diminution de l'absorption des acides biliaries dans l'intestin par l'effet de la coriandre, résultant aussi en une diminution du cholestérol dans l'organisme (Caroline Tudeau et al., 2006 ; Kansal, 2012 ; Momin et al., 2012).

**I.9.5. Effet anti cancer :**

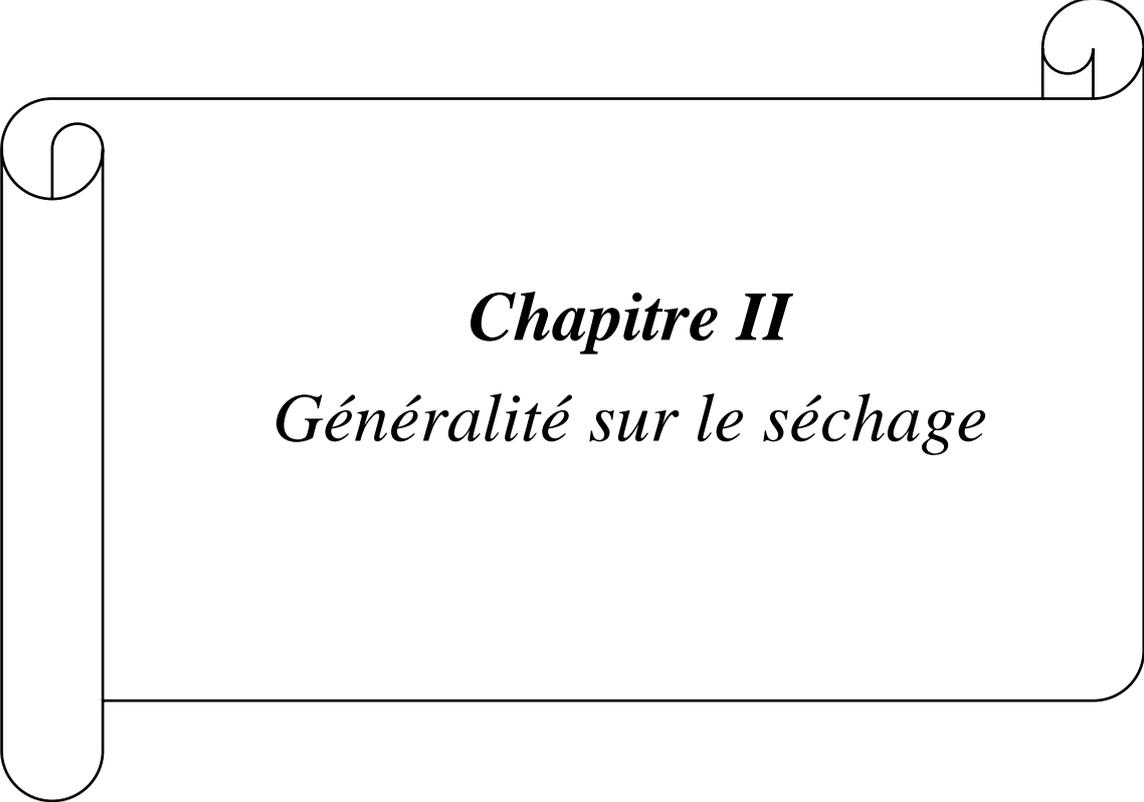
La coriandre joue un rôle protecteur contre les effets délétères dans le métabolisme des lipides chez le cancer du côlon. Cet effet peut être expliqué comme un des mécanismes possibles par lesquels la coriandre peut inhiber la tumorigénèse du côlon (**Chithra et leelamma., 2000 ; Momin et al., 2012**).

**I.9.6. Effet anti-anxiété :**

L'extrait aqueux des graines de *Coriandrum sativum* L. a un effet anxiolytique et pourrait avoir des effets sédatifs et relaxant musculaire (**Emamghoreishi et al., 2005 ; Momin et al., 2012**).

**I.9.7. Utilisations traditionnelles :**

En Egypte, la coriandre est connue pour ses feuilles et ses graines sèches. Elle est utilisée dans le traitement de la fièvre, des diarrhées, des vomissements, des indigestions et comme stomachique et carminatif. La plante entière est préconisée comme digestif, diaphorétique et stimulant de la puissance masculine (**Khare, 2008 ; Momin et al., 2012 ; Ghedira et Goetz., 2015**). La coriandre est aussi prise pour induire le sommeil. Additionnée de miel, elle est appliquée en cas de fracture osseuse. Elle entre pour traiter l'herpès (**Manniche, 2006 ; Momin et al., 2012 ; Ghedira et Goetz, 2015**).



***Chapitre II***  
*Généralité sur le séchage*

## II.1. Définition de séchage :

Le séchage est une opération qui consiste à réduire le taux d'humidité contenu dans un aliment (Abbasi et Azari, 2009 ; Ding et al., 2012 ; Jelled et al., 2015), c'est la méthode la plus répandue en agriculture pour la conservation des fruits et légumes (Alibas, 2014).

Il consiste à l'évaporation de l'eau et de composés volatils, réduisant ainsi la croissance des micro-organismes et des réactions chimiques non désirées, afin d'augmenter la durée de vie du produit. Il aide à obtenir un produit sec et homogène à l'extrémité du séchage (Abouo, 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 et al., 2010).

Cependant, le processus de séchage peut provoquer des dommages thermiques et de graves modifications des propriétés physiques, chimiques et organoleptiques de la plante aromatique. Par conséquent, le choix de la méthode de séchage est très important (An et al, 2016). Cette opération fait intervenir deux phénomènes : un transfert de chaleur vers la matrice pour faciliter la vaporisation de l'eau, et un transfert de matière (fréquemment de l'eau liquide pour le transfert interne et de la vapeur d'eau pour le transfert externe) de la matrice vers l'atmosphère environnante (Ertekin et Yaldiz, 2004).

## II.2. Notion de l'activité de l'eau :

L'activité de l'eau, définie comme rapport de la pression de vapeur d'eau (P) du produit à la pression de vapeur d'eau pure (P<sub>0</sub>) dans les mêmes conditions (la température) (Kerdudo, 2014).

$$A_w = P/P_0$$

Au cours du séchage, l'eau libre part en premier, puis l'eau est de plus en plus liée. Il ne reste à la fin qu'une eau résiduelle très liée, à une teneur en eau acceptable propre à chaque produit, et qui constitue la teneur objective en eau du séchage (Chkir, Balti et al., 2015).

## II.3. Principe et objectif du séchage :

### II.3.1. Principe :

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).



**Figure 5 :** Mouvement d'un dipôle dans un champ électrique (Singh et Heldman, 2001).

### II.3.2. Objectif

L'objectif principal du séchage est de convertir des denrées périssables en produits stables par abaissement de l'activité de l'eau (**aw**). Dans le but d'interdire ou de minimiser toute activités de détérioration microbienne, biochimique et chimique (Alibas, 2007). En dehors de son premier objectif, le séchage permet de (Bonazzi et Bimbenet, 2003 ; Li, Raghavan et Orsat, 2010) :

- ❖ Augmenter la durée de conservation de produit alimentaire, ainsi que, leurs qualités organoleptiques ;
- ❖ Réduire la masse et le volume du produit afin de faciliter leurs transports, stockage et manutention ;
- ❖ Donner une structure, une présentation ou fonctionnalité particulière aux produits ;
- ❖ Stabiliser les produits agricoles et amortir les caractères de certaines activités.

### II.4.Mécanismes intervenants au cours du séchage

Le séchage est une opération complexe qui met en jeu des transferts couplés de matière (d'eau essentiellement) et de chaleur (Mujumdar, 2014).

#### II.4.1. Techniques de séchage et modes d'apport de chaleur :

La diversité des matériaux à sécher (nature, taille, forme) et des capacités à assurer, les spécificités de traitement à respecter (contraintes physico-chimiques ou biologiques) sont la cause de l'existence d'une très grande variété de techniques (Zidani, 2009). Les principales techniques de séchage décrites dans la littérature sont : la lyophilisation, le séchage au soleil, le séchage par ultrasons et le séchage par microondes (Nowacka, Wiktor et al., 2012 ; Calvache, et al. 2015 ; Sallam, Aly et al., 2015 ; Warning, Arquiza et al., 2015).

Les techniques de séchage sont souvent classées suivant le mode de transmission de la chaleur. On distingue alors :

- ❖ **Le séchage par convection ou séchage direct** : l'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau est apportée par un gaz chaud qui circule au contact du matériau à sécher. Ce dernier joue aussi le rôle de vecteur transportant la vapeur produite hors de l'enceinte de séchage (Esfahani, Vahidhosseini et al., 2015).
- ❖ **Le séchage par rayonnement** : l'énergie est apportée par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques (Wang, Zhang et al., 2015).
- ❖ **Le séchage par conduction ou séchage indirect** : la chaleur est transmise principalement par conduction. Le séchage est effectué en mettant directement le matériau en contact avec une surface chaude (enveloppe, plaque, ...) (Zhu et Hummer, 2012).

#### II.4.2. Transferts de matière :

Le séchage se distingue des autres opérations de déshydratation par le fait que l'eau est enlevée du produit exclusivement par évaporation. Le processus doit, ainsi, avoir pour force motrice le gradient de la pression partielle de vapeur d'eau entre la surface du produit et le milieu extérieur (Allaf et al., 2012). Le milieu extérieur doit également assurer un débit de chaleur permettant de<sup>2+</sup> nécessaire à la vaporisation de l'eau (Bonazzi and Bimbenet, 2003).

#### II.5. Séchage assisté par étuve :

Dans le cas du séchage par étuve, l'air apporte au produit une partie au moins de l'énergie nécessaire à la vaporisation ; et donc l'eau sera évaporée sans ébullition sous l'effet du gradient de pression partielle d'eau. La vapeur d'eau est transférée par conduction et convection du produit dans le milieu ambiant et est ensuite entraînée par le gaz (Bonazzi et Bimbinet, 2003).

Il faut préciser la température de l'étuve, le temps, et la taille de l'échantillon à tester. Même si cette dernière n'est pas en général critique (Vasseur, 2009).

Ce type de séchage présente plusieurs avantages (Bimbenet et al., 2002 ; Mokrane et sihem, 2019)

- ❖ 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.

Néanmoins, plusieurs chercheurs ont souligné que le séchage conventionnel (**Yongsawatdigul et Gunaskaran, 1996 ; Freng et Tang, 1998 ; Maskan, 2000 ; Gowen et al., 2008**):

- ❖ Provoque une dégradation importante de la qualité du produit tel que : la couleur, la texture, la flaveur, les nutriments,
- ❖ Longue durée du séchage,
- ❖ Sévère rétrécissement, implique souvent une réduction de transfert de l'humidité et parfois réduction de transfert de chaleur.

## **II.6.Séchage assisté par microondes :**

### **II.6.1. Définition des micro-ondes :**

Les micro-ondes ou hyperfréquences sont des ondes électromagnétiques non ionisantes, composées d'un champ électrique et d'un champ magnétique. Les fréquences des micro-ondes se situent dans le domaine des fréquences allant de 300 MHz à 300 GHz ce qui correspond à une longueur d'onde de 1 millimètre à 1 mètre. La fréquence la plus utilisée est 2450 MHz correspondant à la fréquence de la majorité des magnétrons des fours micro-ondes de cuisine ayant une puissance de 600 à 1000 Watts et une longueur d'onde dans l'air de 12,2 cm (**Chandrasekaran, Ramanathan et al., 2013**).

### **II.6.2. Appareillage de Micro-onde :**

Un four micro-ondes est constitué de trois éléments principaux (**Eskilsson et Bjorklund, 2000 ; Mandal et al., 2007**):

- ❖ Un générateur de micro-ondes, aussi nommé magnétron, qui génère les microondes à partir d'énergie électrique.
- ❖ Un guide d'ondes métalliques qui propage les micro-ondes du magnétron à l'échantillon.
- ❖ Une cavité dans laquelle le réacteur sera placé.

En outre, de nombreux éléments peuvent être ajoutés et adaptés en fonction des besoins de l'expérience.

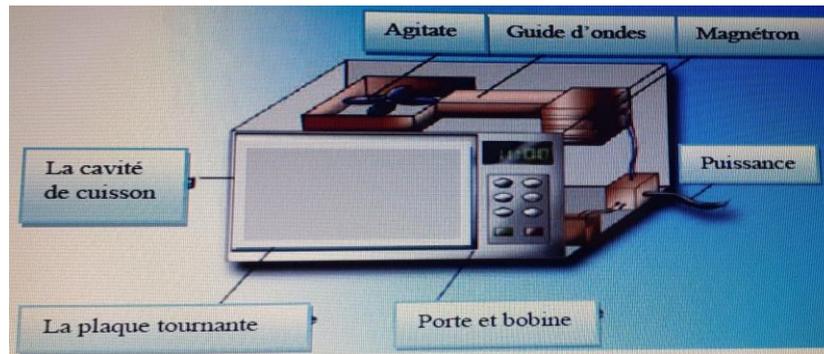


Figure 6 : schéma d'un four à micro-onde (Mathavi et al., 2013).

### II.6.3. Mécanisme de chauffage par micro-ondes :

Le transfert de chaleur sous chauffage micro-ondes est complètement inversé par rapport au chauffage conventionnel. La chaleur du chauffage conventionnel se transmet de l'extérieur vers l'intérieur. Sous chauffage micro-ondes, le volume traité devient lui-même source de chaleur. On parle de dégagement de la chaleur de l'intérieur vers l'extérieur (Chandrasekaran, Ramanathan et al., 2013).

Deux types de mécanismes sont à l'origine de l'échauffement, le premier est relatif à la présence de charges libres, le deuxième est lié à la nature polaire des molécules.

**Dans le premier cas**, les charges électriques libres (ions) soumises à un champ électrique  $E$ , vont migrer dans le sens du champ et sont à l'origine d'un courant de conduction. Il s'agit du mécanisme de conduction ionique. Les oscillations de ces charges, gênées par la présence de molécules fixes, produisent un échauffement par chocs.

**Dans le deuxième cas**, les matériaux composés de molécules formant des dipôles électriques, de répartition généralement aléatoire, s'orientent dans le sens du champ électrique extérieur imposé. Dans le cas d'un champ électrique alternatif, les dipôles changent «rapidement» de sens et la haute fréquence génère un mouvement aléatoire traduisant ainsi une haute température du système (Chandrasekaran, Ramanathan et al., 2013).

### II.6.4. Le four à microonde :

Le chauffage par micro-ondes se rapporte à l'utilisation d'ondes électromagnétiques afin de produire de la chaleur dans le matériel à sécher. Le fonctionnement d'un four à microonde est simple, l'énergie électrique apportée alimente le magnétron qui convertie l'énergie électrique en champ électromagnétique et par un guide d'onde (tube rectangulaire en métal), les ondes produites sont dirigées vers l'agitateur d'onde et pénètrent dans l'enceinte métallique où se trouve l'aliment à chauffer sur une plaque tournante, ce qui permet au produit alimentaire

d'être exposé aux ondes qui pénètrent l'aliment pour atteindre les molécules d'eau (**Mathavi, Sujatha et al., 2013**).

#### **II.6.5. séchage par micro-onde :**

Ce type du séchage est une méthode efficace de temps et d'énergie qui peut améliorer la qualité du produit dans certains cas (**Li et al., 2010**). Le fonctionnement d'un four à micro-onde est simple, l'énergie électrique apportée alimente le magnétron qui convertit l'énergie électrique en champ électromagnétique et par un guide d'onde (tube rectangulaire en métal), les ondes produites sont dirigées vers l'agitateur d'onde et pénètrent dans l'enceinte métallique où se trouve l'aliment à chauffer sur une plaque tournante, ce qui permet au produit alimentaire d'être exposé aux ondes qui pénètrent l'aliment pour atteindre les molécules d'eau (**Mathavi, Sujatha et al., 2013**).

Le séchage par micro-onde est identique à celui du chauffage haute fréquence, il se caractérise par l'absorption d'un rayonnement électromagnétique par le produit à chauffer (**Roussy et al., 2003**). Les vagues électromagnétiques agissent l'une sur l'autre directement avec des particules ioniques et dipolaires, entraînant l'excitation et le frottement (**Li et al., 2010**).

#### **II.6.6. Paramètres influençant le séchage par microondes :**

##### **❖ Propriétés diélectriques des aliments**

Dans le traitement microondes, seules les propriétés électriques du matériel à chauffer sont importantes pour la dissipation de l'énergie électrique en chaleur.

##### **❖ Puissance microondes dissipée**

La puissance microondes est en réalité une densité de puissance (ou puissance volumique) dissipée dans le produit. L'énergie microondes en elle-même n'est pas une énergie thermique.

La chaleur provient plutôt de la conséquence de l'interaction entre l'énergie des microondes et le matériau (**Copson, 1975**).

##### **❖ Profondeur de pénétration des microondes**

L'absorption progressive de la puissance est caractérisée par la profondeur de pénétration ( $dp$ ). Elle est définie comme la profondeur dans le matériau pour laquelle le transfert de l'onde a été réduit de 37% par rapport à la puissance entrante (**Buffler, 1993**).

### ❖ Effet du facteur de perte

Le facteur de perte  $\varepsilon''$  d'un matériau varie avec sa température, sa teneur en eau et la fréquence du champ électrique qui lui est soumis (Sosa-Morales et al., 2010).

## II.6.7. Les avantages et les inconvénients de séchage par micro-onde :

### II.6.7.1. Les avantages

Le séchage assisté par microonde présente plusieurs avantages dont : Selon (Al-Duri et McIntyre, 1992 ; Giese, 1992 ; Kharisov et al., 2012 ; McSweeney et Seetharaman, 2015 ; Wray et Ramaswamy, 2015).

- Rapidité : Le séchage aux microondes réduit considérablement le temps de séchage à plus de 99%, quand il est comparé au séchage au soleil et à l'étuve ;
- Sélectivité : chauffage sélectif des parties intérieures de l'échantillon contenant l'humidité ;
- Amélioration de l'efficacité du séchage, aussi bien que la qualité de quelques produits déshydratés.
- Réduction maximale de la consommation d'énergie suite à la spécificité de l'action des radiations micro-ondes.
- Facilité d'utilisation.
- Combinaison avec d'autres méthodes de séchage.

### II.6.7.2. Les inconvénients

- Son coût élevé,
- La nécessité de l'associer à un séchage à air chaud. (Simon, 2012)

## II.7. Cinétiques de séchage :

Plusieurs théories et modèles ont été élaborés pour aborder les cinétiques de séchage et appréhender les lois physiques qui contrôlent les transferts. La complexité des mécanismes mis en jeu et le caractère variable des produits (nature, forme, propriétés physiques) empêchent de trouver un modèle unique susceptible de représenter toutes les situations. Il n'est pas étonnant dans ces conditions que les courbes caractéristiques de la cinétique de séchage présentent Plusieurs étapes qui, individuellement et au cours d'une même opération, sont contrôlées par différents phénomènes de transfert (Kavak Akpınar, Bicer et al., 2006).

Quelle que soit la nature du produit et l'opération de séchage adoptée, l'étude expérimentale de la cinétique consiste à enregistrer l'évolution de sa masse, 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) (Moss et Otten 1989).

### II.8. Les facteurs qui augmentent la cinétique : (Zidani, 2009)

- La diminution de l'humidité absolue de l'air de séchage.
- L'élévation de la température de l'air de séchage.
- L'augmentation du coefficient de transfert thermique par une augmentation de la vitesse de circulation de l'air.
- L'augmentation de la surface spécifique du produit, ce qui entraîne une augmentation de la surface d'échange. Pendant cette période. La nature de solide et sa structure interne (pores, interstices) n'intervenant pas.

### II.9. Les modèles mathématiques de cinétiques :

La modélisation a pour but de déterminer le modèle mathématique qui décrit la variation du taux d'humidité (M) en fonction du temps.

Le principe de la modélisation est basé sur un ensemble d'équations mathématiques qui peuvent caractériser correctement le système. En particulier, la solution de ces équations doit permettre la prédiction des paramètres du processus en fonction du temps en tout point, basé uniquement sur les conditions initiales (Kavak Akpınar, Bicer et al., 2006).

Sur le tableau ci-dessous sont consignés quelques modèles de cinétiques de séchage des matrices alimentaires.

**Tableau III :** Quelques modèles mathématiques utilisés pour décrire les cinétiques de Séchage par rayonnements micro-ondes.

Modèle	Equation du modèle	Matrice	Référence
Newton	$MR = \exp(-kt)$	Kiwis	(Pathare et Sharma, 2006).
Henderson et Pabis	$MR = a \cdot \exp(-kt)$	Oignon	(Zarein, Samadi et al., 2015).

Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Cacahuètes	(Moss et Otten, 1989).
Wang et Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	Pomme	(Sharma et Prasad, 2004).
Logarithmique	$MR = a \cdot \exp(-kt) + b$	Pomme	(Zarein, Samadi et al., 2015).
Midilli et al Modified	$MR = \exp(-kt^n) + bt$		
Modified page	$MR = \exp(-kt^n)$		
Modified page equation-II	$MR = \exp(-c(t/L^2)^n)$		
Two-term	$MR = \exp(-k_1t) + b \exp(-k_2t)$	Ail	(Başlar, Kılıçlı et al., 2014).
Parabolique	$MR = a + b + ct^2$		

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e}$$

**MR** : Taux d'humidité (u.a).

**M** : Taux d'humidité restant instantané (%).

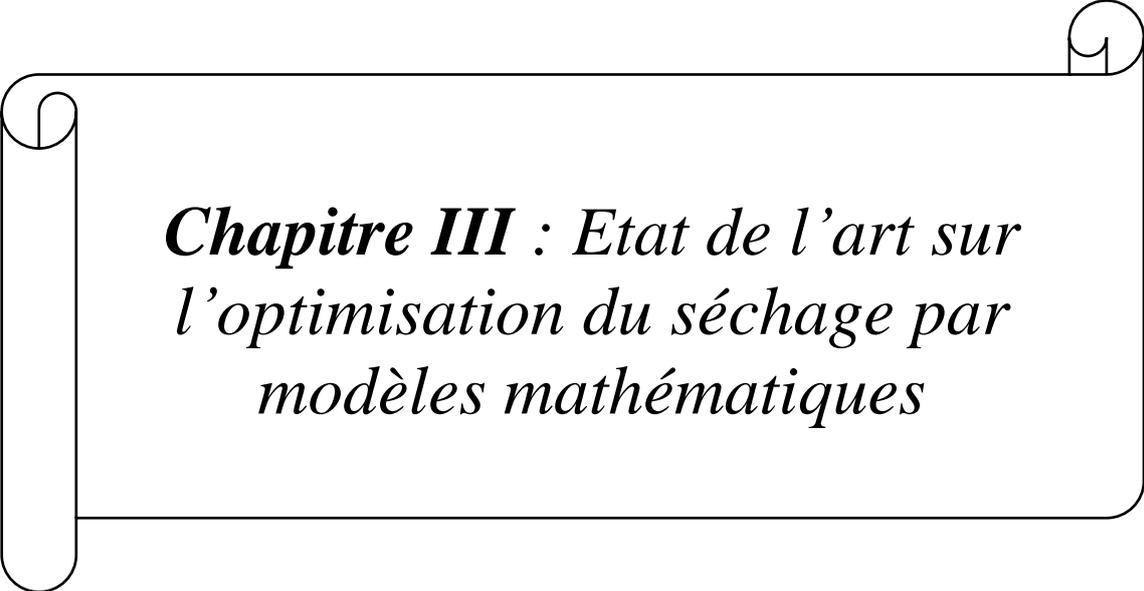
**M<sub>0</sub>** : Taux d'humidité initiale (%).

**M<sub>e</sub>** : Taux d'humidité à l'équilibre (%).

**K** : la constante de vitesse.

**n** : paramètre de l'équation.

**t** : le temps.



***Chapitre III : Etat de l'art sur  
l'optimisation du séchage par  
modèles mathématiques***

### **III.1. Séchage par micro-onde :**

De nombreuses études ont été réalisées sur le séchage par micro-ondes ou le séchage assisté par micro-ondes pour une grande variété de produits alimentaires. Les références et les sujets de certaines de ces études sont :

- Lait écrémé, lait entier, poudres de caséine, beurre et séchage des pâtes fraîches, **Soysal (2004)**
- Séchage du persil, **Soysal (2005)** et **Ozbek et Dadali (2007)**.
- Séchage à la menthe, **Erdem (2006)**.
- Séchage du poivron rouge, **Sarimeseli (2011)**.
- Séchage des feuilles de coriandre, **Tulasidas (1997)** et **Kassem et al. (2011)**.
- Séchage du raisin, **Liamkaew et al. (2008)** et **Alibas (2007)**.
- Séchage de citrouille, **Workneh et al. (2011)**.
- Séchage de la tomate, **Miller et Braddock (1982)**.
- Séchage des écorces d'agrumes, **Evin (2011)**.
- Séchage des rosiers, **Dadali et Ozbek (2008)**.
- Séchage des poireaux, **Ozkan et al. (2007)**.
- Séchage des épinards, **Dadali et al. (2007)**.
- Séchage de gombo, **Işık et al. (2011)**.
- Séchage des lentilles, **Albanese et al. (2006)**.
- Séchage des pommes de terre, **Inchuen et al. (2008)**.
- Séchage de la pâte de curry rouge thaïlandais, **El Hana (2008)** et **Wang et al. (2007)**.
- Séchage de pomme **Feto (2005)**.
- L'application de microonde sur l'alimentation, **Koné et al. (2013)**.
- Amélioration de la qualité des aliments par micro-onde, **Mechlouch et al. (2014)**.
- Séchage des cubes de carottes, **huang et al. (2016)**.
- Séchage de banane, **Monteiro et al. (2016)**.
- Séchage des myrtilles, **Samoticha et al. (2016)**.

D'après ces études on conclut que le séchage est l'un des méthodes les plus anciennes, utilisées et efficaces pour la conservation des fruits et des légumes. Particulièrement la technique de séchage par micro-onde qui assure la rapidité, sélectivité, facilité d'utilisation.

### **III.2. Les modèles mathématiques :**

Les modèles physiques et mathématiques sont importants pour établir l'influence des principales variables de processus sur la qualité du produit final, afin d'appliquer un contrôle de production efficace. Cet objectif peut être atteint par la mise en place d'un modèle global, capable de simuler ce qui se passe pendant le processus et donc de prédire les valeurs de propriétés souhaitées. Plusieurs modèles mathématiques ont été développés et rapportés dans la littérature pour le séchage par micro-onde.

Plusieurs auteurs (**Chemkhi et al., 2005; Karim et Hawlader, 2005 ; Migliori et al., 2005 ; Yang et al., 2001**) ont étudiés et modélisés le processus de séchage convectif pour différents aliments. Les modèles proposés consistent en des bilans de masse, de chaleur et des équations pour décrire le phénomène de rétrécissement. L'hypothèse principale étant : le médium était considéré comme biphasique (solide et liquide) ; les distributions initiales d'humidité et de température étaient considérées comme uniformes et la condition d'équilibre thermodynamique à l'interface air-échantillon, qui est supposé coïncider avec le front d'évaporation. **Barba (2005)** a rapporté un code mathématique capable de résoudre numériquement quelques équilibres généralisés d'équations de transfert de chaleur et de masse. Le code, après validation, a été appliqué pour décrire les aliments dans l'enquête DSC (Differential Scanning Calorimetry).

Le code a été construit pour gérer différents types de conditions limites, des coefficients variables, des problèmes multiples, différents types de termes de génération, y compris la production d'énergie diélectrique qui a lieu pendant le chauffage par micro-ondes. **Soysal et al. (2006)** ont étudiés le séchage par micro-ondes et proposés un ajustement empirique des données expérimentales des courbes de séchage convectif. **Datta et Raskesh (2008)** ont proposés un modèle 3D composé par les équations de Maxwell résolues à l'état stationnaire à l'intérieur de la cavité du four, de l'échantillon et le momentum, transfert de chaleur et de masse à l'intérieur de l'échantillon. Les trois phases incluses dans le modèle des milieux poreux étaient l'eau solide, l'eau liquide et le gaz. Pour l'équilibre du momentum, l'équation de Darcy a été utilisée pour chaque phase dans les milieux poreux.

Le modèle formulé par **Renshaw (2009)** décrit la déshydratation de la denrée alimentaire par l'évaporation, les phénomènes de transport et le chauffage RF. Un modèle 2D a été développé. L'auteur a considéré l'évaporation à l'intérieur de l'échantillon et le champ électromagnétique a été étudié à l'état transitoire. **Kowalski et al. (2010)** ont présentés un modèle mathématique de séchage par micro-ondes-convective et sa validation. Ils ont considéré un matériau en trois phases et ont négligé la déformation (rétrécissement). Les bilans d'énergie et de masse sont rapportés. Ils ont considéré que la quantité d'énergie de micro-onde absorbée par le matériau de séchage s'est décomposée exponentiellement avec la distance. Les résultats théoriques reflètent qualitativement bien les données. **McMinn et al. (2003)** ont adaptés l'analyse de modèle proposé par **Dincer et Dost (1995)** pour évaluer les caractéristiques de transfert de masse. **Acierno et al. (2004a)** ont analysés les phénomènes de transport survenant pendant le chauffage par micro-ondes d'un corps dans un applicateur monomode à micro-ondes cylindrique. Une équation transitoire de bilan énergétique 1D a été adoptée pour décrire les processus de chauffage en présence de réaction chimique, le champ électromagnétique a été résolu en mode TM<sub>010</sub> (mode magnétique transversal, c.-à-d. la propagation du champ magnétique n'a pas de composant axial). La chaleur et le transfert de masse induits par le chauffage à micro-onde dans une cavité à micro-ondes fermée multimode ont été observés et modélisés dans **Acierno et al. (2003)**, dans lesquelles des bouteilles de sol humide ont été irradiées pour favoriser l'évaporation de l'humidité à des fins de décontamination. Une équation transitoire du bilan énergétique 1D a été couplée au bilan massique pour tenir compte des pertes d'eau et d'énergie ; le champ électromagnétique a été modélisé par la désintégration exponentielle de Lambert-Beer; la dépendance des propriétés diélectriques à l'humidité a été prise en compte par une équation semi-empirique, et il s'est avéré être un aspect très important du processus. Comparaison entre les profils simulés de température et de teneur en humidité résiduelle et les données expérimentales ont été jugées satisfaisantes. Ces résultats ont été utilisés dans d'autres études pour construire un prototype ouvert d'applicateur de micro-onde et pour développer des protocoles de travail d'irradiation (**Acierno et al., 2004b**)

### **III.3. Optimisation de séchage par modèles mathématiques des ombellifères :**

- **Etude 1 : Optimisation de séchage par modèles mathématiques des tranches de carottes.**

Etude expérimental fait par Hosain Darvishi, Ahmad Banakar et Mohammad Zarein, de l'Université islamique Azad, Téhéran, Iran. L'année 2012, Sur le thème : (modélisation

mathématique et cinétique de séchage des couches minces des tranches de carotte). Éditeur : Global Journals Inc. (États-Unis).

**a. Matière végétale :**

Des échantillons de carottes ont été obtenus auprès du marché local des légumes de Téhéran, en Iran.

**b. Protocole :**

Les caractéristiques de séchage en couche mince des tranches de carotte ont été étudiés sous quatre puissances des micro-ondes ; 200, 300, 400 et 500 W et l'épaisseur de coupe de 2,5 mm. Les données expérimentales ont été analysées pour obtenir des valeurs de diffusivité à partir de la période de chute du taux de séchage. Quatre modèles mathématiques ont été étudiés pour décrire le comportement de séchage en couche mince de la carotte : **Page (1949)**-Page ; **Yagcioglu et al. (1999)**-Logarithmique ; **Midilli et al. (2002)**-**Wang et Singh (1978)**-Wang and Singh.

Le temps de séchage total pour atteindre la teneur en humidité finale de l'échantillon de carotte était de 19.5, 15.5, 10.5 et 7 minutes à 200, 300, 400 et 500 W, respectivement. Évidemment, dans une certaine plage de puissance de micro-onde (200-500W dans cette étude), l'augmentation de la puissance de sortie accélère le processus de séchage, réduisant ainsi le temps de séchage (jusqu'à 61%).

Le meilleur modèle décrivant les caractéristiques de séchage en couche mince des tranches de carotte a été choisi comme étant celui ayant les valeurs  $R^2$  les plus élevées et les valeurs  $x^2$  et RMSE les plus faibles.

. Les estimations des paramètres statistiques ont montrés que les valeurs  $R^2$ ,  $x^2$  et RMSE variaient de 0.9900 à 0.9999, 0.00001 à 0.10269 et 0.00072 à 0.29833, respectivement.

Les résultats montrent que **Midilli et al, (2002)** est le modèle le plus approprié pour le comportement de séchage des tranches de carotte en couche mince. De tous les modèles testés, le modèle Midilli donne la valeur la plus élevée de  $R^2$  et les valeurs les plus faibles de  $x^2$  et de RMSE. Il a été déterminé que la valeur de la constante de vitesse de séchage (k) augmentait avec l'augmentation des puissances de micro-onde. Ceci implique qu'avec l'augmentation de la courbe de séchage de puissance de micro-onde devient plus forte indiquant l'augmentation du taux de séchage.

➤ **Etude 2 : Optimisation de séchage par modèles mathématiques de persil.**

Etude expérimental fait par Y. Soysal<sup>1</sup>; S. Ö ztekin<sup>2</sup>; Ö. Eren<sup>1</sup>, de l'Université Mustafa Kemal, Turquie. L'année 2006, Sur le thème : (séchage par micro-ondes du persil : modélisation, cinétique et aspects énergétiques). Publié par Elsevier Ltd. (Reçu le 23 mars 2005 ; accepté sous forme révisée le 27 janvier 2006).

**a. Matière végétale :**

Des Feuilles de persil vert frais (*Petroselinum crispum Mill.*) ont été obtenues à partir d'un producteur dans la région de Hatay en Turquie.

**b. Protocole :**

Les feuilles de persil (*Petroselinum crispum Mill.*) ont été séchées dans un four à micro-onde domestique de 900W à 2450MHz .La puissance du four à micro-onde a été réglée sur cyclique chauffage avec un taux de 50 %. Cela a fourni un chauffage pendant une période de 9s, suivi d'une pause de 9s.

Six charges de matériaux différentes (128,57 ; 112,40 ; 99,90 ; 90,10 ; 75,13 et 64,30 g) ont été étudiés dans des expériences de séchage au cycle de puissance micro-ondes de 9s /9 s à 900 W.

Le séchage a eu lieu principalement dans des périodes de vitesse constante et de taux de chute. Une période de vitesse constante relativement longue a été observée après une période.

Onze modèles mathématiques ont été étudiés pour décrire le comportement de séchage des feuilles de persil. O'Callaghan *et al.* (1971)-Nowten, Page (1949)-Page, Henderson et Pabis (1961)-Henderson et Pabis ,Yagcioglu *et al.* (1999)-Logarithmique, Midilli *et al.* (2002)-Midilli *et al.* ,Wang and Singh (1978)-Wang and Singh, Chandra and Singh (1995)-Logistic, Henderson (1974)-Two-term, Verma *et al.* (1985)-Verma *et al.*, Sharaf-Elden *et al.* (1980)-Two-term et exponential ,Yaldiz et Ertekin (2001)-Diffusion et approximation.

Les feuilles de persil (*Petroselinum crispum Mill.*) ont été séchées dans un four à micro-onde domestique de 900W 2450MHz pour évaluer les effets de la charge de matériau sur le temps de séchage, le taux de séchage, l'efficacité du séchage et la consommation d'énergie spécifique.

La phase initiale de chauffage pendant les premières minutes du processus de séchage conduit à une efficacité de séchage plus faible. Au cours des dernières étapes du processus

de séchage, l'efficacité du séchage a considérablement diminué pour atteindre une valeur aussi faible que 8 %.

Parmi les 11 modèles mathématiques testés pour s'adapter aux taux de séchage des feuilles de persil, Le modèle de **Midilli et al.**, dont le taux de mortalité est logarithmique et la fonction linéaire du temps a donné le meilleur ajustement pour tous les points des données expérimentales avec des valeurs d'efficacité de modélisation supérieures à 0,9974 et l'erreur quadratique moyenne carrée inférieure à 0,0179.

➤ **Etude 3 : Optimisation de séchage par modèles mathématiques de la coriandre**

Étude expérimentale fait par Ayse Sarimeseli, de l'Université Inonu, 44069 Malatya, Turquie. L'année 2010, sur le thème : (Caractéristiques de séchage à la micro-onde des feuilles de coriandre (*Coriandrum sativum L.*)). Éditeur : elsevier journal.

Historique de l'article : (Reçu le 28 janvier 2010 ; Accepté le 3 octobre 2010 ; Disponible en ligne le 3 novembre 2010).

Des feuilles fraîches de coriandre (*C. sativum L.*) ont été obtenues dans le champ d'un agriculteur à Malatya, en Turquie.

**a. Protocole :**

L'effet de la puissance des micro-ondes sur la diffusion efficace de l'humidité, les paramètres de couleur et les caractéristiques de réhydratation des feuilles de coriandre (*Coriandrum sativum L.*) ont été étudiés à l'aide d'un sécheur à micro-ondes.

Les échantillons ont été lavés et entreposés à 4 °C avant les expériences. Afin de déterminer la teneur initiale en eau des feuilles, celles-ci ont été séparées des tiges et séchées dans un four à 105 °C pendant 24 h et une valeur moyenne de 4,88 g d'eau/g de base sèche ont été trouvés.

Pour réaliser les expériences de séchage, 25 g de feuilles ont été pesées. Cinq sorties de puissances des micro-ondes différentes, 180, 360, 540, 720 et 900 W, ont été utilisées pour sécher les échantillons et trois répétitions ont été effectuées à chacune de ces sorties de puissance.

Chaque procédé de séchage a été appliqué jusqu'à ce que le taux d'humidité initial soit réduit à 0,1 g eau /g base sèche.

Les mesures de la couleur des échantillons séchés ont été déterminées avec un colorimètre. La capacité de réhydratation (RC) des feuilles séchées à différentes puissances a été réalisée en prenant 5 g de feuilles déshydratées et les plonger dans l'eau bouillante pendant 2 min. Après avoir les échantillons réhydratés sur un tamis, les calculs ont été prénaient pour chaque échantillon.

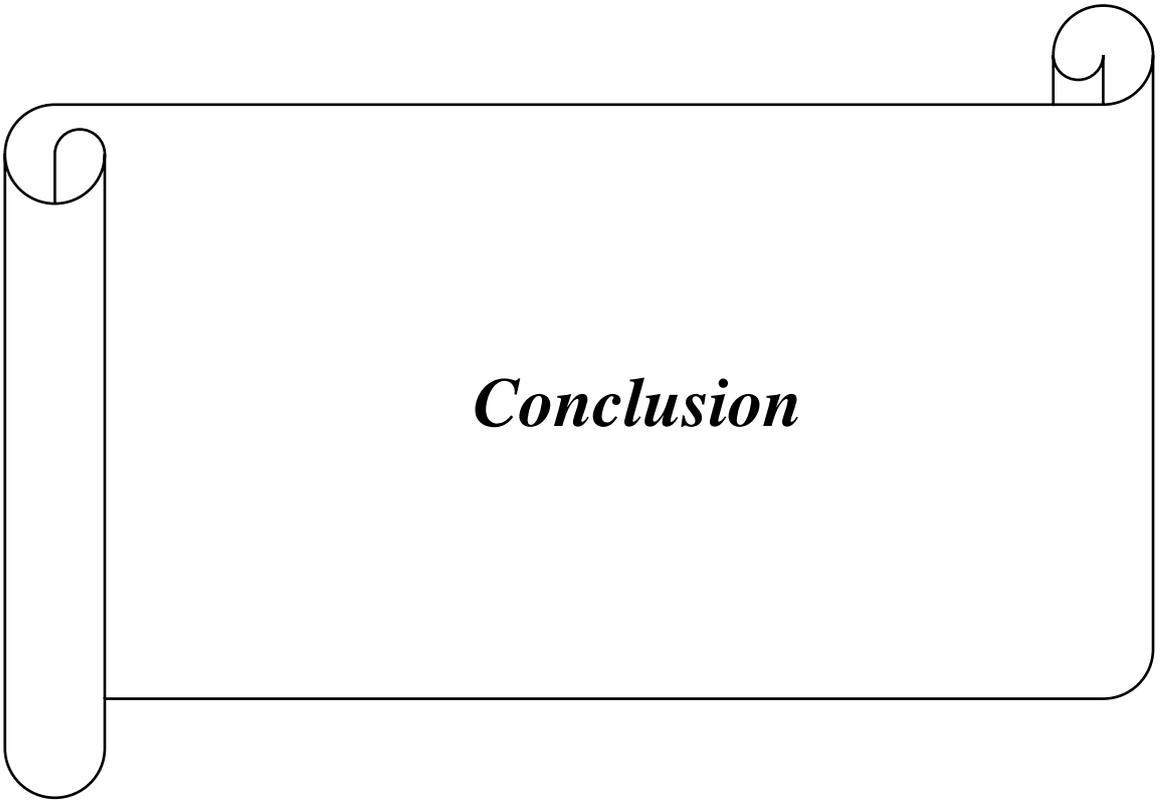
La teneur en humidité des feuilles de coriandre à chaque entrée de puissance a été réduite de 4,88 à 0,1 base sèche. Il a été constaté que la teneur en humidité est affectée par l'entrée de puissance de micro-onde et le temps de séchage des feuilles a été considérablement réduit de 14 à 4 min que l'entrée de puissance a augmenté, l'augmentation de la puissance de sortie a entraîné une réduction des temps de séchage jusqu'à 35%. Les taux de séchage ont été déterminés à partir de la quantité d'eau par unité de temps et par unité de base sèche.

Étant donné que la couleur du produit séché final est une propriété très importante, les feuilles de coriandre séchées devraient avoir des couleurs vertes vifs des échantillons frais.

**b. Les résultats :**

Dans la gamme des valeurs de puissance de micro-onde, 180-360 W, les diffusivités efficaces d'humidité ont été trouvées pour être  $6.3 \times 10^{-11}$  et  $2.19 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s et le résultat a pu être présenté avec succès avec le modèle sug-gested par Midilli et *al.*

Aucune différence significative dans les paramètres de couleur n'a été obtenue entre les échantillons frais et séchés et les changements dans leurs valeurs n'étaient pas dépendants des sorties de puissance du sécheur à micro-ondes.



***Conclusion***

### Conclusion

Le séchage par micro-ondes est une technique économique et rapide par rapport au séchage conventionnel (à l'air libre).

Le présent travail a été réalisé sur l'étude théorique de l'optimisation de séchage par modèles mathématiques des ombellifères, l'objectif est de déterminer le modèle mathématique qui décrit la variation du taux d'humidité en fonction du temps, pour évaluer les effets de la charge de matériau sur le temps de séchage, le taux de séchage, l'efficacité du séchage, la consommation d'énergie spécifique, et pour obtenir des valeurs de diffusivité à partir de la période de chute du taux de séchage. Ainsi que les Paramètres de couleur et les paramètres de réhydratation des feuilles séchées ont également été étudiées.

Les résultats de la cinétique de séchage montrent que le séchage par four à micro-onde accélère le séchage et réduit significativement le temps ce dernier.

D'autre part, parmi les onze modèles mathématiques testés, le modèle **Midilli et al.** est le modèle le plus approprié pour le comportement de séchage des ombellifères

En perspectives, ce travail peut être accompli par :

- L'optimisation de la cinétique de séchage par les plans d'expériences afin d'avoir une meilleure teneur en humidité.
- L'investigation des mécanismes antioxydants tel que le pouvoir réducteur et le pouvoir chélateur des métaux.
- L'optimisation de l'extraction par micro-ondes ainsi par les plans d'expériences (Méthode Surface de Réponse).
- séchage par four à micro-onde combiné avec un système de ventilation.

### A

- Abbasi, S., & Azari, S. (2009). Novel microwave–freeze drying of onion slices. *International journal of food science & technology*, 44(5), 974-979.
- Abouo, V. N., Sadat, A. W., Akmel, C. D., Assidjo, E. N., & Amani, G. N. (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.
- Acierno, D., Barba, A. A., & d'Amore, M. (2004). Heat transfer phenomena during processing materials with microwave energy. *Heat and Mass Transfer*, 40(5), 413-420.
- Acierno, D., Barba, A. A., & d'Amore, M. (2003). Microwaves in soil remediation from VOCs. 1: Heat and mass transfer aspects. *AIChE journal*, 49(7), 1909-1921.
- Acierno, D., Barba, A. A., d'Amore, M., Pinto, I. M., & Fiumara, V. (2004). Microwaves in soil remediation from VOCs. 2. Buildup of a dedicated device. *AIChE journal*, 50(3), 722-732.
- Albanese, D., Cinquanta, L., Russo, L., Crescitelli, S., Farina, M., Brasiello, A., & Di Matteo, M. (2006). Modelling convective and microwave drying of potatoes slices. *IUFoST*, 795-796.
- Al-Duri, B., & McIntyre, S. (1992). Comparison of drying kinetics of foods using a fan-assisted convection oven, a microwave oven and a combined microwave/convection oven. *Journal of Food Engineering*, 15(2), 139-155.
- Alibas, I. (2007). Microwave, air and combined microwave–air-drying parameters of pumpkin slices. *LWT-food science and technology*, 40(8), 1445-1451.
- Alibas, I. (2014). Mathematical modeling of microwave dried celery leaves and determination of the effective moisture diffusivities and activation energy. *Food Science and Technology*, 34(2), 394-401.
- ALLAF, K., MOUNIR, S., & ALLAF, T. (2012). Swell-drying: séchage et texturation par DIC des végétaux.
- An, K., Zhao, D., Wang, Z., Wu, J., Xu, Y., & Xiao, G. (2016). Comparison of different drying methods on Chinese ginger (*Zingiber officinale* Roscoe): Changes in volatiles,

chemical profile, antioxidant properties, and microstructure. *Food Chemistry*, 197, 1292-1300.

### B

- Bajpai, M., Pande, A., Tewari, S. K., & Prakash, D. (2005). Phenolic contents and antioxidant activity of some food and medicinal plants. *International journal of food sciences and nutrition*, 56(4), 287-291.
- Barba, A. A. (2005). Thermal treatments of foods: a predictive general-purpose code for heat and mass transfer. *Heat and mass transfer*, 41(7), 625-631.
- Barros, L., Duenas, M., Dias, M. I., Sousa, M. J., Santos-Buelga, C., & Ferreira, I. C. (2012). Phenolic profiles of in vivo and in vitro grown *Coriandrum sativum* L. *Food Chemistry*, 132(2), 841-848.
- Başlar, M., Kılıçlı, M., Toker, O. S., Sağdıç, O., & Arici, M. (2014). Ultrasonic vacuum drying technique as a novel process for shortening the drying period for beef and chicken meats. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 26, 182-190.
- Blade, S., & Spencer, R. (2016). *Coriander*. Alberta Agriculture and Forestry.
- Boizot, N., & Charpentier, J. P. (2006). Méthode rapide d'évaluation du contenu en composés phénoliques des organes d'un arbre forestier. *Cahier des Techniques de l'INRA*, 79-82.
- BONAZZI, C., & BIMBENET, J. J. (2003). Séchage des produits alimentaires principes. *Techniques de l'ingénieur. Agroalimentaire*, 2(F3000), F3000-1.
- Bonazzi, C., & Bimbenet, J. J. (2008). Séchage des produits alimentaires : Appareils et applications. *Techniques de l'ingénieur. Agroalimentaire*, 2(F3002).
- Bonikowski, R., Celiński, K., Wojnicka-Półtorak, A., & Maliński, T. (2015). Composition of Essential Oils Isolated from the Needles of *Pinus uncinata* and *P. uliginosa* Grown in Poland. *Natural Product Communications*, 10(2), 1934578X1501000243.
- boutriche, S. (2017). recherche du pouvoir phyto-remédiateur de la plante *coriandrum sativum* L. au plomb et l'impact de l'extrait de plante sur des rats intoxiqués au plomb, Université AHMED BEN BELLA
- Bruneton, J. (1993). Pharmacognosie : phytochimie plantes médicinales (No. 581.634 B7).

## Références bibliographiques

---

- Bruneton, J. (2009). Pharmacognosie, phytochimie, plantes médicinales (4e éd.). Tec & Doc/Lavoisier, Paris, 279-281.
- Bruneton, J. « Pharmacognosie », Plantes médicinales, Ed. Lavoisier, Techniques et Documentation, Paris 1999, 405; b) Da Cruz-Cabral, L.; Fernandez-Pinto, V.; Patriarca, A. Int J Food Microbiol. 2013, 166, 1-14.
- Buffler, C. R. (1993). Engineering Fundamentals for the Food Scientist. Van Nostrand Reinhold, New York, 4, 157-159.

### C

- Calvache, J. E. N., Fissore, E. N., Latorre, M. E., Soria, M., Pla, M. F. D. E., & Gerschenson, L. N. (2015). Obtention of dietary fibre enriched fractions from peach bagasse using ethanol pre-treatment and microwave drying. *LWT-Food Science and Technology*, 62(2), 1169-1176.
- Caroline Trudeau, Dt.P. ; Louise Corneau, Dt.P., M.Sc. ; Iris Gignoux, Dt.P., M.Sc., (2006). Nutritionniste, Institut des nutraceutiques et des aliments fonctionnels (INAF), Université Laval.
- Casetti-Dinescu, D. I., Vieira, K., Girard, T. M., & van Altena, W. F. (2012). CONSTRAINTS ON THE MAGELLANIC CLOUDS' INTERACTION FROM THE DISTRIBUTION OF OB STARS AND THE KINEMATICS OF GIANTS. *The Astrophysical Journal*, 753(2), 123.
- Ceska, O., Chaudhary, S. K., Warrington, P., Ashwood-Smith, M. J., Bushnell, G. W., & Poulton, G. A. (1988). Coriandrin, a novel highly photoactive compound isolated from *Coriandrum sativum*. *Phytochemistry*, 27(7), 2083-2087.
- Chandra P K; Singh R P (1995). Applied Numerical Methods for Food and Agricultural Engineers. CRC Press, Boca Raton, FL pp. 163–167.
- Chandrasekaran, S., S. Ramanathan, et al. (2013). "Microwave food processing—A review." *Food Research International* 52(1): 243-261.
- Chemkhi, S., Zagrouba, F., & Bellagi, A. (2005). Modelling and simulation of drying phenomena with rheological behaviour. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 22(2), 153-163.

## Références bibliographiques

---

- Cherng, J. M., Chiang, W., & Chiang, L. C. (2008). Immunomodulatory activities of common vegetables and spices of Umbelliferae and its related coumarins and flavonoids. *Food chemistry*, 106(3), 944-950.
- Chithra, V., & Leelamma, S. (2000). Coriandrum sativum—effect on lipid metabolism in 1, 2-dimethyl hydrazine induced colon cancer. *Journal of Ethnopharmacology*, 71(3), 457-463.
- Chkir, I., Balti, M. A., Ayed, L., Azzouz, S., Kechaou, N., & Hamdi, M. (2015). Effects of air-drying properties on drying kinetics and stability of cactus/brewer's grains mixture fermented with lactic acid bacteria. *Food and bioproducts processing*, 94, 10-19.
- Clémentine, P., 2013. Rôle du stress oxydant au niveau hépatique et rénal dans la toxicité de l'uranium après exposition chronique. Thèse De Doctorat Université Paris-Sud 11. France. «Faculté De Pharmacie De Chatenay-Malabry» .127- 460 p.
- Copson, D. A. (1975). *Microwave Heating*, AVI Publication Comp. Inc.: Westport, Connecticut.

### D

- Dadali, G., & Özbek, B. (2008). Microwave heat treatment of leek: drying kinetic and effective moisture diffusivity. *International journal of food science & technology*, 43(8), 1443-1451.
- Dadalı, G., Apar, D. K., & Özbek, B. (2007). Estimation of effective moisture diffusivity of okra for microwave drying. *Drying technology*, 25(9), 1445-1450.
- Datta, V. R. A. K. (2008). Coupled Electromagnetics-Multiphase Porous Media Model for Microwave Combination Heating.
- Dincer, I., & Dost, S. (1995). An analytical model for moisture diffusion in solid objects during drying. *Drying Technology*, 13(1-2), 425-435.
- Ding, S. H., An, K. J., Zhao, C. P., Li, Y., Guo, Y. H., & Wang, Z. F. (2012). Effect of drying methods on volatiles of Chinese ginger (*Zingiber officinale* Roscoe). *Food and Bioproducts Processing*, 90(3), 515-524.
- Divya, P., Puthusseri, B., & Neelwarne, B. (2012). Carotenoid content, its stability during drying and the antioxidant activity of commercial coriander (*Coriandrum sativum* L.) varieties. *Food Research International*, 45(1), 342-350.

## *Références bibliographiques*

---

- Djerroud, D. (2010). Modélisation markovienne du séchage continu par contact avec agitation (Doctoral dissertation).

### **E**

- ElHana A.N.H. (2008). Microwave drying of apple. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, 25: 980–1003.
- Emamghoreishi, M., Khasaki, M., & Aazam, M. F. (2005). Coriandrum sativum: evaluation of its anxiolytic effect in the elevated plus-maze. *Journal of ethnopharmacology*, 96(3), 365-370.
- Emerenciano V.P., Barbosa K.O., Scotti M., Ferrero M.J.P. (2007). Self organising maps in chemotaxonomic studies of Asteraceae : a classification of tribes using flavonoid data journal of Brazilian chemical society. 18 (5) : 891-899.
- Erdem T. (2006). Drying by microwave energy of washed red pepper by ozonated water. [MSc. Thesis.] University of Çukurova, Turkey. (In Turkish).
- Ertekin, C. and O. Yaldiz (2004). "Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model." *Journal of Food Engineering* 63(3): 349-359.
- Esfahani, J. A., S. M. Vahidhosseini, et al. (2015). "Three-dimensional analytical solution for transport problem during convection drying using Green's function method (GFM)." *Applied Thermal Engineering* 85(0): 264-277.
- Eskilsson, C.S., Bjorklund, E. (2000).Analytical-scale microwave-assisted extraction. *Journal of Chromatography A*, 902: 227–250.
- Evin D. (2011).Investigation on the drying kinetics of sliced and whole rosehips at different moisture contents under microwave treatment. *Scientific Research and Essays*, 6:2337–2347.

### **F**

- Filliat, P. (2012). Les plantes de la famille des Apiacées dans les troubles digestifs. *Doctoral paper university Joseph Fourier Grenoble*, 139p.
- Fito, P., Chiralt, A., & Martin, M. E. (2005). Current state of microwave applications to food processing. *Novel food processing technologies*.

## Références bibliographiques

---

- Freng, H. et Tang, J. (1998). Microwave Finish Drying of Diced Apples in a Spouted Bed. *Journal of food science*. 63(4): 679-683.
- Funebo, T., & Ohlsson, T. (1998). Microwave-assisted air dehydration of apple and mushroom. *Journal of Food Engineering*, 38(3), 353-367.

### G

- Ghedira, K. (2005). Les flavonoïdes : structure, propriétés biologiques, rôle prophylactique et emplois en thérapeutique. *Phytothérapie*, 3(4), 162-169.
- Ghedira, K., & Goetz, P. (2015). *Coriandrum sativum* L.(Apiaceae): Coriandre. *Phytothérapie*, 13(2), 130-134.
- Gowen, A. A., Abu-Ghannam, N., Frias, J., & Oliveira, J. (2008). Modeling dehydration and rehydration of cooked soybeans subjected to combined microwave–hot-air drying. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 9(1), 129-137.

### H

- Henderson S M (1974). Progress in developing the thin-layer drying equation. *Transactions of the ASAE*, 17, 1167–1168/1172.
- Henderson S M; Pabis S (1961). Grain drying theory I: temperature effect on drying coefficient. *Journal of Agricultural Research Engineering*, 6, 169–174.
- Huang, J., Zhang, M., Adhikari, B., & Yang, Z. (2016). Effect of microwave air spouted drying arranged in two and three-stages on the drying uniformity and quality of dehydrated carrot cubes. *Journal of Food Engineering*, 177, 80-89.

### I

- Inchuen, S., Narkrugs, W., Pornchaloempong, P. (2010). Effect of drying methods on chemical composition, color and antioxidant properties of Thai red curry powder. *Kasetsart J. (Nat. Sci.)* 44, 142–151.
- Işık, E., İzli N., Bayram, G., Turgut, I. (2011). Drying kinetic and physical properties of green lard lentil (*Lens culinaris*) in microwave drying. *African Journal of Biotechnology*, 10: 3841–3848.

### J

- Jelled A., Fernandes A., Barros L., Chahdoura H., Achour L., Ferreira I.C.F.R. et Ben Cheikha H., 2015, Chemical and antioxidant parameters of dried forms of ginger rhizomes, *Industrial crops and products*, 77, 30–35

### K

- Kansal, L. E., Sharma, A. R., & Lodi, H. (2012). Remedial effect of coriandrum sativum (coriander) extracts on lead induced oxidative damage in soft tissues of swiss albino mice. *Int J Pharm Pharm Sci*, 4, 729-736.
- Karaali, A., Boyacioğlu, D., Güneş, G., & Özçelik, B. (2004). Flavonoids in fruit and vegetables: their impact on food quality, nutrition and health–STREP or CA. *European commission's the 6th framework programme for research. Istanbul technical university. Turkey.*
- Karim, M.A., Hawlader, M., 2005. Drying characteristics of banana: theoretical modelling and experimental validation. *Journal of Food Engineering* 70, 35–45.
- Kassem, A.S., Shokr, A.Z., El-Mahdy, A.R., Aboukarima, A.M., Hamed, E.Y.(2011). Comparison of drying characteristics of Thompson seedless grapes using combined microwave oven and hot air drying. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 10: 33–40.
- Kavak Akpinar, E., Y. Bicer, et al. (2006). "Modelling of thin layer drying of parsley leaves in a convective dryer and under open sun." *Journal of Food Engineering* 75(3): 308-315.
- Kavak Akpinar, E., Y. Bicer, et al. (2006). "Modelling of thin layer drying of parsley leaves in a convective dryer and under open sun." *Journal of Food Engineering* 75(3): 308-315.
- Kerdudo, A. (2014). *Optimisation de la conservation des cosmétiques : impact de la formulation, recherche de nouveaux conservateurs naturels, encapsulation* (Doctoral dissertation).
- Khare, C. P. (2008). *Indian medicinal plants: an illustrated dictionary*. Springer Science & Business Media.
- Kharisov, B. I., Kharissova, O. V., & Méndez, U. O. (2012). Microwave hydrothermal and solvothermal processing of materials and compounds. *The Development and Application of Microwave Heating*, 5, 107-140.

## *Références bibliographiques*

---

- King, A. M. Y., & Young, G. (1999). Characteristics and occurrence of phenolic phytochemicals. *Journal of the American Dietetic Association*, 99(2), 213-218.
- Koné, K. Y., Druon, C., Gnimpieba, E. Z., Delmotte, M., Duquenoy, A., & Laguerre, J. C. (2013). Power density control in microwave assisted air-drying to improve quality of food. *Journal of Food Engineering*, 119(4), 750-757.
- Kubo, M., Sakio, H., Shimano, K., Ohno, K., (2004). Factors influencing seedling emergence and survival in *Cercidiphyllum japonicum*. *Folia Geobotanica* 39, 225-234.
- Kumaran, A., & Karunakaran, R. J. (2007). In vitro antioxidant activities of methanol extracts of five *Phyllanthus* species from India. *LWT-Food Science and Technology*, 40(2), 344-352.

### **L**

- Lahmari N, Fahloul D et Azani I. (2012). Influence des méthodes de séchage sur la qualité des tomates séchées (variété Zahra), *Revue des Energies Renouvelables*. 15(2) :285 – 295.
- Le, T. Q. and W. Jittanit (2015). "Optimization of operating process parameters for instant brown rice production with microwave-followed by convective hot air drying." *Journal of Stored Products Research* 61(0): 1-8.
- Li, Z. ; Raghavan, G. et Orsat, V. (2010). Temperature and power control in microwave drying. *Journal of food Engineering*. 97(4): 478-483.
- Liamkaew, R., Thipayarat, A., & Koetsinchai, W. (2008, January). Kinetics model of vacuum microwave drying of dried pumpkin slices. In *2nd Technology and Innovation for Sustainable Development Conference* (pp. 28-29).
- LUGASI A., HOVARI J., SAGIK. And BIRO L., 2003 - The role of antioxidant phytonutrients in the prevention of diseases. *J.Acta.biologica. szegediensis*. 47 (1-4):119-125

### **M**

- Mahendra, P., & Bisht, S. (2011). Anti-anxiety activity of *Coriandrum sativum* assessed using different experimental anxiety models. *Indian journal of pharmacology*, 43(5), 574.
- Mandal, V., Mohan, Y., & Hemalatha, S. (2007). Microwave assisted extraction—an innovative and promising extraction tool for medicinal plant research. *Pharmacognosy reviews*, 1(1), 7-18.

## Références bibliographiques

---

- Maskan, M. (2000). Microwave/air and microwave finish drying of banana. *Journal of Food Engineering*, 44(2): 71-78.
- Matasyoh, J. C., Maiyo, Z. C., Ngure, R. M., & Chepkorir, R. (2009). Chemical composition and antimicrobial activity of the essential oil of *Coriandrum sativum*. *Food Chemistry*, 113(2), 526-529.
- Mathavi, V., Sujatha, G., Ramya, S. B., & Devi, B. K. (2013). New trends in food processing. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, 5(2), 176.
- McMinn, W., Khraisheh, M., Magee, T., 2003. Modelling the mass transfer during convective, microwave and combined microwave-convective drying of solid slabs and cylinders. *Food Research International* 36, 977–983.
- McSweeney, M., Seetharaman, K., 2015. State of Polyphenols in the Drying Process of Fruits and Vegetables. *Critical reviews in food science and nutrition* 55, 660-669.
- Mechlouch, R. F., Mahdhaoui, B., Elfalleh, W., Mahjoubi, A., & Brahim, A. B. (2014). Mathematical modeling of microwave drying of beans (*Vicia faba* L.), Peas (*Pisum sativum*) and Tomatoes (*Solanum esculentum*) in thin layer. *International Journal of Energy Engineering*, 4(2A), 25-32.
- Melo EA, Bion IM, Filho JM, Guerra NB. (2003). In vivo antioxidant effect of aqueous and etheric coriander (*Coriandrum sativum* L.) extracts. *Eur J Lip Sci Technol* 105: 483–487.
- Mhemdi H, Rodier E, Kechaou N, Fages J (2011). A supercritical tuneable process for the selective extraction of fats and essential oil from coriander seeds. *J. Food Engg.* 105(4):609-616.
- Midilli A; Kucuk H; Yapar Z (2002). A new model for singlelayer drying. *Drying Technology*, 20(7), 1503–1513.
- Migliori, M., Gabriele, D., de Cindio, B., Pollini, C.M., 2005. Modelling of high quality pasta drying mathematical model and validation. *Journal of Food Engineering* 69, 387–397.
- Miller, W. M., & Braddock, R. J. (1982). Microwave drying of citrus peel [Cattle feed, energy utilization]. In *Proceedings of the... annual meeting-Florida State Horticultural Society (USA)*.
- MOKRANE, S. (2019). Effet du séchage au micro-onde et à l'étuve sur la composition et l'activité antibactérienne du gingembre (*Zingiber officinale*).

## *Références bibliographiques*

---

- Momin, A. H., Acharya, S. S., & Gajjar, A. V. (2012). Coriandrum sativum-review of advances in phytopharmacology. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 3(5), 1233.
- Monteiro, R. L., Carciofi, B. A., & Laurindo, J. B. (2016). A microwave multi-flash drying process for producing crispy bananas. *Journal of Food Engineering*, 178, 1-11.
- Moss, J. R. and L. Otten (1989). "A Relationship between Colour Development and Moisture Content during Roasting of Peanuts." *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal* 22(1): 34-39.
- Mountian, I., Baba-Aïssa, F., Jonas, J. C., De Smedt, H., Wuytack, F., & Parys, J. B. (2001). Expression of Ca<sup>2+</sup> transport genes in platelets and endothelial cells in hypertension. *Hypertension*, 37(1), 135-141.
- Mujumdar, A. S. (2014). 15 Impingement Drying. *Handbook of Industrial Drying*, 371.

### **N**

- Naouel, O. (2015). Etude chimique et biologique des huiles essentielles de coriandre, de fenouil et de persil, Université AHMED BEN BELLA.
- Nowacka, M., A. Wiktor, et al. (2012). "Drying of ultrasound pretreated apple and its selected physical properties." *Journal of Food Engineering* 113(3): 427-433.

### **O**

- O'Callaghan J R; Menzies D J; Bailey P H (1971). Digital simulation of agricultural dryer performance. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 16, 223–244.
- Oganessian, N., Ankoudinova, I., Kim, S. H., & Kim, R. (2007). Effect of osmotic stress and heat shock in recombinant protein overexpression and crystallization. *Protein expression and purification*, 52(2), 280-285.
- Özbek, B., & Dadali, G. (2007). Thin-layer drying characteristics and modelling of mint leaves undergoing microwave treatment. *Journal of Food Engineering*, 83(4), 541-549.

### **P**

- Page, G (1949). Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers. MSc Thesis, Purdue University, Indiana, USA.

## Références bibliographiques

---

- Pathak Nimish, L., Kasture Sanjay, B., Bhatt Nayna, M., & Rathod Jaimik, D. (2011). Phytopharmacological properties of Coriander sativum as a potential medicinal tree: an overview. *J Appl Pharm Sci*, 1(4), 20-5.
- Pathare, P. B. and G. P. Sharma (2006). "Effective Moisture Diffusivity of Onion Slices undergoing Infrared Convective Drying." *Biosystems Engineering* 93(3): 285-291.

### R

- Renshaw, R., 2009. Multiphysics Modelling of Food Dehydration during RF Exposure. Comsol Conference, Milan.
- ROUSSY, G., ROCHAS, J. F., & OBERLIN, C. (2003). Chauffage diélectrique: Technologies. *Techniques de l'ingénieur. Génie électrique*, 12(D5941), D5941-1.

### S

- Sahib, NG, Anwar, F., Gilan,i AH, Hamid, AA., Saari, A., Alkharfy, KM. (2013). Coriander (Coriandrum sativum L.) : A potential source of high-value components for functional foods and nutraceuticals- A Review. *Phytoterapy Research*, 27 1439-1456.
- Sallam, Y. I., M. H. Aly, et al. (2015). "Solar drying of whole mint plant under natural and forced convection." *Journal of Advanced Research* 6(2): 171-178.
- Samoticha, J., Wojdyło, A., & Lech, K. (2016). The influence of different the drying methods on chemical composition and antioxidant activity in chokeberries. *LWT-Food Science and Technology*, 66, 484-489.
- Santé canada, 2010. << Fichier canadien sur les éléments nutritif (<http://webprod3.hc-sc.gc.ca/cnf-start-debuter>>>, consulté le 15 juillet 2011.
- Sarimeseli A. (2011).Microwave drying characteristics of coriander (Coriandrum satiyum L.) leaves. *Energy. Conversion & Management*, 52: 1449–1453.
- Sharaf-Elden Y I; Blaisdell J L; Hamdy M Y (1980). A model for ear corn drying. *Transactions of the ASAE*, 5, 1261–1265.
- Sharma, G. P. and S. Prasad (2004). "Effective moisture diffusivity of garlic cloves undergoing microwave-convective drying." *Journal of Food Engineering* 65(4): 609-617.
- Shaw, M., Meda, V., Tabil Jr, L., & Opoku Jr, A. (2006). Drying and color characteristics of coriander foliage using convective thin-layer and microwave drying. *Journal of microwave power and electromagnetic energy*, 41(2), 56-65.

## Références bibliographiques

---

- Silva, A. S., Almeida, F. D. A., Lima, E. E., Silva, F. L. H., & Gomes, J. P. (2008). Drying kinetics of coriander (*coriandrum sativum*) leaf and stem cinéticas de secado de hoja y tallo de cilantro (*Coriandrum sativum*). *CYTA-Journal of Food*, 6(1), 13-19.
- Singh, R. P., & Heldman, D. R. (2001). *Introduction to food engineering*. Gulf Professional Publishing.
- Sosa-Morales, M. E., Valerio-Junco, L., Lopez-Malo, A., & Garcia, H. S., (2010) Dielectric properties of foods: Reported data in the 21st Century and their potential Applications. *LWT - Food Science and Technology*, 43(8), 1169-1179.
- Soysal Y. (2004). Microwave drying characteristics of parsley. *Biosystems Engineering*, 89: 167–173.
- Soysal Y. (2005). Mathematical modeling and evaluation of microwave drying kinetics of mint (*Mentha spicata* L.). *Journal of Applied Sciences*, 5: 1266–1274.
- Soysal, Y., Öztekin, S., & Eren, Ö. (2006). Microwave drying of parsley: modelling, kinetics, and energy aspects. *Biosystems Engineering*, 93(4), 403-413.

### T

- Tapiero, H., Tew, K. D., Ba, G. N., & Mathe, G. (2002). Polyphenols: do they play a role in the prevention of human pathologies?. *Biomedicine & pharmacotherapy*, 56(4), 200-207.
- Tisserand R, Young R, Williamson EM (2014) Safety of Essential Oil, A Guide for Health Care Professionals, Churchill Livingstone Elsevier editor, Edinburgh London New York Oxford Philadelphia St Louis Sydney Toronto.
- Tulasidas T.N., Ratt C., Raghavan G.S.V. (1997). Modeling of microwave drying of grapes. *Canadian Agricultural Engineering*, 39: 57–67.

### V

- VASSEUR, J. 2009. Séchage : principes et calcul d'appareils-Séchage convectif par air chaud (partie 1).
- Veberic R., Colaric M. et Stampar F., 2008. Phenolic acids and flavonoids of fig fruit (*Ficus carica* L.) in the northern Mediterranean region. *Food Chemistry*.(106) : 153-157.
- Verma L R; Bucklin R A; Endan J B; Wratten F T (1985). Effects of drying air parameters on rice drying models. *Transactions of the ASAE*, 28, 296–301.

### W

- Wang C.Y; Singh R.P (1978). A single layer drying equation for rough rice. ASAE Paper No: 78-3001, ASAE, St. Joseph, MI.
- Wang, H.-c., M. Zhang, et al. (2015). "Drying of shiitake mushroom by combining freeze-drying and mid-infrared radiation." *Food and Bioproducts Processing* 94(0): 507-517.
- Wang, Z., Sun, J., Chen F., Liao, X., Hu X. (2007). Mathematical modeling on thin layer microwave drying of apple pomace with and without hot air pre-drying. *Journal Food Engineering*, 80: 536–544.
- Wangensteen, H., Samuelsen, A. B., & Malterud, K. E. (2004). Antioxidant activity in extracts from coriander. *Food chemistry*, 88(2), 293-297.
- Warning, A. D., J. M. R. Arquiza, et al. (2015). "A multiphase porous medium transport model with distributed sublimation front to simulate vacuum freeze drying." *Food and Bioproducts Processing* 94(0): 637-648.
- Wichtl, M., Anton, R., Bernard, M., & Czygan, F. C. (2003). *Plantes thérapeutiques : tradition, pratique officinale, science et thérapeutique*. Tec & Doc ; Ed. médicales internationales.
- Wollgast, J., & Anklam, E. (2000). Review on polyphenols in *Theobroma cacao*: changes in composition during the manufacture of chocolate and methodology for identification and quantification. *Food Research International*, 33(6), 423-447.
- Wong, P. Y., & Kitts, D. D. (2006). Studies on the dual antioxidant and antibacterial properties of parsley (*Petroselinum crispum*) and cilantro (*Coriandrum sativum*) extracts. *Food chemistry*, 97(3), 505-515.
- Worknech T.S., Raghavan V., Garipey Y. (2011). Microwave assisted hot air ventilation drying of tomato slices. In: *International Conference on Food Engineering and Biotechnology (ICFEB 2011)*: 150–161.
- Wray, D., Ramaswamy, H.S., 2015. Novel Concepts in Microwave Drying of Foods. *Drying Technology* 33, 769-783.

### Y

## *Références bibliographiques*

---

- Yagcioglu A; Degirmencioglu A; Cagatay F (1999). Drying characteristics of laurel leaves under different drying conditions. Proceedings of the 7th International Congress on Agricultural Mechanization and Energy in Agriculture, pp 565-569. Adana, Turkey, 26–27 May.
- Yaldız O; Ertekin C (2001). Thin layer solar drying of some different vegetables. *Drying Technology*, 19(3), 583–596.
- Yang, H., Sakai, N., Watanabe, M., 2001. Drying model with non-isotropic shrinkage deformation undergoing simultaneous heat and mass transfer. *Drying Technology* 19, 1441–1460.
- Yongsawatdigul, J. et Gunaskaran, S. (1996). MICROWAVE-VACUUM DRYING OF CRANBERRIES: PART II. QUALITY EVALUATION. *Journal of food processing and preservation*. 20(2): 145-156.

### **Z**

- Zarein, M., Samadi, S. H., & Ghobadian, B. (2015). Investigation of microwave dryer effect on energy efficiency during drying of apple slices. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 14(1), 41-47.
- Zhu, F. and G. Hummer (2012). "Drying Transition in the Hydrophobic Gate of the GLIC Channel Blocks Ion Conduction." *Biophysical Journal* 103(2): 219-227.
- Zhu, J.-F., J.-Z. Liu, et al. (2015). "Thin-layer drying characteristics and modeling of Ximeng lignite under microwave irradiation." *Fuel Processing Technology* 130(0): 62-70.
- Zidani, S. (2009). Influence des techniques de séchage sur la solubilité des protéines de la levure "*Saccharomyces cerevisiae*" produite dans un milieu à base de dattes, Université El Hadj Lakhdar.